

циальная сила может быть при определенных условиях ускоряющей, а поток тепла — аномальным (от "холодного" тела к "горячему"). Физически это обусловлено наличием у частицы внутренних степеней свободы, в результате чего обмен энергией и импульсом в системе движущаяся частица — поверхность не является столь тривиальным, как, например, при движении заряженной частицы. На подобные эффекты обращалось внимание В. Г. Полевым [1] при рассмотрении флуктуационно-диссипативного взаимодействия двух полубесконечных пространств, разделенных плоской щелью и находящихся в относительном движении.

Показано, что зонд сканирующего зондового микроскопа может быть использован как "тепловой штамп" для модификации поверхности образца через ближнепольные моды флуктуационного электромагнитного поля, поскольку соответствующий поток тепла на много порядков превышает поток излучения абсолютно черного тела той же температуры.

Наконец, сделана оценка вклада структурных эффектов в тангенциальную силу и скорость нагрева частицы. Такие эффекты могут наблюдаться при движении в направлении низкоиндексных направлений двумерных структур, находящихся на поверхности образца.

Список литературы

1. Полевой В. Г. Тангенциальные молекулярные силы между движущимися телами, обусловленные флуктуационным электромагнитным полем // ЖЭТФ. 1990. Т. 98. Вып. 6(12). С. 1990—1999.

2. Tomassone M. S., Widom A. Electronic friction forces on molecules moving near metals // Phys. Rev. 1997. V. B56. P. 4938—4943.
3. Pendry J. B. Shearing the vacuum — quantum friction // J. Phys. C: Solid State Phys. 1997. V. 9. P. 10301—10320.
4. Volokitin A. I., Persson B. N. J. Theory of friction: contribution from fluctuating electromagnetic field // Phys. Low-Dim. Struct. 1998. V. 7/8. P. 17—28.
5. Dedkov G. V., Kyasov A. A. Electromagnetic friction forces on the scanning probe asperity moving near surface // Phys. Lett. 1999. V. A259. P. 38—42.
6. Dedkov G. V., Kyasov A. A. Electromagnetic fluctuation forces on a particle moving near a surface // Surf. Sci. 2000. V. 463. N 1. P. 11—21.
7. Dorofeyev I., Fuchs H., Wenning G., Gotsmann B. Damping of a moving particle near a wall: a relativistic approach // Phys. Rev. 2001. V. B54. P. 35403—35410.
8. Volokitin A. I., Persson B. N. J. Dissipative van der Waals interaction between a small particle and a metal surface // Phys. Rev. 2002. V. B65. P. 115419—115430.
9. Kyasov A. A., Dedkov G. V. Relativistic theory of fluctuating electromagnetic slowing down of neutral spherical particles moving in close vicinity to a flat surface // Nucl. Instr. Meth. 2002. V. B195. N 3—4. P. 247—259.
10. Дедков Г. В., Кясов А. А. Диссипация энергии флуктуационного электромагнитного поля, тангенциальная сила и скорость нагрева нейтральной частицы, движущейся вблизи плоской поверхности // ФТТ. 2002. Т. 28. № 8. С. 79—84.
11. Дедков Г. В., Кясов А. А. Электромагнитные и флуктуационно-электромагнитные силы взаимодействия движущихся частиц и нанозондов с поверхностями. Нерелятивистское рассмотрение // ФТТ. 2002. Т. 44. № 10. С. 1729—1751.
12. Pendry J. B. Radiative exchange of heat between nanostructures // J. Phys.: Condens. Matter. 1999. V. 11. P. 6621—6633.
13. Volokitin A. I., Persson B. N. J. Radiative heat transfer between nanostructures // Phys. Rev. 2001. V. B63. P. 205404—205415.
14. Дедков Г. В., Кясов А. А. Об эффекте теплообмена между пробной наночастицей и поверхностью через ближнепольные моды флуктуационного электромагнитного поля // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. № 23. С. 50—57.
15. Beloshitsky V. V., Komarov F. F. and Kumakhov M. A. Dechanneling, flux — peaking and energy losses of fast charged particles through thick crystals // Phys. Rep. 1986. V. 139. N 6. P. 293—364.

УДК 681.586.773

В. А. Дьяченко, д-р техн. наук, проф.,
А. Б. Смирнов, канд. техн. наук,
Санкт-Петербургский государственный
технический университет

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ МИКРОМАНИПУЛЯТОРОВ С ПЬЕЗОПРИВОДАМИ

Рассматриваются микроманипуляционные системы с биморфными пьезоприводами, предназначенные для биологических исследований. Анализируются конструктивные решения устройств с тремя степенями свободы. Приводится расчет перемещений рабочего органа микроманипулятора в зависимости от напряжения, подаваемого на пьезопривод. Определяются области перемещений и траектории движения при определенных законах изменения напряжения.

Последние достижения в области медицины и биологии, в частности в генной инженерии (кло-

нирование) и цитологии, в немалой степени обязаны бурному развитию микроманипуляционных систем, способных проводить тончайшие операции на клеточном уровне. Рабочими органами таких устройств служат микропипетки, микроинъекторы и микроэлектроды.

Современные микроманипуляторы обычно имеют два уровня перемещений — грубые и точные. Первые осуществляются в относительно больших зонах (20...40 мм) на скоростях до 10 мм/с при разрешении 0,1 мм за счет ручного или электромеханического приводов, в состав которых входят электродвигатели и механические передачи (реечные, винтовые). Точные перемещения (ход до 1...2 мм) при максимальном разрешении 0,2 мкм осуществляются с помощью модулей, установленных на приводах грубых перемещений, включающих электромеханические приводы с червячными, рычажными и ленточными передачами, или с мембранными объемными гидравлическими передачами. В основном эти микроманипуляционные системы

имеют по три степени свободы на модулях грубого и точного перемещений.

Мировой лидер в производстве микроманипуляторов — японская компания NARISHIGE — выпустила на рынок манипуляторы с пьезоэлектрическими приводами точных перемещений, установленными на модулях грубых перемещений с гидropередачами [1]. Для получения точных перемещений (в зоне до 0,1 мм по каждой степени свободы) в них используются составные пьезоэлектрические преобразователи (ПП), состоящие из набора пьезокерамических шайб. Примером может быть образец (рис. 1), состоящий из пакета секций 1 тонких пьезокерамических шайб (ПКШ) и имеющий по концам два фланца 2, стянутых винтовой шпилькой 3 с тонкой средней частью посредством двух гаек 4. Стяжка секций необходима для выбора зазоров и люфтов между ПКШ, повышения жесткости пьезоэлектрического привода и уменьшения петли гистерезиса. Тонкостенная пластмассовая втулка 5 служит в качестве изолятора и элемента, центрирующего весь пакет секций ПКШ. Слюдяные шайбы 6 также являются изоляторами, обладающими высокой жесткостью при сжатии. Обычно секция 1 состоит из 10...20 ПКШ толщиной 0,5...1 мм с серебряными электродами, нанесенными на плоские торцевые поверхности, которые электрически параллельно соединены между собой.

Для увеличения диапазона перемещений пьезопривода может быть использован простейший принцип мультиплексии перемещений — применение разноплечного рычага. На рис. 2 показано устройство, состоящее из ПП 1, рычага 2 с упругим шарниром 3 и выходного звена 4. Коэффициент мультиплексии этой системы $k = L/l_p$. Однако такие конструктивные решения становятся громоздкими.

Особенностью ПП является то, что они представляют собой твердотельные элементы, преобразующие электрическую энергию в энергию механического движения, которые могут быть достаточно просто закреплены на механических передаточных звеньях или исполнительных органах. Они фиксируются на механических частях обычно с помощью клеевых или резьбовых соединений.

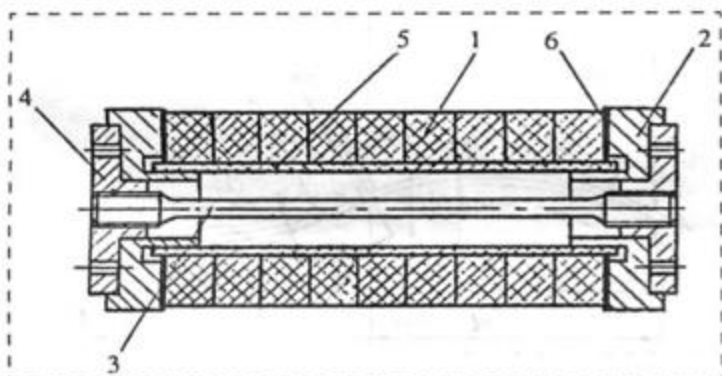


Рис. 1. Составной пьезопреобразователь

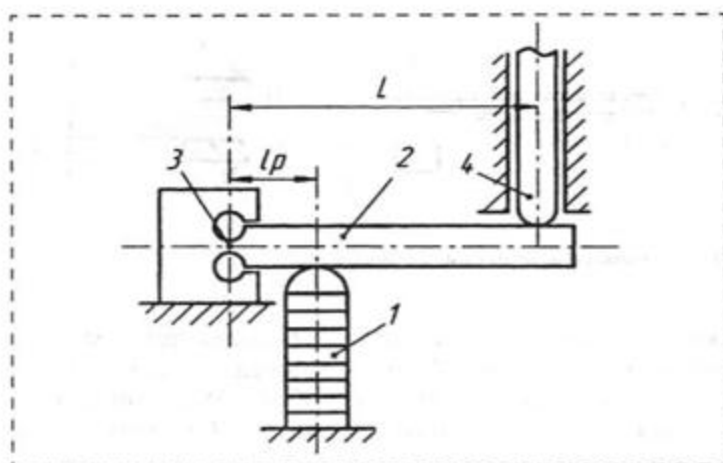


Рис. 2. Мультиплексия перемещений пьезопреобразователя

Управляемое перемещение этих звеньев осуществляется за счет изменения формы и (или) размеров ПП, являющихся конструктивными элементами механической цепи манипулятора.

Пьезокерамические элементы имеют высокую надежность, поэтому применение их в механических системах не снижает общего уровня надежности. Однако узким местом при их применении является хрупкость пьезокерамики. ПП не требуют смазки, они не подвержены коррозии, могут работать при температурах до 400 °С. КПД преобразования электрической энергии в механическую близок к КПД электромагнитных систем.

Важный принцип мехатроники, заключающийся в соединении в единую систему электромеханических преобразователей энергии, передаточных механизмов и рабочих органов, может быть воплощен при разработке микроманипуляторов с помощью ПП, встроенных в передаточные механизмы или даже непосредственно в рабочие органы. Этим достигается высокая компактность устройств в целом.

Для микроманипуляционных систем перспективно использование биморфных пьезоэлектрических преобразователей (БПП) [2], которые соответствуют указанному принципу мехатроники. В них используются изгибные деформации многослойных структур, состоящих из активных — пьезоэлектрических слоев и неактивных — металлических или полимерных слоев. При определенном направлении поляризации пьезокерамических элементов в них возникают управляемые изгибные деформации, которые приводят к многократному увеличению перемещений по сравнению с ПП, работающими на растяжение—сжатие. Кинематические упругие устройства со встроенными в них БПП становятся активными, т. е. кроме обеспечения заданной траектории движения они одновременно служат для преобразования электрической энергии в механическую [3].

Наиболее технологичной является конструкция БПП (рис. 3), состоящая из двух пьезокерамиче-

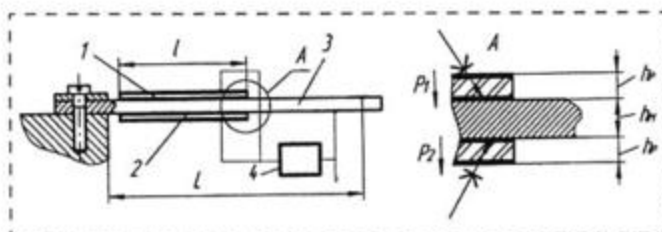


Рис. 3. Биморфный пьезопреобразователь

ских пластин 1, 2 с одинаковым направлением векторов поляризации P_1 и P_2 и металлической рессоры 3, склеенных между собой. Электрическое напряжение подается от источника 4 на электроды пьезоэлектрических пластин 1 и 2. Толщина пьезоэлемента h_p обычно не превышает 1 мм, а толщина металлической рессоры h_m — не более 0,5 мм. Соотношение длин l/L может меняться от 0,3 до 1.

Последовательное соединение трех БПП может послужить основой для создания модуля точных перемещений с тремя степенями свободы. Авторы предлагают компактное устройство микроманипулятора (рис. 4). Расположенные в одной плоскости два БПП 1 с одной стороны консольно закреплены на модуле грубых перемещений, а с другой — жестко связаны со второй парой БПП 2, которые параллельны друг другу. В свою очередь, с другой стороны БПП 2 связаны с жесткой платформой 3, образуя упругий параллелограмм. На противоположных гранях платформы 3 зафиксированы два других параллельно расположенных БПП 4, концы которых установлены на второй жесткой платформе 5, образуя второй упругий параллелограмм. На платформе 5 находится рабочий орган 6 (например, микроэлектрод). При подаче напряжения на БПП 1 точка С выходного звена совершает перемещение вдоль оси z , при подаче напряжения на БПП 2 точка С перемещается по оси x , а при подаче напряжения на БПП 4 точка С движется по оси y .

Такое схемное решение модуля точных перемещений позволяет перемещать рабочий орган в зоне $1 \times 0,5 \times 0,5$ мм при максимальных линейных габаритах модуля до 60 мм. Оно имеет невысокую жесткость из-за последовательного соединения БПП и, как следствие, невысокое быстродействие.

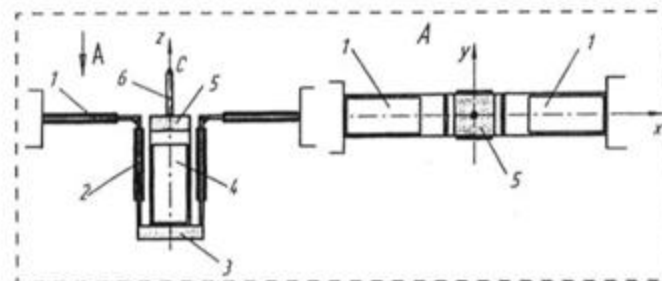


Рис. 4. Модуль точных перемещений микроманипулятора с тремя степенями свободы

Повышение жесткости и упрощение конструктивной схемы манипулятора может быть достигнуто за счет применения активного упругого шарнира (АУШ) на базе металлической рессоры с наклеенными на ней двумя парами пьезоэлектрических пластинок, образующих два БПП, у которого в точке 0 закреплено выходное звено в виде жесткого стержня (расчетная схема такого устройства показана на рис. 5).

Концы рессоры в точках А и В имеют сосредоточенные упругие шарниры, моменты реакции в которых незначительны. Схема с АУШ выгодно отличается от предыдущей схемы тем, что при подаче на оба БПП напряжения противоположной полярности рессора изгибается таким образом, что точка С выходного звена совершает качение вокруг точки 0, а при подаче напряжения одинаковой полярности выходное звено движется поступательно. Таким образом, эта малогабаритная конструктивная схема имеет две степени свободы.

Для осуществления перемещения точки 0 на два БПП подаются различные по амплитуде и фазе напряжения U_1 и U_2 , которые в расчетах можно заменить эквивалентными моментами M_{E1} и M_{E2} , изгибающими БПП:

$$M_{Ei} = -\frac{3}{2} \frac{d_{31} \left[\left(h_p + \frac{h_m}{2} \right)^2 - \frac{h_m^2}{4} \right]}{\left\{ E_m s_{11}^E \frac{h_m^3}{8} + \left[\left(h_p + \frac{h_m}{2} \right)^3 - \frac{h_m^3}{8} \right] \right\} h_p \lambda_b} U_i, \quad i = 1, 2,$$

где s_{11}^E — податливость пьезоэлектрики при постоянной напряженности электрического поля; d_{31} — пьезоэлектрический модуль пьезоэлемента при действии электрического напряжения в направлении, перпендикулярном его деформации; E_m — модуль Юнга для металла рессоры; h_p — толщина пьезоэлемента.

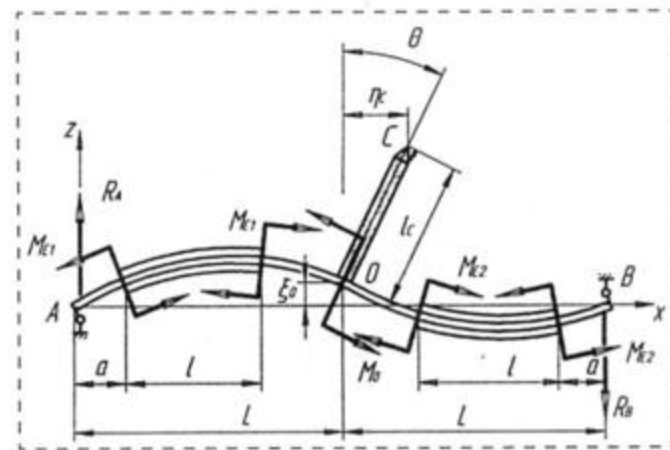


Рис. 5. Расчетная схема микроманипулятора с двумя степенями свободы при подаче напряжений на пьезоэлементы

зокерамических пластинок; h_m — толщина металлической рессоры; λ_b — податливость сечения БПП.

В нашем случае БПП представляет собой композит, состоящий из трех склеенных слоев, поэтому податливость поперечного сечения определяется формулой [4]

$$\lambda_b = \frac{12}{b \left\{ E_m h_m^3 + 2 \frac{h_p^2}{s_{11}} \left[1 + 3 \left(1 + \frac{h_m}{h_p} \right)^2 \right] \right\}},$$

где b — ширина БПП, равная ширине как пьезоэлементов, так и рессоры.

Рассчитав перемещения точки C выходного звена упругой системы при действии эквивалентных моментов, определим рабочую зону выходного звена модуля точных перемещений. Пусть напряжения U_1 и U_2 изменяются в пределах $-U \leq U_i \leq U$, $i = 1, 2$, тогда область, в которой может находиться точка C , будет ограничена четырьмя прямыми линиями и будет представлять собой ромб (рис. 6, штриховой линией показана эллиптическая траектория движения точки C при подаче гармонического напряжения на два БПП со сдвигом фаз на угол 90°):

$$\begin{cases} \xi_C = -A\eta_C + BU; \\ \xi_C = -A\eta_C - BU; \\ \xi_C = A\eta_C - BU; \\ \xi_C = A\eta_C + BU, \end{cases}$$

где ξ_C и η_C — перемещения точки C по осям ξ и η

соответственно, $A = \frac{L}{l_C}$;

$$B = -\frac{3\lambda_b(l+2a)l}{4} \times \frac{d_{31} \left[\left(h_p + \frac{h_m}{2} \right)^2 - \frac{h_m^2}{4} \right]}{\left\{ E_m s_{11}^E \frac{h_m^3}{8} + \left[\left(h_p + \frac{h_m}{2} \right)^3 - \frac{h_m^3}{8} \right] \right\} h_p \lambda_b}.$$

Для упругой системы, имеющей следующие числовые значения параметров: $L = 40$ мм, $l = 30$ мм, $a = 10$ мм, $b = 15$ мм, $h_m = 0,1$ мм, $h_p = 0,8$ мм, $l_C = 40$ мм, $E_m = 0,71 \cdot 10^5$ МПа (дюралюминий), $s_{11}^E = 10,7 \cdot 10^{-6}$ МПа $^{-1}$, $d_{31} = -158 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н (пьезокерамика ЦТБС-3), в диапазоне изменения напряжений $-500 \text{ В} \leq U_{1,2} \leq 500 \text{ В}$ получим эквивалентные моменты в диапазоне $M_{1,2} = \pm 0,10 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и следующие диапазоны перемещений: $\xi_{0E} = \pm 0,13$ мм (см. рис. 6), $\eta_{0E} = \pm 0,13$ мм, $\theta_{0E} = \pm 0,19^\circ$. Таким

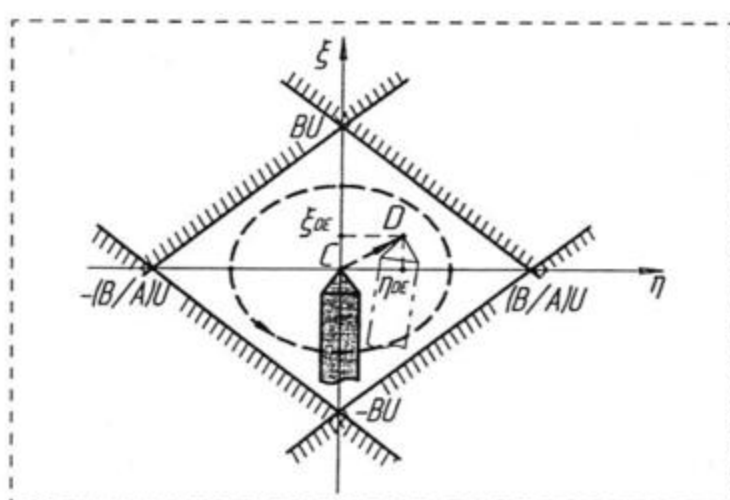


Рис. 6. Область перемещения точки C выходного звена и траектории ее движения в местной системе координат

образом, рабочая зона перемещений представляет собой квадрат. При одновременном действии эквивалентных моментов в указанном диапазоне и момента нагрузки M_0 его значение, при котором выходное звено не сможет повернуться ($\theta_0 = 0$), составит $M_0 = 0,10 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Повышение быстродействия и увеличение числа степеней свободы до трех может быть получено при крестообразном соединении двух рессор с БПП. Конструктивная схема экспериментального образца показана на рис. 7. На модуле грубых перемещений 1 закреплены параллельно распо-

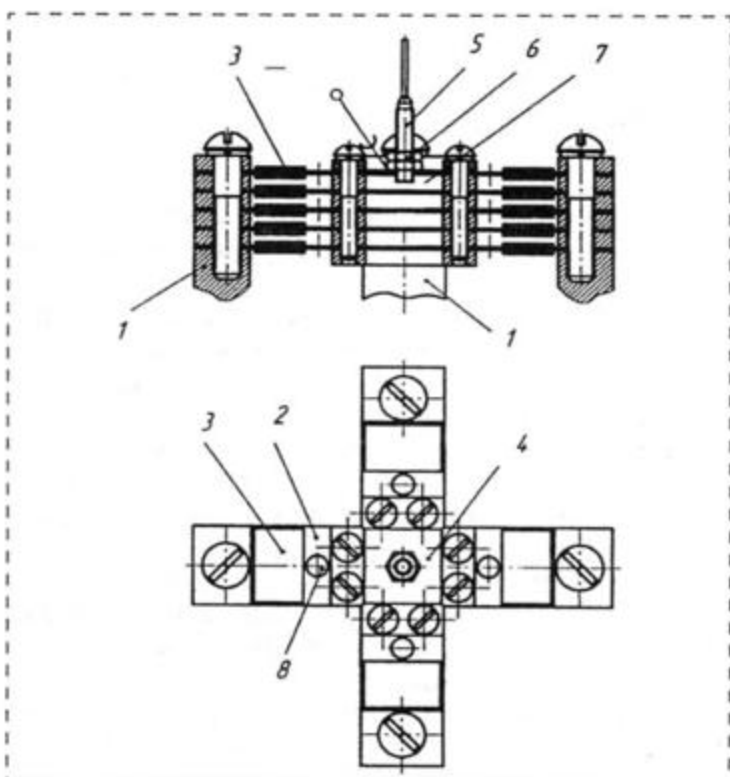


Рис. 7. Модуль точных перемещений с тремя степенями свободы

женные рессоры 2 с БПП 3, к концам которых прикреплена одна крестообразная рессора 4. В ее центре расположено выходное звено 5, закрепленное с помощью гайки 6 и контргайки. Рессоры с БПП собираются в пакеты с помощью планок 7. Отверстия 8 необходимы для уменьшения жесткости рессор 2. При подаче различных по фазе и по амплитуде напряжений на плечи манипулятора выходное звено 5 может двигаться как в вертикальном направлении, так и качаться вокруг горизонтальных взаимно перпендикулярных осей. Параллельное соединение нескольких рессор с БПП в каждом плече позволяет повысить жесткость системы и компенсировать погрешности перемещения, вызванные гистерезисом пьезокерамического материала.

Таким образом, разнообразные упругие системы с БПП позволяют создать микроманипуляторы с несколькими степенями свободы, имеющие малые габаритные размеры и высокую точность отработки задаваемых перемещений.

Список литературы

1. <http://www.narishige.co.jp/products/products.htm>.
2. Ерофеев А. А., Бойцов С. В. Пьезоэлектронные микро-двигатели, манипуляторы: Учеб. пособие. СПб.: СПбГТУ, 1992. 56 с.
3. Смирнов А. Б. Активные упругие направляющие и шарниры с биморфными пьезопреобразователями // Фундаментальные исследования в технических университетах. М-лы V Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. Изд. СПбГТУ, 2001. С. 175—177.
4. Смирнов А. Б. Пьезоэлектрические вибропитатели: Учеб. пособие. СПб.: СПбГТУ, 1995. 33 с.

ИНФОРМАЦИЯ

Информационное сообщение о 10-м Международном симпозиуме "НАНОСТРУКТУРЫ: ФИЗИКА И ТЕХНОЛОГИЯ"

Симпозиум "Наноструктуры: физика и технология" проводится ежегодно, начиная с 1993 г., под руководством лауреата Нобелевской премии акад. РАН Ж. И. Алферова. 10-й Международный симпозиум проходил с 17 по 21 июня 2002 г. в Санкт-Петербурге и на теплоходе во время экскурсии Санкт-Петербург — Кизи — Валаам — Санкт-Петербург.

Организаторами симпозиума выступили:

- Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН;
- Научно-технологический центр микроэлектроники при ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН;
- Министерство промышленности, науки и технологий Российской Федерации;
- Отделение общей физики и астрономии РАН и Санкт-Петербургский научный центр РАН.

Симпозиум проводился при финансовой поддержке Министерства промышленности, науки и технологий Российской Федерации, Российского фонда фундаментальных исследований, а также ряда зарубежных организаций, в частности, Германии и Великобритании.

Всего на симпозиуме было представлено более 160 докладов из более чем 20 стран мира: России, США, Германии, Франции, Японии, Великобритании, Канады и др. По сравнению с 9-м Между-

народным симпозиумом тематика докладов существенно не изменилась, однако в 2002 г. не были выделены в отдельные направления доклады, в которых обсуждались общие свойства низкоразмерных структур и упорядоченные массивы наночастиц. В итоге в рамках научной программы симпозиума обсуждались доклады по следующим направлениям:

- технология наноструктур;
- наноструктуры на основе кремния;
- инфракрасные явления в наноструктурах;
- широкозонные наноструктуры;
- микрорезонаторы и фотонные кристаллы;
- характеристика наноструктур и новые методы сканирующей зондовой микроскопии;
- квантовые ямы и сверхрешетки;
- квантовые проволоки и квантовые точки;
- туннельные явления;
- спиновые явления в наноструктурах;
- квантовые компьютеры;
- приборы на основе наноструктур;
- транспортные явления в наноструктурах;
- лазеры и оптоэлектронные устройства;
- экситоны в наноструктурах;
- двумерный электронный газ.

Представленные на симпозиуме доклады позволяют в определенной степени оценить современ-