

КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МСТ

УДК 621.049.77:001.891.57

Е. С. Горнев, д-р техн. наук,
Н. А. Зайцев, д-р техн. наук, проф.,
М. Ф. Равилов,
И. М. Романов, канд. техн. наук,
ОАО НИИМЭ и "Микрон"

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОМЕХАНИКИ.

Часть II*

Описана методология калибровки моделей МЭМС. Для экстракции геометрических параметров и свойств материалов использовались интерферометрические измерения, РЭМ фотографии и электрические измерения простых тестовых структур наряду с подробным электромеханическим моделированием. Обсуждены ограничения процедуры калибровки, связанные с зависимостью свойств от ширины и геометрических неоднородностей.

Калибровка программ моделирования

Программы компьютерного моделирования нуждаются в полной калибровке, чтобы получить полезные и точные результаты. Для определения механических свойств исследователи измеряют резонансные частоты [1], наблюдают влияние напряжений на вращающиеся или защелкивающиеся структуры [2, 3, 4], травят балки с механическими профилями [5], измеряют смещение под действием электростатических сил [6, 7], выполняют тест на изотропное растяжение [8]. Определяемые свойства существенно варьируются, даже для поликремниевых слоев, широко используемых в технологии MUMPs (Multi-user MEMS Process service) Центра электроники Северной Калифорнии [9]. Эти различия могут быть следствием ошибок и аппроксимаций при измерении и моделировании, или следствием действительного изменения свойств материала, которые зависят от метода и направления воздействия, размера и подготовки образца. Было бы идеальным выполнять весь набор методов экстракции параметров по тестовым структурам, находящимся на одном кристалле. Каждый метод имеет ограничения по разрешению, что делает трудным проведение сравнения или определение такого свойства, как анизотропия.

*Часть I статьи опубликована в № 10, 2002.

В работе [10] авторы унифицируют два различных метода экстракции параметров для получения подходящей откалиброванной модели для MUMPs процесса. Модель калибруется совместно для оптических (амплитуда отклонения) и электрических (напряжение срабатывания) измерений, а не независимо, как описано в [11] и [12]. Таким образом, увеличивается согласованность определяемых параметров. Модель, состоящая из информации о геометрии и свойстве материалов, исключает необходимость дальнейшей настройки параметров [13, 14]. Шаги калибровки состоят из определения необходимых параметров модели, разработки подходящих тестовых структур, определения параметров с использованием программы электромеханического моделирования и экстраполяции поведения реальных сложных приборов. В статье [10] рассматриваются электростатически управляемые балки на базе поликремния, хотя определенные параметры могут быть использованы для моделирования других приборов. Однако нужно быть осторожным при моделировании различных режимов воздействий и работы, или при моделировании приборов с размерами, превышающими откалиброванный диапазон. Однородность свойств материалов не всегда может быть экстраполирована.

1. Определение геометрических размеров

На рис. 1 (см. третью сторону обложки) показано поперечное сечение электростатически управляемой балки, изготовленной по MUMPs технологии. Вертикальный размер (высота) здесь увеличен (для наглядности).

Интерес представляют следующие геометрические параметры: толщины Si*-0 (POLY0, на рис. 1), Si*-1 (POLY1) нитрида и жертвенных ФСС, глубины неровности, форма ступеньки крепления и форма других ступенек. Электрическая толщина нитрида кремния определяется из емкостных измерений. Толщина Si*-1 измеряется на ступеньке крепления, осажденного на Si*-0, как показано на РЭМ фотографии на рис. 2 (см. третью сторону обложки). Ошибка измерений, проведенных с помощью Zygo NewView 200 с интерферометром белого света, с повторяемой точностью составила 0,01 мкм и определялась как разность между измеренным значением и действительной толщиной свободной поликремниевой балки.

2. Зависимость свойств балки от ее ширины

Поведение балок зависит от ширины. Чем уже балка, тем больше чувствительность балки к малым отклонениям поперечного сечения от идеальной прямоугольной формы. Дополнительно каждая балка имеет вариации высоты вдоль ширины.

Верхние поверхности более узких балок (меньше, чем 50 мкм ширины) скруглены. Эти скругления скорее являются следствием неравномерности травления поверхности во время травления жертвенных слоев, чем следствием изгиба. Изгиб в таком режиме деформации (изгиб по ширине без существенного изгиба по длине) не может быть промоделирован с использованием изотропного градиента напряжений. Более широкие балки показывают седлообразное изменение высоты вдоль ширины со скругленными углами вблизи каждого края. Возможно слияние двух искривлений в одно в случае узких балок. Поскольку причина таких искривлений неясна, для минимизации влияния неидеального поперечного сечения были использованы балки только шириной 30 мкм. Тем не менее, моделирование показывает, что зависимость наблюдаемых величин от ширины является эффектом второго порядка при наблюдении колебаний и защелкивания балок, фиксированных с двух сторон. Однако определение параметров консольных балок является более сложным и требует больших исследований. Каждая процедура калибровки неизбежно ограничена рабочим диапазоном приборов и их размерами. В работе [10] исследовались электростатически управляемые балки шириной 30 мкм на основе Si^*-I с двухсторонней фиксацией, имеющие ступеньки и другие неровности. Сначала измерялись геометрические размеры, затем начальные двухосевые напряжения, и наконец, определялся модуль Юнга. Принималось, что электрическое поведение всех слоев является идеальным без частотной зависимости, т. е. поликремниевые слои служат отличными проводниками, а жертвенные слои и нитридный слой — хорошими изоляторами.

3. Калибровка модели плоских балок

На рис. 3 (см. третью сторону обложки) показаны профиль и маска электростатически управляемой балки с верхним электродом на основе Si^*-I и с подложкой кремния в качестве нижнего электрода.

Балка является плоской за исключением ступенчатой области крепления. Для большей схожести с моделируемым объектом были изготовлены балки, которые можно моделировать как двумерные (отсутствует перекрытие Si^*-I окна для крепления). На рис. 4 показана 2D-модель для про-

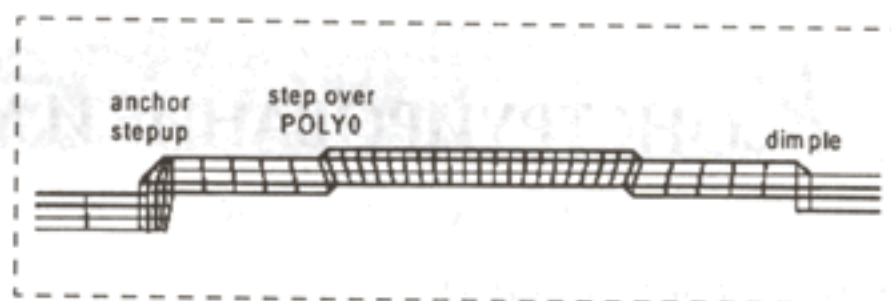


Рис. 1. Поперечное сечение электростатически управляемой балки

граммы моделирования Abaqus, имеющая геометрию ступеньки крепления и другие механические неровности, которые соответствуют РЭМ фотографиям, приведенным на рис. 2 и 5 (см. третью сторону обложки). В модель также включено влияние перетрава, наклон боковых стенок и комформность осаждения.

Полное 3D-моделирование требует огромных вычислительных и временных ресурсов, делая его непригодным для экстракции параметров, при которой необходимо проводить расчет многих вариаций данной системы. В Abaqus включена модель электростатических сил, использующая аппроксимацию параллельных пластин, которая учитывает интерференцию полей и конечную толщину балки.

Когда прикладывается напряжение между балкой и кремниевой подложкой, электростатические силы притягивают балку к подложке. При напряжении на балке выше порогового, называемом напряжением включения, балка резко сгибается вниз и контактирует с нитридом. И модуль Юнга и начальные напряжения могут быть определены путем подгонки под измеренное напряжение включения. Измерения были выполнены с помощью HP 4275A, который был использован для задания рабочего напряжения и определения резкого увеличения емкости при срабатывании. Полученное значение модуля Юнга для этих балок составило 135 ГПа.

В работе [15] представлен простой способ определения модуля упругости тонких пленок любой толщины. Сначала формируется двухслойная балка. Вследствие наличия внутренних напряжений эта балка деформируется без каких-либо внешних воздействий. Модуль упругости осажденной пленки определяется по профилю деформации этой самодформирующейся двухслойной балки. Для такого определения в [15] разработана теоретическая модель.

Несмотря на максимальное приближение конструкции экспериментальных образцов к моделируемому, результаты моделирования могут не согласовываться с результатами измерений. Причиной этого может быть игнорирование таких эффектов, как изменяемые граничные условия, вытравленные

отверстия, изменение напряжений по толщине пленки и др. На рис. 6 (см. третью сторону обложки) продемонстрированы эти эффекты. Причиной неоднородности свойств материала может быть наличие золотого контакта и поверхностные остатки. К тому же характеристики прибора могут изменяться со временем вследствие таких факторов, как усталость материалов или накапливаемый заряд, которые обычно не учитываются при моделировании.

Существенное влияние на работу микромеханических устройств оказывают механические напряжения, которые возникают в слоях структуры в процессе ее изготовления. Некоторые из программ предусматривают учет влияния механических напряжений на работу микромеханических устройств. Для таких программ необходимо формировать геометрию прибора не с помощью редактора геометрии, а с помощью программы моделирования технологии изготовления, которая рассчитывает механические напряжения.

Выводы

Микромеханические системы представляют собой достаточно сложные устройства, для оптимизации функционирования которых необходимо использовать компьютерное моделирование. Для этих целей имеются несколько пакетов программ, которые учитывают особенности функционирования микромеханических систем для широкого диапазона применения. Для решения некоторых задач многократное проведение 3D-моделирования отнимает большие вычислительные ресурсы и ресурсы времени. Поэтому составляют модели меньшего порядка, а затем настраивают их по результатам 3D-моделирования и экспериментальным данным. А иногда требуется и аналитическое описание поведения микромеханических устройств для использования его при моделировании на системном уровне (микромеханическое устройство вместе со схемой управления и обработки сигнала).

На функционирование микромеханических устройств оказывают влияние внутренние механические напряжения, которые возникают и изменяются в структуре в процессе ее изготовления. Поэтому при моделировании функционирования микромеханических устройств необходимо учитывать внутренние механические напряжения.

Особое место при моделировании занимает калибровка программ моделирования. Причем адаптацию необходимо проводить не только для каждой вариации технологии, но и для каждой отдельной конструкции элемента. Это связано с тем, что

механические свойства микромеханических элементов зависят не только от структуры слоев и условий их формирования, но и от неровностей, вытравленных окон и других конструктивных особенностей. Для определения механических параметров элементов (модуль Юнга, соотношение Пуассона и др.) есть специальные тестовые элементы и разработанные методики.

Список литературы

1. Petersen K. E. Dynamic micromechanics on silicon: Techniques and devices // IEEE Transactions of Electron Devices. 1978. ED-25. P. 1241—1250.
2. Guckel H., Randazzo T., Burns D. W. A simple technique for the determination of mechanical strain in thin films with applications to polysilicon // Journal of Applied Physics. Mar 1985. 57 (5). P. 1671—1675.
3. Marshall J. C., Read D. T., Gaitan M. Analysis of fixed-fixed beam test structures // Proceedings of SPIE Conference on Microlithography and Metrology in Micromachining II, Austin TX. Oct. 1996. Vol. 2880. P. 46—55.
4. Fang W., Wickert J. A. Post-buckling of micromachined beams // Journal of Micromechanics and Microengineering. Sep. 1994. Vol. 4 no 3. P. 116—122.
5. Weihs T. P., Hong S., Bravman J. C., Nix W. D. Mechanical deflection of cantilever microbeams: A new technique for testing the mechanical properties of thin films // Journal of Materials Research. Sep. / Oct 1988. 3(5). P. 931—942.
6. Najafi K., Suzuki K. Measurement of fracture stress, Young's modulus, and intrinsic stress of heavily boron-doped silicon microstructures // Thin Solid Films. Dec 1989. Vol. 181. P. 251—258.
7. Gupta R. K. Electrostatic pull-in test structure design for in-situ mechanical property measurements of microelectromechanical systems (MEMS) // Ph. D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, USA. Jun 1997.
8. Sharpe W. N., Turner Jr. K., Edwards R. L. Measurements of the effect of specimen size on Young's modulus and tensile strength of polysilicon // Late News Poster Session Supplemental Digest of IEEE Solid State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head. Jun 1998. P. 17—19.
9. Koester D. A., Mahadevan R., Shishkoff A., Markus K. W. Smart MUMPs Design Handbook including MUMPs Introduction and Design Rules (rev. 4), Microelectronics Center of North Carolina. Jul 1996.
10. Chan E. K., Garikipati K., Dutton R. W. Comprehensive Characterization of Electrostatically-Actuated Beams // Sensors and Actuators conference in Hilton Head. June 7—11, 1998.
11. Marshall J. C., Read D. T., Gaitan M. Analysis of fixed-fixed beam test structures // Proceedings of SPIE Conference on Microlithography and Metrology in Micromachining II, Austin, TX. Oct 1996. Vol. 2880, P. 46—55.
12. Gupta R. K. Electrostatic pull-in test structure design for in-situ mechanical property measurements of microelectromechanical systems (MEMS) // Ph. D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, USA. Jun 1997.
13. Gupta R. K. Electrostatic pull-in test structure design for in-situ mechanical property measurements of microelectromechanical systems (MEMS) // Ph. D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, USA. Jun 1997.
14. Fang W., Wickert J. A. Post-buckling of micromachined beams // Journal of Micromechanics and Microengineering. Sep 1994. Vol. 4 no 3. P. 116—122.
15. Fang W. Determination of the elastic modulus of thin film materials using self-deformed micromachined cantilevers // Journal of Micromechanics and Microengineering. 1999. 9. P. 230—235.

Л. В. Беликов, канд. техн. наук,
ИБХФ им. Н. М. Эмануэля РАН

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНОГО МОСТА УИТСТОНА НА МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ КРЕМНИЕВОЙ МЕМБРАНЕ, ОРИЕНТИРОВАННОЙ ПО (100)

Описан метод проектирования топологии полного активного моста Уитстона из тензорезисторов p- и n-типов проводимости, расположенных на монокристаллической кремниевой мембране, ориентированной по кристаллографической плоскости (100). Метод позволяет определить правую и левую, верхнюю и нижнюю границы тензорезисторов относительно центра мембраны.

Анализ существующих работ по проектированию топологии тензорезисторного моста Уитстона на монокристаллической кремниевой мембране, ориентированной по (100)

Имеем монокристаллическую кремниевую (МК) мембрану толщиной h , которая заземлена по контуру радиуса R и нагружена распределенным давлением p . Планарная сторона этой мембраны ориентирована по кристаллографической плоскости (100) — в дальнейшем по тексту — по плоскости (100). Под проектированием топологии полного активного моста Уитстона из тензорезисторов p - и n -типов проводимости, как и ранее [3], будем понимать определение радиуса R и толщины h мембраны или их отношения, а также положения правой x_2 и левой x_1 , верхней y_2 и нижней y_1 границ области, занимаемой каждым из четырех тензорезисторов на мембране относительно ее центра таким образом, чтобы относительное изменение сопротивления $\Delta r/r$ было максимальным. Тензорезисторы, расположенные в смежных плечах моста, должны при этом иметь равные по величине, но противоположные по знаку изменения относительного сопротивления $\Delta r/r$. Начало декартовых координат совпадает с центром мембраны.

Известно [1, с. 235], что наиболее опасными точками на мем-

бране являются точки у ее заделки. Если верхний предел измеряемого давления p известен, то из [1] получим

$$\sigma_{\text{экв}} = 0,75p(R/h)^2 \sqrt{1 - \mu + \mu^2}, \quad (1)$$

где μ — коэффициент Пуассона.

С учетом того, что в кристаллографической плоскости (100) для кристаллографического направления [100] коэффициент Пуассона МК равен 0,279, имеем:

$$\sigma_{\text{экв}} = 0,85p(R/h)^2 \leq [\sigma],$$

где $[\sigma]$ — допускаемое напряжение.

В той же кристаллографической плоскости для кристаллографического направления [110] коэффициент Пуассона равен 0,064. Тогда

$$\sigma_{\text{экв}} = 0,97p(R/h)^2 \leq [\sigma].$$

Следовательно, опасной точкой на мембране с точки зрения прочности является точка пересечения направления [110] и радиуса мембраны.

На основании (1) и данных [2, 11, 16], которые могут быть приняты предварительно, отыскиваем соотношение R/h .

В первой появившейся после [4, 12] работе [18] относительное изменение сопротивления $\Delta r/r$ тензорезистора, расположенного на мембране, записано в виде

$$\Delta r/r = T_{11}\sigma_1 + T_{12}\sigma_2 + T_{13}\sigma_3 + T_{16}\sigma_6, \quad (2)$$

где T_{11} — продольный тензорезистивный коэффициент при произвольном направлении продольной оси тензорезистора относительно стандартных (кристаллографических) осей (рис. 1, а); T_{12} — поперечный первого рода тензорезистивный коэффициент при произвольном направлении продольной оси тензорезистора относительно стандартных (кристаллографических) осей (рис. 1, б); T_{13} — поперечный второго рода тензорезистивный коэффициент; T_{16} — сдвиговый второго рода тензорезистивный коэффициент (рис. 1, в); σ_1 — продольные, σ_2 — поперечные первого рода (в плоскости

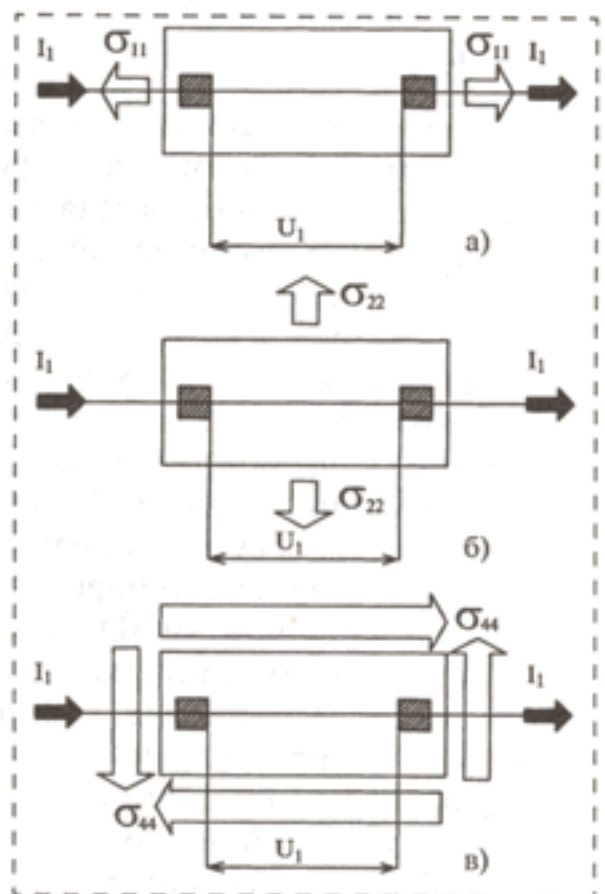


Рис. 1. Ориентация направления:
а — протекающего по тензорезистору тока I_1 , измеряемого падения напряжения U_1 и растягивающих (сжимающих) напряжений σ_{11} относительно друг друга при продольном тензорезистивном эффекте; б — протекающего по тензорезистору тока I_1 , измеряемого падения напряжения U_1 и растягивающих (сжимающих) напряжений σ_{12} относительно друг друга при поперечном первого рода тензорезистивном эффекте; в — протекающего по тензорезистору тока I_1 , измеряемого падения напряжения U_1 и сдвиговых напряжений σ_{66} относительно друг друга при сдвиговом второго рода тензорезистивном эффекте

тензорезистора) напряжения растяжения—сжатия, σ_3 — поперечные второго рода (в плоскости, перпендикулярной плоскости тензорезистора) напряжения растяжения—сжатия, σ_6 — сдвиговые (в плоскости тензорезистора) напряжения.

Поскольку при расчете напряжений в мембране при ее изгибе внешними силами исходят, как известно, из гипотезы недеформируемости нормали [1, 17, 25], то величину σ_3 следует считать равной нулю. По этой причине в уравнении (2) должно отсутствовать слагаемое $T_{13}\sigma_3$. Позднее в [10] было повторено это ошибочное утверждение. Кроме того, "радиальные" тензорезисторы (направление между контактами которых совпадает с направлением радиуса мембраны) на рис. 11, 12 и 13 работы [18] прямолинейные, а "окружные" (направление между контактами которых совпадает с окружным направлением мембраны) имеют вид дуги. На рис. 13 этой работы представлен, по мнению автора, полный активный мост, в котором два "радиальных" тензорезистора, образующих противоположные плечи моста, имеют вид прямых, параллельных диаметру мембраны, а "окружные" тензорезисторы имеют форму дуг окружности, замыкающих "радиальные" тензорезисторы. Нетрудно сообразить, что относительные изменения сопротивлений "окружных" тензорезисторов будут различны, хотя бы только потому, что сами тензорезисторы имеют разное начальное сопротивление и расположены на разных расстояниях от центра мембраны.

В [5] на основании работы [9] дано такое выражение для выходного сигнала полного активного моста из тензорезисторов p -типа проводимости, расположенных на мембране, ориентированной по кристаллографической плоскости (100):

$$U_{\text{вых}} = 0,192T_{44}pR^2[(r_1/R)^2 + (r_2/R)^2]U_{\text{пит}}/h^2, \quad (3)$$

где r_1 и r_2 — расстояние (видимо, от центра тяжести) тензорезисторов до центра мембраны. При этом на основании совершенно непонятных соображений авторы считают, что один из тензорезисторов работает на растяжение, а второй — на сжатие; T_{44} — фундаментальный сдвиговый тензорезистивный коэффициент.

Авторы этой работы, вслед за автором работы [9], исходят из предположения, что продольный T_{11} и поперечный T_{12} фундаментальные тензорезистивные коэффициенты диффузионных (или ионнолегированных) слоев на кремнии малы, и ими можно пренебречь. Далее они, неизвестно из каких соображений, считают, что на мембране есть такие места, где существуют только растягивающие или только сжимающие напряжения, хотя, как известно [1, 17, 25], на мембране существует двухосное напряженное состояние.

В [15] со ссылкой на [9] дано такое выражение для выходного сигнала полного активного моста из тензорезисторов p -типа проводимости, расположенных на мембране с ориентацией по кристаллографической плоскости (100):

$$U_{\text{вых}} = 0,384T_{44}pR^2(x_{1\text{цт}}y_{1\text{цт}} + x_{2\text{цт}}y_{2\text{цт}})R^{-2}U_{\text{пит}}/h^2, \quad (4)$$

где $x_{1\text{цт}}$, $y_{1\text{цт}}$, $x_{2\text{цт}}$, $y_{2\text{цт}}$ — координаты центров тяжести тензорезисторов, работающих, видимо, на растяжение и сжатие.

На приведенном в этой работе рисунке топологии "радиальный" тензорезистор имеет П-образную форму, что, как известно, уменьшает его чувствительность.

Авторы этой статьи снова исходят из предположения, что продольный T_{11} и поперечный T_{12} фундаментальные тензорезистивные коэффициенты диффузионных (или ионнолегированных) слоев на кремнии малы и ими можно пренебречь.

В [23], отмечая наличие в наших работах путаницы в обозначениях и неверных формул, тем

не менее пришли к выводу о том, что ход рассуждений не вызывает сомнений. Они исправили формулы для продольного T_{11} и поперечного T_{12} тензорезистивных коэффициентов для плоскости (100) и оставили формулы для определения этих коэффициентов в плоскостях (110) и (111), полученные нами, без изменений. Но чтобы путаница все же существовала, они ввели в выражение напряжений коэффициент α , значение которого изменяется от нуля (при жестко заземленной мембране) до единицы (при свободно опертой мембране). При этом не было указано, каким образом выбирать значение этого коэффициента, а поэтому топология полного активного моста из тензорезисторов p -типа проводимости на плоскостях (100) и (110) получилась совершенно не отличимой от предложенной нами.

Автор [22] считает, что в наших работах [4, 12] и в работе [9] были выявлены лишь точки экстремальной чувствительности. Далее он приводит аналитические выражения, которые, по его мнению, отражают анизотропию механических свойств кремния:

$$\sigma_x = pR^2[0,435 - (0,869 + 0,246 \cos 2\theta)(r/R)^2]/h^2; \quad (5)$$

$$\sigma_y = pR^2[0,435 - (0,869 - 0,246 \cos 2\theta)(r/R)^2]/h^2, \quad (6)$$

где θ — угол между горизонтальным направлением и линией, соединяющей центры мембраны и тензорезистора; σ_x , σ_y — главные напряжения [17].

Как автор [22] на основании полученных им уравнений (5) и (6) учитывает анизотропию механических свойств кремния, представляется совершенно неясным.

Во всех перечисленных работах много говорится о влиянии температуры на характеристики датчиков давления, хотя это и не следует из уравнений (2)—(6).

Поэтому попытаемся получить все необходимые для проектирования топологии полного актив-

ного моста из тензорезисторов обоих типов проводимости с учетом конечных размеров тензорезисторов и температурной зависимости свойств собственно МК-мембран.

Проектирование топологии полного активного моста

Напомним, что существуют следующие тензорезистивные коэффициенты:

- продольный T_{1111} , когда направление протекающего по тензорезистору тока I_1 , направление измеряемого падения напряжения U_1 и направление напряжений растяжения—сжатия σ_{11} совпадают. При свертке тензора по индексу этот коэффициент запишется как T_{11} (рис. 1, а) [2, 8, 21];
- поперечный T_{1122} , когда направление протекающего по тензорезистору тока I_1 и направление измеряемого падения напряжения U_1 совпадают между собой, но это направление перпендикулярно направлению напряжений растяжения—сжатия σ_{22} . Соответственно при свертке тензора по индексу этот коэффициент запишется как T_{12} (рис. 1, б);
- сдвиговый второго рода T_{1112} , когда направление протекающего по тензорезистору тока I_1 и направление измеряемого падения напряжения U_1 совпадают между собой, а тензорезистор находится под действием напряжений сдвига σ_{12} (рис. 1, в).

При свертке тензора по индексу этот коэффициент записывается как T_{16} .

Ранее нами были получены [4, 12] зависимости модуля Юнга E_1 , коэффициента Пуассона μ_1 , модуля сдвига G_1 , продольного T_{11} , поперечного первого рода T_{12} и сдвигового второго рода T_{16} тензорезистивных коэффициентов монокристаллического кремния в кристаллографической плоскости (100) от выбираемого направления относительно стандартных осей в виде, удобном

для инженерного применения. При произвольной ориентации осей тензорезистора в кристаллографической плоскости (100) имеем:

$$E_1 = [S_{11} - 0,5(S_{11} - S_{12} - 0,5S_{44}) \sin^2 2\varphi]^{-1}; \quad (7)$$

$$\mu_1 = [S_{11} - 0,5(S_{11} - S_{12} - 0,5S_{44}) \sin^2 2\varphi][S_{11} - 0,5(S_{11} - S_{12} - 0,5S_{44}) \sin^2 2\varphi]^{-1}; \quad (8)$$

$$G_1 = [S_{44} + (S_{11} - S_{12} - 0,5S_{44}) \sin^2 2\varphi]^{-1}; \quad (9)$$

$$T_{11} = T_{11} - 0,5(T_{11} - T_{12} - T_{44}) \sin^2 2\varphi; \quad (10)$$

$$T_{12} = T_{12} + 0,5(T_{11} - T_{12} - T_{44}) \sin^2 2\varphi; \quad (11)$$

$$T_{16} = -0,5(T_{11} - T_{12} - T_{44}) \sin 4\varphi, \quad (12)$$

где T_{11} и T_{12} — фундаментальные продольный и поперечный тензорезистивные коэффициенты соответственно [24]; S_{11} , S_{12} , S_{44} — фундаментальные коэффициенты упругой податливости [2, 8, 21]. Угол φ отсчитывается от кристаллографического направления [100].

Используя уравнения С. Г. Лехницкого [17] и уравнения (7)—(12) и опуская промежуточные преобразования, запишем уравнение относительного изменения сопротивления тензорезистора, направление продольной оси которого совпадает с кристаллографическим направлением [100], в следующем виде:

$$\begin{aligned} (\Delta r/r)_{\text{рад}} &= T_{11}\sigma_x + T_{12}\sigma_y = \\ &= K_{100}T_{11}[(3S_{11} - S_{12})x^2 + (S_{11} - 3S_{12})y^2 - (S_{11} - S_{12})R^2] - \\ &- K_{100}T_{12}[(S_{11} - 3S_{12})x^2 + (3S_{11} - S_{12})y^2 - (S_{11} - S_{12})R^2], \end{aligned} \quad (13, a)$$

а для тензорезистора, продольная ось которого перпендикулярна направлению [100], получим

$$\begin{aligned} (\Delta r/r)_{\text{окр}} &= T_{12}\sigma_x + T_{11}\sigma_y = \\ &= K_{100}T_{11}[(S_{11} - 3S_{12})x^2 + (3S_{11} - S_{12})y^2 - (S_{11} - S_{12})R^2] - \\ &- K_{100}T_{12}[(3S_{11} - S_{12})x^2 + (S_{11} - 3S_{12})y^2 - (S_{11} - S_{12})R^2], \end{aligned} \quad (13, б)$$

где $K_{100} = 1,5\rho S_{44}/[S_{44}(3S_{11} - S_{12}) + 2(S_{11}^2 - S_{12}^2)]h^2$.

Для ориентировочных расчетов и построения эпюры $(\Delta r/r)$ "точечного" тензорезистора примем следующие значения фундаментальных коэффициентов по [21]:

- для тензорезисторов p -типа проводимости

$$\begin{aligned} T_{11} &= +6,6 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}; \\ T_{12} &= -1,1 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}; \\ T_{44} &= +138,1 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}; \end{aligned}$$

- для тензорезисторов n -типа проводимости

$$\begin{aligned} T_{11} &= -102,2 \cdot 10^{-11} \text{ Па}; \\ T_{12} &= +53,4 \cdot 10^{-11} \text{ Па}; \\ T_{44} &= -13,6 \cdot 10^{-11} \text{ Па}; \end{aligned}$$

- упругой податливости для обоих случаев

$$\begin{aligned} S_{11} &= 0,768 \cdot 10^{-11} \text{ Па}; \\ S_{12} &= -0,214 \cdot 10^{-11} \text{ Па}; \\ S_{44} &= 1,256 \cdot 10^{-11} \text{ Па}. \end{aligned}$$

На рис. 2 представлены 12 вариантов топологии полных активных мостов Уитстона из тензорезисторов n -типа проводимости, расположенных на круглой, заземленной по контуру радиуса R толщиной h мембране, которая нагружена распределенным давлением p (рис. 2, а—м) [7]. Особо отметим то обстоятельство, что из приведенных рисунков не представляется возможным определение положения центра тензорезистора, находящегося в сложном плече моста. На этом рисунке тензорезисторы, находящиеся в смеж-

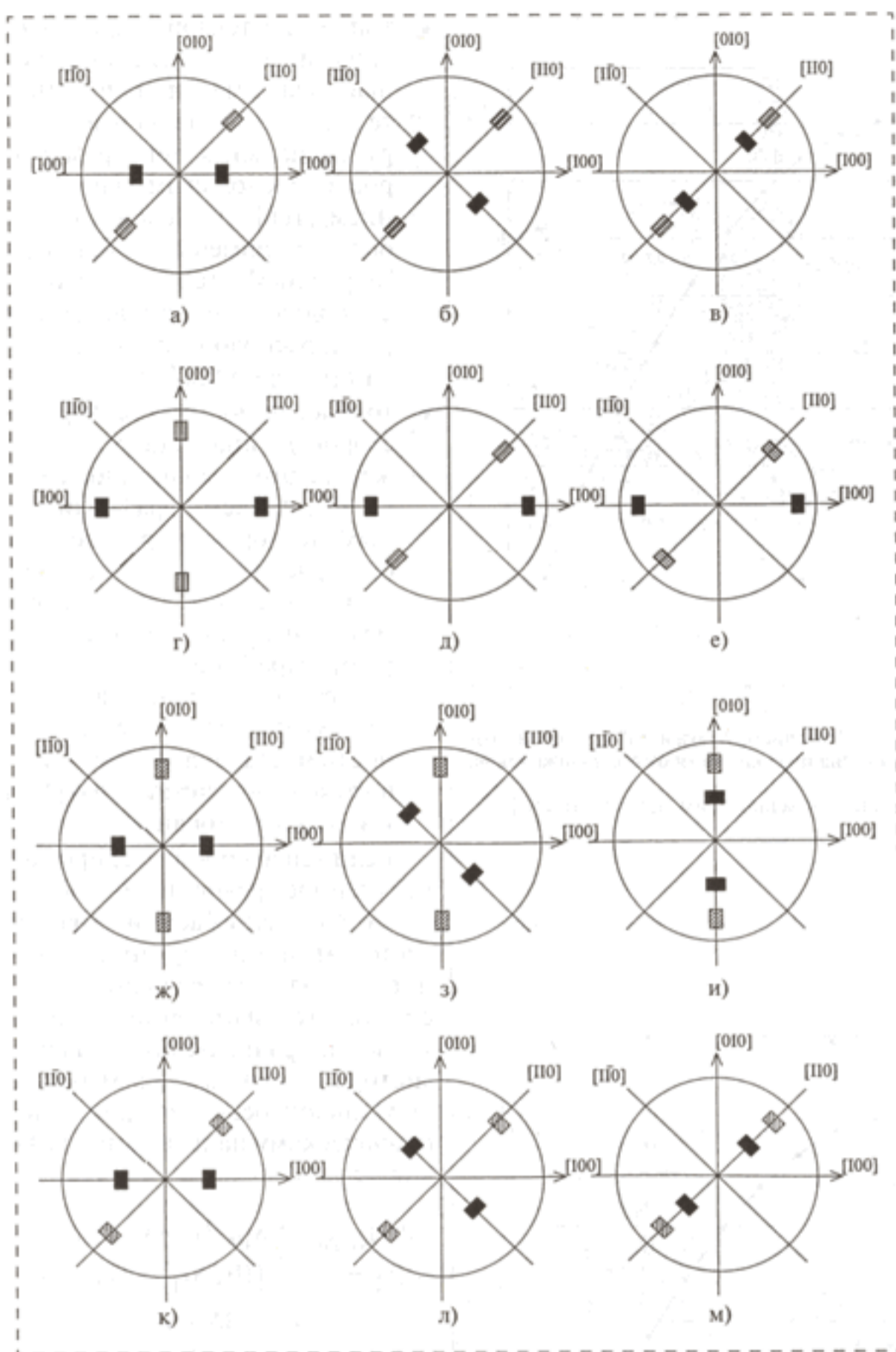


Рис. 2. Варианты топологии полного активного моста Уитстона из тензорезисторов *n*-типа проводимости, предложенные В. И. Вагановым [6]

ных плечах моста, имеют разную штриховку.

При внимательном рассмотрении вариантов топологии их оказывается только 9, так как варианты топологии частично повторяются. В самом деле известно, что кристаллографическое направление [100] физически эквивалентно кристаллографическому направлению [010], а кристал-

лографическое направление [110] физически эквивалентно кристаллографическому направлению [110]. Поэтому:

- вариант 2, *в* является полным аналогом варианта 2, *а*, так как расположенные в центре тензорезисторы имеют продольные оси вдоль одинаковых кристаллографических направлений этой плоскости;

- вариант 2, *е* является полным аналогом варианта 2, *д* по той же самой причине;
- вариант 2, *и* является полным аналогом варианта 2, *з* по той же самой причине.

Совершенно непонятны причины, побудившие автора этой работы предлагать топологию с чувствительностью 0,49 от максимально возможной (варианты 2, *з—и*) или 0,51 от максимально возможной (варианты 2, *л, м*). В вариант 2, *к*, как нам представляется, вкралась ошибка в вычислениях, что дало чувствительность 1,02 от максимально возможной.

Построим эпюры относительного изменения сопротивления $\Delta r/r$ "точечных" тензорезисторов *n*-типа проводимости для кристаллографических направлений [100] и [110] (рис. 3 и 4), а также эпюру относительного изменения сопротивления $\Delta r/r$ "точечных" тензорезисторов *p*-типа проводимости для кристаллографического направления [110] (рис. 5), так как при направлении продольной оси тензорезисторов *p*-типа проводимости по кристаллографическому направлению [100] имеет место весьма малое относительное изменение сопротивления.

Проанализируем полученные результаты:

- топология, представленная на рис. 2, *а*, обладает чувствительностью примерно (0,7...0,8) от максимально возможной, причем центр тяжести тензорезистора, расположенного в смежном плече моста, находится на расстоянии (0,7...0,8)*R*;
- топология, представленная на рис. 2, *б* и *в*, обладает чувствительностью (0,4...0,6) от максимально возможной. Особо отметим, что все тензорезисторы моста, имеющие продольную ось по направлению [110], должны быть "радиальными". При этом максимальная чувствительность ограничивается тензорезистором, расположенным у заделки мембраны, и составляет (0,7...0,8) от максимально возможной;

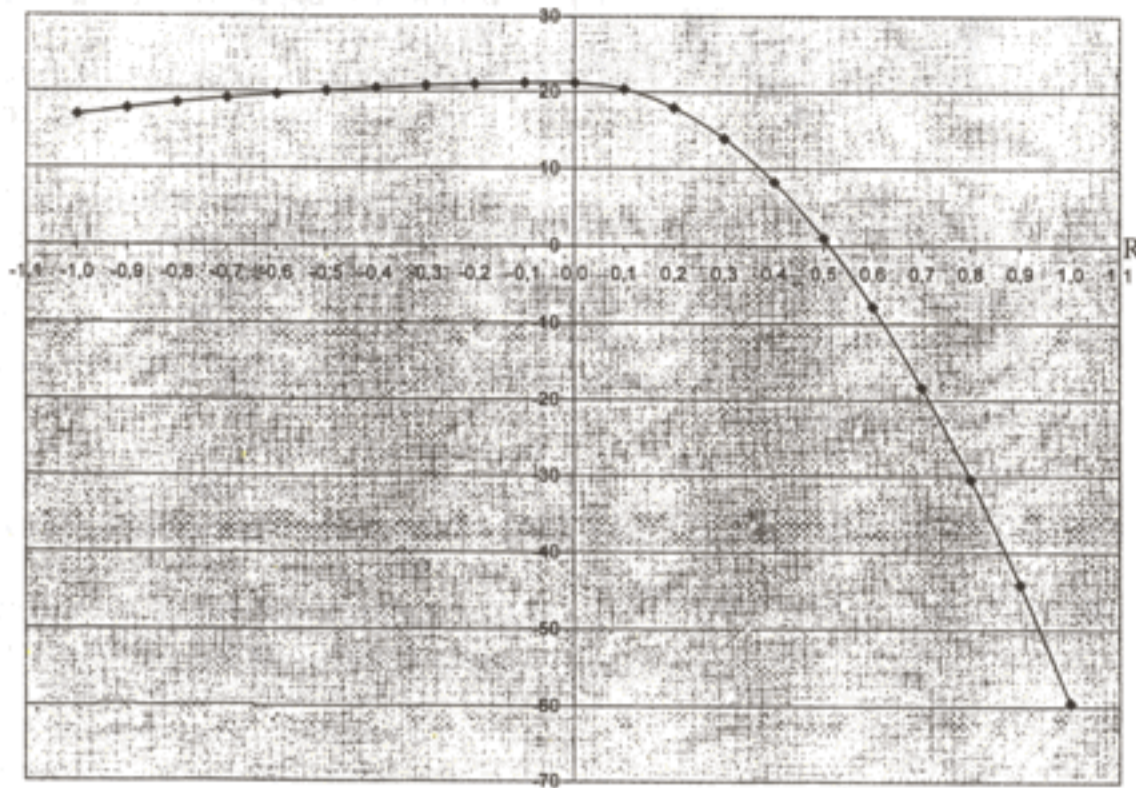


Рис. 3. Относительное изменение сопротивления "точечного окружного" (слева) и "точечного радиального" (справа) тензорезистора *n*-типа проводимости от его положения на радиусе *R* мембраны
Продольная ось на рис. 3—5 совпадает с кристаллографическим направлением [100] (масштаб по оси ординат $\times \rho R^2 / 10^{11}$ Па h^2)

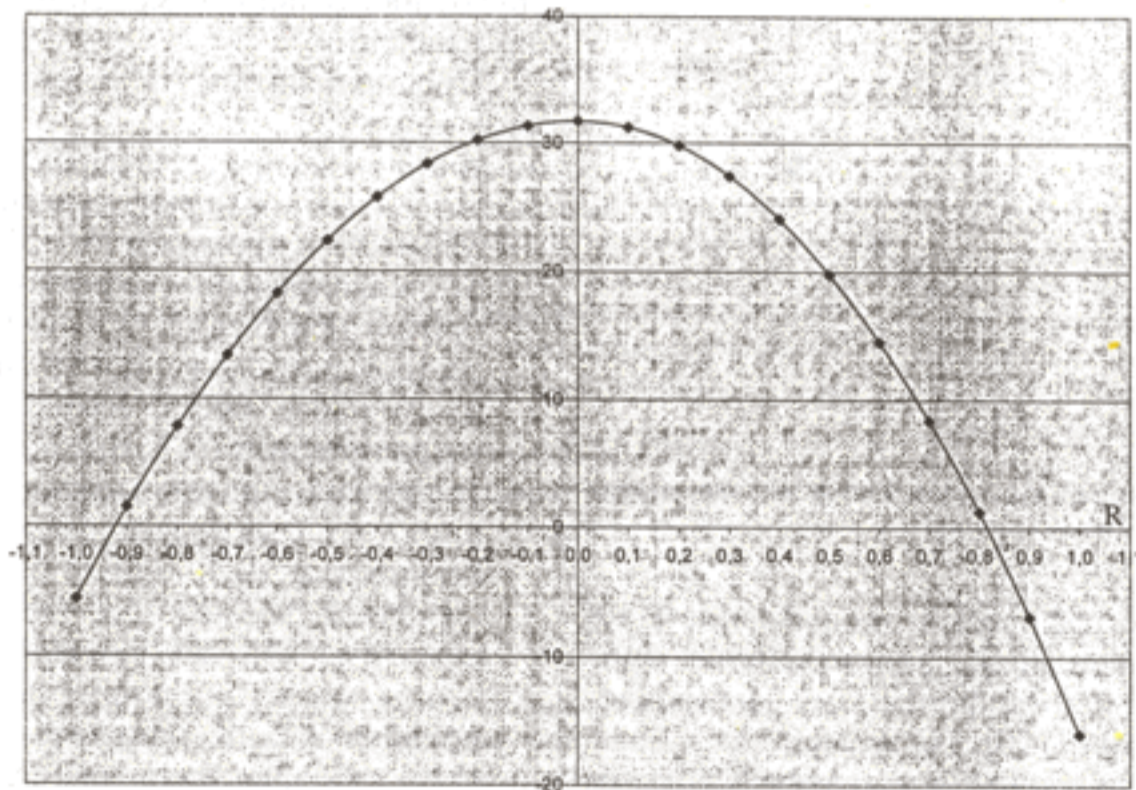


Рис. 4. Относительное изменение сопротивления "точечного окружного" (слева) и "точечного радиального" (справа) тензорезистора *n*-типа проводимости, если его продольная ось совпадает с кристаллографическим направлением [110]

- топология тензорезисторов *n*-типа проводимости, обладающая максимальной чувствительностью, должна иметь пару "радиальных" тензорезисторов с продольным направлением [100], расположенных в области примерно $0,8R$, и пару "окружных" тензорезисторов с продольным направлением [110], расположенных в области примерно $0,2R$;
- топология моста из тензорезисторов *p*-типа остается такой же, как это было предложено в [4, 12], причем пара "радиальных" тензорезисторов должна быть расположена на расстоянии примерно $0,8R$ от центра мембраны по направлению [110]; пара "окружных" тензорезисторов, ограничивающих максимальную чувствительность моста, должна быть расположена по направлению [110] у заделки мембраны.

Если теперь проинтегрировать полученное уравнение по площади $dx \times dy$, занимаемой тензорезистором, и взять среднее значение, то получим уравнение относительного изменения сопротивления "радиального" тензорезистора конечных размеров с продольной осью по кристаллографическому направлению [100] в виде

$$\begin{aligned}
 (\Delta r/r)_{\text{ср.рад}} = & K_{100} T_{11} \rho (x_2 - x_1)^{-1} \times \\
 & \times (y_2 - y_1)^{-1} \iint [(3S_{11} - S_{12})x^2 + \\
 & + (S_{11} - 3S_{12})y^2 + \\
 & + (S_{11} - S_{12})R^2] dx dy + \\
 & + K_{100} T_{12} \rho (x_2 - x_1)^{-1} (y_2 - y_1)^{-1} \times \\
 & \times \iint [(S_{11} - 3S_{12})x^2 + \\
 & + (3S_{11} - S_{12})y^2 + \\
 & + (S_{11} - S_{12})R^2] dx dy, \quad (14 \text{ а})
 \end{aligned}$$

где x_1, x_2 — левая и правая границы тензорезистора; y_1, y_2 — нижняя и верхняя границы тензорезистора.

Аналогично для "окружного" тензорезистора конечных размеров с продольной осью по кри-

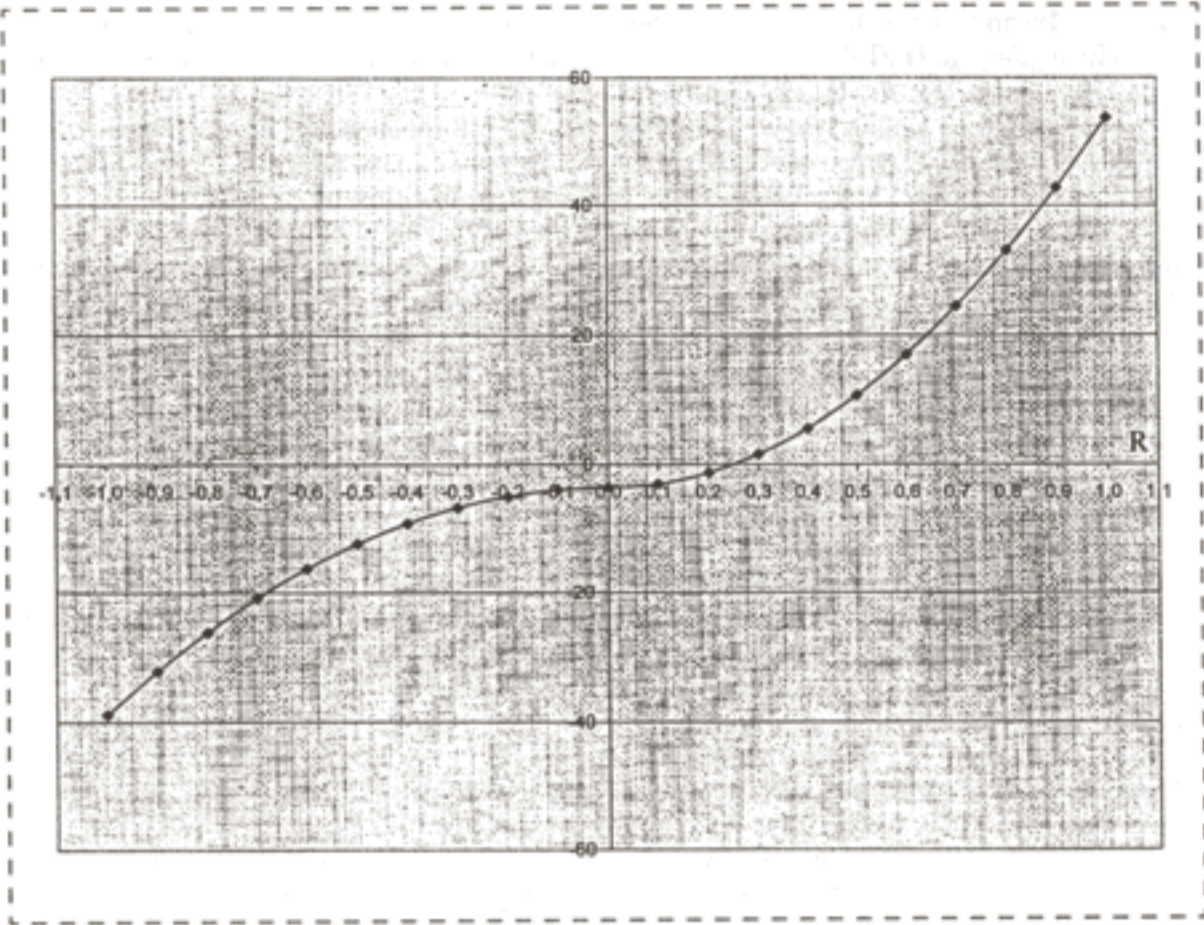


Рис. 5. Относительное изменение сопротивления "точечного окружного" (слева) и "точечного радиального" (справа) тензорезистора *p*-типа проводимости, если его продольная ось совпадает с кристаллографическим направлением [110]

сталлографическому направлению [100] будем иметь:

$$\begin{aligned}
 (\Delta r/r)_{\text{ср.окр}} = & K_{100} T_{12} p (x_2 - x_1)^{-1} \times \\
 & \times (y_2 - y_1)^{-1} \iint [(3S_{11} - S_{12})x^2 + \\
 & + (S_{11} - 3S_{12})y^2 + \\
 & + (S_{11} - S_{12})R^2] dx dy + \\
 & + K_{100} T_{11} p (x_2 - x_1)^{-1} (y_2 - y_1)^{-1} \times \\
 & \times \iint [(S_{11} - 3S_{12})x^2 + \\
 & + (3S_{11} - S_{12})y^2 + \\
 & + (S_{11} - S_{12})R^2] dx dy. \quad (14 б)
 \end{aligned}$$

Для "радиального" тензорезистора обоих типов проводимости конечных размеров с продольной осью по кристаллографическому направлению [110] будем иметь:

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{\Delta r}{r}\right)_{\text{ср.рад}} = & \frac{K_{110} p}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \times \\
 & \times \left[(T_{11} + T_{12} + T_{44}) \int \int_{x_1 y_1}^{x_2 y_2} [(S_{11} + \right. \\
 & + S_{12} + S_{44})x^2 - (S_{11} + S_{12} - \\
 & - S_{44})y^2 - 0,5S_{44}R^2] dx dy -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - (T_{11} + T_{12} - T_{44}) \int \int_{x_1 y_1}^{x_2 y_2} [(S_{11} + \\
 & + S_{12} - S_{44})x^2 - (S_{11} + S_{12} + \\
 & + S_{44})y^2 + 0,5S_{44}R^2] dx dy \Big],
 \end{aligned}$$

что дает окончательно

$$\begin{aligned}
 (\Delta r/r)_{\text{ср.рад}} = & 0,333(T_{11} + T_{12} + \\
 & + T_{44})p(S_{11} + S_{12} + S_{44})(x^2 + \\
 & + x_2 x_1 + x_1)/[K_{110}(x_2 - x_1) \times \\
 & \times (y_2 - y_1)] - 0,333(T_{11} + T_{12} + \\
 & + T_{44})p(S_{11} + S_{12} - S_{44}) \times \\
 & \times (y_2 + y_2 x_1 + y_1)/[K_{110}(x_2 - \\
 & - x_1)(y_2 - y_1)] + 0,333(T_{11} + \\
 & + T_{12} - T_{44})p(S_{11} + S_{12} - S_{44}) \times \\
 & \times (x_2 + x_2 x_1 + x_1)/[K_{110}(x_2 - \\
 & - x_1)(y_2 - y_1)] - 0,333(T_{11} + \\
 & + T_{12} - T_{44})p(S_{11} + S_{12} - S_{44}) \times \\
 & \times (y_2 + y_2 x_1 + y_1)/[K_{110}(x_2 - \\
 & - x_1)(y_2 - y_1)] - p(T_{11} + T_{12}) \times \\
 & \times S_{44}R/[K_{110}(x_2 - x_1) \times \\
 & \times (y_2 - y_1)], \quad (15)
 \end{aligned}$$

где $K_{110} = -0,5[2(S_{11} + S_{12} + 0,5S_{44})(S_{11} - S_{12}) + 0,25(S_{11} + S_{12})S_{44}]$.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

- топология полного активного моста Уитстона из тензорезисторов *p*-типа, предложенная нами в [4, 12], не претерпела каких-либо изменений;
- топология полного активного моста Уитстона из тензорезисторов *n*-типа проводимости имеет максимальную чувствительность, если продольная ось радиального тензорезистора (в одном плече моста) направлена по [100] и сам он находится у заделки мембраны, а продольная ось тензорезистора, находящегося в смежном плече моста, направлена по [110], а центр его тяжести находится на расстоянии $\sim 0,2R$ от центра мембраны.

Данные работ [6, 21] при записи выходного сигнала моста Уитстона в форме (14 а, б) и (15) позволяют определить вклад температуры в результаты измерений.

Этапы проектирования топологии:

- по верхнему пределу измеряемого давления *p* определяем отношение R/h ;
- выбираем тип ионного легирования — "базовое" или "эмиттерное";
- выбираем форму тензорезисторов и их ширину;
- определяем число "квадратов", т. е. номинальное сопротивление тензорезисторов;
- в случае использования тензорезисторов *n*-типа проводимости с продольной осью по [100] вычерчиваем их положение у заделки мембраны, а по уравнению (14 а) определяем относительное изменение его сопротивления;
- по уравнению (15) с помощью итерационных вычислений определяем положение радиального тензорезистора *n*-типа проводимости с продольной осью по [110] и относительное изменение его сопротивления.

Таким образом, полученные в настоящей работе уравнения (14 а) для тензорезисторов n -типа проводимости и (15) для тензорезисторов p -типа проводимости позволяют определить правую и левую, верхнюю и нижнюю границы области, занимаемой тензорезисторами на круглой заземленной по контуру и нагруженной распределенным давлением МК-мембране, ориентированной по (100). При этом учитываются верхний предел измерений и параметры R и h мембраны. Формулы (14 а) и (15) позволяют определить вклад температуры в изменение упругих постоянных МК и, следовательно, в изменение выходного сигнала моста.

Список литературы

1. Андреева Л. Е. Упругие элементы приборов. М.: Машгиз, 1962. 455 с.
2. Баранский П. И., Клочков В. П., Потыкевич И. В. Полупроводниковая электроника. Свойства материалов (Справочник). Киев: Наукова думка, 1975, 704 с.
3. Беликов Л. В. Проектирование топологии тензорезисторного моста Уитстона, расположенного на монокристаллической кремниевой мембране, ориентированной по (111) // Микросистемная техника. 2001, № 8. С. 14—18.
4. Беликов Л. В., Берников В. Б., Евдокимов В. И. и др. О проектировании датчиков давления с интегральными тензопреобразователями. М.: ЦНИИТЭИ-приборостроения, 1971. 20 с.
5. Бердинский А. С., Кальпус В. Ю. Измерительные характеристики тензочувствительных элементов мембранного

типа // Физика и техника полупроводников. Новосибирск: НЭТИ. 1976. С. 96—101.

6. Буренков Ю. А., Никаноров С. П. Температурная зависимость упругих свойств кремния // Физика твердого тела. 1974. Т. 16. Вып. 5. С. 1496—1498.

7. Ваганов В. И. Интегральные тензопреобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1983. 136 с.

8. Вустер У. Применение тензоров и теории групп для описания физических свойств кристаллов: Пер. с англ. М.: Мир, 1977. 383 с.

9. Гридчин В. А. Расчет интегральной тензочувствительной мостовой схемы на круглой мембране // Физика и техника полупроводников. Новосибирск: НЭТИ. 1974. С. 120—133.

10. Евдокимов В. И., Шадгина А. Г. Методика расчета преобразователей на основе кремнийсапфировых структур для измерения малых и средних давлений // Материалы конференции "Измерительные преобразователи механических и тепловых величин на базе микроэлектроники" М.: МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1980. С. 46—54.

11. Еланская Л. Г., Фомин В. Г. Прочность некоторых полупроводниковых монокристаллов при комнатной температуре // Труды ГИРЕДМЕТ. Вып. 66. 1974. С. 19—25.

12. Заседателев С. М., Беликов Л. В., Берников В. Б. и др. О проектировании датчиков давления с интегральными тензопреобразователями // Приборы и системы управления. 1971. № 11. С. 45—48.

13. Кальпус В. Ю. Механические характеристики интегрального тензочувствительного элемента в форме круглой мембраны // Физика и техника полупроводников. Новосибирск: НЭТИ, 1975. С. 19—26.

14. Кальпус В. Ю., Куракова Л. М. Влияние технологических факторов на тензочувствительность элементов мембранного типа // Физика и техника полупроводников. Новосибирск: НЭТИ. 1976. С. 106—113.

15. Кальпус В. Ю., Пятков А. В. Интегральный тензочувствительный элемент

на круглой кремниевой мембране // Физика и техника полупроводников. Новосибирск: НЭТИ. 1975. С. 98—103.

16. Концевой Ю. А., Литвинов Ю. М., Фаттахов Э. А. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь. 1982. 239 с.

17. Лехницкий С. Г. Анизотропные пластинки. Изд. 2-е, переработ. и доп. М.: ГИТТЛ, 1957. 463 с.

18. Мильман С. И. Расчет элементов тензочувствительных схем // Труды ГосНИИ теплоэнергетического приборостроения. Вып. 80. 1973. С. 137—162.

19. Мильман С. И. Характеристики гетероэпитаксиальных кремниевых тензорезисторов на монокристаллических сапфировых подложках // Труды ГосНИИ теплоэнергетического приборостроения. Вып. 83. 1977. С. 3—20.

20. Най Дж. Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц. Изд. 2-е: Пер. с англ., М.: Мир, 1967. 385 с.

21. Никаноров С. П., Буренков Ю. А., Степанов А. В. Упругие свойства кремния // Физика твердого тела. 1971. Т. 13. Вып. 10. С. 3001—3004.

22. Носкин А. Б. Расчет чувствительности интегральных преобразователей давления мембранного типа с учетом анизотропии механических свойств кремния // Электронная измерительная техника в научных исследованиях, М.: Энергоатомиздат, 1982. С. 11—15.

23. Пивоненков Б. И., Стучебников В. М. Проектирование полупроводниковых интегральных тензочувствительных структур // Приборы и системы управления. 1976. № 1. С. 20—21.

24. Терстен Р. Применение полупроводниковых преобразователей для измерения деформаций, ускорений и смещений // Физическая акустика / Под ред. У. Мэзона. Т. 1. Методы и приборы ультразвуковых исследований. Часть Б: Пер. с англ. М.: Мир, 1967. С. 187—209.

25. Тимошенко С. П., Лессельс Дж. Прикладная теория упругости. Изд. 3-е, стереотипное: Пер. с англ. М.-Л.: ГНТИ, 1931. 392 с.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МСТ

УДК 546.28:535.3

Т. С. Перова¹, канд. физ.-мат. наук,
Е. К. Астрова², канд. физ.-мат. наук,
О. А. Усов², канд. физ.-мат. наук,

¹Department of Electronic and Electrical
Engineering, University of Dublin, Trinity College,
Dublin-2, Ireland;

²Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе,
РАН (Санкт-Петербург)

ИК СПЕКТРЫ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ, ВВЕДЕННЫХ В КАНАЛЫ МАКРОПОРИСТОГО КРЕМНИЯ*

Оптические свойства макропористого кремния с регулярной структурой цилиндрических каналов, заполненных жидкими кристаллами (ЖК), были исследованы методом ИК Фурье спектроскопии. Показано, что стержнеобразные сегнетоэлектрические ЖК ориентированы вдоль стенок пор, а оси колонн ЖК дискотиков перпендикулярны к ним. Обнаружен эффект усиления низкочастотных полос поглощения некоторых молекулярных колебаний ЖК в пористой матрице кремния.

Введение

Пористые системы, такие как пористые полупроводники, искусственные опалы и т. п., привлекают в настоящее время большое внимание исследователей. Особый интерес вызывают пористые матрицы с периодической структурой, которые могут иметь запрещенные зоны для фотонов [1]. Введение ЖК в пористые системы позволяет контролировать положение запрещенной зоны за счет изменения показателя преломления [2, 3]. Однако процессы инфильтрации ЖК материалов и их поведение в ограниченном пространстве каналов макропористого кремния находятся лишь на начальной стадии исследований [4]. В данной работе методом ИК спектроскопии была изучена ориентация ЖК молекул различной формы в макропористой кремниевой матрице.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 01-02-017853), Программы Министерства промышленности, науки и технологий "Наноструктурные приборы"(Гос. контракт № 40.072.1.1.1180).

Эксперимент

Исследованный в данной работе макропористый кремний (рис. 1, а, см. вторую сторону обложки) представляет собой кремниевую пластину с регулярными цилиндрическими каналами диаметром 3—4,5 мкм, глубиной 200—250 мкм, образующими треугольную решетку с периодом 12 мкм. Травление пор осуществлялось в растворе HF с подсветкой пластины кремния с обратной стороны [5]. Для инфильтрации в матрицу кремния были использованы два типа жидких кристаллов, структура которых показана на рис. 1, б (см. вторую сторону обложки): коммерческий сегнетоэлектрический ЖК (ЖКС) типа SCE-8 и дискотический ЖК (ЖКД) типа Н7Т-NO₂ на основе трифенилена. Инфильтрация ЖК в поры макропористого кремния осуществлялась за счет капиллярного эффекта при температуре приблизительно на 10 °С выше критической температуры перехода в изотропное состояние.

ИК спектры поглощения вышеупомянутых композитов были получены с помощью Фурье спектрометра Digilab FTS60A в диапазоне 450–4000 см⁻¹. Ориентация молекул ЖК в матрице макропористого кремния была определена путем сравнения относительной интенсивности и положения различных полос поглощения в объемных ячейках с различной ориентацией ЖК и в пористой кремниевой матрице. Для этой цели были приготовлены ЖК ячейки из ZnSe с планарной и гомеотропной ориентацией. Спектры поглощения ЖК были измерены для двух поляризаций с вектором электрического поля, параллельным и перпендикулярным оси (плоскости) ЖК молекул.

Результаты

На рис. 2, а и б представлены спектры молекулярных колебаний ЖКД в объемных ячейках с гомеотропной и планарной ориентацией, а также в макропористом кремнии. Обычно ориентация ЖКД определяется по отношению к оси колонны (нормали к плоскости диска). При этом считают, что ориентация ЖКД планарна, если ось колонны расположена в плоскости подложки, и гомеотропна, если перпендикулярна к ней.

На рис. 2, а и б показаны ИК спектры ЖКД в области C—C валентного колебания (1590—1640 см⁻¹) и C—H внеплоскостного колебания (800—890 см⁻¹) бензольного кольца. Как видно на рис. 2, а, спектры поглощения C—C колебаний в диапазоне 1590—1640 см⁻¹ (спектры приведены к интенсивно-

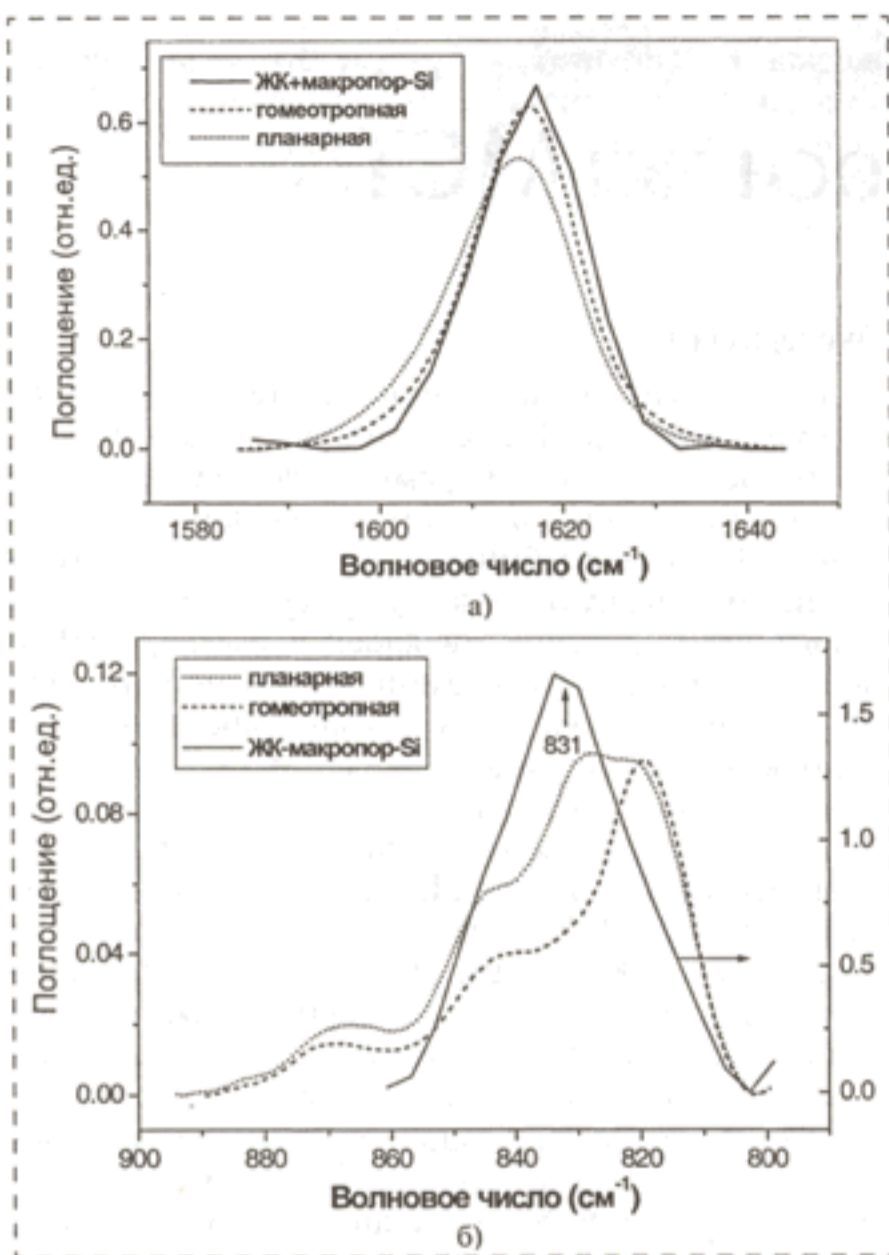


Рис. 2. ИК спектры жидкого кристалла Н7Т-NO₂ в макропористой кремниевой матрице (жирная линия) и в объемных ячейках из ZnSe при планарной (штриховая линия) и гомеотропной (пунктирная линия) ориентациях

сти алкильной цепочки в диапазоне 2800–3000 см⁻¹, где ориентационные эффекты малы) для всех трех образцов достаточно близки между собой по положению и форме. В то же время из спектра, показанного на рис. 2, б, видно, что максимум сложной полосы С–Н колебаний находится при 831 см⁻¹ для ЖКД в ячейке с планарной ориентацией и в пористой матрице, и при 820 см⁻¹ для ячейки с гомеотропной ориентацией. Для определения характера ориентации ЖК молекул в пористой матрице было использовано так называемое дихроичное отношение $R_{ij} = A_i/A_j$, которое позволяет оценить соотношение относительных интенсивностей, параллельных (A_i) и перпендикулярных (A_j) к плоскости молекул колебаний. При рассмотрении такого дихроичного отношения важно правильно выбрать A_i и A_j , чтобы дипольные моменты переходов для этих колебаний были взаимно перпендикулярны. Для расчета отношения R_{ij} сложная полоса 800–890 см⁻¹ была разложена на составляющие с использованием четырех функций Фойгта. Дихроичное отношение, рассчитанное из С–С ко-

лебаний (A_i) на частоте 1610 см⁻¹ и С–Н колебаний (A_j) на частоте 831 см⁻¹, равно 31,0 для ЖК в гомеотропной ячейке, 7,0 для планарной ячейки и только 0,4 для Н7Т-NO₂ в пористой матрице.

Таким образом, молекулы ЖКД Н7Т-NO₂ в макропористом кремнии ориентированы так же, как молекулы этого ЖК в объемной ячейке с планарной ориентацией. Это означает, что ориентация молекул Н7Т-NO₂ гомеотропна по отношению к стенкам пор (рис. 3, б, см. вторую сторону обложки), что согласуется с результатами работы [6], в которой показано, что гомеотропная ориентация дискообразных молекул более устойчива.

Из анализа ИК спектров ЖКС молекул SCE-8 в макропористом кремнии видно, что относительные интенсивности колебаний, параллельных и перпендикулярных к длинной оси молекулы, близки к тем, что наблюдаются для гомеотропной ориентации ЖКС в ячейке, т. е. ЖКС в порах кремния находится в гомеотропной ориентации относительно плоскости подложки (или в планарной ориентации по отношению к стенкам пор, рис. 3, а, см. вторую сторону обложки). Этот вывод совпадает с результатами, полученными ранее при исследовании ориентации нематических ЖК в макро- и микропористом кремнии [7]. Такая ориентация стержнеобразных молекул ЖК наблюдается также на необработанных поверхностях различных материалов, в том числе на кремниевых подложках [8]. Необходимо заметить, что гомеотропная ориентация стержнеподобных молекул обычно получается только в результате специальных методов обработки поверхности (покрытие серфактантами).

Кроме того, как видно на рис. 2, для ЖКД обнаружен эффект усиления интенсивности низкочастотных полос поглощения молекулярных колебаний ЖК в области 800–900 см⁻¹. Эффект усиления интенсивности наблюдается для обоих типов ЖК и для всех колебательных полос, которые соответствуют длинам волн, сравнимым с постоянной решетки (12 мкм) фотонного кристалла.

Это позволяет предположить, что эффект усиления связан с локализацией света в макропорах данного фотонного кристалла аналогично тому, как это наблюдается в волноводах с фотонной щелью [9]. Похожий эффект усиления интенсивности поглощения наблюдался в одномерных фотонных кристаллах с микрорезонаторами [10]. Эффект усиления интенсивности низкочастотных полос поглощения некоторых молекулярных колебаний ЖК, возможно, связан с резонансным усилением интенсивности света в каналах макропористого кремния аналогично эффекту Пурселя в микрорезонаторах [11].

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что стенки каналов оказывают ориенти-

рующее действие на молекулы ЖК так, что стержнеобразные молекулы сегнетоэлектрических ЖК выстраиваются вдоль стенок, а оси колонн (нормаль к плоскости диска) дискообразных молекул ориентируется перпендикулярно к ним.

Обнаружено заметное влияние периодической среды на колебательные свойства молекул ЖК, введенных в каналы макропористого кремния.

Авторы благодарят А. Г. Ткаченко за помощь в приготовлении образцов, проф. Дж. К. Виджа за содействие в проведении измерений ИК спектров и А. А. Акову за предоставление дискообразного ЖК $H7T-NO_2$.

Список литературы

1. Yablonovitch E. Photonic Crystals // J. of Modern Optics. 1994. 41. 2. P. 173—194.
2. Bush K., John S. Liquid-Crystal Photonic-Band-Gap Materials: The Tunable Electromagnetic Vacuum // Phys. Rev. Lett. 1999. 83. 5. P. 967—970.

3. Thonissen M., Marso M., Arens-Fisher R. et al. Electrical Control of the Reflectance of Porous Silicon Layers // J. Porous Materials. 2000. 7. 1. P. 205—208.

4. Leonard S. V., Mondia J. P., Van Driel H. M. et al. Tunable two-dimensional crystals using liquid crystal infiltration // Phys. Rev. B. 2000. 61. 4. P. R2389—R2391.

5. Lehmann V., Foll H. Formation Mechanism and Properties of Electrochemically Etched Trenches in *n*-Type Silicon // J. Electrochem. Soc. 1990. 137. 3. P. 653—659.

6. Perova T. S., Vij J. K. and Kocot A. The Investigation of the Structure and the Orientation of Molecules in Discotic Liquid Crystals Using Infrared Spectroscopy // Adv. Chem. Phys. 2000. 113. 2. P. 341—345.

7. Wolkin M. V., Chan S. and Fauchet P. M. Proceeding of the International Conference Silicon. Madrid, Spain, March, 2000. P. O-58.

8. Sonin A. A. The Surface Physics of Liquid Crystals, Gordon & Breach Science Pub, Amsterdam, 1995. P. 7—11.

9. Желтиков А. М. Дырчатые волноводы // Успехи Физических наук. 2000. 170. 11. С. 1203—1215.

10. Alieva E. V., Kuzik L. A., Mattei G. et al. Use a Microcavity Mode in Porous Silicon Superlattice to Enhance Band Intensities in Vibrational Spectra // Phys. Stat. Sol(a). 1999. 175. 1. P. 175—179.

11. Boroditsky M., Vrijen R., Krauss T. F. et al. Spontaneous Emission Extraction and Purcell Enhancement from Thin-Film 2-D Photonic Crystals // J. Lightwave Technol. 1999. 17. 11. P. 2096—2103.

ПРИМЕНЕНИЕ МСТ

УДК 535.34

В. И. Рудаков, д-р физ.-мат. наук, В. В. Овчаров, В. П. Пригара,
Институт микроэлектроники и информатики
РАН, г. Ярославль

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛА С ПОМОЩЬЮ РАДИАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В СИСТЕМАХ С РАДИАЦИОННЫМ ТЕПЛООБМЕНОМ

Приведена классификация радиационных тепловых систем "нагреватель—поглощатель" по зависимости плотности теплового потока между ними от температуры поглотителя при фиксированной температуре нагревателя. Предложен метод исследования структурных и физических свойств поверхности тела на основе анализа ИК-излучения в такой стационарной тепловой системе. Метод основан на использовании зависимости плотности теплового потока между ИК-излучателем и поверхностью от ее температуры. Описана схема эксперимента, позволяющая реализовать этот метод. Обсуждается вопрос устойчивости стационарных состояний в системе радиационного теплообмена.

Введение

Взаимодействие тела с электромагнитным излучением характеризуется его интегральными или спектральными оптическими характеристиками:

коэффициентами поглощения, отражения и пропускания. В свою очередь, само тело является источником электромагнитного излучения, энергия которого характеризуется его степенью черноты. Если интегральная степень черноты определяется только свойствами самого тела — его природой и температурой, то интегральные коэффициенты поглощения, отражения и пропускания зависят также от спектрального состава падающего излучения. Источником этого излучения являются другие тела, образующие систему, в которой происходит процесс обмена энергией [1]. Таким образом, интегральный коэффициент поглощения характеризует скорее свойства системы, чем поглощающей поверхности, в то время как степени черноты каждого из тел системы являются всего лишь косвенными характеристиками процесса радиационного теплообмена. Аналогично, индивидуальные свойства химических веществ, вступающих в реакцию, несут в себе информацию о ходе реакции в непроявленном виде. Характер взаимодействия между ними, определяемый их качественными и количественными параметрами, позволяет их классифицировать, например, как взрывоопасные или невзрывоопасные смеси. Подобным образом лучистый теплообмен в зависимости от природы и температуры тел, составляющих систему, будет проявлять те или иные особенности, которые можно классифицировать с помощью характеристики, описывающей тепловое взаимодействие в системе в зависимости от ее параметров [2]. Мерой взаи-

рующее действие на молекулы ЖК так, что стержнеобразные молекулы сегнетоэлектрических ЖК выстраиваются вдоль стенок, а оси колонн (нормаль к плоскости диска) дискообразных молекул ориентируется перпендикулярно к ним.

Обнаружено заметное влияние периодической среды на колебательные свойства молекул ЖК, введенных в каналы макропористого кремния.

Авторы благодарят А. Г. Ткаченко за помощь в приготовлении образцов, проф. Дж. К. Виджа за содействие в проведении измерений ИК спектров и А. А. Акову за предоставление дискообразного ЖК $H7T-NO_2$.

Список литературы

1. Yablonovitch E. Photonic Crystals // J. of Modern Optics. 1994. 41. 2. P. 173—194.
2. Bush K., John S. Liquid-Crystal Photonic-Band-Gap Materials: The Tunable Electromagnetic Vacuum // Phys. Rev. Lett. 1999. 83. 5. P. 967—970.

3. Thonissen M., Marso M., Arens-Fisher R. et al. Electrical Control of the Reflectance of Porous Silicon Layers // J. Porous Materials. 2000. 7. 1. P. 205—208.

4. Leonard S. V., Mondia J. P., Van Driel H. M. et al. Tunable two-dimensional crystals using liquid crystal infiltration // Phys. Rev. B. 2000. 61. 4. P. R2389—R2391.

5. Lehmann V., Foll H. Formation Mechanism and Properties of Electrochemically Etched Trenches in *n*-Type Silicon // J. Electrochem. Soc. 1990. 137. 3. P. 653—659.

6. Perova T. S., Vij J. K. and Kocot A. The Investigation of the Structure and the Orientation of Molecules in Discotic Liquid Crystals Using Infrared Spectroscopy // Adv. Chem. Phys. 2000. 113. 2. P. 341—345.

7. Wolkin M. V., Chan S. and Fauchet P. M. Proceeding of the International Conference Silicon. Madrid, Spain, March, 2000. P. O-58.

8. Sonin A. A. The Surface Physics of Liquid Crystals, Gordon & Breach Science Pub, Amsterdam, 1995. P. 7—11.

9. Желтиков А. М. Дырчатые волноводы // Успехи Физических наук. 2000. 170. 11. С. 1203—1215.

10. Alieva E. V., Kuzik L. A., Mattei G. et al. Use a Microcavity Mode in Porous Silicon Superlattice to Enhance Band Intensities in Vibrational Spectra // Phys. Stat. Sol(a). 1999. 175. 1. P. 175—179.

11. Boroditsky M., Vrijen R., Krauss T. F. et al. Spontaneous Emission Extraction and Purcell Enhancement from Thin-Film 2-D Photonic Crystals // J. Lightwave Technol. 1999. 17. 11. P. 2096—2103.

ПРИМЕНЕНИЕ МСТ

УДК 535.34

В. И. Рудаков, д-р физ.-мат. наук, В. В. Овчаров, В. П. Пригара,
Институт микроэлектроники и информатики
РАН, г. Ярославль

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛА С ПОМОЩЬЮ РАДИАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В СИСТЕМАХ С РАДИАЦИОННЫМ ТЕПЛООБМЕНОМ

Приведена классификация радиационных тепловых систем "нагреватель—поглощатель" по зависимости плотности теплового потока между ними от температуры поглотителя при фиксированной температуре нагревателя. Предложен метод исследования структурных и физических свойств поверхности тела на основе анализа ИК-излучения в такой стационарной тепловой системе. Метод основан на использовании зависимости плотности теплового потока между ИК-излучателем и поверхностью от ее температуры. Описана схема эксперимента, позволяющая реализовать этот метод. Обсуждается вопрос устойчивости стационарных состояний в системе радиационного теплообмена.

Введение

Взаимодействие тела с электромагнитным излучением характеризуется его интегральными или спектральными оптическими характеристиками:

коэффициентами поглощения, отражения и пропускания. В свою очередь, само тело является источником электромагнитного излучения, энергия которого характеризуется его степенью черноты. Если интегральная степень черноты определяется только свойствами самого тела — его природой и температурой, то интегральные коэффициенты поглощения, отражения и пропускания зависят также от спектрального состава падающего излучения. Источником этого излучения являются другие тела, образующие систему, в которой происходит процесс обмена энергией [1]. Таким образом, интегральный коэффициент поглощения характеризует скорее свойства системы, чем поглощающей поверхности, в то время как степени черноты каждого из тел системы являются всего лишь косвенными характеристиками процесса радиационного теплообмена. Аналогично, индивидуальные свойства химических веществ, вступающих в реакцию, несут в себе информацию о ходе реакции в непроявленном виде. Характер взаимодействия между ними, определяемый их качественными и количественными параметрами, позволяет их классифицировать, например, как взрывоопасные или невзрывоопасные смеси. Подобным образом лучистый теплообмен в зависимости от природы и температуры тел, составляющих систему, будет проявлять те или иные особенности, которые можно классифицировать с помощью характеристики, описывающей тепловое взаимодействие в системе в зависимости от ее параметров [2]. Мерой взаи-

модействия естественно принять плотность радиационного теплового потока q , а в качестве параметров выбрать температуры T_i тел, составляющих систему. Тогда зависимость $q(T_1, \dots, T_n)$ (n — число тел, участвующих в теплообмене) будет непосредственным образом характеризовать радиационные свойства системы. В простейшей системе, состоящей из двух тел — "нагревателя" и "поглощателя", удобно зафиксировать температуру нагревателя T_1 , а для описания свойств системы использовать характеристику зависимости плотности потока от температуры поглотителя T_2 : $q(T_2)$. В дальнейшем мы будем называть ее радиационной характеристикой.

В данной работе проведена классификация систем "нагреватель—поглотитель" с помощью радиационных характеристик и исследованы их особенности. На основе этой классификации предложены метод и модель устройства, позволяющие идентифицировать свойства исследуемой поверхности: химический состав, степень шероховатости и структуру приповерхностного слоя.

Физическая основа метода

Рассмотрим систему из двух бесконечных плоскостепенных пластин, помещенных в вакуум, одна из которых является нагревателем, а вторая — поглотителем.

В стационарном случае теплообмен излучением между ними в приближении серых тел описывается формулой Христиансена:

$$q = \sigma \epsilon_r (T_h^4 - T_a^4), \tag{1}$$

где q — плотность теплового потока, Вт/м²; σ — постоянная Стефана—Больцмана, Вт/м²К⁴; T_h — температура нагревателя, К; T_a — температура поглотителя, К; ϵ_r — приведенная степень черноты, выражение которой содержит степени черноты поглотителя $\epsilon_a(T_a)$ и нагревателя $\epsilon_h(T_h)$:

$$\epsilon_r = (1/\epsilon_h + 1/\epsilon_a - 1)^{-1}. \tag{2}$$

В случае, если модель серого тела оказывается недостаточной и необходимо учитывать зависимость степени черноты от длины волны λ , можно воспользоваться спектральным аналогом формулы Христиансена [3]:

$$q = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{e_{\lambda b, h}(\lambda, T_h) - e_{\lambda b, a}(\lambda, T_a)}{1/\epsilon_h(\lambda, T_h) + 1/\epsilon_a(\lambda, T_a) - 1} d\lambda, \tag{3}$$

где

$$e_{\lambda b, h}(\lambda, T_h) = \frac{2\pi C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T_h)] - 1}, \tag{4}$$

$$e_{\lambda b, a}(\lambda, T_a) = \frac{2\pi C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T_a)] - 1}, \tag{5}$$

$e_{\lambda b, h}(\lambda, T_h)$ — спектральная поверхностная плотность потока излучения нагревателя из абсолютно черного тела (АЧТ); $e_{\lambda b, a}(\lambda, T_a)$ — спектральная поверхностная плотность потока излучения поглотителя из АЧТ; λ_1, λ_2 — границы спектрального интервала.

Переход от формулы (1) к формуле (3) связан с тем, что в качестве нагревателя обычно используется металл, а в качестве поглотителя — диэлектрик, спектральные характеристики которых сильно отличаются друг от друга (рис. 1, а, б). Это приводит к тому, что эффективный теплообмен излучением между ними осуществляется в ограниченном спектральном интервале $\Delta\lambda$. Этот интервал задается той частью спектральной характеристики металлического нагревателя $e_h(\lambda, T_h)$, в которой он излучает почти всю поступающую к нему энергию. В свою очередь, степень черноты диэлектрика $\epsilon_a(\lambda, T_a)$ (см. рис. 1, б) может сильно зависеть от рассматриваемого интервала $\Delta\lambda$. В результате характеристика $q(T_a)$, построенная с помощью формулы (1), в которой степени черноты $\epsilon_h(T)$ и $\epsilon_a(T)$

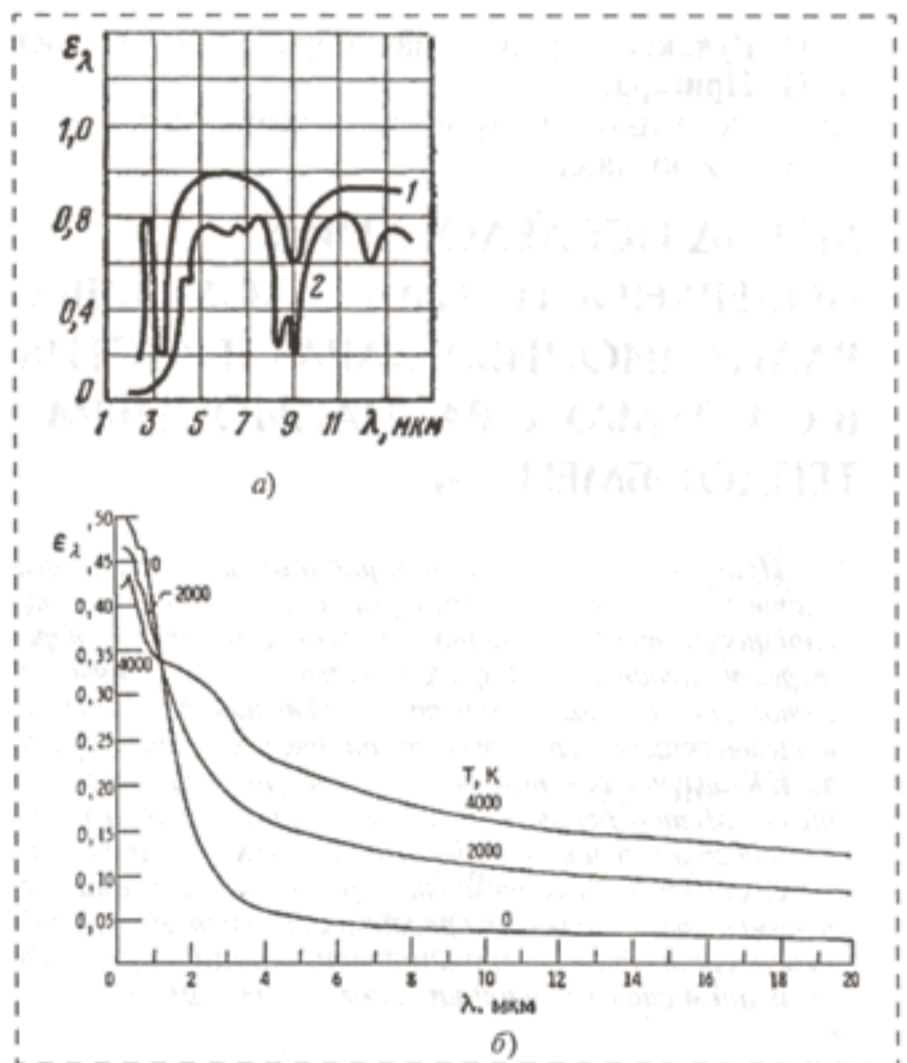


Рис. 1. Спектральная степень черноты ϵ_λ : а — кварцевого стекла при температурах 811 К (1) и 500 К (2) на интервале 2...12 мкм [2]; б — вольфрама при различных температурах [3]

характеризуют весь спектр длин волн (интегральная степень черноты),

$$\varepsilon(T) = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda, T) \varepsilon_{\lambda b}(\lambda, T) d\lambda}{\sigma T^4}, \quad (6)$$

может сильно отличаться от характеристики $q(T_a)$, построенной по формуле (3). Для того, чтобы привести в соответствие зависимости, построенные по формулам (1) и (3), введем интервальную степень черноты

$$\varepsilon_{\Delta\lambda}(T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, T) \varepsilon_{\lambda b}(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda b}(\lambda, T) d\lambda}. \quad (7)$$

С помощью этой величины или ее более простого аналога

$$\varepsilon_{\Delta\lambda}(T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, T) d\lambda}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (8)$$

можно громоздкие расчеты по формуле (3) в первом приближении заменить более простыми расчетами по формуле Христиансена (1). С ее помощью можно также решить и обратную задачу: поставить в соответствие характеристике $q(T_a)$, построенной по формуле (3), такую приведенную степень черноты $\varepsilon_r(T_h, T_a)$, которая обеспечила бы тождественность обеих характеристик при подстановке в формулу (1).

Рассмотрим в качестве поглотителя исследуемый образец — поверхность полупроводниковой пластины. Известно, что степень черноты зависит от шероховатости поверхности, состава и структуры поверхностного слоя. Поэтому зависимость $q(T_h, T_a)$ несет в себе информацию о поглощающих свойствах поверхности исследуемого образца, которую можно выделить, зная свойства поверхности нагревателя. Эта задача относится к классу обратных задач и может быть решена с помощью введения гипотезы о виде температурной зависимости степени черноты поглотителя $\varepsilon_a(T_a)$. В связи с этим представляет интерес проблема моделирования и классификации характеристик $q(T_h, T_a)$ в зависимости от свойств $\varepsilon_a(T_a)$.

Типичные представители металлов и диэлектриков имеют, как правило, монотонные характеристики: металлы — возрастающие, диэлектрики — убывающие. Поэтому классификацию характеристик $q(T_a)$ можно провести в зависимости от знака производной $\beta = d\varepsilon_a/dT$ (рис. 2). Тогда положи-

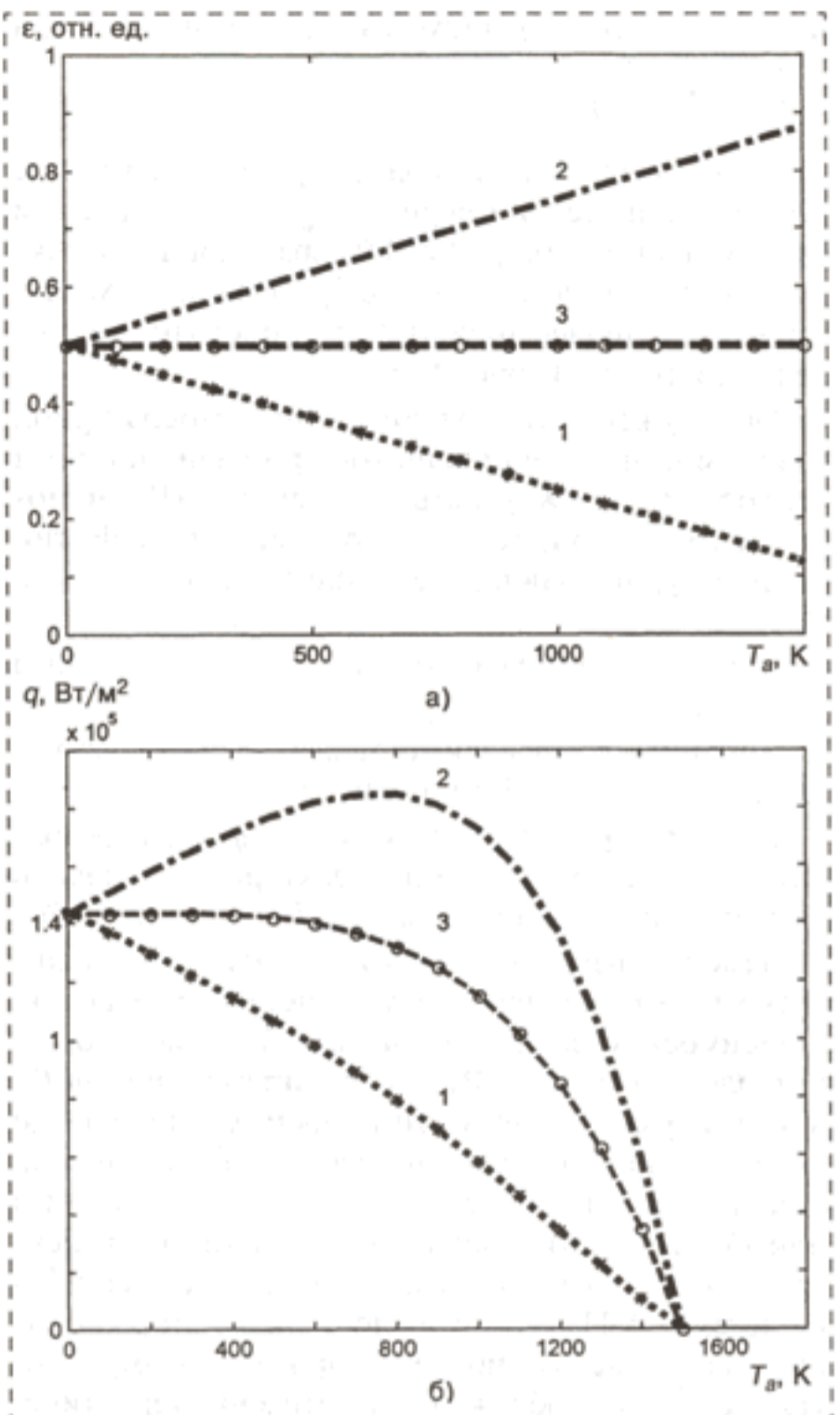


Рис. 2. Классификация характеристик $q(T_a)$ в зависимости от значения производной $\beta = d\varepsilon_a/dT$:

a — модельное представление температурной зависимости степени черноты $\varepsilon_a = \alpha + \beta T_a$ (α, β — постоянные); *b* — общий вид температурной зависимости плотности теплового потока при радиационном теплообмене между нагревателем и поглотителем с различными значениями коэффициента β : кривая 1 соответствует значениям $\beta < 0$; кривая 2 — $\beta > 0$; кривая 3 — $\beta = 0$

тельным производным будут соответствовать монотонно возрастающие характеристики, отрицательным — монотонно убывающие, и значению нуль — излучающие характеристики типа серого тела.

Влияние $\varepsilon_a(T_a)$ на ход зависимости $q(T_a)$ в первом приближении оценим, моделируя $\varepsilon_a(T_a)$ линейной функцией

$$\varepsilon_a(T_a) = \alpha + \beta T_a, \quad (9)$$

где α и β — постоянные коэффициенты, они могут принимать те или иные фиксированные значения в зависимости от свойств материала, степень чер-

ноты которого моделируется, причем $0 \leq \alpha \leq 1$, а $-\frac{1}{T_h} \leq \beta \leq \frac{1-\alpha}{\alpha T_h}$.

Были исследованы модельные температурные зависимости степени черноты $\epsilon_a(T_a)$ с различным знаком постоянной β : $\beta > 0$ (возрастающие, характерные для металлов); $\beta < 0$ (убывающие, характерные для диэлектриков); $\beta = 0$ (постоянные, модель серого тела) (рис. 2, а).

Обнаружено, что каждому типу температурной зависимости степени черноты при радиационном теплообмене между нагревателем из АЧТ и модельным поглотителем соответствует свой тип температурной зависимости плотности теплового потока:

1-й тип: $\beta > 0$ зависимость $q(T_a)$, содержащая максимум;

2-й тип: $\beta < 0$ зависимость $q(T_a)$ резко убывающая, с перегибом, без максимума;

3-й тип: при $\beta = 0$ зависимость $q(T_a)$ переходная между двумя типами характеристик: плавно убывающая с максимумом при $T_a = 0$ (рис. 2, б).

Замена нагревателя из АЧТ реальным металлическим нагревателем требует учета спектральной зависимости степени черноты $\epsilon(\lambda, T)$, участвующих в теплообмене тел. Расчет характеристики $q(T_a)$ в этом случае нужно вести по формуле (3) или по формуле (1), но с использованием интервальной степени черноты, определяемой соотношением (7) или (8). При этом для такого типичного диэлектрика, как плавленый кварц, характеристика $q(T_a)$ в системе "АЧТ—кварц" относится ко второму типу, а в системе "молибден—кварц" к первому типу. На рис. 3, а, б изображены обе эти характеристики, построенные для соосных цилиндрических нагревателя и поглотителя, для которых реализуется условие радиационной замкнутости системы. Для построения $q(T_a)$ в системе "АЧТ—кварц" (рис. 3, а) использовалась формула (1) и аналитическое выражение для интегральной степени черноты плавленого кварца $\epsilon_a(T_a) = 1,315 - 8,33 \cdot 10^{-4} T_a$, полученное из анализа графика для температуры 500...800 К, приведенного в [4]. Для построения $q(T_a)$ в системе "молибден—кварц" (рис. 3, б) использовалась формула (3). Зависимости $\epsilon_h(\lambda, T)$ и $\epsilon_a(\lambda, T)$ взяты соответственно из [5] и [4]. Соответствующая интервальная степень черноты, позволяющая построить $q(T_a)$ по формуле (1) на интервале длин волн от 1 до 6 мкм при температурах поглотителя 500...800 К и нагревателя 900...1400 К, определена по формуле (8):

$$\begin{aligned} \epsilon_{\Delta\lambda, h}(T_h) &= 1,078 \cdot 10^{-2} + 6,95 \cdot 10^{-5} T_h; \\ \epsilon_{\Delta\lambda, a}(T_a) &= -2,896 \cdot 10^{-2} + 6,828 \cdot 10^{-4} T_a. \end{aligned}$$

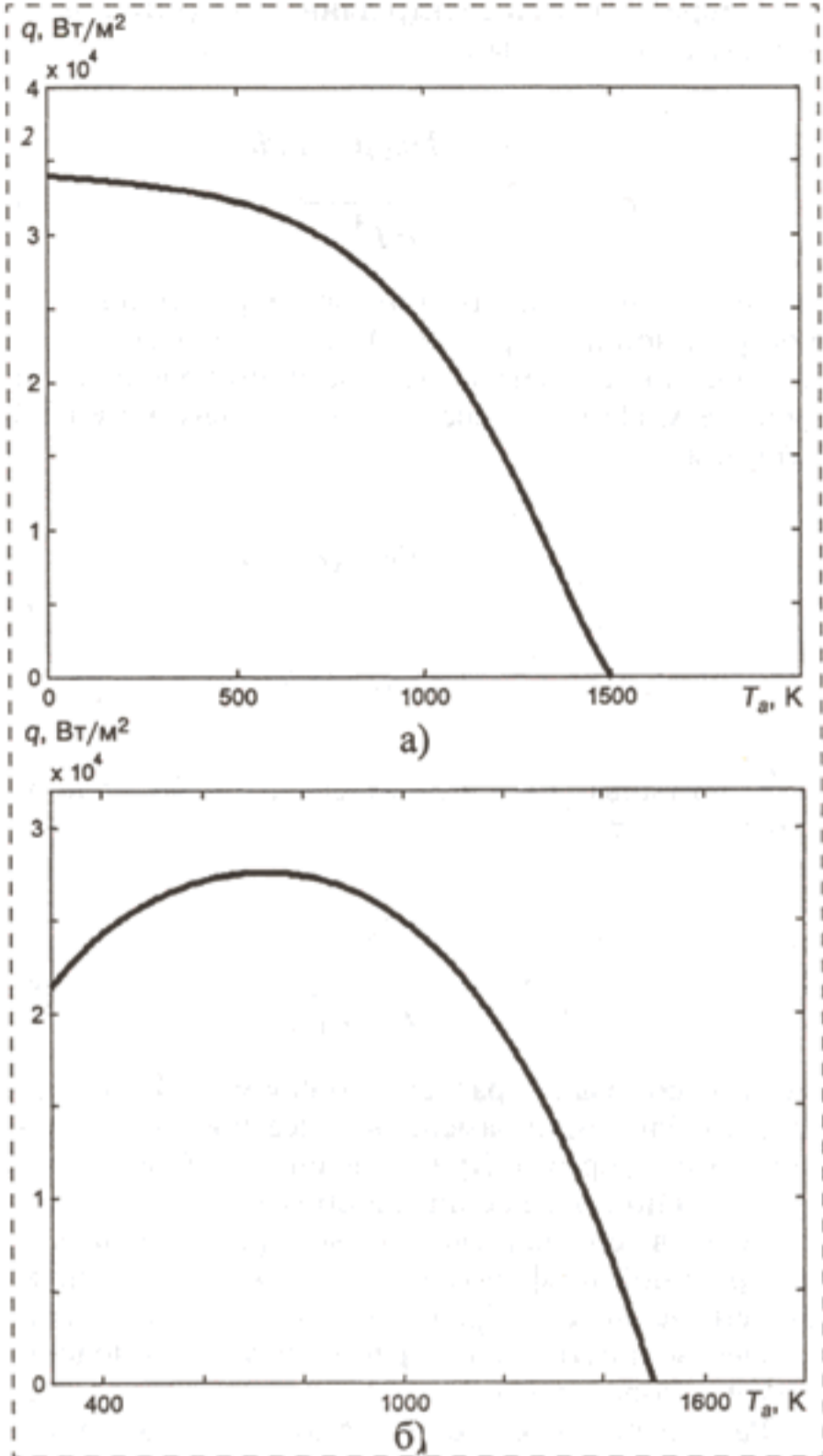


Рис. 3. Характеристика $q(T_a)$ в системе: а — "АЧТ—кварц"; б — "молибден—кварц"

Модель устройства для снятия характеристики $q(T_a)$

Для снятия характеристики $q(T_a)$ (T_h — фиксируется) предлагается модель экспериментальной установки, принципиальная схема которой изображена на рис. 4. Она содержит три близко расположенные плоскопараллельные пластины: вспомогательный нагреватель $h1$, поглотитель a , он же — исследуемая поверхность, и основной нагреватель h , расположенный между ними. Температура основного нагревателя T_h фиксирована, и ее значение известно. Температура исследуемой поверхности T_a , а с ней и температура вспомогательного нагревателя T_{h1} , контролируется так, чтобы при изменении T_a выполнялось условие $T_h = \text{const}$.



Рис. 4. Модель устройства для снятия характеристики $q(T_a)$

Чтобы исключить другие виды теплообмена кроме излучения, указанное устройство помещается в вакуум. Предположим, что степени черноты излучающих и поглощающих поверхностей вспомогательного $\varepsilon_{h1}(\lambda T)$ и основного $\varepsilon_h(\lambda T)$ нагревателей известны, а степень черноты поглотителя $\varepsilon_a(\lambda T)$ — неизвестна.

В качестве исследуемой системы, для которой строится характеристика $q(T_a)$, рассмотрим излучающую поверхность основного нагревателя h и поверхность поглотителя a . Тогда $q(T_a)$ соответствует плотности потока q_{ha} при $T_h = \text{const}$. В стационарном состоянии плотность теплового потока между вспомогательным и основным нагревателем q_{h1h} может быть рассчитана по формулам (1) и (2) при известных температурах T_{h1} и T_h . Если степень черноты поглотителя $\varepsilon_a(\lambda T)$ — неизвестна, то рассчитать плотность потока между основным нагревателем и поглотителем q_{ha} невозможно, но в стационарном состоянии в этом и нет необходимости, так как

$$q_{h1h} = q_{ha} \quad (10)$$

Таким образом, если в процессе контролируемого изменения температуры поглотителя T_a , температура вспомогательного нагревателя T_{h1} меняется так, что температура основного нагревателя остается постоянной, $T_h = \text{const}$, то каждому измеренному значению T_a ставится в соответствие рассчитанное значение $q_{h1h} = q_{ha}$, т. е. находятся две координаты точки снимаемой характеристики $q(T_a)$. Тогда, меняя T_a в достаточно широком интервале температур, можно построить характеристику $q(T_a)$. Поскольку в данном устройстве для построения $q(T_a)$ знать радиационные свойства поглотителя необязательно, то по полученной характеристике можно восстановить его степень черноты и идентифицировать материал поглотителя.

Из анализа рис. 2, а, б следует, что характеристики $q(T_a)$ целесообразно снимать, начиная с максимально возможной для исследуемой поверхности температуры, обеспечивающей минимальное значение плотности потока q_{ha} между основным нагревателем и поглотителем. (Ограничения, на-

кладываемые на температуру поглотителя, могут быть связаны с необходимостью сохранения химического или структурного состава исследуемой поверхности.) При таком подходе мы можем избежать неоднозначности трактовки результатов для характеристик $q(T_a)$, имеющих максимум. Как видно из рис. 5, для таких характеристик существует участок изменения q :

$$P_c < q < P_{\text{max}}$$

на котором уравнение (1) имеет два решения T_a^* и T_a^{**} , соответствующие значению $q = P^*$ внутри этого участка (здесь P — излучаемая мощность). При этом решения, соответствующие левой от T_{max} ветви характеристики $q(T_a)$, неустойчивы по отношению к малому изменению q , и эта ветвь характеристики не описывает реально достижимых стационарных состояний системы "нагреватель—поглотитель". Чтобы убедиться в этом, дадим малое приращение Δq в окрестности точки $P = P^*$, соответствующей участку $P_c < q < P_{\text{max}}$ (см. рис. 5). Так как температура нагревателя должна оставаться постоянной, то на правой ветви для компенсации увеличения Δq необходимо уменьшить T_a . Двигаясь таким образом от точки к точке по правой ветви, мы дойдем до температуры $T_a^* = T_{\text{max}}$, соответствующей максимально возможному значению плотности теплового потока излучения в данной системе при фиксированной температуре основного нагревателя $T_h = \text{const}$. Дальнейшая компенсация приращения излучаемой мощности с помощью уменьшения температуры поглотителя

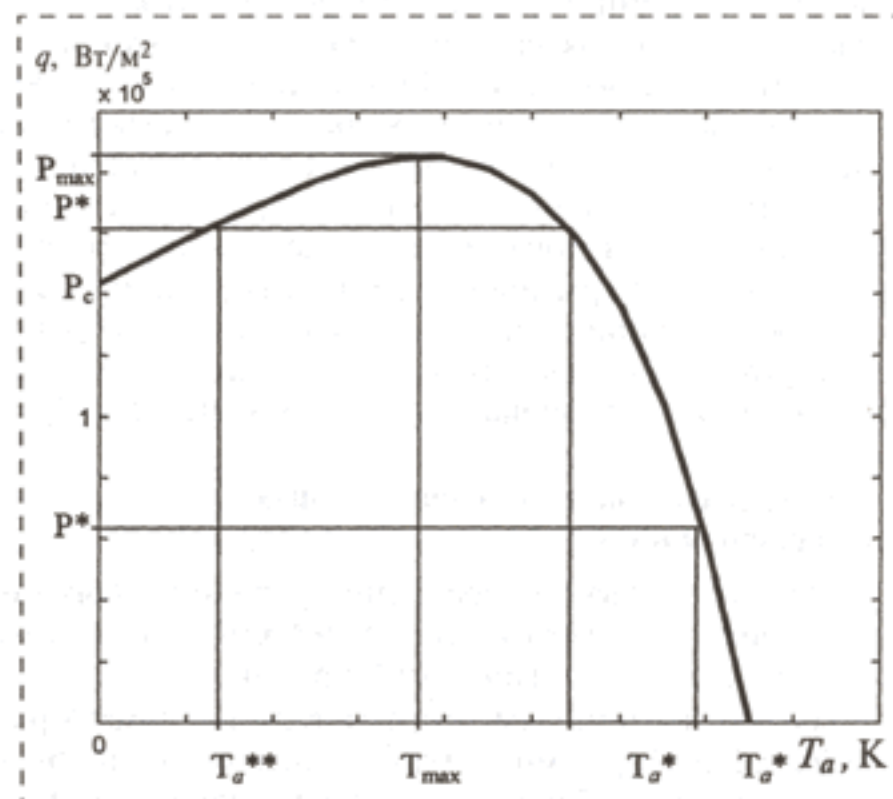


Рис. 5. Графическая иллюстрация проблемы неустойчивости в системе радиационного теплообмена для характеристик $q(T_a)$ с максимумом

T_a невозможна, так как стационарное значение плотности потока на левой ветви уменьшается с понижением T_a .

Если поглотитель представляет собой пластину толщиной b , материал которой имеет плотность ρ и теплоемкость c , то при отклонении плотности отводимого потока q от его стационарного значения q_s , температура пластины будет меняться по закону

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{q - q_s}{c\rho b} \quad (11)$$

При $q = q_s$ имеем $T = T_s = \text{const}$, и система находится в стационарном состоянии. Пусть теперь температура поглотителя $T_a^* < T_{\text{max}}$ (см. рис. 5), т. е. рабочая точка системы находится на левой ветви характеристики. При случайном небольшом увеличении отводимого от поглотителя теплового потока, его температура начнет уменьшаться, что на левой ветви характеристики приведет к уменьшению поступающего потока. Это, в свою очередь, приведет к новому уменьшению температуры и т. д. Аналогично, при случайном уменьшении отводимого теплового потока температура поглотителя начнет увеличиваться, а это приведет к увеличению потока между нагревателем и поглотителем и дальнейшему росту температуры поглотителя. Таким образом, при изменении отводимого от поглотителя теплового потока q и возникающего в результате этого отклонения температуры поглотителя от установившегося значения появляется избыточный тепловой поток $\pm(q - q_s)$, увеличивающий это отклонение.

Физическая трактовка неустойчивости в системах радиационного теплообмена с монотонно возрастающими характеристиками $\epsilon_a(T_a)$ требует дальнейших исследований. Принципиальным вопросом является сама возможность существования пика на характеристике $q(T_a)$, описывающей реальный теплообмен излучением. Прежде всего необходимы исследования в области адекватности применения формулы (3) для реальных процессов теплообмена при значительной разности температур излучателя и поглотителя $\Delta T > T_h/2$, для которых появляется нисходящая ветвь характеристик $q(T_a)$.

Метод исследования поверхностных неоднородностей

Метод основан на сравнении радиационных характеристик поверхности исследуемой пластины до и после технологической обработки.

Одной из проблем этого метода является правильный выбор температурного интервала, в котором с целью обеспечения максимальной разрешающей способности метода различие между степенью черноты поверхности до и после обработки было бы наибольшим.

Если задан нагреватель при температуре T_0 (например, тугоплавкий металл с максимумом излучательной способности в ближней ИК области спектра), то максимум его длины волны (мкм) можно оценить по закону Вина:

$$\lambda_{\text{max}} = 2890/T_0 \quad (12)$$

Допустим, что значение λ_{max} попадает в один из специфических интервалов (λ_1, λ_2) , где спектры двух сравниваемых поверхностей $\epsilon_1(\lambda, T_0)$ и $\epsilon_2(\lambda, T_0)$ существенно отличаются друг от друга. Тогда можно ожидать, что температурные зависимости $\epsilon_1(\lambda, T)$ и $\epsilon_2(\lambda, T)$ на небольшом температурном интервале, покрывающем значение T_0 , будут заметно отличаться.

Спектральный интервал длин волн $[\lambda_1, \lambda_2]$, на котором ожидаются существенные различия степени черноты поверхности до и после обработки, всегда можно выбрать, так как специфика обработки исследуемой поверхности известна. Зная этот интервал, можно подобрать соответствующий нагреватель и его температуру T_h с максимумом длины волны излучения λ_{max} именно на этом интервале. При выполнении этих условий можно ожидать, что температурные зависимости степени черноты поверхности до и после обработки будут заметно отличаться.

Эти соображения могут быть положены в основу выбора температурного интервала построения характеристики $q(T_a)$ двух сравниваемых поверхностей. Например, в кремнии n -типа формируют слой p -типа. Спектры коэффициента поглощения на интервале 1...5 мкм для n - и p -типа кремния существенно различны (на рис. 6 приведены спектры пропускания для n - и p -типа Si).

Если такой кремний n - и p -типа "посмотреть" в системе (см. рис. 4) с нагревателем, максимум излучения которого также приходится на интервал 1...5 мкм, то построенные характеристики $q(T_a)$ для материалов n - и p -типа будут существенно различными.

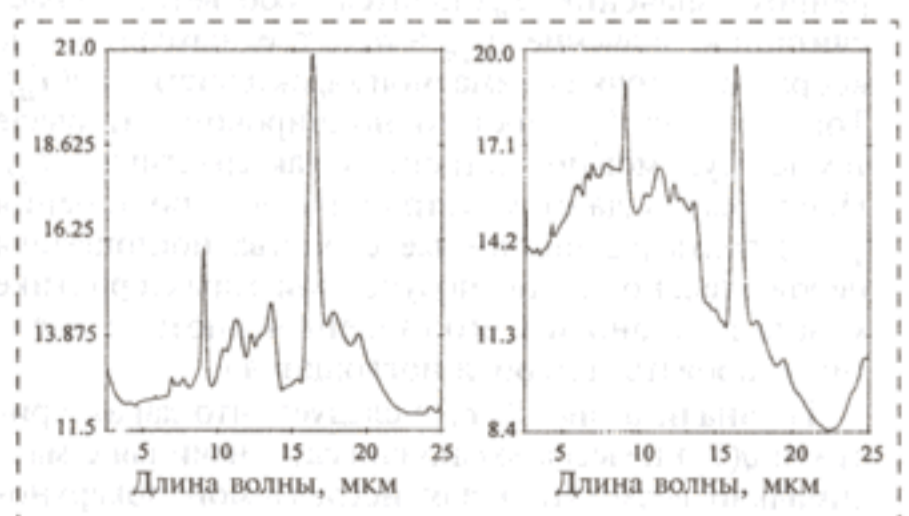


Рис. 6. Спектр пропускания кремния (%) на интервале, чувствительном к типу легирующей примеси: а — n -тип; б — p -тип

Заключение

Выполнена классификация стационарных тепловых систем "нагреватель—поглотитель" на основе радиационных характеристик, описывающих зависимость плотности теплового потока как функцию температуры поглотителя при фиксированной температуре нагревателя. Выделены два типа характеристик. Характеристики первого типа имеют максимум и неустойчивую по отношению к малым флуктуациям теплового потока ветвь. Характеристики второго типа являются монотонно убывающими. Проведено обсуждение неустойчивости в радиационных тепловых системах первого типа.

На основе проведенной классификации предложен метод исследования поверхностных свойств, использующий температурную чувствительность степени черноты исследуемой поверхности. Метод позволяет построить радиационную характеристи-

ку системы "нагреватель—поглотитель" и восстановить по полученным данным степень черноты, коэффициент поглощения и материал исследуемой поверхности. Предложена принципиальная схема устройства для снятия радиационных характеристик.

Список литературы

1. Блох А. Г. Основы теплообмена излучением. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. 332 с.
2. Рудаков В. И., Овчаров В. В., Пригара В. П. Сб. докладов Всероссийской научно-технической конференции "Микро- и наноэлектроника-2001", Звенигород, 2001.
3. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975. 935 с.
4. Излучательные свойства твердых материалов: Справочник под общ. ред. А. Е. Шейндлина. М.: Энергия, 1974. 472 с.
5. Брамсон М. А. Справочные таблицы по инфракрасному излучению нагретых тел. М.: Наука, 1964.

УДК 629.7.005

С. В. Абрамов, В. М. Ачильдиев, канд. техн. наук, ФГУП НИИ ПМ им. академика В. И. Кузнецова, Москва;

О. А. Мезенцев, МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, PD candidate, University of Calgary, Canada

МОБИЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЛОКАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА УРБОЭКОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ МИКРОЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Анализируются работы по созданию мобильного комплекса для локального мониторинга урбоэкосистем на основе микролетательных аппаратов. Рассмотрены схемы комплекса и микролетательных аппаратов, их состав и основные проектные характеристики. Приведены предварительные расчетные и экспериментальные характеристики отдельных элементов микролетательного аппарата.

Развитие микроэлектроники, вычислительной техники и особенно микромеханики, а также появление новых композиционных материалов создали основу технических средств для разработки микролетательных аппаратов (МЛА) локального наблюдения урбоэкосистем. МЛА как отдельный подкласс дистанционно пилотируемых летательных аппаратов (ДПЛА) — это полуавтономный или автономный летательный аппарат, размером менее 15 см в любом измерении, массой около 100 г. МЛА должен выполнять различные военные и гражданские задания, имея при этом приемлемую це-

ну (менее 1000 долл.). На аппарате должна быть установлена видеокамера с отображением изображения в режиме реального времени, навигационная и связная аппаратура. МЛА должен летать от 20 мин до 2 ч с радиусом действия от 1 до 10 км и скоростью больше 45 км/ч.

Основными задачами, которые должны решать МЛА, являются разведка (фото и видео в режиме реального времени); ретрансляция связи в городских условиях; поисково-спасательные работы; исследования внутренних областей зданий; передача информации о результатах применения управляемых боеприпасов и корректировка огня; контроль лесных массивов и сельскохозяйственных угодий; слежение за миграцией зверя в охотничьих хозяйствах; контроль за экологическим состоянием окружающей среды: взятие проб воздуха (газовоздушной смеси), воды (жидкой среды), грунта; дистанционное наблюдение Земли.

В настоящее время на основе микромеханических и наномеханических систем ведутся разработки новых классов автономно пилотируемых (АП) МЛА и микророботов с массой от долей грамма до нескольких десятков граммов [1, 2]. Основное преимущество микророботов и МЛА для наблюдения и исследования планет Солнечной системы и Земли — это их низкая стоимость по сравнению с обычными аппаратами [3].

Конструкции таких АП МЛА в зависимости от назначения и резкой смены условий эксплуатации будут существенно отличаться друг от друга. Так, например, АП МЛА для исследования Марса наиболее рационально выполнить по самолетной схеме, а для исследования Венеры аппарат имеет

Заключение

Выполнена классификация стационарных тепловых систем "нагреватель—поглощатель" на основе радиационных характеристик, описывающих зависимость плотности теплового потока как функцию температуры поглотителя при фиксированной температуре нагревателя. Выделены два типа характеристик. Характеристики первого типа имеют максимум и неустойчивую по отношению к малым флуктуациям теплового потока ветвь. Характеристики второго типа являются монотонно убывающими. Проведено обсуждение неустойчивости в радиационных тепловых системах первого типа.

На основе проведенной классификации предложен метод исследования поверхностных свойств, использующий температурную чувствительность степени черноты исследуемой поверхности. Метод позволяет построить радиационную характеристи-

ку системы "нагреватель—поглощатель" и восстановить по полученным данным степень черноты, коэффициент поглощения и материал исследуемой поверхности. Предложена принципиальная схема устройства для снятия радиационных характеристик.

Список литературы

1. Блох А. Г. Основы теплообмена излучением. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. 332 с.
2. Рудаков В. И., Овчаров В. В., Пригара В. П. Сб. докладов Всероссийской научно-технической конференции "Микро- и наноэлектроника-2001", Звенигород, 2001.
3. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975. 935 с.
4. Излучательные свойства твердых материалов: Справочник под общ. ред. А. Е. Шейндлина. М.: Энергия, 1974. 472 с.
5. Брамсон М. А. Справочные таблицы по инфракрасному излучению нагретых тел. М.: Наука, 1964.

УДК 629.7.005

С. В. Абрамов, В. М. Ачильдиев, канд. техн. наук, ФГУП НИИ ПМ им. академика В. И. Кузнецова, Москва;

О. А. Мезенцев, МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, PD candidate, University of Calgary, Canada

МОБИЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЛОКАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА УРБОЭКОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ МИКРОЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Анализируются работы по созданию мобильного комплекса для локального мониторинга урбоэкоосистем на основе микролетательных аппаратов. Рассмотрены схемы комплекса и микролетательных аппаратов, их состав и основные проектные характеристики. Приведены предварительные расчетные и экспериментальные характеристики отдельных элементов микролетательного аппарата.

Развитие микроэлектроники, вычислительной техники и особенно микромеханики, а также появление новых композиционных материалов создали основу технических средств для разработки микролетательных аппаратов (МЛА) локального наблюдения урбоэкоосистем. МЛА как отдельный подкласс дистанционно пилотируемых летательных аппаратов (ДПЛА) — это полуавтономный или автономный летательный аппарат, размером менее 15 см в любом измерении, массой около 100 г. МЛА должен выполнять различные военные и гражданские задания, имея при этом приемлемую це-

ну (менее 1000 долл.). На аппарате должна быть установлена видеокамера с отображением изображения в режиме реального времени, навигационная и связная аппаратура. МЛА должен летать от 20 мин до 2 ч с радиусом действия от 1 до 10 км и скоростью больше 45 км/ч.

Основными задачами, которые должны решать МЛА, являются разведка (фото и видео в режиме реального времени); ретрансляция связи в городских условиях; поисково-спасательные работы; исследования внутренних областей зданий; передача информации о результатах применения управляемых боеприпасов и корректировка огня; контроль лесных массивов и сельскохозяйственных угодий; слежение за миграцией зверя в охотничьих хозяйствах; контроль за экологическим состоянием окружающей среды: взятие проб воздуха (газовоздушной смеси), воды (жидкой среды), грунта; дистанционное наблюдение Земли.

В настоящее время на основе микромеханических и наномеханических систем ведутся разработки новых классов автономно пилотируемых (АП) МЛА и микророботов с массой от долей грамма до нескольких десятков граммов [1, 2]. Основное преимущество микророботов и МЛА для наблюдения и исследования планет Солнечной системы и Земли — это их низкая стоимость по сравнению с обычными аппаратами [3].

Конструкции таких АП МЛА в зависимости от назначения и резкой смены условий эксплуатации будут существенно отличаться друг от друга. Так, например, АП МЛА для исследования Марса наиболее рационально выполнить по самолетной схеме, а для исследования Венеры аппарат имеет

смысл выполнить в виде микронизов сферической или дискообразной формы с удельной плотностью конструкции, близкой к плотности атмосферы планеты. Объем такого аппарата может быть доведен до объема настольного теннисного мяча (Ø40 мм). Навигационная система таких МЛА должна содержать датчики, выполненные на основе нанотехнологии, способные реагировать на изменение гравитации планеты.

Технологическая выполнимость МЛА является следствием успехов в нескольких микротехнологиях, в особенности технологиях микроэлектромеханических систем (MEMS). Эти системы объединяют планарные электронные микрокомпоненты с сопоставимыми по размерам пространственными электромеханическими структурами различной сложности, что позволяет порой достичь уникальных функциональных возможностей. В настоящее время такие устройства производят промышленным способом. Дальнейшие исследования в этом направлении направлены на удешевление промышленного производства систем MEMS.

Другим направлением развития микроэлектронных систем является разработка крошечных видеокамер, миниатюрных инфракрасных датчиков и датчиков биологического и химического анализа для обнаружения опасных материалов. Размер этих устройств не превышает размера обычных микросхем и является определяющим в выборе объема МЛА.

В настоящее время интенсивные работы по созданию МЛА ведутся как у нас в стране, так и за рубежом. Большой интерес представляют МЛА на основе винтокрылых летающих "тарелок" и безопорных МЛА. Для данного класса аппаратов резко снижаются габаритно-массовые показатели и упрощаются схемы управления автоматом стабилизации.

На базе разрабатываемых конструкций автономно пилотируемых аппаратов возможно создание АП МЛА для исследования планет Солнечной системы. В табл. 1 приведены основные технические характеристики разрабатываемых МЛА [1—4].

По нашему мнению, одним из наиболее перспективных вариантов является АП МЛА "Пустельга", который выполнен по вертолетной схеме и оснащен видеокамерой. На базе этого аппарата создается мобильный комплекс локального мониторинга урбоэкосистем.

Структурная схема мобильного комплекса локального мониторинга (МК ЛМ) урбоэкосистем на основе АП МЛА "Пустельга" приведена на рис. 1.

МК ЛМ состоит из АП МЛА и мобильного комплекса управления (МКУ). МКУ состоит из корпуса типа "CASE", являющегося одновременно и тарой для транспортировки АП МЛА, мобильного компьютера, инерциального блока, аккумуляторной батареи, зарядного устройства и преобразователя напряжения для МКУ, GPS приемника, блока наземной приемно-передающей аппаратуры с антенной, компаса, электронного уровня, комплекта запасных аккумуляторов для АП МЛА, зарядного устройства для аккумуляторов АП МЛА.

Размеры МК ЛМ урбоэкосистем на основе АП МЛА составляют примерно 1000 × 800 × 200 мм, а масса не более 5 кг. Схема построения АП МЛА приведена на рис. 2, а внешний вид макета одновинтового АП МЛА на рис. 3 (см. четвертую сторону обложки).

АП МЛА состоит из фюзеляжа, который включает в себя корпус приборного отсека, гондолу двигателя, на которой с помощью штанг укреплен дефлектор. В гондole установлен двигатель с редуктором и винтом, контроллером управления и с одной или несколькими рулевыми машинками. В дефлекторе по периферии размещены проблесковые маячки, а на штангах — антенны GPS при-

Таблица 1

Микромеханические летательные аппараты

Характеристика	Наименование разработчика				
	БЛА-2	AP-1, НПП "Регуста"	Black Widow	MA, MLVCo	"Пустельга-1" НИИ ПМ
Масса, грамм	200	500	100	—	100
Энергоноситель		Аккумуляторы		Углеводород	Аккумуляторы
Размеры, мм	2000 × 1000	320 × 320	150 × 150	150 × 150	Ø50 × 150
Система управления	Радиоуправляемая	БИНС + GPS	Радиоуправляемая		БИНС + GPS
Диапазон высот применения, м	До 5000	До 1500	600	60	До 1500
Продолжительность полета, ч	0,7	0,7	0,5	0,3	1,0
Скорость полета, км/ч	60 + 80	36 + 54	54	—	54
Аппаратура наблюдения	ТК	ТК	ТК	ТК	ТК
Дальность, км	10,0	7,5	2,0	1,8	5,0
Наземный комплекс управления	—	На базе ноутбука	—	—	На базе ноутбука

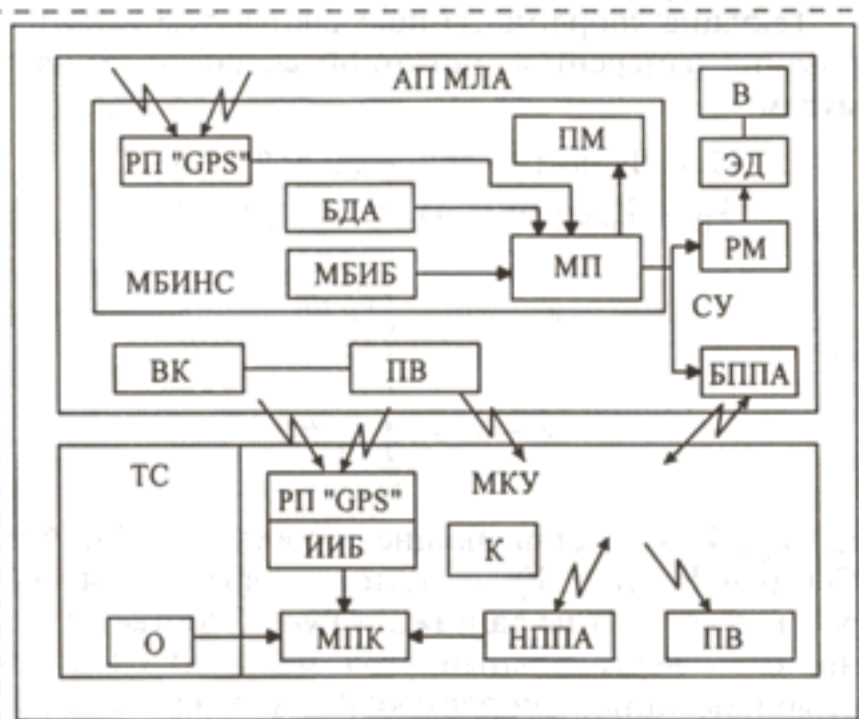


Рис. 1. Структурная схема мобильного комплекса локального мониторинга урбоэкосистем:

АП МЛА — автономно пилотируемый микролетательный аппарат; МБИНС — микромеханическая бесплатформенная инерциальная навигационная система; ЭД — электрический двигатель; В — винт; РП "GPS" — радиоприемник глобальной навигационной системы; МБИБ — микромеханический бесплатформенный измерительный блок; МП — микропроцессор; ПМ — проблесковые маячки; СУ — система управления; ВК — видеокамера; РМ — рулевые машинки; БППА — бортовая приемно-передающая аппаратура; ТС — транспортное средство; МКУ — мобильный комплекс управления; ПВ — передатчик видеоизображения; О — одометр; ИИБ — инерциальный измерительный блок; БДА — блок датчиковой аппаратуры; МПК — мобильный персональный компьютер; К — компас; НППА — наземная приемно-передающая аппаратура

емника, передатчика видеоизображения и антенны бортовой приемно-передающей аппаратуры. В корпусе приборного отсека установлена аккумуляторная батарея, видеокамера с передатчиком видеоизображения, плата GPS приемника, плата микромеханического бесплатформенного инерциального блока с микропроцессором (рис. 4, см. четвертую сторону обложки) и плата датчиковой аппаратуры.

АП МЛА представляет собой аппарат с одним несущим винтом. Фюзеляж МЛА изготовлен по симметричной схеме из композиционного материала и вписывается в сферу обметания с винтом 150 мм. Для управления по крену и тангажу используются две рулевые машинки, которые изменяют вектор тяги винта с двигателем относительно корпуса АП МЛА. Управление по курсу осуществляется аэродинамическими рулями.

Скорость полета аппарата зависит от тяговооруженности и площади аппарата в плане. Площадь поверхности в плане S_a выбирается из условия ее минимальности. На рис. 5 (см. четвертую сторону обложки) приведена зависимость силы лобового сопротивления F_x от площади и скорости полета аппарата V_a . Исходя из приведенных зависимостей для одновинтовой схемы скорость аппарата вы-

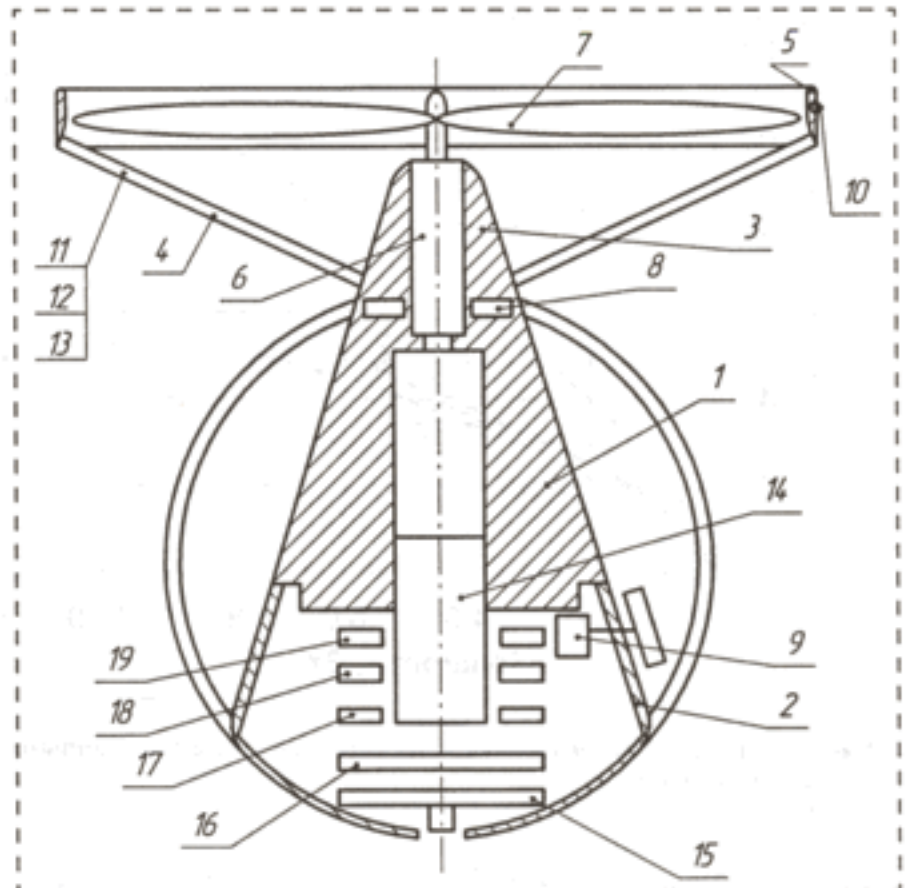


Рис. 2. Схема построения АП МЛА:

1 — фюзеляж; 2 — корпус приборного отсека; 3 — гондola двигателя; 4 — штанги; 5 — дефлектор; 6 — двигатель с редуктором; 7 — винт; 8 — контроллер управления; 9 — рулевые машинки; 10 — проблесковые маячки; 11 — антенны GPS приемника; 12 — передатчик видеоизображения; 13 — антенны бортовой приемно-передающей аппаратуры; 14 — аккумуляторная батарея; 15 — видеокамера с передатчиком видеоизображения; 16 — плата GPS приемника; 17 — плата датчиковой аппаратуры; 18 — плата микромеханического бесплатформенного инерциального блока с микропроцессором

брана $V_a = 10$ м/с, $S_a = 0,75 \cdot 10^{-2}$ м², при этом $F_x = 0,2$ Н.

В табл. 2 приведены массовые характеристики АП МЛА с четырьмя, двумя и одним несущим винтом. Макет АП МЛА на основе авиамодели ENGAGER GSIII приведен на рис. 6 (см. четвертую сторону обложки).

Таблица 2

Массовые характеристики АП МЛА

Наименование элементов конструкции и аппаратуры	Масса, г		
	"Пустельга-4"	"Пустельга-2"	"Пустельга-1"
Корпус	22	12	8
Аккумуляторы	42	42	22
Электродвигатель с винтом и редуктором	4 × 12	2 × 12	12
Видеокамера с передатчиком видеоизображения	13,5	13,5	13,5
GPS антенна	7,0	7,0	7,0
МикроБИНС	10,0	10,0	10,0
Блок приемно-передающей аппаратуры	4,0	4,0	4,0
Блок датчиковой аппаратуры	20	10	5
Рулевые машинки	—	1 × 5	2 × 5
Винты	4 × 0,5	2 × 0,5	1 × 0,5
Общая масса	170,5	128,5	92

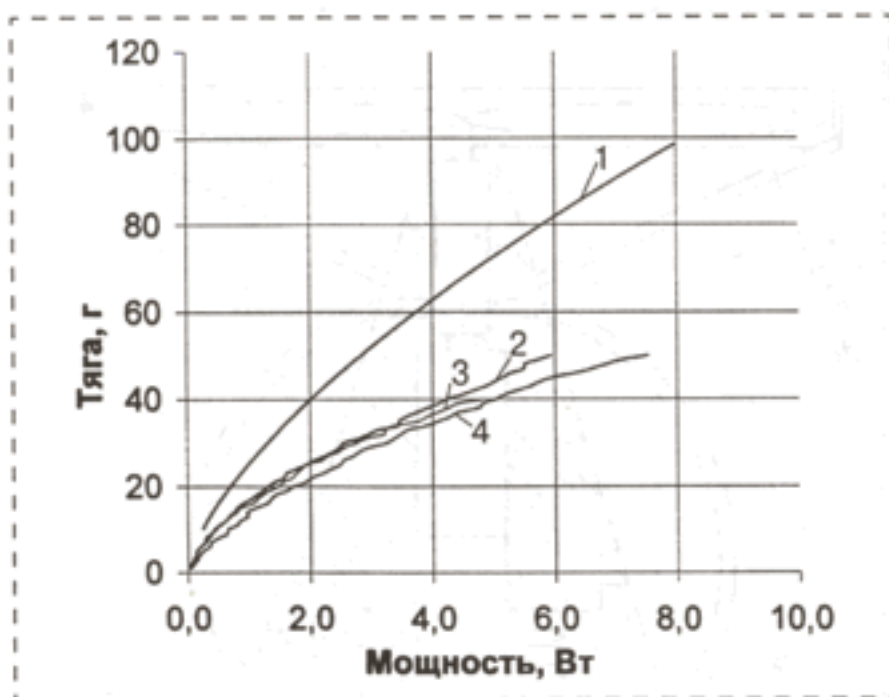


Рис. 7. Зависимость тяги электрического двигателя с различными диаметрами винтов

Как видно из табл. 2, масса аппаратов лежит в диапазоне от 92 до 170,5 г. На рис. 7 показаны тяга электрического двигателя с различными диаметрами винтов при коэффициенте редукции 4:1 и специально профилированного винта с коэффициентом редукции редуктора 8:1 в зависимости от потребляемой мощности.

В результате испытаний установлено, что наиболее эффективен винт с диаметром 150 мм. Профилирование винта по сечениям приводит к увеличению тяги на 30%. Анализ результатов испытаний показывает, что дальнейшая оптимизация геометрии винта и использование дефлектора и редуктора с коэффициентом редукции 16:1 позволяет увеличить тягу еще примерно на 30-50%.

Исходя из этого, для рассматриваемых аппаратов при аккумуляторе с емкостью 2,1 А/ч время полета составляет 45 мин.

Стабилизация МЛА по траектории его движения осуществляется автоматически с помощью автопилота. В автопилоте имеются три канала стабилизации: курса, крена и тангажа. В качестве измерителей угловой скорости используются микромеханические вибрационные гироскопы, в качестве датчиков высоты — микромеханический акселерометр и барометрический высотомер.

Законы управления формируются с помощью микроконтроллера и позволяют осуществлять стабилизацию курса, крена и тангажа в прямолинейном полете (стабилизация углов относительно центра масс) и координированных разворотов. Навигация в процессе полета осуществляется с помощью интегрированной бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) и GPS приемника. Для кратковременных участков полета навигация осуществляется в системе координатной сетки для данной проекции карты [6].

Текущие координаты получают путем интегрирования измеренной истинной скорости по формулам:

$$V_C = V_{и} \cos(\theta - \alpha) \cos(\psi + \beta) + V_{BC};$$

$$V_B = V_{и} \cos(\theta - \alpha) \sin(\psi + \beta) + V_{BB};$$

$$y - y_0 = \int_0^t V_C dt;$$

$$x - x_0 = \int_0^t V_B dt;$$

где V_C, V_B — составляющие скорости АП МЛА на Север и Восток; $V_{и}$ — истинная воздушная скорость; θ, ψ — углы тангажа и курса, соответственно; α — вертикальный угол между продольной осью и истинной скоростью; β — угол скольжения.

Работа мобильного комплекса локального мониторинга урбоэкосистем осуществляется следующим образом. На монитор мобильного компьютера выводятся карта района патрулирования и, по сигналу наземной интегрированной БИНС, координаты оператора или транспортного средства. С помощью клавиатуры задается траектория полета (прямолинейная, змейка и т. д.), конечная точка маршрута, высота, скорость полета и команда "Взлет". Полет осуществляется в автономном режиме. После набора высоты аппарат начинает движение по маршруту, передавая свои параметры движения и видеоизображение в реальном масштабе времени.

На монитор мобильного компьютера выводятся: карта той местности, которой проводится мониторинг; видеоизображение участка исследуемой поверхности; координаты видеоизображения АП МЛА; расположение транспортного средства; конечная точка маршрута. Аппарат управляется с клавиатуры мобильного компьютера. Размер визуруемой поверхности в одном кадре 50×50 м на высоте 150 м с разрешением 0,2 м, с точностью привязки кадра к электронной карте местности $5 \div 10$ м. В процессе полета АП МЛА может зависать над заданной точкой, менять высоту зависания и скорость полета. Посадка осуществляется автоматически до высоты $5 \div 10$ м, далее аппарат падает в режиме авторотации винта. Введение в состав комплекса дополнительно одного или двух аппаратов, трех комплектов аккумуляторов и двух зарядных устройств позволит осуществлять непрерывное инспектирование района.

В качестве дополнительной аппаратуры на АП МЛА могут стоять приборы для широкоспектрального контроля окружающей среды, а именно, для сбора различной информации (биологической, химической, а также радиолокационной). Модуль датчиковой аппаратуры имеет унифицированные посадочные места и в зависимости от решаемых задач его можно в процессе работы заменять. Кроме

этого, в состав телеметрируемой информации входят температура, давление и скорость ветра.

В процессе полета АП МЛА позволяет определять неблагоприятный и недоступный районы инспектирования с привязкой к электронной карте местности.

Список литературы

1. Климов Д. М., Васильев А. А., Лучинин В. В., Мальцев П. П. Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 3—8.

2. Рубцов И. В., Нестеров В. Е., Рубцов В. И. Современная зарубежная военная микро- и мини-робототехника // Микросистемная техника. 2000. № 3. С. 36—42.

3. Ачильдиев В. М., Дудко В. Г., Есаков В. А. и др. Дистанционно пилотируемый микролетательный аппарат для локального мониторинга лесных и урбоэкосистем // Труды международной конференции "Математические и физические методы в экологии и мониторинге природной среды". М.: МГУЛ, 2001. С. 290—294.

4. Ермаков В. А., Михоленок А. Н. Анализ состояния и развития беспилотных летательных аппаратов // Микросистемная техника. 2002. № 3. С. 40—42.

5. Самолетные навигационные системы / Под ред. В. Ю. Полянова. М.: Военное издательство, 1973. С. 22—23.

В МИРЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 616.9-078.33

Е. Н. Храмов, д-р техн. наук,
Н. С. Осин, д-р биол. наук,
В. Г. Помелова, д-р биол. наук, И. В. Виха,
Т. А. Быченкова, канд. техн. наук,
В. Г. Смирнова, Г. И. Грабкина, Т. А. Касьянова,
ГНЦ — Государственный НИИ биологического
приборостроения Минздрава РФ

МЕМБРАННО-ФИЛЬТРАЦИОННЫЙ ИММУНОАНАЛИЗ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИНДИКАЦИИ

Разработка простых, быстрых и чувствительных методов, создание готовых диагностических комплектов и портативных тест-систем для обнаружения и идентификации возбудителей инфекционных заболеваний являются актуальной задачей противобиологической защиты.

Среди методов лабораторной диагностики наиболее чувствительными, но длительными и трудоемкими являются методы выделения возбудителей на селективных питательных средах (бактерии) или путем заражения клеточных культур и животных (вирусы). Из числа современных методов наиболее часто применяется твердофазный иммуноферментный анализ (ТИФА), который благодаря его высокой специфичности и чувствительности успешно используется для диагностики широкого спектра инфекционных заболеваний. Гораздо реже в лабораторной практике используют точечный ИФА на мембранных фильтрах, так называемый дот-ИФА, хотя его высокая чувствительность показана при диагностике многих инфекций [8], что позволило ряду фирм приступить к выпуску коммерческих наборов на его основе.

Разработанный в 1983 г. специалистами Научно-исследовательского института Уолтера Смита Министерства армии США дот-ИФА может выполняться в различных модификациях [13]. Среди них одной из наиболее перспективных для диагностики опасных инфекций, особенно передающихся воздушно-капельным путем, является мембранно-фильтрационная методика. Обладая равной по сравнению с ТИФА чувствительностью, такой вариант анализа имеет следующие преимущества:

- существенно проще в исполнении;
- обеспечивает визуальный учет результатов по изменению окраски хромогенного субстрата на поверхности мембраны;
- устройство фильтрующего модуля позволяет быстро и эффективно проводить сорбцию и концентрирование возбудителей из разбавленных биологических проб, при этом исключается образование аэрозоля.

Указанные преимущества определяют целесообразность использования дот-ИФА в необорудованных лабораториях и для проведения так называемых "анализов на дому" [8, 11].

В ГНИИ биологического приборостроения в течение 1987—1995 гг. разрабатывались дот-ИФА по следующим основным направлениям:

- создание технических устройств для проведения иммуноанализа;
- разработка базы химических реагентов;
- оптимизация методик иммуноанализа для детекции возбудителей различных таксономических групп (бактерий и вирусов) и серодиагностики инфекций;
- конструирование тест-систем для группоспецифической и видоспецифической индикации возбудителей, серодиагностики инфекций;

этого, в состав телеметрируемой информации входят температура, давление и скорость ветра.

В процессе полета АП МЛА позволяет определять неблагоприятный и недоступный районы инспектирования с привязкой к электронной карте местности.

Список литературы

1. Климов Д. М., Васильев А. А., Лучинин В. В., Мальцев П. П. Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке // Микросистемная техника. 1999. № 1. С. 3—8.

2. Рубцов И. В., Нестеров В. Е., Рубцов В. И. Современная зарубежная военная микро- и мини-робототехника // Микросистемная техника. 2000. № 3. С. 36—42.

3. Ачильдиев В. М., Дудко В. Г., Есаков В. А. и др. Дистанционно пилотируемый микролетательный аппарат для локального мониторинга лесных и урбоэкосистем // Труды международной конференции "Математические и физические методы в экологии и мониторинге природной среды". М.: МГУЛ, 2001. С. 290—294.

4. Ермаков В. А., Михоленок А. Н. Анализ состояния и развития беспилотных летательных аппаратов // Микросистемная техника. 2002. № 3. С. 40—42.

5. Самолетные навигационные системы / Под ред. В. Ю. Полянова. М.: Военное издательство, 1973. С. 22—23.

В МИРЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 616.9-078.33

Е. Н. Храмов, д-р техн. наук,
Н. С. Осин, д-р биол. наук,
В. Г. Помелова, д-р биол. наук, И. В. Виха,
Т. А. Быченкова, канд. техн. наук,
В. Г. Смирнова, Г. И. Грабкина, Т. А. Касьянова,
ГНЦ — Государственный НИИ биологического
приборостроения Минздрава РФ

МЕМБРАННО-ФИЛЬТРАЦИОННЫЙ ИММУНОАНАЛИЗ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИНДИКАЦИИ

Разработка простых, быстрых и чувствительных методов, создание готовых диагностических комплектов и портативных тест-систем для обнаружения и идентификации возбудителей инфекционных заболеваний являются актуальной задачей противобиологической защиты.

Среди методов лабораторной диагностики наиболее чувствительными, но длительными и трудоемкими являются методы выделения возбудителей на селективных питательных средах (бактерии) или путем заражения клеточных культур и животных (вирусы). Из числа современных методов наиболее часто применяется твердофазный иммуноферментный анализ (ТИФА), который благодаря его высокой специфичности и чувствительности успешно используется для диагностики широкого спектра инфекционных заболеваний. Гораздо реже в лабораторной практике используют точечный ИФА на мембранных фильтрах, так называемый дот-ИФА, хотя его высокая чувствительность показана при диагностике многих инфекций [8], что позволило ряду фирм приступить к выпуску коммерческих наборов на его основе.

Разработанный в 1983 г. специалистами Научно-исследовательского института Уолтера Смита Министерства армии США дот-ИФА может выполняться в различных модификациях [13]. Среди них одной из наиболее перспективных для диагностики опасных инфекций, особенно передающихся воздушно-капельным путем, является мембранно-фильтрационная методика. Обладая равной по сравнению с ТИФА чувствительностью, такой вариант анализа имеет следующие преимущества:

- существенно проще в исполнении;
- обеспечивает визуальный учет результатов по изменению окраски хромогенного субстрата на поверхности мембраны;
- устройство фильтрующего модуля позволяет быстро и эффективно проводить сорбцию и концентрирование возбудителей из разбавленных биологических проб, при этом исключается образование аэрозоля.

Указанные преимущества определяют целесообразность использования дот-ИФА в необорудованных лабораториях и для проведения так называемых "анализов на дому" [8, 11].

В ГНИИ биологического приборостроения в течение 1987—1995 гг. разрабатывались дот-ИФА по следующим основным направлениям:

- создание технических устройств для проведения иммуноанализа;
- разработка базы химических реагентов;
- оптимизация методик иммуноанализа для детекции возбудителей различных таксономических групп (бактерий и вирусов) и серодиагностики инфекций;
- конструирование тест-систем для группоспецифической и видоспецифической индикации возбудителей, серодиагностики инфекций;

- определение области практического применения дот-ИФА для целей лабораторной диагностики.

Материалы и методы

Использовались следующие возбудители бактериальных и вирусных инфекций:

- бактерии семейства Enterobacteriaceae: *Yersinia pestis* (штаммы EV, 8061, 502), *Y. pseudotuberculosis*, *Y. enterocolitica*. Препараты получены из НИПЧИ "Микроб" (Саратов);
- бактерии семейства Bacillaceae: *Bacillus anthracis* (штаммы Sterne 34F-2, СТИ 122, ИХТИМАН), *B. subtilis* (штамм 85), *B. megaterium* (штамм 2), *B. anthracoides* (штамм 9), *B. cereus* (штамм 108). Получены из ГИСК им. Л. А. Тарасевича;
- бактерии рода *Francisella*: *F. tularensis* (штаммы 543/6, Shu, Miura, 83, 7, 15, 170, 890, 348, 500). Получены из НИПЧИ КиЗ (Ставрополь);
- бактерии рода *Brucella*: *B. abortus* (штамм 544), *B. melitensis* (штамм 16М). Получены из НИИ-ЭМ им. Н. Ф. Гамалеи;
- бактерии семейства Pseudomonadaceae: *Pseudomonas mallei* (штаммы 8, 376, 388, 472, 477, 10230), *P. pseudomallei*, *P. aeruginosa*. Получены из Волгоградского НИПЧИ;
- риккетсии семейства Rickettsia: *R. prowazeki*, *R. sibirica*. Получены из НИИ ВС (Пермь);
- ботулинический анатоксин типов А и В из *Clostridium botulinum* (НИИЭМ им. Н. Ф. Гамалеи).
- вирусы семейства Togaviridae рода Alphavirus: венесуэльского энцефаломиелита лошадей — ВЭЛ (штаммы Тринидад, 230), Мукамбо (штамм ВеАп 8), Бижубридж, Пиксуна (штамм ВеАг 35645), Синдбис (штамм AR-339);
- вирусы семейства Flaviviridae рода Flavivirus: клещевого энцефалита — КЭ (штамм 4072), шотландского энцефаломиелита овец (штамм I-40), омской геморрагической лихорадки (штамм Никитина), киассанурской лесной болезни (штамм Р-9605), японского энцефалита — ЯЭ (штамм Р-1), желтой лихорадки — ЖЛ (штаммы Дакар, FNV);
- вирусы семейства Bunyaviridae рода Hantavirus: геморрагической лихорадки с почечным синдромом — ГЛПС (штаммы Hantaan, Puumala, Rogoria); рода Nairovirus: крымской конго-геморрагической лихорадки — КГЛ (штамм УЗ 10145), рода Bunyavirus: Тягиня (штамм Бардош-92), зайца-беляка (штамм оригинальный), Инко (штамм KN 3641), рода Phlebovirus: Тоскана (штамм РНЛ-18), Каримабад (штамм I-58), неаполитанской москитной лихорадки — НМЛ (штамм Аф-130);
- вирусы семейства Rhabdoviridae рода Lyssavirus: вирус бешенства — ВБ (штамм CVS);

- вирусы семейства Poxviridae рода Orthopoxvirus — вирус вакцины;
- вирусы семейства Herpesviridae: вирус простого герпеса 1-го типа — ВПГ-1 (штамм УС), цитомегаловирус человека — ЦМВ (штамм АД-169).

Вирусы были получены из лабораторий биологии и индикации арбовирусов (руководитель — проф. А. М. Бутенко) и сравнительной вирусологии (руководитель — проф. И. Ф. Баринский) НИИ вирусологии им. Д. И. Ивановского РАМН и прошли многократные пассажи на культурах клеток Vero, СПЭВ, ЛЭЧ.

Возбудители бактериальных инфекций использовали в виде: взвеси микробов, убитых формалином; растворимых антигенов; ацетоновых порошков; липополисахаридов (ЛПС) клеточной стенки; анатоксинов.

Возбудители вирусных инфекций использовали в виде: сахарозо-ацетоновых антигенов (САА); вируссодержащих культуральных жидкостей (ВКЖ); мозговых вируссодержащих суспензий (МВС). В качестве контролей использовали те же материалы, не зараженные вирусами. Вирус вакцины использовали в виде выращенной на хорион-аллантоисной оболочке куриных эмбрионов ововакцины.

Для исследования вирусов использовали поликлональные иммунные асцитические жидкости (ИАЖ) мышей, поликлональные кроличьи сыворотки, а также моноклональные антитела (МКА) МАК 14-7 (к вирусу ВЭЛ штамм Тринидад), ГЕМА-12 (к вирусу КГЛ штамм УЗ 10145), КЭН 46-8 (к вирусу КЭ штамм 4072), Е-11 (к ВБ), В-11 (к ВПГ-2 штамм ВН). Все препараты были получены из НИИ вирусологии им. Д. И. Ивановского РАМН.

Для определения бактерий использовали поликлональные сыворотки кролика, барана или лошади, а также МКА FB11X (к *E. tularensis*), два вида МКА к *Y. pestis* (гибридома *Yp.LPS. A6.Sp.* к ЛПС и гибридома *Yp.Fl.D3.B2.Sp.* к фракции F-1), МКА к *Ps. mallei* (*S. D.3-3* и *S. D.11-3*). Препараты были получены из Института прикладной иммунологии (г. Чехов), НИПЧИ Сибири и Дальнего Востока (Иркутск), НИПЧИ К и З (Ставрополь), НИПЧИ "Микроб" (Саратов), НИИЭМ им. Н. Ф. Гамалеи РАМН, НИИ ВС (Пермь).

Иммуноглобулины из сывороток и асцитных жидкостей выделяли методами 3-кратного осаждения сульфатом аммония с последующим фракционированием IgG на сефадексе G-200 или аффинной хроматографии на протеин А-сефарозе; Fab-фрагменты IgG из гипериммунной сыворотки лошади (к *R. prowazeki*) получали методом расщепления IgG папаином с последующим фракционированием на сефадексе G-200.

Конъюгаты антител с пероксидазой хрена (ПХ) готовили методом периодатного окисления в модификации Wilson и Nakane из расчета 5 мг ПХ на

10 мг IgG. Для конъюгации использовали ПХ производства НПО "Биолар" (Латвия, г. Олайне) или "Sigma".

Субстратом для пероксидазы служили о-толидин ("Fluka"), 3, 5, 3',3'-тетраметилбензидин (ТМБ) и его производные ТМБ-сульфат и ТМБ-дигидрохлорид, синтезированные в ГНИИ биологического приборостроения, дианизидин ("Serva"). В опытах использовали нитроцеллюлозные мембраны производства НИИ "Медполимер" (опытные серии) или Schleicher&Schuell (Германия); ацетатцеллюлозные мембраны "Владипор" МФА-МА и МФЦ НПО "Тасма" (Казань); полиамидные и поливинилхлоридные мембраны производства НИИ "Химволокно" (Санкт-Петербург).

ТИФА выполняли по общепринятым методикам в варианте двойного "сандвича" антител. Результаты учитывали на фотометре "Мультискан" при длине волны 492 нм. Результат считали положительным в случае 2-кратного (и более) превышения значения специфического сигнала над уровнем фонового сигнала.

Детекцию большинства исследованных возбудителей проводили методом прямого дот-ИФА [3]. На ацетатцеллюлозную мембрану, помещенную в фильтрующую ячейку КИМФ-02, вносили по 100 мкл антигенсодержащего материала в разведениях в предварительно подобранном буфере и инкубировали 20 мин при нормальной температуре. Затем содержимое лунок просасывали в вакуум-камеру и обрабатывали мембрану раствором обезжиренного молока (25 мкл) для блокировки свободных сайтов связывания (20 мин при нормальной температуре), затем вносили 25 мкл специфического конъюгата в рабочем разведении. На следующем этапе в лунки вносили по 25 мкл субстрата (о-толидина или ТМБ-дигидрохлорида).

Для выявления антигенов некоторых вирусов (флавивирусы, флебовирусы, герпес-вирусы, вирус бешенства) и определения антител в иммунных жидкостях использовали непрямой вариант дот-ИФА. В этом случае сорбированные на мембране антигены взаимодействовали с немечеными антителами (сыворотки, ИАЖ) с последующим проявлением образовавшихся иммунных комплексов с помощью антивидовых конъюгатов.

Результаты дот-ИФА учитывали визуально на влажных мембранах по интенсивности окрашивания пятен.

Результаты и обсуждение

Разработка технических устройств для проведения дот-ИФА

Для осуществления мембранно-фильтрационного варианта дот-ИФА предложен ряд устройств [1, 6, 12]. Ближайшими аналогами фильтрующей ячейки комплекта КИМФ-02 являются устройства для иммуноблотинга фирм "Bio-Rad" [12] и "Whatman

"Polyfiltronics" [6]. В отличие от них разработанный комплект включает модифицированный вариант фильтрующего модуля, который рассчитан на проведение всех стадий анализа и позволяет осуществить почти 10-кратное концентрирование материала биопроб.

В ГНИИ биологического приборостроения разработаны два варианта устройства для дот-ИФА: КИМФ-02, позволяющий провести одновременный анализ 96 проб, и КИМФ-03, предназначенный для анализа единичных проб.

Основным элементом устройства КИМФ-02 является фильтрующий модуль, состоящий из двух 96-ячеечных пластин, изготовленных из высокопрочного поликарбоната. Между пластинами помещена фильтрующая мембрана, на поверхности которой проходит иммунореакция. Пластины соединены с нижней камерой, предназначенной для сбора отмывочного буфера и непрореагировавших компонентов реакции, что исключает образование аэрозоля при проведении иммуноанализа. Герметичность соединения достигается с помощью четырех винтовых зажимов, а необходимое для фильтрации разрежение — путем использования двухкамерного вакуумного насоса.

В комплект КИМФ-02 входят:

- устройство для предфильтрации, позволяющее удалить из проб крупные частицы примесей пыли, грязи и др.;
- необходимые для проведения анализа химические реагенты;
- дозаторы переменного объема для внесения проб и реагентов;
- насос.

Насос используется не только для создания разрежения в фильтрующем модуле, он может быть подключен к промывающему устройству ("гребенке"), с помощью которого можно быстро и качественно провести промывание мембраны на всех этапах анализа.

КИМФ-03 состоит из фильтрующего патрона размером 60 × 70 мм с неподвижной нижней и съемной верхней пластинами с семью отверстиями; между пластинами помещена мембрана. Фильтрацию проб осуществляют с помощью ручного насоса или обычного медицинского шприца емкостью 10—20 мл.

Разработка базы химических реагентов для проведения дот-ИФА

Оценивали пригодность для проведения иммуноанализа нескольких типов мембран: нитроцеллюлозных, ацетатцеллюлозных, поливинилхлоридных, полиамидных. Основными критериями выбора являлись высокая сорбционная емкость, минимальный уровень фоновых реакций, высокая фильтрующая способность и прочность. В результате исследований, проведенных с использованием возбу-

дителей различных таксономических групп, было установлено, что указанным критериям в наибольшей степени соответствуют ацетатцеллюлозные мембраны, что обусловило их преимущественное использование в устройствах КИМФ-02 и КИМФ-03.

При выборе субстрата пероксидазы для проведения дот-ИФА оценивали о-толидин, ТМБ, ТМБ-сульфат, ТМБ-дигидрохлорид, дианизидин. Критериями выбора являлись чувствительность иммуноанализа, уровень фонового окрашивания мембраны, динамика образования окраски опытных и контрольных образцов на мембране. Результаты этих опытов показали, что о-толидин в наибольшей степени отвечает указанным критериям. Этот субстрат образует окрашенный в синий цвет продукт ферментативной реакции, что при сопоставлении с желтовато-коричневой окраской контрольных лунок облегчает визуализацию результатов анализа. В качестве альтернативного субстрата при постановке как дот-ИФА, так и ТИФА может быть использован ТМБ-дигидрохлорид. Этот субстрат хорошо растворяется в воде и органических растворителях, обеспечивает четкую дифференциацию опытных и контрольных образцов и в отличие от о-фенилендиамина и о-толидина неканцерогенен [4].

Оптимизация методик иммуноанализа

При выборе схемы иммуноанализа принципиальную важность с точки зрения расхода иммунореагентов, длительности и трудоемкости анализа представляла оценка целесообразности проведения дот-ИФА в варианте двойного "сэндвича" антител. Согласно данным литературы [7, 10], при детекции возбудителей различных таксономических групп (вирусы, бактерии, простейшие) необходимость в предварительной сорбции на мембране специфических антител отсутствует. Как правило, антигенсодержащий материал, в том числе пробы из биологических жидкостей организма человека и животных (кровь, моча и др.), сорбируют непосредственно на мембрану с последующей визуализацией образовавшегося иммунного комплекса. Это обусловлено природой взаимодействия биологических образцов с мембраной, в основе которого может лежать механическая адсорбция, а в случае вирусов — электростатические силы, гидрофобные взаимодействия или силы Ван-дер-Ваальса [2].

Проведенные нами исследования показали, что при детекции вирусов антигенсодержащий материал (сыворотки крови, моча, ВКЖ, мозговые вируссодержащие суспензии, сахарозоацетоновые антигены) целесообразно сорбировать непосредственно на мембрану. Предварительное активирование мембраны специфическими антителами не оказывало влияния на результаты иммуноанализа, что подтверждает данные о преимущественно сорбцион-

ном механизме взаимодействия исследованных вирусов с мембраной.

При исследовании возбудителей бактериальных инфекций было установлено, что при анализе корпускулярных антигенов большинства бактерий (взвесей убитых формалином микробов) необходимость в предварительном активировании мембраны специфическими антителами также отсутствовала. Вместе с тем в случае водорастворимых бактериальных антигенов и токсинов чувствительность детекции была существенно выше при проведении анализа на предварительно обработанной специфическими антителами мембране, что, по-видимому, свидетельствует о преобладании механизма сорбции за счет специфического взаимодействия антиген—антитело.

Для исследованных бактерий и большинства изученных нами вирусов оптимальные параметры сорбции достигались при рН 9,6, хотя для некоторых вирусов (рода Bunyavirus) эффективность сорбции была выше при рН 5,0.

Для повышения чувствительности детекции некоторых вирусов (флавивирусы, флебовирусы и др.) целесообразно было использовать непрямой вариант дот-ИФА, включающий образование иммунного комплекса антиген—специфическое немеченое антитело—антивидовой конъюгат. Эти и другие особенности иммуноанализа приведены в разделе "Материал и методы", в опубликованных ранее работах [3] и в табл. 1 при описании разработанных тест-систем.

Конструирование тест-систем для группоспецифической и видоспецифической индикации возбудителей

Основные характеристики тест-систем для выявления исследованных бактерий представлены в табл. 2. Показано, что в разработанных тест-системах порог детекции гомологичных антигенов составляет $(1-30)10^5$ микробных тел в 1 мл в случае корпускулярных антигенов или от 10 до 30 нг/мл при определении растворимых антигенов и токсинов.

При оценке специфичности тест-систем (уровня перекрестных реакций) было установлено, что высокой специфичностью характеризовалась тест-система для детекции возбудителя туляремии. В этой тест-системе 10 штаммов *F. tularensis*, в том числе выделенных из природных источников в пределах нозоареала возбудителя, можно было детектировать в концентрации $5 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5$ микробных тел в 1 мл; неспецифическое взаимодействие с другими бруцеллами и возбудителем сапа (*Ps. mallei*) отсутствовало.

Тест-система для определения возбудителя сибирской язвы позволяла выявлять вирулентный штамм Sterne 34F-2 в титрах, в 100 раз более высоких по сравнению с авирулентными штаммами ИХТИМАН и СТИ, а также *B. subtilis* при отсут-

Тест-системы для группоспецифической и видоспецифической индикации вирусов

Выявляемый вирус	Антитела в составе тест-системы		Вариант дот-ИФА	Порог детекции, ИД ₅₀ /мл	Степень дифференциации
	Немеченые	Меченые ПХ			
ВЭЛ	Нет	МКА МАК 14—7 к вирусу ВЭЛ штамм Тринидад	Прямой	$1,7 \cdot 10^5$	В пределах комплекса ВЭЛ
Основакцины	"	ПКА кроличьи к вирусу оспы	"	$6 \cdot 10^4$	В пределах рода Orthoroxvirus
КЭ	ИАЖ мышей к вирусу КЭ штамм 4072	ПКА кроличьи против IgG мыши	Непрямой	$(1-10)10^4$	В пределах комплекса КЭ
ЯЭ	ИАЖ мышей к вирусу ЯЭ штамм Р-1	То же	"	$(1-10)10^4$	В пределах вида
ЖЛ	ИАЖ мышей к вирусу ЖЛ штамм Дакар	"	"	$(1-10)10^4$	То же
ГЛПС	Нет	ПКА человека к вирусу ГЛПС	Прямой	$1,6 \cdot 10^4$	В пределах рода Hantavirus
КГЛ	"	ПКА мышинные к вирусу КГЛ	"	$1,6 \cdot 10^4$	В пределах вида
НМЛ	ИАЖ мышей к вирусу НМЛ	ПКА кроличьи против IgG мыши	Непрямой	$3,2 \cdot 10^3$	В пределах комплекса НМЛ
Калифорнийской серогруппы (КСГ)	Нет	ПКА мышинные к вирусам Инко и Тягиня	Прямой*	$(1-10)10^5$	В пределах КСГ
ВБ	МКА Е-11 к ВБ штамм Внуково 32	ПКА кроличьи против IgG мыши	Непрямой	$(1-10)10^4$	В пределах вида
ВПГ	МКА В-11	ПКА кроличьи	"	н. о.	ВПГ-1, ВПГ-2
ЦМВ	ПКА кроличьи	—	"	$(1-10)10^3$	В пределах вида

Примечание. Звездочка — сорбцию вирусов КСГ на мембрану проводили при pH 5,0; ПКА — поликлональные антитела; н. о. — не определяли.

ствии неспецифических реакций с другими спорообразующими бактериями семейства Bacillaceae (*B. cereus*, *B. megaterium*, *B. anthracoides*) в диапазоне концентраций от 10^4 до 10^8 микробных тел в 1 мл. Тест-система для определения возбудителя бруцеллеза давала перекрестную реакцию с *B. melitensis*, хотя и в более низких (в 10 раз) титрах по сравнению с гомологичным антигеном; неспецифическое связывание с *F. tularensis* отсутствовало. Порог детекции штаммов чумного микроба составлял от $2 \cdot 10^5$ до $(2-6)10^6$ микробных тел в 1 мл, причем в наиболее низких титрах выявлялся вакцинный штамм EV. Основные характеристики тест-систем для детекции вирусов приведены в табл. 1.

Анализ представленных данных показывает, что для большинства исследованных вирусов в разработанных тест-системах порог детекции составлял $(1-100)10^4$ ИД₅₀/мл, степень дифференциации (по результатам анализа видов и штаммов родственных возбудителей, перечисленных в разделе "Материал и методы"), — от группоспецифической до видоспецифической.

Определение области практического применения дот-ИФА

Оценивали возможность применения разработанных методик и тест-систем для детекции возбудителей в лабораторных материалах (зараженные клеточные культуры и пр.), в пробах из природных источников (суспензии комаров, суспензии органов животных), в клинических материалах (сыворотки крови, моча, ликвор). Типичные результаты

опытов по определению вирусоспецифических антигенов в зараженных лабораторных материалах (на примере вируса ВЭЛ) приведены на рисунке.

Представленные данные свидетельствуют о возможности определения антигенов вируса ВЭЛ во всех исследованных материалах с чувствительностью, близкой к чувствительности ТИФА. Аналогичные результаты были получены при использовании перечисленных в табл. 1 тест-систем, предназначенных для детекции вирусов с природной очаговостью [3].

Тест-системы для определения антигенов ВПГ и ЦМВ были использованы для диагностики вызываемых этими вирусами заболеваний у новорожденных детей и их матерей. Выявление вирусоспецифических антигенов проводили в крови, ликворе, моче. В ходе этих исследований была установлена корреляция результатов дот-ИФА с данными других методов (ТИФА, ДНК-гибридизация, полимеразная цепная реакция) и с клиническими проявлениями заболеваний.

При анализе материалов из природных очагов инфекций (суспензии из легочной ткани мышей, отловленных в очаге ГЛПС) и суспензий комаров, экспериментально зараженных вирусами калифорнийской серогруппы, было установлено, что дот-ИФА существенно уступает ТИФА по чувствительности и характеризуется высоким уровнем неспецифических фоновых реакций. Последнее было обусловлено забиванием пор мембраны крупнодисперсными частицами анализируемых суспензий, которые вследствие малого объема пробы не

Основные характеристики тест-систем для детекции возбудителей бактериальных инфекций методом прямого дот-ИФА

Выявляемый возбудитель (заболевание)	Состав тест-системы		Анализируемые антигены	Порог детекции, число микробных тел в 1 мл (нг/мл)
	Первичные антитела	Конъюгат		
<i>B. anthracis</i> (сибирская язва)	Нет	ПКА антиспоровые кроличьи	<i>B. anthracis</i> штаммы: Sterne 34F-2 ИХТИМАН СТИ <i>B. subtilis</i> <i>B. cereus</i> <i>B. megaterium</i> <i>B. anthracoides</i> Водорастворимый	10^4 10^6 10^6 10^6 — — (16)
<i>Br. abortus</i> (бруцеллез)	"	ПКА кроличьи	<i>Br. abortus</i> , штамм 544 <i>Br. melitensis</i> штамм M16 <i>F. tularensis</i> штамм 543/6 <i>F. tularensis</i> штамм 543/6	$2 \cdot 10^5$ $2 \cdot 10^6$ — $5 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5$ **
<i>F. tularensis</i> (туляремия)	МКА	ПКА FB11X лошадиные	<i>Br. abortus</i> , штамм 544 <i>Br. melitensis</i> штамм M16 <i>Ps. mallei</i> штамм 10230 <i>Y. pestis</i> штаммы: EV 8061 502 <i>Y. pseudotuberculosis</i> <i>Y. enterocolitica</i> Растворимый (ЛПС)	— — — $(2-6)10^6$ $2 \cdot 10^5$ $6 \cdot 10^5$ $5 \cdot 10^7$ — (37)
<i>Y. pestis</i> (чума)	ПКА лошадиные	ПКА лошадиные	Ботулинический анатоксин типов: А В	$(2-6)10^6$ $2 \cdot 10^5$ $6 \cdot 10^5$ $5 \cdot 10^7$ — (37)
<i>Cl. botulinum</i> (ботулизм)	ПКА кроличьи	ПКА кроличьи	Р. провазекки Р. сибирская Р. провазекки	(10) (20-30) $2 \cdot 10^6$ $1,2 \cdot 10^5$ $4 \cdot 10^5$
<i>R. prowazeki</i> (сыпной тиф)	Нет	ПКА (IgG) ПКА (Fab)		

Примечание. * — реакция отсутствует в диапазоне концентраций возбудителя от 10^4 до 10^8 микробных тел в 1 мл;
** — диапазон значений порога детекции для 10 штаммов *F. tularensis*: Shu, Miura, 543/6, 890, 7, 15, 170, 348, 500, 83.

могли быть удалены на стадии префильтрации. Результаты этих опытов свидетельствуют об ограниченной пригодности мембранно-фильтрационного варианта дот-ИФА для детекции возбудителей в биологических пробах при проведении экологического мониторинга очагов.

Вместе с тем важной составной частью экологических исследований и клинической лабораторной диагностики являются изучение иммуноструктуры населения и животных в эндемичных районах, серодиагностика заболеваний. В основу разработки непрямого варианта дот-ИФА, позволяющего выявлять специфические антитела в сыворотках крови человека и животных, была положена способность антигенов исследованных возбудителей сорбироваться на мембране и специфически взаимодействовать с гомологичными антителами. Важным преимуществом такого варианта дот-ИФА по сравнению с ТИФА является возможность сорбции на

мембране неочищенных антигенов, что не влияет на чувствительность серодиагностики, однако существенно снижает трудоемкость подготовительной работы [3]. Эти выводы иллюстрирует табл. 3 на примере определения антител к вирусу ВЭЛ в сыворотках крови иммунизированных этим вирусом кроликов и мышей.

Непрямой вариант дот-ИФА был успешно применен для диагностики бактериальных инфекций, в частности сифилиса [5].

Разработанная тест-система включала в качестве антигена солевой экстракт из культуральных бледных трепонем, обработанных ультразвуком. Антиген иммобилизовали на поверхности нитроцеллюлозной мембраны при использовании КИМФ-02 или на поверхности лунок 96-луночного планшета при постановке ТИФА.

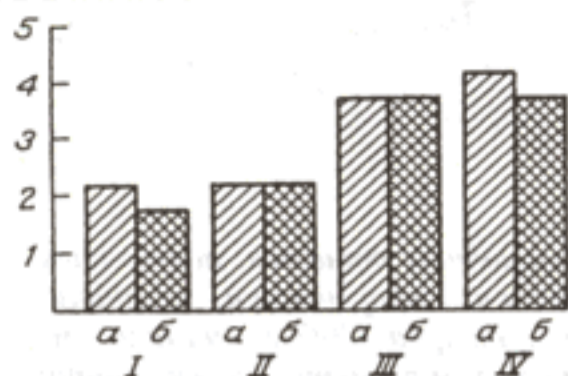
Было исследовано 163 образца сывороток крови пациентов с различными формами сифилиса, в том

Таблица 3

Результаты определения антител к вирусу ВЭЛ в сыворотках крови кроликов и мышей методами дот-ИФА и ТИФА

Антиген-содержащий материал на мембране	Титры антител в сыворотке кролика		Титры антител в ИАЖ мышей	
	Дот-ИФА	ТИФА	Дот-ИФА	ТИФА
Очищенный вирус*	819 200**	819 200	25 600	25 600
САА	819 200	—	51 200	—
МВС	819 200	—	25 600	—
ВКЖ	409 600	—	25 600	—

Примечание. * — вирус ВЭЛ очищен в ВКЖ в водно-полимерной системе [9]; ** — приведены обратные величины титров; прочерк — не используется в ТИФА.



Результаты определения антигенов вируса ВЭЛ в различных материалах методами дот-ИФА и ТИФА.

По оси ординат — логарифм титра антигенов.

I — ВКЖ; II — 10 %-ная вирусосодержащая суспензия из мозга мышей-сосунков; III — САА из МВС; IV — ВКЖ после концентрирования и очистки в водно-полимерной системе ПЭГ — декстрансульфат натрия [9].

Столбик с косой штриховкой — результаты дот-ИФА, столбик в клетку — результаты ТИФА

числе с ранними и латентными, а также здоровых лиц и людей с различными соматическими заболеваниями, которые составили контрольную группу. При выявлении антитрепонемных антител результаты дот-ИФА хорошо коррелировали с данными ТИФА и других методов (кроме менее чувствительной РСК). Следует отметить, что по сравнению с реакцией иммунофлюоресценции (РИФ-абс.), считающейся одной из наиболее чувствительных и специфичных для серодиагностики сифилиса, чувствительность и специфичность дот-ИФА составили соответственно 90,2 и 90,0 %.

Таким образом, в результате проведенной в ГНИИ биологического приборостроения комплексной разработки дот-ИФА созданы технические устройства, база химических реагентов, методики иммуноанализа, тест-системы для детекции широкого круга возбудителей, серодиагностики вызываемых ими заболеваний.

Комплект КИМФ-02 прошел технические и медицинские испытания и рекомендован к серийному выпуску Минздравом РФ. Комплект включает все необходимое для выполнения анализа даже в необорудованной лаборатории, набор прилагаемых реагентов обеспечивает достоверную визуальную регистрацию результатов анализа. Разработанные методики и тест-системы обеспечивают чувствительность иммуноанализа, сопоставимую с чувствительностью ТИФА, однако менее трудоемки и существенно проще в исполнении.

Результаты использования дот-ИФА для детекции возбудителей в биологических пробах и для выявления антител в иммунных сыворотках свидетельствуют о целесообразности включения простой и быстрой методики дот-ИФА в комплекс лабораторных методов, предназначенных для контроля за накоплением вирусоспецифических анти-

генов в различных биологических субстратах, прежде всего в культурах зараженных клеток, в пробах из окружающей среды (например, из водных источников), для контроля активности антигенов и антител, используемых в серологических реакциях, для выявления специфических антигенов в клинических образцах, а также для серодиагностики инфекций.

Список литературы

- Березин В. Э., Таран О. И., Зайдес В. М. // Методы исследования в молекулярной, общей и медицинской вирусологии. М., 1987. С. 43—151.
- Брок Т. Мембранная фильтрация. М., 1987.
- Быченкова Т. А., Помелова В. Г., Осин Н. С. и др. // Вопр. вирусол. 1994. № 4. С. 157—160.
- Быченкова Т. А., Помелова В. Г., Чудинов А. В. и др. // Клин. лаб. диагн. 1995. № 1. С. 24—26.
- Виха И. В., Смирнова В. Г., Орлина Э. А. и др. // Там же. 1997. № 4. С. 24, 33—36.
- Информационные материалы фирмы Whatman Polyfiltronics // Biotech. Products intern. 1998. Vol. 10, N 2. P. 20.
- Михайлов А. Т., Смирский В. Н. // Методы иммунохимического анализа в биологии развития. М., 1991. С. 155—194.
- Папнас М. Г. // Новые методы иммуноанализа / Под ред. У. Коллинза; пер. с англ. М., 1991. С. 116—137.
- Помелова В. Г., Гайдамович С. Я., Демениев В. А., Кадошников Ю. П. // Вопр. вирусол. 1986. № 5. С. 584—587.
- Стародуб И. Ф., Коломиец Л. И., Калиниченко И. Е. // Иммунология. 1988. № 6. С. 73—75.
- Cardosa M. Q., Hoor T. P., Shaari N. S. // J. Virol. 1988. Vol. 66. N 1. P. 81—88.
- New Autoclavable Bio-Dot Microfiltration Apparatus // Bio-Rad Laboratories. Bull. 1986.
- Pappas M. G., Najkowski R., Hookmeyer W. T. // J. Immunol. Meth. 1983. Vol. 64. P. 205—214.
- Храмов Е. Н., Осин Н. С., Помелова В. Г., Виха И. В., Быченкова Т. А., Смирнова В. Г., Грабкина Г. И., Касьянова Т. А. Мембранно-фильтрационный иммуноанализ: реагенты, методы, диагностические и технические средства индикации // Вестник Российской академии медицинских наук. 1999. С. 20—26.

В этом номере мы продолжаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области математики, информатики, механики, химии и физики и поддержанных РФФИ по итогам конкурса 1997 г. (начало см. в № 1—12, 2001 г., № 1—10, 2002 г.). Данные по исполнителям проектов можно найти в "Информационном бюллетене РФФИ" № 5 за 1997 г.

<http://intra.rfbr.ru>

АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

Особенности магнитных свойств ультрамягких проволок и многослойных структур

Номер проекта: 97-02-17968-а

Год предоставления отчета: 1997

Теоретически и экспериментально исследованы магнитные свойства магнитомягких ферромагнитных проводов и пленок с рекордно малыми значениями эффективной константы магнитной анизотропии. Измерения проведены на вибрационном и разработанном в процессе выполнения проекта магнитооптическом магнитометрах. В магнитомягких образцах обнаружены особенности перемагничивания двухслойных структур с сильной магнитостатической связью, приводящие к обратному ходу петли гистерезиса образца. Обнаружены осцилляции осевой компоненты намагниченности тонких проволок на основе Co при перемагничивании полем, перпендикулярным оси проволоки. Построены и апробированы модели магнитной структуры магнитомягких микропроводов с отрицательной и положительной константами магнитострикции, показана роль упругих напряжений в формировании магнитных характеристик аморфных микропроводов, рассчитаны критические значения длины и константы анизотропии. Разработаны методы расчета и программа численного моделирования распределений намагниченности в магнитомягкой однослойной пленке, получены предварительные результаты, указывающие на сложный характер распределения намагниченности на боковых сторонах пленки, который определяет период плоскопараллельной доменной структуры в тонкой пленке.

Экситоны и неоднородные деформации в напряженных полупроводниковых наноструктурах

Номер проекта: 97-02-17872-а

Год предоставления отчета: 1997

Начаты теоретические исследования влияния неоднородных деформаций на экситонные состояния в полупроводниковых наноструктурах — квантовых нитях (1D) и точках (0D), получаемых травлением напряженных приповерхностных квантовых ям. Построен основанный на функции Грина метод вычисления и найдены пространственные распределения деформаций в наноструктурах и обусловленные деформацией изменения зонной структуры для разнообразных геометрий и размеров исследуемых систем. Проанализированы теоретически условия автолокализации экситонов с образованием вокруг экситона области неоднородной

фононной поляризации, в полярных квантовых нитях полупроводник/диэлектрик.

Исследование спектров и пространственного распределения центров с глубокими уровнями в GaN и родственных материалах

Номер проекта: 97-02-17076-а

Год предоставления отчета: 1997

Показано, что в нелегированных и легированных кремнием слоях $n\text{-AlGaIn}$ различного состава, выращенных на сапфировых подложках и подложках из карбида кремния, наблюдаются неоднородности двух основных типов. Для первого из них характерно, что сигнал наведенного тока (НТ) и сигнал краевой микрокатодолюминесценции (МКЛ) в РЭМ изменяются в фазе. Контраст в интенсивности в этом случае обусловлен неоднородностью распределения глубоких центров рекомбинации. К дефектам данного типа относятся области вблизи пор, где сильно снижена концентрация глубоких центров, в том числе и тех, что ответственны за желтую и голубую полосы в спектрах МКЛ. Другие два вида неоднородностей данного класса — это ячеистая неоднородность с характерным размером ячейки 0,3—3 мкм, где центры ячеек обеднены глубокими центрами, и мозаичная неоднородность с чередованием областей с пониженной концентрацией глубоких центров (характерный размер 1—3 мкм) с матрицей, в которой концентрация центров повышена. В неоднородностях второго типа сигналы НТ и МКЛ меняются в противофазе, указывая на неоднородность распределения концентрации мелких доноров. Такая неоднородность характерна для пленок с пирамидами роста. Наблюдается также мозаичная неоднородность указанного типа с областями с повышенной концентрацией электронов, имеющими характерный размер около 1—3 мкм.

В спектрах глубоких уровней в нелегированных и легированных кремнием кристаллах AlGaIn различного состава обнаружены дырочные ловушки с энергией, изменяющейся в диапазоне 0,2—0,35 эВ и 0,85—1 эВ при изменении мольной доли алюминия от 0 до 0,25. Первые, более мелкие дырочные ловушки, ответственны за гашение фотопроводимости в образцах AlGaIn при повышении температуры. Концентрация вторых ловушек коррелирует с интенсивностью желтой полосы и в образцах GaN возрастает вблизи пор и вблизи стенок ячеек в пленках с ячеистой неоднородностью.

Помимо этого в образцах GaN и AlGaIn обнаружены центры с сильной решеточной релаксацией, приводящие к явлению замороженной фотопроводимости при температурах ниже 400 К. Определена высота барьера для захвата элек-

тронов в зависимости от состава, показано, что в GaN центры, о которых идет речь, не связаны непосредственно с кремниевыми донорами, определена оптическая энергия ионизации центров (около 1 эВ).

Магнитоэластичность диамагнитных кристаллов

Номер проекта: 97-02-16327-а

Год предоставления отчета: 1997

Закончена работа по созданию и отладке установки для изучения микропластичности кристаллов в постоянном магнитном поле с помощью механического одноосного сжатия. Реализована возможность программируемого нагружения кристаллов механическими импульсами регулируемой формы. Минимальная сила, которую можно подать на образец и измерить, составляет 0,05 Н (5 г). Точность измерения силы 10–12 %. Предварительные эксперименты выявили нетривиальное поведение дислокаций при совместном действии на кристалл механической нагрузки и магнитного поля.

Для кристаллов LiF получены зависимости пробега дислокации от напряженности электрического поля в широком диапазоне магнитных полей. Показано, что начиная с некоторого электрического поля эти зависимости имеют экспоненциальный характер, причем показатель экспоненты практически не зависит от напряженности магнитного поля.

На примере кристаллов NaCl(Ca) предложена методика оценки размеров примесных комплексов на основе определения зависимости порогового магнитного поля B' , ниже которого магнитоэластический эффект не наблюдается, от концентрации примеси кальция в кристалле.

Проведена серия контрольных экспериментов для выяснения причины увеличения пробега дислокаций в магнитном поле при прохождении слабого электрического тока в монокристаллах Al. Эксперименты показали, что увеличение пробега не связано ни с нагревом образца, ни с возникновением механических напряжений, обусловленных силой Ампера или различными коэффициентами линейного расширения образца и контактов. Показано, что влияние тока на подвижность дислокаций наблюдается только при магнитных полях выше порогового уровня B' .

Диэлектрические фазы в условиях квантового эффекта Холла

Номер проекта: 97-02-16829-а

Год предоставления отчета: 1997

Разработан и экспериментально опробован индуктивный метод возбуждения краевых магнитоплазмонов во время разрешенных экспериментах. Продемонстрировано, что индуктивное возбуждение эффективно в сравнительно слабых магнитных полях, а в ультраквантовом пределе уступает по эффективности емкостной связи. Выполнены магнитоэластические эксперименты по исследованию диэлектрических состояний в двойных квантовых ямах с туннельным барьером в центре. Обнаружено, что в таких системах при температурах порядка десятков милликельвинов образуются новые коллективные щели, предположительно обусловленные кулоновским взаимодействием электронов, находящихся в двух различных половинах квантовой ямы.

Высоковозбужденные излучающие состояния фуллерена: образование, диссипация энергии и релаксация

Номер проекта: 97-02-18510-а

Год предоставления отчета: 1997

Выполнен ряд исследований обнаруженного нами ранее нового явления — испускания квазинепрерывного электромагнитного излучения с планковским спектром при релаксации высоковозбужденной молекулы фуллерена в газовой фазе. Измерены спектры излучения (в диапазоне 300–800 нм) и функции возбуждения излучающих состояний (для энергии электронов до 100 эВ) при столкновении молекулы фуллерена с электроном в пересекающихся пучках. Показано, что радиационная температура соответствует внутренней энергии фуллерена, т. е. зависимость эффективности излучения от длины волны невелика. Обнаружено, что основной вклад в излучение вносят положительно заряженные ионы C_{60}^+ , следовательно, с излучательной релаксацией конкурирует термоэлектронная эмиссия, и полная кинетика релаксации частицы с внутренней температурой 2000–3000 К включает в себя оба процесса. Развита методика, позволяющая варьировать время пребывания излучающих частиц в области наблюдения, и получены временные зависимости интенсивности излучения.

Локальные магнитные свойства микроструктур с двумерным электронным газом

Номер проекта: 97-02-17920-а

Год предоставления отчета: 1997

Основными задачами на отчетный период являлись отработка технологии создания субмикронных гибридных структур и предварительное экспериментальное исследование магнитотранспортных свойств металлических Холловских датчиков. При решении этих задач были получены следующие результаты:

- с использованием электронной литографии получены золотые Холловские мостики шириной 0,4–1 мкм;
- исследованы магнитотранспортные свойства субмикронных Холловских микромостиков;
- отработана технология изготовления мезоструктур с ДЭГ, имеющих геометрию "кольца" и "диска" микронных размеров;
- изготовлены гибридные структуры — металлические Холловские датчики, расположенные на поверхности GaAlAs/GaAs мезоструктуры с двумерным электронным газом;
- для повышения чувствительности в качестве альтернативного материала для Холловских микромостиков был выбран висмут.

В отчетный период была отработана технология получения пленок висмута и измерены их электрофизические параметры.

Разработка методов нелинейного акустического видения

Номер проекта: 97-02-17524-а

Год предоставления отчета: 1997

Впервые в экспериментах по модуляции высокочастотных крутильных волн низкочастотными изгибными колебаниями обнаружены и исследованы нелинейные акустические свойства трещин в твердых телах при тангенциальных напряжениях по отношению к контактирующим поверхностям. Установлено, что параметр нелинейности трещины существенно зависит от состояния контакта: при введении

жидкости в контакт нелинейность трещины значительно уменьшается.

Выполнены исследования нелинейного рассеяния акустических волн в композитных материалах с трещинами. Обнаружена мультigarмоническая модуляция высокочастотного сигнала накачки основной и высшими гармониками низкочастотного тонального вибрационного возбуждения. Наблюдался аномально высокий коэффициент модуляции порядка -20 дБ для многих мультigarмонических составляющих. Также установлен эффект влияния наличия воды в трещине на ее акустическую нелинейность: при заполнении трещины водой амплитуда модуляции уменьшалась на $3-4$ дБ.

Впервые экспериментально исследованы возможности использования методов акустической импульсной томографии для обнаружения "нелинейных" дефектов в композитных материалах. Была исследована акустическая "прозрачность" трещины для короткого импульсного сигнала в зависимости от фазы дополнительного сильного импульса давления, которые формировались с помощью калиброванных синхронизированных взрывных источников. Показано, что коэффициент акустической "прозрачности" зависит от фазы импульса нагружения, приводящего к модуляции ширины трещины.

Теоретически исследованы физические особенности формирования акустических сигналов от движущегося стохастически ансамбля нелинейно-рассеивающих объектов в линейной среде и предложен метод измерения средней скорости и ее дисперсии по ансамблю. Подобный метод может быть применен для нелинейной акустической визуализации движущихся нелинейно-рассеивающих объектов.

Исследование микроструктур с двойным обменом в перовскитоподобных соединениях

Номер проекта: 97-02-18598-а

Год предоставления отчета: 1997

В основе микроскопических теорий класса соединений $La_{1-x}Ca_xMnO_3$ со смешанной валентностью лежит представление о двойном обмене и сильном электрон-фононном взаимодействии. Однако экспериментальные оценки микроскопических параметров предлагаемых теорий при исследовании этих соединений затруднены. Другим способом получения данных параметров является исследование примесных парных центров смешанной валентности в диэлектрических кристаллах. Одним из возможных кандидатов для данных исследований является кристалл $KZnF_3:Cr_{2+}, Cr_{3+}$, где ранее нами были обнаружены линии поглощения парных центров ионов $Cr_{2+}-Cr_{3+}$. В этой связи целью настоящей работы являлось экспериментальное определение типа обменного взаимодействия в паре $Cr_{2+}-Cr_{3+}$, оценка интеграла перескока *eg*-электрона и теоретическая идентификация наблюдаемых линий поглощения.

Для определения симметрии парного центра ионов $Cr_{2+}-Cr_{3+}$ нами была выбрана пьезоспектроскопическая методика. Выполнение поставленной задачи потребовало существенного улучшения чувствительности спектрополяриметра. В результате модернизации экспериментальной установки и автоматизации процесса измерений стала возможной регистрация расщеплений под действием давления до 10^{-4} от ширины линии.

Методом пьезодихроизма показано, что линии поглощения кристалла $KZnF_3:Cr_{2+}, Cr_{3+}$ в областях 503, 580 и 598 нм соответствуют парным центрам ионов $Cr_{2+}-Cr_{3+}$, расположенным вдоль тетрагональной оси кристалла. Предложена микроскопическая модель парного центра. Минимумы адиабатического потенциала пары соответствуют сжатию фторового окружения иона Cr_{3+} и согласованному ян-тел-

леровскому вытягиванию фторового октаэдра около Cr_{2+} . Сильное вибронное взаимодействие ионов хрома с кристаллической решеткой существенно редуцирует параметр двойного обмена. Определенный по температурной зависимости интегральной интенсивности линий поглощения фактор поляронной редукции оказался примерно равным 0,11. Рассмотрены правила отбора обменно-индуцированных электродипольных переходов в условиях двойного обмена. Полученная формула хорошо объясняет факт наблюдения малого числа линий поглощения пар $Cr_{2+}-Cr_{3+}$.

Плазменные гетерофазные процессы окисления микропримеси диоксида серы

Номер проекта: 97-02-16392-а

Год предоставления отчета: 1997

Выполнен комплекс методических работ, обеспечивший успешное проведение экспериментальной части проекта 1997 г. Опробована надежность спектрофотометрического контроля микропримеси SO_2 "on-line" в натуральных экспериментах ($\lambda = 285$ нм) и впервые проведены систематические исследования эффективности гетерофазной очистки, стимулированной электронным пучком (ЭП) при различных условиях (концентрация SO_2 , объемная доля аэрозоля, мощность дозы, поглощенная доза, температура).

Методом светорассеяния найдено частичное распределение капель водяного аэрозоля, генерируемого пневматической форсункой в натуральных экспериментах, а также в опытах по исследованию динамики транспортных процессов в газе.

С использованием спектрального комплекса КСВУ-12 отработан дифференциальный метод ($\epsilon_{\lambda = 288} - \epsilon_{\lambda = 289}$ нм) контроля SO_2 в смешанном потоке газ-жидкость — так называемый метод "droplet train technique", позволивший судить о скорости транспортных процессов кислорода в капельной влаге.

Исследована динамика транспортных процессов в жидкости в условиях одновременного окисления SO_2 при воздействии ЭП — так называемый метод "a wetten flow tube technique".

С применением иодометрии найдены коэффициенты экстинкции ϵ (200—300 нм) для HSO_3^- и $SO_{2(aq)}$ — основных компонентов SO_2 в водных растворах ($pH = 2-4$, $T = 298$ К).

С учетом констант равновесий: $SO_{2(aq)} \leftrightarrow HSO_3^- + H^+$;

$HSO_4^- \leftrightarrow SO_4^{2-} + H^+$, оптического поглощения рабочих растворов ($\lambda = 200-210$, $\lambda = 276,4$ нм) и измерения pH образцов это дало возможность надежно контролировать содержание непрореагировавшей серы (IV): $[S(IV)] = [HSO_3^-] + [SO_2]$.

Обнаружен синергизм действия ионизирующего излучения и ионов Mn(II) при окислении микропримеси диоксида серы в капельной фазе.

С применением "one phase bulk study" найдено, что эффект марганца обусловлен формированием в системе высокореакционно-способных металлокомплексов $MnHSO_3^+$, быстро реагирующих с переносчиками цепи — радикалами SO_3^- .

Транспорт тепла в органических и молекулярных кристаллах

Номер проекта: 97-02-17772-а

Год предоставления отчета: 1997

Было проведено экспериментальное исследование теплопроводности компактированных образцов и кристаллов фуллерита при температурах ниже нормальных и рассмот-

рена возможность применения существующих теоретических представлений для описания механизмов транспорта энергии в совершенных кристаллах и компактированных образцов С60. Обнаружено, что в интервале $T = 280 \pm 6$ К температурная зависимость теплопроводности $k(T)$ компактированных образцов близка к теплопроводности аморфного сплава и может быть описана в рамках модели Эйнштейна (перенос тепла в системе некогерентно колеблющихся молекул). Это объясняется возникновением сильной разориентации в объеме кристаллических зерен в процессе компактирования. Измерения теплопроводности кристаллов С60 при $T < 30$ К были выполнены впервые. Обнаружено, что в области $T = 75 \pm 25$ К наблюдаемая зависимость $k(T)$ может быть описана выражением $k(T) \sim \exp(-b/T)$, характерным для поведения теплопроводности совершенных непроводящих кристаллов при температурах ниже дебаевской (где преобладает фонон-фононное рассеяние с перебросом в объеме образца (модель Дебая—Пайерлса). При низких температурах преобладает рассеяние фононов на "замороженных" ориентационных дефектах, остаточная концентрация которых в кристалле SC фазы может достигать 10 %. Исследования теплопроводности полимеризованных компактированных образцов показали, что полимерные связи между молекулами С60 в таких образцах препятствуют образованию ориентационных дефектов. Были подобраны и проведены предварительные исследования электропроводности образцов органического проводника (ТТТ)2-13, в которых ранее наблюдался переход металл—изолятор при температурах ~ 100 К. Планируется провести в дальнейшем измерения тепло- и электропроводности этих образцов при температурах ниже нормальных. Закончена сборка и начаты отладочные эксперименты на установке по исследованию транспортных характеристик в магнитном поле.

Изучение механизмов переноса электронов в конденсированных средах

Номер проекта: 97-02-16455-а
Год предоставления отчета: 1997

В 1997 г. проведены эксперименты, имеющие целью исследование механизма переноса электронов собственного трека в кристаллах неона. Предложена и реализована новая методика проведения μ SR экспериментов в электрическом поле с одновременным измерением тока разделения зарядов, что позволяет выяснить истинное значение электрического поля внутри образца.

Экспериментально показано, что внесение примеси водорода в кристаллы неона на уровне 1 % принципиально меняет характер накапливания зарядов на поверхности кристалл—электрод. Проведены первые тестовые эксперименты по идентификации механизма образования мюония в Si.

Применение новой методики μ SR измерений в переменных электрических полях позволило решить проблему накапливания заряда на границе диэлектрик—металлический электрод и открывает возможность прямого измерения времени захвата зарядов в полупроводниках.

Электрооптические явления в гомоэпитаксиальном нитриде галлия

Номер проекта: 97-02-18088-а
Год предоставления отчета: 1997

Задачей первого этапа выполнения проекта являлось изучение особенностей эпитаксиального роста объемного нитрида галлия на различных подложках и исследование

оптических и электрических характеристик выращенных слоев. При этом особое внимание уделялось получению и исследованию свободных слоев GaN, поскольку такие образцы будут использованы на следующем этапе для гомоэпитаксиального роста нитрида галлия. Были исследованы процессы роста толстых слоев (более 100 нм) GaN на следующих материалах: аллюминате и галлате лития, арсениде галлия, сапфире различных кристаллических ориентаций. Исследованы спектры фотолюминесценции этих образцов. Детальное изучение спектров комбинационного рассеяния позволило определить фононный спектр нитрида галлия. Методом рентгеновского рассеяния определено их кристаллическое совершенство. Разработка технологии роста поликристаллического GaN достаточно большого размера дала возможность получить слои нитрида галлия на сапфире методом лазерного распыления. Выполнены исследования электрооптических параметров этого материала.

Исследование эффектов акустического воздействия на частично насыщенные капиллярно пористые среды

Номер проекта: 97-02-17537-а
Год предоставления отчета: 1997

Проведены экспериментальные работы по исследованию влияния виброколебаний на фильтрационную способность речного песка, являющегося весьма распространенным примером гранулированной среды. Изучаемой характеристикой служила проницаемость скелета по отношению к фильтрации сквозь него жидкого компонента (влаги). Для этого на специально собранной в ИПФ РАН лабораторной установке исследована частотная зависимость вибровоздействия на скорость фильтрации как водопроводной, так и дистиллированной воды в широком интервале звуковых частот. Важным результатом являются экспериментально полученные данные, не только подтверждающие лишь качественно описанные в литературе эффекты виброуплотнения и виброразжижения, но и представляющие собой более подробные сведения относительно перехода от одного эффекта к другому по мере смены частоты, которые ранее в литературе не обсуждались. Указанный результат может представлять и практический интерес для некоторых разделов техники.

Выполнен теоретический анализ движения жидкой капли, заземленной внутри волокнистой поры, в условиях несмачиваемых стенок под действием мощной акустической волны, бегущей по каркасу вдоль капиллярных волокон. Численный анализ позволил обнаружить возможность реализации не только колебательного, но и поступательного режима движения капли. Получены требуемые условия на уровень и частоту акустического воздействия, а также на параметры капельной жидкости, на геометрические и физические характеристики пор.

Электронные состояния и явления переноса в легированных полупроводниковых структурах с искусственным беспорядком

Номер проекта: 97-02-17334-а
Год предоставления отчета: 1997

Рассмотрена задача о влиянии кулоновских полей, возникающих при перераспределении заряда в легированных сверхрешетках с контролируемым беспорядком и в асим-

метричных двойных квантовых ямах, на уровне размерного квантования. Получено точное решение модельной задачи о вертикальном экранировании плоского дефекта в сверхрешетке. На основе теории функционала плотности, сформулированной применительно к квазидвумерным структурам, показана возможность существования неоднородных распределений электронов по ямам (электронных сверхструктур), возникающих за счет обменно-корреляционного вклада в энергию системы. Проведено исследование устойчивости пространственно однородных состояний, найдены условия спонтанного нарушения симметрии и проанализированы возникающие электронные сверхструктуры. Получено, что условия возникновения электронной сверхструктуры в сверхрешетках являются существенно менее жесткими, чем условия вигнеровской кристаллизации. Проведены численные расчеты спектров туннельной прозрачности сверхрешеток с контролируемым беспорядком и асимметричных двойных квантовых ям. Проанализирован температурный ход вертикальной проводимости таких структур с учетом некогерентных процессов.

Для ограниченных систем в режиме квантового (прыжкового) переноса показано, что приближение, лежащее в основе существующей теории термоэлектрических кинетических коэффициентов и связанное с использованием локально равновесной электронной функции распределения при решении квантового кинетического уравнения, может нарушаться, в частности, в режиме баллистического транспорта фононов. Найдено, что в этих условиях прыжковая термоЭДС обращается в нуль. Теория использована для объяснения anomalously малых значений термоЭДС нейтронно-легированного германия при низких температурах в области прыжковой проводимости.

Исследование электронных и колебательных характеристик фторуглеродных связей в конденсированных средах на основе импульсно-периодического лазерного возбуждения

Номер проекта: 97-02-17729-а

Год предоставления отчета: 1997

Разработана методика получения спектров комбинационного рассеяния света во фторорганических соединениях. Установлено, что за фторуглеродную связь ответственно колебательное возбуждение с частотой, находящейся в диапазоне $500-800 \text{ см}^{-1}$ в зависимости от типа молекулярного соединения. Разработанная методика открыла возможности для проведения диагностики присутствия фторуглеродной связи в гомогенных и гетерогенных структурах.

Кинетика фононов в неупорядоченных диэлектрических и сегнетоэлектрических твердых телах

Номер проекта: 97-02-16810-а

Год предоставления отчета: 1997

Изучено распространение слабонервновесных фононов $DT <$. Изучена кинетика слабонервновесных фононов теплового импульса в двух однофазных керамиках из оксида алюминия, полученных в разных технологических режимах: первая изготавливалась методом изостатического прессования при 400 МПа с последующим отжигом при температуре $1900 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение одного часа; корундовые керамики вто-

рого типа изготавливались по стандартной технологии с временем синтеза до 20 ч. Обнаружен эффект "замедления" распространения нервновесных фононов (частоты $\sim 10^{12}$ Гц) в образцах первого типа по сравнению с керамиками, полученными по обычной технологии. Количественная обработка полученных результатов в рамках предложенной нами ранее модели распространения нервновесных фононов в однофазных керамиках позволяет сделать следующие выводы. При одинаковой весовой плотности обоих типов керамики ($\sim 98 \%$) отношение площади межзеренных контактов к площади поверхности зерна в керамиках первого типа составляет $\sim 0,3$, тогда как в обычных керамиках $\sim 0,9-0,95$, т. е. в керамике первого типа реализуется шероховатая мелконерегулярная граница (нерегулярности порядка длины волны фонона) раздела между зернами.

Нанокластеры меди в аморфном углероде: структура, размеры и особенности электронного транспорта

Номер проекта: 97-02-18110-а

Год предоставления отчета: 1997

Исследовались морфология медных нанокластеров в матрице аморфного гидрогенизированного углерода (а-С:Н), сформированных в процессе плазменного сораспыления графитовой и медной мишеней, и собственно наноструктура матрицы. Наблюдалось образование в матрице наноалмазной фазы в узком интервале давлений. Впервые экспериментально продемонстрировано наличие в а-С:Н графитоподобной фазы, определяющей оптические свойства этого материала и определен размер графитоподобных нанокластеров. Аллотропный состав углерода в а-С:Н контролировался с помощью прямой электронномикроскопической идентификации нанокластеров основных аллотропов углерода — алмаза и графита совместно с измерением формы края оптического поглощения. Преимущественное содержание того или иного аллотропа задавалось давлением и напряженностью электрического поля в рабочей камере магнетрона. Наблюдался и был исследован эффект обратимости ухода водорода из связанного состояния в пленках а-С:Н в процессе их отжига.

Для определения размеров медных нанокластеров проводились оценки взаимно дополняющими методами по данным спектральных, электронномикроскопических и рентгеновских исследований (малоугловое рассеяние). Построенные функции распределения медных и углеродных нанокластеров по размерам имеют форму гауссовой функции. Предложен флуктуационный механизм формирования нанокластеров меди и углерода в матрице а-С:Н. Анализ данных по малоугловому рентгеновскому рассеянию в рамках теории рассеяния фрактальными структурами позволил обнаружить изменение формы поверхности медных рассеивателей в а-С:Н от практически гладкой при малых концентрациях меди до гофрированной при концентрациях порядка 25 %.

Разработана компьютерная модель физических процессов образования нанокластеров в процессах плазменного распыления, основанная на общей теории радиационных процессов и позволяющая описывать как баллистические процессы при осаждении частиц на подложку, так и диффузию компонентов, приводящую к формированию и росту кластеров.