

Читателю о журнале

Анализ современного состояния техники новых поколений и "критических" технологий в ряде наиболее развитых стран позволяет сделать заключение о том, что с начала 90-х годов наиболее динамично развивающейся является "технология микросистем" ("microsystems technology" -MST), определившая создание нового научно-технического направления – "микросистемной техники" ("microsystems engineering" – MSE).

Появление **микросистемной техники (МСТ)** ознаменовало революцию в области систем, реализуемых на микроуровне и обеспечивающих функционирование не только в условиях стационарного твердого тела, но и в случае, когда объект или часть объекта микросистемы или контактирующая с ним среда находятся во взаимной пространственно-временной динамике. Новым в этом понятии является привнесение современной технологии массового производства, свойственной микроэлектронике, в производство традиционных устройств и механизмов повышенной сложности, характерной для радиотехники, оптики, машиностроения, приборостроения и биомедицины. Это сочетание позволяет изготавливать уникальные многофункциональные устройства с микронными размерами и низкой стоимостью. **Развитие микросистемной техники для научно-технического прогресса может иметь такие же последствия, какие оказало появление микроэлектроники на становление и современное состояние ведущих областей науки и техники.**

Задачей журнала является освещение современного состояния, перспектив и тенденций развития микросистемной техники, рассмотрение вопросов разработки и внедрения микросистем в различные области науки, технологии и производства.

Систематизация основных проблем микросистемной техники проводится по нескольким направлениям.

Информационные технологии, конструирование и моделирование объектов МСТ – САПР объектов

МСТ, моделирование объектов МСТ и их производства с учетом эффекта масштабирования.

Материаловедческие и технологические основы МСТ – традиционные и перспективные материалы для объектов МСТ (материалы поверхностной и объемной микромеханики, адаптивные ("умные") материалы); специальные технологии МСТ (LIGA-технология, корпускулярно-лучевое микроформобразование, волоконная технология, нанотехнология, молекулярная электроника).

Элементная база МСТ – сенсоры и трансдюсеры физических величин, химических элементов, биологических материалов; исполнительные устройства (микромеханизмы, микроинструмент); источники энергии и движения (микродвигатели, микротурбины); авиа- и автоэлектронные компоненты.

Типы микросистем – микроэлектромеханические, микрооптомеханические и биотехнические микросистемы; биочипы; микросистемы энергообеспечения; технологические микросистемы; мини- и микроробототехнические системы.

Применение объектов МСТ – конструирование приборов и машин – макросистем на основе элементной базы МСТ; сборка макросистем на основе элементной базы МСТ; испытания, сертификация и эксплуатация макросистем, созданных на основе МСТ.

Информация – конференции, совещания, выставки, новости науки и техники, обзоры специальной литературы и т.п.

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

Журнал распространяется только по подписке.

Оформить подписку на второе полугодие 2000 года можно в отделениях связи (индекс по каталогу Роспечати 79493) или непосредственно в редакции (107076, Москва, Стромынский пер., 4; тел. 269-55-10) с указанием адреса получателя.

УДК 621,3.049.77:539.3

В.И. Волчихин, канд. техн. наук, проф.,
А.И. Воячек, канд. техн. наук, доц.,
В.В. Смогунов, д-р техн. наук, проф.,
 Пензенский государственный университет

МОДЕЛЬ ГЕТЕРОГЕННЫХ СТРУКТУР МИКРОСИСТЕМНОЙ ТЕХНИКИ

Рассмотрены принципы моделирования контактных систем микросистемной техники. Приведены методики расчета результатов исследований упругих и теплофизических характеристик контактных систем.

Микросистемы представляют собой сложные гетерогенные структуры, требующие сочетания совокупности разнородных материалов, которые должны надежно функционировать при динамическом и температурном воздействии, в условиях агрессивности сред и радиации [1]. Одной из важных гетерогенных структур является контактная система, определяющая взаимодействие деталей и фаз в микросистемной технике.

Контактную систему можно определить как совокупность взаимно сопряженных деталей (материалов), обладающую свойством целостности, возникающим вследствие связей контактного взаимодействия. Контактные системы в микросистемной технике можно разделить на две принципиально различные группы [2]:

- контактные системы, в которых взаимодействие деталей осуществляется через шероховатые поверхности;
- соединения разнородных материалов, когда один из материалов заполняет полностью или частично впадины шероховатой поверхности детали, изготовленной из другого материала (см. рисунок).

В настоящее время накоплен определенный материал для контактных систем первой группы по исследованию деформационных и теплофизических процессов, износостойкости, проводимости и т.д. Эти исследования в большинстве своем базируются на теории Герца о взаимодействии твердых тел. В то же время до сих пор не уделяется должного внимания контактным системам второй группы, хотя в некоторых микросистемах они составляют большинство. Непосредственное использование результатов, основанных на решении задачи Герца, недопустимо, так как в контактных системах второй группы гипотезы теории Герца не выполняются.

Широкое распространение контактных систем второй группы в микросистемной технике обусловлено технологиями их создания. Большинство этих технологий направлено на реализацию фазового перехода (выделение твердой фазы тем или иным способом из жидкой или газообразной фазы или травление твердой фазы) на шероховатой поверхности элемента. Таким

образом, взаимодействие фаз в контактных системах второй группы осуществляется по случайной поверхности, а работоспособность их будет определяться в основном процессами, протекающими в пределах высоты шероховатостей.

В основном теорий процессов, протекающих в гетерогенном слое контактных систем второй группы, может быть положена *полидисперсная модель гетерогенного материала*. Полидисперсная модель предполагает изотропию свойств в плоскости системы. Согласно этой модели, упругие и теплофизические свойства гетерогенного слоя определяются следующими тензорами:

- тензор модулей упругости

$$C_{ij} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{2}(C_{22} - C_{23}) & 0 & 0 \\ & & & & C_{66} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{pmatrix}; \quad (1)$$

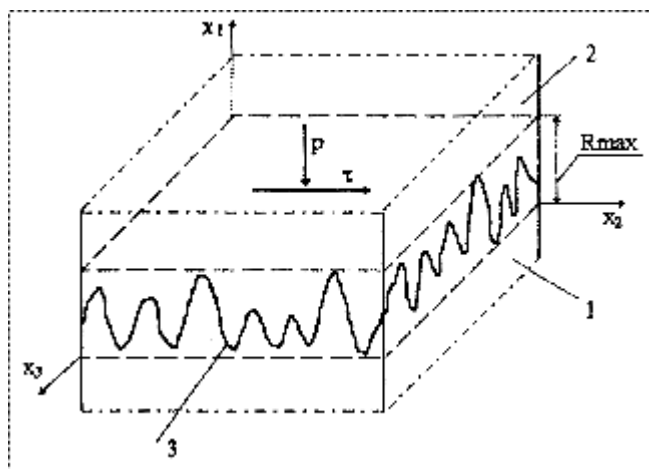
- тензор коэффициентов теплопроводности

$$\lambda_{ij} = \begin{pmatrix} \lambda_{11} & 0 & 0 \\ & \lambda_{22} & 0 \\ & & \lambda_{22} \end{pmatrix}; \quad (2)$$

- тензор коэффициентов линейного расширения

$$\alpha_{ij} = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & 0 & 0 \\ & \alpha_{22} & 0 \\ & & \alpha_{22} \end{pmatrix}; \quad (3)$$

В качестве примера приведем технические эффективные модули упругости, характеризующие упругие свойства при сжатии E_{11} и сдвиге в плоскости контактной системы G_{12} :



Контактная система микросистемной техники:

1 – первая фаза; 2 – вторая фаза; 3 – граница контакта фаз

$$E_{11} = CE + (1-C)E_2 + \frac{4C(1-C)(\mu_1 - \mu_2)^2 G_2}{(1-C)\eta_3 + C\eta_4 + 1}; \quad (4)$$

$$G_{12} = \frac{G_1(1+C) + G_2(1-C)}{G_1(1-C) + G_2(1+C)},$$

где $\eta_3 = G_2 / (K_1 + G_1 / 3)$; $\eta_4 = G_2 / (K_2 + G_2 / 3)$; E_i , G_i , μ_i - модули Юнга, сдвига, коэффициенты Пуассона для первого ($i = 1$) и второго ($i = 2$) материалов системы соответственно; C - доля площади сечения, перпендикулярного оси x_1 , занятая первым материалом.

В формулах (4) предполагается, что фазы являются однородными и изотропными. Вместе с тем, в результате изменения процентного содержания фаз по толщине слоя системы, гетерогенный слой в целом будет анизотропным и неоднородным.

Учитывая, что процентное содержание фаз по высоте гетерогенного слоя меняется, для его определения целесообразно использовать формулы для относительной площади опорной поверхности профиля. В случае, когда случайное поле контакта фаз подчиняется закону Грама-Шарлье и это распределение является однородным и изотропным, была получена следующая формула для относительной площади опорной поверхности:

$$C = Et(x_1) = 1 - \Phi\left(\frac{x_1}{\sqrt{K(0)}}\right) + \left\{ \frac{A}{6} \left[\left(\frac{x_1}{\sqrt{K(0)}} \right)^2 - 1 \right] - \frac{E}{24} \left[\left(\frac{x_1}{\sqrt{K(0)}} \right)^3 - 3 \left(\frac{x_1}{\sqrt{K(0)}} \right) \right] \right\} \varphi\left(\frac{x_1}{\sqrt{K(0)}}\right) - \left\{ \frac{A}{6} \left[\left(\frac{R_{max} - R_p}{\sqrt{K(0)}} \right)^2 - 1 \right] + \frac{E}{24} \left[\left(\frac{R_{max} - R_p}{\sqrt{K(0)}} \right)^3 - 3 \left(\frac{R_{max} - R_p}{\sqrt{K(0)}} \right) \right] \right\} \varphi\left(-\frac{R_{max} - R_p}{\sqrt{K(0)}}\right), \quad (5)$$

где $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{(R_p - R_{max})/\sqrt{K(0)}}^z e^{-\frac{y^2}{2}} dy$; $A = 6\sqrt{2\pi}(0,5 - t_m)$;

$E = 24 \left(1 - \frac{\sqrt{2\pi}}{2k_q} \right)$; t_m - относительная опорная площадь

на уровне базовой плоскости; k_q - отношение среднего геометрического отклонения точек поля (R_q) к среднему арифметическому отклонению точек поля (R_a); R_{max} - наибольшая высота неровностей профиля; R_p - наибольшая высота выступа профиля над базовой плоскостью; $K(0)$ - корреляционная функция ($R_q = \sqrt{K(0)}$).

Если в (5) положить $E = 0$, то $k_q = 1,25$. Это значение соответствует для нормального закона распределения. Поэтому при значениях k_q близких к 1,25, можно с достаточной для практики точностью использовать только два члена ряда закона Грама-Шарлье.

Наряду с эффективными показателями упругих свойств, которые характеризуют их в каждой точке контактной системы, представляют практический интерес интегральные показатели, характеризующие свойства системы в целом. Под интегральными показателями упругих свойств контактных систем понимаются коэффициенты нормальной (k_N) и тангенциальной (k_τ)

податливости, которые оценивают нормальную и тангенциальную жесткость системы в целом. Зависимость между деформациями системы и действующими на них нагрузками имеет вид:

$$\delta_N = k_N p; \quad \delta_\tau = k_\tau \tau, \quad (6)$$

где p , τ - контактное давление и удельная тангенциальная сила; δ_N , δ_τ - перемещения верхней плоскости системы относительно нижней вдоль осей x_1 , x_2 соответственно (см. рисунок). Выражения для коэффициентов нормальной и тангенциальной податливости имеют вид:

$$k_N = \int_0^{R_{max}} \frac{d x_1}{E_{11}(x_1)}; \quad k_\tau = \int_0^{R_{max}} \frac{d x_1}{G_{12}(x_1)}. \quad 3 \quad (7)$$

Исследование упругих свойств контактных систем по приведенным выше формулам показало, что распределение E_{11} , G_{12} по толщине системы изменяется от соответствующих значений одной фазы до соответствующих значений другой фазы, причем характер этого изменения соответствует характеру изменения процентного содержания фаз по толщине системы. Особенно это касается модуля E_{11} , т.е. того модуля, формулы расчета которого в большей степени подчиняются правилу "смеси".

Исследование коэффициентов нормальной и тангенциальной податливости контактной системы показало, что их значение существенно зависит от толщины системы (R_{max}), модулей упругости фаз и распределения фаз по толщине системы. Если шероховатость подчиняется нормальному закону распределения, для которого можно принять $Ra = \sqrt{2K(0)/\pi}$; $R_{max} = 6\sqrt{K(0)}$, то коэффициенты нормальной и тангенциальной податливости можно представить в виде:

$$k_N = 3\pi Ra \cdot k_N^{np}; \quad k_\tau = 3\pi Ra \cdot k_\tau^{np}, \quad (8)$$

где $k_N^{np} = \int_0^1 \frac{dz}{E_{12}(z)}$; $k_\tau^{np} = \int_0^1 \frac{dz}{G_{12}(z)}$; $z = x_1 / R_{max}$.

В (8) приведенные коэффициенты нормальной (k_N^{np}) и тангенциальной (k_τ^{np}) податливости зависят только от модулей упругости фаз.

Таким образом, предложенная модель деформирования контактных систем второй группы микросистемной техники позволяет оценить среднее напряженное состояние в каждой точке системы с учетом технологии обработки поверхностей и технологий получения систем. Кроме того, получены интегральные характеристики жесткости контактных систем, введение которых в существующие методики расчета гетерогенных элементов микросистемной техники позволяет учесть особенности деформирования зоны контакта соединений разнородных материалов, обусловленные техническими особенностями производства.

Список литературы

1. Климов Д.М., Васильев А.А., Лучинин В.В., Мальцев П.П. Перспективы развития микросистемной техники в 21 веке // Микросистемная техника, 1999. № 1. С. 3-6.
2. Иванов В.А., Волчихин В.И., Гордин Г.Т. Ударостойкие и виброустойчивые резистивные устройства для автономных систем управления // Организация производства и прогрессивная технология в приборостроении, 1989. № 4. С. 32-35.

УДК 539

А.В. Зотов, д-р физ.-мат. наук, Владивостокский гос. университет экономики и сервиса,

В.В. Коробцов, канд. физ.-мат. наук,

В.Г. Лифшиц, член-корр. РАН, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН

ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУР С "ЗАХОРОНЕННЫМИ" ПОВЕРХНОСТНЫМИ ФАЗАМИ НА КРЕМНИИ

Рассмотрены основные подходы, достижения и перспективы в области формирования "захороненных" поверхностных фаз атомной толщины на кремнии с использованием сверхвысоковакуумной технологии роста пленок.

В связи с требованиями микроминиатюризации полупроводниковых приборов интерес к поверхностным фазам на кремнии постоянно возрастает. Дело в том, что уменьшение размеров приборов происходит не только "в горизонтальной плоскости", постоянно уменьшается и толщина полупроводниковых структур, составляя в настоящее время единицы монослоев. При таких толщинах роль поверхности и поверхностных фаз становится определяющей. С использованием поверхностных фаз – материалов с пониженной размерностью, т.е. двумерных слоев – представляется возможным формирование микроэлектронных структур нового типа, в том числе и многослойных, обладающих качественно новыми перспективными свойствами, т.е. систем с высокой плотностью функциональных элементов и повышенным быстродействием.

В данной статье изложены представления о том, что следует понимать под поверхностными фазами, приведены основные сведения о процессе твердофазной эпитаксии на кремнии и результаты выращивания сверхрешеток с "захороненными" поверхностными фазами.

Поверхность и поверхностные фазы

Поверхность. Обычно при определении поверхности используют подход Гиббса, основанный на следующей идее: всякая величина, характеризующая поверхностные свойства, определяется как разность микроскопических величин для реального твердого тела, обладающего поверхностями, и гипотетического твердого тела без поверхностей. Таким образом, слой, некоторые свойства которого отличны от свойств массивного материала, где он расположен, и называется "поверхностью". "Толщина" поверхности имеет различные значения по отношению к различным свойствам.

Поверхностные фазы. Если рассматриваемая система состоит из двух соприкасающихся объемных однородных частей в различных состояниях, находящихся

в равновесии друг с другом, то говорят о двух фазах вещества. На поверхности, как и в объеме тела, процессы протекают в сторону установления термодинамического равновесия, в котором направленное перемещение атомов отсутствует, т.е. в сторону образования фаз, в данном случае – поверхностных, находящихся в состоянии термодинамического равновесия с объемной фазой. Таким образом, можно сказать, что поверхностная фаза (ПФ) – это поверхностный слой, существующий в состоянии термодинамического равновесия с объемом и обладающий своей электронной и кристаллической структурами и свойствами, отличными от свойств объемных материалов из атомов адсорбата, подложки и объемного силицида, если таковой существует [1]. Поверхностной фазе, как и объемной, присущи области температурной и концентрационной устойчивости. В целом можно сказать, что *поверхностная фаза* – это новое вещество, хотя и состоящее из тех же атомов, что и объемное, но обладающее иными характеристиками.

Структура и состав поверхностных фаз. Геометрическая структура среди других свойств считается одной из важнейших характеристик поверхностных фаз, довольно успешно позволяющих их идентифицировать. Обычно поверхностные фазы обозначаются в соответствии с их периодичностью относительно монокристаллической подложки, на которой они выращены. Так, например, поверхностная фаза $\text{Si}(111) \sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -В (или сокращено $\sqrt{3}$ -В) имеет период решетки в направлении осей x и y в $\sqrt{3}$ раз больший, чем период кремниевой подложки с ориентацией (111).

При формировании поверхностных фаз следует различать атомы, входящие в состав поверхностной фазы (атомы "в фазе"), и атомы, находящиеся в избытке по отношению к концентрации чужеродных атомов, когда полностью вся поверхность покрыта поверхностной фазой (атомы "на фазе"). В случае, когда вся поверхность полностью покрыта поверхностной фазой и на поверхности есть только атомы "в фазе", говорят, что образована поверхностная фаза стехиометрического состава. Если удалить часть чужеродных атомов из какой-либо поверхностной фазы, сохранив ее решетку, то получим "область гомогенности" этой поверхностной фазы. Заметим, что атомы "в фазе" относительно сильно связаны с подложкой, а атомы "на фазе" – слабо. Это различие между атомами, входящими в состав поверхностной фазы и избыточными по отношению к ней, определяет природу всех поверхностных процессов, и его необходимо принимать во внимание при формировании поверхностных фаз и при объяснении поверхностных процессов [2].

Концентрацию атомов адсорбата на поверхности обычно выражают в монослоях. При этом за один монослой (МС) принимается величина, равная концентрации атомов кремния в верхнем слое подложки. Например, для поверхности $\text{Si}(111)$ 1 МС равен $7,8 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Оказывается, однако, что такая ситуация, когда под слоем адсорбата существует ровно 1 МС атомов кремния, реализуется далеко не всегда. При нанесении субмонослойных покрытий металла на кремниевую подложку при повышенных температурах

упорядоченная кремниевая поверхностная фаза разрушается. В результате на поверхности образуются несвязанные атомы металла и "незанятые" атомы кремния, которые могут связываться друг с другом в необходимых пропорциях, образуя поверхностную фазу с решеткой нового типа, отличающейся от кремниевой решетки, но эпитаксиально (т.е. в виде двумерного монокристалла) на ней расположенную. Для описания такой поверхностной фазы следует указывать содержание не только атомов адсорбата, но и содержание атомов кремния, которое совсем не обязательно должно быть равным одному монослою (точно так же, как это указывается для объемных двухкомпонентных фаз – $A_x B_y$). Проблема состоит в определении числа атомов кремния "в фазе", так как достаточно затруднительно распознать атомы Si, входящие в состав поверхностной фазы и входящие в состав подложки. Это удалось сделать с использованием метода сканирующей туннельной микроскопии [3, 4]. Вместе с анализом положения атомов адсорбата это дает возможность корректно строить модель кристаллических решеток для поверхностных фаз, что так же важно для физики поверхности, как и построение объемных кристаллических решеток в обычной кристаллофизике.

Проводимость поверхностных фаз. При наличии на поверхности кремния поверхностной фазы, электрическая проводимость в приповерхностной области может обеспечиваться носителями подложки, поверхностной фазы и адатомов на поверхностной фазе [5]. Толщина поверхностной фазы составляет порядка нескольких ангстрем, поэтому при использовании, например, 4-зондового метода невозможно обеспечить контакт зонда с поверхностной фазой, не контактируя при этом с объемом подложки. Это приводит к тому, что измеряемая таким образом поверхностная проводимость для подобных структур имеет две составляющие: проводимость, обеспечиваемая носителями объемного кремния, и проводимость, обеспечиваемая носителями поверхностной фазы. В этом случае, измеряя *in situ* в сверхвысоком вакууме поверхностную проводимость сначала чистой подложки без поверхностной фазы кремний-металл, а затем подложки со сформированной поверхностной фазой, можно оценить вклад носителей поверхностной фазы в общую проводимость, который, в принципе, может быть как положительным, так и отрицательным [6]. Иначе говоря, в зависимости от свойств самих поверхностных фаз кремний-адсорбат можно наблюдать как увеличение, так и уменьшение поверхностной проводимости образца при образовании ПФ кремний-металл. Фиксируемые изменения проводимости являются довольно значительными, что связано с высокими значениями концентрации носителей в поверхностных фазах.

Таким образом, поверхностные фазы на кремнии можно рассматривать как новый перспективный материал для микроэлектроники. К его преимуществам следует отнести: *малую толщину*, *новые перспективные свойства* (например, такие как повышенная проводимость), *упорядоченность* (и поэтому – предсказуемость свойств), *самоорганизацию*.

Твердофазная эпитаксия

Поверхностные фазы стабильны лишь в условиях сверхвысокого вакуума, контакт с окружающей атмосферой приводит к разрушению их структуры и дегградации свойств. В связи с этим на пути использования поверхностных фаз в приборных структурах встает задача наращивания на них покрытий (например, слоев аморфного или эпитаксиального кремния) с сохранением структуры поверхностной фазы на "захороненной" границе раздела. Перспективным методом для решения этой задачи может служить *твердофазная эпитаксия* (ТФЭ).

Базовым методом ТФЭ, с точки зрения технической реализации, служит метод молекулярно-лучевой эпитаксии, и твердофазную эпитаксию можно рассматривать как специфический режим эпитаксии из молекулярных пучков. Различие состоит лишь в том, что в режиме обычной (традиционной) молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) осаждение и кристаллизация пленки происходит одновременно в ходе напыления на "горячую" подложку, а в случае ТФЭ процесс формирования эпитаксиальной пленки разбивается на два этапа: напыление аморфной пленки на "холодную" подложку и ее кристаллизация при последующем отжиге при температурах ниже температуры плавления кремния. Было установлено, что твердофазная эпитаксия идет путем перемещения границы раздела "кристалл-аморфная фаза" от подложки к поверхности аморфного слоя. Скорость движения границы раздела (скорость ТФЭ) определяется такими параметрами, как температура отжига, ориентация подложки, тип и концентрация присутствующих в пленке примесей [7].

Исследования показали, что твердофазная эпитаксия имеет ряд преимуществ по сравнению с более традиционной молекулярно-лучевой эпитаксией. Ограничения на встраивание примесей в кристаллическую структуру не позволяют получать в эпитаксиальных пленках с помощью обычной МЛЭ уровни легирования выше предела равновесной растворимости примеси в Si. Пленки по мере приближения концентрации примеси к пределу растворимости становятся все более дефектными, а доля электрически активных примесей резко уменьшается. В случае твердофазного режима эпитаксии встраивание примеси в кристаллическую структуру происходит в неравновесных условиях, что позволяет получать уровни легирования выше предела равновесной растворимости. Так как для полной кристаллизации пленок достаточны невысокие температуры отжига, ТФЭ позволяет получать сверхрезкие профили легирования с шириной переходной области атомного масштаба. Можно сделать вывод, что твердофазная эпитаксия представляет собой перспективный метод получения тонких эпитаксиальных пленок Si и различных многослойных структур на их основе.

"Захороненные" поверхностные фазы

Представляет большой интерес формирование как двумерных полупроводниковых приборов на плоскости, так и трехмерных систем с "захороненными" двумерными слоями из однородных поверхностных фаз или

двумерных микроструктур. Последнее требует умения наращивать эпитаксиальные кремниевые слои на поверхностных фазах без их разрушения. При таких процессах определяющим становится такое свойство поверхностных фаз, как их устойчивость (стабильность).

Стабильность поверхностных фаз. Понятно, что стабильность той или иной поверхностной фазы к нанесению поверх нее, например, аморфной пленки кремния определится уже при нанесении субмонослойных покрытий Si. Действительно, если в результате нанесения одного – двух слоев поверхностная фаза не разрушится, то при напылении последующих слоев (и даже при отжиге с невысокими температурами) диффузия к поверхности будет затруднена, так как это будет объемная диффузия со значительно более высокой энергией активации процесса.

Исследование широкого набора разнообразных поверхностных фаз показало, что достаточной стабильностью обладают лишь несколько поверхностных фаз. Одна из наиболее стабильных поверхностных фаз – это Si (111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -В. В этой поверхностной фазе есть важная особенность в конструкции. Атомы бора в ней находятся в замещающих положениях (т.е. замещают атомы кремния) во втором от поверхности слое, а верхний слой состоит из атомов кремния. Именно такая структура и дает возможность выращивания аморфного кремния поверх поверхностной фазы слоя без разрушения самой фазы. В большинстве других случаев (адатомы или тримеры адсорбата на поверхности Si (111) или димеры адсорбата на поверхности Si (100)) поверхностные фазы нестабильны и разрушаются уже на самых ранних стадиях напыления аморфной пленки кремния [8]. Таким образом, примеров стабильных фаз немного и пока среди них отсутствуют структуры с атомами адсорбата, расположенными поверх атомов кремния.

В качестве положительных достижений в области формирования "захороненных" поверхностных фаз можно отметить сохранение поверхностной фазы Si(111) $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -В под слоем аморфного кремния [8, 9] и фазы Si(100)2×1-В под слоем эпитаксиального кремния, выращенного с помощью метода ТФЭ [10, 11]. Представляет интерес и формирование дельта-легированных слоев и сверхрешеток на их основе из "захороненных" поверхностных фаз Si(100)2×1-Sb. В последнем случае, хотя упорядоченная структура атомов сурьмы не сохраняется, межслоевого перемешивания не происходит [12].

Электрические свойства "захороненных" поверхностных фаз. В работах [13, 14] были исследованы электрические свойства (проводимость, концентрация и подвижность носителей заряда) различных поверхностных фаз Al, Sb и В на подложках Si(100) и Si(111), покрытых слоем аморфного кремния. Только встроенные поверхностные фазы В/Si демонстрируют металлические свойства" в них наблюдается практически полная электрическая активация примеси и отсутствие "вымораживания" носителей заряда вплоть до минимальных исследованных температур около 20 К. Напротив, все поверхностные фазы Sb/Si и Al/Si (независимо от их структуры и состава) после напыления слоя аморфного Si демонстрируют ничтожно малую активацию мигрирующей примеси. Наблюдаемое отличие в электрических свойствах связано с различным атомным строением поверхностных фаз: в то время, как атомы Al и Sb во

всех поверхностных фазах занимают положения сверху атомов Si подложки, атомы В занимают замещающие положения в приповерхностном слое решетки Si.

Были определены также электрические характеристики дельта-легированных сверхрешеток на основе поверхностных фаз Si (100) – Sb. В сверхрешетках с малым периодом (порядка 1,5 нм) получены рекордно высокие средние объемные концентрации носителей заряда (электронов) до $8 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ [15]. Подвижность электронов в таких решетках в два раза превышает известные величины для однородно легированных монокристаллов Si:As. Следует отметить, однако, что теоретические оценки предсказывают значения подвижности носителей значительно более высокие, чем те, что уже удалось получить в выращенных "захороненных" поверхностных фазах. Улучшение их электрических характеристик, по-видимому, может быть достигнуто как путем повышения их структурного качества, так и путем их интеграции в более сложные многослойные конструкции. В качестве примера можно привести результаты по выращиванию многослойных структур, содержащих "захороненную" поверхностную фазу В/Si(111) и слои Ge, и исследованию их электрических свойств [16]. Оказалось, что в образцах вида Si/Ge/B/Si(111) и Si/Ge/B/Ge_xSi_{1-x}/Si(111) подвижности носителей заряда (дырок) в 2-2,5 раза выше, чем в образцах вида Si/B/Si(111). Можно ожидать, что при оптимизации параметров многослойных структур (толщина слоев, температура их формирования, слоевая концентрация бора во встроенной поверхностной фазе) могут быть достигнуты еще более высокие значения подвижности.

Список литературы

1. Lifshits V.G., Saranin A.A. and Zotov A.V. Surface phases on silicon: Formation, structure and properties Chichester, UK, Wiley, 1994. 4p.
2. Lifshits V.G., Akilov V.B., Chursov B.K. and Gavriljuk Yu.L. Surface Science. 1989. V. 222. P. 21-30.
3. Saranin A.A., Zotov A.V., Lifshits V.G., Ryu J. -T., Kubo O., Tani H., Katayama M. and Oura K. Physical Review B. 1998. V. 58. P. 3345-3548.
4. Saranin A.A., Zotov A.V., Lifshits V.G., Ryu J. -T., Kubo O., Tani H., Harada T., Katayama M. and Oura K. Physical Review B. 1999. V. 60. P. 14372-14381.
5. Hasegawa S., Tong X., Takeda S., Sato N. and Nagao T. Progress in Surface Science. 1999. V. 60. P. 89-257.
6. Ryzhkov S.V., Tsukanov D.A. and Lifshits V.G. Physics of Low-Dimensional Structures. 1998. N 7-8. P. 1-6.
7. Zotov A.V. and Korobtsov V.V. Journal of Crystal Growth. 1989. V 98. P. 519-530.
8. Zotov A.V., Ryzhkov S.V. and Lifshits V.G. Surface Science. 1995. V. 328. P. 95-104.
9. Headrick R.L., Feldman L.C. and Robinson I.K. Applied Physics Letters. 1989. V. 55. P. 442-444.
10. Ziliang Z., Kulakov M.A., Bullemer B., Eisele I. and Zotov A.V. Applied Physics Letters. 1996. V. 69. P. 494-496.
11. Weir B.E., Eaglesham D.J., Feldman L.C., Luftman H.S. and Headrick R.L. Applied Surface Science. 1995. V. 84. P. 413-418.
12. Zotov A.V., Saranin A.A., Lifshits V.G. and Khr amtsova E.A. Surface Science. 1990. V. 230. L147-L150.
13. Headrick R.L., Levi A.F.J., Luftman H.S., Kovalchick J. and Feldman L.C. Physical Review B. 1991. V. 43. P. 14711-14714.
14. Zotov A.V., Wittmann F., Lechner J., Eisele I., Ryzhkov S.V. and Lifshits V.G. Applied Physics Letters. 1995. V. 67. P. 611-613.
15. Eisele I., Wittmann F., Lifshits V.G., Zotov A.V., Ditina Z.Z. and Ryzhkov S.V. Thin Solid Films. 1994. V. 238. P. 27-30.
16. Zotov A.V., Lifshits V.G., Rupp T. and Eisele I. Journal of Applied Physics. 1998. V. 83. P. 5865-5869.

В.Н. Котов, канд. техн. наук,
В.Г. Клиндухов, вед. технолог,
И.И. Черепашин, аспирант,
НИИ МВС ТРТУ (г. Таганрог)

МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРЕМНИЯ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКОЙ

Рассмотрены результаты исследования структуры дислокационного спектра пластически деформированного кремния. Показана возможность и целесообразность применения электроимпульсной обработки для модификации структуры и оптических свойств полупроводниковых материалов. Представлены экспериментальные результаты, свидетельствующие о смещении края фундаментальной полосы поглощения кремния в длинноволновую сторону в результате электроимпульсной обработки. Предложены возможные области практического применения пластически деформированного кремния.

Разработка малогабаритных простых в производстве и эксплуатации сенсоров с техническими характеристиками, отвечающими жестким требованиям современных систем управления и автоматизации, в последние годы вошла в число важнейших проблем, которые решаются

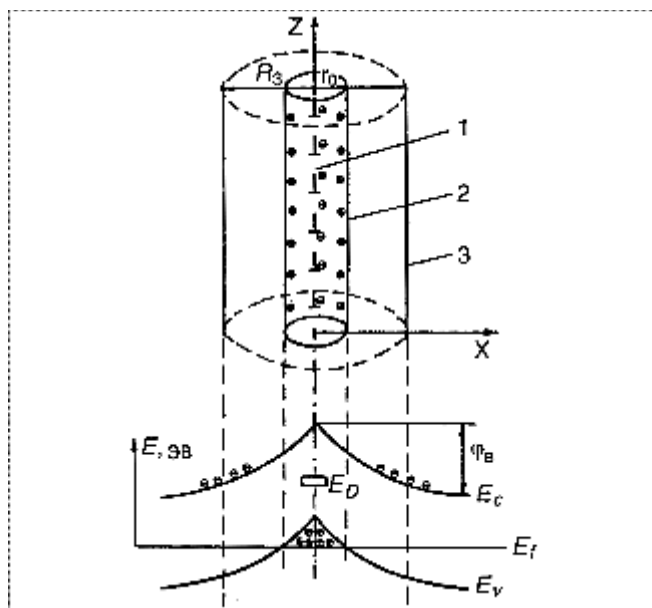


Рис. 1. Модель дислокационной трубки пространственного заряда и ее энергетическая диаграмма:

1 – внутреннее ядро дислокации около 10^{-6} см; 2 – слой инверсии 10^{-5} см, 3 – трубка пространственного заряда $R_3 = 10^{-3} \div 10^{-4}$ см; E_D – дислокационный уровень энергии; ϕ_B – потенциал барьера дислокации

средствами микроэлектроники и полупроводниковой технологии. Здесь наметились и развиваются два основных пути.

Первый состоит в совершенствовании и модернизации на основе новейших технологических методов и средств многих широко известных, но практически исчерпавших свои возможности принципов (тензо- и пьезоэффектов, эффекта Холла, ионоселективной чувствительности МДП-структур и пр.).

Второй путь развития микроэлектронных сенсоров – использование новых или ранее неиспользовавшихся явлений и эффектов в полупроводниках и полупроводниковых структурах, по своим потенциальным возможностям превосходящих известные и применяемые принципы, например, обладающих повышенной или избирательной чувствительностью к каким-либо внешним воздействиям, либо из-за специфики своего проявления выполняющих автоматическое преобразование какого-либо воздействия в выходной сигнал, удобный для пользователя.

В настоящее время можно считать установленным фактом, что введение дислокации в кристаллы полупроводников, например путем пластической деформации, вызывает следующие нарушения решетки [1]:

- локальные поля упругих напряжений вокруг дислокации;
- нарушенные или ненасыщенные связи и обусловленные ими уровни энергии;
- области пространственного заряда, которые сразу образуются в полупроводниках и окружают дислокацию.

Согласно модели Рида, краевая дислокация может быть представлена в виде трубки пространственного заряда, как это показано на рис. 1. Отрицательный заряд ядра дислокации, например в германии и кремнии, образуется посредством притяжения свободных электронов к ненасыщенным связям. Последние создают локализованный пространственный заряд. В кристаллах с дислокациями точки решетки, расположенные на дополнительной полуплоскости, образуют линейный заряд, вокруг которого устанавливается цилиндрический пространственный заряд.

Протяженность области пространственного заряда вокруг дислокации – порядка нескольких микрометров, она зависит от степени легирования полупроводника, для слаболегированного кристалла она может достигать 100 мкм [1].

Дислокационные уровни, расположенные в середине запрещенной зоны, являются идеальными для электронно-дырочной рекомбинации с равным числом партнеров из валентной зоны и зоны проводимости. Инжекция носителей вблизи таких центров приводит к увеличению скорости рекомбинации любых пар носителей из обеих зон или из ловушек, имеющих уровни в середине запрещенной зоны, которые могут служить промежуточными ступенями в каскадном процессе перехода из зоны проводимости в валентную зону. Как и в электронно-дырочном переходе, здесь сильные локальные электрические поля, обусловленные наличием трубок пространственного заряда, ускоряют электроны до тех пор, пока

они не приобретут импульс, достаточный для возбуждения других электронов в зону проводимости.

Известно, что облучение полупроводников, имеющих глубокие дислокационные состояния, световым излучением широкого спектрального диапазона сопровождается увеличением коэффициента поглощения полупроводника в области его границы фундаментального поглощения [2].

Экспериментальные исследования пластически деформированных полупроводников показали, что изменения края фундаментального поглощения могут быть обусловлены электрическим полем дислокации [2], полем механических напряжений [3], точечными дефектами, возникающими в процессе пластического деформирования,

В статье [3] исследовано изменение спектров поглощения в области края фундаментального поглощения в кремнии и арсениде галлия при введении дислокации в кристалл методом одноосного сжатия при повышенной температуре. Обнаружено поглощение с красной границей $E_g - 0,1$ эВ в Si и $E_g - 0,20$ эВ в GaAs. Авторы утверждают, что данное поглощение обусловлено изменением ширины запрещенной зоны кристалла в поле упругих напряжений дислокации.

С целью выяснения природы электронных состояний в кремнии с дислокациями, сформированными описанным выше способом, в работе [2] проведены совместные исследования методами оптического поглощения, DLTS и ЭПР (электронный парамагнитный резонанс). В результате в спектре пластически деформированного кремния обнаружены три типа оптических переходов: переход из нижней зоны дислокационных оборванных связей $E_{\sigma} + 0,4$ эВ в зону проводимости с эффективным сечением поглощения фотона $\sigma_{\phi} = 1,6 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2 \text{ эВ}^{-0,5}$; переход 0,98 эВ между локальными состояниями дефектов, рожденных движущейся дислокацией; переход типа уровень – зона, по мнению авторов, возможно обусловленный возбуждением электронов из состояний поверхностных дефектов микро- и макротрещин $E + 0,62$ эВ в зону проводимости.

Таким образом, результаты ранних исследований свидетельствуют о сложной структуре дислокационного спектра практически деформированного кремния.

В настоящей работе исследуется возможность и целесообразность применения электроимпульсной обработки (ЭИО) как метода локального энергетического воздействия на полупроводниковые материалы для модификации их структуры и оптических свойств. Ранее было показано, что диаметр зоны, подвергнутой воздействию электрического разряда, определяется режимом ЭИО и может достигнуть значения порядка 1 мкм. При ЭИО в межэлектронном промежутке (МЭП) практически мгновенно выделяется значительная энергия (от долей до десятков джоулей). В результате в локальных объемах на поверхности электродов и в МЭП происходит ряд термополевых эффектов, приводящих к формообразованию, легированию и изменению кристаллической структуры поверхностных слоев электродов [4-7].

Известно, что электроимпульсная обработка полупроводниковых материалов приводит к возникновению нарушенного поверхностного слоя. Толщина этого слоя может составлять 30-40 мкм, а при мягких режимах – не более 10-15 мкм [4]. По некоторым данным [5], при ЭИО в мягком режиме глубина нарушенного поверхностного слоя может быть не более 2 мкм.

Механизм зарождения и распределения дислокации по объему монокристаллического кремния при воздействии ЭИО исследован в статье [6]. Объем дислокационной области, а также средняя плотность дислокации в ней определяются энергией разряда, удельным сопротивлением полупроводникового материала, его исходной температурой, а также температурой и временем последующего высокотемпературного отжига.

В данной работе методом ИК-спектроскопии оценивалась степень структурных изменений приповерхностного слоя монокристаллического кремния, подвергнутого ЭИО в разных режимах. ИК-спектры пропускания снимались на инфракрасном спектрометре ИКС-14А при температуре $T = 300$ К в спектральной области $7000 \dots 1100 \text{ см}^{-1}$ ($\lambda = 0,9 \dots 1,4$ мкм). Измерения проводились на пластинах кремния марки КЭФ-3 (111) до и после ЭИО в различных режимах. Режим ЭИО характеризовался энергией разрядов W и плотностью возникающих эрозионных лунок N_L на единицу поверхности.

Для твердого вещества в виде плоскопараллельной пластины толщиной d с коэффициентом отражения R показатель поглощения α связан с коэффициентом пропускания P соотношением [8]

$$P = \frac{I}{I_0} = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha d}}{1-R^2 e^{-2\alpha d}}, \quad (1)$$

где I – поток излучения, прошедший сквозь кремниевую пластину; I_0 – поток излучения, падающий на кремниевую пластину.

Отсюда имеем

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left\{ \frac{(1-R)^2}{2P} + \sqrt{\left[\frac{(1-R)^2}{2P} \right]^2 + R^2} \right\}. \quad (2)$$

Для кремния в области длин волн $\lambda = 1 \dots 1,2$ мкм [8]

$$R = 0,310 \pm 0,0004.$$

На рис. 2 показаны ИК-спектры поглощения, построенные с помощью выражения (2) по данным измерения коэффициента пропускания P . Кривые построены в предположении, что образцы кремния однородны. При расчете кривой 1 использовалось значение $d = 300$ мкм, соответствующее толщине кремниевых пластин. При расчете кривых 2-5 учитывалось, что увеличение поглощения после ЭИО пластин происходит за счет поглощения в образовавшемся нарушенном поверхностном слое, толщина которого в первом приближении равна 20 мкм. Построенные кривые 2-5 характеризуют поглощение ИК-излучения

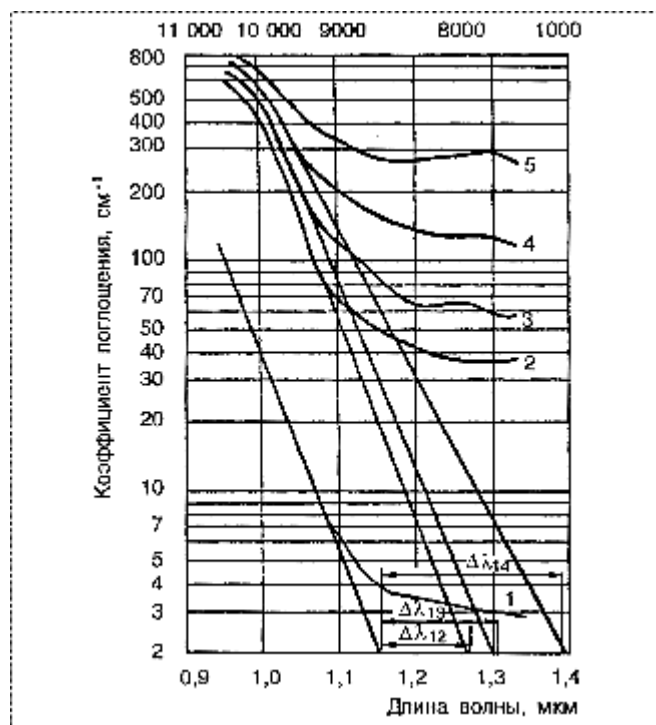


Рис. 2. ИК-спектры поглощения в кремнии до ЭИО (кривая 1) и после ЭИО пластин в режимах:

$W = 1 \cdot 10^{-5}$ Дж, $N_D = 1 \cdot 10^7$ см⁻² (кривая 2), $W = 5 \cdot 10^{-5}$ Дж, $N_D = 5 \cdot 10^6$ см⁻² (кривая 3), $W = 1 \cdot 10^{-4}$ Дж, $N_D = 2 \cdot 10^6$ см⁻² (кривая 4); $W = 8 \cdot 10^{-4}$ Дж, $N_D = 8 \cdot 10^5$ см⁻² (кривая 5)

непосредственно в нарушенном слое кремния. Видно, что после ЭИО край собственного поглощения в кремнии смещается в длинноволновую сторону. Количественно оценить это смещение трудно, однако, экстраполируя кривые с участков, где коэффициент поглощения изменяется сильнее всего, до нулевого значения α , получаем значение смещения $\Delta\lambda$ для кривых 2–5 относительно кривой 1.

Смещение полос соответствует изменению эффективной ширины запрещенной зоны на величину ΔE_g .

Значения $\Delta\lambda$, ΔE_g и $\Delta\alpha$ в зависимости от режима ЭИО кремния

Режим ЭИО кремния	Смещение края фундаментальной полосы $\Delta\lambda$, мкм	Изменение ширины запрещенной зоны ΔE_g , эВ	Искажение решетки $\Delta\alpha \times 10^{-4}$, мм
$W = 1 \cdot 10^{-5}$ Дж, $N_D = 1 \cdot 10^7$ см ⁻²	0,12	0,10	0,080
$W = 5 \cdot 10^{-5}$ Дж, $N_D = 5 \cdot 10^6$ см ⁻²	0,15	0,13	0,105
$W = 1 \cdot 10^{-4}$ Дж, $N_D = 2 \cdot 10^6$ см ⁻²	0,24	0,20	0,168

Изменение эффективной ширины запрещенной зоны может быть вызвано искажением решетки кремния в результате ЭИО. Изменение постоянной решетки кремния $\Delta\alpha$ связано с соответствующим изменением ширины запрещенной зоны соотношением $\Delta\alpha = 0,81 \Delta E_g$ [8]. Рассчитанные по приведенным на рис. 2 кривым значения параметров приведены в таблице.

Из приведенных данных видно, что ЭИО может приводить к существенному искажению кристаллической решетки кремния. Смещение края фундаментальной полосы поглощения в результате ЭИО кремния в длинноволновую сторону свидетельствует об уменьшении ширины запрещенной зоны. В свою очередь, это означает, что в нарушенном слое кремния преобладают растягивающие напряжения деформации. Это подтверждается также тем, что интенсивная ЭИО всей поверхности приводит к изгибу кремниевой пластины, причем нарушенный слой при этом находится на вогнутой стороне пластины.

Таким образом, следует ожидать, что облучение светом ИК-диапазона кремниевых структур, содержащих структурно-неоднородные области, сформированные ЭИО, может привести к локальному выделению дополнительной энергии светового излучения в объеме полупроводника в указанных областях кремния и активации в них ряда физико-химических процессов, причем энергия, необходимая для активации таких процессов, в данном случае может быть существенно ниже, чем при изотермическом отжиге. Полученный эффект может быть использован для построения новых сенсорных структур и элементов микросистем на кремнии с использованием технологии MEMS микро-электромеханических систем. Конкретные примеры использования будут рассмотрены в ближайших номерах издания.

Список литературы

1. Матаре Г. Электроника дефектов в полупроводниках: Пер. с англ. Г.Н. Гуро/ Под ред. С.А. Медведева. М.: Мир, 1974. 464 с.
2. Баженов Л.В., Кведер В.В., Красильникова Л.Л., Шальпин А.И. Поглощение света глубокими дислокационными состояниями в кремнии // ФТТ. 1986. Т. 28. № 1. С. 230-234.
3. Баженов А.В., Красильникова Л.Л. Поглощение света в поле упругих напряжений дислокации в кремнии и арсениде галлия // ФТТ. 1985. Т. 28. № 1. С. 235-241.
4. Лазаренко Б.Р. Некоторые научные проблемы электрической эрозии материалов // Электронная обработка материалов. 1969. № 2. С. 7-11.
5. Воробьев А.А. О процессах разрушения тел при их бомбардировке с большой скоростью // Электронная обработка материалов. 1969. № 2. С. 23-26.
6. Воробьев А.А. Основы измерения свойств материалов при электроискровой обработке // Электронная обработка материалов. 1969. № 6. С. 25-30.
7. Лазаренко Н.И. О механизме образования покрытий при электроискровом легировании металлических поверхностей // Электронная обработка материалов. 1965. № 1. С. 49-53.
8. Лошкова Э.Н. Исследование инфракрасного спектра поглощения кремния, облученного нейтронами // Труды Физического института им. П.Н. Лебедева. М.- Наука, 1966. № 37. С. 102-148.

УДК 621.3: 763: 778. 19

В.Ф. Дряхлушин, канд. физ.-мат. наук, **Н.В. Востоков**, **А.Ю. Климов**,
В.В. Рогов, **В.И. Шашкин**, канд. физ.-мат. наук,
 Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ ЛИТОГРАФИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НАНОМЕТРОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Разработаны методы сканирующей зондовой литографии, позволяющие создавать различные нанометровые элементы (металлические и диэлектрические линии, точки, вытравленные в образце ямки и канавки) на произвольных поверхностях (слабо- и сильнолегированных полупроводниках, металлах, диэлектриках). Метод включает нанесение на образец двухслойного тонкопленочного покрытия полимер - металл, непластическую деформацию пленки металла зондом микроскопа, сухое травление полимера и нанесение метаглических и/или диэлектрических элементов либо травление образца через сформированную маску. Созданы различные наноэлементы с минимальными размерами ~50 нм.

В последнее время большое внимание привлекают приборы на основе наноразмерных объектов, в том числе квантовых точек, нитей, одноэлектронных транзисторов и т.п. Эти приборы характеризуются рядом уникальных свойств, связанных с квантованием спектра электронов, могут усиливать и преобразовывать очень слабые сигналы, имеют малые размеры и крайне низкое энергопотребление и весьма перспективны для нанoeлектроники. Для стабильной работы при нормальной температуре эти приборы должны иметь размеры порядка десятков нанометров. Для вертикальных размеров эта проблема успешно решается методами молекулярно-лучевой и газофазной эпитаксии. Однако при формировании горизонтальных структур в планарной технологии эта проблема встречает большие трудности. Электронно-лучевая и рентгеновская литография лишь приближаются к созданию приборов с такими размерами.

В связи с этим большой интерес представляет возникшая в последние годы альтернатива - *сканирующая зондовая литография* (СЗЛ) [1-5]. СЗЛ является недорогим, компактным и удобным инструментом получения рисунка нанометровых размеров на поверхности.

В настоящее время предпринимаются попытки использования СЗЛ

для сверхплотной записи информации. Фирмой IBM [6] создана решетка кантилеверов 32×32 (всего 1024), которые могут одновременно и независимо друг от друга записывать и считывать информацию на поверхности $3 \times 3 \text{ мм}^2$, т.е. на макро-размерах. Данным методом может быть записана информация с плотностью $\sim 500 \text{ Гбит/дюйм}^2$. Для сравнения - плотность записи на магнитных жестких дисках, полученная в лабораторных условиях, составляет 20 Гбит/дюйм^2 , ожидаемый предел $\sim 60\text{-}70 \text{ Гбит/дюйм}^2$, скорость считывания $20\text{-}30 \text{ Мбит/с}$ [6]. В системе с одним кантилевером реализована плотность записи $1,6 \text{ Тбит/дюйм}^2$ (пространственный размер одного бита 8 нм) [7]. В качестве сред для записи информации обычно используются пленки поликарбоната или полиметилметакрилата (ПММА), механизм записи - механическое или термомеханическое воздействие зонда [8] на пленку полимера. Скорость записи и считывания информации посредством одного зонда пока невелика и составляет десятки килобит в секунду, но при параллельном процессе она может быть вполне удовлетворительной. Другой метод сверхплотной записи информации - с помощью сканирующего ближнепольного оптического микроскопа - разрабатывается фирмой "Hitachi" [9]. Механизм

записи - фотометрическое воздействие. При нагревании поверхности образцов происходит локальная кристаллизация аморфного образца, что приводит к существенному увеличению коэффициента отражения света. Реализована плотность записи 100 Гбит/дюйм^2 при скорости считывания 10 Мбит/с . Процесс фототермического воздействия зонда ближнепольного оптического микроскопа на различные полимеры исследован в [10].

Другим привлекательным качеством СЗЛ является высокая точность позиционирования (до 10 нм), что позволяет в одном эксперименте получить изображение поверхности образца, выбрать интересующую область и затем модифицировать ее. Таким образом можно сделать контакты к одиночным квантовым точкам или наноостровкам, "дорисовать" элементы, полученные методами оптической или электронно-лучевой литографии.

В методе СЗЛ модификация поверхности происходит при воздействии зонда микроскопа на поверхность объекта в некоторых областях. Существует несколько типов СЗЛ. Метод ближнепольной оптической литографии позволяет получить элементы с минимальными размерами $\sim 100 \text{ нм}$ [11, 12]. К сожалению, вследствие катастрофического уменьшения пути прохождения оптического излучения через зонд ближнепольного микроскопа при уменьшении его апертуры [13] ($\sim a^6$, a - диаметр апертуры) уменьшение размеров модифицируемой области при оптическом воздействии весьма проблематично. Но, как показано в [9, 10], перспективным является фототермическое взаимодействие зонда микроскопа с образцом, при котором нагреваемый оптическим излучением зонд осуществляет локальную термическую модификацию поверхности. Этот метод очень близок к модификации поверхности нагретым зондом атомно-силового микроскопа [8].

Наиболее впечатляющие успехи достигнуты в методе, использующем комбинацию сканирующего туннельного и атомно-силового микроскопов. В нем зонд удерживается вблизи поверхности с помощью атомно-

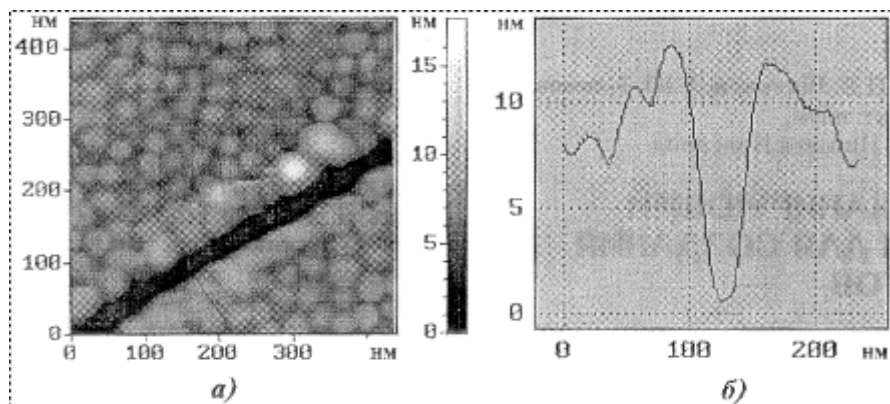


Рис. 1. Атомно-силовое изображение модифицированной структуры полимер - индий до плазмо-химического травления (а) и его рельеф вдоль линии (б)

силового взаимодействия, а модификация поверхности реализуется током, протекающим между зондом и поверхностью. Это может быть либо прямое анодное окисление образца [3, 4, 14], либо экспозиция электронного резиста [15]. Исследован процесс анодного окисления гидрогенизированного кремния [3], арсенида галлия [4], некоторых металлов [16-18] в зависимости от приложенного напряжения, времени сканирования, влажности окружающей среды. Показано, что для окисления образцов необходимо приложить напряжение -10В между зондом и образцом. Получены различные элементы с минимальными размерами 10-20 нм, изготовлены квантовые провода [19] и точки [20]. Создан ряд приборов с нанометровыми размерами активных областей, в том числе биполярный [21] и полевой [22,23] транзисторы, одноэлектронные транзисторы [24, 25], в том

числе работающих при нормальной температуре [16], и ячейка памяти на его основе [18].

В другом варианте этого метода ток, протекающий между зондом и образцом, был использован для локальной экспозиции электронного резиста [15, 26]. Полученный рисунок был применен в качестве маски для жидкостного анизотропного травления кремния и арсенида галлия, получены ярко выраженные рельефные рисунки на поверхности монокристаллов с минимальными размерами до 30 нм. Однако метод имеет ряд недостатков. В частности, он может быть применен лишь для ограниченного класса образцов, имеющих хорошую проводимость, например, для гидрогенизированного кремния, сильнолегированных ($\geq 10^{19} \text{ см}^{-3}$) полупроводников, некоторых металлов. Полученный рисунок в виде окисного слоя или экспо-

нированного резиста имеет малое отношение высоты слоя к его латеральным размерам и может быть использован в качестве маски лишь для жидкостного травления.

Нами предложен и реализован *новый метод СЗЛ*, позволяющий создавать произвольный рисунок (в виде металлических или диэлектрических нитей, точек, вытравленных в образце методом сухого травления ямок или канавок) на поверхности различных образцов (слабо- и сильнолегированных полупроводников, металлов, диэлектриков). Метод заключается в нанесении двухслойного тонкопленочного покрытия полимер-металл, непластической деформации пленки металла зондом атомно-силового микроскопа (механическая деформация) либо нагретым зондом ближнепольного оптического микроскопа (термическая деформация) и перенесении рисунка на поверхность образца с помощью плазмохимического травления полимера. Сформированная таким образом маска имеет высокое отношение ее высоты к ширине рисунка и позволяет наносить металлические или диэлектрические покрытия либо выполнять сухое травление образца с последующей взрывной литографией.

Для получения тонкого слоя полимера на образец, помещенный на центрифугу (3000-5000 об/мин), наносился раствор поликарбоната в хлороформе (~1 %). Толщина слоя поликарбоната, полученная после термической обработки при температуре 200 °С в течение 10 мин, составляла 50-100 нм в зависимости от скорости вращения центрифуги. Тонкие слои (5-10 нм) легкодеформируемых металлов (индия, олова) наносились на поверхность пленки поликарбоната методом магнетронного напыления при охлаждении подложки до температуры ~200 К. Атомно-силовое (АСМ) изображение поверхности полученной структуры приведено на рис. 1, шероховатость поверхности при указанных выше режимах не превышает 1 нм. Механические свойства такой системы позволяют проводить ее непластическую деформацию зондом атомно-силового микроскопа, действующим с силой 1-10 мкН, на

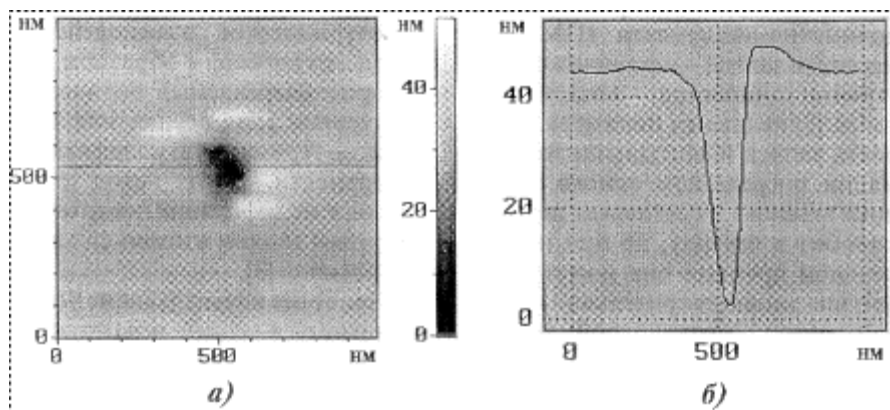


Рис. 2. Атомно-силовое изображение модифицированной структуры полимер - индий после плазмо-химического травления (а) и его рельеф вдоль линии (б)

глубину, превышающую толщину пленки металла. Эксперименты проводились на атомно-силовом микроскопе "SoIver-P4" фирмы "Нанотехнология МДТ" (Зеленоград, Россия).

Рисунок с размерами ~ 50 нм (рис. 1) был получен как в контактной, так и в тейпинг-моду. В контактной моду сила воздействия иглы кантилевера на поверхность образца поддерживается на постоянном уровне. Значение этой силы устанавливается меньше порога деформации покрытия при позиционировании зонда и превышает порог неупругой деформации покрытия в тех точках, где создается рисунок.

В тейпинг-моду кантилевер колеблется на резонансной частоте, при этом большую часть периода колебаний игла кантилевера не касается поверхности образца, и только при соударении кантилевер теряет избыток энергии, накопленный за остальную часть периода. При позиционировании зонда амплитуда колебаний поддерживается на постоянном уровне, обеспечивающем слабое недеформирующее воздействие на поверхность. В тех областях, где создается рисунок, зонд перемещается в сторону поверхности, что приводит к деформации покрытия. Тейпинг-моду, по-видимому, является более перспективной, так как при ее реализации удастся использовать кантилеверы со значительно более жесткой балкой, следовательно, перемещение зонда в сторону поверхности для неупругой деформации покрытия значительно меньше, чем в случае кантилеверов, используемых в контактной моду, что ведет к увеличению точности позиционирования. Затем структура травится в кислородной плазме для перенесения рисунка на поверхность образца с сохранением недеформируемых зондом областей. АСМ-изображение такой структуры (в этом случае виде ямки) показано на рис. 2. Здесь на вид рельефа (рис. 2, б), по-видимому, оказывает влияние форма зонда АСМ. Дело в том, что с помощью зонда АСМ, имеющего форму пирамиды, нельзя точно измерить форму узких глубоких ямок, сравнимых с его размерами. В данном случае, по нашим предположениям, рельеф должен быть шире в нижней части.

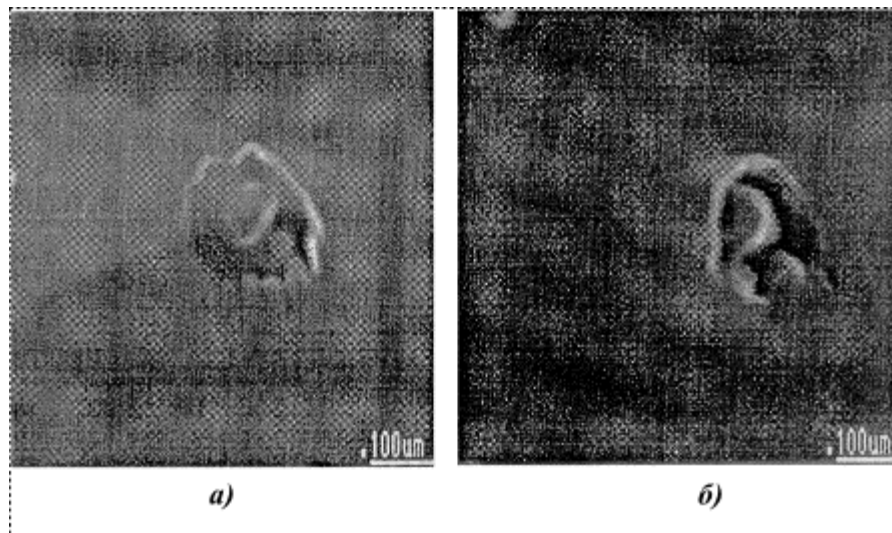


Рис. 3. Изображения одиночного металлического наноконтакта на поверхности кремния, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа:
а - нормально к поверхности; б - под углом 35° к поверхности

Созданная маска была нами использована для изготовления различных нанометровых элементов на поверхности разных образцов. В частности, была вытравлена ямка глубиной ~ 20 нм на поверхности кремния с последующим напылением металлической "точки" с латеральными размерами ~ 50 нм (рис. 3). На рис. 4 показана система периодических металлических полос с шириной ~ 80 нм и периодом 170 нм. На рис. 5 приведены вытравленные в пленке ниобия канавки глубиной 40 нм и латеральными размерами ~ 80 нм. Здесь, как и на рис. 2, б, на вид рельефа влияет форма зонда АСМ.

Неупругая деформация защитного покрытия, описанного выше, возможна также с помощью

нагретого зонда ближнепольного оптического микроскопа. Эксперименты по термической деформации проводились на созданном в Институте физики микроструктур РАН ближнепольном микроскопе [27]. Ранее [28] нами был разработан метод изготовления зондов для этого микроскопа, использующий только химическое травление с последующим нанесением пленки металла толщиной ~ 100 нм. В данных экспериментах мы использовали "утопленный" вариант зонда, в котором заостренное волокно покрывалось тонкой (10-20 нм) пленкой ванадия (рис. 6). Температура плавления индия 156°C , что ниже температуры плавления поликарбоната, зонд микроскопа мог быть нагрет без разрушения до температу-

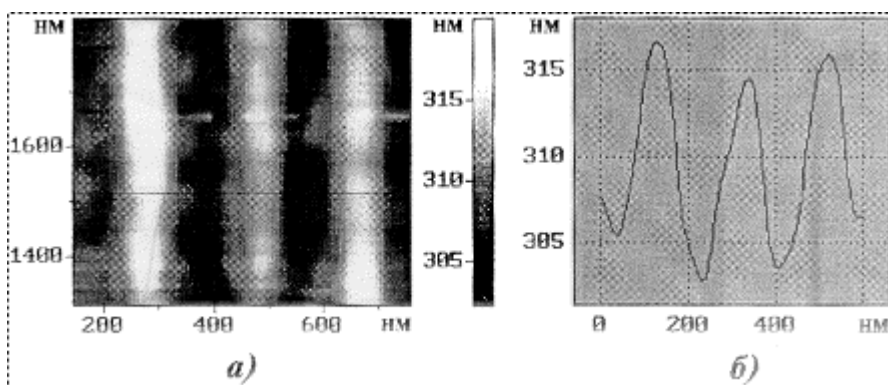


Рис. 4. АСМ — изображение металлических (Мо) наноразмерных полос на поверхности кремния (а) и рельеф вдоль линии (б)

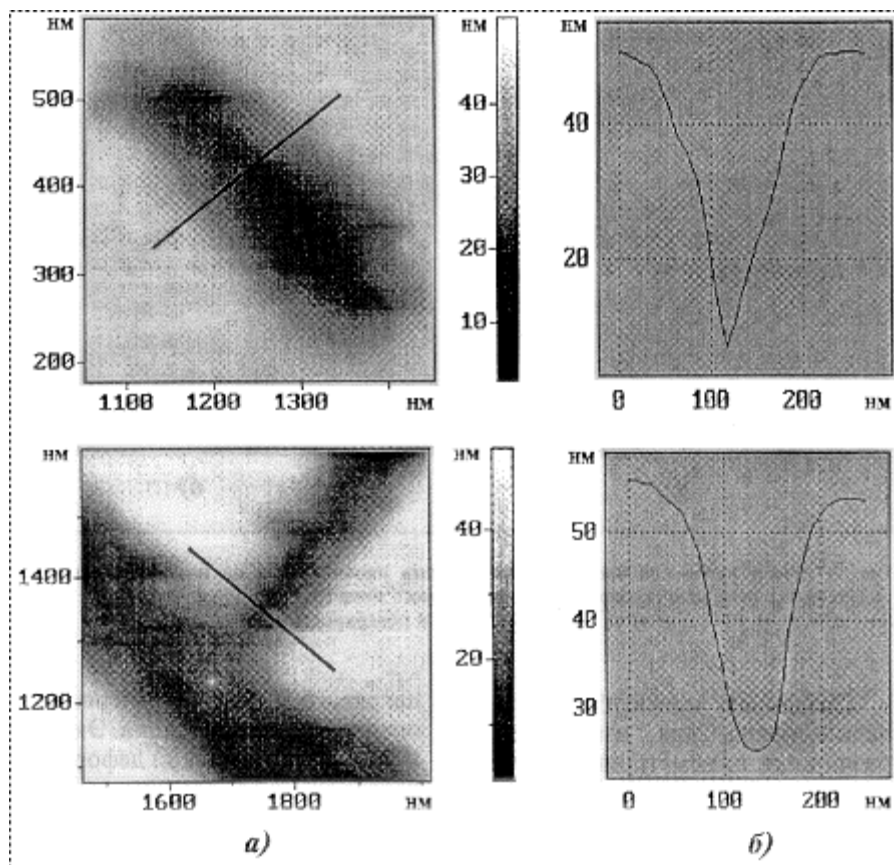


Рис. 5. АСМ - изображения наноклапавок, выправленных в пленке ниобия (а) и их рельефы вдоль линий (б)

ры $\sim 400^\circ\text{C}$. В наших экспериментах зонд нагревался до $T = 200^\circ\text{C}$ при подаче на него оптического излучения мощностью $\sim 300\text{ мВт}$. Пример такой модификации маскирующего покрытия в виде коротких тонких ($< 30\text{ нм}$) линий показан на рис. 7. Аналогичный метод модификации полимеров для целей сверхплотной записи информации (но не литографии) был использован недавно в [8, 10].

В качестве примера приложения СЗЛ нами были изготовлены наноконтакты ванадия на поверхности арсенида галлия (аналогичные приведенному на рис. 3). Их вольт-амперные характеристики (ВАХ) были измерены с помощью атомно-силового микроскопа с применением проводящих кантилеверов. Использовались кремниевые кантилеверы, покрытые проводящим слоем (карбид вольфрама). Зонд прижимался

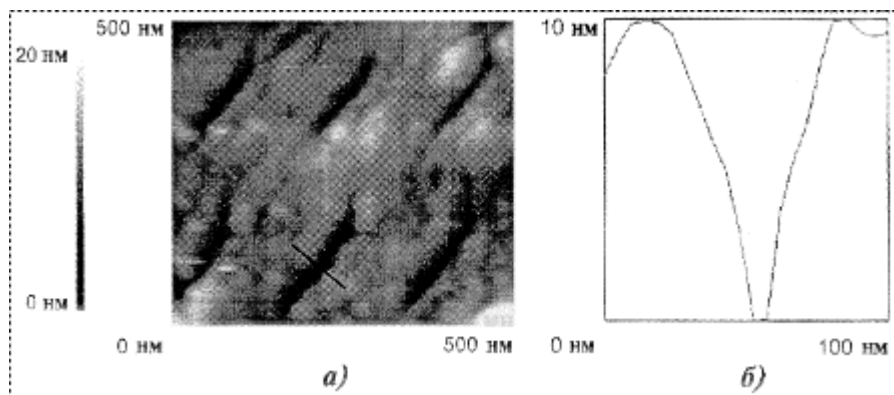


Рис. 7. АСМ - изображение структуры полимер - индий, модифицированной с помощью нагретого зонда ближнепольного оптического микроскопа (а) и его рельеф вдоль линии (б)



Рис. 6. Изображение зонда для ближнепольной термической модификации, полученное на сканирующем электронном микроскопе

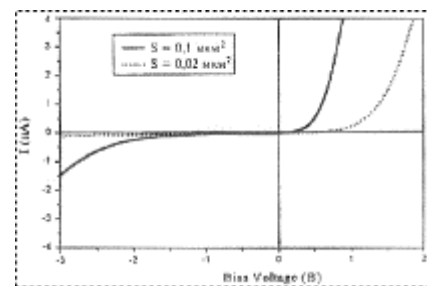


Рис. 8. Вольт-амперные характеристики барьерных наноконтактов ванадий - арсенид галлия

к наноконтакту в контактной моде АСМ, после чего измерялись ВАХ. Они имеют вид (рис. 8), характерный для барьерного контакта металл - полупроводник.

Таким образом, в статье описан метод СЗЛ, позволяющий изготавливать различные наноэлементы с характерными размерами $\sim 50\text{ нм}$ на поверхности произвольных образцов. Данный метод может найти применение при разработке и создании новых электронных приборов с нанометровыми размерами активных областей и при исследовании электронных свойств полупроводниковых нанообъектов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (00-02-16487), программы "Фундаментальные исследования и высшее образование" и Центра сканирующей зондовой микроскопии ННГУ.

Список литературы

1. J.A. Dagata, J. Schncir, H.H. Harary, C.J. Evans, M.T. Postek and J. Bennett // Appl. Phys. Lett., 56, 2001-2003 (1990).
2. K. Matsumoto, S. Takahashi, M. Ishii, M. Hoshi, A. Kurokawa, S. Ichimura and A. Ando Jpn.J. Appl. Phys., Part 1, 34, 1387-1392(1995).
3. P.A. Fontaine, E. Dubois and D. Stievenard, J. Appl. Phys., 84, 1776-1781 (1998).
4. Y. Okada, S. Amano, M. Kawabe and J.S. Harris J. Appl. Phys., 83, 7998-8001 (1998).
5. B. Klehn and U. Kunze J. Appl. Phys., 85, 3897-3903(1999).
6. P. Vettiger, M. Despont, U. Drechsler et al, Proc. Int. Conf. on Scan. Tunneling Microscopy. Seoul, 1999, p. 4.
7. E.B. Cooper, S.R. Manalis, H. Fang, H. Dai, K. Matsumoto, S.C. Minne, T. Hunt, C.F. Quate Appl. Phys. Lett., 75, 3566-3568 (1999).
8. G. Binnig, M. Despont, V. Drechsler, W. Haberle, M. Lutwyche, P. Vettiger, H.J. Mamin, B.W. Chui and T.W. Kenny, Appl. Phys. Lett., 74, 1329(1999).
9. S. Hosaka, A. Kikukawa, H. Koyanagi, T. Shintani, M. Miyamoto, K. Nakamura, K. Etoh, Nanotechnology, 8, A58 (1997).
10. D. Zeisel, B. Dutoit, V. Deckert, T. Roth and R. Zenobi, Anal. Chem., 69, 749 (1997).
11. C.C. Davis, W.A. Atia, A. Gungor, D.L. Mazzoni, S. Pilevar and I.I. Smolyaninov, Laser Physics, 7, 243-255 (1997).
12. M.K. Hemdon, R.T. Collins, R.E. Hollingsworth, P.R. Larson and M.B. Johnson, Appl. Phys., 74, 141-143(1999).
13. U. Durig, D.W. Pohl, F. Rohner, J. Appl. Phys., 59, 3318-3327(1986).
14. B. Legrand and D. Stievenard, Appl. Phys. Lett., 74, 4049-4051 (1999).
15. K. Wilder, C. Quate, D. Adderton, R. Bernstein and V. Flings, Appl. Phys. Lett., 73, 2527-2529(1998).
16. K. Matsumoto, M. Ishii, K. Segawa, Y. Oka, B.J. Vartanian and J.S. Harris, Appl. Phys. Lett., 68, 34-36 (1996).
17. T. Schmidt, R. Martel, R.L. Sandtrom, P. Avouris, Appl. Phys. Lett., 73, 2173-2175 (1998).
18. K. Matsumoto, Y. Cotoh, T. Maeda, J.A. Dagata, J.S. Harris, Appl. Phys. Lett., 76, 239-241 (2000).
19. R. Held, S. Luscher, T. Heinzel, K. Emsslin, W. Wegscheider, Appl. Phys. Lett., 75, 1134-1136(1999).
20. S. Kohmoto, H. Nakamura, T. Ishikawa, K. Asakawa, Appl. Phys. Lett., 75, 3488 - 3 490 (1999).
21. S. Richter, D. Cahen, S.R. Cohen, K. Garlsman, V. Lyakhovitskaya and Y. Manassen, Appl. Phys. Lett., 73, 1868-1870 (1998).
22. S.C. Minne, H.T. Soh, Ph. Flueckiger and C.F. Quate, Appl. Phys. Lett., 66, 703-705 (1995).
23. P.M. Campbell, E.S. Snow and P.J. McMarr, Appl. Phys. Lett., 66, 1388-1390 (1995).
24. A. Dutta, S.P. Lee, S. Hatatani, S. Oda, Appl. Phys. Lett., 75, 1422-1424 (1999).
25. S. Luscher, A. Fuhrer, R. Held, K. Ensslin, W. Wegscheider, Appl. Phys. Lett., 75, 2452-2454 (1999).
26. F.S.-S. Chien, C.-L. Wu, Y.-C. Chou, T.T. Chen, S. Gwo, W.-F. Hsiegh, Appl. Phys. Lett., 75, 2429-2431 (1999).
27. Волгунов Д.Г., Гапонов С.В., Дряхлушин В.Ф. и др. // Приборы и техника эксперимента, 1998. №2, с. 132-137.
28. Дряхлушин В.Ф., Климов А.Ю., Рогов В.В., Гусев С.А. // Приборы и техника эксперимента, 1998, №2, 138-139 с.

УДК 539.219.1

В.Б. Цомая, канд. техн.

Мурманское отделение Секции прикладных проблем при КНЦ РАН

ТЕРМОМОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Рассмотрены основные принципы нового научного направления, приводятся составы разработанных гетерогенных рабочих тел, обладающих в 100-1000 раз лучшими энергетическими показателями, чем пар и газ. Изложена физическая сущность новых способов аккумулирования и преобразования энергии. Даны возможные сферы применения термомолекулярной энергетики.

Анализ развития энергетики за последние 100-150 лет показывает, что тепловые двигатели, установки, а также ряд аккумулирующих и демпфирующих устройств в качестве рабочего тела используют пар или газ. Практически достигнут предел по накоплению и преобразованию энергии с помощью традиционных рабочих тел, и трудно ожидать заметного улучшения таких параметров, как термический КПД, энергоемкость и т.п. при решении новых технических задач.

В настоящее время ведутся работы по разработке и созданию нового гетерогенного рабочего тела (ГРТ) на основе использования поверхностных явлений в высокодисперсных системах.

Более высокие по сравнению с традиционными рабочими телами термодинамическая компактность ГРТ - энергообразующая способность единицы объема рабочего тела, отнесенная к 1 °С рабочего перепада температур в цикле — (на 2-3 порядка) и энергоемкость (на 1-2 порядка) получаются в результате того, что энергетические преобразования ГРТ основаны на зависимости потенциальной энергии межмолекулярного взаимодействия от температуры процесса, в то время как у традиционных рабочих тел (пара, газа) энергопреобразующие процессы основаны на использовании зависимости кинетической энергии хаотического движения молекул от температуры.

ГРТ представляет собой гетерогенную термодинамическую систему "жидкость—капиллярно-пористая

матрица, не смачиваемая этой жидкостью", в которой работу совершает межфазная лиофобная (несмачиваемая) развитая поверхность между жидкостью и капиллярно-пористой матрицей.

Допустим, требуется раскатать каплю воды по поверхности стола. Для этого необходимо затратить большую энергию, в результате чего произойдет развитие межфазной поверхности. Обратно в каплю жидкость соберется под действием межмолекулярных сил, при этом происходит сокращение межфазной поверхности и совершается полезная работа. Используя в качестве капиллярно-пористых матриц высокодисперсные вещества с большим объемом порового пространства и диаметром пор 5-10 нм, можно в 1 г вещества получать до нескольких тысяч квадратных метров поверхности. Таким образом, работа, совершаемая межфазной поверхностью, может достигать очень больших значений.

Разработка и создание технологий на основе термомолекулярных эффектов с использованием ГРТ являются новым шагом в развитии специальной, общепромышленной и бытовой энергетики.

В 1990 г. были успешно проведены промышленные испытания гидрокапиллярных аккумуляторов и демпферов автономного исполнительного механизма для раскрытия конструкций космического аппарата. Механизм имел в 2 раза меньшие габаритные размеры и развивал усилие в 4 раза большее, чем применяемые пружинные приводы, причем

Список литературы

1. J.A. Dagata, J. Schncir, H.H. Harary, C.J. Evans, M.T. Postek and J. Bennett // Appl. Phys. Lett., 56, 2001-2003 (1990).
2. K. Matsumoto, S. Takahashi, M. Ishii, M. Hoshi, A. Kurokawa, S. Ichimura and A. Ando Jpn.J. Appl. Phys., Part 1, 34, 1387-1392(1995).
3. P.A. Fontaine, E. Dubois and D. Stievenard, J. Appl. Phys., 84, 1776-1781 (1998).
4. Y. Okada, S. Amano, M. Kawabe and J.S. Harris J. Appl. Phys., 83, 7998-8001 (1998).
5. B. Klehn and U. Kunze J. Appl. Phys., 85, 3897-3903(1999).
6. P. Vettiger, M. Despont, U. Drechsler et al, Proc. Int. Conf. on Scan. Tunneling Microscopy. Seoul, 1999, p. 4.
7. E.B. Cooper, S.R. Manalis, H. Fang, H. Dai, K. Matsumoto, S.C. Minne, T. Hunt, C.F. Quate Appl. Phys. Lett., 75, 3566-3568 (1999).
8. G. Binnig, M. Despont, V. Drechsler, W. Haberle, M. Lutwyche, P. Vettiger, H.J. Mamin, B.W. Chui and T.W. Kenny, Appl. Phys. Lett., 74, 1329(1999).
9. S. Hosaka, A. Kikukawa, H. Koyanagi, T. Shintani, M. Miyamoto, K. Nakamura, K. Etoh, Nanotechnology, 8, A58 (1997).
10. D. Zeisel, B. Dutoit, V. Deckert, T. Roth and R. Zenobi, Anal. Chem., 69, 749 (1997).
11. C.C. Davis, W.A. Atia, A. Gungor, D.L. Mazzoni, S. Pilevar and I.I. Smolyaninov, Laser Physics, 7, 243-255 (1997).
12. M.K. Hemdon, R.T. Collins, R.E. Hollingsworth, P.R. Larson and M.B. Johnson, Appl. Phys., 74, 141-143(1999).
13. U. Durig, D.W. Pohl, F. Rohner, J. Appl. Phys., 59, 3318-3327(1986).
14. B. Legrand and D. Stievenard, Appl. Phys. Lett., 74, 4049-4051 (1999).
15. K. Wilder, C. Quate, D. Adderton, R. Bernstein and V. Flings, Appl. Phys. Lett., 73, 2527-2529(1998).
16. K. Matsumoto, M. Ishii, K. Segawa, Y. Oka, B.J. Vartanian and J.S. Harris, Appl. Phys. Lett., 68, 34-36 (1996).
17. T. Schmidt, R. Martel, R.L. Sandtrom, P. Avouris, Appl. Phys. Lett., 73, 2173-2175 (1998).
18. K. Matsumoto, Y. Cotoh, T. Maeda, J.A. Dagata, J.S. Harris, Appl. Phys. Lett., 76, 239-241 (2000).
19. R. Held, S. Luscher, T. Heinzel, K. Emsslin, W. Wegscheider, Appl. Phys. Lett., 75, 1134-1136(1999).
20. S. Kohmoto, H. Nakamura, T. Ishikawa, K. Asakawa, Appl. Phys. Lett., 75, 3488 - 3 490 (1999).
21. S. Richter, D. Cahen, S.R. Cohen, K. Garlsman, V. Lyakhovitskaya and Y. Manassen, Appl. Phys. Lett., 73, 1868-1870 (1998).
22. S.C. Minne, H.T. Soh, Ph. Flueckiger and C.F. Quate, Appl. Phys. Lett., 66, 703-705 (1995).
23. P.M. Campbell, E.S. Snow and P.J. McMarr, Appl. Phys. Lett., 66, 1388-1390 (1995).
24. A. Dutta, S.P. Lee, S. Hatatani, S. Oda, Appl. Phys. Lett., 75, 1422-1424 (1999).
25. S. Luscher, A. Fuhrer, R. Held, K. Ensslin, W. Wegscheider, Appl. Phys. Lett., 75, 2452-2454 (1999).
26. F.S.-S. Chien, C.-L. Wu, Y.-C. Chou, T.T. Chen, S. Gwo, W.-F. Hsiegh, Appl. Phys. Lett., 75, 2429-2431 (1999).
27. Волгунов Д.Г., Гапонов С.В., Дряхлушин В.Ф. и др. // Приборы и техника эксперимента, 1998. №2, с. 132-137.
28. Дряхлушин В.Ф., Климов А.Ю., Рогов В.В., Гусев С.А. // Приборы и техника эксперимента, 1998, №2, 138-139 с.

УДК 539.219.1

В.Б. Цомая, канд. техн.

Мурманское отделение Секции прикладных проблем при КНЦ РАН

ТЕРМОМОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Рассмотрены основные принципы нового научного направления, приводятся составы разработанных гетерогенных рабочих тел, обладающих в 100-1000 раз лучшими энергетическими показателями, чем пар и газ. Изложена физическая сущность новых способов аккумулирования и преобразования энергии. Даны возможные сферы применения термомолекулярной энергетики.

Анализ развития энергетики за последние 100-150 лет показывает, что тепловые двигатели, установки, а также ряд аккумулирующих и демпфирующих устройств в качестве рабочего тела используют пар или газ. Практически достигнут предел по накоплению и преобразованию энергии с помощью традиционных рабочих тел, и трудно ожидать заметного улучшения таких параметров, как термический КПД, энергоемкость и т.п. при решении новых технических задач.

В настоящее время ведутся работы по разработке и созданию нового гетерогенного рабочего тела (ГРТ) на основе использования поверхностных явлений в высокодисперсных системах.

Более высокие по сравнению с традиционными рабочими телами термодинамическая компактность ГРТ - энергообразующая способность единицы объема рабочего тела, отнесенная к 1 °С рабочего перепада температур в цикле — (на 2-3 порядка) и энергоемкость (на 1-2 порядка) получаются в результате того, что энергетические преобразования ГРТ основаны на зависимости потенциальной энергии межмолекулярного взаимодействия от температуры процесса, в то время как у традиционных рабочих тел (пара, газа) энергопреобразующие процессы основаны на использовании зависимости кинетической энергии хаотического движения молекул от температуры.

ГРТ представляет собой гетерогенную термодинамическую систему "жидкость—капиллярно-пористая

матрица, не смачиваемая этой жидкостью", в которой работу совершает межфазная лиофобная (несмачиваемая) развитая поверхность между жидкостью и капиллярно-пористой матрицей.

Допустим, требуется раскатать каплю воды по поверхности стола. Для этого необходимо затратить большую энергию, в результате чего произойдет развитие межфазной поверхности. Обратно в каплю жидкость соберется под действием межмолекулярных сил, при этом происходит сокращение межфазной поверхности и совершается полезная работа. Используя в качестве капиллярно-пористых матриц высокодисперсные вещества с большим объемом порового пространства и диаметром пор 5-10 нм, можно в 1 г вещества получать до нескольких тысяч квадратных метров поверхности. Таким образом, работа, совершаемая межфазной поверхностью, может достигать очень больших значений.

Разработка и создание технологий на основе термомолекулярных эффектов с использованием ГРТ являются новым шагом в развитии специальной, общепромышленной и бытовой энергетики.

В 1990 г. были успешно проведены промышленные испытания гидрокапиллярных аккумуляторов и демпферов автономного исполнительного механизма для раскрытия конструкций космического аппарата. Механизм имел в 2 раза меньшие габаритные размеры и развивал усилие в 4 раза большее, чем применяемые пружинные приводы, причем

усилие постоянно на всем рабочем ходе механизма. Проработаны варианты создания гидрокапиллярных двигателей с внешним теплоподводом и безфреоновых холодильников с использованием ГРТ, имеющих хладопроизводительность в 2,5 раза большую, чем традиционные. Отличительной особенностью всех термомолекулярных энергоустройств является бесшумность работы и полное отсутствие загрязнений окружающей среды.

Возможными сферами применения являются:

- новые гидрокапиллярные двигатели с КПД, равным (0.9 - 0.95) КПД цикла Карно;
- новые амортизирующие устройства для различных технических средств;
- устройства для подъема грузов с больших глубин;
- аварийные приводы и инструмент;
- катапульты;
- бесфреоновые холодильники;
- узлы стыковки и раскрытия конструкций космических аппаратов;
- кузнечно-прессовое и сварочное оборудование;
- создание сейсмостойких инженерных сооружений и защита побережий от разрушения волнами;
- высокоэффективные демпферы и амортизаторы;
- аккумулирование тепловой и механической энергии на тепловых и атомных станциях вместо гидроаккумулирующих станций;
- системы рекуперации энергии торможения на транспорте и т.д.

Повышение энергоемкости ГРТ достигается за счет подбора систем "жидкость - капиллярно-пористая матрица" с максимальным углом смачивания, увеличения дисперсности пустот и их абсолютного объема в матрице, а также применения жидкостей с повышенным значением поверхностного натяжения.

При аккумулировании тепловой энергии решающее значение принадлежит температурному коэффициенту поверхностного натяжения: чем он больше, тем выше энергоемкость ГРТ по теплоте.

В зависимости от функционального назначения энергоустройств матрица ГРТ может представлять собой либо моноблок, либо дискретные капиллярно-пористые частицы матрицы, образующие с жидкостью суспензию.

ГРТ можно перемещать с помощью электромагнитных полей. Возможны два варианта: пористая матрица содержит вкрапления ферромагнитных материалов; ГРТ помещают в гибкие оболочки, которым могут быть приданы электромагнитные свойства.

В качестве жидкого компонента ГРТ следует использовать низкотемпературные эвтектики на базе галлия, воду и водные растворы, глицерин, а также другие жидкие металлы и расплавы, не смачивающие пористые матрицы, не теряющие подвижности и не претерпевающие фазовых переходов в области температур и давлений, при которых работает устройство.

В качестве капиллярно-пористой матрицы ГРТ целесообразно применять силикагели, алюмосиликаты, силихромы, пористые стекла, оксиды алюминия, ядерные фильтры Флерова на лавсановой основе, тефлоновые пористые пленки "Дюрапор" и "Владипор", сополимер стирола, дивенилбензола и другие пористые материалы с удельной поверхностью 100- 1000 м²/г. При необходимости работы при сверхвысоких давлениях (сотни - тысячи мегапаскалей) следует применять цеолиты с максимальным объемом пор.

Все указанные вещества находят широкое применение в катализной промышленности и легко могут быть получены в необходимых количествах.

Применяя в качестве капиллярно-пористых матриц смеси из 10 - 15 порошков с известными размерами пор и капилляров, можно получать ГРТ с любым требуемым видом рабочих характеристик.

Широкие перспективы открывает применение ГРТ для аккумулирования и преобразования энергии.

При наличии избыточной механической или гидравлической энергии она может быть накоплена в виде работы изотермического обра-

зования межфазной поверхности в гидрокапиллярных аккумуляторах и затем использована для совершенствования механической работы.

При наличии избыточной тепловой энергии она может быть накоплена в гидрокапиллярных аккумуляторах в виде скрытой теплоты образования межфазной поверхности в процессе принудительного сжатия ГРТ и возвращена в систему в процессе самопроизвольного изотермического сокращения межфазной поверхности.

Поверхностная теплоемкость ГРТ соизмерима и может быть даже больше объемной теплоемкости гетерогенной системы (в зависимости от степени дисперсности пористой матрицы и природы жидкости).

Для эффективного рассеивания кинетической энергии движущихся масс целесообразно использовать гидрокапиллярные демпферы и амортизаторы с широким спектром рабочих характеристик, получаемых за счет изменения композиционного состава порошков (пористых матриц ГРТ) и за счет изменения ширины петли гистерезиса.

Для осуществления больших перестановочных усилий на борту подвижных объектов при дефиците пространства целесообразно применять компактные энергоавтономные гидрокапиллярные исполнительные механизмы.

Уникальными возможностями обладает термомолекулярный привод, в котором процесс преобразования энергии после ее накопления в системе прерывается на любой интервал времени, а замыкание цикла (рабочий ход привода) осуществляется в требуемый момент путем подвода порции теплоты к системе. В конструкции предусмотрена возможность многократного повторения циклов зарядки и рабочего хода.

В основе новых способов аккумулирования и преобразования энергии лежит использование лиофобных высокодисперсных систем "жидкость - капиллярно-пористое тело, не смачиваемое этой жидкостью" ($90^\circ < \theta < 180^\circ$). Пример такой гетерогенной системы представлен на рис. 1. Если изотермически сжать эту систему, то на $P-V$ -диаграмме

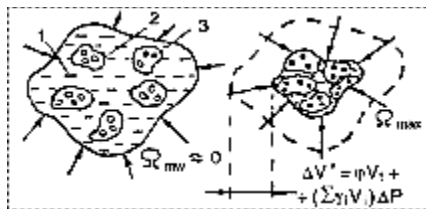


Рис. 1

(рис. 2) можно выделить деформационные участки 1-2 и 3-4, но существенное сжатие системы происходит на участке 2-3 за счет интрузии (проникновения) жидкости в лиофобное капиллярно-пористое пространство матрицы ГРТ. Изобарно-изотермическое сжатие ГРТ $\Delta V = \phi V_i = k r \Delta \Omega$, где ϕ - пористость матрицы; V_i - объем матрицы, ϕV_i - объем перового пространства; r - радиус пор и капилляров; k - коэффициент формы пор и капилляров; $\Delta \Omega$ - межфазная поверхность "жидкость-твердое тело".

Изобара-изотерма 2-3 на рис. 2 обязана тому факту, что давление в гидросистеме определяется капиллярным давлением Лапласа:

$$P_L = \frac{2\sigma \cos \theta}{r},$$

где σ - коэффициент поверхностного натяжения жидкости, поэтому ГРТ практически несжимаемо до тех пор, пока давление в системе не достигнет капиллярного. Площадь, ограниченная кривой 1-2-3-4, характеризует работу сжатия ГРТ. В частности, для участка 2-3 она имеет вид:

$$\delta W = P \Delta V = \sigma \cos \theta \Delta \Omega. \quad (1)$$

Используя широко известные капиллярно-пористые материалы

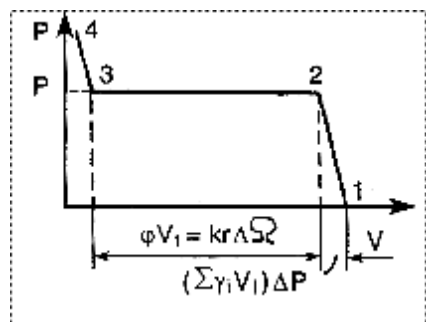


Рис. 2

(силикагели, алюмосиликаты, силихромы, пористые стекла и т.д.) с максимальной межфазной поверхностью $\Delta \Omega = 100 \div 1000 \text{ м}^2/\text{г}$ адсорбента и жидкости, не смачивающие эти матрицы (ртуть, эвтектики на базе галлия, воду, водные растворы и т.д.), можно в процессе сжатия ГРТ накапливать энергию, а в процессе самопроизвольного сокращения межфазной поверхности (расширения ГРТ) совершать полезную работу δW .

В процессе экспериментов было установлено, что изотермичность сжатия ГРТ сохраняется при высоких скоростях сжатия (время сжатия $10^{-1} - 10^{-3}$ с). Примером такой изотермы является кривая 1 на рис. 3 (монопористая матрица, т.е. $r = \text{const}$). Если увеличить темп сжатия, то $P-V$ -диаграмма приобретает существенные изменения (кривые 3-4), а при импульсной нагрузке (процесс близок к адиабатическому) ГРТ становится несжимаемым (кривая 2).

Рост давления в системе по мере увеличения темпа сжатия ГРТ (переход от кривой 3 к кривой 4) связан с тем, что процесс образования поверхности является тепломеханическим, т.е. к системе необходимо подводить не только механическую энергию δW , но и тепловую:

$$\delta q = -T \frac{d\sigma}{dT} \cos \theta \Delta \Omega, \quad (2)$$

где δq - скрытая теплота образования межфазной поверхности; $(d\sigma/dT) \cos \theta$ - удельная поверхностная энтропия; $d\sigma/dT$ - физическая константа, температурный коэффициент поверхностного натяжения, для простых жидкостей $d\sigma/dT < 0$, поэтому при развитии поверхности, когда $\Delta \Omega > 0$, требуется подвод теплоты к системе, т.е. $\delta q > 0$.

Если темп сжатия ГРТ и потребность в теплоте превышает тепловой поток к системе извне, то образование межфазной поверхности идет за счет внутренней энергии системы, т.е. за счет снижения температуры ГРТ, а это приводит, в свою очередь, к повышению поверхностного натяжения в соответствии с уравнением

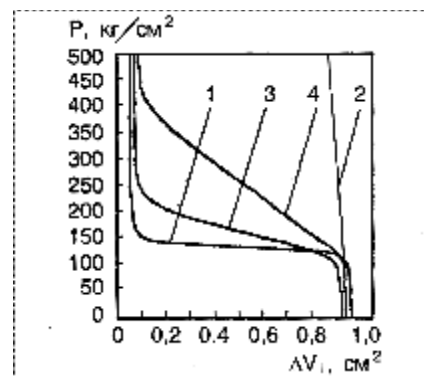


Рис. 3

$$\sigma = \sigma_0 (1 - T/T_{kp})$$

и росту капиллярного давления в системе. Это объясняет факт расположения кривой 4 на рис. 3 выше кривой 3 (большее охлаждение системы за счет принудительного высокоскоростного сжатия ГРТ внешними силами).

Адиабатическая несжимаемость ГРТ (кривая 2) объясняется теми же причинами: при мгновенном сжатии из-за отсутствия прихода теплоты извне система переохлаждается, и возросшее капиллярное давление Лапласа не позволяет внешним силам сжать ГРТ (все протекает в полном соответствии с законом Ле-Шателье-Брауна).

Соотношение между механической δW^* и тепловой δq^* энергиями, подводимыми к системе в изотермическом процессе образования межфазной поверхности, определяется температурой процесса T_{II} природой и свойствами применяемой жидкости, критической температурой T_{kp} т.е. температурой, при

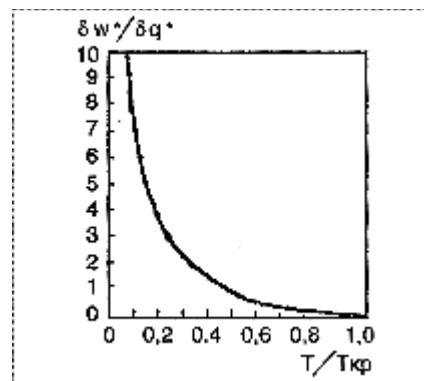


Рис. 4

которой $\sigma = 0$:

$$\frac{\sigma W^*}{\sigma q^*} = \frac{T_{кр}}{T_{II}} - 1. \quad (3)$$

Графическая интерпретация равенства (3) представлена на рис. 4. Из графика следует, что в области низких температур $T_2 (T_{пл} < T_2 < 0,5T_{кр})$ расход механической энергии σW^* на образование поверхности превышает расход тепловой σq^* , поэтому в этой области целесообразно аккумулировать механическую энергию и затем использовать ее для совершения полезной работы.

В области высоких температур $T_2 (0,5T_{кр} < T_2 < T_{кр})$ к системе необхо-

димо подводить (аккумулировать) в большем количестве уже тепловую энергию и отводить скрытую теплоту образования поверхности в обратном процессе расширения ГРТ (самопроизвольное сокращение межфазной поверхности) при температуре T_1 .

Скрытая теплота образования поверхности σq^* близка к скрытой теплоте испарения жидкости $q_{исп}$. Из молекулярной физики известно, что последняя складывается из работы дезагрегации жидкости на отдельные молекулы и работы расширения молекулярного газа. Соотношение между указанными величинами примерно 9:1. Таким образом, скры-

тая теплота образования поверхности приближается к работе дезагрегации жидкости при использовании высокодисперсных матриц капиллярно-пористых тел. Этим объясняется высокая энергоемкость гидрокапиллярных аккумуляторов механической и тепловой энергии.

Список литературы

- 1 Ерошенко В.А. Термодинамическая компактность тепловых двигателей // Изв. АН УССР, Промышленная теплотехника, 1987. №4 С 74-78
- 2 Ерошенко В.А. Теплообмен при заполнении фобных капилляров жидкостью // Изв. АН СССР, Коллоидный журнал, 1987 № 5. С 875-880.

УДК 621.3.049.7.002

Т.М. Зимина, канд. физ.-мат. наук,

В.В. Лучинин, д-р техн. наук

Е.В. Крапивина, аспирант, А.С. Ресин, аспирант, Центр Микротехнологии и диагностики, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА И ПРОБЛЕМЫ БИМЕДИЦИНСКОГО АНАЛИЗА

(Продолжение)*

Приведен обзор аналитических микросистем для биомедицинского анализа. Рассмотрены особенности технологии и функциональные элементы аналитических микросистем, промышленные образцы, примеры применения.

Основные технологии изготовления капиллярных микрочипов

КАМС могут изготавливаться из стеклянных, кварцевых, кремниевых, полимерных или иных субстратов с каналами и отверстиями для заполнения чипа рабочими растворами, введения пробы и реагентов. Металлизация используется с целью создания электродов, подводящих высокое напряжение для электрофореза и управления потоками жидкости.

К настоящему времени у нас и за рубежом разработаны и реализованы ряд основных конструкций КАМС, которые можно классифицировать как:

- полимерные (и стеклянно-полимерные) [20—22];
- стеклянные (кварцевые) [19, 22,—24];
- кремниевые [25].

В последнее время наиболее перспективными считаются полимерные технологии, поскольку они позволяют существенно снизить стоимость изделий и перейти к выпуску одноразовых капиллярных чипов,

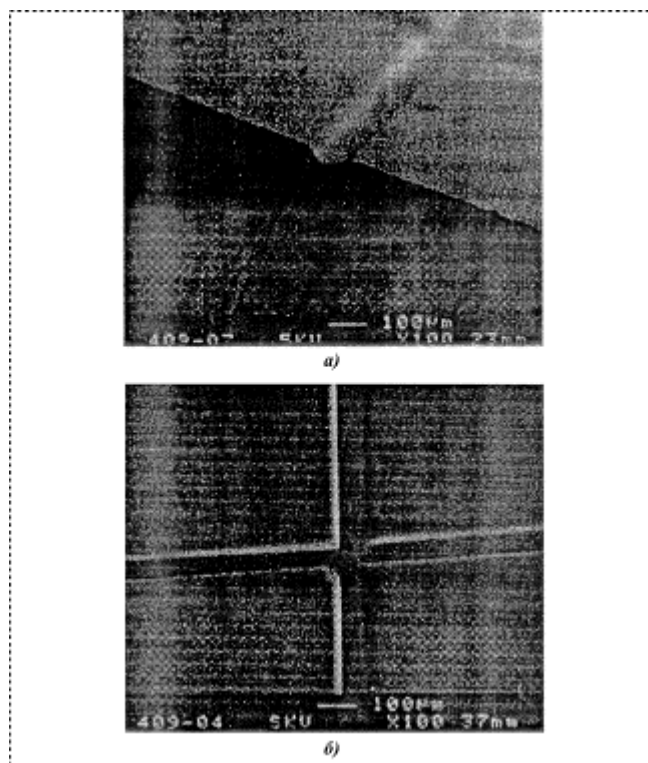


Рис. 6. Микрофотографии полиакрилового капиллярного микрочипа, полученного методом прецизионного литья: а) поперечное сечение микроанализа на акриловой пластине; б) вид сверху инфекционного креста (пресечение канала для разделения каналом для образца)

* Начало статьи — см. № 2, 2000.

которой $\sigma = 0$:

$$\frac{\sigma W^*}{\sigma q^*} = \frac{T_{кр}}{T_{II}} - 1. \quad (3)$$

Графическая интерпретация равенства (3) представлена на рис. 4. Из графика следует, что в области низких температур $T_2 (T_{II} < T_2 < 0,5T_{кр})$ расход механической энергии σW^* на образование поверхности превышает расход тепловой σq^* , поэтому в этой области целесообразно аккумулировать механическую энергию и затем использовать ее для совершения полезной работы.

В области высоких температур $T_2 (0,5T_{кр} < T_2 < T_{кр})$ к системе необхо-

димо подводить (аккумулировать) в большем количестве уже тепловую энергию и отводить скрытую теплоту образования поверхности в обратном процессе расширения ГРТ (самопроизвольное сокращение межфазной поверхности) при температуре T_1 .

Скрытая теплота образования поверхности σq^* близка к скрытой теплоте испарения жидкости $q_{исп}$. Из молекулярной физики известно, что последняя складывается из работы дезагрегации жидкости на отдельные молекулы и работы расширения молекулярного газа. Соотношение между указанными величинами примерно 9:1. Таким образом, скры-

тая теплота образования поверхности приближается к работе дезагрегации жидкости при использовании высокодисперсных матриц капиллярно-пористых тел. Этим объясняется высокая энергоемкость гидрокапиллярных аккумуляторов механической и тепловой энергии.

Список литературы

- 1 Ерошенко В.А. Термодинамическая компактность тепловых двигателей // Изв. АН УССР, Промышленная теплотехника, 1987. №4 С 74-78
- 2 Ерошенко В.А. Теплообмен при заполнении фобных капилляров жидкостью // Изв. АН СССР, Коллоидный журнал, 1987 № 5. С 875-880.

УДК 621.3.049.7.002

Т.М. Зимина, канд. физ.-мат. наук,

В.В. Лучинин, д-р техн. наук

Е.В. Крапивина, аспирант, А.С. Ресин, аспирант, Центр Микротехнологии и диагностики, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА И ПРОБЛЕМЫ БИМЕДИЦИНСКОГО АНАЛИЗА

(Продолжение)*

Приведен обзор аналитических микросистем для биомедицинского анализа. Рассмотрены особенности технологии и функциональные элементы аналитических микросистем, промышленные образцы, примеры применения.

Основные технологии изготовления капиллярных микрочипов

КАМС могут изготавливаться из стеклянных, кварцевых, кремниевых, полимерных или иных субстратов с каналами и отверстиями для заполнения чипа рабочими растворами, введения пробы и реагентов. Металлизация используется с целью создания электродов, подводящих высокое напряжение для электрофореза и управления потоками жидкости.

К настоящему времени у нас и за рубежом разработаны и реализованы ряд основных конструкций КАМС, которые можно классифицировать как:

- полимерные (и стеклянно-полимерные) [20—22];
- стеклянные (кварцевые) [19, 22,—24];
- кремниевые [25].

В последнее время наиболее перспективными считаются полимерные технологии, поскольку они позволяют существенно снизить стоимость изделий и перейти к выпуску одноразовых капиллярных чипов,

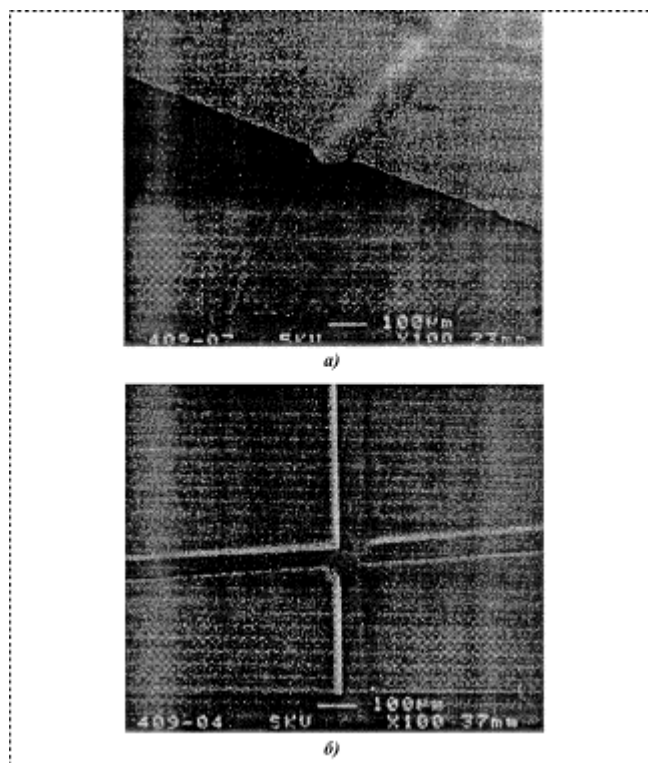


Рис. 6. Микрофотографии полиакрилового капиллярного микрочипа, полученного методом прецизионного литья: а) поперечное сечение микроанализа на акриловой пластине; б) вид сверху инфекционного креста (пресечение канала для разделения каналом для образца)

* Начало статьи — см. № 2, 2000.

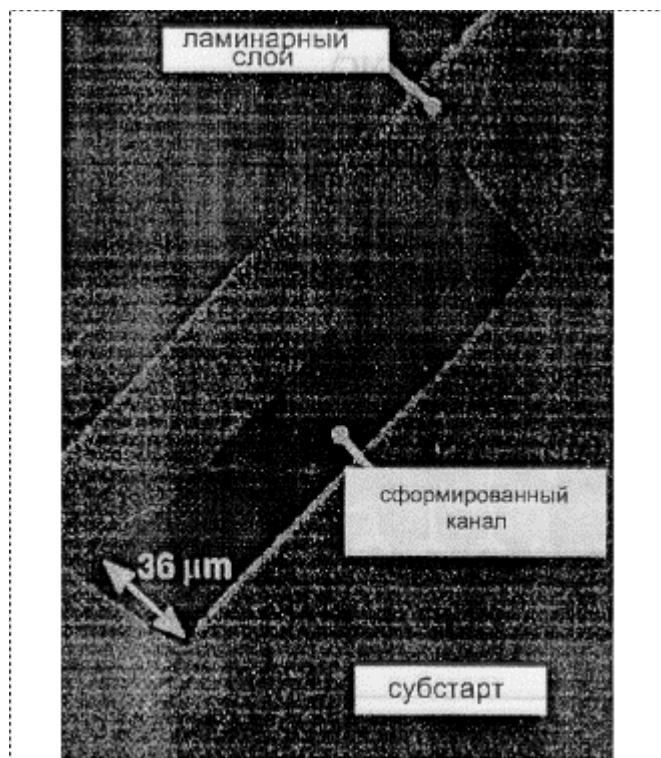


Рис. 7. Микрофотография полимерного микрочипа, изготовленного методом лазерной микрообработки поликарбонатного субстрата. Показан вход в микроканал, образовавшийся в зазоре между субстратом с каналами и полиэтилентерфталатной ламинарной пленкой, примененной для герметизации канала (увеличение 800х) [27]

для работы с "грязными" образцами при диагностике заболеваний (СПИД, гепатит).

При изготовлении полимерных чипов используются технологии прецизионного литья, микрофрезерования, каландрирования, ламинирования, лазерной микрообработки [20-22]. Показано, что полимерные субстраты могут соответствовать по качеству и геометрии поверхности требованиям, предъявляемым к КАМС. Так, на рис. 6 приведена фотография [26] планарного устройства, полученного методом литья под давлением из полиакрилата. Устройство обладает хорошими диэлектрическими свойствами и позволяет работать при напряженности электрического поля выше 1100 В/см, однако по сравнению с кремниевыми микрочипами наблюдалось плохое рассеяние тепла.

На рис. 7 представлен результат применения лазерной микрообработки для получения каналов в поликарбонатном субстрате [27]. Использовался УФ эксимерный импульсный лазер с импульсами 200 мДж. Получены также каналы в полистироле, ацетате целлюлозы, полиэтилентерфталате.

Часть II. Функциональные компоненты аналитических микросистем

В зависимости от конкретных задач архитектура микросистемы может изменяться. Например, КАМС для генного анализа включает следующие компоненты:

капиллярную систему, инжектор, микроклапаны, амплификатор (ПЦР-реактор), теплообменник, источник возбуждающего излучения и датчик флуоресценции, источник питания, микропроцессорный модуль. Рассмотрим более подробно некоторые из компонентов (табл. 2).

Компоненты микрогидравлики

Капиллярная сеть КАМС обеспечивает транспортные функции при проведении анализа за счет электроосмотического, гидростатического течений или электрофоретического движения молекул. К ним относятся дозирование, перемешивание проб и реагентов, разделение многокомпонентных проб по хроматографическому или электрофоретическому механизму. В качестве примера можно привести стеклянный чип для капиллярного электрофореза, изготовленный в Oak Ridge National Laboratories (США) и чип из полиметилметакрилата (табл. 2, 1-а и рисунки на 3-й странице обложки), изготовленный в Центре микротехнологии и диагностики СПбГЭТУ.

Топология транспортно-разделительных магистралей чип-анализатора должна обеспечивать:

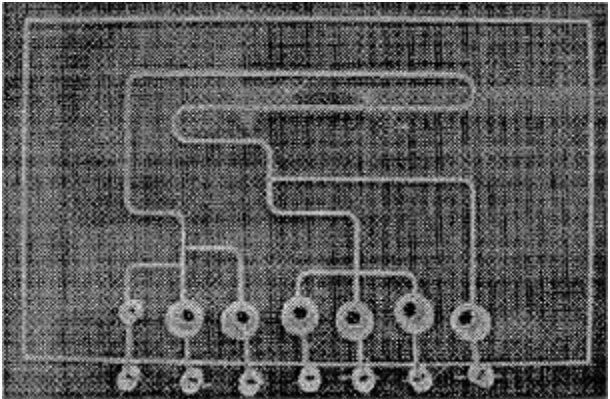
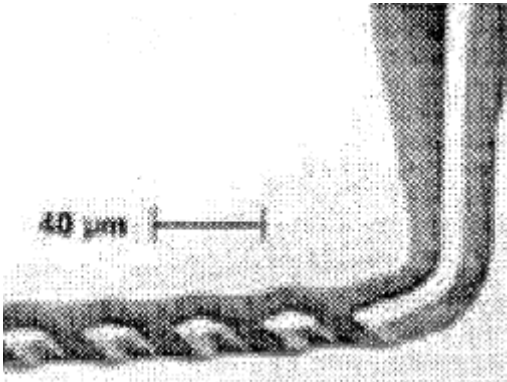
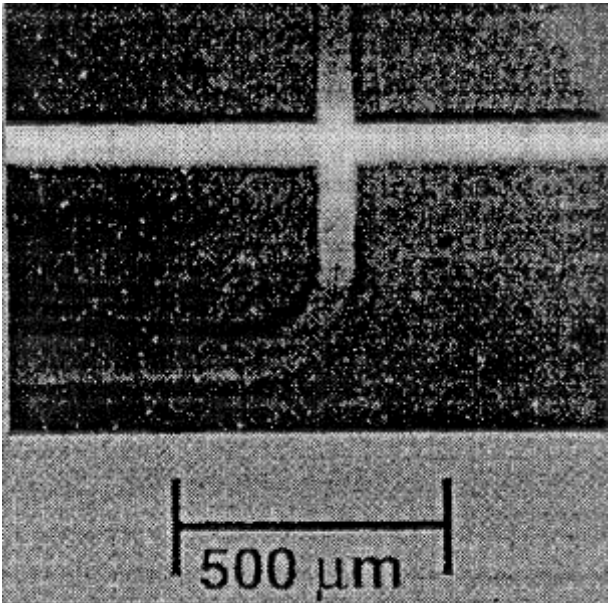
- наличие резервуаров для ввода пробы, реагента и буферного раствора;
- прямоугольное пересечение каналов, образующих "инжекционный крест", осуществляющий смешивание и дозированный ввод пробы.
- наличие разделительного канала, в котором происходит фракционирование и съем информации;
- пересечение каналов под углом при смешивании реагентов.

Типовые габариты каналов: ширина 50...120 мкм, глубина 5...20 мкм.

Одним из требований к жидкостной микросистеме является обеспечение предварительной обработки образца реагентом. Но низкие скорости потока не позволяют создать условия для конвективного смешивания и оно осуществляется посредством диффузии. Для такого перемешивания в малом объеме, а также для предотвращения внешних воздействий применяют статические смесители [29], выполненные в виде особых геометрических неоднородностей микрометрового размера в капилляре чипа (табл. 2, 1 -б). Такие смесители стимулируют образование вихревого течения, разворачивая тем самым слой жидкостей так, чтобы ускорить диффузионный обмен между ними. Принцип образования вихрей основан на создании любой преграды для побуждения вращения потока вокруг оси направления движения.

Компоненты, осуществляющие ввод дозированного объема пробы и реагентов, могут быть выполнены в виде "инжекционного креста" (табл. 2, 1 -в), т.е. пересечения каналов, которое позволяет осуществлять дозированный ввод пробы в разделительный капилляр путем электрического регулирования направления потоков [30].

Компоненты аналитических систем на основе МСТ (КАМС)

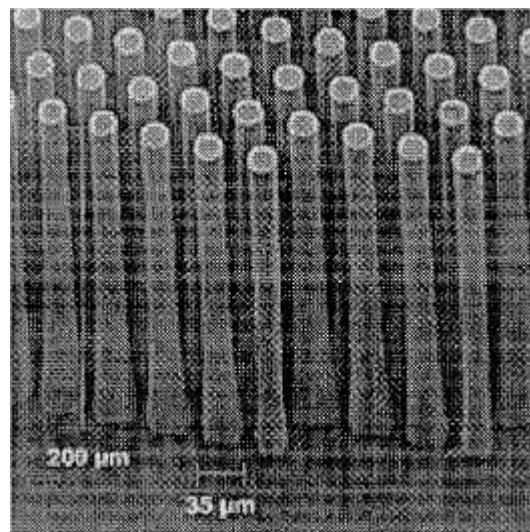
Функциональные компоненты и их применение	Конструкторское решение
1. Компоненты микрогидравлики	
а. Транспортно-разделительная капиллярная система на полимерном чипе (Центр микротехнологии и диагностики СПбГЭТУ). Применение. Электрофоретический анализ проб (пептидов, белков, аминокислот, фрагментов ДНК), иммуноанализ.	
б. Статические смесители [29]. Применение. Повышение эффективности смешивания при потоочно-инжекционном анализе, образовании ферментных комплексов, связывании с флуоресцентными метками	
в. Дозатор "инжекционный крест" [30]. Применение. Дозированный вывод пробы в разделительный канал.	

2. Концентрирующие компоненты [31]

а. Матрица микроструктур с высокой площадью поверхности.

Применение.

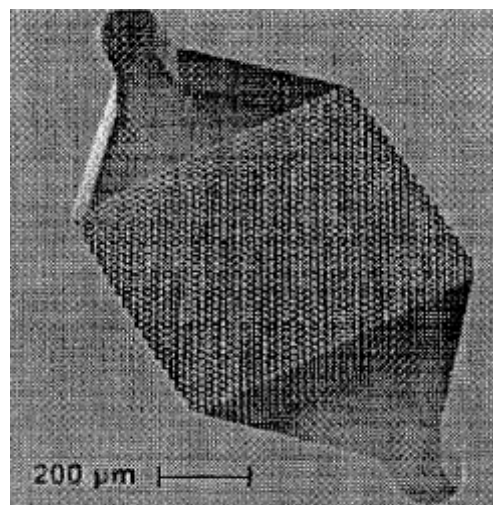
Экстрагирование, очистка и концентрирование ДНК из биологических проб.



б. Микрочип, содержащий матрицу микроструктур с высокой площадью поверхности.

Применение.

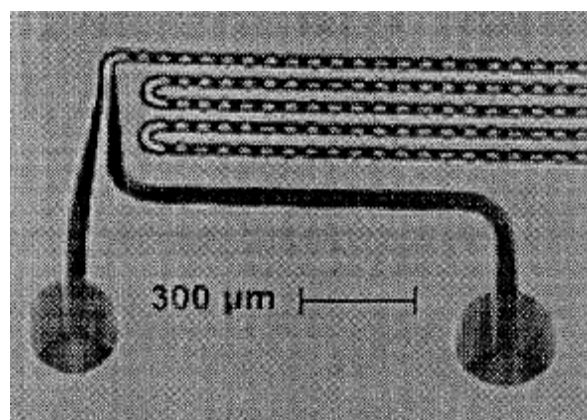
Экстрагирование, очистка и концентрирование ДНК из биологических проб.



в. Электронная фотография поверхности чипа для экстракции ДНК из биологической пробы.

Применение.

Экстрагирование, очистка и концентрирование ДНК из биологической пробы.

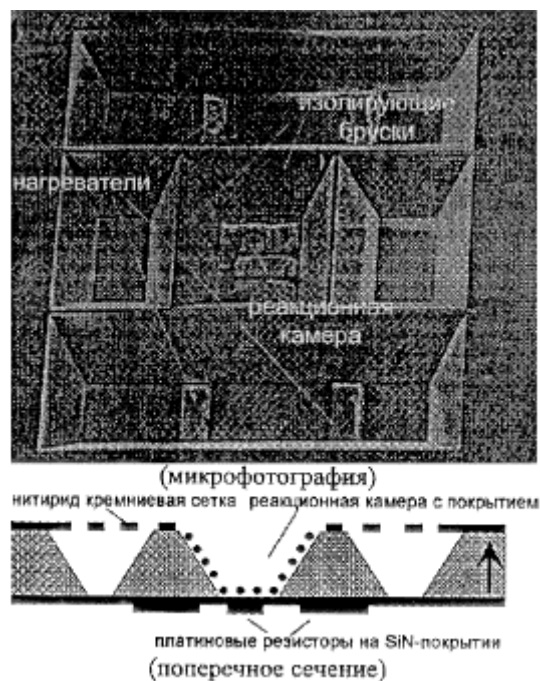


3. Компоненты термообработки

а. Реакционная микрокамера [33].

Применение.

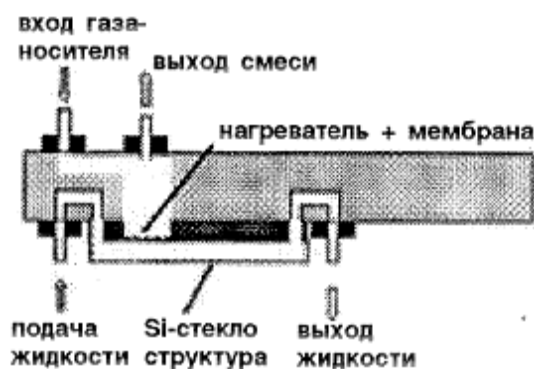
Амплификация нуклеиновых кислот с помощью полимеразной цепной реакции.



б. Микроиспаритель [34].

Применение.

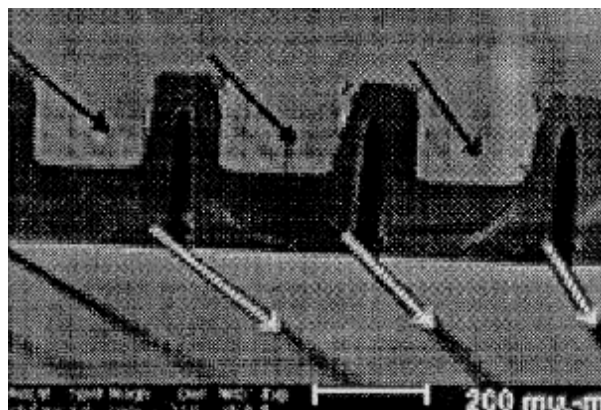
Испарение жидких компонентов в газовый носитель.



в. Теплообменник [35].

Применение.

Низкоинерционный газовый теплообменник.



4. Микронасосы

а. Микронасос с пьезоэлектрическим активатором [36].

Применение.

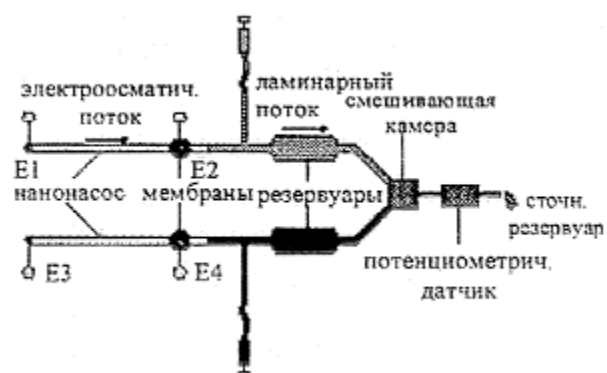
Дозированный ввод малых объемов компонентов.



б. Микроаналитическая система для объемного титрования с электроосмотическим насосом [37].

Применение.

Ввод пробы в систему для объемного титрования с постоянной скоростью и высокой степенью равномерности.



5. Контрольно-измерительные датчики

а. Пьезоэлектрический микромембранный резонатор [38].

Применение.

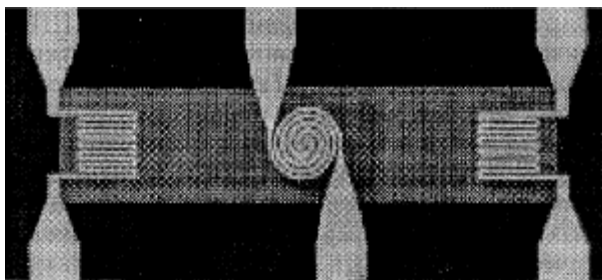
Определение плотности и вязкости компонентов в каналах микроаналитической системы.



б. Температурный датчик потока [39].

Применение.

Измерение скорости потока компонентов в каналах микроаналитической системы.



Концентрирующие компоненты

Одно из следствий миниатюризации - малые объемы образца. Это может быть как существенным преимуществом, например, в случае клинического мониторинга, так и создавать определенные проблемы, например, приводить к недостаточной чувствительности детектирования. Объем образца, необходимый для того, чтобы можно было провести детектирование, определяется следующим выражением [31]:

$$V_{обп} = \frac{1}{hN_A c}, \quad (5)$$

где h - эффективность используемого сенсора ($0 \leq h \leq 1$); N_A - число Авогадро; c - концентрация анализируемого вещества (моль/л). Иными словами, необходимый объем образца определяется как эффективностью сенсора, так и концентрацией детектируемого вещества.

Manz A. et al. [32] проанализировали возможности использования очень малых объемов образца и пришли к выводу, что использование микроаналитической техники возможно при решении многих задач диагностики, так как ряд диагностически значимых соединений присутствуют в пробах в концентрациях от 10^8 до 10^{21} ед/мл и, исходя из формулы (5), могут детектироваться при объеме образца в пределах $10^{-12} \dots 10^{-6}$ л. Однако большинство диагностически значимых веществ присутствуют в пробе в более низких концентрациях (от нескольких единиц до 10^7 ед/мл) и их детектирование выходит за пределы области теоретически достижимой чувствительности [32]. Эта проблема решается использованием концентраторов. Одно из решений - создание микроструктур с высокой площадью поверхности для концентрации ДНК [31]. В табл. 2, 2-а представлена электронная микрофотография поверхности для захвата ДНК на основе оксидированного кремния, изготовленной методом глубокого реактивного ионного травления.

Экстрагирование, очистка и концентрирование нуклеиновых кислот из сложных биологических образцов являются первым шагом в геномном анализе. Этот шаг весьма важен, так как нуклеиновая кислота в любом живом организме надежно защищена внутри клетки. При разрушении клетки (клеточный лизис) ее нуклеиновая кислота переходит в раствор, где могут присутствовать другие биологические молекулы, например, белки и комплексы металлов (например, Fe^{2+} гемоглобина), которые связывают нуклеиновую кислоту и ингибируют полимеразную цепную реакцию (ПЦР) амплификации. Поэтому нуклеиновая кислота должна быть изолирована, а ингибиторы смыты. При протекании образца через матрицу таких микроструктур ДНК, растворенная в образце, связывается с поверхностью микроструктур, концентрируется там и затем может быть вымыта специальным раствором значительно меньшего объема. Непрерывный поток жидкого биологического препарата сквозь матрицу таких концентраторов (табл. 2, 2-б, 2-в) приводит к постепенному накоплению нуклеиновой кислоты на больших площадях SiO_2 -поверхности.

Компоненты термообработки (термоциклирования)

Представленный подход к МАС позволяет решать многие задачи, связанные с термической обработкой образца. Например, метод амплификации ДНК путем проведения ПЦР требует циклического нагрева и охлаждения образца. Высокая тепловая изоляция и низкая масса, достижимые благодаря миниатюризации тепловых компонентов жидкостных систем, могут значительно уменьшить требуемую мощность и значения тепловых констант системы и ускорить процесс термоциклирования при проведении ПЦР. В процессе проведения ПЦР смесь образца с набором специальных ПЦР-реагентов подвергается режиму циклического изменения температуры, при котором требуемый участок ДНК удваивается в течение каждого температурного цикла. Для эффективного и быстрого переноса теплоты желательно иметь систему с низкой теплоемкостью, которая обеспечивает быстрый нагрев жидкости и быстрое ее охлаждение. В качестве примера можно привести кремниевую микрокамеру для амплификации ДНК (табл. 2,3-а) [33]. Реакционная камера термически изолирована от субстрата с помощью четырех "брусков". В качестве нагревателей используются резистивные элементы, нанесенные по бокам реакционной камеры. Они передают теплоту непосредственно к кремниевым стенкам микрокамеры. Температурным датчиком служит платиновый резистор, нанесенный на внешнюю сторону дна камеры. Во время стадии охлаждения теплота передается из камеры к подложке, которая имеет постоянную низкую температуру. Система характеризуется термической временной постоянной

$$\tau = R_t C_t, \quad (6)$$

где C_t - теплоемкость камеры; R_t - термическое сопротивление между камерой и подложкой. Теплоемкость камеры определяется соотношением

$$C_t = \rho V, \quad (7)$$

где ρ , c - плотность и удельная теплоемкость содержимого камеры соответственно; V - объем кремниевой камеры.

Термическое сопротивление между камерой и окружающим субстратом определяется соотношением

$$R_t = L/(4\lambda A), \quad (8)$$

где λ - теплопроводность кремния, A - поперечное сечение брусков, L - длина брусков. В камере такой конструкции τ может быть порядка долей секунды.

Для решения определенных задач аналитические микросистемы могут содержать и другие компоненты термообработки, такие как микроиспарители, теплообменники. В табл. 2 представлены схема микроиспарителя (3-б) [34] и параллельного проточного теплообменника (3-в) [35], изготовленных методами микротехнологии.

Микронасосы

Одним из важных компонентов КАМС являются микронасосы, необходимые для транспортирования образцов и реагентов. Для доставки небольших количеств пробы в локализованный участок используются различные типы и конструкции микронасосов. В табл. 2, 4-а представлена схема пьезоэлектрического микронасоса [36]. В кремниевом субстрате вытравливаются небольшая полость и каналы. Затем к кремнию анодированием прикрепляется тонкая стеклянная мембрана, герметизируя эту полость и формируя резервуар с узкими выходным и входным каналами. Далее входное отверстие погружается в жидкость, которая за счет капиллярного эффекта поднимается в резервуар до тех пор, пока не достигнет конца выходного канала. Когда электрическое поле приложено к пьезоэлектрическому элементу, соединенному со стеклянной мембраной, мембрана прогибается в полость и вытесняет жидкость. Насосы могут работать с частотой до нескольких килогерц и образовывать капельки жидкости объемом 100 пл.

Для систем проточного инъекционного анализа, капиллярного электрофореза и хроматографии постоянная скорость потока и его равномерность являются необходимыми требованиями. В табл. 2, 4-б представлено схематическое изображение КАМС, содержащего микронасосы с электроосмотическим принципом действия для осуществления процедуры объемного титрования [37]. Электроосмотический поток между электродами E1 и E2 осуществляет доставку раствора образца в смешивающую камеру, в то время как второй поток между электродами E3 и E4 откачивает оттитрованный раствор. В равновесном состоянии, т.е. без внешнего гидростатического давления, электроосмотическое давление, создаваемое таким насосом, описывается отношением:

$$\Delta p = \frac{8\mu_{eo}\eta L}{r_h^2} E, \quad (9)$$

где μ_{eo} - электроосмотическая подвижность; η - вязкость; L - длина микроканала насоса; E - напряженность электрического поля; r_h - эффективный радиус микроканала.

Объемная скорость потока в канале может быть найдена из соотношения

$$Q = \frac{\sqrt{R_n^2 + \frac{16\rho\eta\mu_{eo}LE}{A_{вых}^2 r_h^2}} - R_n}{\frac{\rho}{A_{вых}^2}}, \quad (10)$$

где R_n - гидравлическое сопротивление канала; ρ - плотность жидкости; $A_{вых}$ - поперечное сечение канала.

Контрольно-измерительные датчики

Кроме представленных компонентов, значительный интерес представляет интегрирование в КАМС различ-

ных анализирующих датчиков: скорости потока, pH, ионной силы, вязкости, оптической плотности и др.

В табл. 2, 5-а представлена схема пьезоэлектрического микромембранного резонатора для определения плотности и вязкости жидкости [38]. Резонатор состоит из монокристаллического Si-слоя толщиной 4,6 или 6,6 мкм, покрытого слоем SiO₂ толщиной 0,1 мкм. Структура типа сэндвича (0,6 мкм Al; 2,4 мкм ZnO и 0,3 мкм Al) формирует электрод заземления, пьезоэлектрический слой и электроды возбуждения и детектирования. Центральный электрод используется для возбуждения поперечных вибраций мембраны, в то время как электрод вдоль края мембраны применяется для детектирования вибрации. Жидкость находится в контакте с обратной стороной мембраны, изменяя частоту и добротность этой колебательной системы. По этим параметрам определяют вязкость и плотность жидкости.

В табл. 2, 5-б представлено изображение термического датчика потока [39]. Датчик состоит из нагревателя в виде спирали и двух термозондов в виде спиралей прямоугольной формы, расположенных симметрично по бокам от нагревателя. Датчик находится на дне проточного канала, один термозонд расположен выше по течению канала, другой - ниже. Датчик измеряет зависящую от скорости потока конвективную теплопередачу от нагревателя через поток к двум термозондам. Используя различные методы температурной модуляции, можно достичь высокой точности измерения и независимости от возмущений.

Датчики и другие компоненты, интегрируемые в микроаналитические системы, могут иметь разнообразные конструкторские решения и использовать различные принципы действия.

Примеры интеграции различных компонентов в единую микроаналитическую систему

Понятно, что интеграция в единое устройство различных компонентов является важной задачей для разработчиков микроаналитических систем и определяется функциональным назначением создаваемой системы. На рис. 8 представлена одна из возможных реализаций капиллярной микроаналитической системы LabChip, разработанная компанией "Caliper Technologies". Капиллярная система выполнена с помощью технологии фотолитографии и жидкостного травления. Ширина каналов 70 мкм, глубина 10 мкм.

Фирмой продуман и разработан пользовательский интерфейс, связываю-

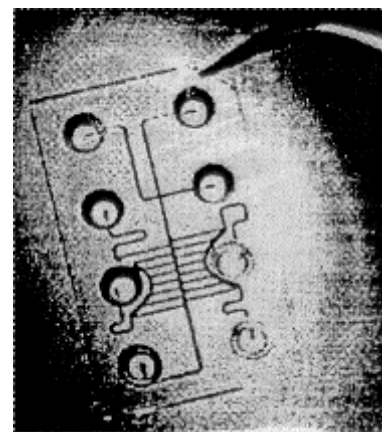


Рис. 8. Реализация капиллярной системы LabChip ("Caliper Technologies", 1998)

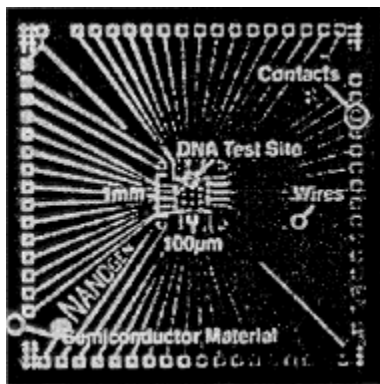


Рис. 9. фотография микрочипа фирмы Nanogen и системы электрических контактов

вводится специальный гель, служащий молекулярным ситом). Получаемый уровень разрешения составляет одну пару оснований.

Примером успешного осуществления интеграции различных компонентов в логически завершённую автоматизированную систему является устройство, разработанное компанией "Nanogen Inc". Данное устройство включает в себя одноразовый картридж, содержащий полупроводниковый микрочип (рис. 9) и микропроцессорную систему для управления и съёма информации. Устройство позволяет проводить анализ образцов ДНК посредством гибридизации (так называемое секвенирование посредством гибридизации, SBH). Микрочип в определенных местах покрывается специальным проницаемым слоем, который образует ряд "тестовых площадок" на поверхности чипа диаметром около 80 мкм (рис. 10). На каждой тестовой площадке чипа синтезируются олигонуклеотиды с известной последовательностью. Размер чипа с контактными дорожками от активной области (всего 25 электродов) 1 см×1 см. Разрабатывается чип с 100 и 400 тестовыми участками. Размер активной области 1 мм².

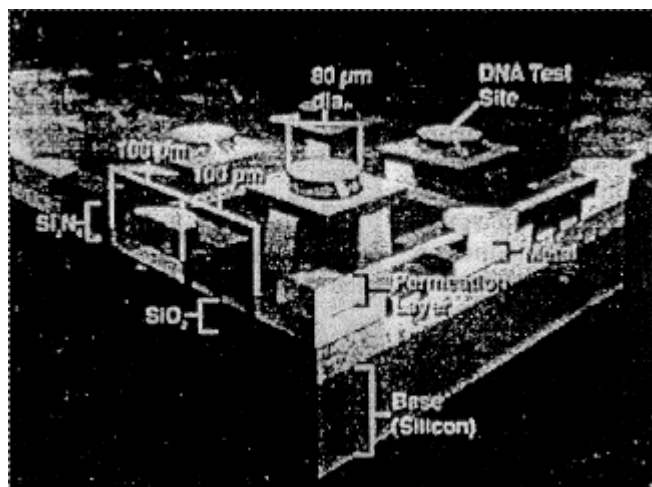


Рис. 10. Схематическое изображение гибридно-интегрального аналитического микрочипа фирмы "Nanogen"

Так как возможен синтез различных олигонуклеотидов на разных тестовых площадках, и независимый потенциал может быть подан к каждой площадке, то возможно проведение комплексного и параллельного анализа.

Микрочип вставляется в полимерный одноразовый картридж, который содержит специальные каналы и резервуары для ввода и вывода реагентов, их промывки, электрические соединения, которые связывают чип с системой управления.

Автоматическая система съёма информации состоит из высокочувствительного лазерного флуоресцентного сканера для детектирования связанных молекул; флюидной системы, осуществляющей перемещение реагентов и пробы, а также производящей процессы промывки чипа и картриджа; компьютерного обеспечения, осуществляющего выбор режима анализа, контроль за проведением детектирования, обработку данных.

Оператор просто вставляет картридж, содержащий тестируемый образец в устройство. Затем все процессы осуществляются автоматически. 96-канальное устройство для капиллярного электрофореза, выпущенное фирмой IMM, позволяет проводить параллельный анализ образцов для массового скрининга новых лекарственных препаратов. Другая сверхвысокопроизводительная система представлена недавно фирмой Caliper. Эта система разработана специально для фармацевтических компаний.

Часть III. Состояние промышленных разработок

Революция в биомедицинском анализе, связанная с использованием аналитических микрочипов, вызвала определенный "ажиотаж" в области аналитического приборостроения, обеспечивающего биохимию, геномный анализ и диагностику, что привело к возникновению целого ряда специализированных приборостроительных фирм (табл. 3). С 1993 г. по настоящее время в США создано более десятка компаний в развитие которых за это время (по данным пресс-релизов этих фирм) вложено около 400 млн долларов из различных источников, причем примерно половина средств обеспечена государством.

В области матричных чипов (или гибридизационных чипов) наиболее "старыми" фирмами являются "Affimetrix" и "Nanogen" (Калифорния, США), созданные в 1993 г. Фирма "Affimetrix" разрабатывает исключительно гибридизационные чипы для анализа ДНК. К настоящему времени фирмой "Affimetrix" создана аналитическая система GeneChip Integrated System, которая автоматически вводит и анализирует целевую нуклеиновую кислоту (независимо может исследовать четыре образца), фокусирует возбуждающее излучение в 3-мкм точках в каждой из ячеек матрицы. Изображение матрицы высокого разрешения генерируется в реальном времени и записывается в файл первичных данных, которые обрабатываются и могут легко переводиться в другие информационные системы.

Технологический профиль ведущих фирм, реализующих МСТ-концепции в биомедицинском анализе

Название и расположение фирмы	Основные направления работы и технологии	Продукция
"Caliper Technologies" (США)	Лаборатории на чипе. Системы для высокопроизводительного скрининга для разработки лекарственных препаратов, лечения и выполнения более дешевых биологических и генетических исследований. Микрофлюидные капиллярные стеклянные и полимерные чипы, которые функционируют как интегральные схемы. Они работают с жидкими фазами, содержащими ДНК, белки или клетки, как полупроводники работают с электронами. Это ускоряет процессы анализа	LabChip™ systems: системы для высокопроизводительного скрининга с анализом данных и сохранением в базах данных для пользователей. Agilent 2100 Bioanalyzer. Первая персональная аналитическая система, состоящая из Agilent 2100 Bioanalyzer и технологии LabChip. High Throughput Screening System: высокопроизводительная система скрининга, использующая чипы с нанолитровым объемом; используется менно различных чипов для фармакологических анализов
"Orchid Biocomputers" (США)	Технологии, схожие с работой компьютерных чипов для создания микроскопических станций по управлению жидкостями для разработки лекарств. Чипы проводят тысячи химических реакций одновременно. Они применяются вместе с комбинаторной химией и высокопроизводительным анализом. Применение: параллелизация; микрофабрикация для создания трехмерных структур реакторов и флюидных транспортных каналов; планарные процессы; микросенсорные линейки для мониторинга реакций	The 144 Work Station - лабораторная модель. SNP stream. SAGIAN Core System
"Cepheid" (США)	Анализ патогенных факторов, а также ДНК, крови, мочи, тканей, пищи. Аминокислотный анализ. Высокопроизводительные переносные анализаторы для солдат. Технологии PCR в микроварианте. Полностью автоматизированные анализаторы ДНК. Переносной прибор, который может быть использован в полевых условиях. Быстрые химические реакторы	I-CORE™ - высокопроизводительные реакционные трубки для PCR. Smart Cycler™ 8-канальная приставка, которая испытывается в лабораториях. microBE™ - портативный прибор. microDiagnostics™
"Affimetrix" (США)	Высокоскоростные системы анализа генной информации, ее обработки, систематизации в базах данных. VLSIPS Микрочип для изучения мутаций мембранного гена регулятора человеческого цистического фиброза (CFTR) с использованием реакции мультиплексной Polymerase Chain Reaction (PCR) и системы GeneChip Микротехнологии, гибридизационные чипы, компьютерные программы для систематизации данных, флюидика	GeneChip Instrument System: станция флюидики сканер генных матриц рабочая станция информационная система (лабораторная система для работы с информацией, система поиска данных по экспрессии). Чипы: GeneChip p53, CYP450
"Hyseq" (США)	Открытие генов. Лицензирование генов. Открытие полиморфизма. Ускорение молекулярных процессов. Мультифункциональность анализа одной пробы. Гибкая архитектура, позволяющая варьировать функциональность матриц. SBH (сиквенирование путем гибридизации) ¹ . Высокая производительность (1М образцов/месяц). Создание библиотек генов. Высокая точность сиквенирования. Универсальные ДНК микроматрицы, разработанные совместно с Перкин-Элмер	HyChip System - процесс для исследования последовательности ДНК с 1024 5-мерными олигонуклеотидами. HyGnostics Platform
"Nanogen" (США)	Генные исследования с использованием чипов с открытой архитектурой. Диагностика инфекционных заболеваний и фармакогенетика. Технология, интегрирующая микроэлектронику и молекулярную биологию на патентованных микрочипах. Используется активная микроэлектроника для транспортирования и концентрации заряженных молекул на специальных активных площадках в полупроводниковом микрочипе. Ключевые партнеры - Becton Dickinson по диагностике инфекционных заболеваний, Elan по геному анализу и Hoechst AG по разработке лекарств	Nanogen - полностью автоматизированный прибор. Состоит из высокочувствительного лазерного флюоресцентного сканера (сканирование матриц с 100 точками за 2 минуты, флюоресценция детектируется от менее чем 500 молекул) и жидкостной системы, с полностью автоматизированным движением реагентов на одноразовом чипе. Включает прецизионные шприцевые микронасосы, держатель чипа и жидкостные коммуникации, компьютер и программу для управления анализом и обработки данных

¹SBH - гибридизация меченых проб ДНК с известной последовательностью и неизвестных проб ДНК. По завершению процесса гибридизации присоединившиеся последовательности могут быть расшифрованы или получено их "факсимиле", которое может быть помещено в библиотеку генов, для более поздней расшифровки.

Название и расположение фирмы	Основные направления работы и технологии	Продукция
"Aura Dagnostics" (Великобритания)	Микрофлюидика	
"ACLARA" (США)	Микрогидравлические устройства для генного анализа, мониторинга лекарств, клинической диагностики. Активная микрофлюидика и интегральная химическая переработка. Полимерные чипы. Разделение в полимерных чипах	LabCard CHIP-PCR CHIP-electrophoresis
"Aurora Biosciences Corporation" (США)	Компьютерное управление процессом ультравысокоскоростного скрининга (включая обычные 96-и 384-ячеечные блоки). Микрофлюидика для быстрой доставки. Флюоресцентный анализ. Система генного анализа с репортером на основе <i>b</i> -лактамазы. Полностью автоматизированные высокопроизводительные системы скрининга (1000000 компонентов), 100000 в день для первичного скрининга и 2000 для повторного скрининга	UHTSS - ультравысокопроизводительная система скрининга (завершение в 2000 г.) NanoPlates - платформа для скрининга с 3456 миниатюрными ячейками. К ним станция микрофлюидики, флюоресцентный детектор, информационная система
"Microtech" (Великобритания)	Концепция биофабрики на чипе. Работа на стыке биологии и микроэлектроники. Использование электроосмотической флюидики для анализа клеток, микроорганизмов и других биочастиц (бактерий, паразитов, вирусов, хромосом, биомакромолекул - ДНК и белков), синтетических частиц. Диэлектрофорез. Электроротация. Диэлектрофорез с плавающей волной. Лазерные технологии. Анализ электрических полей. Цифровой процессинг изображений. Применение неоднородных полей, помодомоторных сил в воздействии на частицы	Анализаторы на основе электроротации. Анализатор микробиологических загрязнений пищи

Создана информационная система, включающая алгоритмы интерпретации первичной информации и связи данных с другими источниками генетической информации. Такие чипы применяются для анализа экспрессии, генотипирования и диагностики болезней. С 1996 г. компания активно сотрудничает с фармацевтическими фирмами по созданию стандартных методик генного анализа по изучению рака - ген p53 (рак груди, кишечника, яичников и других органов); созданию матриц для определения *N. influenzae*, *S. pneumoniae*; идентификации бактерий и изучению нечувствительности к антибиотикам; созданию тестов для клинической диагностики ВИЧ и его генных вариаций, новых баз данных и служб по изучению специфицированных болезней; исследованию корреляций между мутациями и ВИЧ вирусом. К 1997 г. уже объявлено о выпуске первого коммерческого продукта по генной диагностике мутаций, который полностью читает ген p53 сепрессанта опухолей. Объявлено о выпуске коммерческого набора для лабораторного анализа цитохрома P450 (CYP450).

К 1998 г. объявлен выпуск расширенного портфеля продуктов GeneChip, включая матрицу высокой плотности, позволяющую анализировать уровни экспрессии 30000 генов и последовательностей и более 40000 человеческих генов.

"Nanogen" развивает технологию, интегрирующую микроэлектронику и молекулярную биологию на патентованных микрочипах. Эта фирма специализируется в генных исследованиях, используя возможности открытой архитектуры чипов. Этой фирме удалось к настоящему времени создать опытный образец автоматизированного прибора с высокочувствительным лазерным флюоресцентным сканером, где используются программы с распознаванием образов. Прибор проводит сканирование матриц с 100 точками за 2 мин. Флюоресценция детектируется при наличии не менее чем 500 молекул. Жидкостная система контролирует ввод пробы и промывку, осуществляя полностью автоматизированное движение реагентов на одноразовом чипе.

Продукция фирмы "HySeq" - это HyChip System - универсальные матрицы, разработанные совместно с "Perckin-Elmer", для исследования последовательности ДНК с 1024 5-мерными олигонуклеотидами. Система HyGnostics Platform создана для полной расшифровки ДНК на многих репликационных матрицах.

В 1996 г. учеными Стенфордского университета и Ливерморской национальной лаборатории создана фирма "Cepheid" (Калифорния, США), концепция которой - применение достижений в микрофлюидике и микроэлектронике для создания революционных

методов диагностики на основе анализа ДНК (концепция обозначена как microDiagnostics&trade). Компания разрабатывает полностью интегрированные портативные приборы и лабораторные системы для быстрого и эффективного детектирования инфекций, человеческих генов и экологических токсинов в армейских условиях. Компания "Cepheid" недавно объявила о внедрении в армию портативной системы анализа ДНК для определения загрязнений пищи, воды, идентификации патогенных бактерий на поле боя и криминалистического ДНК-анализа. Компания получила заказ Министерства обороны США на разработку миниатюрной полностью автоматизированной системы анализа ДНК для использования в различных сценариях лабораторной и полевой диагностики. Эта система должна явиться первым шагом по пути к ручным приборам для солдат на поле боя. Цель проекта - разработать анализаторы биологического оружия. Закончен первый этап работ по созданию портативного высокоскоростного ПЦР-термоциклера.

Фирма "Caliper Technologies" благодаря партнерству с "Hewlett-Packard", "Dow Chemical" и другими ведущими приборостроительными и химическими концернами, соединила несколько "интеллектуальных портфелей" и стала мировым лидером по технологиям "лаборатории-на-чипе". Разрабатываемая продукция - LabChi р системы - позволяет осуществлять высокопроизводительный скрининг для разработки лекарственных препаратов, усовершенствования лечения и реализации более дешевых биологических и генетических исследований. Фирма получила фундаментальный патент на концепцию лаборатории-на-чипе. Благодаря сотрудничеству с "Dow Chemical" разработаны одноразовые полимерные чипы. К настоящему времени фирма выпустила на рынок первую систему с использованием капиллярных чипов - Agilent2100Bioanalyzer.

Несколько отличное направление развивает "Auroga Biosciences Corporation". Эта фирма разрабатывает полностью автоматизированные высокопроизводительные системы скрининга (UNTSS). Эти системы могут оперировать растворами в модулях для быстрого доступа. Они способны обработать 100000 соединений в день при первичном скрининге и 2000 при повторном скрининге и проверке перспективности соединений. Ключевая позиция компании - компьютерное управление процессом ультравысокоскоростного скрининга.

Заключение

Из предыдущего раздела статьи видно, что технологии матричных гибридизационных чипов для генного анализа достигли коммерческого уровня. Медленнее превращается в потребительские продукты более наукоемкая область капиллярных (или микрофлюидных) чипов, в которой авторы данной статьи видят ниши для предложения оригинальных технических решений. Поэтому нам представляется необходимым более подробно рассмотреть области применения именно таких систем с учетом их преимуществ.

К настоящему времени описаны лабораторные системы КАМС для сепарации посредством капиллярного электрофореза [8, 40, 41], синхронизированного циклического электрофореза [42], свободно-поточного электрофореза [43], электрохроматографии в открытом капилляре [13], мицеллярной электрохроматографии [44], электрофореза с применением ПЦЗ-реакторов на чипе [45], капиллярного изоэлектрофокусирования [46], электрофореза с постколоночными реакторами для визуализации [16] и др. Преимущества этих капиллярных анализаторов: компактная геометрия, скорость и параллельность анализа, низкая стоимость.

Основные направления анализа с использованием КАМС:

- генный анализ с применением ПЦР и капиллярного электрофореза;
- анализ белков;
- анализ пептидов;
- анализ олиго- и полисахаридов;
- иммунный анализ;
- анализ электрофоретической подвижности, ζ -потенциалов и распределения по размерам молекул и частиц.

Перечислим те аналитические применения КАМС, которые непосредственно могут быть перенесены из области электрофореза и хроматографии в формат анализа на чипе [47].

Аналитическая биохимия и биомедицинский анализ: определение катехоламинов, гормонов, энзимов, идентификация изоэнзимов, идентификация аминокислот, пептидов и других биохимических маркеров, получение пептидных карт, анализ рестрикционных фрагментов ДНК, синтетических олигонуклеотидов, исследование фармакокинетики, определение нуклеотидной последовательности ДНК, генетический анализ, генотипирование, усовершенствование методов лечения, дешевые биологические и генетические исследования.

Например, изготовлен микрочип, содержащий сосуды с β -галактозидазой-субстратом, гидролизующим в флюоресцирующий продукт резорурфин [48]. Исследовалось ингибирование реакции фенилэтил- β -D-тиогалактозидом. Определение энзима требует 20 мин, 120 пг энзима и 7,5 нг субстрата. По сравнению с обычным анализом возможно уменьшить количество реагентов на четыре порядка.

Сконструирована и изготовлена система для 12-канального капиллярного электрофореза для быстрого (160 с) параллельного анализа образцов ДНК на примере диагностики наследственного геохромотоза путем электрофореза рестрикционных фрагментов pBR322 MspI DNA, окрашенных красным красителем-интеркалятором (butyl TOTYN) с присоединением в колонке метки thiazole orange [49]. Фрагменты детектировались с помощью конфокального флюоресцентного сканера при возбуждении флюоресценции лазером $\lambda = 488$ нм, 5 мВт и детектировании флюоресценции $\lambda = 510..540$ нм и $\lambda = 645$ нм. Сканирующая система

детектирования стала в 10 раз чувствительней, чем при использовании РЗС-матрицы.

Иммунология:

иммунодиагностика микроорганизмов и токсинов в объектах окружающей среды, болезней и патологических состояний, аллергенов. Имеются данные о применении микрочипов в иммуноанализе [50], например, интегральный иммунореактор представляет собой стеклянный микрочип, в котором реагенты и образец сыворотки для конкурентного иммуноанализа сывороточного теофиллина могут смешиваться для проведения реакции. Устройство работает как автоматическая микрофлюидная система для иммуноанализа. Образец сыворотки с меткой, теофиллином и антитеофиллин смешиваются в реакторе объемом 51 нл, а затем проба объемом 100 пл поступает в разделительный канал. Связанный и свободный трасер затем детектируются с помощью флуориметрического детектора. Предел детектирования составляет 0,26 мг/л.

Разработана методика определения кортизола в крови на 96-канальном чипе с помощью электроферритического иммуноанализа [51]. Система позволяет проводить 200 000 анализов в сутки.

Фармацевтический анализ:

определение подлинности и чистоты синтетических медикаментов, гормонов, антибиотиков, витаминов, изучение фармакокинетики, высокопроизводительный скрининг для разработки лекарственных препаратов, поиск биологически активных фракций при разработке лекарств методом комбинаторного синтеза/высокопроизводительного анализа, фармакогенетика.

Экологический анализ:

определение промышленных экотоксикантов.

Экспертиза пищевых продуктов:

определение подлинности продуктов и напитков, определение пищевых добавок, микотоксинов, биологических токсинов, бактерий.

Криминалистическая экспертиза:

анализ наркотиков и лекарственных препаратов, идентификация с помощью генного анализа.

Список литературы

- 20 Woolley A.T., Sensabaugh G.E., Mathies R.A. // Anal. Chem. 1997. V. 69. P. 2181-2186.
- 21 Mangru S.D., Harrison D.J. // Electrophoresis 1998. V. 19. P. 2301-2307.
- 22 Effenhauser C.S., Bruin G.J. M., Paulus A. // Anal. Chem. 1997. V. 69. P. 3451-3457.
- 23 Effenhauser C.S., Manz A., Widmer H.M. // Anal. Chem. 1993. V. 10. P. 2637-2642.
- 24 Jacobson S.C., Moore A.W., Ramsey J.M. // Anal. Chem. 1995. V. 67. P. 2059-2063.
- 25 Harrison D.J., Glavina P.G., Manz A. // Sens. Actuators B 1993. V. 10. P. 107-116.
- 26 McCornick R.M., Nelson R.J., Alonso-Amigo M.G., Benvegna D.J., Hooper H.H. // Anal. Chem. 1997. V. 69. P. 2626-2630.
- 27 Roberts M.A., Rossier J.S., Gitault P.B. // Anal. Chem. 1997. V. 69. P. 2035-2042.
- 28 Koutny L., Schmalzing D., Taylor T.A. // Anal. Chem. 1996. V. 68. P. 18-22.
- 29 Petersen K., McMillan W., Kovacs G., Northrup A., Chrostel L., Pourahmadi F. The promise of miniaturized clinical diagnostic systems, IDV Technology Magazine, Jul. 1998 (IVDT archive, <http://device-link.com/ivdt/archive/98/07/009.htm>).
- 30 Jacobson S.C., Herdenroder R., Koutny L.B., Wannack R.J., Ramsey M. // Anal. Chem. Vol. 66, No. 7, April 1, 1994, pp. 1107-1113.
- 31 Petersen K., McMillan W., Kovacs G., Northrup A., Chrostel L., Pourahmadi F. The promise of miniaturized clinical diagnostic systems // IDV Technology Magazine, Jul. 1998 (IVDT archive, <http://device-link.com/ivdt/archive/98/07/009.htm>).
- 32 Manz A. et al. Miniaturised systems of total chemical analysis: new concept of chemical detection // Sensors and actuators, B1(1-6): 244-248, 1990.
- 33 Daniel J.H., Iqbal S., Millington R.B., Moor D.F., Lowe C.R., Leslie D.L., Lee V.L.A., Pearce M.J. // Sensors and Actuators, A71(1998), pp. 81-88.
- 34 Blandin O., Alepee Ch., van Lintel H., Graber F., Bertetti J.M., Renaud Ph. A Microflow Liquid to Gas Converter, Proc. The 13th European Conference on Solid-State Transducers (Euroensors 13), The Hague, The Netherlands, 12-15 September, 1999, pp. 683-686 (19C3).
- 35 Alepee Ch., Parrate L., Cousseau P., Vulpescu L., Renaud Ph. Fast Heating and Cooling for High Temperature Chemical Microreactors // Proc. IMRET Conference, Frankfurt am Main, Germany, April 1999.
- 36 Blanc-hard A.P., Kaiser R.J., Hood L.E. // Biosensors and Bioelectromcs, Vol. 11, No. 6/7, 1996, pp. 687-690.
- 37 Guenat O.T., Ghiglione D., Pasquier V., van der Schoot B.H., Morf W.E., de Rooij N.F. An Electro-Osmotically Driven Nanopump for Volumetric Nanotitration Applications // Proc. The 13th European Conference on Solid-State Transducers (Euroensors 13), The Hague, The Netherlands, 12-15 September, 1999, pp. 681-682 (19C2).
- 38 Kollettr S., Brand O., Sarro P.M., Vellekoop M.J., Baltes H. Piezoelectric ZnO Membrane Resonators for Liquid Property Sensing // Там же, pp. 677-680 (19C1).
- 39 Bedo G., Fannasch H., Muller R. A Silicon Flow Sensor for Gases and Liquids Using AC Measurements // Там же, pp. 887-890 (25P23).
- 40 Hfrrison D.J., Manz A., Fan Z. // Anal. Chem. 1992. V. 64. P. 1926.
- 41 Jacobson S.C., Ramsey J.M. // Anal. Chem. 1996. V. 68. P. 720-723.
- 42 Bugggraf N., Manz A., Widmer H.M. // J. High Resolut. Chromatogr. 1993. V. 16. P. 594.
- 43 Raymond D., Manz A., Widmer H.M. // Anal. Chem. 1994. V. 66. P. 2858-2865.
- 44 Von Heeren F., Veerporte E., Manz A. // Anal. Chem. 1996. V. 68. P. 2044-2053.
- 45 Wooley A.T., Hadley D., Landre P. // Anal. Chem. 1996. V. 68. P. 4081-4086.
- 46 Jacobson S.C., Ramsay J.M. // Anal. Chem. 1997. V. 69. P. 3212-3217.
- 47 Бельский Б.Г., Зиминая Т.М. // Научное приборостроение, 1999 (в печати).
- 48 Hadd A.G., Raymond D.E., Halliwell J.W. // Anal. Chem. 1997. V. 69. P. 3407-3412.
- 49 Wooley A.T., Sensabaugh G.F., Mathies R.A. // Anal. Chem. 1997. V. 69. P. 2181-2186.
- 50 Chiem N.H., Harrison D.J. // Clin. Chem. 1998. V. 44. P. 591-598.
- 51 IMM
- 52 Ross P.L., Davis P.A., Belgrader P. // Anal. Chem. 1998. V. 70. P. 2067-2073.

УДК 678.7

Е.П. Гребенников,
ОАО ЦНИТИ "Техномаш"

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БАКТЕРИОРОДОПСИНСОДЕРЖАЩИХ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК Часть II*

Исследуются бактериородопсинсодержащие полимерные пленки в целях организации на их основе процессов обработки информации. Базовые процессы преобразования информации бактериородопсинсодержащими средами определяются обратимыми светозависимыми изменениями показателей поглощения и преломления. Рассматриваются оптико-физические, технологические и конструкционные свойства бактериородопсинсодержащих полимерных пленок.

1. Функциональные оптико-физические свойства БР-содержащих полимерных пленок при нормальных условиях

Рабочая область плотности мощности излучения. Под действием светового потока HeNe-лазера с длиной волны - 0,63 мкм достаточной плотности мощности бактериородопсин (БР) меняет свои оптические характеристики, в частности коэффициент поглощения. На длине волны 410 ± 10 нм поглощение увеличивается, на других длинах волн - уменьшается. Происходит это в результате перехода БР из формы БР570 в другие формы, в том числе М412.

Важно определить начало изменений характеристик (порог чувствительности) и область заметных изменений в допустимых пределах воздействия. Допустимым пределом, по-видимому, следует считать значения плотности мощности, приводящие к насыщению или значительному (выше 30°C) нагреву БР.

Нами определялось изменение пропускания БР-содержащей полимерной пленкой тестирующего (слабого) излучения на фиксированных длинах волн при действии на эту же область пленки излучения HeNe-лазера определенной плотности мощности. За значение чувствительности I в этом и последующих экспериментах принималось отношение изменения пропускания при данном уровне воздействия к пропусканию БР в отсутствие воздействия.

Плотность мощности HeNe-лазера оценивалась с помощью измерителя средней мощности и энергии лазерного излучения ИМО-2Н. Изменение плотности мощности осуществлялось набором калиброванных нейтральных светофильтров.

Предварительно ослабленный свет от осветителя проходил через пленку БР и попадал в монохроматор

МДР4-2, выделявший интересующую нас область длин волн (570, 410, 610 нм и пр.). Расположенное на выходе монохроматора фотоприемное устройство ФЭП4 преобразовывало свет в электрический сигнал, который усиливался усилителем постоянного тока и регистрировался самописцем.

Результаты представлены на рис. 1. При освещении БР излучением HeNe-лазера с плотностью мощности выше $0,1 \text{ мВт/см}^2$ наблюдается изменение сигнала на выходе фотоприемного устройства. Максимальное значение плотности мощности составило 400 мВт/см^2 . Более высокие значения плотности мощности не использовались, так как даже при 400 мВт/см^2 образцы могли нагреваться на несколько градусов за время измерения (несколько секунд).

При плотности мощности HeNe-лазера 100 мВт/см^2 пропускание БР излучения на длине волны 570 нм и 610 нм увеличивается в 4,5 и 3 раза соответственно, а на длине волны 410 нм уменьшается в 2,5 раза по сравнению с пропусканием необлученного БР. Рабочей областью следует, по-видимому, выбрать значения плотности мощности от 1 до 100 мВт/см^2 . Такие изменения пропускания могут быть использованы для преобразования информации.

Динамические характеристики БР. Под динамическими характеристиками мы подразумеваем временные характеристики изменений (увеличение - уменьшение) пропускания пленок БР на тестирующих длинах волн при включении и выключении излучения фиксированной плотности мощности HeNe-лазера. Значение этих характеристик позволяет оценить быстродействие отклика БР на внешнее воздействие.

Исследовались БР-содержащие пленки при нормальной температуре.

Непрерывное излучение HeNe-лазера с плотностью мощности порядка 100 мВт/см^2 освещало пленку БР в течение некоторого фиксированного интервала времени, определяемого оптическим затвором. Длительность освещения менялась от 0,25 до 50 с.

Отметим некоторые характерные особенности фотоотклика. При действии излучения лазера в спектральной области 370-450 нм поглощение тестирующего излучения увеличивалось (максимально - вблизи 410 нм); в области 455-460 нм изменений не наблюдалось; в более длинноволновой области (460-610 нм)

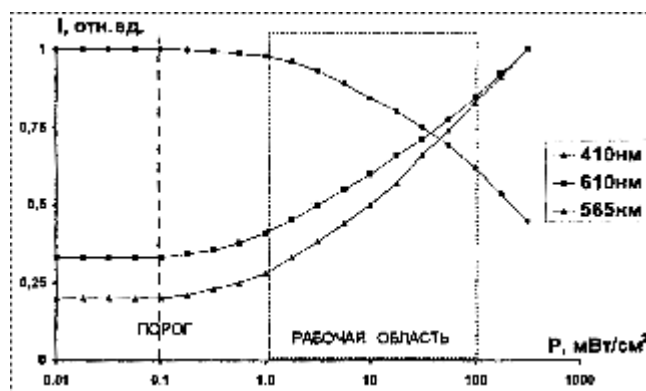


Рис. 1. Определение рабочей области плотности мощности излучения

* Часть I см. "Микросистемная техника" № 2, 2000.

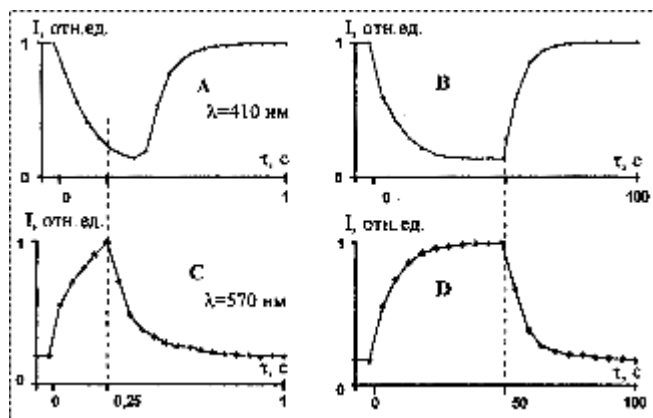


Рис. 2. Динамические характеристики БР, встроенного в желатиновую матрицу: А и С - фазы быстрого роста и спада фотоотклика; В и Д - фазы медленного роста и спада фотоотклика

увеличивалось пропускание тестирующего излучения, причем наиболее сильно вблизи 570 нм.

В кривых фотоотклика (рис. 2) как с момента начала действия излучения HeNe-лазера, так и после его окончания отчетливо наблюдаются две фазы - фаза быстрого (десятичные доли секунды), а затем фаза медленного (десятки секунд) роста (и спада) фотоотклика.

Фактически основные изменения состояния БР (80 %) происходят в течение первых 1-2 секунд, а затем идет "накопление" изменений. Почти на всех длинах волн наблюдается задержка (рис. 2, А) момента начала спада отклика после окончания действия излучения HeNe-лазера. Время задержки в некоторых случаях достигает 0,75 с.

Изменение контраста амплитудной картины и просветление БР-содержащей среды при прохождении лазерного излучения. Помимо исследования прохождения тестирующего излучения при действии HeNe-лазера оценивалось изменение пропускания БР-содержащих сред и на длине волны 632,8 нм.

Измерения проводились в непрерывном режиме на установке для регистрации прошедшего излучения, содержащей устройство с постоянным набором последовательности нейтральных светофильтров на пути

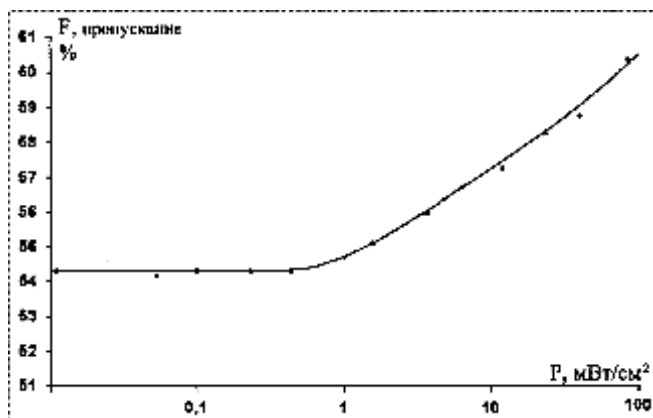


Рис. 3. Изменение пропускания БР-содержащей пленки от плотности мощности проходящего потока лазерного излучения

лазерного луча и перемещаемого внутри последовательности образца с БР-содержащей средой.

Характерная зависимость пропускания от плотности мощности проходящего излучения HeNe-лазера через образец с БР приведена на рис. 3. Из этой зависимости следует, что пропускание БР (на длине волны 632,8 нм) возрастает и БР-содержащая среда просветляется. Рост пропускания с увеличением плотности мощности лазерного излучения означает возможность увеличения контраста амплитудной картины, создаваемой на поверхности БР-содержащей среды. В частности, на основании приведенной кривой нетрудно посчитать, что в рабочей области контраст γ , определяемый из соотношения $\gamma = |(J_1 - J_2) / (J_1 + J_2)|$ где J_1 и J_2 - интенсивности света в двух разных участках на поверхности БР-содержащей среды, после прохождения через эту среду изменится от исходного 0,82 (для $J_1 = 100$ мВт/см² и $J_2 = 10$ мВт/см²) до 0,84.

Оценка устойчивости полимерных БР-содержащих пленок к длительному воздействию лазерного излучения. Для исследований использовался HeNe-лазер непрерывного действия ЛГН-213 со средней мощностью свыше 40 мВт на длине волны 632,8 нм и плотностью мощности порядка 0,6 Вт/см² в пятне диаметром 3 мм. Среднее время облучения образца - 7 ч в сутки, что соответствует дозе 15 кДж/см излучения. Максимальная доза составила 370 кДж/см. Эксперимент проводился при нормальной температуре.

В ходе эксперимента измерялись изменение пропускания БР на длине волны 565 нм и чувствительность на той же длине волны к импульсному воздействию излучения HeNe-лазера с плотностью мощности $= 200$ мВт/см².

Отмечено, что при дозах, больших 100 кДж/см, увеличивается пропускание и уменьшается чувствительность. При дозе $= 370$ кДж/см² (более 200 ч облучения) пропускание на длине волны 565 нм возрастает примерно на 30 %, а чувствительность падает вдвое (рис. 4).

Условия функционирования БР-содержащих пленок предполагают, что диапазон воздействий на пленки составляет 1 - 50 мВт/см², что в среднем составляет 25 мВт/см. При указанной плотности мощности доза облучения 370 кДж/см², при которой чувствительность уменьшилась вдвое, будет достигнута через 4000 ч.



Рис. 4. Изменение свойств БР в результате длительного воздействия лазерного излучения

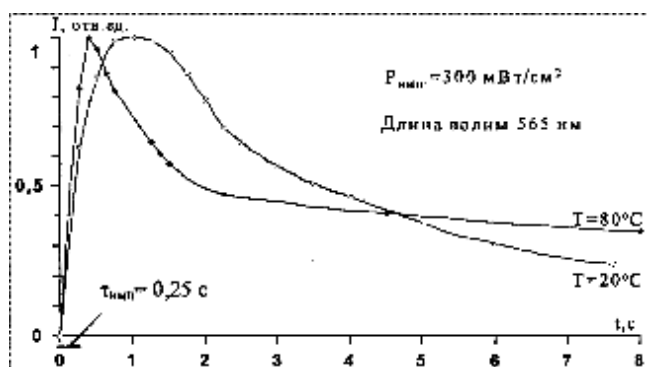


Рис. 5. Изменение пропускания БР-содержащих пленок в условиях термического воздействия

2. Изменение функциональных оптико-физических свойств БР-содержащих полимерных пленок в результате воздействия дополнительных факторов

Изменение чувствительности и пропускания БР-содержащих полимерных пленок при нагревании. Изменение чувствительности и пропускания в зависимости от температуры исследовалось на установке, включающей термостат, нагревательный элемент, осветитель, монохроматор, фотоприемное устройство с регистратором, HeNe-лазер непрерывного действия, оптический затвор.

Нагретая в термостате до определенной температуры (25-95°C с погрешностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$) БР-содержащая полимерная пленка подвергалась кратковременному (от 0,25 до 20 с) воздействию излучения HeNe-лазера с плотностью мощности 300 мВт/см². Изменение пропускания регистрировалось на диаграммной ленте самописца в виде "всплесков", по которым можно судить об относительном изменении пропускания, т.е. чувствительности БР-содержащих полимерных пленок, и динамике процесса. Полное время эксперимента не превышало 50 мин.

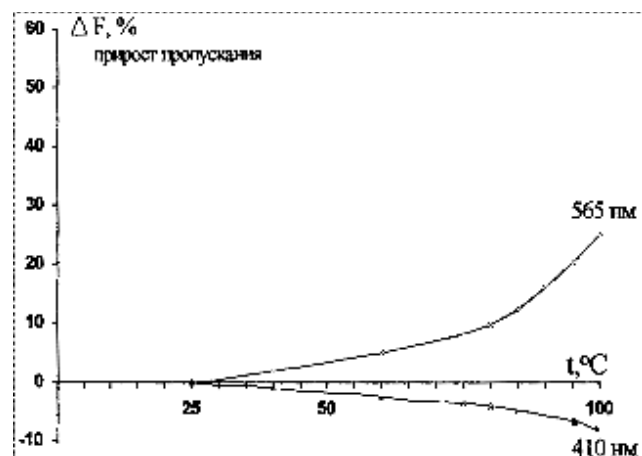


Рис. 6. Изменение воздействия чувствительности в условиях термического воздействия

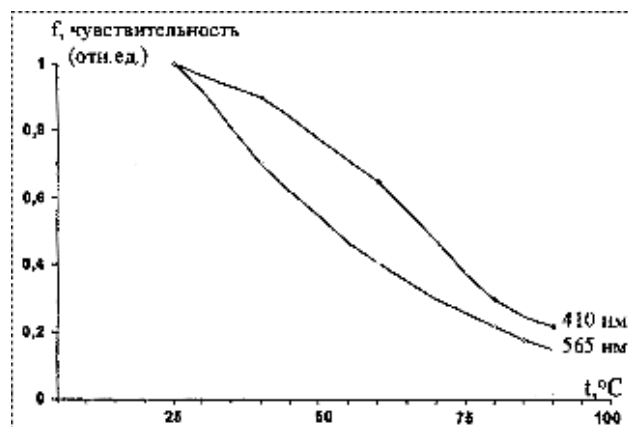


Рис. 7. Изменение динамических характеристик БР-содержащих пленок в зависимости от температуры (длительность импульса 0,25 с)

Отмечено, что при нагревании начальное пропускание (до действия излучения HeNe-лазера) образцов изменяется (рис. 5), причем на длине волны 565 нм увеличивается более чем на 20 %, а на длине волны 410 нм уменьшается почти на 10 % при температуре 95°C. Чувствительность БР уменьшается на обеих длинах волн почти в 5 раз, причем на длине волны 565 нм несколько быстрее (рис. 6).

Изменение динамических характеристик БР-содержащих пленок при нагревании. При увеличении температуры наблюдаются также и изменения динамических характеристик БР-содержащих пленок. Характерная картина изменений представлена на рис. 7, 8.

На участках нарастания и спада отклика на импульсное воздействие излучения HeNe-лазера по-прежнему присутствуют "быстрые" (порядка секунды) и "медленные" (порядка десяти секунд) составляющие. С повышением температуры "быстрая" временная составляющая сначала сокращается с 2 до 0,6 с при 80°C на $\lambda = 565$ нм, а затем возрастает до 2 с при 90°C. "Медленная" временная составляющая с повышением температуры до 90°C возрастает от 20 с в несколько раз. Существующее отставание момента начала спада отклика от момента прекращения действия лазерного импульса порядка 0,75 с при 25°C сокращается до 0,25 с при 80°C.

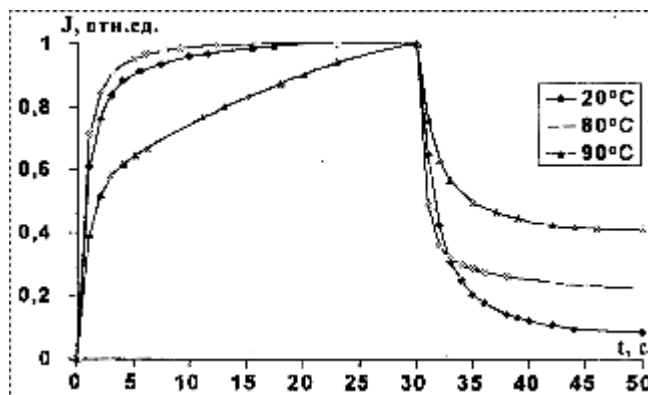


Рис. 8. Изменение динамических характеристик БР-содержащих пленок в зависимости от температуры (длительность импульса 30 с)

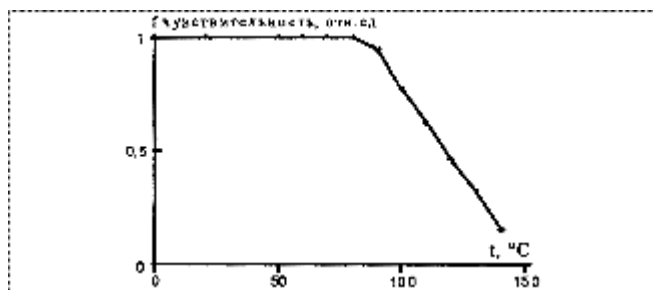


Рис. 9. Восстановление чувствительности после нагрева

Восстановление чувствительности и пропускания БР-содержащих полимерных пленок после нагревания. Предварительно проводилась оценка чувствительности образцов на фиксированной длине волны (570 нм) при уровне воздействия излучения HeNe-лазера с плотностью мощности около 200 мВт/см^2 .

В области температур $60\text{--}80^\circ\text{C}$, при которых БР-содержащие пленки выдерживались по 30 мин, а затем остывали до нормальной температуры, в начальный момент после нагрева наблюдалось падение чувствительности, а затем по мере остывания и 30-минутного "отдыха" - полное восстановление свойств БР (рис. 9). Заметное необратимое уменьшение чувствительности начиналось с 90°C . После 30-минутного прогрева при 130°C чувствительность остывшего БР уменьшалась наполовину, а после 30-минутного прогрева при 140°C чувствительность составила 15 % от начальной.

Отмечено (рис. 10), что если в начальный момент образцы демонстрировали увеличение пропускания на 20 % и более, то затем, по мере остывания, пропускание уменьшалось практически до прежнего значения (для $60\text{--}80^\circ\text{C}$) или до некоторого промежуточного значения, тем большего, чем выше была температура (для $90\text{--}140^\circ\text{C}$).

Изменение поглощения и чувствительности БР-содержащих полимерных пленок после воздействия УФ-излучения. В процессе изготовления структур, содержащих БР, последний в некоторых случаях подвергается воздействию интенсивного УФ-излучения (спектральная область $250\text{--}400 \text{ нм}$). Необходимо знание предельно допустимой для БР дозы, т.е. максимальной дозы, при которой необратимые изменения в БР еще не приводят к существенному ухудшению характеристик БР-содержащих полимерных пленок, например, к потере чувствительности.

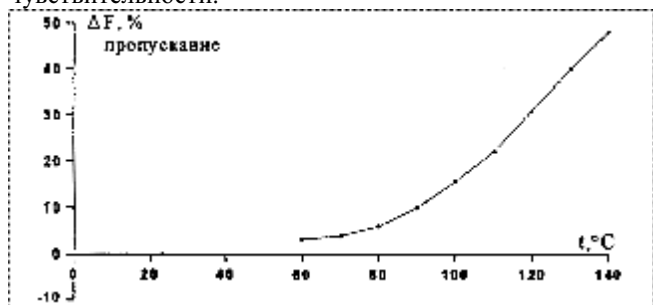


Рис. 10. Восстановление пропускания БР-содержащих пленок после нагрева

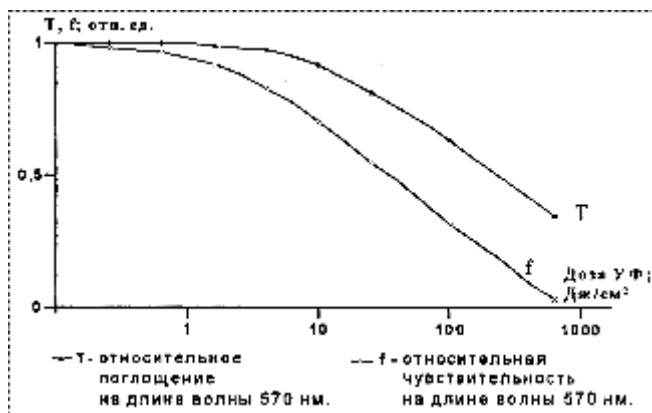


Рис. 11. Изменение поглощения и чувствительности БР под действием УФ-излучения

Предварительно оценивались чувствительность образцов на фиксированной длине волны (570 нм) при уровне воздействия излучения HeNe-лазера с плотностью мощности около 200 мВт/см^2 . Пленки БР подвергались воздействию различных доз УФ-излучения, после чего определялась их чувствительность к свету HeNe-лазера.

Для УФ-облучения использовалась ртутно-кварцевая лампа ПРК-7М с излучением в спектральном диапазоне $310\text{--}390 \text{ нм}$. Поток УФ-излучения после фильтра УФС-5 составлял - 6, 0 мВт/см^2 . Плотность мощности УФ-излучения определялась с помощью калиброванного в УФ-области фотоэлемента Ф17. Значение дозы УФ-излучения линейно зависит от времени облучения. Доза 200 Дж/см^2 набиралась примерно за 10 ч.

Отмечено, что совместное воздействие температуры и УФ-излучения разрушает БР существенно быстрее. Для устранения теплового нагрева пленок БР применялись интенсивный теплоотвод и светофильтр УФС-5 толщиной 5 мм.

Результаты испытаний показали (рис. 11), что при дозе УФ-излучения 20 Дж/см^2 чувствительность БР-содержащих пленок на длине волны 565 нм падает по сравнению с необлученными БР-содержащими пленками в 1,6 раза, а при дозе 200 Дж/см^2 - более чем в 2,5 раза.

В одном из экспериментов БР-содержащая пленка подвергалась воздействию излучения ртутно-кварцевой лампы ПРК-7М с фильтром УФС-5 в общей сложности почти 30 ч. После получения пленкой дозы УФ-излучения около 600 Дж/см^2 ее поглощение упало в 3 раза, а чувствительность - в 10 раз.

Предельно допустимой дозой УФ-излучения следует, по-видимому, считать 10 Дж/см^2 , при которой ухудшение чувствительности составляет около 20 %.

Совместное действие УФ-излучения и излучения HeNe-лазера. Совместное воздействие излучения HeNe-лазера и нагревания. Облучению подвергались образцы, имевшие начальное пропускание на длине волны 565 нм около 20 %. Изменение поглощения и чувствительности участков БР-содержащих пленок, подвергшихся совместному воздействию, измерялось относительно участков, подвергшихся воздействию только УФ-излучения или только нагреву.

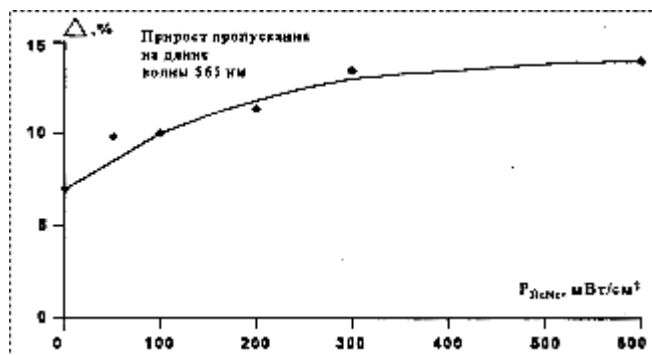


Рис. 12. Изменение пропускания БР-содержащих пленок в процессе воздействия УФ-излучением

В экспериментах по совместному воздействию использовались источник УФ-излучения с плотностью мощности -6 мВт/см^2 в спектральном диапазоне 310-390 нм и HeNe-лазер непрерывного действия с плотностью мощности, постоянной в течение одного эксперимента и составляющей 50, 100, 200, 300 и 600 мВт/см. Доза УФ-излучения была всегда одинаковой (-35 Дж/см^2), т.е. время экспозиции одинаково и составляет -100 мин (рис. 12).

В ходе экспериментов измерялось изменение оптического пропускания после каждого совместного облучения. Обнаружено необратимое увеличение оптического пропускания БР с ростом дозы излучения HeNe-лазера от 300 Дж/см^2 до 3600 Дж/см^2 , составившее от 3 до 7 % соответственно сверх того, что обусловлено действием только УФ-излучения (-7%).

Для экспериментов по совместному действию теплоты и лазерного излучения использовался непрерывный HeNe-лазер, обеспечивающий излучение на длине волны 632,8 нм с плотностью мощности до 500 мВт/см^2 , а также термостабилизатор, позволявший поддерживать в течение нескольких часов температуру образцов в пределах $60-90^\circ\text{C}$ с погрешностью $\pm 1^\circ\text{C}$. В ходе экспериментов доза воздействия излучения HeNe-лазера сохранялась постоянной (450 Дж/см^2). Постоянство дозы воздействия при различных значениях плотности мощности излучения достигалось различным временем экспозиции (от 15 мин до 5 ч).

Отмечено, что совместное действие нагрева и излучения HeNe-лазера вызывает увеличение оптического

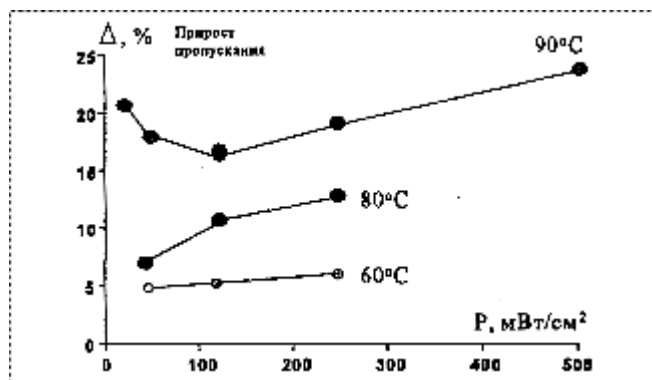


Рис. 13. Изменение пропускания БР-содержащих пленок в процессе нагревания и воздействия излучения HeNe-лазера

го пропускания БР-содержащих пленок по сравнению с изменением оптического пропускания в результате действия только нагревания. Как видно из графика (рис. 13), при температурах $60, 80^\circ\text{C}$ и при одинаковой дозе воздействия излучения HeNe-лазера более высокая плотность мощности приводит к большему увеличению оптического пропускания.

Для температуры 90°C обнаруживается минимум в увеличении пропускания вблизи плотности мощности 200 мВт/см^2 . Рост пропускания БР-содержащих пленок при снижении плотности мощности излучения HeNe-лазера, по-видимому, связан с увеличением времени пребывания БР при температуре 90°C .

Заключение

Рассмотрены свойства бактериородопсина, используемые при обработке информации. Для технических целей предложены БР-содержащие полимерные пленки, обоснован выбор полимерной матрицы для размещения БР в пленках и определены их конструктивно-технологические характеристики. Проведена оценка: рассеяния оптического излучения в пленках, показателя преломления БР-содержащих полимерных пленок, оптической неоднородности, обусловленной качеством поверхности и распределением концентрации БР вдоль поверхности пленки, а также выполнено измерение показателя преломления БР в составе воздушно-сухих пленок.

В плане исследований функциональных оптико-физических свойств БР-содержащих полимерных пленок при нормальных условиях определены рабочая область плотности мощности излучения и динамические характеристики БР. Получены данные по устойчивости полимерных БР-содержащих пленок к длительному воздействию лазерного излучения. Оценено возможное изменение контраста амплитудной картины и просветление БР-содержащей среды при прохождении лазерного излучения.

Исследовано влияние на функциональные оптико-физические свойства БР-содержащих полимерных пленок воздействия дополнительных факторов, возникающих в ходе технологических процессов или эксплуатации, в том числе: изменение чувствительности и пропускания БР-содержащих полимерных пленок при нагревании, изменение динамических характеристик БР-содержащих пленок при нагревании, восстановление чувствительности и пропускания БР-содержащих полимерных пленок после нагревания, изменение поглощения и чувствительности БР-содержащих полимерных пленок после воздействия УФ-излучения, а также совместное действие УФ-излучения и излучения HeNe-лазера и совместное воздействие излучения HeNe-лазера и нагревания.

Характерной особенностью бактериородопсина в составе исследуемых полимерных пленок является его способность к частичному или полному восстановлению своих свойств после прекращения воздействия на него разрушающих факторов, которые могут возникать в процессе изготовления или эксплуатации изделий, имеющих в своем составе БР-содержащие полимерные пленки.

Так, воздействие по отдельности УФ-излучением дозой до 1 Дж/см^2 , нагревом до 80°C в течение 30 мин или излучением HeNe-лазера дозой до 100 кДж/см^2 практически не влечет необратимых изменений в бактериородопсине. Совместное воздействие нагрева, УФ-излучения и лазерного излучения ведет к усилению разрушающего эффекта при любой комбинации перечисленных факторов.

Если предположить, что снижение чувствительности БР-содержащих пленок вдвое является предельно допустимым, то, возвращаясь к вопросу устойчивости исследуемых пленок

к дополнительному воздействию излучения HeNe-лазера в процессе эксплуатации БР-содержащих пленок, отметим следующее. Эксперименты, проведенные по исследованию влияния совместно действующих факторов излучения лазера и термического воздействия показали, что уменьшение плотности мощности излучения в 10 раз (от 500 до 50 мВт/см²) при одной и той же дозе облучения снижает разрушающий эффект от воздействия лазерного излучения вдвое. Поскольку средняя плотность мощности излучения HeNe-лазера, действующего на БР-содержащие пленки в процессе функционирования, составляет приблизительно 25 мВт/см² (это примерно в 20 раз меньше плотности мощности излучения, использованной в эксперименте), ожидаем, что допустимая доза воздействия в процессе эксплуатации может быть значительно больше значения 370 кДж/см², полученного в эксперименте. Кроме того, замечено, что "отдых" БР при нормальной температуре приводит к заметному восстановлению его первоначальных свойств по пропусканию и чувствительности.

Все это дает основание считать, что в предполагаемых условиях реальное время функционирования БР-содержащих пленок составит не менее 10000 ч.

Напомним, что для возбуждения БР мы использовали HeNe-лазер с длиной волны излучения 632,8 нм, позволивший обеспечить необходимый для эксперимента уровень плотности мощности излучения. Отметим, что сечение взаимодействия БР570 для этой длины волны составляет всего лишь $0,44 \cdot 10^{-2}$ нм², в то время как для 530 нм - $1,9 \cdot 10^{-2}$ нм², а для 570 нм - $2,32 \cdot 10^{-2}$ нм². Следует ожидать, что исследованные нами эффекты, связанные с воздействием излучения (и, в частности, чувствительность БР), будут более выражены для излучения на тех длинах волн, которым соответствуют большие значения сечения взаимодействия фотонов с молекулами БР.

Список литературы

1. Галушкин А.И. О современных направлениях развития нейрокомпьютеров // Информационные технологии. 1997. № 5. С. 3-5.
2. Datamation. 1996. Vol. 42. № 14. P. 68-73.
3. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: теория и практика. М.: Мир. 1992. 240 с.
4. Бубеников А.Н., Бубеников А.А. Технологические проблемы создания субмикронных нейрочипов и нейросистем на пластинах // Информационные технологии. 1997. № 5. С. 21-28.
5. Евтихий Н.Н., Оныкий Б.Н., Перепелица В.В., Щербаков И.Б. Гибридные оптоэлектронные нейрокомпьютеры // Нейрокомпьютер. № 3, 4.
6. Лучинин В.В. Проблемы интеграции микро- и биотехнологии // Петербургский журнал электроники. 1991. № 1.
7. Пригожий И. От существующего к возникновению. М.: Наука, 1985.
8. Рамбиди Н.Г. Биомолекулярные нейрокомпьютеры // Нейрокомпьютер. 1998. №1,2.
9. Ramhidi N.G., Maximychev A.V. Towards a biomolecular computer. Information processing capabilities of biomolecular nonlinear dynamic media // Dio Systems. 1997. V. 41. P. 195-211.
10. Всеволодов Н.Н. Биопигменты-фоторегистраторы. Фотоматериал на бактериородопсине. М.: Наука. 1988. 222с.
11. Dab I Iaronian and Aaron Lewis. Elements of a unique bacteriorhodopsin neural network architecture. Applied optics. Vol. 30. № 5. P. 597-608.
12. IEEE Control Systems. 1996. Vol. 16. № 1. P. 6-12.
13. Алексеев А.С., Валянский СИ., Савранский В.В. Нелинейно-оптические свойства Ленгмюра-Блоджетт-монослоев бактериородопсина // Тр. ИОФАН. 1992. Т. 38. С. 133-150.
14. Dieter Oesterhelt, Christoph Brauchle and Norbert Hampp. Bacteriorhodopsin: a biological material for information processing // Quarterly Reviews of Biophysics 24, 4 (1991). P. 425-478.
15. Основы технологии светочувствительных фотоматериалов / Под ред. В. И. Шеберстова. М.: Химия. 1977. 504 с.

УДК 621.3.049.77.002.5

И.В. Рубцов, канд. техн. наук доц.,
В.Е. Нестеров, канд. техн. наук,
В.И. Рубцов, канд. техн. наук,
МГТУ им. Н.Э. Баумана

СОВРЕМЕННАЯ ЗАРУБЕЖНАЯ ВОЕННАЯ МИКРО- И МИНИ-РОБОТОТЕХНИКА

Кратко представлены текущие программы и типовые проекты в области зарубежной военной микро- и мини-робототехники. Сформулированы основные задачи для нового класса военных роботов. Введена размерная классификация микро- и мини-роботов специального назначения.

В течение последних 5-10 лет в индустриально развитых странах мира произошел резкий скачок в области научно-технического прогресса. Причиной тому послужила очередная научно-техническая революция, приведшая к появлению МЭМС-микроэлектромеханических систем (MEMS-MicroElectroMechanical Systems). Направление развития микроэлектромеханики, называемое МЭМС, в современной русскоязычной научной литературе часто именуется целым набором слов-синонимов: мехатроника, микротехника, микромеханика, микроэлектромеханика, микроприборостроение, микротроника.

Новые технологии разработки и промышленного производства микроэлектромеханических систем являются развитием планарных технологических процессов, уже давно используемых при изготовлении образцов микросхемотехники. В основе развития и практического применения технологий МЭМС лежат чисто экономические факторы. Известно, что массовое производство микросхем чрезвычайно дешево. В то же время классические промышленные технологии (механо-обработка, литье, технология пластмасс и др.), используемые при изготовлении традиционных электромеханических устройств, характеризуются резким увеличением себестоимости производства по мере снижения линейных размеров (и роста точности изготовления) деталей механических систем. Этим и обусловлены попытки изготовления как отдельных деталей механической части, так и всего изделия в целом в едином технологическом производственном процессе, что при массовом производстве низводит себестоимость всего электро-механического блока практически к нулю. Кроме того, результирующее изделие получается функционально полным с микрометровыми размерами и с минимальным энергопотреблением.

Отдельные характерные примеры промышленных образцов изделий, полученных на основе технологий МЭМС, приведены на рис. 1.

На рис. 1, а показан емкостной датчик акселерометра марки ADXL-50 производства компании Analog Devices

к дополнительному воздействию излучения HeNe-лазера в процессе эксплуатации БР-содержащих пленок, отметим следующее. Эксперименты, проведенные по исследованию влияния совместно действующих факторов излучения лазера и термического воздействия показали, что уменьшение плотности мощности излучения в 10 раз (от 500 до 50 мВт/см²) при одной и той же дозе облучения снижает разрушающий эффект от воздействия лазерного излучения вдвое. Поскольку средняя плотность мощности излучения HeNe-лазера, действующего на БР-содержащие пленки в процессе функционирования, составляет приблизительно 25 мВт/см² (это примерно в 20 раз меньше плотности мощности излучения, использованной в эксперименте), ожидаем, что допустимая доза воздействия в процессе эксплуатации может быть значительно больше значения 370 кДж/см², полученного в эксперименте. Кроме того, замечено, что "отдых" БР при нормальной температуре приводит к заметному восстановлению его первоначальных свойств по пропусканию и чувствительности.

Все это дает основание считать, что в предполагаемых условиях реальное время функционирования БР-содержащих пленок составит не менее 10000 ч.

Напомним, что для возбуждения БР мы использовали HeNe-лазер с длиной волны излучения 632,8 нм, позволивший обеспечить необходимый для эксперимента уровень плотности мощности излучения. Отметим, что сечение взаимодействия БР570 для этой длины волны составляет всего лишь $0,44 \cdot 10^{-2}$ нм², в то время как для 530 нм - $1,9 \cdot 10^{-2}$ нм², а для 570 нм - $2,32 \cdot 10^{-2}$ нм². Следует ожидать, что исследованные нами эффекты, связанные с воздействием излучения (и, в частности, чувствительность БР), будут более выражены для излучения на тех длинах волн, которым соответствуют большие значения сечения взаимодействия фотонов с молекулами БР.

Список литературы

1. Галушкин А.И. О современных направлениях развития нейрокомпьютеров // Информационные технологии. 1997. № 5. С. 3-5.
2. Datamation. 1996. Vol. 42. № 14. P. 68-73.
3. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: теория и практика. М.: Мир. 1992. 240 с.
4. Бубеников А.Н., Бубеников А.А. Технологические проблемы создания субмикронных нейрочипов и нейросистем на пластинах // Информационные технологии. 1997. № 5. С. 21-28.
5. Евтихий Н.Н., Оныкий Б.Н., Перепелица В.В., Щербаков И.Б. Гибридные оптоэлектронные нейрокомпьютеры // Нейрокомпьютер. № 3, 4.
6. Лучинин В.В. Проблемы интеграции микро- и биотехнологии // Петербургский журнал электроники. 1991. № 1.
7. Пригожий И. От существующего к возникновению. М.: Наука, 1985.
8. Рамбиди Н.Г. Биомолекулярные нейрокомпьютеры // Нейрокомпьютер. 1998. №1,2.
9. Ramhidi N.G., Maximychev A.V. Towards a biomolecular computer. Information processing capabilities of biomolecular nonlinear dynamic media // Dio Systems. 1997. V. 41. P. 195-211.
10. Всеволодов Н.Н. Биопигменты-фоторегистраторы. Фотоматериал на бактериородопсине. М.: Наука. 1988. 222с.
11. Dab I Iaronian and Aaron Lewis. Elements of a unique bacteriorhodopsin neural network architecture. Applied optics. Vol. 30. № 5. P. 597-608.
12. IEEE Control Systems. 1996. Vol. 16. № 1. P. 6-12.
13. Алексеев А.С., Валянский СИ., Савранский В.В. Нелинейно-оптические свойства Ленгмюра-Блоджетт-монослоев бактериородопсина // Тр. ИОФАН. 1992. Т. 38. С. 133-150.
14. Dieter Oesterhelt, Christoph Brauchle and Norbert Hampp. Bacteriorhodopsin: a biological material for information processing // Quarterly Reviews of Biophysics 24, 4 (1991). P. 425-478.
15. Основы технологии светочувствительных фотоматериалов / Под ред. В. И. Шеберстова. М.: Химия. 1977. 504 с.

УДК 621.3.049.77.002.5

И.В. Рубцов, канд. техн. наук доц.,
В.Е. Нестеров, канд. техн. наук,
В.И. Рубцов, канд. техн. наук,
МГТУ им. Н.Э. Баумана

СОВРЕМЕННАЯ ЗАРУБЕЖНАЯ ВОЕННАЯ МИКРО- И МИНИ-РОБОТОТЕХНИКА

Кратко представлены текущие программы и типовые проекты в области зарубежной военной микро- и мини-робототехники. Сформулированы основные задачи для нового класса военных роботов. Введена размерная классификация микро- и мини-роботов специального назначения.

В течение последних 5-10 лет в индустриально развитых странах мира произошел резкий скачок в области научно-технического прогресса. Причиной тому послужила очередная научно-техническая революция, приведшая к появлению МЭМС-микроэлектромеханических систем (MEMS-MicroElectroMechanical Systems). Направление развития микроэлектромеханики, называемое МЭМС, в современной русскоязычной научной литературе часто именуется целым набором слов-синонимов: мехатроника, микротехника, микромеханика, микроэлектромеханика, микроприборостроение, микротроника.

Новые технологии разработки и промышленного производства микроэлектромеханических систем являются развитием планарных технологических процессов, уже давно используемых при изготовлении образцов микросхемотехники. В основе развития и практического применения технологий МЭМС лежат чисто экономические факторы. Известно, что массовое производство микросхем чрезвычайно дешево. В то же время классические промышленные технологии (механо-обработка, литье, технология пластмасс и др.), используемые при изготовлении традиционных электромеханических устройств, характеризуются резким увеличением себестоимости производства по мере снижения линейных размеров (и роста точности изготовления) деталей механических систем. Этим и обусловлены попытки изготовления как отдельных деталей механической части, так и всего изделия в целом в едином технологическом производственном процессе, что при массовом производстве низводит себестоимость всего электро-механического блока практически к нулю. Кроме того, результирующее изделие получается функционально полным с микрометровыми размерами и с минимальным энергопотреблением.

Отдельные характерные примеры промышленных образцов изделий, полученных на основе технологий МЭМС, приведены на рис. 1.

На рис. 1, а показан емкостной датчик акселерометра марки ADXL-50 производства компании Analog Devices

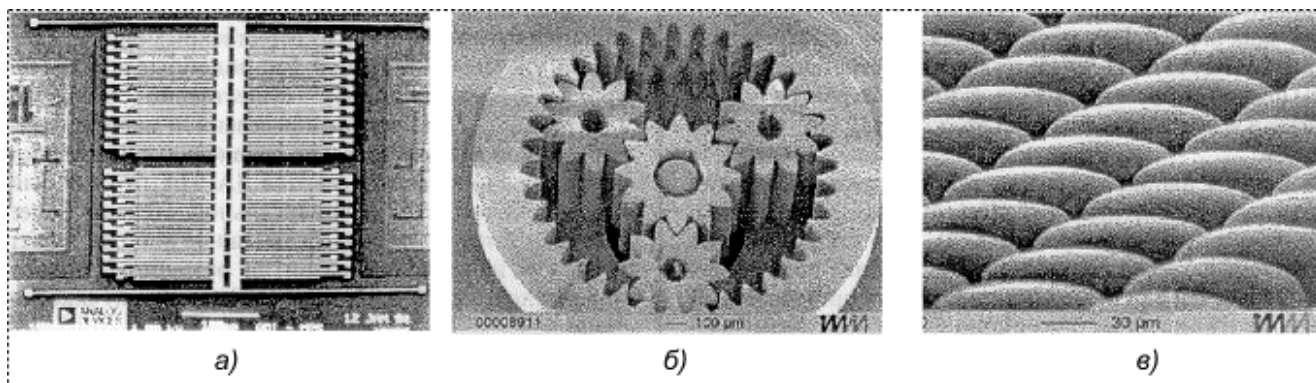


Рис. 1. Примеры использования технологий МЭМС

образца 1994 г. Консоли датчика имеют длину 140 мкм, зазор между консолями составляет 2 мкм. Сам датчик расположен в центре платы акселерометра в окружении электронных блоков предварительной обработки сигнала и буферных каскадов. Вся плата акселерометра изготовлена в едином технологическом МЭМС-процессе. Интересен тот факт, что в общепромышленном исполнении масса изделия составляет 50 г, в то время как для военных приложений тот же узел выполняется массой 5 г.

На рис. 1,б-в показаны образцы продукции института микротехнологий (Institute of Microtechnology) в Майнце, Германия. На рис 1,б приведен внешний вид планетарного редуктора с передаточным отношением 20, наружный диаметр которого составляет 1,9 мм, на рис. 1,в - образцы стеклянных микролинз для телеобъективов, диаметр которых составляет 100 мкм.

В рамках технологий МЭМС может использоваться множество различных конструкционных материалов. Детали микромашин могут быть выполнены из керамики, полимеров, даже из ферромагнетиков.

Именно технологии МЭМС являются в настоящее время тем технологическим базисом, на котором строится вся зарубежная микро- и мини-робототехника.

Исследования и разработки в области микроробототехнических систем ведутся сейчас практически во всех развитых странах мира. Наиболее интенсивный характер этих работ применительно к направлению военной робототехники наблюдается в США по линии Проектного агентства перспективных оборонных исследований ДАРПА (DARPA - Defense Advanced Research Projects Agency) ДАРПА является головной исследовательской и разрабатывающей организацией Министерства обороны США (DoD- Department of Defense USA). Это агентство определяет направления и контролирует ход выполнения фундаментальных и прикладных исследований в интересах Министерства обороны США, занимается исследованиями и технологиями, где высоки риск и непредсказуемость результата, но при этом успех может обеспечить качественный скачок в областях решения традиционных военных задач и приложений двойного назначения. В 1997-1999 гг объем финансовых ресурсов, выделенных ДАРПА на развитие микро-и мини-робототехники, сравнялся с размером финанси-

рования разработок в области традиционных военных робототехнических систем.

В настоящее время основные работы в области военной микро- и мини-робототехники финансируются в рамках **трех программ ДАРПА:**

- "Управляемые биологические системы" (Controlled Biological Systems), сроки выполнения - 1998-2002 гг., объем финансирования 20 млн. долл.,
- "Биоподобные системы" (Biomimetic Systems), сроки выполнения - 1998-2001 гг., объем финансирования 20 млн. долл.;
- "Распределенные робототехнические системы" (Distributed Robotics), сроки выполнения - 1998-1999 гг. (с возможностью продолжения), объем финансирования 10 млн. долл.

Живые биологические системы обладают сложными и уникальными способностями и взаимодействуют с окружающей средой, что может быть успешно использовано в военной области. Работы по созданию биомикророботов на основе природных биологических организмов (преимущественно насекомых) ведутся в интересах Министерства обороны США в течение уже длительного времени. В настоящий момент работы в этой области курируются программой ДАРПА.

Управляемые биологические системы. Цель программы - создание прототипов биологических систем как платформы для разработки перспективных биосистем поиска, обнаружения, идентификации, измерения в военных целях. В процессе выполнения программы планируется организация исследований по управлению биологическими организмами биотическими методами. Будут апробированы: управление моторными функциями через физическое, тепловое, нейронное, химическое стимулирование, через внедрение управляющих материалов и/или устройств.

Исследования ведутся по двум главным направлениям.

Первое направление *"Биологические системы" (Biological Systems)*, связанное с пчелами и мотыльками, должно ответить на вопрос, могут ли естественные организмы в результате предварительных целенаправленных воздействий (дрессировки) использоваться в оборонных целях, например при нахождении мин, и что при этом выступает в качестве побудительного фактора,

ориентирующего биосистему на выполнение поставленной задачи [1,2]. Как следует из материалов конференции "DARPATECH-99"[5], на естественные биоорганизмы предполагается возложить функции охраны и поиска целей в условиях неизвестной враждебной окружающей среды.

Второе направление нацелено на разработку так называемых "Биогибридов" (*Hybrid Biosy stems*) (рис. 2, см. четвертую сторону обложки). Это подразумевает некоторые "технологические улучшения" природных способностей или возможностей живых организмов. В результате подобные биомикророботы могут использоваться как мобильные сенсорные или навигационные устройства для решения целого спектра задач военной направленности.

Примерами являются пчела-миноискатель с прикрепленным радиоследящим пояском (рис. 2,а), радиоуправляемая бабочка-мотылек (рис. 2,б).

Интересен также проект японских ученых из научно-городка Цукуба, которые получили финансирование в размере 5 млн. долл. на период 1997-2001 гг. Руководитель группы господин Симояма считает, что в принципе невозможно создать робота, который бы адекватно воспроизводил действия живых существ. Поэтому целесообразно исследовать насекомых, чтобы возложить на них выполнение специфических операций, которые не под силу человеку. Например, управляемых мелких существ (рис. 2,в) можно было бы запускать в развилки зданий в поисках жертв стихийных бедствий, "внедрять" в щели и отверстия со "шпионской миссией", пускать по трубам с микрокамерами для их обследования и т.д.

На первом этапе работ исследователи превратили один из видов тараканов - "black beetle" - в послушное ползающее существо, действия которого можно контролировать на расстоянии с помощью специального пульта. На спины особей водрузили микропроцессоры массой примерно 3 г, а вместо крылышек, которые были удалены, укрепили мельчайшие электроды. Поступающий на них сигнал заставляет подопытных двигаться вперед, поворачивать налево и направо, перемещаться в сторону предметов, излучающих тепло. Тараканы могут нести полезную нагрузку, превышающую их собственную массу в 20 раз. Время функционирования подобных биомикророботов пока ограничено несколькими месяцами работы.

Теоретические и практические знания, методики и результаты, накопленные учеными и специалистами в процессе выполнения исследований природных организмов, являются базовыми для новой научной дисциплины - *биомиметики*. Биомиметика - это очень необычное поле деятельности, на котором инженеры-робототехники и биологи совместно занимаются *реверсивными методами синтеза артефактов из образцов живой природы*. В настоящий момент работы в этом направлении курируются программой ДАРПА.

Биоподобные системы. Цель программы - развитие нового класса роботов - биоподобных механических микро- (рис. 3, см. четвертую сторону обложки) и мини-робототехнических (рис. 4, см. четвертую сторону

обложки) систем, обладающих двигательными функциональными возможностями их естественных биологических организмов-прототипов. Биоподобные роботы на практике демонстрируют существенно большую адаптивность в условиях неопределенной малоструктурированной внешней среды по сравнению с обычными роботами. По оценкам экспертов ДАРПА, "этот новый класс роботов будет в значительной степени более гибким и устойчивым, чем сегодняшние роботы, и даст толчок в направлении развития разработок новых материалов, промышленных технологий, датчиков и приводов".

Практические приложения будут включать автономные или полуавтономные задачи в таких областях, как разведка, разминирование (для небольших насекомыхоподобных мини-роботов), доставка полезных грузов (в том числе - инверсионная деятельность), широко-спектральный сбор информации (функции охраны, поиска целей, раннего обнаружения радиационных, химических, бактериологических атак), навигационные задачи, нейтрализация вооружений противника, а также задачи взаимодействия с человеком в еще более широком смысле.

Ниже рассмотрен ряд характерных проектов, выполняемых в данной области.

Проект "*Микромеханическое летающее насекомое*" (*Micromechanical Flying Insect Project*) выполняется в Университете Беркли (University of Berkeley), США [6]. Объем выделенного финансирования составляет 2,5 млн. долл., завершение работ планируется на конец 2004 г.

В ходе разработки предполагается создать микромеханическое летающее насекомое (рис. 3,а) - устройство с размахом крыльев 10-25 мм, способное практически реализовывать функцию автономного полета.

Предварительный анализ возможных конструкций показал:

- пьезоэлектрические двигатели и гибкие пространственные структуры, подобные грудной клетке, способны обеспечить необходимые значения плотности энергии;
- требуемую для полета мощность можно получить с помощью солнечных батарей.

Разработчики проекта замечают, что для летающих микророботов - аналогов природных насекомых с мощностью полета менее 10 мВт, уже сейчас с помощью МЭМС-технологий можно практически изготовить необходимые крылья и источники питания. Сложность создания подобных систем лежит в плоскости разработки блоков генерирования энергии, управления полетом, а также блока связи для дистанционного управления.

В процессе создания летающих микророботов специалисты ДАРПА внимательно анализируют опыт и результаты, полученные разработчиками других стран в этой области. При этом большой интерес у них вызывает *экспериментальный образец микровертолета* (рис. 3,б), созданного в Институте микротехнологий (Institute of Microtechnology) в Майнце, Германия. Микровертолет длиной 24 мм и массой 0,4 г снабжен двумя электроприводами диаметром 1,9 мм, состоящими из электромагнитного двигателя и встроенного планетарного редуктора.

Следует подчеркнуть, что в настоящее время военные специалисты в США всерьез озабочены проблемой создания микро- и мини-роботов - летательных аппаратов. Весной 1997 г. директор ДАРПА Лэрри Линн, выступая на заседании одного из комитетов американского сената, провозгласил начало новой эры в развитии авиастроения: "Мы создадим новый класс летательных аппаратов, которые по размерам и маневренности ни в чем не будут уступать колибри".

Основное преимущество подобных систем - невозможность засечь их с помощью средств ПВО. Затруднен также и выбор средств борьбы с ними.

Основное назначение-шпионаж, борьба с терроризмом, военная разведка (как во время широкомаштабных боевых действий, так и особенно во время уличных боев). Гражданское применение подразумевает "комплексный контроль окружающей среды".

Технические требования к подобным микро-роботам ограничены сегодня следующими основными параметрами:

Габаритные размеры, см	≤15
Скорость, км/ч	≥60
Дальность полета, км	≤10

Проект "Шагающая платформа "Thing" (*Walking Platform Project*), выполняется в Массачусетском университете (University of Massachusetts), США. Основная цель состоит в практической отработке технологий создания биоподобных шагающих микро-робототехнических систем (рис. 3,в, см. четвертую сторону обложки), алгоритмов распознавания элементов окружающей среды, системы управления и элементов системы искусственного интеллекта.

Похожий проект выполняется с 1998 г. в Университете Вандербильт (Vanderbilt University), США. Разработчики получили 904 тыс. долл. для создания в течение трех лет семейства насекомоподобных микро-роботов размером 2-3 см (рис. 3,г, см. четвертую сторону обложки). Роботы должны быть оборудованы высокоэффективными резонансными пьезоэлектрическими приводами, системами управления и восприятия окружающей обстановки. На теле роботов предполагается установить микровидеокамеры и датчики звука или температуры.

Перед роботами ставится задача незаметного поиска целей взаимодействия с командным пунктом.

Проект "Скорпион" (*Scorpion Project*) (рис. 4,а, см. четвертую сторону обложки) выполняется в соответствии с грантом ДАРПА (DARPA Grant: N00014-99-1 -0483) в Институте автономных интеллектуальных систем (Institute for Autonomous intelligent Systems), Германия. Цель проекта - интегрировать в схемы высокого уровня управления поведенческие рефлексии низкого уровня, которые определены исходя из биологических экспериментов на беспозвоночных [7-8]. В процессе выполнения проекта разработчики сконструировали биоподобный автономный шестиногий мини-робот, снабженный зарядным устройством на основе солнечных батарей. Встроенное программное обеспечение эмулирует простейшие рефлексии реальных живых существ-прототипов.

По окончании трехлетнего проекта мини-робот должен будет действовать в пустыне Мо́аве. Задача робота будет заключаться в ориентировании в пустыне

в радиусе 25 миль без связи с человеком и в самостоятельном возвращении на место дислокации.

Другой проект Института автономных интеллектуальных систем - змееподобный "Робот для сложных инспекционных задач "SNAKE2" (*A robot for difficult inspection tasks SNAKE2*) (рис. 4,д, см. четвертую сторону обложки) [9,10]. Цель исследования - разработка мини-робота, имитирующего естественное движение биологической змеи настолько близко, насколько это возможно.

Мини-робот "SNAKE2" построен в 1999 г. Он имеет 12 колес вокруг каждой секции туловища, крутящий момент более 12 Н·м для любого звена и может двигаться со скоростью 0,1 м/с. Структурно мини-робот может включать до 15 типовых унифицированных секций. В каждой секции установлено по три двигателя, соседние секции соединены универсальным шарниром. У каждой секции есть шесть инфракрасных дистанционных датчиков, три моментных датчика, один датчик наклона, два угловых датчика для измерения положения шарнира. Видеокамера, расположенная в головной секции робота, предназначена для передачи видеоизображения на удаленный монитор. Ультразвуковые датчики, установленные на голове робота, используются для обнаружения препятствий. Питание осуществляется либо по кабелю, либо за счет энергии батарей, расположенных в хвостовом сегменте. В полностью автономном режиме мини-робот может работать до 30 мин.

Змееподобные мини-роботы являются идеальной инспекционной и диверсионно-разведывательной системой для узких полостей, коробов, канализационных коллекторов и труб. Именно этим объясняется значительный интерес, проявляемый к ним во всем мире.

Работы по программе "Биоподобные подводные роботы" (Biomimetic Underwater Robot Program) выполняются в Северо-восточном университете в Бостоне (Northeastern University in Boston), США. Они объединяют в себе два проекта по разработке военных мини-роботов (рис. 4,з,е, см. четвертую сторону обложки), выполняемых по линии Ведомства морских исследований (Office of Naval Research) США [11,12].

Цель программы - теоретическое исследование, проектирование и испытание под водой двух классов биоподобных автономных подводных транспортных средств.

Одно из них - это восьминогое шагающее транспортное средство, сконструированное по подобию лобстера (крупное океаническое ракообразное) и предназначенное для операций дистанционного контроля в реках и/или на дне прибрежных зон океана. Это устройство обладает робастной адаптацией к изменяющемуся рельефу дна, вызванному большими волнами.

Второе транспортное средство - это система, спроектированная по подобию миноги и предназначенная для операций дистанционного контроля в толще воды в реках и/или в прибрежных зонах океана. Это устройство обладает робастным широтно-высотным управлением и характеризуется высокой маневренностью.

Мини-роботы этих классов позволяют проводить совместные исследования: первый - исследуя дно,

второй - толщу воды. Обе эти системы представляют собой новый класс автономных подводных робототехнических транспортных средств, которые могут адаптироваться к различным условиям.

Распределенные робототехнические системы. Работы ДАРПА по этой программе направлены на разработку перспективных систем по следующим основным направлениям:

- предельно малые роботы (микро-роботы);
- роботы с динамически изменяемой структурой;
- системы роботов;
- биоробототехнические системы;
- поиск новых технических методов управления роботами (новые способы связи, элементы искусственного интеллекта).

Большое внимание уделяется выдерживанию оптимального баланса между индивидуальными возможностями отдельного микро- или мини-робота и возможностями всей робототехнической системы в целом, между интеллектуальными способностями отдельного робота и всей системы. Кроме того, для обеспечения возможности динамического автоматического конфигурирования/реконфигурирования интегрированной робототехнической системы из отдельных роботов ведется поиск новых технических решений в областях:

- разработки архитектуры микро- и мини-роботов;
- систем управления;
- систем связи;
- механических приводных систем.

Процесс конфигурирования/реконфигурирования робототехнической системы будет решаться в зависимости от изменяющихся условий окружающей среды или поставленных задач.

Программа ориентирована на разработку микро-роботов (и систем на их основе) с индивидуальными размерами менее 5 см в любом направлении.

Распределенные робототехнические системы интересуют Министерство Обороны США в основном из-за совокупности прогнозируемых присущих им уникальных возможностей по осуществлению акций военной направленности в условиях дистанционного управления, способствующих решению поставленных боевых задач с минимальным риском для личного состава. Предполагается, что параллельная совместная работа многочисленных микро- или мини-роботов сможет значительно сократить общее время выполнения поставленной боевой задачи. Кроме того, практическое применение интегрированной робототехнической системы на их основе значительно дешевле, чем применение одиночного комплексного робота.

Осуществление этих прогнозов при применении микро- и мини-роботов может быть обеспечено следующим:

- сочетанием различных технологий, таких как микроэлектроника, МЭМС, активные материалы, современные компоновочные решения, новые энергоаккумуляторы и др., что делает производство микро- и мини-роботов сравнительно дешевым с относительно низкой общей себестоимостью;

- наличием у интегрированных систем на основе микро- и мини-роботов уникальных свойств, используемых при решении боевых задач.

Вследствие малых размеров и потенциально низкой стоимости микро- и мини-роботы могут быть доставлены и развернуты индивидуально (одним человеком) или небольшими командами бойцов - для увеличения их боевого потенциала, выполнения рискованных операций или боевых задач, даже трудно прогнозируемых в настоящее время.

Для потенциальных применений таких роботов или систем роботов характерны: задачи наблюдения, разведки, поиска проходов в минных полях, дезинформации противника, доставки оружия, маскировки и малая дальность действия.

При выполнении программы ДАРПА стремится к достижению следующих главных результатов:

- развитию и внедрению в производство новейших технологий для практической реализации наземных, воздушных, водных микро- и мини-роботов военного назначения;
- развитию и внедрению в практику боевого применения интегрированных робототехнических систем.
- Разработка микро- и мини-роботов сопряжена с необходимостью решения сложных технических проблем, главными из которых являются:
 - разработка приводных механизмов для передвижения устройств с малой массой;
 - согласование низкоэнергетических электронных систем управления с нагрузкой;
 - разработка новых высокоэффективных источников энергии;
 - синтез систем управления микро- и мини-роботами со стороны человека.

Масса микро- и мини-роботов близка к массе соответствующих им мелких животных и насекомых (из биологических прототипов). При этом для использования потенциала новейших и уникальных механизмов передвижения, строящихся по аналогии с живыми организмами-прототипами, отдельные элементы преобразовательных устройств микро- и мини-роботов (колесики, траки) и биоподобные механические приводные системы (типа прыгающих, лазающих, ползающих, скользящих и т.д.) связываются между собой с применением МЭМС-технологий и технологий активных материалов (пьезоматериалов). В дополнение к этому МЭМС-технологий позволяют выполнить механические и электронные функциональные устройства на одном кремниевом чипе. Передовые технологии упаковки (современные компоновочные решения), использующие мультичиповые модули и вырабатывающие смешанный электрический сигнал, обеспечивают практическое развитие новых идей по интегрированию формы и содержания для микро- и мини-роботов.

Следует отметить, что в настоящее время еще не наступил прорыв в областях хранения, генерации и преобразования энергии применительно к микро- и мини-роботам. Поэтому, чтобы дать возможность микро- и мини-роботам выполнять работу в течение длительного периода времени в различных внешних

условиях окружающей среды, актуален поиск новых технических способов передачи и/или получения энергии для зарядки/перезарядки отдельных подсистем роботов.

Одним из характерных примеров (рис. 5), иллюстрирующих военное приложение распределенной робототехнической системы, является проект Robart III (начат в 1992 г.), работы по которому выполняются в Центре космических и военно-морских робототехнических систем в Сан-Диего, Калифорния (SSC San Diego -Robotics at Space and Naval Warfare Systems Center, San Diego, CA). По этому проекту разрабатывается перспективная роботизированная платформа, "малоуязвимого бойца", предназначенная для проведения разведывательных, охранных и антитеррористических спецопераций. В рамках проекта отрабатываются возможности по координации рефлексивного телеуправления и вопросы взаимодействия между основным боевым роботом типа "Robart III" и семейством вспомогательных мини-роботов (решающих задачи разведки и навигации) типа "Hexapod II" [3, 4].

Технический анализ содержательной части представленных современных зарубежных программ и основных проектов в области военной микро- и мини-робототехники дает основание ввести в рассмотрение комплексную размерную классификацию нового класса робототехнических систем специального назначения (см. таблицу).

Как следует из приведенной классификации, военные мини-роботы являются логическим развитием малого класса обычных роботов (образцов тактической робототехники). За счет применения элементов технологий МЭМС разработчикам удалось снизить массогабаритные показатели прототипов. Комплексный же переход к технологиям МЭМС не только дает возможность реализовать действующие механические микро-роботы в размерах природных насекомых, но и порождает практическое создание биомикробототехнических систем военного назначения.

Классификация современной зарубежной микро- и мини-робототехники специального назначения

Параметр	Микроботы	Мини-роботы	Обычные роботы (малые)
Характерный размер	2 - 5 см	10 - 25 см	Свыше 50 см
Потребляемая мощность	5 мВт - 1 Вт	5-100 Вт	Свыше 100 Вт
Масса	0, 1- 10 г	1 - 10 кг	Свыше 20 кг

Несмотря на свои сверхмалые размеры, военные микро- и мини-роботы будут обладать достаточно развитым интеллектом. По мнению западных разработчиков, это класс автономных адаптивных роботов (интеллектуальных систем) третьего поколения. Исходя из поставленной внешней цели, они смогут сами

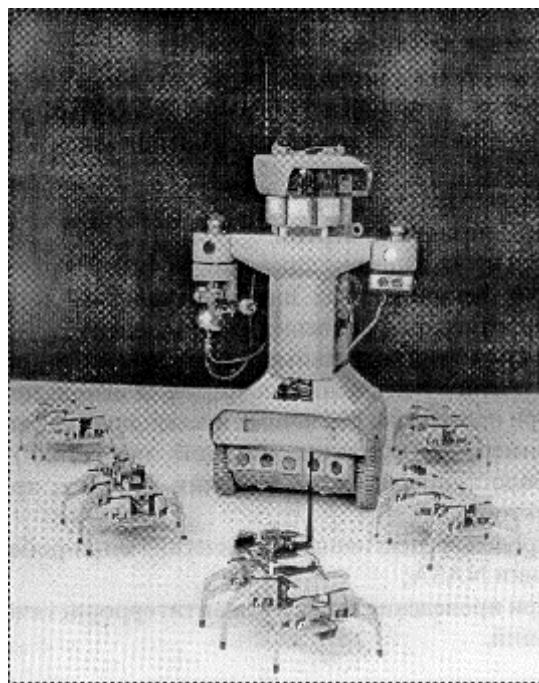


Рис. 5. Распределенная робототехническая система

планировать свою деятельность в неизвестной окружающей среде; встроенные алгоритмы обеспечат возможность самообучения. Информационная насыщенность обеспечивается за счет собственной развитой сенсорной системы.

Перспективные военные микро- и мини-роботы являются принципиально новым классом робототехнических систем. В силу характерных для них низкой себестоимости, высокой скрытности, крайне малой энерговооруженности они планируются к применению в рамках новых специфических задач.

Основой их практического использования в интересах Вооруженных сил, по мнению западных военных аналитиков, должна стать концепция массированного применения большого числа однотипных интеллектуальных механических или биологических микросистем, выполняющих общую глобальную задачу в условиях тесного информационного взаимодействия как между отдельными микросистемами, так и между ними и человеком.

В боевых условиях на такие роботы предполагается возложить выполнение следующих задач:

- широкоспектральный контроль окружающей среды (сбор информации) - биологический, химический, радиолокационный;
- комплексная разведка, поиск целей в условиях неизвестной окружающей среды;
- нейтрализация вооружений противника;
- скрытная доставка секретной информации (без использования теле-, радио-, спутниковых каналов связи);
- массированная дезинформация средств обнаружения противника;

- охрана и пассивное наблюдение с помощью мобильных датчиков.

- В отсутствие широкомасштабных боевых действий отдельные единичные образцы подобных систем планируется использовать для решения задач в областях:

- разведки/шпионажа;
- организации диверсий;
- при проведении спецопераций на чужой территории (в качестве мобильных интеллектуальных датчиков предварительного оповещения и разведки).

В мирное время отдельные экземпляры мини-роботов специального назначения планируется использовать:

- при проведении различных инспекционных заданий (например, на объектах ядерной энергетики) и в труднодоступных местах (в узких коробах, трубах, коллекторах);
- в роли перспективных космических мини-роботов -по линии NASA;
- при проведении комплекса антитеррористических операций.

Список литературы

1. Paul Stone. Creatures Feature Possible Defense Applications // American Forces Press Service.

2. Researchers Buzz About Land Mine Detecting Bees // American Forces Press Service.

3. Ciccimaro D.A., Everett H.R., Bruch M.H. and Phillips C.B. A Supervised Autonomous Security Response Robot // American Nuclear Society 8th International Topical Meeting on Robotics and Remote Systems (ANS'99), Pittsburgh, PA, 25-29 April, 1999.

4. Ciccimaro D.A., Everett H.R., Gilbrath G.A. and Trail T.T. An Automated Security Response Robot // SPIE Proc. 3525: Mobile Robots XIII and Intelligent Transportation Systems, Boston, Massachusetts, 1-5 November 1998.

5. DARPA Tech'99: The 21 Defense Advanced Research Project Agency Systems and Technology Symposium, Denver, USA, July, 1999.

6. Wing Rotation and the Aerodynamic Basis of Insect Flight // Science, vol. 284, no. 5422, 18 June 1999.

7. Kirchner F. Development of Terrestrial Ambulatory Autonomous Robots // Proc 2nd DARPA-CBS Workshop on controlled biological systems, Tuscon, Arizona, USA, January 1999.

8. Kirchner F. Scorpion-25 Meilen autonom durch die Wüste // GMD-Spiegel 3-4-1999

9. Linnemann R., Paap K., Klaassen B. Modeling and Simulation of the Robot GMD-Snake2 // Computational Intelligence for modeling control and automation (Hrsg.) M. Mohammadian. IOS Press Amsterdam.

10. Klaassen B., Paap K. GMD-SNAKE2: A Snake-like Robot Driven by Wheels and a Method for Motion Control // IEEE, International Conference on Robotics and Automation, IEEE Robotics and Automation Society, P. 3014-3019.

11. Ayers J., Crisman J.D. and Massa D. A Biologically-based Controller for an Underwater Ambulatory Robot // Proc. Int. Symp. Unmanned Untethered Submersible Technology. Autonomous Undersea Systems Institute, Portsmouth, N.H., 1993. P. 60-68.

12. Ayers J. A Reactive Ambulatory Robot Architecture for Operation in Current and Surge // Proc. of the Autonomous Vehicles in Mine Countermeasures Symposium. Naval Postgraduate School. 1995. P. 15-31.



УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА ПО МСТ

Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)

выпустил учебное пособие

"Расчет электромагнитных и температурных полей методом конечных элементов" (автор Мельников А.А.)

В пособии рассмотрены особенности математического описания электромагнитных и температурных полей в сплошных средах. Изложены основы метода конечных элементов, одного из самых эффективных современных численных методов решения инженерных и физических задач. Представлена методика решения задач расчета электростатических, магнитных и температурных полей в однородных, кусочно-однородных, неоднородных линейных и нелинейных средах методом конечных элементов. Приведены примеры решения конкретных инженерных задач.

Учебное пособие предназначено для студентов специальностей "Микросистемная техника" (201800) и "Электронные приборы и устройства" (200300). Оно может быть использовано ими при изучении дисциплин "Проектирование микросистем", "Математические модели и САПР электронных приборов и устройств", а также при выполнении курсовых и дипломных проектов. Пособие также может быть полезно студентам других специальностей.

