

Большое значение имеет климатическое исполнение приборов. Если обеспечить верхнюю границу диапазона рабочих температур измерительных приборов на уровне максимальной температуры окружающего воздуха, то можно отказаться от применения системы кондиционирования станции. В отключенном состоянии приборы должны выдерживать условия хранения, соответствующие граничным климатическим параметрам окружающего воздуха.

При реализации вышеизложенных положений появляется возможность вообще отказаться от системы жизнеобеспечения газоаналитического измерительного комплекса. Все необходимые для этого функции могут выполняться им самим. Резко снижаются габариты, масса, энергопотребление. Автоматическая стационарная станция становится малогабаритным измерительным прибором, который можно размещать непосредственно «на столбе». Стоимость малогабаритной АСКЗА приближается к стоимости стационарного многокомпонентного прибора для измерения микроконцентраций вредных веществ. Это позволит существенно расширить сеть постов непрерывного атмосферного мониторинга и получать более достоверную информацию о концентрациях и ме-

сте локализации вредных веществ в воздухе населенных пунктов.

На основе АСКЗА как первичного датчика возможно создание информационно-измерительных систем (ИИС) различного уровня — начиная от локальных систем крупных промышленных предприятий, ИИС городов и населенных пунктов и до ИИС экологического мониторинга регионов и страны в целом.

В настоящее время разворачивается ИИС экологического мониторинга в г. Киеве. После завершения работ по определению представительных точек в городе планируется развернуть сеть из шестнадцати станций АСКЗА, информация от которых будет поступать в Управление экологии и природных ресурсов города.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кашин А. В., Сидоров В. А., Ильин А. И., Катин С. В. Информационная система для контроля за загрязнением воздуха // Газовая промышленность. — 1999. — № 12. — С. 66 — 67.
2. Автоматические измерительные сети для охраны окружающей среды / Проспект ф. DORNIER, Германия.
3. Mobile Air Pollution Monitoring Laboratory / Проспект ф. HORIBA, Япония.
4. Система контроля загрязнения атмосферного воздуха SYSTEM 7000 / Проспект. ф. LEAR SIEGLER, США.

*Д. ф.-м. н. В. А. ДРОЗДОВ, к. ф.-м. н. М. А. ДРОЗДОВ,
к. ф.-м. н. В. В. КОВАЛЬЧУК*

Украина, Одесский институт Сухопутных войск, Южноукраинский гос. педагогический университет им. К. Д. Ушинского, г. Одесса
E-mail: wladi@tekom.odessa.ua

Дата поступления в редакцию
01.11 2002 г.

Оппонент *д. ф.-м. н. В. В. ГОЛОВАНОВ*
(Южноукр. пед. ун-т им. К. Д. Ушинского,
г. Одесса)

НАНОМЕТРОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВЕРСИИ

Рассмотрены основные подходы и закономерности формирования и управления системой нанометровых атомарных кластеров как основной составляющей наноприборов.

Анализ тенденции развития современной физики нанометрового дипазона приводит к закономерному вопросу о возможности создания электронного прибора (ЭП) с геометрическими размерами в несколько атомов либо отдельной квазимолекулы. Кроме того, некоторые технологические процессы, например электронно-лучевая литография, позволяют создавать полупроводниковые наноструктуры размером менее 10 нм, т. е. уже сегодня появляются новые приборы, где «эксплуатируются» квантовые свойства электронов [1—5].

Весьма перспективна идея создания электронного прибора, где бы использовался одноэлектронный транспорт носителей заряда. При ее практической реализации возникает несколько основных проблем, решение которых, возможно, и определит успех. Прежде всего, это:

а) возможность управления свойствами наноструктур путем вариации геометрии и структурного состава нанометрового ЭП;

б) разрешение механических задач в нм-области (т. е. возможность создания мезомеханики);

в) развитие технологических методов производства нанометрового ЭП [3—5].

В настоящей статье проанализированы возможности создания и функционирования электронного прибора, размеры которого лежат в нм-области.

Технологические ограничения, которые свойственны сегодняшним реалиям при переходе к атомному масштабу, вынуждают исследователей скрупулезнее и как можно точнее проводить изучение наноструктур [1, 2, 6—8]. В нм-приборах квантовые свойства электронов и атомов играют решающую роль, а волновая природа электронов определяет характер движения носителей через канал. Если ширина канала соизмерима с длиной волны электронов, то локализация электронов зависит от атомной структуры материала, его морфологии, что, собственно, и определяет доминирующее значение геометрии нм-прибора.

Недавний успех, достигнутый специалистами компании Lucent Technologies в исследовательском центре Bell Laboratories, выводит процесс миниатюризации электронной техники на грань физических возможностей материального мира. С помощью метода т. н. «химической автосборки» ученые покрыли пару крошечных золотых электродов слоем вещества на углеродной основе толщиной в одну-единственную молекулу. Расстояние между электродами составляло 1—2 нм, т. е. было примерно в 20 раз меньше достигнутого ранее предела. Особо важным является и то, что устройство снабжено и третьим электродом, позволяющим ему работать в качестве усилителя или переключателя. Успех американских ученых подтвердил принципиальную возможность создания нанотранзисторов. Вместе с тем сами специалисты предупреждают, что потребуются еще с десяток лет, чтобы такие устройства пришли на смену нынешним кремниевым транзисторам в электронных микропроцессорах [2].

В отличие от полевых транзисторов, в нанотранзисторах туннельный эффект наблюдается в том случае, когда два металлических электрода разделены геометрическим барьером в единицы нанометров, т. е. барьером в десятки атомов. В такой ситуации электроны, обладающие энергией Ферми, способны туннелировать через диэлектрический слой. Электрические свойства туннельного перехода зависят от прозрачности этого слоя для электронных волн. В наноприборах используется тот факт, что если переход обладает достаточно большим сопротивлением, то передача «информации» через барьер квантуется.

Процесс квантования можно проиллюстрировать на примере модели (рис. 1), которую целесообразно назвать одноэлектронным гетерослоем.

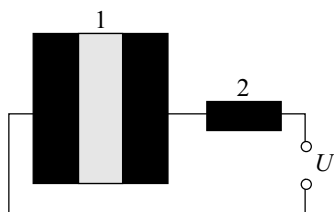


Рис. 1. Модель одноэлектронного гетерослоя

Если источник напряжения заряжает конденсатор 1 через обычный резистор 2, то потенциальная нагрузка на конденсаторе строго пропорциональна напряжению и не проявляет никаких признаков квантования. Но если одна из сторон перехода формирует «островок», окруженный изоляционными материалами, то в случае замены диэлектрика в конденсаторе туннельным переходом (на рис. 1 это промежуток между пластинами конденсатора) передача нагрузки на этот «островок» будет проходить дискретно (квантовано), что приводит к увеличению напряжения (возникновению т. н. «кулоновской лестницы»). Такой эффект наблюдался экспериментально [5, с. 160—161].

В одноэлектронном гетерослое потенциальная нагрузка на переходе управляется прикладываемым напряжением. При увеличении температуры или проводимости барьер увеличивается, «ступеньки» уменьшаются и, в конечном счете, сливаются в прямую линию, типичную для обычного резистора.

Эффект «кулоновской лестницы» проявляется при определенных условиях. Во-первых, энергия электронов из-за тепловых колебаний должна быть значительно меньше, чем кулоновская энергия, которая необходима для перемещения отдельного электрона на «островок», когда приложенное напряжение равно нулю.

Эта энергия равна $e^2/2C$, где e — заряд электрона, C — полная емкость конденсатора («ворот») и туннельных переходов. Во-вторых, сам туннельный эффект должен быть достаточно слабым, чтобы предотвратить нарастание концентрации туннелирующих электронов на электродах перехода, поскольку возможно возникновение химического разделения зарядов в диэлектрике. Согласно теоретическим оценкам [9], это означает, что проводимость туннельного перехода должна быть гораздо меньше, чем квант проводимости ($2e^2/h$, где h — постоянная Планка). Когда выполняются оба эти условия, процессы, происходящие в системе, аналогичны проявлению кратности заряда на масляных каплях, которое наблюдал Роберт Милликен [10].

Рассмотрим подробнее принцип работы наноприбора, в котором использован одноэлектронный транспорт. В конструкции прибора предусматриваются два изолированных перехода — для входа и выхода отдельных носителей тока, например, электронов (рис. 2). Такой прибор можно рассматривать как полевой транзистор, в котором канал заменен двумя туннельными переходами 1, формирующими металлический «островок»* 2. Напряжение, прикладываемое к электроду перехода, варьирует плотность энергии, необходимую для изменения концентрации носителей на «островке».

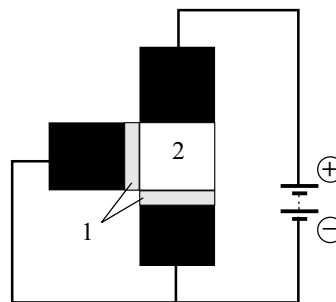


Рис. 2. Модель наноприбора с одноэлектронным транспортом

Из физических соображений понятно, что одноэлектронные транзисторы могут быть двух типов — «металлические» и «полупроводниковые», в зависимости от принципа пространственного разделения туннельных барьеров. Первоначальным вариантом одноэлектронного транзистора была «металлическая» модель, предложенная Фултоном и Доланом [12]. Эти исследователи использовали тонкую алюминиевую фольгу, служащую также материалом для изготовления электродов. Через теньевую маску металл испарялся для формирования эмиттера, базы и коллектора. Туннельные переходы формировались за счет естественного окисления металла. Второй слой металла, измененный по отношению к первому путем вращения образца, испарялся таким образом, чтобы сформировать «островок».

В полупроводниковой модели нм-прибора эмиттер, база и коллектор могут быть созданы за счет уменьшения области локализации двумерного электронного газа, возникающего в интерфейсе между двумя слоями полупроводника, например, типа AlGaAs и GaAs [2]. В этом случае область проводимости определяется металлическими электродами, созданными над слоем полупроводника. Отрицательный потенциал, прикладываемый к этим электродам, уменьшает концентрацию электронного газа вблизи

* Собственно «островковые» структуры исследовались различными авторами, см., например, [11].

них. Такие области с малой концентрацией электронов могут быть достаточно узкими, что способствует туннелированию носителей между источником, электродом («островком») и стоком. Другими словами, электрод, который формирует «островок», может использоваться как электрод перехода. В такой модели «островок» можно рассматривать как квантовую точку, поскольку электроны здесь «блокированы» во всех трех направлениях. Примером квантовой точки могут быть атомарные кластерные системы, наноструктуры [6].

За последние несколько лет исследователи из Технологического университета Дельфи (Нидерланды) и Токийского института твердого тела (Япония) показали, что квантовые точки ведут себя подобно искусственным квазимолекулам [13,14].

Наиболее перспективным представляется изучение процессов в нанотрубках, нанопроволоках и сфероподобных кластерах [4], где проявляется кулоновская блокада единственного носителя тока на моноатомном «островке».

Для решения задач, связанных с исследованием атомной, электронной и фононной структур кластерных систем, зачастую используют схему молекулярно-динамического моделирования [8, 9]. Такой модельный подход позволяет проследить не только за структурными перестройками кластеров, но также проанализировать их электрофизические характеристики.

В качестве примера использования кластеров в наноприборах рассмотрим следующую систему: металлический кластер (для определенности имеющий сферическую форму радиусом R), который помещен в диэлектрическую матрицу с проницаемостью ϵ . Очевидно, что потенциал такого кластера $U=q/C$, где q — электрический заряд, $C=\epsilon R$ — емкость кластера. Для кластера размером в несколько нанометров $C \approx 10^{-18}$ Ф. Поэтому один электрон, помещенный в такой кластер, создает потенциал, соответствующий величине 0,1 В. Такое значение потенциала вполне достаточно для кулоновской блокады транспорта других электронов, что открывает совершенно невероятные иные возможности для создания нового класса электронных приборов, т. н. одноэлектронных приборов. Уже разработано несколько типов таких приборов: полевые транзисторы, управляемые одиночным электроном на затворе, одноэлектронный аналог биполярного транзистора, «одноэлектронный насос» и др. Принципиальная схема одноэлектронного элемента памяти изображена на **рис. 3**.

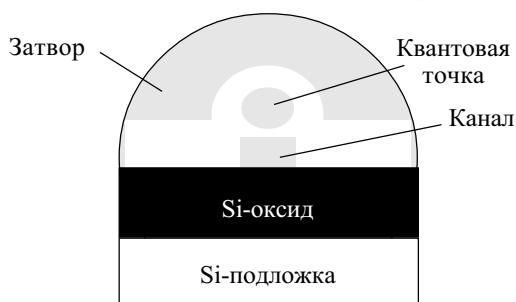


Рис. 3. Структурная схема устройства памяти с наноразмерным кластером в качестве плавающего затвора на основе одноэлектронного транспорта

В настоящее время практическая реализация таких структур, как правило, основана на использовании прецизионной литографии тонких металлических пленок или полупроводниковых слоев с двухмерным газом. Пространственное разрешение, характерное для этого подхода, как правило, не позволяет создать объекты достаточно малого размера, что ограничивает рабочую температуру таких устройств на уровне температуры жидкого гелия и ниже. Следует, однако, отметить значительный прогресс этой технологии, который достигнут в последнее время. Так, в [2—5] сообщается о создании одноэлектронной памяти, работающей при комнатной температуре, на основе полевого транзистора с очень узким каналом и плавающим затвором нанометрового размера. Информация об исследовании атомарных кластеров, представленная в обзоре [6], также позволяет надеяться на скорую технологическую реализацию проекта получения кластеров размером в единицы нанометров, что является чрезвычайно перспективным для создания одноэлектронных приборов, работающих при комнатных температурах.

Заметим, что хотя кластеры в полупроводниках начали привлекать пристальное внимание исследователей относительно недавно (последние 25 лет), в технологии кластероформирования уже имеется значительный прогресс. В ряде практически важных случаев удается контролировать химический состав, размер, концентрацию и пространственное расположение кластеров в полупроводнике. Прогресс в технологии получения кластеров позволяет уже сегодня использовать их в приборах полупроводниковой электроники.

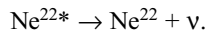
Весьма перспективны исследования состояний позитрония (Ps) в твердотельных матрицах и, в частности, в высокодисперсных материалах, содержащих квантовую точку с развитой внутренней поверхностью. Образовавшиеся в объеме вещества атомы Ps могут диффундировать в полости-поры и накапливаться там в больших количествах.

Одноквантовая аннигиляция свободной пары (e^+e^-) невозможна в силу законов сохранения энергии и импульса. Число квантов, в зависимости от ориентации спинов частиц, обычно равно 2 или 3. Здесь действует специфический квантовый закон сохранения зарядовой четности, согласно которому, например, аннигиляция с излучением четного числа γ -квантов возможна лишь из синглетного состояния, когда спины частиц антипараллельны и полный спин равен нулю. В противоположность этому, из триплетного состояния, в котором спины частиц параллельны и полный спин атома равен единице, возможна аннигиляция лишь в нечетное число квантов. Регистрация даже единичных γ -квантов труда не составляет, и это позволяет фактически проследить за возникновением единичных атомов Ps.

В обычных условиях эксперимента концентрация Ps в веществе не превышает одного атома на кубический сантиметр.

Приемы «слежки» за Ps разнообразны и по возможностям дополняют друг друга. В лабораторных условиях источником позитронов обычно служит ка-

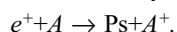
кой-либо β^+ -активный элемент, чаще всего искусственный изотоп меди Si^{64} или натрия Na^{22} . Особенно удобен натрий. Его распад, сопровождающийся испусканием нейтрино (ν), приводит к образованию возбужденного ядра неона Ne^{22*} , которое быстро, почти мгновенно, спустя менее чем 10^{-11} с, испускает гамма-квант с энергией 1,28 МэВ и переходит в основное состояние:



Регистрация γ -кванта такой энергии — это одновременно и регистрация момента рождения позитрона, вся жизнь которого до акта аннигиляции оказывается в поле зрения экспериментатора. В момент рождения позитрон имеет скорость, соизмеримую со скоростью света. Но попадая в вещество, он быстро тормозится, расходуя большую часть первоначальной энергии на ионизацию среды. Теория ионизационных потерь очень надежна и позволяет с хорошей точностью рассчитать время, необходимое для торможения [15].

Определяя вероятность трехчастичной γ -аннигиляции, измеряя время жизни позитрона и угловую корреляцию, т. е. пространственное распределение аннигилирующих квантов, удастся довольно точно восстановить последовательность и характер взаимодействий позитрона и Ps с атомами вещества, что представляет исключительно большой интерес и для теоретической химии, и для ряда важных практических приложений.

В газах релятивистский позитрон тормозится до скоростей валентных электронов атомов среды ($\sim 10^7$ см/с) за 10^{-9} с. В жидкостях это время почти в 1000 раз меньше. Позитрон, имея скорость, близкую к скорости валентных электронов, способен подхватить какой-нибудь из них, образовав атом Ps:



Сразу же после образования новый атом Ps еще очень «горяч», его энергии (порядка 10 эВ) соответствует температура $\sim 130000^\circ\text{C}$. Но после нескольких соударений с атомами среды он «остывает», его энергия становится примерно равной энергии атомов окружения ($\sim 0,1$ эВ).

Естественное время жизни Ps, т. е. время жизни в вакууме, зависит от его полного спина. Трехквантовая аннигиляция менее вероятна, чем двухквантовая. Поэтому время жизни триплетного Ps в вакууме примерно в 1000 раз больше, чем синглетного, который аннигилирует спустя $1,25 \cdot 10^{-10}$ с после образования. В веществе время жизни триплетного Ps значительно меньше, чем в вакууме. Причина — различные гасящие процессы взаимодействия Ps с атомами среды. Возможна, например, аннигиляция позитрона триплетного Ps не на своем электроне (она заторможена законом сохранения зарядовой четности), а на «чужом» электроне атома среды. Поскольку спин электрона среды может иметь ориентацию, противоположную спину электрона Ps, этот процесс сопровождается излучением двух γ -квантов.

Кроме того, возможен и прямой обмен двух электронов с противоположными спинами, переводящий

орто-Ps в пара-Ps, который быстро аннигилирует (это т. н. орто-пара-конверсия). Конверсионное тушение особенно эффективно при наличии парамагнитных центров, имеющих неспаренные и потому легко обмениваемые электроны. Даже в ничтожных концентрациях (до 0,001%) такие примеси могут заметно изменять эффективное время жизни Ps в среде. На этом принципе основан очень интересный метод конверсионного детектирования свободных радикалов, которые играют важнейшую роль в кинетике многих практически важных химических процессов.

Создание новых систем требует определенной инженерно-исследовательской сноровки, поскольку нужно проявить интуицию, чтобы расположить атомы в квазимолекуле по заранее обдуманной схеме и тем самым получить новые свойства. Некоторые из получаемых при этом кластеров проявляют необыкновенные свойства.

Учитывая опыт, накопленный химиками в исследовании полиэдрических систем, имеющих внутри «закапсулированные» атомы другого сорта и получивших название — «клатраты» (clathrate), можно выдвинуть модель нанометрового электронного прибора, «построенного» на кластерной основе. Внутри полиэдрической кластерной конфигурации (молекулярно динамическое изучение полиэдрических

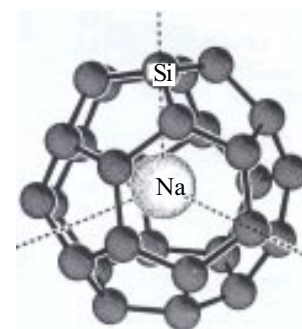


Рис. 4. Локализация атома натрия в центре полиэдрического кластера кремния, обладающего симметрией T_d

структур на основе Si проводилось авторами [6, 8, 16]) возможна локализация атомов натрия, как это показано на рис. 4. Локализация атома натрия внутри кремниевого полиэдра вызывает перераспределение электронной плотности системы. Иллюстрацией этого служат контурные карты электронной плотности (рис. 5), рассчитанные в рамках метода функционала электронной плотности [14, 17]. Само по себе образование полиэдрической

структуры приводит к увеличению удельного объема кластера (по сравнению с алмазоподобной структурой). Такое «распухание» становится причиной увеличения ширины запрещенной зоны ΔE_g из-

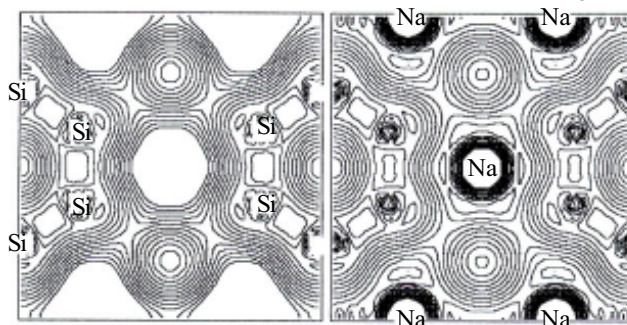


Рис. 5. Распределение электронной плотности в полиэдрических кластерах кремния (46 атомов), не содержащих (слева) и содержащих атом натрия

за изменения углов между химическими связями в кластере (для 46-атомного кремниевого полиэдра расширение зоны составляет 0,65 эВ, т. е. $\Delta E_g \approx 1,75$ эВ).

Работа с полупроводниковыми клатратами – это, по сути дела, альтернативная методика, которая может быть использована инженерами для изменения значения ширины запрещенной зоны и связанных с ней электрофизических параметров за счет изменения геометрии структуры без нагнетания кислорода в материал.

В настоящее время исследователи пытаются создать новые кластерные системы, заставляя реагировать между собой те, которые уже существуют (заметим, что полиэдр из 46 атомов кремния представляет собой систему соединенных полиэдров меньшего размера: 20- и 26-атомного кластеров, описанных в [8, 16–18]).

Таким образом, рассмотрены основные подходы и закономерности формирования и управления системой нанометровых атомарных кластеров как основной составляющей наноприборов. Это позволяет рассчитывать на то, что уже в недалеком будущем станет возможным создание эффективных светоизлучательных приборов на основе кластерного кремния и реализацию одноэлектронных приборов, работающих при комнатной температуре.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Хайрутдинов Р. Ф. Химия полупроводниковых наночастиц // Успехи химии.— 1998.— Т. 67.— С. 125—139.
2. Мильвидский М. Г., Чалдышев В. В. Наноразмерные атомные кластеры в полупроводниках — новый подход к формированию свойств материалов // ФТП.— 1998.— Т. 32, № 5.— С. 513—522.
3. Devoret M. H., Esteve D., Urbina C. Single-electron transfer in metallic nanostructures // Nature.— 1992.— Vol. 360.— P. 547—553.

4. Shirakashi J. Single-electron charging effects in Nb/Nb oxide-based single-electron transistors at room temperature // Appl. Phys. Lett.— 1998.— Vol. 72.— P. 1893—1899.

5. Sohn L. L., Kouwenhoven L. P., Schoen G. Mesoscopic electron transport.— Dordrecht: Kluwer (Nato series), 1997.

6. Ковальчук В. В. Ультрадисперсные субфазы в молекулярной электронике // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2002.— № 3.— С. 6—14.

7. Tanaka K. Nanotechnology towards the 21st century // Thin Sol. Films.— 1999.— Vol. 341.— P. 120—125.

8. Ковальчук В. В. Теоретичне обґрунтування штучного синтезування кластерних сполук на основі кремнію // Фізика конденсованих високомолекулярних систем.— 2002.— № 9.— С. 27—31.

9. Халдеев Г. В., Петров С. Н. Компьютерное моделирование электрохимических процессов на межфазной границе // Успехи химии.— 1998.— № 2.— С. 107—124.

10. Храмов Ю. А. Биография физики. Хронологический справочник.— К.: Техника, 1982.— С. 160—161.

11. Трусов Л. И., Холмянский В. А. Островковые металлические пленки.— М.: Металлургия, 1973.

12. Zhuang L., Guo L., Chou S. Y. Silicon single-electron quantum-dot transistor switch operating at room temperature // Appl. Phys. Lett.— 1998.— Vol. 72.— P. 1205—1211.

13. Saito S., Oshiyama A. Electronic structure of Si_{46} and $Na_2Ba_6Si_{46}$ // Phys. Rev. B.— 1995.— Vol. 51.— P. 2628—2631.

14. Moriguchi K., Yonemura M., Shintani A., Yamanaka S. Electronic structures of Na_8Si_{46} and Ba_8Si_{46} // Ibid.— 2000.— Vol. 61.— P. 9859—9862.

15. Luschnik A., Feldbach E., Kink R., Luschnik Ch. Secondary excitons in alkali halide crystals // Ibid.— Vol. 53.— P. 5379—5387.

16. Дроздов В. А., Ковальчук В. В. Теоретичний аналіз структурних та оптичних характеристик ультрадисперсних фаз кремнію // Фотоелектроніка.— 2002.— № 11.— С. 34—39.

17. Kovalchuk V. V. Real nanodimensional silicon particles: cluster approximation // Photoelectronics.— 2001.— N 10.— P. 12—17.

18. Nagase S. Polyhedral compounds of the heavier group-14 elements – silicon, germanium, tin, and lead // Account of Chem. Research.— 1995.— Vol. 28 (11)— P. 469—476.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИЙ. СИМПОЗИУМЫ

«МИКРОЭЛЕКТРОНИКА И ИНФОРМАТИКА—2003»

*10-я Всероссийская
межвузовская научно-техническая
конференция студентов и аспирантов
23—24 апреля 2003 г.
Россия Москва*

Ученый секретарь Фролова

Галина Владимировна.

Ответственный секретарь Харач

Валентина Павловна.

Почтовый адрес Оргкомитета:

124498, Москва, К-498, Московский
государственный институт электронной техники
(МИЭТ), ОНТИ, на конференцию "МЭИ-2003".

Научные направления работы конференции

- Физика и технология микро- и нанoeлектроники.
- Материалы и компоненты электронной техники.
- Проектирование электронных компонентов и систем.
- Микросистемы и микромеханика.
- Биомедицинская электроника.
- Опто- и акустоэлектроника.
- Математические модели и алгоритмы в информатике.
- Управляющие и вычислительные системы и приборы.
- Автоматизированные информационные системы.
- Телекоммуникационные системы и связь.
- Технологическое оборудование микроэлектроники.
- Экологические аспекты микро- и нанoeлектроники.
- Менеджмент и маркетинг наукоемких производств.
- Гуманитарные проблемы информатизации.