

НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

№ 4 ◆ 2005

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Издаётся с 1999 г.

Главный редактор
Мальцев П. П.

Зам. гл. редактора
Лучинин В. В.

Редакционный совет:
Аристов В. В.
Асеев А. Л.
Васильев В. В.
Гапонов С. В.
Каляев И. А.
Климов Д. М.
Ковалчук М. В.
Лифшиц В. Г.
Мокеров В. Г.
Никитов С. А.
Чаплыгин Ю. А.
Шевченко В. Я.

Редакционная коллегия:
Антонов Б. И.
Астахов М. В.
Белоус А. И.
Быков В. А.
Васильев А. А.
Волчихин В. И.
Горнек Е. С.
Градецкий В. Г.
Гурович Б. А.
Журавлев П. В.
Захаревич В. Г.
Кальнов В. А.
Карякин А. А.
Квардаков В. В.
Кузин А. Ю.
Мокров Е. А.
Норенков И. П.
Панич А. Е.
Панфилов Ю. В.
Петросянц К. О.
Петручин В. Ф.
Путилов А. В.
Пятышев Е. Н.
Сауров А. Н.
Сигов А. С.
Степанов Ю. И.
Сухопаров А. И.
Телец В. А.

Отв. секретарь
Лысенко А. В.

Редакция:
Безменова М. Ю.
Григорин-Рябова Е. В.
Учредитель:
Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Кульчицкий Н. А., Кульчицкий А. Н.,
Мельников А. А. Пороговые характеристики детекторов на основе GeSi/Si
гетероструктур с внутренней фотоэмиссией в спектральном диапазоне
8...12 мкм 2

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

Рынков Д. О., Чечка В. В., Щука А. А. Одноэлектронные приборы 8
Кондратьев А. С., Митренин В. Б., Сенчик К. Ю., Васильев Н. Ф.,
Юхнев А. Д. Насос для мехатронных перфузионных медицинских систем . 24

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

Альтшуллер Г. М., Вакс В. Л., Гайкович К. П. СВЧ зондирование динамики
глубинной температуры при нагреве и охлаждении живых тканей. 28

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

Бурдаков С. Ф., Кириченко В. В., Коротынский А. В., Смольников Б. А.,
Чистяков В. М. Классификация зарубежных мини- и микроборботехнических
систем военного назначения на основе структурно-функционального
подхода 37

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ 42

ОБСУЖДАЕМ ПРОЕКТЫ

Спасский С. В. Вентильный двигатель 46

СТРАНИЧКА РФФИ

Цыганов С. А., Тихонов И. П. К вопросу использования результатов
фундаментальных исследований — взгляд из РФФИ 48

ИНФОРМАЦИЯ 53

Contents 56

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

Аннотации статей журнала на русском и английском языках и требования к оформлению
статей доступны на сайте журнала: <http://www.microsystems.ru>.

ПОДПИСКА:

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

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МНСТ

УДК 621.315

А. В. Войцеховский, д-р физ.-мат. наук, проф.,
С. Н. Несмолов, канд. физ.-мат. наук,
Сибирский физико-технический институт,
г. Томск, vav@elefot.tsu.ru
Н. А. Кульчицкий, д-р техн. наук,
А. Н. Кульчицкий, А. А. Мельников, канд. техн. наук,
Московский государственный институт
радиотехники, электроники и автоматики,
kna@comail.ru

ПОРОГОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ GeSi/Si ГЕТЕРОСТРУКТУР С ВНУТРЕННЕЙ ФОТОЭМИССИЕЙ В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ 8...12 мкм

Рассмотрены вопросы создания инфракрасных детекторов на эпитаксиальных гетероструктурах Ge_xSi_{1-x}/Si . Проведен расчет пороговых характеристик фотоэмиссионных детекторов в спектральном диапазоне 8...12 мкм и анализ возможностей их оптимизации путем изменения параметров.

Кремниевые детекторы с внутренней фотоэмиссией (барьеры Шоттки и гетероструктуры) перспективны для разработки матриц фокальной плоскости инфракрасного диапазона, что обусловлено высокой стабильностью и хорошей однородностью свойств матричных детекторов данного типа [1]. Традиционный материал для инфракрасных детекторов — $HgCdTe$ обладает высокими пороговыми характеристиками [2], но плохо подходит для создания крупноформатных матричных фотоприемников вследствие низкой однородности и плохой воспроизводимости свойств, высокой стоимости и сложности совмещения с кремниевой считающей электроникой в гибридной конфигурации. Фотоэмиссионные детекторы на основе кремния предоставляют преимущества использования высокоразвитой кремниевой технологии и реализации монолитных матриц, в которых матрица детекторов и схемы считывания и обработки видеосигнала выполнены на одном кремниевом кристалле [1, 3]. Детектирование с помощью фотоэмиссионных детекторов можно разделить на следующие этапы: поглощение излучения свободными носителями (обычно дырками) в металле или в сильно-

легированном полупроводнике, транспорт фотовозбужденных дырок в электроде и последующая внутренняя эмиссия через потенциальный барьер на границе раздела. Границную длину волны фотоэмиссионных детекторов определяет не ширина запрещенной зоны полупроводника как в собственных детекторах, а высота потенциального барьера на границе раздела металла (вырожденный полупроводник) — полупроводник, что позволяет использовать кремний для создания детекторов, действующих в спектральных диапазонах 3...5 и 8...12 мкм.

Самым популярным типом детекторов с внутренней фотоэмиссией в настоящее время являются детекторы на основе барьеров Шоттки $PtSi/p-Si$, которые широко применяются в спектральном диапазоне 3...5 мкм [3—5]. Крупноформатные двухмерные матрицы на основе детекторов данного типа (до 1040×1040 элементов) обладают превосходной стабильностью и однородностью свойств, но не могут использоваться для детектирования в спектральном диапазоне 8...12 мкм. В 1991 г. было предложено использовать для детектирования в инфракрасной области спектра эпитаксиальные гетероструктуры $p^+-Ge_xSi_{1-x}/p-Si$, граничной длиной которых можно управлять путем изменения соотношения компонентного состава силицида германия. Первыми детекторами, созданными на основе гетероструктур $GeSi/Si$, были детекторы на основе классического гетероперехода с внутренней фотоэмиссией (HIP — *heterojunction internal photoemission*) [6—9]. На основе силицида германия в настоящее время разрабатывается несколько новых типов инфракрасных детекторов: детекторы на основе классического гетероперехода с внутренней фотоэмиссией [6—9], детекторы на основе множественных квантовых ям [10], многоспектральные детекторы на основе многослойных структур $PtSi/Si/GeSi/Si$ и $PtSi/GeSi/Si$ [11], детекторы на основе $GeSi$ -микроболометров [12, 13].

Следует отметить, что в настоящее время достаточно подробно разработана концепция использования детекторов на основе гетеропереходов $p^+-SiGe/p-Si$ для детектирования в спектральном диапазоне 3...5 мкм [14, 15]. Известны работы, в которых предложено использовать $GeSi/Si$ -детекторы для детектирования в окне прозрачности 8...12 мкм, но эти детекторы обычно действуют при очень низких рабочих температурах (менее 50 К) [9]. В связи с этим важной современной задачей является оптимизация рабочих характеристик детекторов на основе гетероструктур $GeSi/Si$, действующих в

спектральном диапазоне 8...12 мкм [16–18]. Целью данной работы является расчет пороговых характеристик фотоэмиссионных детекторов в спектральном диапазоне 8...12 мкм и анализ возможностей их оптимизации путем изменения параметров детекторов на основе формул, полученных ранее в работе [19].

Проведем расчет пороговых характеристик тепловизионной системы с детектором на основе гетероструктуры GeSi/Si при следующих предположениях:

- пороговые характеристики ограничены шумами детектора (на практике часто необходимо учитывать шумы считывающего мультиплексора);
- коэффициент пропускания атмосферы равен единице (что возможно при малом расстоянии от объекта теплового излучения до фотоприемника);
- коэффициент пропускания входной оптической системы равен единице;
- входная оптическая система имеет фильтр, отсекающий излучение с длиной волны, меньшей, чем 8 мкм.

Пороговые характеристики НИР-детектора при этих условиях обычно ограничены дробовыми шумами темнового тока и фонового фототока. Несмотря на различия спектральных зависимостей квантовой эффективности НИР-детекторов от аналогичной характеристики барьеров Шоттки, связанной со спектральной зависимостью коэффициента поглощения в вырожденном полупроводнике, в длинноволновой области для НИР-детекторов также верна формула Фаулера. На рис. 1 приведены спектральные зависимости квантовой эффективности НИР-детектора в длинноволновой области при разных граничных длинах волн, рассчитанные по формуле Фаулера. При расчете использова-

ны значения эмиссионного коэффициента Фаулера $C_1 = 0,2 \text{ эВ}^{-1}$; $C_1 = 1 \text{ эВ}^{-1}$ и граничные длины волн $\lambda_c = 10 \text{ мкм}$, $\lambda_c = 11,12 \text{ мкм}$. По литературным данным коэффициент C_1 обычно находится в диапазоне от 0,1 до 0,4 эВ^{-1} , но может достигать 1,38 эВ^{-1} для многослойных детекторов [7]. Для типичного однослойного НИР-детектора $C_1 = 0,2 \text{ эВ}^{-1}$ [6].

Рассмотрим зависимость средней квантовой эффективности от граничной длины волны при различных значениях коэффициента квантовой эффективности и температур фона (рис. 2). Из рис. 2 следует, что средняя квантовая эффективность НИР-фотодетекторов сильно зависит от граничной длины волны и коэффициента квантовой эффективности и менее от температуры фона. Увеличение средней квантовой эффективности при росте λ_c обусловлено увеличением квантовой эффективности прежде всего в коротковолновой области диапазона 8 мкм — λ_c . На рис. 3 приведены зависимости средней квантовой эффективности от эмиссионного коэффициента Фаулера при различных граничных длинах волн.

Рабочая температура НИР-детектора является ключевым параметром, позволяющим управлять значением темнового тока. Оптимальным является режим ограничения фоном, при котором темновой ток меньше фонового фототока (режим ОФ или BLIP — ограничение пороговых характеристик дробовыми шумами фонового фототока). Температура, при которой темновой фототок равен фоновому (температура ограничения фоном), зависит от постоянной Ричардсона A^{**} , коэффициента эффективности эмиссии, апертурного угла θ , температуры фона T_Φ и граничной длины волны. Постоянная Ричардсона в зависимости от технологии из-

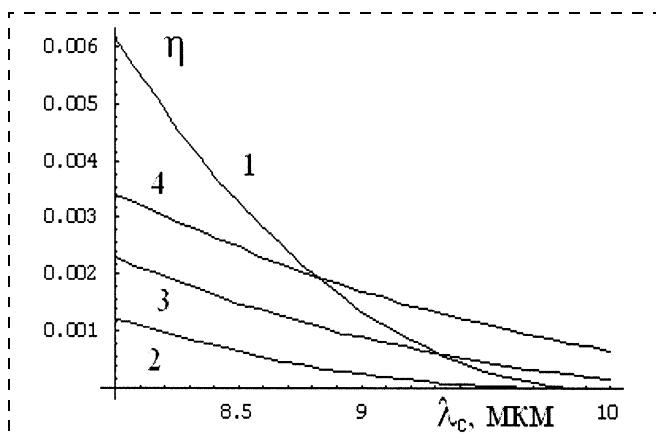


Рис. 1. Спектральные зависимости квантовой эффективности НИР-детекторов при $C_1 = 1 \text{ эВ}^{-1}$ и $\lambda_c = 10 \text{ мкм}$ (кривая 1), а также при $C_1 = 0,2 \text{ эВ}^{-1}$ и $\lambda_c = 10 \text{ мкм}$ (кривая 2); $\lambda_c = 11 \text{ мкм}$ (кривая 3), $\lambda_c = 12 \text{ мкм}$ (кривая 4)

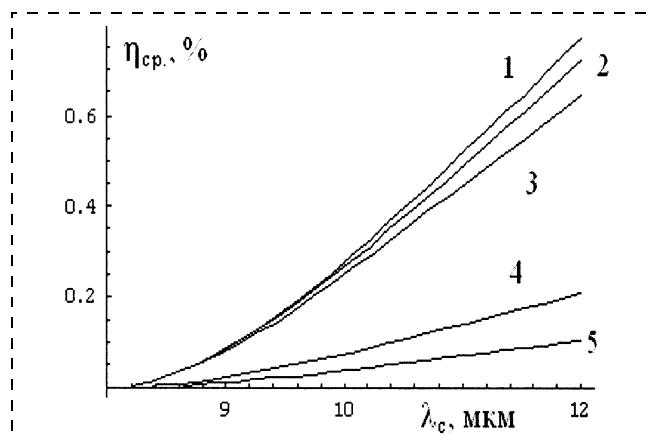


Рис. 2. Зависимость средней квантовой эффективности от граничной длины волны для $C_1 = 1,4 \text{ эВ}^{-1}$ и температур фона 350, 300, 250 К (кривые 1—3, сверху вниз), а также для температуры фона 300 К при $C_1 = 0,4 \text{ эВ}^{-1}$ (кривая 4) и $0,2 \text{ эВ}^{-1}$ (кривая 5)

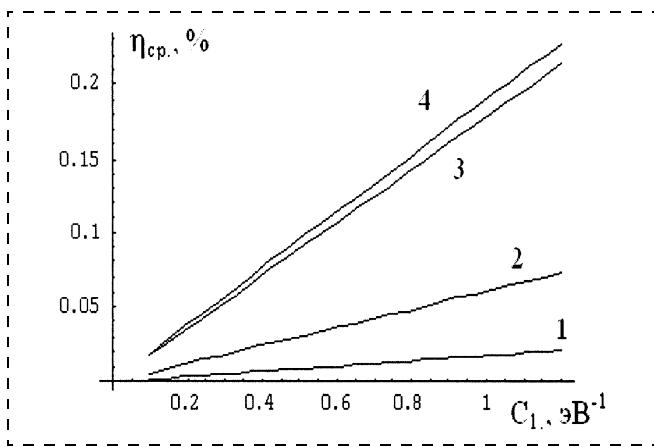


Рис. 3. Зависимость средней квантовой эффективности от коэффициента C_1 при температуре фона 300 К при граничных длинах волн 8,5; 9; 10 мкм (кривые 1–3), а также при граничной длине волны 10 мкм и температуре фона 250 К (кривая 4)

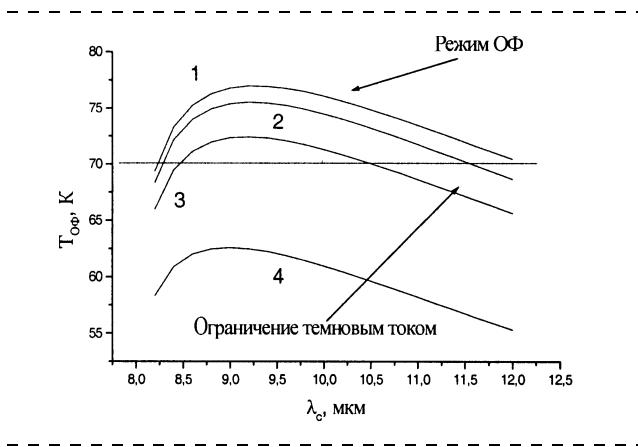


Рис. 5. Зависимость температуры ОФ от граничной длины волны при различных значениях коэффициента $K = 2$ (кривые 1, 2, 3) и $K = 84$ (кривая 4) при температуре фона 293 К (кривые 1, 3, 4), 350 К (кривая 2) при $\theta = 30^\circ$ (кривые 2–4) и полусферической апертуре (кривая 1)

готовления изменяется от 3,7 до 8,4 А/см²К² [6–9]. На рис. 4 показаны зависимости темнового тока и фонового фототока от граничной длины волны НИР-детектора.

Как следует из рис. 4, при работе в спектральном диапазоне 8...12 мкм режима ограничения фоном можно добиться только при крайне больших коэффициентах эффективности эмиссии (более 1 эВ⁻¹) или при больших апертурных углах. При типичных значениях C_1 (около 0,2 эВ⁻¹) и $F/2$ оптике режим ограничения фоном достичим лишь при температурах фотоприемника, меньших 70 К.

Рассмотрим зависимость температуры фона от граничной длины волны при различных значениях коэффициента $K = A^{**}/C_1$ и различных условиях

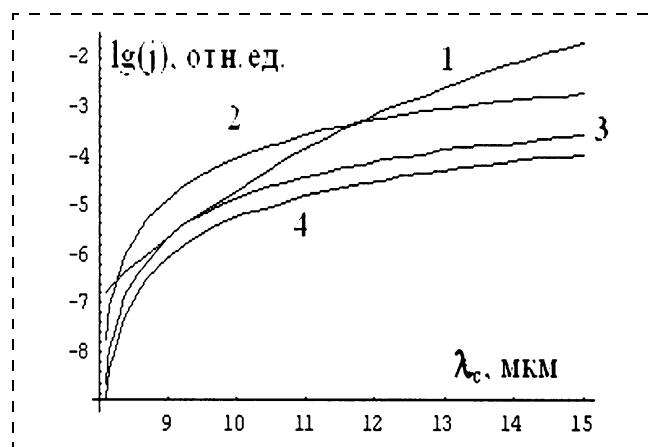


Рис. 4. Зависимость логарифмов плотности темнового тока (кривая 1) и фонового фототока (кривые 2–4) от граничной длины волны при температуре фона 293 К, температуре фотоприемника 70 К, полусферической (кривая 2) и $F/2$ -апертуре (кривая 4) ($\theta = 14^\circ$) при $C_1 = 1,4^\circ, A^{**} = 3,7 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$, а также при полусферической апертуре при $C_1 = 0,2$; $A^{**} = 3,7 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$ (кривая 3)

регистрации излучения (по литературным данным $2 < K < 84 \text{ A/эВсм}^2\text{K}^2$). При действии в спектральном диапазоне 8 мкм ... λ_c зависимость температуры ОФ от граничной длины волны имеет максимум. Спад температуры ОФ при малых длинах волн обусловлен малой квантовой эффективностью вблизи длинноволновой границы, а при больших длинах волн быстрым увеличением темнового тока при уменьшении высоты потенциального барьера.

Из рис. 5 следует, что при типичных значениях $K = 20$ режим ограничения фоном при температуре 70 К не достижим, но возможно реализовать режим ограничения фоном в НИР-детекторах, в которых $R \approx 3,19$ ($C_1 = 1,38 \text{ эВ}^{-1}, A^{**} = 4,4 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$) при больших апертурных углах. На рис. 6 приведе-

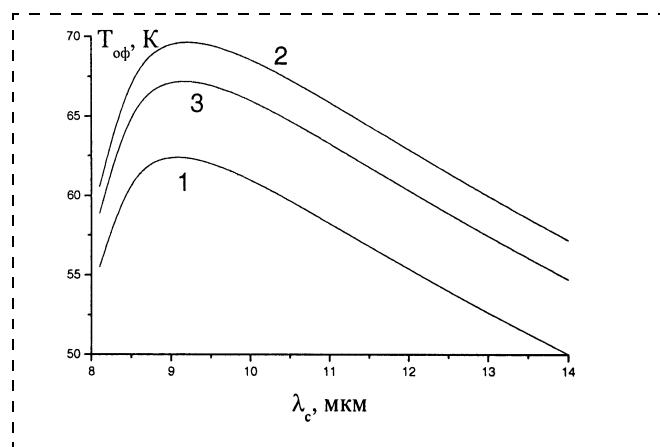


Рис. 6. Зависимость температуры ограничения фона от граничной длины волны однослоистого детектора (кривые 1, 2) и многослойного детектора (кривая 3) при $F/2$ оптике (кривые 1, 3) и полусферической апертуре (кривая 2). Кривые рассчитаны для случая регистрации излучений с длинами волн, большими 8 мкм

ны зависимости температуры ОФ для типичного однослойного и многослойного НИР-детекторов на основе GeSi при различных апертурных углах. Для повышения рабочей температуры фотоприемной системы желательно использовать детекторы с высокими значениями эмиссионного коэффициента, малыми значениями постоянной Ричардсона и граничной длиной волны, соответствующей максимуму зависимости температуры ОФ от λ_c . При увеличении апертурного угла можно добиться реализации режима ОФ при 70 К, но это приведет к ухудшению пороговых свойств НИР-детекторов.

Для характеристики фотоприемников традиционно используют спектральную обнаружительную способность. Спектральная обнаружительная способность НИР-детекторов значительно меньше обнаружительной способности для собственных детекторов на основе узкозонных материалов вследствие малой квантовой эффективности. Рассмотрим зависимости спектральной обнаружительной способности при длине волны 8 мкм от граничной длины волны для различных НИР-детекторов при температуре фона 300 К. При расчетах предполагаем, что в составе входной оптической системы имеется фильтр, пропускающий инфракрасное излучение только в спектральном диапазоне 8...12 мкм. Для расчетов использовались формулы, приведенные в работе [19].

Из рис. 7 следует, что обнаружительная способность НИР-детекторов сильно зависит от значений C_1 и A^{**} , а максимум обнаружительной способности на данной длине волны наблюдается при определенной граничной длине волны. Положение максимума и пиковое значение обнаружительной способности изменяются при изменении температуры фона и апертурного угла.

На рис. 8 показаны спектральные зависимости спектральной обнаружительной способности НИР-детектора при различных граничных длинах волн. Из рис. 8 следует, что увеличение граничной длины волны до 16 и 20 мкм приводит к увеличению обнаружительной способности при больших рабочих длинах волн из спектрального диапазона 8...12 мкм, и уменьшению ее в коротковолновой части данного спектрального диапазона.

Эти изменения определяются двумя конкурирующими процессами, происходящими при увеличении граничной длины волны: ростом квантовой эффективности (это увеличение возрастает при больших длинах волн) и увеличением темнового тока (этот процесс не зависит от рабочей длины волны).

Использование узконаправленной апертуры увеличивает обнаружительную способность, но

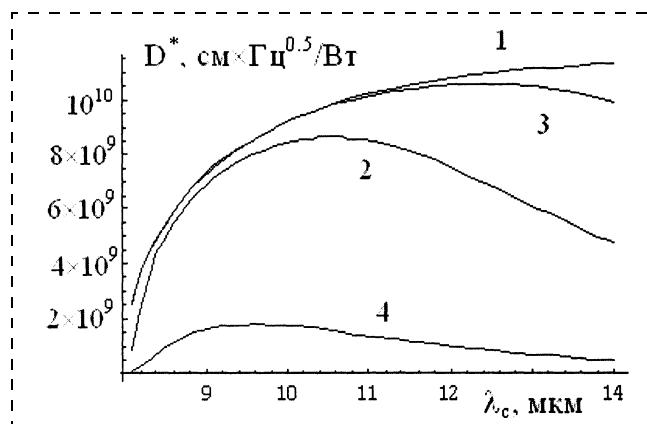


Рис. 7. Зависимости спектральной обнаружительной способности на длине волны 8 мкм от граничной длины волны при полусферической апертуре без учета темновых токов при $C_1 = 1,4 \text{ эВ}^{-1}$, $A^{**} = 3,7 \text{ А/см}^2\text{К}^2$, $T = 70 \text{ К}$, $T_\Phi = 300 \text{ К}$ (кривая 1), с учетом темнового тока при $C_1 = 1,4 \text{ эВ}^{-1}$, $A^{**} = 3,7 \text{ А/см}^2\text{К}^2$, $T = 60 \text{ К}$, $T_\Phi = 300 \text{ К}$ (кривая 2), при $C_1 = 1,4 \text{ эВ}^{-1}$, $A^{**} = 3,7 \text{ А/см}^2\text{К}^2$, $T = 70 \text{ К}$, $T_\Phi = 300 \text{ К}$ (кривая 3), при $C_1 = 0,2 \text{ эВ}^{-1}$, $A^{**} = 8,4 \text{ А/см}^2\text{К}^2$, $T = 70 \text{ К}$, $T_\Phi = 300 \text{ К}$ (кривая 4)

при этом возрастает роль темнового тока, и поэтому режима ограничения пороговых характеристик шумами фонового фототока можно добиться при более низких температурах.

Пороговые характеристики НИР-детекторов в режиме накопления могут быть улучшены путем увеличения времени накопления. Время накопления определяется, в свою очередь, емкостью потенциаль-

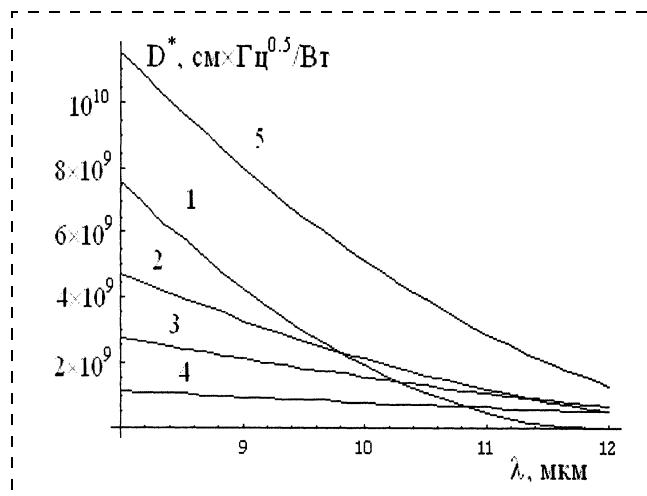


Рис. 8. Спектральные зависимости обнаружительной способности с учетом фонового фототока и темнового тока при полусферической апертуре и различных граничных длинах волн (12, 14, 16, 20 мкм — кривые 1—4, соответственно), а также без учета темновых токов при $\lambda_c = 14 \text{ мкм}$ (кривая 5) ($C_1 = 1,4 \text{ эВ}^{-1}$, $A^{**} = 3,7 \text{ А/см}^2\text{К}^2$, $T_\Phi = 300 \text{ К}$, $T = 70 \text{ К}$)

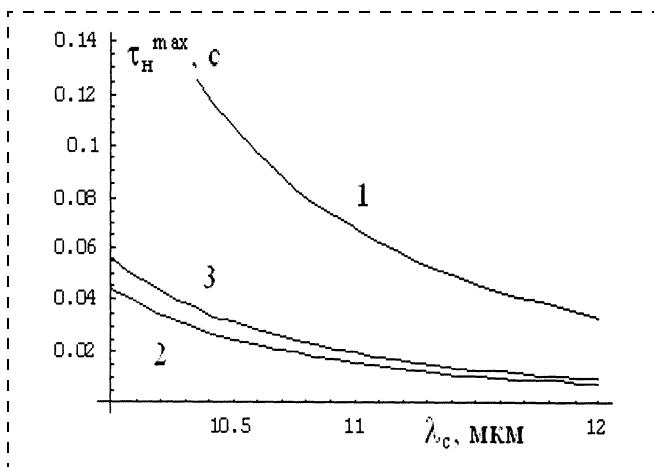


Рис. 9. Зависимость максимального времени накопления при $T_{\phi} = 300$ К, $C_1 = 0,2$ эВ $^{-1}$ при емкости потенциальной ямы 10^7 электронов, $\theta = 14^\circ$ (кривая 1) и $\theta = 30^\circ$ (кривая 2), а также при емкости ямы хранения $5 \cdot 10^7$ электронов и полусферической апертуре (кривая 3)

ной ямы N_{\max} , которая для современных кремниевых мультиплексоров составляет $(1\dots4) \cdot 10^7$ электронов. Несмотря на малые значения спектральных обнаружительных способностей GeSi-HIP-детекторы могут иметь близкие к собственным детекторам пороговые температуры, что определяется возможностью увеличивать время накопления до времени кадра, а это проблематично для собственных детекторов вследствие быстрого заполнения ямы хранения. На рис. 9 приведены зависимости максимального времени накопления от граничной длины волны при размере детектора 30 мкм, температуре фона 300 К, $F/2$ -апертуре для разных значений емкости хранения. Следует отметить, что на практике время накопления в формирователях изображения в реальном масштабе времени нежелательно увеличивать до значений, больших 0,04 с, независимо от емкости ямы хранения.

На рис. 10 приведены расчетные зависимости пороговой разности температур от граничной длины волны для однослойных и многослойных HIP-детекторов при $F/2$ -апертуре, времени накопления 10 мс, температуре фона 300 К и температуре детекторов 60 и 77 К. При оценке пороговых характеристик использовались литературные данные о параметрах типичных HIP-детекторов ($C_1 = 0,2$ эВ $^{-1}$), а также многослойных HIP-детекторов, в которых можно обеспечить значительно большие значения коэффициента эмиссии ($C_1 = 1,4$ эВ $^{-1}$). Значения постоянной Ричардсона по литературным данным обычно составляют $3,7\dots4,4$ А/см 2 К 2 . Как следует из проведенных расчетов, лучшие значения пороговой разности температур дают многослойные детек-

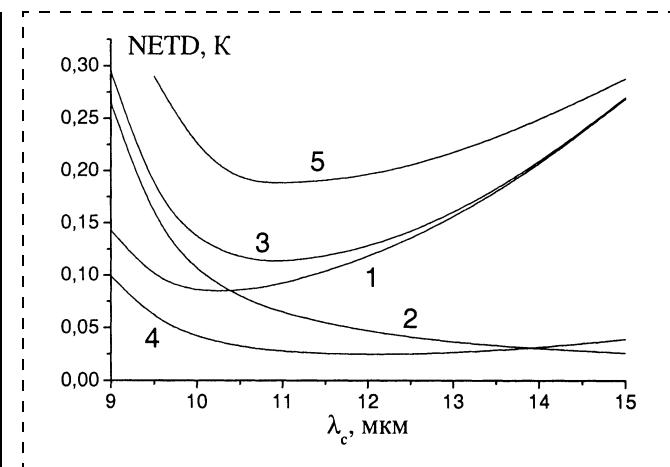


Рис. 10. Зависимости NETD ($\tau_h = 10$ мс) от граничной длины волны однослойного детектора (кривые 1–3) и многослойного детектора (кривые 4, 5) при температуре 60 К (кривые 1–4) и 77 К (кривая 5). Кривая 1 рассчитана без учета шумов фонового фототока, а кривая 2 — без учета шумов темнового тока

торы, в которых можно обеспечить сильное поглощение при оптимальной толщине слоев.

Из рис. 10 следует, что при правильном выборе режима регистрации излучения фотоэмиссионные детекторы обеспечивают значения NETD, сравнимые с аналогичным параметром собственных детекторов на основе узкозонных материалов. Ухудшение NETD при больших λ_c связано с ростом дробовых шумов темнового тока при уменьшении высоты потенциального барьера, а при малых λ_c — с низкими значениями квантовой эффективности вблизи длинноволновой границы. Уменьшения NETD можно добиться путем снижения рабочей температуры детектора. Важной задачей является выбор технологического цикла, обеспечивающего наименьшие значения A^{**} и увеличение коэффициента эмиссионной эффективности C_1 путем оптимизации конструкции и параметров детекторов. На зависимостях NETD фотоэмиссионных детекторов от граничной длины волны в спектральном диапазоне 8...12 мкм имеется минимум, положение которого зависит от температуры, параметров детектора и условий регистрации излучения. На рис. 11 приведены зависимости оптимальной λ_c (кривые 1, 2) и соответствующие значения NETD (кривые 3—7) для HIP-детекторов, действующих в спектральном диапазоне 8...12 мкм. Расчеты проведены при следующих параметрах: $\theta = 90^\circ$, $T_{\phi} = 300$ К, $A^{**} = 4,4$ А/см 2 К 2 , $S = 9 \cdot 10^{-6}$ см 2 , $F = 2$, $C_1 = 0,2$ эВ $^{-1}$ для кривых 1, 3—5 и $C_1 = 1,4$ эВ $^{-1}$ для кривых 2, 6, 7. Кривые 5 и 7 рассчитаны без учета темновых токов, для кривой 4 $\tau_h = 40$ мс, для остальных — 10 мс.

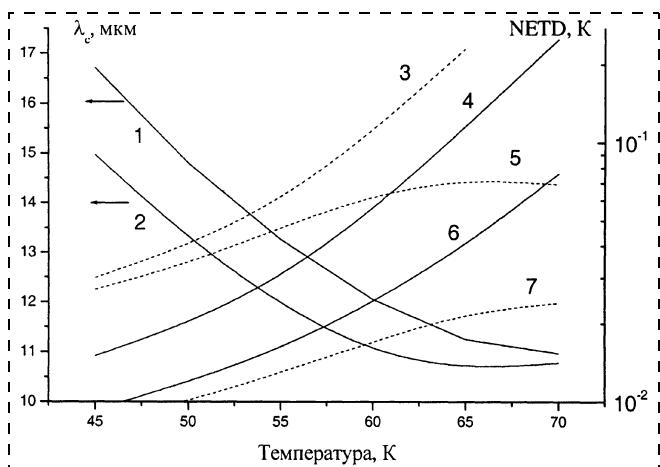


Рис. 11. Зависимости оптимальной граничной длины волны от температуры однослойного (кривая 1) и многослойного (кривая 2) HIR-детектора, а также зависимости NETD на оптимальной длине волны от температуры для однослойного (кривые 3–5) и многослойного (кривые 6, 7) детекторов. Кривые 5 и 7 рассчитаны без учета темновых токов, для кривой 4 время накопления составляет 40 мс, для остальных — 10 мс

Таким образом, рассчитаны зависимости обнаружительной способности и NETD от граничной длины волны HIR-детекторов, действующих в спектральном диапазоне 8...12 мкм. Показано, что зависимости NETD от граничной длины волны имеют минимум при граничной длине волны 10...11 мкм. Увеличение NETD при меньших граничных длинах волн обусловлено малыми значениями квантовой эффективности, а при больших граничных длинах волн — увеличением темнового тока. Показана возможность оптимизации характеристик GeSi/Si детекторов путем изменения граничной длины волны и рабочей температуры. Рассчитаны зависимости оптимальной длины волны HIR-детектора от рабочей температуры детектора при разных условиях регистрации излучения и соответствующие значения NETD. Показано, что HIR-детекторы с $C_1 = 1,4 \text{ эВ}^{-1}$ могут обеспечивать малые значения NETD (менее 0,1 К) при температуре 70 К, в однослойных детекторах ($C_1 = 0,2 \text{ эВ}^{-1}$) для достижения таких NETD необходимо охлаждение до 55...60 К.

Список литературы

1. Рогальский А. Инфракрасные детекторы: Пер. с англ. под ред. А. В. Войцеховского. Новосибирск: Наука, 2003. 636 с.
2. Овсиюк В. Н., Курышев Г. Л., Сидоров Ю. Г. и др. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона / Под ред. В. Н. Синицы. Новосибирск: Наука, 2001. 376 с.
3. Kimata M., Ueno M., Yagi H., Shiraishi T., Kawai M., Endo K., Kosasayama Y., Sone T., Ozeki T., Tsubouchi N. PtSi Schottky-barrier infrared focal plane arrays // Opto-electronics review. 1998. V. 6. № 1. P. 1–10.
4. Lin T. L., Park J. S., George T., Jones E. W., Fathauer R. W., Maserjian J. Long-wavelength PtSi infrared detectors fabricated by incorporating a p^+ doping spike grown by molecular beam epitaxy // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 62. P. 3318–3320.
5. Nesmelov S. N., Voitsekhovskii A. V., Kokhanenko A. P. Threshold characteristics of p-Si-PtSi barriers with highly-doped surface nanolayer // Proceeding of SPIE. 2003. V. 5056. P. 127–134.
6. Lin T. L., Ksendzov A., Dejewski S. M., Jones E. W., Fathauer R. W., Krabach T. N., Maserjian J. SiGe/Si heterojunction internal photoemission long-wavelength infrared detectors fabricated by molecular beam epitaxy // IEEE Transactions on electron devices. 1991. V. 38. № 5. P. 1141–1144.
7. Park J. S., Lin T. L., Jones E. W., Del Castillo H. M., George T., Gunapala S. D. Long-wavelength stacked $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ heterojunction internal photoemission infrared detectors // SPIE. 1993. 2020. P. 12–21.
8. Corbin E., Shaw M. J., Kitchin M. R., Jaros M., Konle J., Presting H. Structure and doping optimization of SiGe heterojunction internal photoemission detectors for mid-infrared application // Optical Engineering. 2001. V. 40. № 12. P. 2753–2762.
9. Wada H., Nagahima M., Hayashi K. 512 × 512 element GeSi/Si heterojunction infrared FPA // Proc. SPIE. 1999. V. 3698. P. 584–595.
10. Kruck P., Helm M., Fromherz T., Bauer G. Medium wavelength, normal — incidence, p -type Si/SiGe quantum well infrared photodetector with background limited performance up to 85 K // Applied Physics Letters. 1996. V. 69. P. 3372–3374.
11. Xiao X., Sturm J. S., Parikh S. R., Lyon S. A., Meyerhofer D., Paifrey S., Shallcross F. V. Silicide/Strained Si_{1-x}Ge Schottky-barrier infrared detectors // IEEE Electron Devices Letters. 1993. V. 14. № 4. P. 199–201.
12. Dong L. An uncooled microbolometer infrared detector based on poly-SiGe thermistor // Sensors and Actuators A. 2003. V. 105. P. 286–292.
13. Chistokhin I. B. et al. Polycrystalline layers of silicon-germanium alloy for uncooled IR bolometers // Proc. SPIE. 2003. V. 5126. P. 407–414.
14. Presting H., Konle J., Hepp M., Kibbel H., Thonke K., Sauer R., Corbin E., Jaros M. Novel mid-infrared silicon/germanium detector concepts // Optical Engineering. 2000. V. 39. № 10. P. 2624–2641.
15. Presting H. Near and mid infrared silicon/germanium based photodetection // Thin Solid Films. 1998. 321. P. 186–195.
16. Войцеховский А. В., Коханенко А. П., Несмелов С. Н. Инфракрасные детекторы на основе поверхностно-барьерных структур с внутренней фотоэмиссией // Оптика атмосферы и океана. 2003. Т. 16. № 9. С. 856–861.
17. Voitsekhovskii A. V., Kokhanenko A. P., Nesmelov S. N. Spectral detectivity and NETD of doping spike PtSi/p-Si and GeSi/Si HIR detectors // Opto-electronics review. 2003. V. 11. № 2. P. 161–168.
18. Войцеховский А. В., Коханенко А. П., Несмелов С. Н. Пороговые характеристики инфракрасных детекторов на основе гетеропереходов GeSi/Si // Известия ВУЗов. Физика. 2003. № 4. С. 26–28.
19. Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Кульчицкий Н. А., Кульчицкий А. Н., Мельников А. А. Анализ пороговых характеристик GeSi/Si детекторов на основе гетероперехода с внутренней фотоэмиссией в спектральном диапазоне 8...12 мкм // Микросистемная техника. 2005. № 3. С. 11–17.

ЭЛЕМЕНТЫ МНСТ

УДК 621.38.002.56

Д. О. Рынков, В. В. Чечя, А. А. Щука, д-р. техн. наук,
Московский институт радиотехники, электроники, автоматики (ТУ)

ОДНОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

Современный научно-технический прогресс определяется развитием электроники. Последние достижения в области электроники связываются с физикой низкоразмерных структур, технологией их изготовления и созданием приборов с принципиально новыми функциональными возможностями.

Одной из таких перспективных технологий является создание одноэлектронных устройств. Работа посвящена созданию одноэлектронных транзисторов и приборов на их основе.

Введение

Основной путь, по которому стараются идти создатели электронной техники при разработке новых моделей вычислительных устройств, — миниатюризация компонентов. Уменьшение размера приборов — не самоцель, а неизменная тенденция в микроэлектронике. Как правило, миниатюризация сопровождается ростом быстродействия, производительности и надежности, снижением расхода энергии, уществлением. Похоже, что в не таком уж далеком будущем этот процесс достигнет своего естественного предела. Советские и российские физики, проведя ряд теоретических и экспериментальных исследований, показали возможность создания нового типа вычислительных устройств. Для этих устройств информация будет представлена не в виде привычных электрических импульсов, а в виде отдельных электронов. Это направление получило название — одноэлектронника.

1. Из истории возникновения одноэлектронники

Управление поведением одиночных электронов удавалось лишь в уникальных экспериментах, требующих особой аппаратуры. В рамках исследований в об-

ласти наноэлектроники процессы управления отдельными электронами становятся нормой и на этой основе предлагается строить серийные приборы. Такой прогресс стал возможен благодаря развитию не только науки, но и технологии. В последние годы научились соединять друг с другом проводники очень малого поперечного сечения, оставляя между ними тончайший слой изолятора. Как оказалось, с помощью такой конструкции — туннельного перехода — можно управлять движением отдельных электронов.

Согласно основным принципам квантовой механики, микрочастицы (в частности электроны) могут переходить через изолятор с одного проводника на другой — "туннелировать". В отличие от обычного движения электронов в проводнике, которое зависит лишь от их коллективных свойств, при туннелировании проявляются индивидуальные характеристики каждой частицы. Электроны проходят через слой изолятора по отдельности, и это позволяет зарегистрировать перемещение с проводника на проводник даже одного из них. Ведь с точки зрения радиоэлектроники туннельный переход — это простейший конденсатор, а туннелирование элек-

тронов приводит к небольшой перезарядке такого конденсатора, и следовательно, к изменению напряжения на нем. Если площадь, и соответственно емкость перехода, достаточно малы, то перезарядка даже на один элементарный заряд приведет к заметному скачку напряжения.

Предположим, какой-то из электронов перешел сквозь изолятор незаряженного перехода. При этом на переходе сразу же появится напряжение, препятствующее движению следующих частиц, — проскочивший электрон своим зарядом отталкивает собратьев. Это явление было названо кулоновской блокадой. Вследствие блокады очередной электрон пройдет через изолятор только тогда, когда предыдущий удалится от перехода. В результате частицы станут перескакивать с проводника на проводник через определенные промежутки времени, а частота таких перескоков — одноэлектронных колебаний — будет равна значению силы тока, деленному на заряд электрона.

Теперь представим, что удалось получить систему из двух последовательно соединенных переходов — небольшой кусочек металла, тонкими слоями изолятора отделенный от подходящих к нему с двух сторон проводников. От заряда на центральном проводнике будет зависеть проницаемость обоих переходов — значит, меняя этот заряд, нетрудно управлять током через систему. На таких устройствах (одноэлектронных транзисторах) можно построить почти любую схему, аналоговую или цифровую.

Если за счет теплового движения частица приобрела достаточно большую энергию, она может прорвать кулоновскую блокаду. Поэтому для каждого одноэлектронного устройства существует своя критическая температура,

выше которой оно перестает работать. Эта температура обратно пропорциональна площади перехода: чем меньше его емкость, тем больше скачок напряжения и тем выше барьер кулоновской блокады.

Теория описанных явлений создавалась усилиями многих ученых, но решающий вклад в нее внесли московские физики Д. А. Аверин и К. К. Лихарев. Сделанные ими расчеты и предсказания необходимо было проверить на эксперименте. Первым эту проверку в январе 1987 года осуществили сотрудники физического факультета МГУ канд. физ.-мат. наук Л. С. Кузьмин и д-р физ.-мат. наук К. К. Лихарев [1–4].

Распыляя индий над свинцовой пленкой, покрытой тонким слоем оксида-изолятора, они получили множество крошечных гранул. Сверху на них вновь нанесли изолятор, а затем нанесли второй слой свинца. Поскольку при распылении возникли гранулы разного диаметра, их постигла разная участь. Мелкие и средние оказались под слоем изолятора, а самые крупные превратились в центральный проводник одноэлектронного транзистора — на них образовались пары переходов, соединяющих их со слоями свинца. Среди множества изготовленных образцов были найдены такие, в которых одноэлектронный транзистор получился лишь из одной гранулы. С ним и проводились эксперименты. Их результаты полностью совпали с ожидаемыми.

Для экспериментальной проверки принципов действия одноэлектронного транзистора физикам МГУ пришлось изготовить довольно сложную конструкцию (рис. 1). Для опыта был нужен микроскопический кусочек металла, соединенный туннельными переходами с двумя проводниками. Чтобы получить его, над

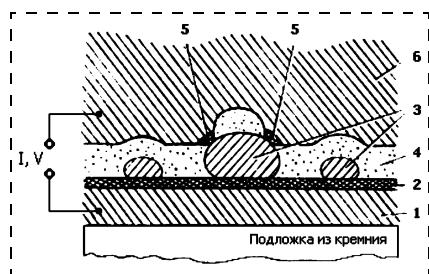


Рис. 1. "Одноэлектронная" транзисторная структура

пленкой из свинцового сплава 1, покрытой тонким слоем изолирующего оксида индия 2, распыляли индий. На образовавшиеся при этом круглые гранулы индия 3 сверху нанесли слой изолятора (оксида кремния 4) такой толщины, что он покрыл все гранулы, кроме самой крупной. Разумеется, и на этой грануле наросла шапка изолятора, но ее боковая поверхность осталась чистой. Проведя реакцию с кислородом, на этой поверхности сформировали тонкий слой изолирующего оксида 5, а затем залили всю конструкцию вторым слоем свинцового сплава 6. В результате между гранулой индия и свинцовыми проводниками возникли два туннельных перехода малой площади: первый — между основанием гранулы и нижним слоем свинца, второй — между ее боковой поверхностью и верхним слоем. В поведении такой системы было замечено влияние одноэлектронных эффектов, и это доказало возможность создания устройств, обрабатывающих информацию с помощью движения отдельных электронов.

2. Основные положения одноэлектронники

2.1. Базовая теория кулоновской блокады

Рассмотрим основные принципы одноэлектронного туннелирования. Опишем систему из одного туннельного перехода между двумя металлическими контактами. Пусть емкость такой сис-

темы — C . Тогда запасенная энергия данной системы или конденсатора составляет

$$E = Q^2/2C, \quad (2.1)$$

где Q — заряд на обкладках конденсатора. Так как заряд электрона является дискретной величиной, то минимальное значение изменения энергии ΔE составит

$$\Delta E = e^2/2C, \quad (2.2)$$

где e — элементарный заряд электрона. Для наблюдения эффектов необходимо, чтобы минимальное изменение энергии было больше температурных флуктуаций, т.е.

$$\Delta E \gg kT, \quad (2.3)$$

где k — постоянная Больцмана, а T — температура. Кроме этого необходимо, чтобы данное изменение превышало энергию квантовых флуктуаций $G = \max(G_s, G_i)$, где G_i — проводимость туннельного перехода; G_s — проводимость, шунтирующая переход:

$$\Delta E \gg hG/C. \quad (2.4)$$

Исходя из (2.4) можно записать, что

$$G \ll R_Q^{-1}, \quad (2.5)$$

где R_Q — квантовое сопротивление, $R_Q = h/4e^2 = 6,45 \text{ к}\Omega$.

Одно из важнейших предложений теории одноэлектронного туннелирования заключалось в том, что начальный заряд Q_0 на туннельном переходе может быть отличен от 0, и более того, может принимать значения, не кратные целому числу электронов. Данный факт объясняется тем, что начальный заряд может создаваться поляризацией близлежащих электродов, заряженных примесей и т. д., и таким образом иметь любое значение. Тогда заряд Q в уравнении (2.1) будет иметь вид $Q = Q_0 - e$. Из всего сказанного вытекает, что,

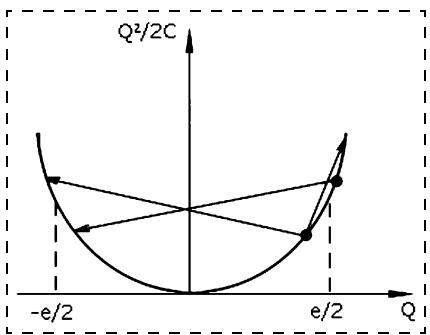


Рис. 2. Зависимость зарядовой энергии перехода от заряда. Стрелками показан результат добавления (вычитания) одного электрона

если Q лежит в пределах от $-e/2$ до $+e/2$, то добавление или вычитание целого числа электронов будет увеличивать энергию (2.1), т. е. является энергетически невыгодным. Данный вывод иллюстрируется рис. 2.

Видно, что если заряд хотя бы немножко меньше значения $e/2$, то добавление или вычитание одного электрона приводит к увеличению общей энергии. Если же заряд превышает значение $e/2$, то выгодным становится туннелирование электрона через диэлектрик. Так как напряжение на конденсаторе $V = Q/C$, то при напряжениях от $-e/2C$ до $+e/2C$ ток через туннельный переход протекать не должен. Говоря иначе, для того чтобы обеспечить туннелирование через переход, необходимо преодолеть силу кулоновского отталкивания электронов. Данный эффект отсутствия тока при приложении напряжения в указанных пределах был назван эффектом кулоновской блокады. Таким образом, кулоновская блокада — это явление отсутствия тока при приложении напряжения к туннельному переходу из-за невозможности туннелирования электронов вследствие их кулоновского отталкивания. Напряжение, которое необходимо приложить к переходу для преодоления кулоновской блокады,

$$V_{\text{к.б.}} = e/2C, \quad (2.7)$$

называют также напряжением отсечки. В дальнейшем будем придерживаться термина "напряжение кулоновской блокады" и обозначения $V_{\text{к.б.}}$.

Рассмотрим процесс протекания тока через одиночный туннельный переход. Так как ток является величиной непрерывной, то заряд на одной стороне перехода накапливается постепенно. При достижении значения $e/2$ происходит туннелирование одного электрона через переход и процесс повторяется. Это аналогично падению капель из неплотно закрытого крана: при достижении некоторой критической массы капля отрывается от крана и начинается образование следующей (такая аналогия была предложена К. К. Лихаревым). Заряд одного электрона e накапливается при токе I за время t : $e = I \cdot t$, затем электрон туннелирует через переход.

Нетрудно заметить, что процесс повторяется периодически с частотой

$$f = I/e, \quad (2.8)$$

где I — ток через переход. Такие осцилляции были названы одноэлектронными туннельными (*single electron tunneling-SET*) осцилляциями. Следует еще раз отметить, что наблюдение кулоновской блокады возможно лишь при выполнении условий (2.3) и (2.5). Даные условия, особенно температурное (2.3), накладывают довольно жесткие ограничения на конструкции одноэлектронных приборов. Из (2.2) и (2.3) можно получить значение емкости, необходимое для наблюдения кулоновской блокады при данной температуре T .

Подставив численные значения e и k , получим, что для наблюдения эффекта,

$$C \ll e^2/2kT \quad (2.9)$$

при $T = 4,2$ К необходима емкость $\ll 2 \cdot 10^{-16}$ Ф, а для $T = 77$ К

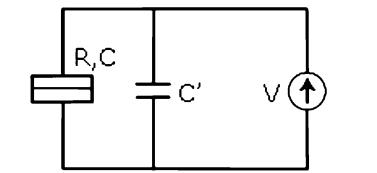


Рис. 3. Эквивалентная схема туннельного перехода

и $T = 300$ К соответственно $\ll 10^{-17}$ и $\ll 3 \cdot 10^{-18}$. Таким образом, для работы приборов при высоких температурах (выше 77 К) необходима емкость 10^{-18} — 10^{-19} Ф или 0,1—1 аФ.

На рис. 3. показана эквивалентная схема рассмотренной системы. Прямоугольником обозначен туннельный переход. Данное графическое обозначение для кулоновского туннельного перехода является общепринятым. Переход характеризуется сопротивлением R и емкостью C , C' — емкость подводящих контактов. К переходу приложено напряжение V . Из приведенной схемы видно, что если паразитная емкость C' больше емкости перехода, емкость системы будет определяться шунтирующей емкостью C' . В реальных приборах не удается получить шунтирующую емкость менее 10^{-15} Ф, что как минимум на два порядка больше требуемой для наблюдения одноэлектронного туннелирования даже при температурах жидкого гелия.

Таким образом, наблюдение одноэлектронного туннелирования в системе с одним переходом при сегодняшнем развитии технологии является весьма проблематичным.

Для разрешения данной проблемы была предложена конструкция из двух туннельных переходов, включенных последовательно. Эквивалентная схема этой конструкции представлена на рис. 4.

Как видно из рис. 4, емкость контактов уже не шунтирует емкость каждого перехода. Общую электростатическую энергию та-

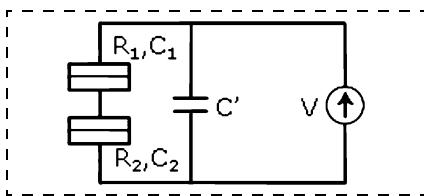


Рис. 4. Эквивалентная схема конструкции с двумя переходами

кой системы можно записать в виде

$$E = Q_1^2/2C_1 + Q_2^2/2C_2, \quad (2.9)$$

где 1, 2 — индексы переходов. Физически такая конструкция представляет собой малую проводящую частицу, отделенную туннельными переходами от контактов, поэтому $Q_1 = Q_2 = Q$, где Q — заряд, находящийся на частице. Тогда (2.9) можно переписать в виде, который полностью аналогичен формуле (2.1), за исключением того, что вместо емкости C фигурирует емкость $C_{\Sigma} = C_1 + C_2$ — суммарная емкость двух переходов, так как C_1 и C_2 включены параллельно.

Таким образом, справедливыми остаются формулы (2.2), (2.4) и (2.8) при замене в них C на C_{Σ} . В формулах (2.3) и (2.4) необходимо заменить G на $\max(G_1, G_2)$. Характерная вольт-амперная характеристика двухпереходной системы с симметричными переходами показана на рис. 5.

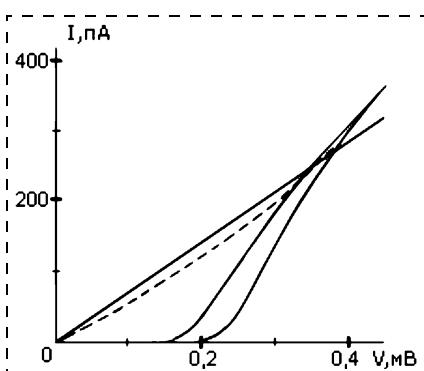


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика двойного перехода при 20 мК, для затворного напряжения 0 (сплошная кривая) и $e/2C$ (штриховая кривая). Кривые 1, 2 соответствуют теоретическим расчетам для симметричного перехода с такими же емкостью и сопротивлением

2.2. Кулоновская лестница

Рассмотрим двухпереходную систему с несимметричными переходами. Темп туннелирования через первый переход можно записать в виде

$$\Gamma_1 = \delta E_1/e^2 R_1, \quad (2.10)$$

где $\delta E_1 = eV_1 - e^2/2C_1$ — изменение энергии на первом переходе при падении на нем напряжения $V_1 > V_{\text{к.б.}}$. Подставив δE_1 в (2.10), получим

$$\Gamma_1 = V_1/eR_1 - 1/2R_1 C_1. \quad (2.11)$$

Аналогичное выражение можно записать для Γ_2 . Из (2.11) видно, что при разных R и C переходов будут различаться и темпы туннелирования. Если R и C переходов равны, то при увеличении напряжения будет происходить плавный рост тока, так как число пришедших на кулоновский остров электронов будет равно числу ушедших.

При несимметричности переходов на островке будет существовать заряд из n электронов. При увеличении напряжения до значения, достаточного для забрасывания на островок $(n+1)$ -го электрона, вначале будет происходить резкое увеличение тока, обусловленное переходом с высоким темпом туннелирования.

Дальнейшее увеличение тока, обусловленное переходом с низким темпом туннелирования, будет медленным до тех пор, пока на островок не сможет попасть $(n+2)$ -й электрон. Таким образом, хотя ток через систему проходит непрерывно, в каждый момент времени на островке будет существовать определенное число электронов, зависящее от приложенного напряжения. В результате вольт-амперная характеристика двухпереходной системы имеет ступенчатый вид, называемый "кулоновской лестницей".

Ступеньки "кулоновской лестницы" будут тем ярче выражены,

чем несимметричнее переходы, а при симметрии переходов, т. е. при равенстве RC — постоянных, ступеньки исчезают. Семейство "кулоновских лестниц", рассчитанное К. К. Лихаревым для различных значений Q_0 , представлено на рис. 6.

Как уже отмечалось выше, заряд Q в уравнении (2.1) имеет вид

$$Q = Q_0 - ne, \quad (2.12)$$

где n — целое число электронов на кулоновском острове. Так как Q_0 имеет поляризационную природу, то, расположив рядом с "кулоновским островом" третий электрод — затворный, можно изменять заряд непрерывно, пропорционально затворному напряжению.

Таким образом, при непрерывном изменении Q_0 периодически будет выполняться условие кулоновской блокады, графически показанное на рис. 7. Следовательно, при изменении затворного напряжения периодически будет возникать кулоновская блокада, и зависимость тока через точку (или напряжения на ней при постоянном токе) будет носить осцилляционный характер. Пример таких осцилляций (напряжение на точ-

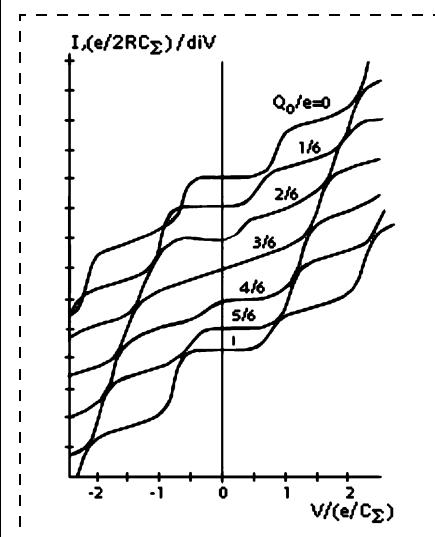


Рис. 6. Расчетная ВАХ схемы, показанной на рис. 4 для различных значений внешнего заряда ($G_1 \ll G_2$, $C_1 = 2C_2$)

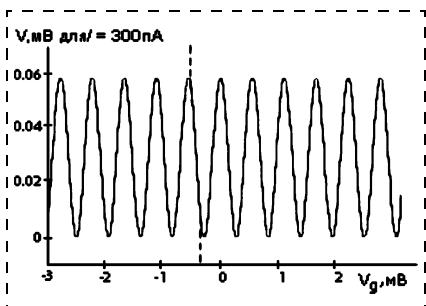


Рис. 7. Зависимость напряжения на квантовой точке при постоянном токе через нее $I = 30 \text{ пA}$ в зависимости от напряжения на затворе

ке при постоянном токе через нее в зависимости от затворного напряжения) показан на рис. 7.

3. Классификация приборных структур одноэлектронники

На основе выделения характерных активных областей приборов различаются следующие классы одноэлектронных структур.

Однотуннельные приборы. Такие структуры содержат только один туннельный переход. Примером может служить одноэлектронный диод [5], содержащий $p-n$ -переход с вырожденным газом носителей заряда, или одноэлектронный бокс [6], в котором туннельный переход подсоединен к источнику напряжения через конденсатор.

Цепочки туннельных переходов. К этому классу относятся структуры, содержащие два и более туннельных переходов в активной области, соединенные последовательно. Один из наиболее изученных приборов, относящихся к этому классу, — одноэлектронный транзистор [7—9]. Он содержит два туннельных перехода, отделяющих очень малый "островок" полупроводника от областей истока и стока. Большинство других известных в настоящее время одноэлектронных приборов относятся к этому классу: "насос" [10, 11], модулятор [11, 12], одноэлектронная память [13] и др.

Матрицы туннельных переходов.

Структуры этого класса содержат в активной области последовательное и параллельное соединения туннельных переходов в плоскости. Примером такой структуры может быть гранулированная микроперемычка [14].

Массивы туннельных переходов. Такие структуры содержат последовательное и параллельное соединение туннельных переходов в различных измерениях.

Каждому из отмеченных классов может быть поставлена в соответствие определенная размерность, а именно: однотуннельным приборам — нульмерный элемент (0D); цепочкам туннельных переходов — одномерный массив (1D); матрицам — двумерный (2D) и массивам туннельных переходов — трехмерный массив элементов (3D).

Каждый из отмеченных классов структур (соответствующей размерности) может быть представлен определенным видом принципиальной структурной схемы. Приведем структурные схемы приборов, относящихся к перечисленным классам.

Бокс (однотуннельный прибор). Структурная схема этого прибора соответствует нульмерной размерности (0D) (рис. 8). В качестве островка выступает промежуточный электрод между туннельным переходом и конденсатором затвора.

Транзистор (цепочка туннельных переходов) содержит два тун-

нельных перехода, соединенные последовательно, и островок между ними. Управление током через структуру осуществляется посредством затвора. На рис. 8 представлен один из вариантов принципиальных структурных схем этого прибора. Соответствующая размерность схемы — 1D. Существуют и другие варианты принципиальных структурных схем одноэлектронного транзистора [15]. Эти схемы отличаются расположением островка и затвора относительно истока и стока, а также конфигурацией затвора. Островок может находиться как в плоскости истока и стока, так и выше либо ниже этой плоскости. Конфигурация затвора может быть различной. Одна из конфигураций, часто используемая в одноэлектронных структурах, — расщепленный затвор [11]. Затвор может располагаться как в плоскости островка (сбоку от него), так и сверху (снизу) островка, непосредственно над (под) ним или сбоку от него. В реальном транзисторе число затворов может быть различным, причем в одном приборе могут использоваться затворы разной конфигурации и с различным расположением относительно островка.

"Многоостровковая" цепочка отличается от схемы транзистора числом островков (см. рис. 8). Так же как и для транзистора, расположение островков относительно истока и стока, а также конфигурация, число и расположение затворов могут быть различными [15].

Микроперемычка (матрица туннельных переходов) — принципиальная структурная схема этого прибора приведена на рис. 8 и соответствует размерности 2D. Схема содержит двумерный массив островков. Управление током через структуру осуществляется затвором, расположенным над островками (на схеме он не показан).

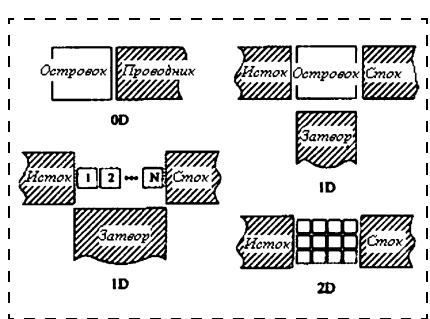


Рис. 8. Принципиальные структурные схемы некоторых одноэлектронных структур

Условно (так как обычно одноэлектронные структуры состоят из различных материалов) выделим следующие виды одноэлектронных структур по материалам островка (островков):

1. *Металлические*. К этому виду относятся пленочные структуры, в которых металлические островки разделены туннельными барьерами в виде диэлектрических слоев [16–18]; структуры на основе гранулированных пленок [14, 19], или на основе металлических коллоидных частиц [20] и др.

В таких структурах имеет место ограничение трехмерного электронного газа в островках.

2. *Полупроводниковые*. Примером таких структур могут быть, например, приборы на основе следующих гетероструктур: GaAs/AlGaAs [21–24], GaAs с δ-легированным слоем [10, 13], AlGaAs/InGaAs/GaAs [24] и др. В этих структурах осуществляется ограничение двумерного электронного газа (ДЭГ) в малые лужицы (островки) различными методами: в результате прикладывания определенных смещений к затворам [21, 22], путем использования электронно-лучевой литографии и травления структуры [23], при использовании ионно-лучевой имплантации Ga [24] и т. д. К этому виду также относятся следующие кремниевые одноэлектронные структуры: на основе МОП полевого транзистора [8, 25]; полученные методом осаждения наноразмерных кремниевых кристаллов [26]; выполненные на подложке кремний-на-изоляторе [9, 27]; на основе δ-легированного SiGe [28] и др.

3. *Диэлектрические*. В этом случае диэлектрические островки должны быть разделены слоями с меньшей проницаемостью по сравнению с материалом островков. В настоящее время примеров изготовления приборов, относящихся к этому виду, нет.

4. *Органические*. Примером такой структуры может служить,

например, транзистор на основе пленки из смеси стеариновой кислоты и карбонатовых кластеров [29]. Последние выступают в качестве островков.

5. *Композиционные*. В этом случае островки изготовлены из композиционного материала или из различных материалов. К этому виду можно отнести структуры, которые не подходят ни к одному из ранее выделенных видов одноэлектронных структур.

По технологическим методам изготовления, материалам, формирующими различные области, управляющим электродам и другим принципам можно выделить **разновидности** одноэлектронных структур. Приведем некоторые из них.

Так, например, металлические одноэлектронные структуры могут различаться по технологическому процессу изготовления. В настоящее время известны следующие методы получения таких структур:

- электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ) и напыления [16, 17];
- линейного самосовмещения [30];
- окисления с использованием сканирующего туннельного микроскопа [18];
- SECO (*step edge cut-of* — ступенчатого торцевого среза) [31];
- анодирования переходов, изготовленных методом ЭЛЛ и напыления [32].

Полупроводниковые структуры различают следующим образом:

- по материалам, формирующими активную область: кремниевые и на основе полупроводников типа A^IVB^V (например, GaAs-структуры и др.);
- по способу формирования активных областей среди кремниевых структур: 1) структуры, полученные в инверсионном слое кремниевого МОП полевого транзистора с двойным затвором [8, 33]; 2) структуры, сформированные на под-

ложке кремний-на-изоляторе с использованием ЭЛЛ и реактивного ионного травления [9, 27, 34, 35]; 3) структуры на основе наноразмерных кремниевых кристаллов, полученных методом обработки в СВЧ плазме и используемых в качестве островков [26].

Как для кремниевых, так и для одноэлектронных структур на основе GaAs существуют различные технологические методы их получения. Основным отличием этих методов является способ ограничения ДЭГ в структурах, малые "лужицы" которого используются в качестве островков.

В настоящее время известны следующие способы такого ограничения (или формирования одноэлектронных структур на основе GaAs):

- ограничение расщепленными затворами Шоттки двумерного электронного газа, формируемого в гетероструктуре GaAs/AlGaAs [11, 21];
- ЭЛЛ и реактивное ионное травление гетероструктуры GaAs/AlGaAs для формирования областей истока, стока, канала и затворов [23];
- ЭЛЛ и вытравливание мезаструктур в GaAs/AlGaAs и формирование затворов Шоттки [36, 37];
- ограничение боковым затвором ДЭГ в δ-легированном GaAs (контуры структуры очерчены ЭЛЛ и травлением) [13, 38];
- ионно-лучевая имплантация Ga в селективно-легированные гетероструктуры GaAs/AlGaAs или AlGaAs/AuGaAs/GaAs [24, 39], и т. д.

Таким образом, известные в настоящее время одноэлектронные приборные структуры можно отнести к определенному классу, виду и разновидности.

При этом они характеризуются определенным видом принципиальных структурных схем (см. рис. 8).

Проиллюстрируем сказанное на примере конкретных наноэлектронных приборов.

4. Типовые приборы одноэлектронники

Металлические структуры. Наиболее изученным прибором, принадлежащим к типу одноэлектронных структур, в настоящее время является одноэлектронный транзистор. Как было отмечено ранее, он относится к классу цепочек туннельных переходов и соответствует размерности 1D (см. рис. 8). Металлические одноэлектронные транзисторы (один из видов одноэлектронных транзисторов) могут отличаться методом изготовления и некоторыми другими признаками, которые будут описаны далее.

Значительный интерес представляют структуры одноэлектронных транзисторов на основе $\text{Al}/\text{AlO}_x/\text{Al}$ -туннельных переходов, изготовленных методом ЭЛЛ и напыления [16]. Причем конфигурация затвора у этих приборов различная: один из них имеет встречно-гребенчатую конфигурацию конденсатора затвора, другой — параллельные плоскости затвора и островка. Рабочая температура таких структур около 0,1 К. Другой известный метод изготовления транзисторов на основе туннельных переходов $\text{Al}/\text{AlO}_x/\text{Al}$ — метод линейного самосовмещения [30].

Основная идея метода заключается в следующем: туннельные переходы формируются по краям базового электрода (островка), ограничивая один из размеров переходов его толщиной. Формируя очень узкую полоску базового электрода распылением и взрывной литографией, второй из размеров туннельных переходов получают также малым.

Исток и сток формируются при вторичном осаждении металлического слоя. Рабочая температура прибора — до 1 К. Извест-

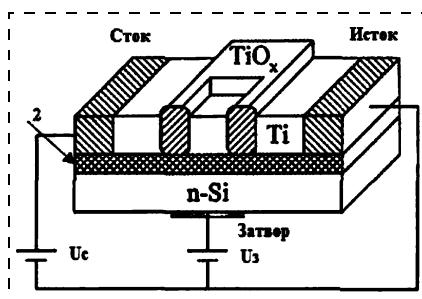


Рис. 9. Транзистор, изготовленный методом окисления с использованием сканирующего туннельного микроскопа

ны металлические одноэлектронные транзисторы на основе других материалов. На рис. 9 представлен транзистор на основе туннельных переходов $\text{Ti}/\text{TiO}_x/\text{Ti}$. Он получен методом окисления с использованием сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) [18]. После нанесения пленки металла (Ti) ее поверхность окисляется анодированием с использованием острия СТМ в качестве катода. Такой транзистор может работать при комнатной температуре. Структура на рис. 10 — транзистор на основе туннельных переходов $\text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Cr}$, изготовленный методом ступенчатого торцевого среза [31]. Основная идея метода: пленка проводника толщиной d_1 напыляется на предварительно изготовленную ступеньку диэлектрического материала толщиной d_2 . При $d_1 < d_2$ электроды не имеют контакта на торцах ступеньки, а ток через структуру течет за счет туннелирования. Рабочая температура при-

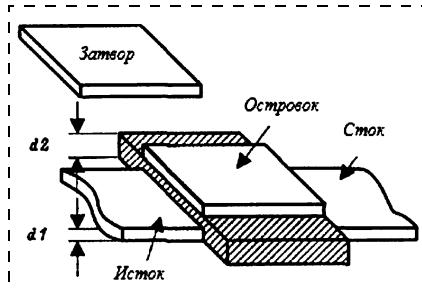


Рис. 10. Транзистор, изготовленный методом ступенчатого торцевого среза

бора — около 15 К. Все описанные выше транзисторные структуры можно также отнести к разновидности пленочных структур.

К классу цепочек туннельных переходов, кроме транзисторов, относятся многоостровковые цепочки. Одной из разновидностей таких структур являются приборы на основе гранулированных пленок. Примером может служить структура на основе гранулированной пленки $\text{Au}/\text{Al}_2\text{O}_3$ [19], полученной совместным распылением Au и Al_2O_3 на Au-подложку. Над этой пленкой располагалась игла СТМ. Для такой структуры были измерены электрические характеристики, которые хорошо согласовывались с теоретически рассчитанными характеристиками для цепочки туннельных переходов. Эффект одноэлектронного туннелирования в структуре в большой степени зависит от содержания золота в пленке и положения иглы СТМ. Рабочая температура структуры — до 77 К.

Другой пример прибора, относящегося к разновидности гранулированных структур, — микроперемычка на основе гранулированной пленки NbN (рис. 11). Размеры пленки выбираются меньше эффективного размера зарядового солитона, что приводит к квазинульмерности свойств электронной проводимости структуры. Прибор изготовлен "методом, зависящим от края" (*edge-defined process*) [14]. Управление током через структуру осуществляется

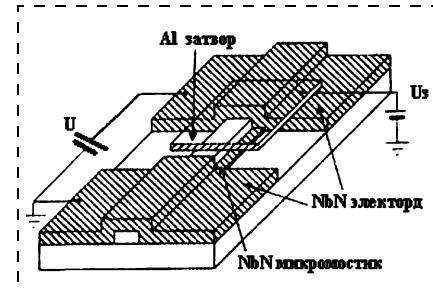


Рис. 11. Микроперемычка на основе гранулированной пленки NbN

посредством затвора, расположенного над островками. Рабочая температура микроперемычки около 4,2 К. В отличие от ранее приведенных структур данный прибор относится к классу матриц туннельных переходов. Его принципиальная структурная схема имеет размерность 2D (см. рис. 8).

Другая разновидность металлических одноэлектронных структур — приборы на основе цепочек коллоидных частиц золота с молекулярными связями [20]. Эти частицы золота являются островками, а органические молекулы, их связывающие, — туннельными барьерами. Частицы Au осаждаются с использованием аминосиланового адгезионного средства на подложку с предварительно изготовленными металлическими (Au) электродами истока, стока и затвора. В результате соответствующей обработки образуются органические молекулы, связывающие осаждаемые коллоидные частицы и электроды истока и стока. Электронный транспорт в такой структуре осуществляется за счет туннелирования электронов через цепочку коллоидных частиц. Таким образом, данный прибор представляет собой многоостровковую цепочку и может быть описан принципиальной структурной схемой размерности 1D (см. рис. 8). Рабочая температура прибора около 4,2 К, хотя при 77 К нелинейность вольт-амперной характеристики (ВАХ) сохраняется.

Интересный способ изготовления металлических одноэлектронных структур был предложен в работе [40]. На подложку со слоем Sb на поверхности осаждалась пленка Ag. Вследствие отсутствия смачивания этой пленки на поверхности подложки образовывались малые капли Ag (островки). С использованием СТМ, игла которого размещалась над одним из таких островков,

была получена структура: {игла СТМ} — островок — подложка. Данная структура является двойным туннельным переходом (частный случай многоостровковой цепочки). ВАХ структуры чувствительна к горизонтальной позиции иглы СТМ. Эффект одноэлектронного туннелирования в структуре наблюдался при комнатной температуре.

Полупроводниковые структуры.

Кремниевый одноэлектронный транзистор (представитель класса цепочек туннельных переходов) — это прибор, исследованию которого уделяется в настоящее время большое внимание. На рис. 12 представлен кремниевый одноэлектронный транзистор, сформированный в инверсионном слое МОП полевого транзистора с двойным затвором [8]. Нижний и верхний затворы получены методом ЭЛЛ и сухого химического травления.

Нижний затвор (положительно смещенный) формирует инверсионный канал, верхний затвор (отрицательно смещенный) — потенциальные барьеры. Рабочая температура прибора около 4,2 К. К другой разновидности относится квантово-точечный транзистор (рис. 13) [9]. Он изготовлен на основе структуры кремний-на-изоляторе с использова-

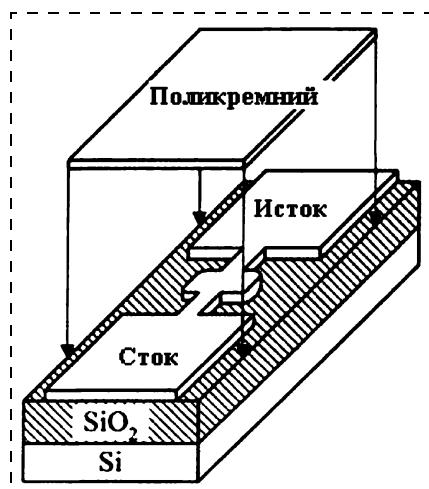


Рис. 13. Квантово-точечный транзистор с поликремниевым затвором

нием ЭЛЛ и реактивного ионного травления. Канал с островком сформированы в верхнем кремниевом слое подложки. В отличие от предыдущего прибора данный транзистор имеет только один поликремниевый затвор, расположенный над каналом.

В режиме туннелирования в структуре наблюдаются осцилляции тока в зависимости от напряжения на затворе. Причиной являются два эффекта: квантовые ограничения и одноэлектронное туннелирование. Этот эффект характерен как для *p*-канальных, так и для *n*-канальных транзисторов. Рабочая температура для *n*-канальных транзисторов составляет 100 К, для *p*-канальных соответственно — 81 К [41]. Реализация таких структур открывает определенные перспективы для создания комплементарных пар квантово-точечных резисторов. На их основе предложено реализовать одноэлектронную память [27, 42].

Структура этого прибора подобна структуре квантово-точечного транзистора (см. рис. 13), поэтому также относится к классу цепочек туннельных переходов. Ее отличие от транзистора состоит в том, что в качестве островка выступает квантово-точеч-

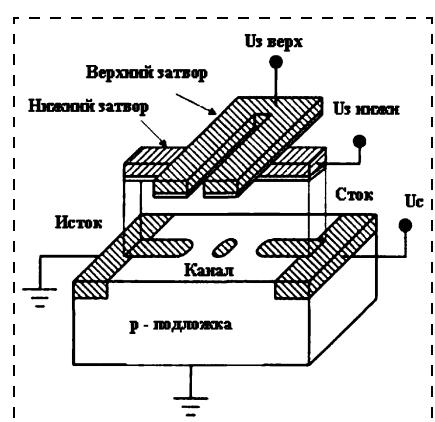


Рис. 12. Одноэлектронный транзистор, сформированный в инверсионном слое МОП полевого транзистора с двойным затвором

ный плавающий поликремниевый затвор. Хранение электрона на плавающем затворе приводит к экранированию канала от потенциала на управляющем затворе и сдвигу порогового напряжения. Известны различные методы получения плавающего затвора: осаждение и второй этап ЭЛЛ и реактивного ионного травления [27], метод самосовмещения [42].

Этот прибор может работать при комнатной температуре.

Другой пример такой же разновидности — многоостровковая цепочка на основе квантового провода с двойным боковым затвором [34]. Туннельные переходы формируются в результате образования обедненных областей в квантовом проводе при подаче напряжений на боковые затворы. Рабочая температура прибора около 2 К, хотя нелинейность в ВАХ наблюдается до 46 К.

Как одну из разновидностей кремниевых приборов по методу изготовления можно рассматривать структуры на основе наноразмерных кремниевых кристаллов, используемых в качестве островков [26]. *Наноразмерные кристаллы* были получены обработкой в СВЧ плазме и покрыты слоем оксида. После этого они были осаждены на структуру с предварительно изготовленными электродами. Структура является квазиодномерной цепочкой туннельных переходов, так как ток течет через путь с наименьшим сопротивлением. Эффект одноэлектронного туннелирования наблюдается в структуре при комнатной температуре.

Интенсивно разрабатываются и одноэлектронные полупроводниковые структуры на основе GaAs. В таких структурах осуществляется ограничение ДЭГ в островки различными методами. По способу такого ограничения можно выделить ряд разновидностей структур. Рассмотрим их на примере конкретных приборов.

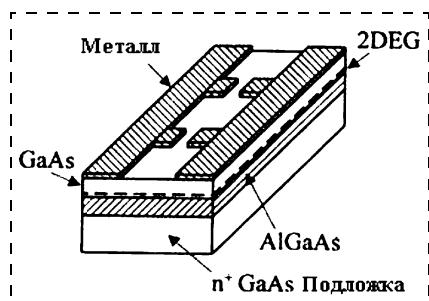


Рис. 14. Структура на основе GaAs/AlGaAs с расщепленным затвором Шоттки

На рис. 14 показан прибор, который представляет собой двойной туннельный переход на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs [21]. В этом приборе ограничение ДЭГ в островки осуществляется посредством прикладывания напряжения к металлическим расщепленным затворам Шоттки, расположенным на поверхности структуры. ДЭГ формируется на границе раздела слоев GaAs и AlGaAs, его плотность контролируется напряжением, приложенным к проводящей подложке. При подаче отрицательных напряжений на расщепленные затворы происходит обеднение ДЭГ под ними. В результате в ДЭГ формируется канал с малыми сегментами (островками) между обедненными участками (барьерами) [43, 44]. Рабочая температура прибора около 0,5 К.

Другая разновидность может быть представлена транзистором на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs, в котором области затворов, истока, стока, островка и канала получены путем ЭЛЛ и реактивного ионного травления канавок в исходной пластине [23]. В результате такого технологического процесса происходит ограничение ДЭГ в этих областях.

В отличие от прибора, приведенного на рис. 14, в такой структуре затворы лежат в одной плоскости с областями истока, стока и островка (планарные затворы). Рабочая температура прибора около 22 мК. Как одну из разно-

видностей отмеченных структур можно рассматривать транзистор на основе GaAs/AlGaAs, изготовленный методом ЭЛЛ и жидкостного химического вытравливания меза-структур и формирования затворов Шоттки [36]. Двумерный электронный газ формируется на границе раздела слоев GaAs и AlGaAs. На боковых стенах полученного при травлении канала с ДЭГ сформированы электрохимическим способом планарные затворы Шоттки. Напряжение, подаваемое на эти затворы, обеспечивает ограничение ДЭГ в островки. Если в структуре с расщепленным затвором (см. рис. 14) электрическое поле приложено перпендикулярно ДЭГ, то горизонтальное электрическое поле, вызванное напряжением на планарном затворе Шоттки, действует на электроны в направлении, параллельном ДЭГ, вызывая его сильное ограничение. Рабочая температура прибора — до 20 К. Существует ряд одноэлектронных структур с ДЭГ в δ-легированной пластине GaAs [13, 38]. В таких структурах ДЭГ лежит выше δ-легированного слоя. Контуры структур (исток, сток, затворы и канал) очерчены методами ЭЛЛ и травления меза-структур в пластине GaAs с δ-легированным слоем. В результате прикладывания напряжения к боковым затворам, а также ввиду наличия примесей и шероховатостей границ в структуре происходит разделение канала с ДЭГ на ряд островков. Такие структуры относятся к классу цепочек туннельных переходов и могут использоваться при создании одноэлектронной памяти. Рабочая температура структур с ДЭГ в δ-легированной структуре GaAs около 4,2 К.

Органические структуры. Примером органической структуры может быть, например, транзистор на основе пленки из смеси стеариновой кислоты и карбонатовых кластеров, которые явля-

ются островками [29]. Прибор был изготовлен следующим образом. На атомарно гладкую поверхность графита с предварительно сформированным электродом управления осаждалась смешанная пленка стеариновой кислоты с включенными в нее карбонатовыми кластерами. Электрод из тонких двухслойных полосок (слой Au на Al_2O_3) формировался методом электронной нанолитографии. Характеристики такой структуры исследовались с использованием СТМ, игла которого размещалась над кластерами. Эффект одноэлектронного туннелирования наблюдается в приборе при комнатной температуре.

5. Молекулярный одноэлектронный транзистор

Большая часть экспериментов по изучению одноэлектронных структур, полученных с помощью литографии, выполнялась при температуре ниже 1 К. Для повышения рабочей температуры необходимо уменьшить характерный размер структуры d , чтобы понизить типичное значение емкости C (для работы при $T = 300$ К требуется $C \leq 10^{-18}$ Ф, соответствующее $d \leq 3$ нм), и это довольно серьезная проблема. Технология, позволяющая легко получать низкие значения емкости, которая фактически и была первой методикой, примененной для исследования одноэлектронного туннелирования при высоких температурах, основана на использовании сканирующего туннельного микроскопа. Игла СТМ, малая проводящая частица и подложка представляют собой простейшую одноэлектронную цепь из двух последовательных туннельных переходов. Для достаточно малых металлических частиц одноэлектронное заряджение сохраняется вплоть до комнатной температуры [47, 48], а при туннелировании через единичные

молекулы оно может быть выражено еще сильнее [49–52].

Недостатком этой технологии было отсутствие управляющего электрода, с помощью которого можно было бы воздействовать на электронный транспорт. По этой технологии получен работающий при комнатной температуре молекулярный одноэлектронный транзистор с металлическим затвором, который управляет туннелированием единичных электронов с иглы СТМ на подложку через карбоновую кластерную молекулу [53].

Ленгмор-Блоджеттовские (ЛБ) монослои стеариновой кислоты с внедренными в них металлоорганическими кластерами осаждались на подложку из пиролитического графита (HOPG) с заранее сформированным управляющим электродом.

Этот электрод был изготовлен с помощью стандартной техники электронной литографии и представлял собой систему тонких (50 нм) и узких (400 нм) золотых полосок, отстоящих друг от друга на 400 нм (рис. 15). Все полоски соединены последовательно и отделены от подложки изолирующей прослойкой (Al_2O_3) толщиной 50 нм (рис. 16).

Осаждение ЛБ слоев проводилось с помощью обычной ком-

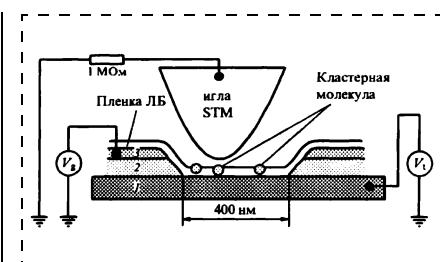


Рис. 16. Схема одноэлектронного транзистора на основе единичной кластерной молекулы:

1 — подложка HOPG; 2 — изолирующая прослойка (Al_2O_3); 3 — золотой электрод затвора

пьютеризированной тефлоновой кюветы; подробное описание методики содержится в работах [51, 54–56]. Небольшое количество смеси карбоновых кластеров и стеариновой кислоты, растворенное в тетрагидрофуране (полная молекулярная концентрация — 0,001 М), помещалось на поверхность воды высокой очистки. После полного испарения раствора монослой сжимался со скоростью около 5 Е²/моль/мин. ЛБ монослой перемещался из кюветы на подложку с управляющим электродом методом Шефера [57].

Электронный транспорт через пленку исследовался при комнатной температуре с помощью СТМ "Nano-Scope" с атомным разрешением. Сначала формировалось изображение пленок при типичных значениях напряжения смещения на игле 0,5 В и туннельном токе 0,5 нА. Изображения были устойчивыми и воспроизводимыми. Карбоновые кластеры были видны как приподнятые объекты овальной формы с продольным размером около 20 нм и поперечным размером примерно в два раза меньше. Среднее расстояние между кластерами составляло около 20 нм. Размер и форма не были абсолютно воспроизводимыми, что может объясняться, например, различной ориентацией кластерных молекул в монослое.

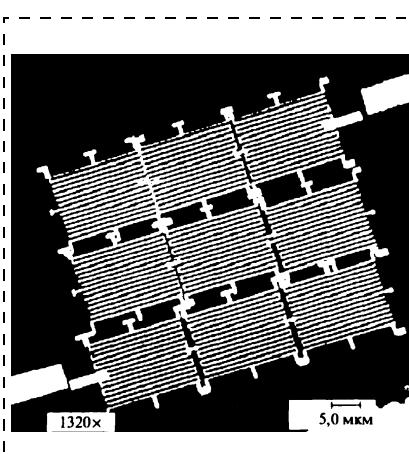


Рис. 15. РЭМ-изображение золотого электрода затвора, сформированного перед осаждением монослоя

После того, как была найдена кластерная молекула, игла СТМ помешалась над кластером и проводилась серия транспортных измерений с разомкнутым контуром обратной связи СТМ (контура обратной связи использовался между измерениями для восстановления вертикального положения иглы). Фактически измерения проводились в 49 близко расположенных точках плоскости, так что исследовались как точки непосредственно над кластером, так и точки в стороне от кластера. Типичная ВАХ постоянного тока для случая туннелирования через кластерную молекулу показана на рис. 17. Она имеет четко выраженную лестничную форму, которая отсутствует в случае, когда игла СТМ находится далеко от кластера. На рис. 17 видны шесть ступенек, которые с хорошей точностью являются эквидистантными с периодом по напряжению около 130 мВ. На рис. 17 также показан результат измерений дифференциального кондактанса с помощью метода синхронного детектирования.

Кривая 1 на рис. 18 изображает зависимость туннельного тока I от напряжения на затворе V_g в случае, когда игла СТМ расположена над кластером, находящимся на расстоянии около 100 нм от управляющего электрода. Эта зависимость имеет явно периодический вид с периодом около 0,8 В.

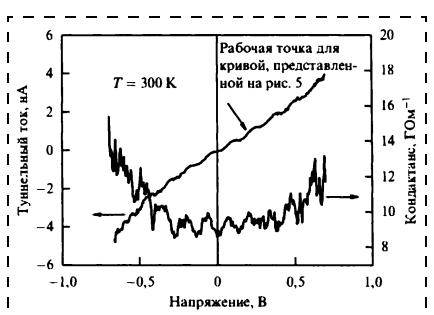


Рис. 17. Типичная ВАХ и дифференциальный кондактанс (как функция напряжения смещения V) молекулярного одноэлектронного транзистора

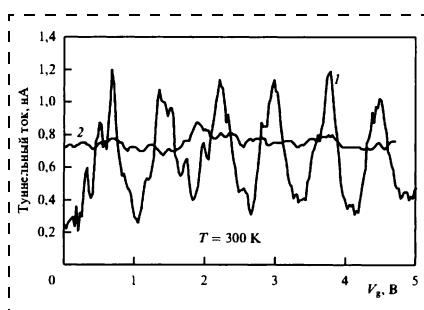


Рис. 18. Зависимость тока через молекулярный одноэлектронный транзистор от напряжения на затворе (кривая 1; точка смещения при постоянном токе показана стрелкой на рис. 17). Аналогичная зависимость в случае, когда игла СТМ расположена над стеариновой кислотой (кривая 2)

В противоположность этому, когда игла СТМ расположена над плоским участком поверхности без кластеров, такой эффект на кривых ВАХ не наблюдается (рис. 19, кривая 2). Исходя из предположения, что каждый период осцилляции кривой 1 соответствует одному дополнительному электрону, можно оценить зарядовую чувствительность нашего молекулярного одноэлектронного транзистора как $10^{-3}e/\sqrt{f}$ (ширина частотной полосы измерительной системы составляет 16 кГц). Предполагается, что основной вклад в полный шум в системе дают механические колебания (~ 150 пА от максимума до минимума на рис. 18). Амплитуда модуляции контрольной кривой зависит от напряжения смещения V при постоянном токе. Качественно можно сказать, что амплитуда максимальна для V , соответствующего точкам между ступеньками ВАХ, в то время как для V в пределах плато управляющим напряжением затвора практически можно пренебречь.

Экспериментальные результаты качественно согласуются с теорией одноэлектронного транзистора [41], однако некоторые вопросы до сих пор не ясны. На поведении единичного электрона, туннелирующего через молекулярную систему, неизбежно долж-

на сказываться дискретность энергетического спектра [42]. В этом случае электрическая емкость не является хорошо определенной величиной, и кулоновская энергия превращается в энергию ионизации и средства к электрону. Однако в настоящее время в литературе не имеется независимой информации об электронном спектре исследуемой системы. Вместе с тем, оказывается, что простая "ортодоксальная" теория [41], в которой энергетический спектр электродов считается непрерывным, достаточно хорошо работает даже для наносистем.

Итак, в первом приближении естественно попытаться объяснить экспериментально наблюдаемую форму ВАХ с помощью "ортодоксальной" теории. В этом случае, считая, что период лестницы $\Delta V \approx 130$ мВ (см. рис. 17), можно вычислить емкость перехода с большим сопротивлением $C = e/\Delta V \approx 1,2 \cdot 10^{-18}$ Ф. Это число слишком велико, чтобы его можно было объяснить как емкость остова карборанового кластера, который имеет диаметр $7E$. СТМ-изображение кластерной молекулы также существенно больше (около $20E$). Разумно предположить, что эффективный размер (в смысле электростатической энергии) больше, чем размер остова. Сфера диаметром

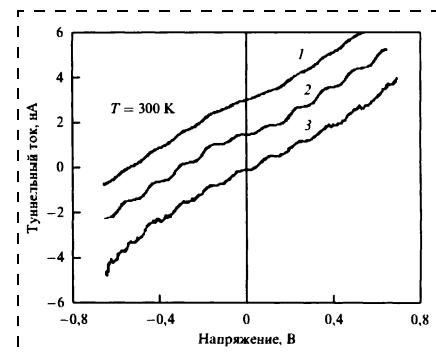


Рис. 19. Кривые ВАХ, вычисленные с помощью "ортодоксальной" теории (кривые 1 и 2) для описания экспериментальных результатов (кривая 3). Кривые свинуты по вертикали

$d = 20 \text{ } E$ имеет емкость $C \approx e \times 1,1 \cdot 10^{-19} \Phi$. Следовательно, экспериментальную емкость $1,2 \cdot 10^{-18} \Phi$ можно достаточно разумно объяснить, если принять во внимание эффективную диэлектрическую постоянную ϵ (связанную с подложкой, стеариновой кислотой и адсорбатом), а также увеличение емкости при приближении геометрии системы к плоскому конденсатору.

На рис. 19 показаны кривые ВАХ, вычисленные с помощью "ортодоксальной" теории (кривые 1 и 2) для описания экспериментальных результатов (кривая 3). Видно, что между теорией и экспериментом имеется неплохое качественное согласие, но нет хорошего количественного. Для получения такой четкой кулоновской лестницы температура должна быть по меньшей мере в 1,5 раза ниже, чем она была в экспериментах. Наблюдение в эксперименте почти горизонтальных ступенек можно объяснить только в предположении, что туннельный переход с существенно большим сопротивлением имеет также значительно большую емкость. Хотя такое допущение кажется не совсем естественным, оно обычно привлекается для объяснения почти плоских ступенек в одноэлектронных экспериментах с использованием СТМ.

Горизонтальные ступеньки можно хорошо описать, если предположить существование дискретного энергетического спектра центрального электрода транзистора [58], что вполне естественно для молекулярной системы. Однако в настоящее время необходимая информация об энергетическом спектре нашей системы отсутствует.

Емкость затвора C_g , вычисленная из периода контрольной кривой (кривая 1 на рис. 19), составляет около $2 \cdot 10^{-19} \Phi$. Отношение $C_g/C \approx 0,15$ оказывается неожиданно большим, несмотря

на то, что расстояние между кластером и электродом затвора ($\ll 60 \text{ нм}$) много больше, чем типичное расстояние между иглой СТМ и кластерной молекулой. Возможное объяснение этого обстоятельства может быть основано на том, что графитовая подложка — далеко не идеальный проводник, и это существенно уменьшает экранирование напряжения на затворе электродами смешения. Теоретическое описание для амплитуды модуляции контрольной кривой (с использованием значения емкости, вычисленного с помощью рис. 18) дает расхождение по температуре в 1,5 раза, аналогичное расхождению, полученному при теоретическом описании ВАХ. Однако на рис. 19 показан наибольший размах колебаний тока, и типичные контрольные кривые не выходят за пределы, объяснимые в рамках "ортодоксальной" теории.

6. Логический элемент И-НЕ на одноэлектронных транзисторах

На одноэлектронных транзисторах можно создать логические элементы подобно микроэлектронной логике. На рис. 20 приведена схема логического элемента И-НЕ, собранная на одноэлектронных транзисторах. В основе таких схем лежит использование туннельных переходов, контактных емкостей и металлических островков. На основе логического элемента этого типа можно построить любую вычислительную схему.

Одно из применений одноэлектронных транзисторов. В 1927 г. Вернер Гейзенберг сформулировал свой знаменитый принцип неопределенности, согласно которому неопределенности координаты и скорости частицы обратно пропорциональны друг другу и поэтому точно может быть измерена либо координата, либо скоп-

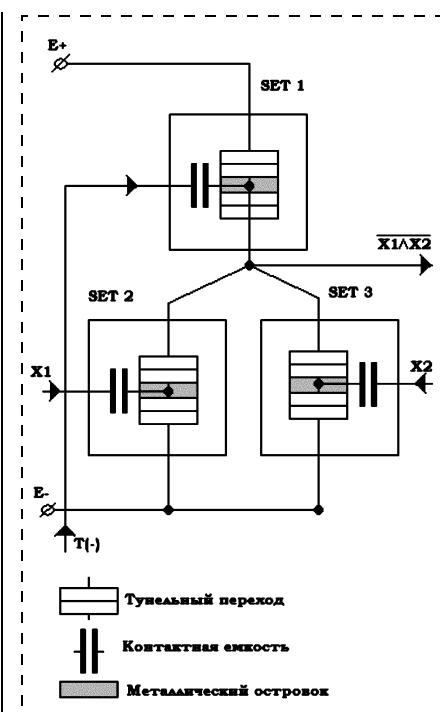


Рис. 20. Схема логического элемента И-НЕ, собранного на основе кластерных транзисторов

рость по отдельности, но не то и другое сразу. Этот принцип лежит в основе квантовой механики, определяя поведение частиц на субатомном уровне. Например, атом водорода устойчив благодаря тому, что сила кулоновского притяжения электрона к протону компенсируется эффективным отталкиванием электрона от ядра вследствие неопределенности флюктуирующей скорости.

А как быть с макроскопическими объектами, состоящими из большого числа атомов? Ведь мы привыкли описывать такие объекты путем одновременного задания четко определенных координаты и скорости их центра массы. Если нам удастся существенно повысить точность измерения того и другого, столкнемся ли мы с принципом неопределенности и на макроуровне? Этому вопросу посвящена работа [59] американских ученых (*University of California, Santa Barbara*). Они сконструировали чрезвычайно деликатный прибор — колеблю-

щийся кристаллический брускок длиной более одного микрометра и сверхчувствительный детектор, позволяющий регистрировать смещения бруска на расстояния порядка одной тысячной нанометра. Брускок состоит из примерно 10 млрд атомов, так что на фоне одного изолированного атома вполне может рассматриваться как макрообъект.

Если бы для такой системы удалось продемонстрировать справедливость принципа неопределенности, это стало бы ярким примером проявления квантово-механических эффектов далеко за рамками традиционной микроскопической (а точнее — наноскопической) физики.

Чтобы понять основную идею работы [59], рассмотрим следующий пример. Если крепко прижать один конец деревянной линейки к краю стола, а затем дернуть за другой край, то линейка начнет колебаться с затухающей амплитудой и через какое-то время снова придет в состояние покоя. Однако, если теперь мы посмотрим на свободный конец линейки через достаточно мощный микроскоп, то увидим, что он во все не покоится, а хаотически тряется "мелкой дрожью". Эта тряска является следствием случайных ударов молекул воздуха по линейке, а также наличия в ней многочисленных флюктуирующих внутренних дефектов. Но в линейке есть и другие, квантовые флюктуации, которые "прячутся" за классическим тепловым движением. Эти "нулевые" флюктуации гораздо меньше по амплитуде и возникают именно вследствие той самой неопределенности координаты и скорости, на которую указал Гейзенберг. По аналогии с упоминавшимся выше атомом водорода упругая возвращающая сила, которая действует на изогнутую линейку, уравновешивается отталкивающим действием флюктуи-

рующей скорости ее центра масс. Роль такой линейки и играл использованный в работе [59] кристаллический брускок.

В силу того, что "нулевые" флюктуации координаты и скорости чрезвычайно малы, их можно наблюдать только при подавлении обычных тепловых флюктуаций, т. е. при охлаждении системы до очень низких температур. В структуре с частотой собственных механических колебаний ~1 ГГц (что соответствует частоте колебаний бруска, использованной в работе [59]) "нулевые" флюктуации становятся преобладающими при понижении температуры до ~10...2 К. Оценка авторов [59] показала, что неопределенность смещения бруска в их экспериментах составляла ~10...5 нм. Для регистрации таких смещений они использовали одноэлектронный транзистор [60] — маленький металлический островок, сравнимый по размерам с колеблющимся бруском и отделенный диэлектрическими барьерами от двух проводов, подключенных к источнику напряжения. Барьеры были сделаны достаточно тонкими, чтобы электроны могли туннелировать из одного провода в другой через островок. Напряжение между проводами подбирали так, чтобы за один раз через островок мог протуннелировать только один электрон. Такой одноэлектронный ток очень чувствителен к флюктуациям электрического заряда в окрестности островка, что и было использовано в работе [59] для регистрации смещений бруска, который был отделен от металлического островка вакуумным зазором шириной 250 нм. Колебания бруска приводили к изменению ширины зазора и соответствующему перераспределению заряда на островке, что, в свою очередь, вызывало флюктуации туннельного тока и позволяло судить об амплитуде колебаний.

К сожалению, достичь чувствительности, достаточной для регистрации "нулевых" квантовых флюктуаций, в [59] так и не удалось. Соотношение неопределенностей Гейзенберга осталось непроверенным для макрообъектов. Но прогресс на этом пути сделан огромный. Остается совсем немного — повысить чувствительность детектора к смещениям в ~100 раз и увеличить частоту колебаний бруска в ~10 раз. При современных темпах развития нанотехники эту задачу вполне по силам решить уже в ближайшем будущем.

7. Одноэлектронный механический транзистор

Чтобы сохранить состояние логической цепи, равное "0" или "1", через полупроводниковый переход транзистора надо "перенести" порядка 100 тыс. электронов. Для передачи одного бита информации, такой подход выглядит несколько расточительно. К тому же часть из этих сотен тысяч электронов создаст тепловой шум, другая часть, вследствие туннельного эффекта, вообще "улетит" через подложку, отказавшись выполнять полезную работу, еще одна часть просто рассеется теплотой в окружающее пространство. Но все перечисленные недостатки, как и многие другие, увы — это неотъемлемая часть современных методов создания полупроводников. А если из транзистора вообще выбросить полупроводниковый переход и передавать электроны "вручную", механическим способом? Причем каждый электрон — в отдельности. Такой транзистор был создан (рис. 21).

Принцип работы этого транзистора следующий. На проводники $G1$ и $G2$ подается регулируемое по частоте переменное напряжение от генератора, вытравленного на одной подложке с

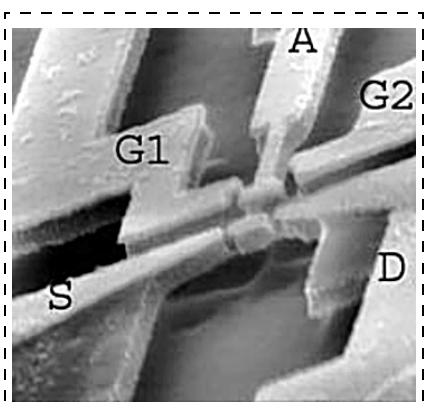


Рис. 21. Фотография механического "транзистора", сделанная с помощью электронного микроскопа

"транзистором". Переменный ток приводит в действие механический маятник *A*, на конце которого можно видеть два утолщения (молоточки). Маятник изолирован от всех контактов (*G1*, *G2*, *S*, *D*) и заземлен. В создании колебательных движений, подчиняясь электромагнитному эффекту, участвует "молоточек", находящийся между контактами генератора. В соприкосновение с ними он не входит. Роль транзисторного "перехода" играет второй "молоточек". Контакты с обеих его сторон выполнены с точностью до 10 нм. Один из контактов — исток (*source*), а другой — сток (*drain*). Расстояние между ними — 300 нм. В цепь сток—исток включен источник тока и измерительный прибор. Колебаясь, маятник ударяет в сток, забирая на себя, благодаря туннельному эффекту, один электрон. Удар в исток пересыпает электрон дальше по цепи. И так до бесконечности. При комнатной температуре и напряжением между стоком и истоком 1 В (маятник раскачивается напряжением 3 В) за один размах переносилось порядка 500 электронов. Подобрав оптимальную частоту генерации и значение напряжения, приложенного к "переходу", удалось создать условия для переноса лишь одного электрона. Но зави-

симость от температуры окружающей среды оказалась достаточно высока. Снижение рабочей температуры "транзистора" до 4 К остановило прибор. Механическая жесткость маятника увеличилась, и он перестал колебаться. Несмотря на это, перспективы у такого "транзистора" хорошие. Прежде всего потому, что такое устройство, вернее даже массив таких устройств, относительно легко создать на современном этапе развития полупроводниковой литографии (все контакты, а также сам маятник были выполнены в промышленных циклах маска — травление—промывка).

С прикладной точки зрения механический "транзистор" привлекателен для космической электроники, где радиоактивное излучение вносит много помех, вызывая спонтанные переходы в полупроводниковых слоях. Маятнику такое излучение не страшно. Использовать в обычной вычислительной электронике механический одноэлектронный "транзистор" очень выгодно. Никакой утечки, никаких тепловых шумов, если транзистор выключен, то он действительно выключен (сток и исток разделены физически).

8. Одноэлектронные запоминающие устройства

Одноэлектронные запоминающие устройства в последнее время развиваются чрезвычайно быстро. Такие устройства, работающие при комнатной температуре, были впервые представлены компанией *Hitachi* в 1993 г. Первые микросхемы объемом 64 бит продемонстрированы в 1996 г., а в 1997 г. появился прототип объемом 128 Мбит. Емкость, которую можно получить на одном кристалле, использующем одноэлектронную технологию, составляет от 4 до 256 Гбит, что позволит хранить в цифровом виде полноформатный видеофильм всего в

одной микросхеме. Разумеется, разработчикам придется пройти трудный путь от прототипа объемом 128 Мбит до серийного производства и решить массу технологических проблем.

Одноэлектронные запоминающие устройства, используемые для реализации 128-Мбитного модуля, были получены на основе естественным образом сформированной структуры — термически полученных нанокристаллов. Основной проблемой развития этой технологии является переход от случайным образом полученной структуры к структуре со строго определенными параметрами, изготовленной по заданному технологическому процессу.

Чтобы яснее понять отличия между структурами, полученными искусственным и естественным путем, а также связанные с этим проблемы, обратимся к рис. 22, где показано семейство одноэлектронных или квантовых устройств, на которых в настоящее время сконцентрированы главные усилия разработчиков.

Все три устройства используют так называемые квантовые точки. На рис. 22 изображено устройство, применяемое в качестве базовой ячейки для разработанных компанией *Hitachi* модулей памяти объемом 128 Мбит. Оно имеет структуру, подобную обычному МОП-транзистору, с той разницей, что область между истоком

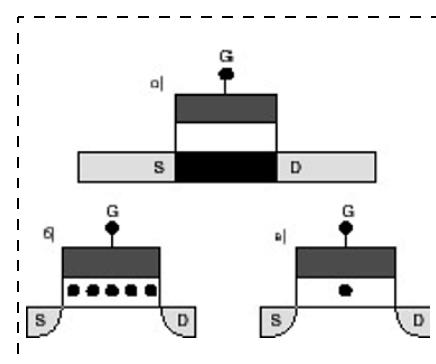


Рис. 22. Три типа квантовых транзисторов

и затвором представляет собой очень тонкую нанокристаллическую кремниевую пленку. Вещество пленки первоначально осаждается в аморфном состоянии, а затем кристаллизуется под воздействием высокой температуры.

Естественным или искусственным образом сформированные нанокристаллы могут работать как сверхмалые области проводимости, где электроны накапливают и образовывают вокруг этой области кулоновский барьер или блокаду, которая может управлять амплитудой тока, протекающего между истоком и стоком устройства, в зависимости от параметров смещения. Действие устройства и его способность работать как энергонезависимая ячейка памяти зависит от случайного формирования нанокристаллов, локализующихся на потенциальной поверхности между истоком и стоком настолько близко к каналу протекания тока, что они могут влиять на проводимость этого канала. В представленном прототипе для подавления некоторых статистических эффектов, связанных со спецификой технологии изготовления, была использована комбинация методов эталонных ячеек и проверки записи.

Из преимуществ устройств на основе нанокристаллов следует отметить высокую скорость записи/считывания, высокую плотность расположения ячеек и совместимость с существующими технологическими процессами.

Элементы одноэлектронной памяти на основе SOI структур. SOI (*Silicon on Insulator*) пленки представляют собой тонкий слой кремния на изоляторе (SiO_2), осажденном на кремниевую подложку. Такие пленки используются для изготовления высококачественных кремниевых полевых транзисторов. Слой оксида надежно изолирует транзистор от

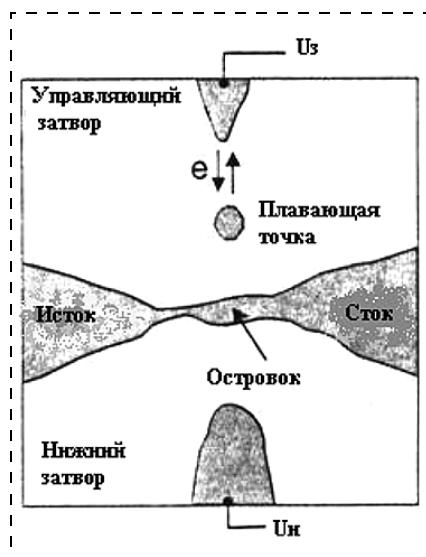


Рис. 23. Элемент одноэлектронной памяти

подложки. Однако SOI структуры весьма дорогие и поэтому редко применяются в массовых интегральных схемах.

Исследователи из NEC Corp. сформировали на основе SOI пленки элемент одноэлектронной памяти [61] (рис. 23). Прежде всего, проводилось сильное ионное легирование слоя кремния. Хотя исходная пленка кремния имела толщину 50 нм, после термического окисления она утоньшалась вдвое. Структура памяти была "нарисована" с помощью электронно-лучевой литографии и ионного реактивного травления в газе CF_4 . После этого проводили окисление на глубину 5 нм для устранения дефектов поверхности, оставшихся от травления. В качестве пассивирующего покрытия использовали слой SiO_2 толщиной 50 нм.

Изготовленная структура представляет собой одноэлектронный транзистор (SET) с электродами истока (*source*) и стока (*drain*) и центральным островком (*island*). Зарядка и разрядка плавающего затвора (*floating dot*) в виде отдельного островка, осуществляемая подачей напряжения на управляющий затвор (*control gate*),

влияет на потенциал центрального островка, и последовательно, на ток через него. В этом и состоит эффект памяти. Запись и считывание были продемонстрированы при температуре 3 К. Достоинством структуры явилось отсутствие паразитных заряженных ловушек вблизи центрального островка SET, которые являются самыми опасными врагами одноэлектронных транзисторов.

Заключение

В общих чертах уже ясны направления, в которых может развиваться одноэлектроника. Первое, традиционное, — построение обычных схем на основе одноэлектронных транзисторов. Второе — связано с особенностями одноэлектронных эффектов. Если множество микроскопических проводников соединить между собой туннельными переходами, поведение электронов в каждом из них станет зависеть от распределения частиц в соседних. К примеру, появление дополнительного электрона в каком-то проводнике может стимулировать движение зарядов через соседние переходы или, напротив, прерывать его. Такая система, если соединения в ней сделаны по нужной схеме, способна выполнять любые логические действия, и потому ее можно использовать как процессор ЭВМ. Вдобавок она обладает своеобразной распределенной памятью — в отсутствие внешних воздействий информация, закодированная в расположении электронов, сохраняется неограниченно долго. Это должно значительно облегчить построение сложных одноэлектронных вычислительных комплексов.

Но есть и еще более заманчивая перспектива — создание молекулярной электроники, т. е. электронных схем, элементами которых служат отдельные молекулы. О таких устройствах говор-

рят давно, но пожалуй, лишь одноэлектроника предложила достаточно реальные и надежные механизмы обработки информации в них. Туннельные переходы в виде двух проводящих ток молекул, разделенных небольшим промежутком, будут иметь настолько малую площадь, что смогут работать уже при комнатных температурах. Они обеспечат и высокое быстродействие, и миниатюрность будущих молекулярных компьютеров.

Список литературы

1. Аверин Д. В., Лихарев К. К. Препринт № 23. М.: МГУ. Физ. ф-т, 1985.
2. Аверин Д. В., Лихарев К. К. // ЖЭТФ. 1986. Т. 90. № 2. С. 733.
3. Аверин Д. В., Зорин А. Б., Лихарев К. К. // ЖЭТФ. 1985. Т. 88. № 2. С. 692.
4. Matsuoka H., Kimura S. // Appl. Phys. Lett. (1995). 66. 613.
5. Leobandung E., Guo L., Wang Y., Chou S. Y. // Appl. Phys. Lett. (1995). 67. 938.
6. Tsukagoshi K., Nakazato K. // Appl. Phys. Lett. (1997). 71. 3138.
7. Kouwenhoven L. P., Johnson A. T., Van der Vaart N. C., Van der Enden A., Harmans C. J. P. M., Foxon C. T. // Phys Z. B. (1991). 85. 381.
8. Geerligs L. J., Anderegg V. F., Holweg P. A. M., Mooij I. E., Pothier H., Esteve D., Urbina C., Devoret M. H. // Phys. Rev. Lett. (1990). 64. 2691.
9. Nakazato K., Blaikie R. J., Ahmed H. // J. Appl. Phys. (1994). 75. 5123.
10. Miura N., Yoshikawa N., Sugahara M. // Appl. Phys. Lett. (1995). 67. 3969.
11. Абрамов И. И., Новик Е. Г. // Изв. Белорус. инж. академии. (1998). № 2 (6)/2. 4.
12. Zimmerli G., Kautz R. L., Martinis J. M. // Appl. Phys. Lett. (1992). 61. 2616.
13. Fulton T. A., Dolan G. J. // Phys. Rev. Lett. (1987). 59. 109.
14. Matsumoto K., Ishii M., Segawa K., Oka Y., Vartanian B. J., Harris I. S. // Appl. Phys. Lett. (1996). 68. 34.
15. Bar-Sadeh E., Goldstein Y., Zhang C., Deng H., Abeles B., Mfflo O. // Phys. Rev. B. (1994). 50. 8961.
16. Sato T., Ahmed H., Brown D., Johnson B. F. G. // I Appl. Phys. (1997). 82. 696.
17. Meirav U., Kastner M. A., Wind S. J. // Phys. Rev. Lett. (1990). 65. 771.
18. Wang Y., Chou S. Y. // Appl. Phys. Lett. 63. 2257 (1993).
19. Pothier H., Weis J., Haug R. J., Klitzing K. // Appl. Phys. Lett. (1993). 62. 3174.
20. Fujisawa T., Tarucha S. // Appl. Phys. Lett. 1996/68/526.
21. Ohata A., Toriumi A., Uchida K. // Jpn. J. Appl. Phys. № 36. (1997). P. 1686.
22. Dutta A., Kimura M., Honda Y., Otobe M., Itoh A., Oda S. // Jpn. J. Appl. Phys. (1997). 36. 4038.
23. Quo L., Leobandung E., Chou S. Y. // Appl. Phys. Lett. (1997). 70. 850.
24. Paul D. J., Cleaver I. R. A., Ahmed H., Whall T. E. // Appl. Phys. Lett. 63. 631 (1993).
25. Солдатов Е. С., Ханин В. В., Трифонов А. С., Губин С. П., Колесов В. В., Преснов Д. Е., Яковенко С. А., Хомутов Г. Б. // Письма ЖЭТФ. (1996). № 64. Вып. 7. С. 510.
26. Gotz M., Bluthner K., Krech W., Nowack A., Fuchs H.-I., Kley E.-B., Thieme P., Wagner Th., Eska G., Hecker K., Hegger H. // I Appl. Phys. (1995). 78. 5499.
27. Altmeyer S., Spangenberg B., Kurz H. // Appl. Phys. Lett. (1995). 67. 569.
28. Nakamura Y., Klein D. L., Tsai I. S. // Appl. Phys. Lett. (1996). 68. 275.
29. Matsuoka H., Ichiguchi T., Yoshimura T., Takeda E. // Appl. Phys. Lett. (1994). 64. 586.
30. Smith R. A., Ahmed H. // J. Appl. Phys. (1997). 81. 2699.
31. Ali D., Ahmed H. // Appl. Phys. Lett. (1994). 64. 2119.
32. Jinushi K., Okada H., Hashizume T., Hasegawa H. // Jpn. J. Appl. Phys. (1996). 35. 1132.
33. Nagamune Y., Sakaki H., Kouwenhoven L. P., Mur L. C., Harmans C. J. P. M., Motohisa I., Noge H. // Appl. Phys. Lett. (1994). 64. 2379.
34. Nakazato K., Thornton T. J., White J., Ahmed H. // Appl. Phys. Lett. (1992). 61. 3145.
35. Fujisawa T., Hirayama Y., Tarucha S. // Appl. Phys. Lett. (1994). 64. 2250.
36. Park K.-H., Ha I. S., Yun W. S., Shin M., Park K.-W., Lee E.-H. // Appl. Phys. Lett. (1997). 71. 1469.
37. Leobanduhg E., Guo L., Chou S. Y. // Appl. Phys. Lett. (1995). 67. 2338.
38. Nakajima A., Futatsugi T., Kosemura K., Fukano T., Yokoyama N. // Appl. Phys. Lett. (1997). 70. 1742.
39. Crouch C. H., Livermore C., Westervelt R. M., Campman K. L., Gossard A. C. // Appl. Phys. Lett. 71. 817 (1997).
40. Blick R. H., Haug R. J., Weis I., Pfannkuche D., Klitzing K. V., Eberl K. // Phys. Rev. B. (1996). 53. 7899.
41. Averin D. V., Likharev K. K. Mesoscopic Phenomena in Solids (Eds B. L. Altshuler, P. A. Lee, R. A. Webb). Amsterdam: Elsevier, 1991. 173 p.
42. Korotkov A. N. Molecular Electronics (Eds J. Jortner, M. A. Ratner) (Oxford: Blackwell) (to be published).
43. Yano K. et al. // IEEE Trans. on Electron. Dev. (1994). 41. 1628.
44. Takahashi Y. et al. // Electron. Lett. (1995). 31. (2). 136.
45. Chen W., Ahmed H. // Vac. Sci. Technol. B. 13. 2883. (1995).
46. Matsumoto K. et al. // Appl. Phys. Lett. (1996). 68. 34.
47. Schonenberger C., Houten H., Donkersloot H. C. // Europhys. Lett. (1992). 20. 249.
48. Dorogi M. et al. // Phys. Rev. B. (1995). 52. 9071.
49. Nejoh H. Nature (London) 353. 640. (1991).
50. Fischer C. M. et al. // Europhys. Lett. 28. 129. (1994).
51. Зубилов А. А. и др. // Письма в ЖЭТФ. (1994). № 20 (5). С. 41. [Tech. Phys. Lett. 20. 195. (1994)].
52. Dubois J. G. et al. Coulomb staircase and quantum size effects in tunneling spectroscopy on ligand stabilized metal clusters. Preprint. М.: Изд-во МГУ, 1995.
53. Солдатов Е. С. и др. // Письма в ЖЭТФ. (1996). 64. 510. [JETPLett. (1996). 64. 556].
54. Lakovenko S. A. et al. Thin Solid Films. (1996). 284—285. 873.
55. Губин С. П. и др. // Неорганические материалы. (1996). № 32 (10). С. 1265. [Inorg. Mat. (1996) 32. 1111].
56. Яковенко С. Д. и др. // Неорганические материалы. (1996). № 32 (10). С. 1272. [Inorg. Mat. (1996). 32. 1118].
57. Gaines G. L. Insoluble monolayers at liquid-gas interfaces (New York: Interscience Publ., 1966).
58. Аверин А. Д., Коротков А. Н. // ЖЭТФ. 1990. 94. 1661. [Sov. Phys./ETP 70. 937. (1990)].
59. Knobel R. G., Cleland A. N. // Nature. 2003. 424. 291.
60. Devoret M. H., Schoelkopf R. J. // Nature. 2000. 406. 1039.
61. Jpn J. Appl. Phys. 38. (1999). 5851.

УДК 621.689-022.53:615.47

А. С. Кондратьев, канд. техн. наук, **В. Б. Митренин**,
К. Ю. Сенчик, канд. медиц. наук,
ЦНИИ робототехники и технической кибернетики,
г. Санкт-Петербург,
Н. Ф. Васильев, канд. техн. наук, **А. Д. Юхнев**,
Санкт-Петербургский Государственный политехнический
университет

НАСОС ДЛЯ МЕХАТРОННЫХ ПЕРФУЗИОННЫХ МЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМ

Рассмотрены вопросы проектирования мехатронных систем медицинского назначения и конструирования входящих в их состав модулей на базе принципа "открытой архитектуры". Применение интегрированных датчиков и актиоаторов в сочетании с микропроцессорной техникой обеспечивает простоту модификации и широкий спектр использования мехатронных систем, что показано на примере перфузионной медицинской системы и ее ключевого модуля — перфузионного насоса.

Введение

Современные тенденции построения технических систем — интеллектуализация и миниатюризация — определяют рост требований к изделиям и устройствам широкого круга применения, включая медицинское направление. Усложнение технологий проведения операций при увеличении параметров управления и контроля, с одной стороны, и необходимость создания удобной и эргономичной среды оператора, с другой, приводят к идеологии построения медицинской техники, базирующейся на принципах функционального интегрирования подсистем с использованием современной интеллектуальной микросистемной компонентной базы. Конструктивно-исполнительные подсистемы, включая механические актиоаторные узлы, проектируются на основе мехатронных подходов и производятся с использованием микро- и нанотехнологий, что обеспечивает интенсивный путь развития технических систем.

Одним из перспективных направлений с точки зрения создания востребованных на рынке потребительских средств меди-

цинской аппаратуры является разработка мехатронных систем на основе микросистемных компонентов. Актуальность подобной разработки обусловлена углублением понимания механизмов патологических процессов и ростом требований к операционному оборудованию на современном уровне развития медицинской науки.

В настоящее время формируются новые направления лечебных и профилактических мероприятий в целях улучшения качества жизни, увеличения ее продолжительности, сохранения трудоспособности, в том числе — в условиях воздействия экстремальных факторов внешней среды. Новые достижения в области здравоохранения дают импульс к созданию более совершенной медицинской техники, а ее внедрение в клиническую практику позволяет совершенствовать и оптимизировать методики лечения.

Тем не менее, практически все медицинские актиоаторные аппараты (исполнительные устройства), как и прежде, требуют непосредственного управления врачом, что повышает риск негативного проявления человеческого

фактора [1]. Использование достижений в области кибернетики и информатики позволяет существенно снизить его влияние за счет дополнительного объективного и внеэмоционального канала контроля.

Изложенные соображения, а также анализ многолетнего собственного клинического опыта работы в области экстракорпорального кровообращения привели к расширению спектра разработок кибернетических мехатронных систем медицинского назначения с использованием современной элементной базы МСТ и принципов мехатроники.

Проектирование мехатронных перфузионных медицинских систем

Совокупность технических средств, осуществляющих в составе кибернетической биотехнической системы экстракорпоральную (вне организма) регулируемую циркуляцию крови или ее компонентов, спинномозговой жидкости, а также лекарственных препаратов, принято называть *мехатронной перфузионной медицинской системой*. Подобные системы часто являются составляющей частью систем жизнеобеспечения.

Необходимым условием построения мехатронной системы является системная интеграция трех элементов — механики, электроники и управляющей вычислительной техники. При этом составляющие части не просто дополняют друг друга, но объединяются таким образом, что система обладает качественно новыми свойствами [2, 3]. Мехатронные перфузионные медицинские системы предназначены для реализации медицинской методики лечения или профилактики посредством организации потока и обработки биологической жидкости или медицинского препарата, создаваемого перфузионными на-

сосами в соответствии с алгоритмом применения системы.

Технические средства медицинской перфузии должны удовлетворять следующим основным требованиям [4, 5]:

- точное и стабильное дозирование;
- обеспечение минимальных сдвиговых напряжений в потоке жидкости;
- управление и контроль в реальном времени;
- отсутствие контакта жидкости с деталями технических средств;
- универсальность;
- возможность работы в полуавтоматическом или автоматическом режиме;
- компактность.

Совокупность этих требований, а также необходимость постоянного совершенствования систем по мере уточнения медицинских методик определяют, с одной стороны, необходимость применения современных гибких систем проектирования (CAD, Pro/ENGINEER) и, с другой стороны, — мехатронного подхода к разработке высокointегрированной техники на основе расчетных и экспериментальных требований к условиям транспортирования биологической жидкости.

На рис. 1 представлена структурная схема мехатронной перфузионной медицинской системы (МПМС). Для осуществления регулируемой циркуляции в каждом канале применяется мехатронный модуль насоса. В ЦНИИ РТК создается модельный ряд таких блоков — роликовые насосы "Марс".

В контур управления системы включен пациент, показатели объективного состояния которого автоматически измеряются и передаются в процессор перфузионной системы. К таким показателям относятся: артериальное давление, частота сердечных сокращений, частота дыхания, пульсоксиметрия, температура, нервно-мышечная проводимость и др. К элек-

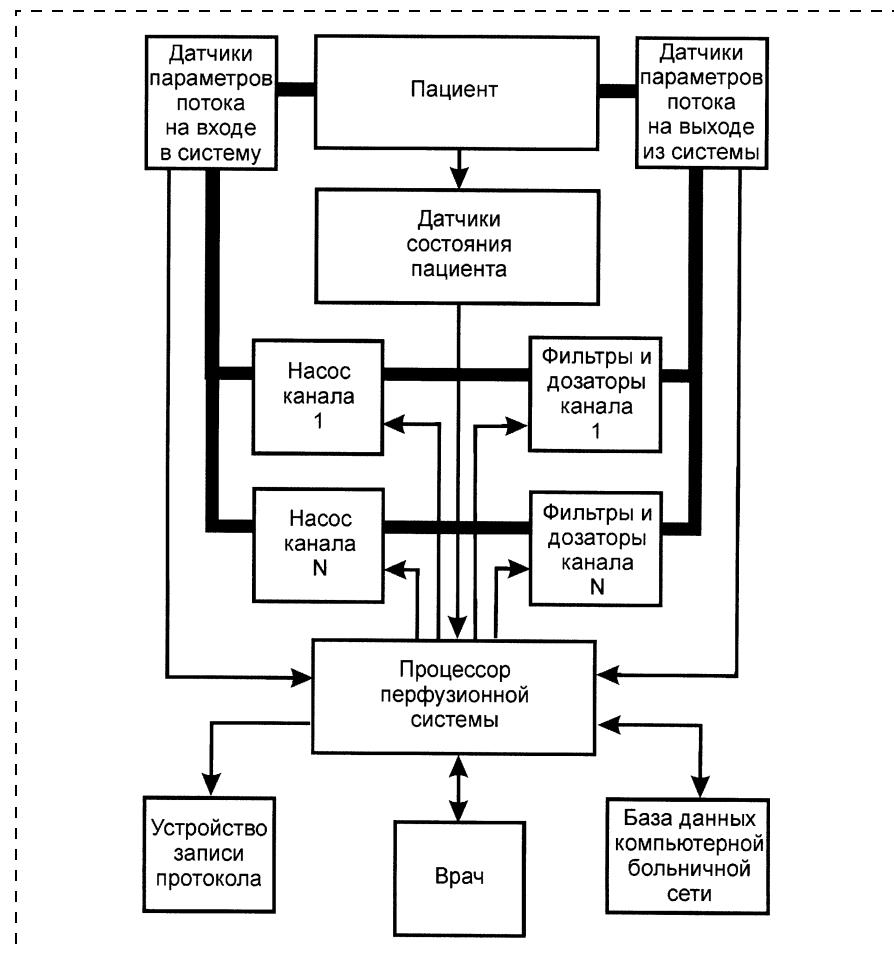


Рис. 1. Структурная схема мехатронной перфузионной медицинской системы

тронным датчикам измерения параметров потока относятся датчики давления, скорости потока (флюметры), температуры, наличия гетерогенных включений (пузырьков газа) в потоке и др. Кроме обеспечения необходимо го диапазона измерения и точности показателей жестким требованием к датчикам является отсутствие контакта.

В ЦНИИ РТК для комплектования МПМС наряду с обычными ультразвуковыми датчиками проводится разработка лазерных датчиков потока (лазерных флюметров). Такие датчики, в отличие от ультразвуковых аналогов, обеспечивают более высокую точность измерения. Кроме этого, лазерное зондирование можно использовать для получения дополнительной информации о

потоке, в частности, оно может быть применено при разработке датчика наличия мелких пузырьков. После проведения соответствующих исследований лазерное спектральное зондирование позволит также проводить экспресс-анализ физического и химического состава крови пациента.

Предлагаемая схема позволяет врачу (оператору) не только управлять операцией, но, при необходимости, через компьютерную сеть больницы вводить в процессор системы из имеющейся в сети базы данных сведения о пациенте и проводимой операции. В системе предусмотрено внешнее устройство для записи протокола действий врача, его идентификационных данных и сведений о состоянии пациента в ходе опе-

рации с формированием архивной "карточки".

Ключевой особенностью построения рассматриваемой медицинской перфузионной системы является принцип "открытой архитектуры", что радикально отличает ее от других известных систем [5]. Данный принцип позволяет упростить модификацию системы, добавление новых элементов и удаление ненужных или неисправных. Бесконтактный способ транспортировки жидкости дает возможность распространить принцип "открытой архитектуры" с информационных магистралей на магистрали потока. Подключение насоса (или бесконтактного датчика) к контуру течения жидкости может быть проведено без остановки работы системы.

Для того чтобы не только не потерять легкость в обращении с перфузионной системой, а наоборот, максимально упростить процедуру инсталляции устройств, целесообразно разработать единый стандарт их подключения к общейшине системного процессора. При этом определение типа подключаемого устройства будет выполняться автоматически, а уточнение его расположения (в случае необходимости) — в форме диалогового запроса персоналу без требований к квалификации последнего.

Устройство перфузионного насоса

Роликовый насос обеспечивает перекачку по пластмассовой магистрали биологической жидкости или лекарственного препарата с заданными параметрами [6]. Транспортировка жидкости осуществляется без нарушения ее стерильности, так как нет соприкосновения с элементами насоса, а магистраль является одноразовой. Насосный модуль позволяет прецизионно регулировать степень пережатия пластмассовой

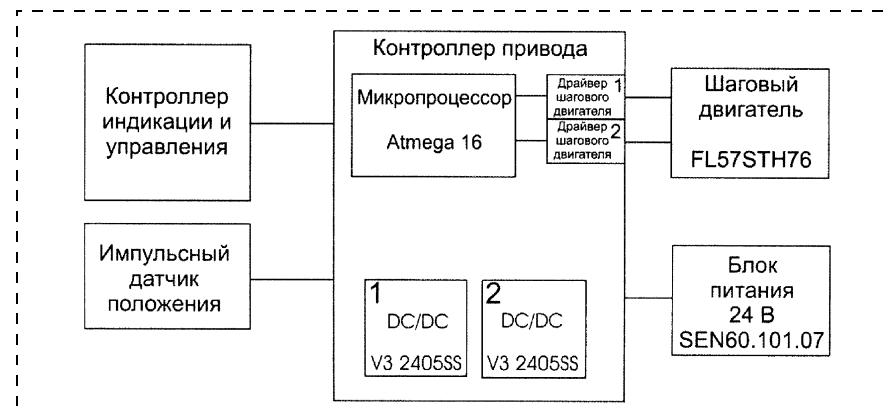


Рис. 2. Структурная схема роликового перфузионного насоса "Марс"

магистрали (окклюзию), в том числе во время работы.

На рис. 2 представлена структурная схема роликового перфузионного насоса "Марс", на рис. 3, в — его внешний вид.

Привод насоса "Марс" включает три основные подсистемы:

- двухфазный гибридный шаговый двигатель FL57STH76;
- инкрементный импульсный датчик положения ЛИР-119А;
- блок контроллера привода.

Система энергопитания представляет собой модульный AC/DC конвертор со стабилизированным выходным напряжением 24 В SEN60.101.07.

Блок контроллера привода содержит:

- два драйвера шагового двигателя LMD18245;
- микропроцессорный контроллер привода Atmega 16;
- вторичные DC/DC конверторы 2405SS.

Электропривод строится по принципу подчиненного регулирования на базе двух контуров регулирования момента потока за счет управления силой тока и частоты вращения за счет управления частотой следования импульсов. Контур момента организуется посредством позиционной модуляции токов двухфазной обмотки двигателя, при этом фазы токов задаются таким образом, чтобы обеспечивать оптимальное значение момента двигателя при

каждом положении ротора на межзубцовом интервале. Амплитуда силы тока определяется по сигналу ошибки с датчика положения.

Системы подчиненного регулирования обладают известными преимуществами. Прежде всего — это удобство настройки и возможность ограничения внутренних координат регулирования. Релейные регуляторы тока обеспечивают предельное быстродействие токовых контуров и ограничение силы тока обмоток и силовых ключей в допустимых пределах.

Примененные принципы управления электроприводом позволяют существенно снизить уровень звуковой мощности в сравнении с обычными приводами на базе шаговых двигателей. Использование точного датчика положения ЛИР-119А дает возможность получить широкий диапазон регулирования частоты вращения привода (почти два порядка) для всего спектра диаметров применяемых пластмассовых магистралей.

Контроллер привода строится на основе двух драйверов привода и микропроцессора. Драйвер привода является импульсным мостовым транзисторным преобразователем с внутренним релейным регулятором выходного тока. Он имеет два входа для регу-

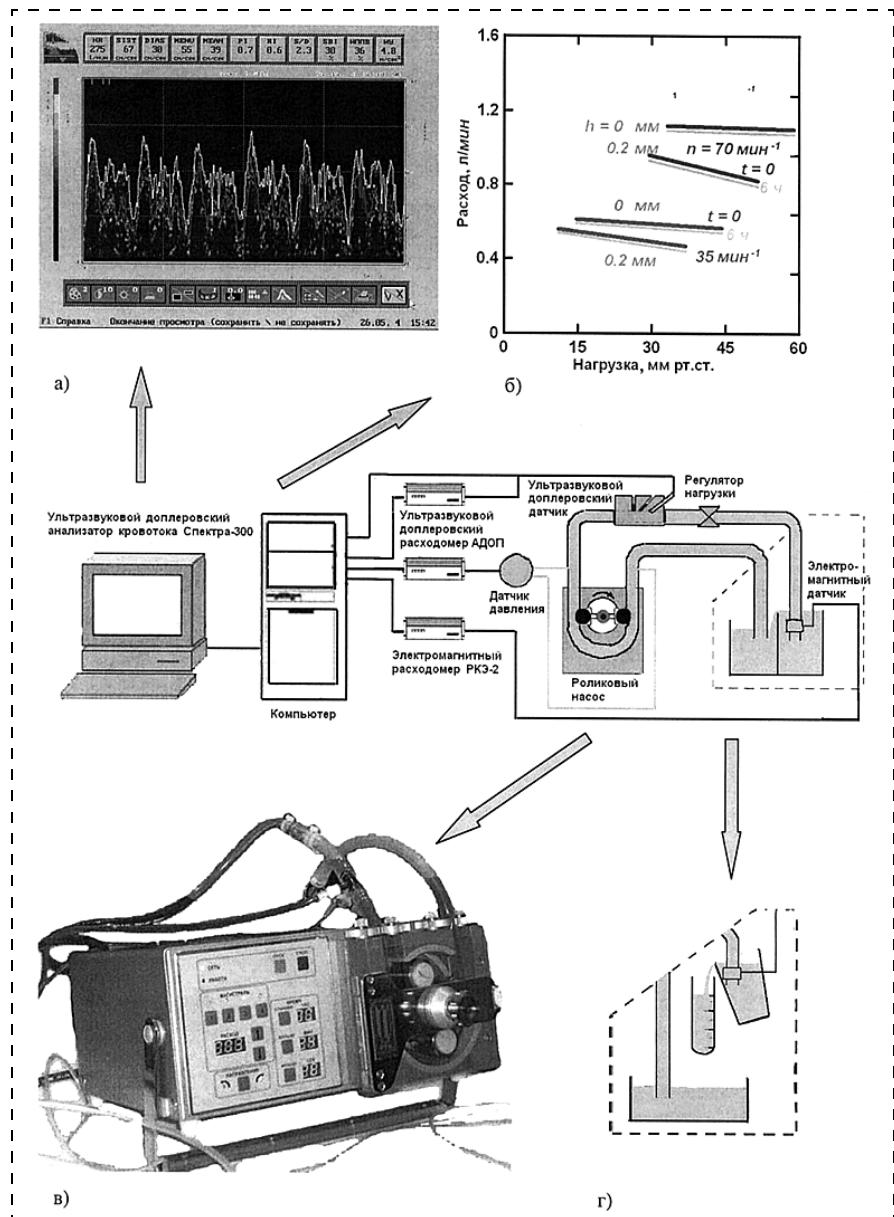


Рис. 3. Стенд для исследования характеристик роликового насоса:

а — доплерограмма; б — расходно-напорные характеристики для различных параметров работы роликового насоса; в — роликовый насос "Марс"; г — блок калибровки расходомеров

лирования выходного тока: аналоговый и цифровой. По цифровому входу от микропроцессора задаются сигналы позиционной модуляции тока обмотки двигателя, а по аналоговому — сигнал регулятора частоты вращения привода. Драйверы привода имеют также внутреннюю защиту по силе тока и температуре.

Модуль индикации и управления в реальном времени осуществляет:

- обработку данных с клавиатуры;
- вывод необходимой информации на светодиодные индикаторы;
- формирование управляющих сигналов для модуля контроллера привода;
- взаимодействие с внешними устройствами посредством унифицированного логического интерфейса USART.

Возможность высокоскоростного аппаратного и информаци-

онного сопряжения позволяет интегрировать роликовые перфузионные насосы "Марс" в сложные медицинские системы, осуществлять дистанционный контроль, прямое и телеконтроль, обработку и архивирование потока информации в процессе работы, проводить анализ текущего состояния системы и внешней среды, а также принимать оперативные решения о наиболее эффективной стратегии управления. Это, в свою очередь, дает возможность скорректировать алгоритмы и программы управления МПМС.

Применение современной элементной базы (к сожалению, исключительно импортной), например, высокопроизводительных FLASH-микроконтроллеров Atmega-16, имеющих 16 Кбайт внутрисистемной памяти и поддерживающих JTAG-стандарт, дает возможность быстрого обновления программного обеспечения для расширения или изменения возможностей имеющейся системы. Как следствие, интуитивный интерфейс пользователя, высокая надежность и отказоустойчивость, динамическая и статическая точность управления, широкий диапазон управления параметрами, компактность и низкое энергопотребление значительно расширяют спектр возможных применений роликовых насосов "Марс" и МПМС на их основе в самых различных областях медицины.

На рис. 3 приведен стенд для исследования параметров роликового насоса "Марс", на базе которого наряду с самим насосом апробирован и отработан ряд элементов мехатронной перфузионной медицинской системы.

Заключение

Реализация принципов мехатроники в медицинской технике дает ряд системных эффектов: повышение надежности, сниже-

ние массогабаритных показателей, улучшение электромагнитной совместимости приборов и т. д. Такой подход эффективен при наличии компонентов, имеющих достаточный уровень интеграции и наделенных "интеллектуальными" функциями. В этом смысле современная элементная база предоставляет для разработчиков мехатронных устройств широкие возможности, прежде всего, на основе унифицированных логических, гальванических и конструктивных интерфейсов.

Использование идеологии "открытой архитектуры" снижает требования к уровню квалификации персонала, что повышает на-

дежность работы системы, играющую ключевую роль для медицинского оборудования. Реализация рассмотренных подходов на базе создаваемого и уже разработанного оборудования позволяет динамично перестраивать функциональную структуру устройств в целях обеспечения решения непрерывно расширяющегося круга задач построения надежной и удобной в эксплуатации медицинской техники.

Список литературы

1. Лищук В. А., Данилевич А. И., Гаврилов А. В., Шевченко Г. В. Об инфраструктуре информационной поддержки клинической медицины // Медицинская техника. 2003. № 4. С. 36–42.
2. Лопота В. А., Юрьевич Е. И. Мехатроника — основа интеллектуальной техники будущего // Микросистемная техника. 2002. № 7. С. 1.
3. Подураев Ю. В., Кулешов В. С. Принципы построения и современные тенденции развития мехатронных систем // Мехатроника. 2000. № 1. С. 5–10.
4. Арзуманян О. С. Сравнительный анализ и оптимизация насосов искусственного кровообращения // Автореферат диссер. на соискание уч. степ. к. т. н., Ереван, 2004.
5. Гринвальд В. М., Киселев Б. Л. Перфузионные системы для гемодиализа // Медицинская техника. 2004. № 2. С. 3–7.
6. Митренин В. Б., Попова А. И., Сенчик К. Ю., Федоров А. Ф. Разработка медицинского малопоточного универсального насоса "МАРС" // Тр. конф. "Новые биокибернетические и телемедицинские технологии 21 века для диагностики и лечения заболеваний человека". Петрозаводск, 2003. 65 с.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.3

Г. М. Альтшуллер, канд. техн. наук,
В. Л. Вакс, канд. физ.-мат. наук,
К. П. Гайкович, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Институт физики микроструктур РАН,
г. Нижний Новгород

СВЧ ЗОНДИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГЛУБИННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ НАГРЕВЕ И ОХЛАЖДЕНИИ ЖИВЫХ ТКАНЕЙ¹

Для зондирования динамики подповерхностного профиля температуры при нагревании и охлаждении тканей тела человека применен метод ближнепольной СВЧ радиометрии, использующий зависимость глубины формирования принимаемого излучения от размера приемной антенны. Задачи восстановления температурного распределения при измерениях биологической ткани в воде и в воздухе сводились к решению уравнений Фредгольма 1-го рода.

Введение

Возможности использования данных СВЧ радиометрических измерений для подповерхностного температурного зондирования (см., например, [1–36]) исследуются на протяжении уже более чем двух десятилетий, однако полученные результаты до сих пор не оправдывают ожиданий. Это обусловлено трудностями учета влияния свойств поверхности отражения и достижения высокой точности калибровки (особенно в нескольких каналах), а также сложностью решения возникающих обратных задач, которые, как правило, относятся к классу некорректных.

Влияние отражения от поверхности компенсировалось двумя способами: путем создания согласованных со средой контактных антенн [4–6, 31, 33–35] для измерений в ближней зоне исследуемой среды и путем измерений при наличии фонового излучения, близкого по яркостной температуре к температуре поверхности среды (например, под отражающим экраном [15, 17, 28, 17] или на частоте в линии сильного атмосферного поглощения [23]) — при измерениях в волновой зоне.

Общий подход к решению задач формирования принимаемого антенной теплового излуче-

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 04-02-16120 и программы Отделения физических наук РАН "Радиоэлектронные методы в исследовании природных сред и человека".

ния от среды, находящейся в ближней зоне антенны, рассматривался в общем виде в [1, 8, 13, 14] и использовался при решении конкретных задач во многих последующих работах (см., например, [4–6]).

Для зондирования подповерхностного профиля температуры применялись, как правило, многочастотные методы с использованием радиометров на нескольких длинах волн. Трудности таких измерений оказались столь существенными, что эти методы (за единичными исключениями) практически не вышли за рамки научных экспериментов. Для сред, в которых отсутствуют внутренние тепловые источники, так что их глубинная температурная эволюция определяется только граничными условиями на поверхности, была предложена и использована методика восстановления подповерхностного профиля температуры по измерениям динамики яркостной температуры излучения среды только на одной длине волны [24, 28].

Другой одноволновой метод, в разных вариантах предложенный в [8, 9, 21, 31, 34], основан на зависимости эффективной глубины формирования излучения, принимаемого контактной антенной, от ее размеров. Эта зависимость проявляется при размерах антенны, меньших длины волны в излучающей среде. Так, в [8] предлагалось выделять различные моды, возбуждаемые средой в волноводе; для этих мод получены уравнения формирования в одномерно-неоднородной среде, причем для плавно-неоднородных сред — в явном виде. В [9, 33] измерялись передаточные функции различных контактных антенн и предлагалось использовать их набор для восстановления температурного профиля из системы уравнений с использованием таких эмпирических передаточных функций; в [21, 31, 34, 36] предлагался подход, близкий к описанному выше, основанный на зависимости глубины формирования принимаемого излучения от размера или высоты антенны над поверхностью. В [21] для полупространства однородной среды был выполнен анализ формирования излучения с учетом передаточной функции ближнепольной антенны и получены интегральные соотношения, связывающие излучение и профиль температуры. Показано, что с уменьшением размера апертуры антенны или ее высоты над поверхностью среды вклад квазистационарных колебаний поля в измеряемый сигнал становится определяющим. При этом эффективная толщина слоя, в котором формируется принимаемое излучение, уменьшается и для маленьких антенн становится много меньше толщины скин-слоя, определяемого поглощением. Эти эффекты были обнаружены и исследованы в

[31], а в [34, 36] использованы для восстановления подповерхностного профиля температуры водной среды.

В данной работе развивается теория ближнепольных измерений для случая антенны в пространстве однородной поглощающей среды; передаточные функции антенн сравниваются с теми, которые получаются при измерениях однородного полупространства. С использованием полученных интегральных уравнений метод подповерхностной температурной диагностики, основанный на зависимости эффективной глубины формирования теплового радиоизлучения от размера электрически малой контактной антенны, впервые использован для контроля глубинной температуры тканей тела человека. При решении уравнений применяется метод обобщенной невязки Тихонова.

Теория ближнепольных радиометрических измерений

В общем случае уравнение для принимаемой эффективной яркостной температуры получается из флукутационно-диссипационной теоремы для корреляционной функции флукуационных токов в поглощающей среде и теоремы взаимности в виде

$$T_B = \frac{\int T(\mathbf{r}) \varepsilon''(\mathbf{r}) |\mathbf{E}(\mathbf{r})|^2 dV}{\int \varepsilon''(\mathbf{r}) |\mathbf{E}(\mathbf{r})|^2 dV}, \quad (1)$$

где V — область, занимаемая поглощающей средой с мнимой частью комплексной диэлектрической проницаемости ε'' ; $T(\mathbf{r})$ — пространственное распределение температуры в среде; $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ — пространственное распределение спектральной компоненты (на рабочей частоте радиометра) электрического поля для случая, когда антenna работает в активном режиме. Распределение поля определяется как свертка соответствующей функции Грина (поля точечного диполя) с распределением тока в антенне по области антены. Функция Грина хорошо известна для случая антены в однородной поглощающей среде. Для случая диполя над однородным поглощающим полупространством проблема рассматривалась Зоммерфельдом еще в 1919 г.; ее развитие и обобщение для слоистой среды выполнены в [37–40]. Задача разрешима и для случая плавно-неоднородного полупространства [34]. Для антенн сложной формы развиты численные методы определения передаточной функции антены [25, 41].

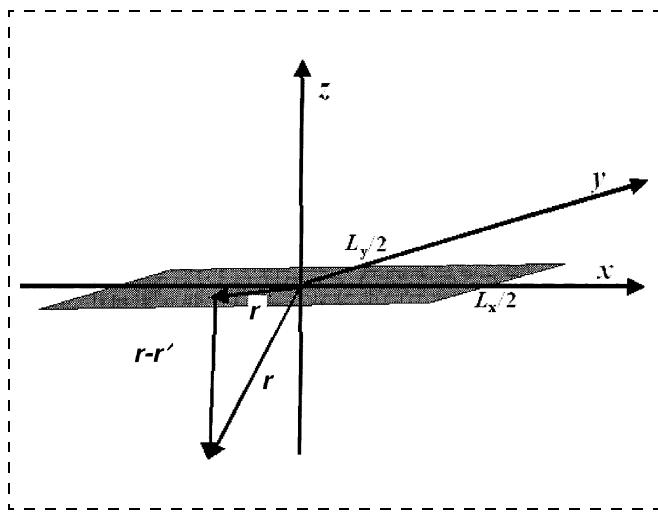


Рис. 1. Антenna в плоскости x - y (серым выделена двумерная область токового распределения)

В случае антенны над одномерно неоднородным по температуре и диэлектрической проницаемости полупространством $z \leq 0$ выражение (1) может быть представлено как

$$\begin{aligned} T_B &= \int_{-\infty}^0 T(z) K(z) dz = \\ &= \int_{-\infty}^0 T(z) \frac{\varepsilon''(z) \int \int |\mathbf{E}(x, y, z)|^2 dx dy}{\int_V \varepsilon''(z) |\mathbf{E}(x, y, z)|^2 dV} dz. \end{aligned} \quad (2)$$

Ядро K имеет единичную нормировку и может быть представлено как сумма волновой и ближнепольной компонент, которые связаны с соответствующими компонентами поля \mathbf{E} . Рассмотрим для

определенности антенну, расположенную в плоскости x - y (рис. 1).

Двумерное распределение тока в области антенны V' генерирует электрическое поле, представляющее сверткой функции Грина и распределения тока. В случае однородной поглощающей среды это поле имеет вид

$$\begin{aligned} \mathbf{E} = & -\frac{c}{4\pi i\omega\varepsilon} \int_{V'} \left[\frac{\mathbf{e}^{-ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|^2} \left\{ \left[-ik - \frac{2}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \right] \times \right. \right. \\ & \times \left. \left[-ik - \frac{1}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \right] + \frac{1}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|^2} \right\} (\mathbf{j}(\mathbf{r}'), (\mathbf{r}-\mathbf{r}')) \times \\ & \times (\mathbf{r}-\mathbf{r}') + \left\{ \frac{\mathbf{e}^{-ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|^2} \left[-ik - \frac{1}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \right] + \right. \\ & \left. \left. + k^2 \frac{\mathbf{e}^{-ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \right\} \mathbf{j}(\mathbf{r}') \right] dV', \end{aligned} \quad (3)$$

где $k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon}$; c — скорость света; ω — частота.

Ближнее поле диполя возрастает при $r \rightarrow 0$ как $1/r^3$, $1/r^2$, и относительный вклад этой компоненты в ядро K по отношению к волновой компоненте, пропорциональной $1/r$, тоже возрастает. Этот вклад зависит от характерных размеров антенны L_x , L_y , особенно при $z \ll L_x$, L_y . Ядро K может быть измерено экспериментально в среде с известными диэлектрическими параметрами (например, в воде) и заданным температурным распределением.

Можно представить (3) в виде двумерного разложения по поперечным волновым числам:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} = & -\frac{1}{i\varepsilon\omega} \int_{V'} \frac{1}{8\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp \left\{ -ik_x(x-x') - ik_y(y-y') \pm i\sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}(z-z') \right\}}{i\sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}} \times \\ & \times \left\{ j_x(x', y', z') \left[(k^2 - k_x^2) \mathbf{x}_0 - k_x k_y \mathbf{y}_0 \pm k_x \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} \mathbf{z}_0 \right] + j_y(x', y', z') \left[-k_y k_x \mathbf{x}_0 + (k^2 - k_y^2) \mathbf{y}_0 \pm \right. \right. \\ & \left. \left. \pm k_y \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} \mathbf{z}_0 \right] + j_z(x', y', z') \left[\pm k_x \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} \mathbf{x}_0 \pm k_y \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} \mathbf{y}_0 + \right. \right. \\ & \left. \left. + (k^2 \pm (k^2 - k_x^2 - k_y^2)) \mathbf{z}_0 \right] \right\} dk_x dk_y dV', \end{aligned} \quad (4)$$

которое для двумерного однородного распределения тока $j_x = \text{const}$ в плоскости $x-y$ (рис. 1) сводится к

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= -\frac{1}{i\epsilon\omega} \frac{j_x}{8\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} j_x(k_x, k_y) \times \\ &\times \frac{e^{-ik_x x - ik_y y \pm i\sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} z}}{i\sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}} \left[(k^2 - k_x^2) \mathbf{x}_0 - k_x k_y \mathbf{y}_0 \pm \right. \\ &\left. \pm k_x \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} \mathbf{z}_0 \right] dk_x dk_y; \\ j_x(k_x, k_y) &= \iint |j_x(x, y)| e^{ik_x x + ik_y y} dx dy = \\ &= 4 \frac{\sin k_x L_x / 2}{k_x} \frac{\sin k_y L_y / 2}{k_y}. \end{aligned} \quad (5)$$

Ближнепольные (квазистационарные) компоненты поля в (5) соответствуют волновым числам, для которых $k_\perp^2 > |k|^2$, $k_\perp^2 = k_x^2 + k_y^2$. Антенна, как фильтр пространственных частот, подавляет спектральные компоненты при $k_x > 2\pi/L_x$, $k_y > 2\pi/L_y$. Таким образом, ближнепольные компоненты подавляются при условии $L_x, L_y > \lambda/\sqrt{\epsilon}$ (λ — длина волны в вакууме), т. е. если размеры антенны больше длины волны в среде. В этом случае ядро (1) не зависит от размера антенны.

В случае однородной среды с неоднородным температурным профилем только по одну сторону симметричной антенны (т. е. $T = T(z)$ при $z < 0$; $T = \text{const} = T(0) = T_0$ при $z \geq 0$) из общего выражения (1) получаем:

$$\begin{aligned} T_B(L_x, L_y) &= \\ &= \frac{\int_{-\infty}^0 T(z) dz \iint |\mathbf{E}(x, y, z)|^2 dx dy + T(0) \int_0^\infty dz \iint |\mathbf{E}(x, y, z)|^2 dx dy}{\int_V |\mathbf{E}(x, y, z)|^2 dV}. \end{aligned} \quad (6)$$

Можно представить температурный профиль в виде $T(z, t) = T(0) + \Delta T(z, t)$, так что с учетом (5) уравнение (6) может быть представлено как

$$\begin{aligned} \Delta T_B(L_x, L_y) &= T_B(L_x, L_y) - T(0) = \\ &= \int_{-\infty}^0 \Delta T(z) \left[\iint |\mathbf{E}(x, y, z)|^2 dx dy / \int_V |\mathbf{E}(x, y, z)|^2 \right] dV dz = \\ &= \int_{-\infty}^0 \Delta T(z) K(L_x, L_y, z) dz; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} K(z, L_x, L_y) &= \tilde{K}(z, L_x, L_y) / \int_{-\infty}^0 \tilde{K}(z', L_x, L_y) dz'; \\ \tilde{K}(z, L_x, L_y) &= \iint |j_x(k_x, k_y, L_x, L_y)|^2 \left[\left| \frac{k_0^2 \epsilon - k_x^2}{\sqrt{k_0^2 \epsilon - k_\perp^2}} \right|^2 + \right. \\ &\left. + \left| \frac{k_x k_y}{\sqrt{k_0^2 \epsilon - k_\perp^2}} \right|^2 + k_x^2 \right] \exp(2 \operatorname{Im} \sqrt{k_0^2 \epsilon - k_\perp^2} z) d^2 k, \end{aligned}$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda$. Эффективную глубину формирования принимаемого излучения естественно определить как

$$d_{\text{eff}}(L_x, L_y) = \left| \int_{-\infty}^0 z' K(z', L_x, L_y) dz' \right|. \quad (8)$$

Тогда для линейного профиля $T(z)$ из (7) и (8) получается простое соотношение для приращения яркостной температуры:

$$\Delta T_B = \Delta T(z = -d_{\text{eff}}), \quad (9)$$

которое легко использовать для определения d_{eff} из измерений T_B . Эффективная глубина d_{eff} уменьшается с уменьшением размеров антенны из-за влияния ближнего поля ($d_{\text{eff}} \rightarrow 0$ при $L_x, L_y \rightarrow 0$), что позволяет рассматривать (7) как интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода для восстановления температурного профиля $T(z)$ из измерений зависимости $\Delta T_B(L_x, L_y)$. С точки зрения оптимизации постановки обратной задачи следует стремиться, чтобы значения d_{eff} равномерно перекрывали область зондируемых температурных вариаций. Следует также отметить, что $d_{\text{eff}} \rightarrow 0$ при $L_y \rightarrow 0$, $L_x = \text{const}$ из-за расходности ядра уравнения для одномерного токового распределения.

В случае измерений однородного полупространства $z \leq 0$, где $\epsilon'' = 0$ при $z > 0$, с помощью плоской контактной антенны (см. рис. 1) уравнение для яркостной температуры получается из (2) в виде [21, 23]:

$$T_B = \int_{-\infty}^0 T(z) K(z) dz; \quad (10)$$

$$\begin{aligned} K(z, h, L_x L_y) &= \\ &= \tilde{K}(z, h, L_x, L_y) / \int_{-\infty}^0 \tilde{K}(z', h, L_x, L_y) dz'; \end{aligned}$$

$$\tilde{K}^2(z, L_x, L_y) = \iint |j_x(k_x, k_y, L_x, L_y)|^2 \times \\ \times \left[\left| \frac{k_0 k_y}{k_{\perp} \sqrt{k_0^2 - k_{\perp}^2}} \right|^2 |T_E(k_{\perp})|^2 + \right. \\ \left. + \frac{k_x^2}{k_{\perp}^2} |T_H(k_{\perp})|^2 |n_{\parallel}^2| \right] \exp(2\text{Im} \sqrt{k_0^2 \varepsilon - k_{\perp}^2} z) d^2 k,$$

где

$$T_E = \frac{2 \sqrt{k_0^2 - k_{\perp}^2}}{\sqrt{k_0^2 - k_{\perp}^2} + \sqrt{\varepsilon k_0^2 - k_{\perp}^2}}; \\ T_H = \frac{2 \sqrt{\varepsilon} \sqrt{k_0^2 - k_{\perp}^2}}{\varepsilon \sqrt{k_0^2 - k_{\perp}^2} + \sqrt{\varepsilon k_0^2 - k_{\perp}^2}}$$

— френелевские коэффициенты;

$$|n_{\parallel}^2| = \left(\left| \sqrt{\varepsilon k_0^2 - k_{\perp}^2} \right|^2 + k_{\perp}^2 \right) / (\varepsilon |k_0^2|).$$

Следует отметить, что резкий рост поля (5) вблизи антенны приводит к нежелательному эффекту высокой чувствительности согласования антенны со средой к малым вариациям положения антенны. Даже тонкая пленка между средой и контактной антенной приводит к регистрируемым изменениям принимаемого сигнала. Это приводит к необходимости точной фиксации положения антенны при измерениях.

Для антенн с размерами $L_x, L_y > \lambda/\sqrt{\varepsilon}$ или на расстоянии $h > \lambda/\sqrt{\varepsilon}$ от поглощающей среды вклад ближнепольных компонент в принимаемое излучение быстро уменьшается. Ядро интегрального уравнения в этом случае практически не отличается от случая измерений в дальней зоне и не зависит от размера антенны, а эффективная глубина формирования излучения совпадает со скрин-слоем $d_{sk} = \lambda/(4\pi \text{Im} \sqrt{\varepsilon})$. Тогда восстановить температурный профиль можно только из многочастотных измерений $T_B(f)$ (см., например, [15–17]).

Результаты измерений

Зависимость глубины формирования принимаемого ближнепольного излучения от размеров антенны рассматривалась в [31, 34]. Результаты позволили начать разработку методов использования этой зависимости как нового источника информа-

ции о подповерхностном профиле температуры в водной среде [34, 36]. В данной работе этот новый подход используется для контроля подповерхностного профиля температуры в живых тканях тела человека в процессах их нагрева и охлаждения с последующей релаксацией. Результаты могут быть особенно интересны для медицинских приложений при лечении методом гипертермии.

При измерениях область бицепса нагревалась или охлаждалась в нагретой или холодной воде соответственно. Далее наблюдалась релаксация к исходному температурному состоянию в воздухе при комнатной температуре. Измерения в воде и воздухе проводились с использованием симметричных контактных антенн с размерами $L_x = L_y = D = 0,5; 1; 2$ и 3 см (рис. 2, см. вторую сторону обложки), подключаемых к радиометру на рабочей длине волны $\lambda = 31$ см. Принимая во внимание возможные источники ошибки, точность измерений оценивается величиной $\delta T_B = 0,4$ К. Антенны были согласованы как с водной средой, так и с телом (коэффициент отражений составлял $R^2 < 0,04$).

Задача ближнепольных измерений на границе двух сред ($z > 0$ — вода или воздух, $z \leq 0$ — ткани тела) рассматривалась на основе развитой выше теории. В водной среде для анализа использовалось уравнение (7), полученное для диэлектрически однородной среды, поскольку диэлектрические параметры воды и мышечной ткани при определенном значении солености воды находятся в хорошем соответствии, что проверяется наличием согласования антенны с обеими средами (отсутствием отраженного сигнала при подключении в активном режиме). Для восстановления профиля температуры в процессе релаксации на воздухе использовалось уравнение (10), полученное для случая измерений на границе полупространства с поглощающей средой. Значения d_{eff} измерялись в водной среде с линейным профилем температуры аналогично [31, 34, 36]. Были получены значения $d_{eff} = 0,14; 0,41; 0,88$ и $1,2$ см для антенн с размерами $D = 0,5; 1; 2$ и 3 см соответственно. Толщина скрин-слоя в тканях составляла около 2 см. Ядро интегрального уравнения для случаев измерений в воде и в воздухе показано на рис. 3.

Можно видеть, что разница в формировании принимаемого излучения тела на границе вода — тело и воздух — тело незначительна и, вероятно, обусловлена эффектом полного внутреннего отражения для некоторого интервала пространственного спектра на границе раздела воздух — тело.

Результаты измерений в водной среде показаны на рис. 4. На основании этих данных динамика глубинного профиля температуры была восстановлена путем решения интегрального уравнения

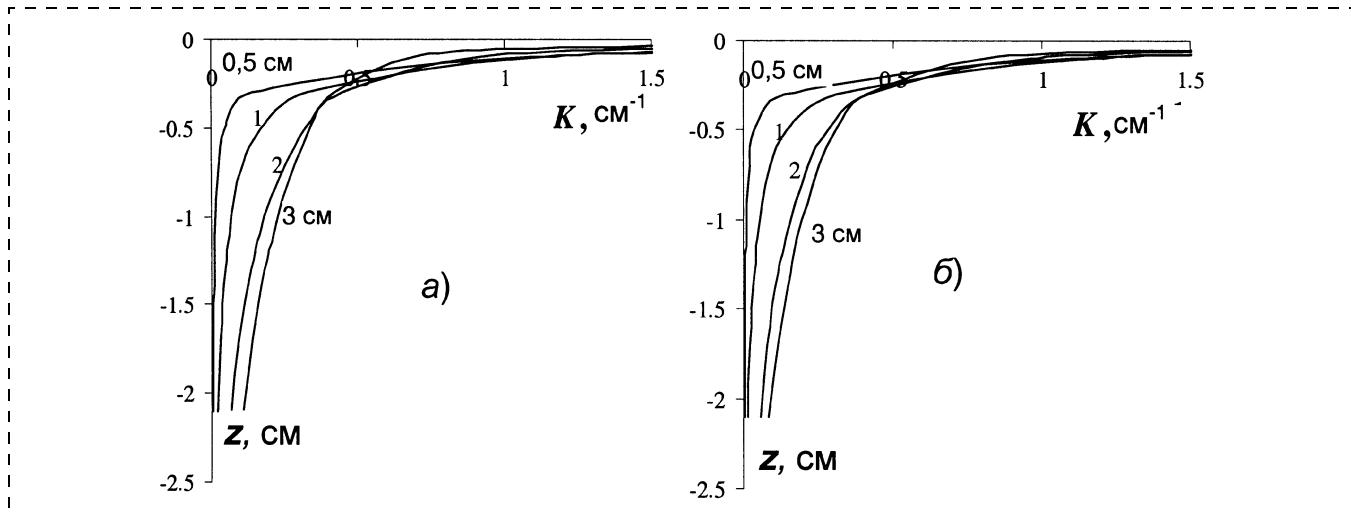


Рис. 3. Ядро интегрального уравнения для антенн с размером $D = 0.5; 1; 2$ и 3 см в случае измерений в воде (а) и в воздухе (б)

Фредгольма 1-го рода (7) методом обобщенной невязки Тихонова так же, как в [34, 36] при восстановлении динамики температуры водной среды. Восстановленная динамика профиля температуры в тканях тела при нагреве и охлаждении показана на рис. 5 (см. вторую сторону обложки).

Как можно видеть на рис. 5, процессы нагрева и охлаждения тканей сходны между собой. В начале процессов приповерхностный слой нагревается (охлаждается) очень быстро; далее температура этого слоя меняется очень медленно, причем охлаждение продолжается дольше, чем нагрев, поскольку, вероятно, организм более активно сопротивляется нагреву, который может повредить тка-

ни. И нагрев, и охлаждение постепенно, с запаздыванием по времени, которое увеличивается с глубиной, проникают в глубь тканей.

Аналогичные измерения динамики яркостной температуры на воздухе и восстановление динамики подповерхностной температуры в процессе релаксации после нагрева или охлаждения в воде представлены на рис. 6 и рис. 7 (см. вторую сторону обложки). Температурные профили получались путем решения уравнения (10) методом обобщенной невязки Тихонова.

Видно, что процесс релаксации в приповерхностном слое начинается сразу же после извлечения тела из водной среды, тогда как в более глубоких

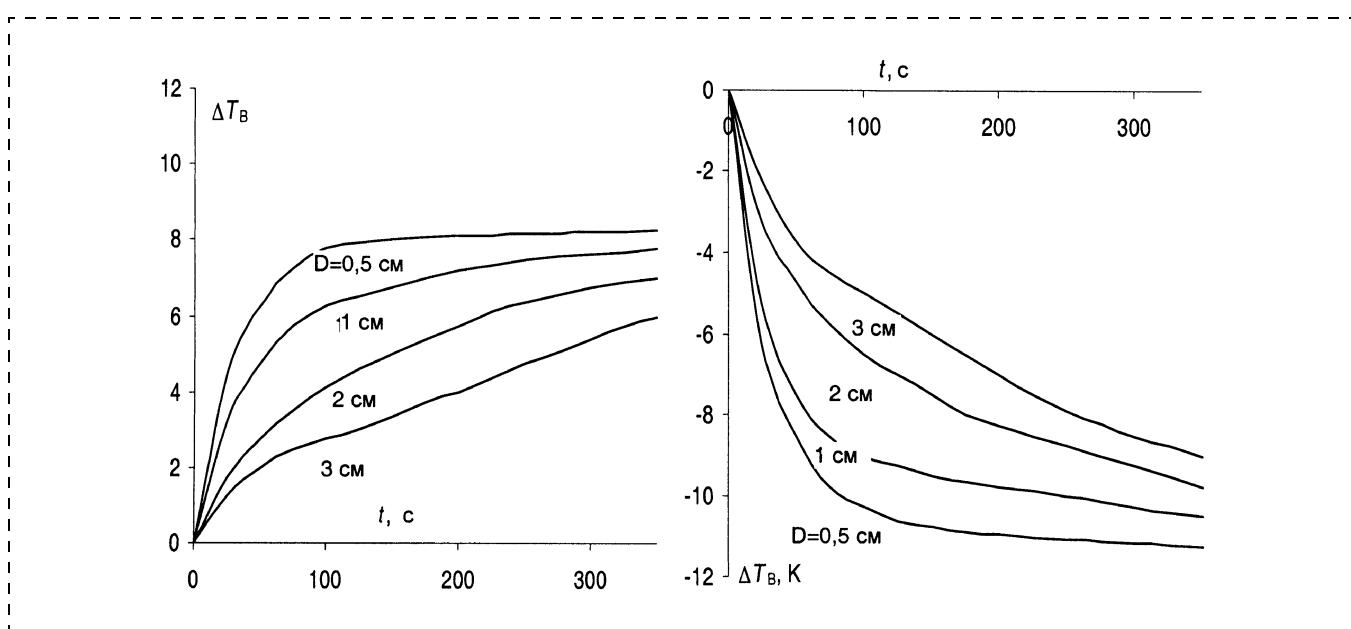


Рис. 4. Измененная динамика $\Delta T_B(t)$ в процессах нагрева (слева) и охлаждения (справа) тканей тела

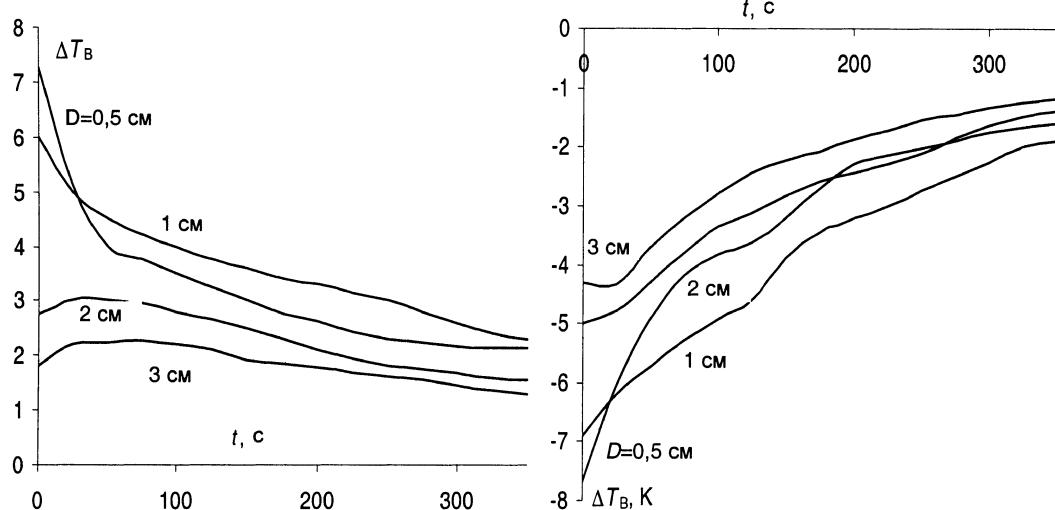


Рис. 6. Измеренная динамика $\Delta T_B(t)$ в процессе релаксации после нагрева (слева) и охлаждения (справа) тканей тела

слоях в течение некоторого времени еще продолжается нагрев (или охлаждение), связанный с механизмом теплопроводности. Динамика яркостной температуры, измеренная антеннами малых размеров, чувствительна к температуре приповерхностного слоя, тогда как самые большие антенны отображают динамику температуры более глубоких слоев, в частности, продолжающийся некоторое время нагрев (или охлаждение) в начальный период релаксации.

На рис. 8 представлены восстановленные температурные профили для двух моментов времени в процессе нагрева тканей.

Температурный профиль при $t = 700$ с соответствует стационарному распределению, которое устанавливается через некоторое время после начала нагрева. Можно использовать это стационарное распределение, чтобы определить функцию распределения тепловых источников тела по глубине из уравнения теплопроводности, которое согласно [32] имеет вид

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = k\nabla^2 T + c_b\rho_b m\rho(T_a - T), \quad (11)$$

где k — коэффициент теплопроводности; c_b — удельная теплоемкость крови; ρ_b — плотность крови; m — скорость кровотока на единицу массы тканей; c — удельная теплоемкость тканей; ρ — плотность тканей; $T_a = 37$ °C — температура в артериях.

В случае стационарного распределения, учитывая поперечную симметрию задачи, можно получить соотношение для приращения потока теплоты, связанное с нагревом тела с поверхности (при $t = 700$ °C):

$$k \frac{d^2 \Delta T(z, t)}{dz^2} = -\Delta W(z) \approx -v_s \Delta T, \quad (12)$$

где $v_s = c_b \rho_b m \rho$ — коэффициент теплообмена крови. Используя стационарный профиль температуры при $t = 700$ с, показанный на рис. 8, при $k = 0,38$ Вт · м⁻³К⁻¹ [42] можно вычислить из (12) изменение функции распределения источников те-

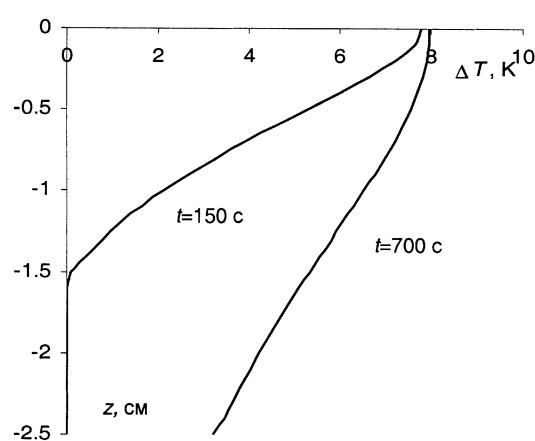


Рис. 8. Восстановленные профили температуры для двух моментов времени в процессе нагрева тканей тела в воде (150 и 700 с после начала нагрева). Профиль $\Delta T(z, t = 700$ с) соответствует стационарному распределению

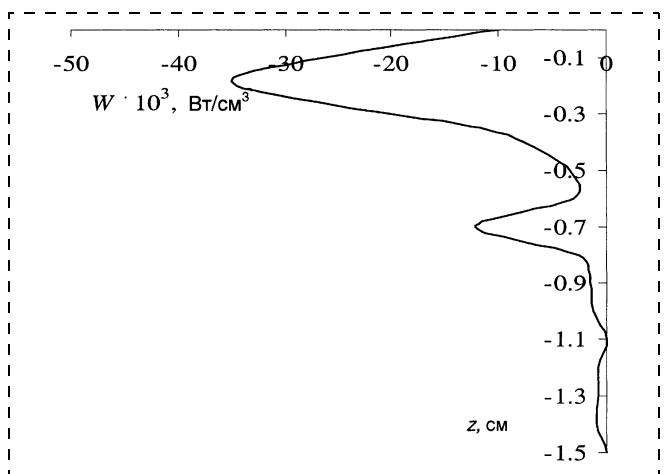


Рис. 9. Глубинное перераспределение источников теплоты в теле, связанное с воздействием горячей воды

плоты $\Delta W(z)$, связанное с воздействием горячей воды. Результат этого вычисления показан на рис. 9.

В перераспределении источников теплоты по глубине в ответ на тепловое воздействие поверхностного нагрева тела можно отметить два максимума стока тепла. Первый расположен под слоем кожи, а второй — под тонким слоем жира. Используя рассчитанное распределение $W(z)$, можно оценить значение v_s из (12). Оценка этой величины по максимуму дает значение $v_s = 5 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-3}\text{К}$. Конечно, следует учитывать неопределенность параметров среды, использованных для определения этой оценки, поэтому результаты имеют скорее качественный уровень точности.

Заключение

Представленные результаты позволяют сделать вывод, что метод ближнепольной радиометрии позволил получить новые результаты при зондировании тела человека и имеет определенные перспективы к дальнейшему развитию, прежде всего, для анализа температурной динамики тела человека. В этом случае легче обеспечить условие неизменности контакта антенны и сохранение согласования антенн в процессе измерений, включая калибровку. Соотношения, полученные для принимаемого излучения в сплошной поглощающей среде позволили установить, что ближнепольный эффект зависимости размеров области формирования принимаемого излучения сходен с аналогичным эффектом при измерениях на границе полупространства и не связан только с наличием этой границы. Для рассматриваемого случая влияние границы раздела проявляется в некотором (сравнительно небольшом) изменении глубинной зависимости ядра интегрального уравнения.

Список литературы

1. Рытов С. М. Теория электрических флуктуаций и тепловое излучение. М.: Изд. АН СССР. 1953.
2. Eldrich L., Hardee P. C. Thermography at millimeter wavelengths // IEE Proc. 1974. N 10. P. 1391—1392.
3. Barret A., Myers P., Sadowsky N. Detection of breast cancer by microwave radiometry // Radio Science. 1977. N 12. P. 1675.
4. Троицкий В. С., Абрамов В. И., Белов И. Ф. и др. Результаты исследований собственного радиоизлучения тела человека // Изв. вузов. Радиофизика. 1981. Т. 24. № 1. С. 118—121.
5. Троицкий В. С. К теории контактных радиометрических измерений внутренней температуры тела // Изв. вузов. Радиофизика. 1981. Т. 24. № 9. С. 1054—1061.
6. Троицкий В. С., Белов И. Ф., Горбачев В. П. и др. О возможностях использования собственного теплового излучения тела человека для измерения его внутренней температуры // Успехи физических наук. 1981. Т. 134. № 1. С. 155.
7. Bardat F., Solimini D. Radiometric sensing of biological layered media // Radio Science. 1983. Vol. 18. N 6. P. 1393—1401.
8. Шмаленюк А. С. О возможности диагностики параметров неоднородных сред по модовым характеристикам их тепловых шумов. Препринт ИРЭ АН СССР № 2 (357). М., 1983.
9. Маречек С. В., Муськин Ю. Н., Поляков В. М., Шмаленюк В. С. Способ определения глубинных температур объекта. Авт. свид.-бо № 1396730 СССР, Г 01 J 5/50.
10. Павлова П. С., Поляков В. М. Точность измерения интегральных температур биологических объектов методами СВЧ-радиометрии // Труды Всесоюз. конф. "Методические вопросы определения температуры биологических объектов радиофизическими методами". М.: ИРЭ АН СССР. 1985. С. 8—15.
11. Троицкий В. С., Аранжереев В. А., Густов А. В. и др. Измерение глубинного температурного профиля биообъектов по их собственному тепловому радиоизлучению // Изв. вузов. Радиофизика. 1986. Т. 5. № 1. С. 62—68.
12. Bardati F., Mongiardo M., Solimini D. Synthetic Array for Radiometric Retrieval of Thermal Fields in Tissues // IEEE Trans. MTT. 1986. Vol. 34. N 5. P. 579—583.
13. Rytov S. M., Kravtsov Yu. A. and Tatarskii V. I. Principles of Statistical Radiophysics. Berlin; New York: Springer-Verlag, 1987.
14. Gottis P. G., Uzunoglu N. K., Papakonstantinou P. S. Measurements of three-dimensional temperature distribution inside dielectric objects using near-field radiometry // Journal of Electromagnetic Waves. 1988. Vol. 5. № 1. P. 62—68.
15. Гайкович К. П., Резник А. Н., Сумин М. И., Троицкий Р. В. Определение профиля температуры поверхностного слоя воды по его радиоизлучению в СВЧ диапазоне // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1987. Т. 23. № 7. С. 761—768.
16. Гайкович К. П., Сумин М. И., Троицкий Р. В. Определение глубинного профиля температуры методом многочастотной радиотомографии в медицинских приложениях // Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31. № 9. С. 1104—1112.
17. Гайкович К. П., Резник А. Н., Троицкий Р. В. Радиометрический метод определения подповерхностного профиля температуры и глубины промерзания грунта // Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т. 33. № 12. С. 1467—1474.
18. Bosquet B., Van de Velde J. C., Mamanni A. et al. Microwave radiometric imaging at 36 Hz for the exploration of

- breast tumors // IEEE Trans. MTT. 1990. Vol. 38. № 6. P. 791—793.
19. Mamouni A., Leroy Y., Bocquet B., Van de Velde J. C., Gelin Ph. Computation of near-field microwave radiometric signals: definition and experimental verification // IEEE Trans. on Microwave theory and Techniques. 1991. Vol. 39. N 1. P. 124—132.
20. Bardati F., Brown V. J., Di Bernardo G. Multi-frequency microwave radiometry for retrieval of temperature distributions in the human neck // J Photogr. Sci. 1991. Vol. 39. N 4. P. 157—160.
21. Резник А. Н. Квазистационарное поле теплового излучения в теории контактной радиотермометрии // Изв. вузов. Радиофизика. 1991. Т. 34. № 5. С. 512—518.
22. Mizushima S., Shimizu T., Suzuki K., Kinomura M., Ohba H., Sugiura T. Retrieval of temperature-depth profiles in biological objects from multifrequency radiometric data // J. Electromag. Waves Appl. 1993. Vol. 7. P. 1517—1548.
23. Троицкий А. В., Троицкий Р. В. Определение температуры поверхности пленки воды по радиометрическим измерениям в линиях поглощения атмосферных газов // Тез. докл. 2-й научной конф. "Применение дистанционных радиофизических методов в исследованиях природной среды" (Муром, июль 1992), М: ИРЭ РАН, 1992. С. 43—44.
24. Gaikovich K. P. Simultaneous solution of emission transfer and thermal conductivity equations in the problems of atmosphere and subsurface radiothermometry // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1994. Vol. 32. N 4. P. 885—889.
25. Duhamel F., Dubois L., Chieve M., Pribetich J. Combining SDA and FDTD methods for the modeling of planar applicators used in microwave hyperthermia // Microwave and Optical Technology Letters. 1994. Vol. 7. N 5. P. 228—232.
26. Cresson P.-Y. Michel C., Dubois I., Chieve M., Pribetich J. Complete three-dimensional modeling of new microstrip-microslot applicators for microwave hyperthermia using the FDTD method // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 1994. Vol. 42. N 12. P. 2657—2666.
27. Dubois L., Sozanski J.-P., Tessier V., Camart J.-Ch., Fabre J.-J., Probetich J., Chive M. Temperature control and thermal dosimetry by microwave radiometry in hyperthermia // IEEE Transactions on Microwave theory and Techniques. 1996. Vol. 44. N 16. P. 1755—1761.
28. Gaikovich K. P., Troitsky R. V. Dynamics of temperature profile, heat, and mass exchange through air-water interface by measurements of thermal radio emission evolution at 60 GHz // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1998. Vol. 36. N 1. P. 341—344.
29. Leroy I., Bocquet B., Mamouni A. Non-invasive microwave radiometry thermometry // Physiol. Meas. 1998. Vol. 19. P. 127—148.
30. Nikita K. S., Stamatakos G. S., Uzunoglu N. K., Karafotias A. Analysis of the interaction between a layered spherical human head model and finite-length dipole // IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques. 2000. Vol. 48. N 11. P. 2003—2013.
31. Гайкович К. П., Резник А. Н. Эффект ближнего поля теплового радиоизлучения // Письма в ЖЭТФ. 2000. Т. 72. Вып. 11. С. 792—796.
32. Camart J. C., Despretz P., Prevost B., Sozanski J. P., Chive M., Pribetich J. New 434 MHz interstitial hyperthermia system monitored by microwave radiometry: theoretical and experimental results // Int. J. Hyperthermia. 2000. Vol. 16. N 2. P. 95—111.
33. Маречек С. В., Поляков В. М. Влияние структуры биотканей на результаты СВЧ радиометрических измерений // Успехи современной электроники. Зарубежная радиоэлектроника. 2001. № 11. С. 21—30.
34. Gaikovich K. P., Reznik A. N., Vaks V. L., Yurasova N. V. New effect in near-field thermal emission // Physical Review Letters, 11 March 2002. Vol. 88. N 10. P. 104302-1—104302-4.
35. Вакс В. Л., Гайкович К. П., Резник А. Н. Ближнее тепловое поле и возможности его использования для глубинной диагностики сред // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 45. № 1. С. 8—25.
36. Гайкович К. П. Обратные задачи ближнепольной радиотермометрии // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46. № 4. С. 268—279.
37. Tai C. T. Dyadic green functions in electromagnetic theory // Intext Educational Publishers Scranton Pa, 1971.
38. Kong J. A. Electromagnetic wave theory. John Wiley & Sons, Inc., 1990.
39. Li L. W., Kooi P. S., Leong M. S., Yeo T. S. On the eigenfunction expansion of dyadic Green's function in planarly stratified media // Journal of Electromagnetic waves and applications. 1991. Vol. 8. N 6. P. 663—678.
40. Dorofeev I., Jersch J., Fuchs H. Spectral composition of electromagnetic fluctuations induced by a lossy layered system // Ann. Phys. (Leipzig). 2003. Vol. 12. N 7—8. P. 421—437.
41. Cresson P.-Y., Michel C., Dubois I., Chieve M., Pribetich J. Complete three-dimensional modeling of new microstrip-microslot applicators for microwave hyperthermia using the FDTD method // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 1994. Vol. 42. N 12. P. 2657—2666.
42. Despretz P., Camart J. C., Mishel Ch., Fabre J.-J., Prevost B., Sozanski J. P., Chive. Microwave prostatic hyperthermia: interest of urethral and rectal applicators combination—theoretical study and animal experiment results // IEEE Trans. Microwave theory and Techniques. 1996. Vol. 44. N 10. P. 1762—1768.

ПРИМЕНЕНИЕ МНСТ

УДК 621.3.049.77

С. Ф. Бурдаков, д-р техн. наук,
В. В. Кириченко, канд. техн. наук,
А. В. Коротынский, канд. техн. наук,
Б. А. Смольников, канд. техн. наук, проф.,
В. М. Чистяков, канд. техн. наук,
ЦНИИРТК, г. С.-Петербург

КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАРУБЕЖНЫХ МИНИ- И МИКРОРОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОДХОДА

Показана необходимость комплексного подхода к классификации мини- и микробототехнических систем с учетом функциональных, размерных и конструктивно-технологических признаков.

Даны определения робототехнических систем (РТС), основанные на превалирующем влиянии уровня технологического развития элементной базы на технический облик системы в целом. При этом тенденции размерной классификации РТС различных видов базирования (воздушное, водное, наземное и космическое) позволяют выделить соответствующие отряды систем в пределах классов, обусловленных средой функционирования.

Предлагаемый подход позволяет с единых системных позиций структурировать многообразие мини- и микроРТС различных видов базирования в целях формирования принципов построения перспективных РТС и прогноза дальнейшего их развития.

Введение

Исследования и разработки в области мини- и микробототехнических систем (РТС), в том числе военного назначения, активно ведутся практически во всех развитых странах мира [1, 2]. За последнее время специалистами разработано и создано большое число опытных и действующих образцов мини- и микроРТС. Появилось несколько классификаций этих систем по разным характерным признакам. Например, в статье [2] авторы выделяют три группы роботов: микро-, мини- и макророботы, и характеризуют их тремя основными параметрами: характерным размером, массой и потребляемой мощностью. В данной статье в основном рассматриваются роботы военного назначе-

ния трех видов базирования: наземные, воздушные и морские. На сайте [3] на основании анализа около 100 конструкций миниатюрных наземных роботов предложена их классификация по размерному признаку. В статье [4] рассмотрены массогабаритные характеристики мини- и микролетательных аппаратов. В работе [5] приводится общая классификация роботов и рассматриваются особенности мобильных робототехнических комплексов для проведения спецопераций. Для космических роботов также существует классификация, основанная на разделении космических аппаратов (КА) по массе [6].

Перечисленные примеры классификации мини- и микроРТС указывают на то, что процесс создания миниатюрных систем и механизмов стал массовым и возникла необходимость в оценке разрабатываемых объектов с единых позиций в целях выявления общих тенденций их развития и определения базового набора системообразующих компонентов.

Существующие попытки классифицировать мини- и микроРТС в основном сводятся к определению размерного ряда и, как правило, ограничены какой-либо одной сферой (средой применения РТС). При этом отсутствует конкретизация самого размерного признака.

Вместе с тем классификация таких сложных систем, как мини- и микроРТС должна включать и другие характеристики: назначение, способы применения, виды базирования, конструктивные особенности и т. д. Исходя из вышеизложенного рассмотрим возможные подходы к созданию единой комплексной классификации мини- и микроРТС.

Выбор классификационных признаков

Размерные ряды. Рассмотрим способы определения размерного ряда мини- и микроРТС как классификационного признака.

Границные параметры размерного ряда, установленные для того или иного вида роботов, как правило, ориентированы на имеющийся опыт, полученный при создании конкретных конструкций. И здесь возникает некий парадокс, состоящий в том, что используемая терминология не соответствует истинным размерам мини- и микроРТС. В частности, классы микро- и наносистем с математической точки зрения должны соответствовать размерам порядка 10^{-6} и 10^{-9} м соответственно. Однако на практике, а также в указанных выше классификациях размеры устройств, которые ре-

ально стоят за этими названиями, явно превышают указанные порядки величин.

Если для РТС одного вида базирования такой подход более-менее приемлем, то для разновидовых РТС возникают противоречивые ситуации, не позволяющие классифицировать все существующие мини- и микроРТС с единых позиций. Еще сложнее обстоит дело с объектами, попадающими в пограничную зону размерного ряда (на границе макро и мини, мини и микро).

Если принадлежность к той или иной категории определяет разработчик, то роботы, имеющие одинаковые массогабаритные характеристики и относящиеся к одной и той же среде функционирования, могут оказаться в разных размерных группах. Более того, например, больший робот может быть представлен как микроробот, а меньший — как мини-робот. Для разрешения такого рода противоречий представляется правомерным следующий подход. Мини-, микроробототехника сформировались как самостоятельные направления в результате стремительного развития в последнее время микротехнологий. Аналогичный процесс в настоящее время происходит и применительно к наноробототехнике. Именно технологии определяют облик создаваемых робототехнических систем [7]. Поэтому логично определить, например, микроробот как объект, создаваемый в основном на базе микротехнологий и, соответственно, наноробот — как объект, для создания которого необходимо использование нанотехнологий. Такой подход в значительной степени снимает противоречия размерного ряда для мини- и микроРТС различных видов базирования.

Основываясь на технологическом подходе, можно выделить следующие отряды роботов.

Макроробот — робот, при создании основных функциональных узлов которого микро- и нанотехнологии не имеют определяющего значения для формирования технического облика и практически не влияют на массогабаритные показатели. Здесь в основном достаточно применения традиционных макротехнологий.

Мини-робот — робот, создаваемый на основе макротехнологий с использованием микротехнологий, которые, хотя и не являются определяющими для его технического облика, но могут оказывать существенное влияние на функциональные характеристики, размеры и массу создаваемого робота.

Микроробот — робот, основные функциональные узлы которого создаются на базе микротехнологий с частичным использованием нанотехнологий. Нанотехнологии в зависимости от степени применения могут влиять на характеристики микроРТС, а от степени их влияния может происхо-

дить существенный разброс параметров финальных образцов микроРТС.

Наноробот — робот, создание которого осуществляется на основе нанотехнологий. Возможно использование *фемтотехнологий*, оперирующих на уровне внутриатомного пространства.

Выбор конкретных значений размерных границ каждого отряда роботов можно осуществить, используя следующие правила:

- в связи с тем, что на современном этапе развития мини- и микроРТС невозможно установить единые граничные нормативы размерного ряда, удовлетворяющие робототехническим системам различного вида базирования, целесообразно все РТС, связанные общей средой функционирования, выделить в отдельный класс и для каждого из них определить собственный размерный ряд;
- граничные параметры, позиционирующие отряды нано, микро, мини, макро, в рамках размерного ряда каждого класса в настоящее время возможно установить достаточно условно, так как они непосредственно связаны с современным уровнем развития науки и техники. Можно предполагать, что с дальнейшим развитием микро- и нанотехнологий эти границы будут смещаться в сторону уменьшения, в пределе приближаясь к размерам, стоящим за определяющей их терминологией;
- с появлением новых технологий, таких как фемто- и пикотехнологии, на размерной оси будут появляться соответствующие новые отряды РТС.

Функциональные классификационные признаки

Исходя из основных положений и анализа возможностей современной мини- и микроробототехники, выделим следующие боевые и обеспечивающие задачи, которые можно решать с применением мини- и микроРТС, а также возможные области использования мини- и микроРТС в военном деле (табл. 1).

Анализ областей использования мини- и микророботов военного назначения показывает, что задачи, решаемые роботами различного базирования, по сути своей сходны, но реализуются различными способами в разных средах функционирования: земной, водной, воздушной и космической. Следовательно, критерием верхнего уровня разделения мини- и микроРТС по функциональному признаку должна выступать среда функционирования.

Оперируя классификационной терминологией, все многообразие мини- и микроРТС можно разделить на несколько основных классов (например, наземные, водные, воздушные и космические роботы). Дальнейшее разделение по функциональ-

Таблица 1

**Боевые и обеспечивающие задачи, которые можно решать с применением мини- и микроРТС,
и возможные области их использования в военном деле**

| Общие военные задачи | Задачи, решение которых возможно с использованием мини- и микроРТС | Возможные области использования мини- и микроРТС |
|---|---|--|
| Обеспечение военной безопасности | Охрана и защита государственной границы | <ul style="list-style-type: none"> • Мониторинг охраняемого участка границы. • Патрулирование участка границы. • Обеспечение спецвязи. • Поиск повреждений инфраструктуры. • Поиск и задержание нарушителей границы. • Нейтрализация диверсантов |
| | Охрана важных государственных объектов | <ul style="list-style-type: none"> • Мониторинг охраняемого объекта. • Внутреннее и наружное патрулирование объекта. • Поиск повреждений инфраструктуры объекта. • Техническое обслуживание и ремонтные работы в труднодоступных и потенциально опасных местах. • Поиск и задержание нарушителей режима. • Нейтрализация диверсантов |
| | Предотвращение и пресечение диверсий и террористических актов | <ul style="list-style-type: none"> • Поиск и идентификация потенциально опасных объектов. • Наблюдение и сбор информации при проведении антитеррористической операции. • Установка и перемещение средств наблюдения по коммуникационным каналам захваченного террористами объекта (трубопроводы, внутренние полости и т. д.) и наружным поверхностям. • Локализация и уничтожение средств совершения диверсий и террористических актов. • Нейтрализация террористов |
| | Предупреждение экологических катастроф и других чрезвычайных ситуаций, ликвидация их последствий | <ul style="list-style-type: none"> • Мониторинг зоны экологической катастрофы и чрезвычайной ситуации. • Поиск повреждений коммуникаций (силовые кабели, газовые трубопроводы и т. д.). • Ремонтно-восстановительные работы в труднодоступных и потенциально опасных местах. • Поиск и оказание помощи пострадавшим |
| Отражение вооруженного нападения | Ведение боевых действий по разгрому вторгшихся, уничтожению созданных (создаваемых) группировок войск (сил) агрессора в районах их базирования, сосредоточения и на коммуникациях | <ul style="list-style-type: none"> • Локальная разведка и связь в индивидуальном снаряжении бойца. • Минирование и разминирование. • Диверсионные акты. • Нейтрализация вооружений и живой силы противника. • Разведка на местности, включая тыл противника. • Охрана боевой техники и объектов. • Поиск пострадавших и оказание помощи раненым после проведения боевых операций. • Доставка боеприпасов на поле боя. • Массированная дезинформация средств обнаружения противника. • Скрытная доставка секретной информации (без использования телекоммуникаций, радиоспутниковых каналов связи). • Корректировка огня |
| Предупреждение и пресечение внутренних вооруженных конфликтов | Разгром и ликвидация незаконных вооруженных формирований, бандитских и террористических групп и организаций, уничтожение их баз, центров подготовки, складов, коммуникаций | <ul style="list-style-type: none"> • Локальная разведка и связь. • Сбор разведданных в районе концентрации незаконных вооруженных формирований, бандитских и террористических групп и организаций. • Наблюдение и контроль путей перемещения бандформирований. • Минирование и разминирование. • Диверсионные акты. • Нейтрализация вооружений и живой силы противника. • Поиск пострадавших и оказание помощи раненым после проведения боевых операций. • Ликвидация главарей бандформирований |

ным признакам целесообразно осуществлять в рамках каждого класса на подклассы и т. п., учитывая при этом специфические особенности среды применения. Такой подход позволяет учесть все существующие и перспективные функциональные отличия, присущие тем или иным РТС. Применение при этом принципа подобия может позволить спрогнозировать появление новых функциональных возможностей мини- и микроРТС.

Следующая группа признаков, которые должны отражаться в разрабатываемой классификации, — это конструктивно-технологические роботы.

Комплексный анализ возможностей создания мини- и микроРТС военного назначения для работы в наземной, воздушной, водной средах и космическом пространстве подтверждает общепризнанный постулат о том, что любая функционально-полнная РТС должна включать четыре основные подсистемы: актиоаторную, сенсорную, информационно-управляющую и энергетическую. Поэтому все многообразие элементов, из которых состоят существующие, а также могут состоять перспективные макро-, мини-, микро-, наноРТС можно разделить соответственно на четыре группы. Дальнейшую детализацию конструктивных элементов целесообразно проводить в рамках каждой группы на базе иерархического принципа деления.

Поскольку каждая такая группа потенциально будет включать в себя все известные конструктивные элементы, соответствующие ей по функциональному признаку (и те, которые могут возникнуть в будущем), то предложенный подход позволяет учесть все возможные конструктивно-технологические отличия, присущие той или иной мини- и микроРТС.

Структурно-функциональный подход к классификации мини- и микроРТС

На основе проведенного анализа можно сформулировать основные положения структурно-функционального подхода к классификации мини- и микроРТС различного базирования и назначения.

С формальной точки зрения всю совокупность классификационных свойств конкретного образца мини- и микроРТС можно представить вектором в трехмерном пространстве, проекция которого на функциональную, размерную и конструктивно-технологическую оси позволяет отнести образец к соответствующему классификационному типу.

Ориентируясь на классификацию объектов живой природы, целесообразно использовать аналогичный базовый набор терминологии.

На функциональной оси выделяем области (классы), связанные со средой функционирова-

ния роботов: водный, земной, воздушный, космический.

В границах каждого класса выделяются подклассы роботов, соответствующие их основному назначению. В рамках каждого подкласса возможно дальнейшее деление на базе иерархического принципа с выходом в конечном итоге на конкретный функциональный набор того или иного робота.

На размерной оси также выделяются некоторые условные области (отряды): макро, мини, микро,nano и т. п.

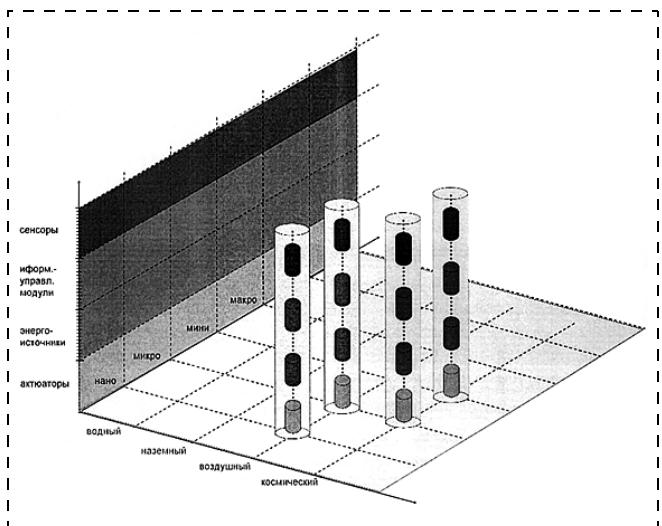
Для определения границ каждого отряда на размерной оси можно использовать обобщенные характеристики существующих и перспективных мини- и микророботов. При этом необходимо принять во внимание три взаимосвязанных параметра: характерный размер, энерговооруженность и масса. В качестве характерного размера принимается максимальный габаритный размер робота.

Примерные размерные границы для nano-, микро-, мини- и макроРТС различных классов приведены в табл. 2.

Конструктивно-технологическая ось содержит набор базовых элементов, из которых можно "собрать" ту или иную разновидность робота. Базовые элементы подразделены на четыре группы: актиоаторы, сенсоры, информационно-управляющие модули, энергоисточники. В каждую группу по принципу вложенных подсистем включены, соответственно, все существующие и перспективные базовые элементы мини- и микроРТС. К приведенным четырем группам в зависимости от функциональных особенностей создаваемых мини- и

Таблица 2
Размерные границы для nano-, микро-, мини- и макроробототехнических систем

| Параметр | НаноРТС | МикроРТС | Мини-РТС | МакроРТС |
|-------------|----------|-----------|----------|----------|
| Водный | | | | |
| L , м | < 0,05 | 0,05–0,5 | 0,5–2,5 | > 2,5 |
| M , кг | < 0,01 | 0,01–5 | 5–250 | > 250 |
| N , Вт | < 0,5 | 0,5–10 | 10–250 | > 250 |
| Земной | | | | |
| L , м | < 0,01 | 0,01–0,1 | 0,1–0,5 | > 0,5 |
| M , кг | < 0,001 | 0,001–0,5 | 0,5–10 | > 10 |
| N , Вт | < 0,005 | 0,005–5 | 5–100 | > 100 |
| Воздушный | | | | |
| L , м | < 0,1 | 0,1–0,5 | 0,5–5 | > 5 |
| M , кг | < 0,01 | 0,01–1 | 1–10 | > 10 |
| N , Вт | < 0,1 | 0,1–50 | 50–500 | > 500 |
| Космический | | | | |
| L , м | 0,05–0,1 | 0,1–1 | 1–4 | > 4 |
| M , кг | 1–10 | 10–100 | 100–500 | > 500 |
| N , Вт | 0,5–20 | 20–200 | 200–4000 | > 4000 |



Основные классификационные признаки

микроСТС, при необходимости, можно добавить дополнительные группы, например, спецоборудование, медтехника, спецоружие и т. п.

С помощью введенных классификационных признаков в рамках трехмерного пространства (см. рисунок) можно классифицировать любую мини- и микроСТС.

В соответствии с изложенным предлагается следующая процедура классификации мини- и микроСТС:

- на функциональной оси выбирается "класс", соответствующий виду базирования, и "подкласс", соответствующий функциональному назначению классифицируемой мини- и микроСТС (например, класс — воздушный, подкласс — разведывательный);
- на размерной оси выбирается "отряд", соответствующий размерному ряду (например, отряд — микро);
- на размерно-функциональной плоскости определяется область (декартово произведение отрезков выделенных на размерной и функциональной оси), которая представляет собой "семейство" мини- и микроСТС (для рассматриваемого примера семейство — разведывательные микролетательные аппараты);
- на конструкторско-технологической оси в каждой из определенных групп (актиоаторы, сенсоры, информационно-управляющие модули, энергоисточники) выбираются базовые элементы, из которых состоит классифицируемый робот;
- объединяя области базовых элементов с областью "семейства" СТС, получаем в трехмерной системе пространство "видов" СТС (на рисунке это цилиндрические столбики, на которых ус-

ловно показан принцип выбора элементной базы);

- проведя дальнейшую детализацию конструктивных элементов, получаем "разновидность" того или иного робота, а по сути — его технический облик (в нашем примере разновидность — разведывательный МЛА, имеющий электродвигатель с винтом, дискообразное крыло, систему стабилизации на базе микрогироскопа и т. п.).

Предложенная последовательность классификации построена по типу виртуального конструктора мини- и микроСТС. Она позволяет классифицировать существующие и перспективные СТС, а также прогнозировать появление новых роботизированных объектов. При этом каждый классифицируемый робот имеет набор отличительных признаков, позиционирующих его в рамках строгой иерархической системы классификации: класс, подкласс, отряд, семейство, вид, разновидность.

Прогностические возможности классификации

Предложенная классификация охватывает как существующие, так и перспективные мини- и микроСТС. Систематизация по конструктивно-технологическим и функциональным признакам с учетом размерного ряда оказывается достаточной для оценки текущего состояния в робототехнике. Иерархический принцип деления областей, выделяемых на классификационных осях, позволяет дополнять оценки текущего состояния, т. е. осуществлять непрерывный мониторинг процессов развития робототехники. В этой связи речь может идти о множестве классификаций или, иными словами, о динамической классификации, позволяющей проводить не только оценку текущей ситуации, но и осуществлять прогноз тенденций развития робототехники.

Если двигаться по размерной оси предложенной классификации, можно видеть стремление к нарастающей миниатюризации как самих микроботов, так и их элементной базы. Особенно важно отметить явное ускорение этого процесса, напоминающее аналогичное ускорение в микроэлектронике, известное как закон экспоненциального развития, или закон Мура. Как и в электронике, этот закон имеет одностороннюю направленность — в сторону микромира. Следствием такого движения является и резкий рост степени сложности мини- и микроСТС, что характерно и для микроэлектронных систем. Если проэкстраполировать этот процесс на будущее, то не трудно увидеть явное сближение микроСТС с системами биологическими, в первую очередь, с миром насекомых. Учитывая высочайший уровень организации биологических объектов, можно заключить, что микроСТС

будут следовать по аналогичному пути. В связи с этим все большее значение приобретает изучение основных рубежей эволюции насекомых, критериев их биологической приспособляемости, совершенствования их сенсорных, энергетических и локомоционных механизмов.

Не менее важную роль играет движение вдоль конструктивно-технологической оси. Здесь также можно отметить сближение технических процессов создания мини- и микроРТС с процессами роста насекомых и микроорганизмов. Уже сегодня происходит переход от планарной технологии изготовления микроэлектромеханических систем (МЭМС) к технологии пространственной, постепенно сводящейся к процессам объемного роста биологических и кристаллических структур. Ясно, что именно качественно новые технологии, технологии "выращивания" структурных микроэлементов, открывают возможности освоения новых масштабных диапазонов микроРТС и новых конструктивных материалов [8].

Наконец, что касается перспектив расширения функциональных характеристик мини- и микроРТС, то и здесь живая природа демонстрирует огромный диапазон средств и способов решения различных задач и достижения разнообразных целей путем использования как особенностей окружающей среды, так и внутренних ресурсов мини- и микроРТС.

Экспертный анализ, опирающийся на предложенную классификацию, показывает, что дальнейшее развитие элементной базы с использованием

новых материалов и совершенствованием микро- и нанотехнологий приведет к неизбежному сужению выделенных областей на функциональной и конструкторско-технологической оси из-за появления многофункциональных интегрированных модулей как составных элементов микроРТС будущего. Можно предполагать, что к 2025 г. преобладающее значение в микроробототехнике приобретут биоподобные роботы с многофункциональными интегрированными модулями типа "искусственная мышца", "искусственная кожа", "искусственный интеллект" и т. п.

Список литературы

- Лопота В. А., Юревич Е. И. Мехатроника — основа интеллектуальной техники будущего // Мехатроника, автоматизация, управление. 2002. № 7. С. 1.
- Рубцов И. В., Несторов В. Е., Рубцов В. И. Современная зарубежная военная микро- и маниробототехника // Микросистемная техника. 2000. № 3. С. 36—42.
- http://www.contrib.andrew.cmu.edu/usr/rjg/webrobots/small_robots_metric.html
- Mueller T. J., DeLaurier J. D. Aerodynamics of small vehicles // Hessert Center for Aerospace Research, Department of Aerospace and Mechanical Engineering, University of Notre Dame, Notre Dame. Institute for Aerospace Studies, University of Toronto, Downsview, Ontario.
- <http://st.ess.ru/publications/articles/robots/robots.htm>
- Стреж С. В., Трошин Е. В. Создание космических систем на базе микророботов // Микросистемная техника. 2003. № 11. С. 35—41.
- Вернер В. Д., Пурцхванидзе И. А. Технологическая модульность в микросистемной технике // Микросистемная техника. 2003. № 9. С. 17—21.
- Алферов Ж. И. и др. Наноматериалы и нанотехнологии // Микросистемная техника. 2003. № 8. С. 3—13.

Новости нанотехнологий

"Живые" роботы двигаются с помощью мышц

Крошечные роботы, приводимые в движение живыми мышцами, были созданы учеными *University of California (Los Angeles)*. Устройства были сформированы посредством "растущих" клеток крысы на микроскопическом кремниевом кристалле, сообщили исследователи в журнале *Nature Materials* (рис. 1, см. четвертую сторону обложки).

Крохотный робот меньше миллиметра длиной может двигаться самостоятельно при добавлении в окружающую среду раствора глюкозы. Эта работа —

впечатляющий пример тесного союза биотехнологий и мира нанотехнологий. Исследователи в области нанотехнологий часто обращаются к живой природе для вдохновения. Но профессор Карло Монтеманьо из *University of California (Los Angeles)*, обратился к природе не за идеей, а за реальными исходными материалами. Ранее он создал роторный наномотор из генетически модифицированного белка. Теперь он вырастил мышечную ткань на крохотных "скелетах" роботов.

Команда Карло Монтеманьо использовала кардиомиоциты (клетки сердца) крысы для создания мельчайших машин, способных двигаться самостоя-

тельно за счет сокращения клеток. Два устройства выглядят как крохотная пара лягушачьих лапок.

"Кости, которые мы используем, на пластмассовой или кремниевой основе", — говорит профессор Монтеманьо. — "Итак, мы сделали эту действительно прекрасную конструкцию, способную двигаться и гнуться. Теперь мы имеем устройства из "скелета" и мышц, которые позволяют им двигаться".

Под микроскопом мы можем увидеть крохотных двуногих "био-ботов", ползающих по кругу. Профессор Монтеманьо сообщил, что такие мышцы могли бы быть использованы в микроскопических машинах в качестве актоаторов или даже управлять миниатюрными электрическими генераторами, обеспечивая энергией микросхемы.

Но когда живые клетки соединяются с кремнием — будут ли они живыми? "Они абсолютно живые", — заявляет профессор Монтеманьо *BBC News*. — "Я имею в виду, что клетки действительно растут, размножаются. Так что эти устройства живые".

Эта идея, вероятно, должна заинтересовать многих, кто уже имеет отношение к нанотехнологиям. Но для Карло, профессора инженерии, это лишь повод сравнить свои решения с теми, которые уже нашла природа, пройдя миллионы лет эволюции до современных сложных задач в технологии.

Источники

1. Cornell: How Cornell scientists uncover and remake molecules of life.
2. BetterHumans: Minuscule Musclebots Powered by Rat Cells.
3. SPIE: First self-assembled micro-robots powered by muscle.
4. New Scientist: First self-assembled micro-robots powered by muscle.

Транзистор с плавником от Infineon уменьшил flash-память

Германские ученые из компании *Infineon Technologies* создали наименьший в мире чип энергонезависимой памяти (*nonvolatile flash memory*), что удалось благодаря сверхмалым FET-транзисторам. Новый чип размерами всего 20 нм может длительно хранить один бит без подачи на устройство энергии. Самая "продвинутая" современная flash-память, выполняющая аналогичные функции (хранение 1 бита памяти), имеет размеры около 90 нм. За последнее время flash-память стала популярна, благодаря ее простому использованию в цифровых

фотоаппаратах, MP3-плеерах, USB-стиках и видеокамерах.

Все попытки уменьшить *flash*-чипы, использующие технологию 90 нм до сегодняшнего времени не увенчались успехом, вследствие физических ограничений, накладываемых процессом их производства. Ученый из *Infineon* удалось создать новый 20 нм чип только благодаря ранее изобретенному полевому транзистору FinFET (рис. 2, см. четвертую сторону обложки), который имеет трехмерную структуру расположения слоев полупроводников. Благодаря ей удалось уменьшить размеры транзистора. Совершенные транзисторы — "плоские", и из-за такой геометрии трудно добиться большей миниатюризации.

Расскажем подробнее о новом полевом транзисторе FinFET. Один из главных компонентов транзистора — кремниевый "плавник" (*fin*), толщиной всего 8 нм, который проходит через нитридный слой, играющий роль "ловушки" для носителей информации — электронов. Затвор транзистора размерами 20 нм управляет "плавником", который, в свою очередь, обеспечивает переключение "ловушечного слоя". Транзистор сконструирован таким образом, что "ловушечный слой" электрически изолирован от "плавника" и затвора. В логическом состоянии, соответствующем "1", в "ловушку" попадает около 100 электронов. В современных чипах ячейка памяти в состоянии "1" содержит их около 1000.

Как и современные элементарные ячейки *flash*-памяти, новая может хранить одновременно 2 бит, это предусмотрено структурой и электрическими характеристиками транзистора.

Как сообщили в четверг, 16 декабря 2004 г. представители компании, новый *flash*-чип, который может хранить до 32 Гбит информации, будет в 8 раз меньше продающихся сегодня чипов. О создании новой памяти компания сообщила на Международной конференции по электронным устройствам в г. Сан-Франциско.

Источник

1. InfoWorld: Infineon designs smallest nonvolatile flash memory chip

Газовая нанотурбина

Как мы уже говорили, наноактоатор — один из основных компонентов наномашин, наноманипуляторов и нанокомпьютеров. Поэтому многие исследовательские команды стараются как можно больше приблизиться к тому, чтобы рассчитать и создать миниатюрные моторы. Ученые из Корей-

ского университета предлагают использовать в качестве основы наноактиоатора газовую турбину.

Ученый Чанг-Анг разработал газовую нанотурбину на основе вложенных друг в друга нанотрубок (рис. 3, см. четвертую сторону обложки). Как он полагает, это будет простым и надежным решением для приведения в движение наномашин.

Производство нанотрубок сегодня не является проблемой. А то, что нанотрубки имеют малый диаметр (от 1 нм и более), позволяет существенно уменьшить размеры актиоатора. Напомним, что диаметр самого маленького наноактиоатора, созданного человеком, составляет около 500 нм (Алекс Зеттл).

Ученые уже давно синтезировали и исследовали многослойные нанотрубки, которые представляют собой несколько нанотрубок, вложенных одна в другую. Чанг-Анг исследовал трение, которое возникает при протекании газа по внешней поверхности нанотрубки и, изучив результаты исследований, пришел к выводу, что силу трения можно использовать в качестве врачающего момента, действующего на нанотрубку.

Ранее, изучив трение в многослойных нанотрубках, исследователи узнали, что при вращении одной нанотрубки внутри другой сила трения ничтожно мала. Используя разницу в силе трения, можно было бы заставить вращаться внешнюю нанотрубку, воздействуя на нее газом или жидкостью. Скорость вращения ротора можно было бы изменять, управляя количеством газа, протекающего по поверхности нанотрубки.

Проведенные ранее исследования показали, что если внутренний слой многослойной нанотрубки повернуть, то она возвращается в прежнее положение благодаря силам электростатики. Но при этом она двигается маятникообразно, делая миллион колебаний в секунду. Исследователи решили использовать это свойство нанотрубки для того, чтобы сделать насос, который сможет нагнетать

в другую нанотрубку-турбину газ или жидкость. А газ, в свою очередь, протекая по внешней поверхности нанотрубки, заставляет ее вращаться. А так как частотой осциллирования нанотрубки-насоса можно управлять (например, подав напряжение на нанотрубку), то, соответственно, можно заставить работать турбину с различной скоростью (рис. 4). Так исследователи хотят создать и насос, и актиоатор.

Как утверждает Чанг-Анг, нанонасос-турбину можно будет создать в течение следующих семи лет. А пока о результатах своих исследований ученыe сообщили в ноябрьском выпуске журнала *Nanotechnology*.

Источник

TRN: Nano gas turbine designed

Вращающийся нанопропеллер

Исследователи из Канады изготовили вращающийся ротор нанометровых размеров, который приводится в движение химическим топливом — перекисью водорода (H_2O_2).

Исследователь Джейфри Озин и его команда из Университета Торонто сначала изготовили ряд "штырей" длиной 300 нм, одна половина которых состояла из золота, а другая — из никеля. Далее, исследователи скомпоновали из них ротор, похожий на пропеллер (рис. 5, см. третью сторону обложки). Диаметр ротора составил около 1 мкм. Полученное устройство поместили на кремниевую матрицу, где ротор закрепили на миниатюрном подшипнике скольжения. Всю систему залили водой. Как только в воду был добавлен слабый раствор перекиси водорода (H_2O_2), пропеллер начал вращаться с постоянной скоростью. Как говорит Озин, открытие произошло случайно, исследователи не ставили перед собой целью создание пероксидного мотора. Цель их исследований — созданиеnanoструктур различной структуры, а добавление пероксида в раствор было всего лишь одним из тестов.

Расскажем подробнее, как работает новый актиоатор. Эффект вращения получился благодаря тому, что лопасти пропеллера состоят из металлов, различным образом взаимодействующих с перекисью водорода. Золото не взаимодействует с перекисью, а лопасти пропеллера присоединены к валу золотым концом. А никель выступает в роли катализатора, помогая пероксиду распадаться на кислород и воду. Таким образом, на никелевых концах с постоянной скоростью начали образовывать-

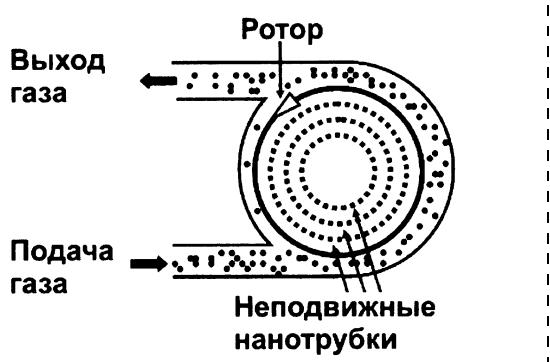


Рис. 4. Принцип работы газовой нанотурбины

ся пузырьки кислорода, сразу же отрываясь от лопасти. Их движение, направленное от лопасти в окружающую среду, вызвало силу, которая взаимодействуя на лопасти, заставила ротор вращаться.

При постоянной концентрации пероксида в растворе ротор вращался с постоянной скоростью. Исследователям даже удалось реверсировать направление вращения ротора. Но несмотря на то, что полученный ротор "почти" наномашина, Озин сомневается в том, что именно такими двигателями будут в будущем приводиться в движение наносистемы. "Да, полученное нами устройство вращается. Да, практически во всех машинах есть моторы вращательного действия, которые приводят их в движение. Но этот мотор неуправляем, а это ограничивает его возможное применение в таких наномашинах, как наноманипуляторы и нанороботы," — заключил исследователь.

Напомним, что работы по созданию актоаторов вращательного действия ведутся уже давно. Ранее были созданы наномоторы на биологической основе (АТФ синтеза), с использованием кремниевых НЭМС-устройств, а также молекул ДНК. Новый мотор представляет собой класс химических наномоторов, которыми исследователи еще всерьез не занимались.

Источник

BBC: Nano-Propellers sent for a spin

ДНК-наномашина производит полимер

Нэд Симэн опять нашел новое применение молекуле ДНК. Теперь с ее помощью ученый создал "фабрику" по производству одного-единственного полимера, повторяющего структуру самой фабрики. Но в будущем подобные наномашины будут производить различные материалы и преобразовывать информацию, изменяя структуру наносистем, состоящих из молекул ДНК. Вполне возможно, что это "счетная" основа будущих ДНК-компьютеров.

"Это первая система-транслятор, основанная на наномеханическом устройстве," — говорит Нэд Симэн. — "Она преобразует один тип информации в другой. А возможность управлять структурой материи на атомарном уровне и есть отличительная черта нанотехнологий". Нэд Симэн — исследователь из Нью-Йоркского университета, создающий из молекул ДНК различные структуры, обладающие удивительными свойствами. Он использует эту универсальную молекулу для того, чтобы по-

ставить на поток производство полимеров с заданной структурой.

Размеры нового ДНК-устройства, изготовленного Симэном, составляют всего $110 \times 30 \times 2$ нм. Оно состоит из двух ДНК-машин, называемых исследователем PX-JX₂ (рис. 6, см. третью сторону обложки). Эти наномашины Нэд изобрел несколько лет назад, скомбинировав определенным образом цепи молекул ДНК.

Симэн и его коллега Шайпинь Ляо добавили цепочки ДНК к каждой стабильной PX-JX₂ наномашине. Затем они добавили фрагменты ДНК, связывающие противоположные концы PX-JX₂ наномашины. Таким образом получилась структура, которую можно видеть на рис. 7 (см. третью сторону обложки).

Далее Нэд и Ляо заставили эту наномашину работать, добавив в раствор, содержащий ее, фрагменты все той же ДНК. Машина начала собирать из них полимер, повторяющий структуру первоначальной "фабрики". Как утверждает Нэд, с помощью этой системы можно производить различные полимеры, а не только тот, который был получен в эксперименте.

ДНК-наномашина работает подобно информационной РНК, которая управляет синтезом определенной полипептидной цепи в организме. Но в функциях этих наносистем есть и существенные отличия. Устройство Симэна не способно к транслокации, т. е. конечный продукт будет такой же структуры, что и само устройство. На рис. 7 видно (см. третью сторону обложки), что структура полученного полимера повторяется. Но ученые верят, что им удастся создать ДНК-машину, работающую подобно рибосоме. "Главное применение будущей искусственной рибосомы будет в синтезе новых материалов по заданной последовательности, за кодированной в ДНК," — говорит Симэн. — "В конце концов, мы научимся делать полимеры и новые материалы в больших количествах и за малый промежуток времени благодаря ДНК-машинам."

Исследователи доложили о результатах своей работы в журнале *Science*.

Источник

Nanotechweb.org: DNA nanomachine helps build polymers

Датчик наноперемещений

В США создан датчик наноперемещений (рис. 8), позволяющий зарегистрировать изменение положения объекта на тысячные доли нанометра. Датчик состоит из наноэлектромеханической перемычки и

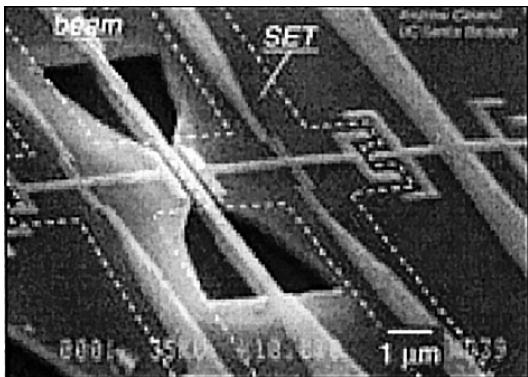


Рис. 8. НЭМС-датчик

одноэлектронного транзистора. В устройствах такого типа механический элемент перемещается под внешним воздействием, а высокочувствительный детектор позволяет измерить его перемещение. Области применения устройства — везде, где требуется ультравысокая точность, например, магниторезонансная микроскопия. Если удастся повысить его чувствительность в 100 раз, ученых появится возможность непосредственной регистрации квантовых эффектов в макросистемах.

Квантово-механический принцип неопределенности утверждает, что невозможно одновременно измерить и положение, и скорость (точнее, импульс) микрочастицы. Тем самым устанавлива-

ется фундаментальное ограничение на точность любых измерений макрообъектов. Правда, достигнуть этих теоретических границ в непосредственных измерениях до последнего времени было невозможно из-за отсутствия приборов с необходимой точностью. Точность наноэлектромеханических устройств уже достаточна для проведения подобных измерений.

Роберту Кнобелю (*Robert Knobel*) и Эндрю Клиланду (*Andrew Cleland*) из Калифорнийского университета в Санта-Барбаре удалось создать работающее устройство, в котором механический элемент представляет собой брускок из арсенида галлия, закрепленный с обоих концов. Длина бруска — 3 мкм, ширина — 250 нм, толщина — 200 нм. Расположен он в 250 нм от одноэлектронного транзистора, представляющего собой детектор перемещения. Брускок и транзистор соединены электрически через емкость. При приложении внешнего напряжения брускок начинает вибрировать. При его перемещении относительно детектора ток, протекающий через транзистор, изменяется. Одноэлектронный транзистор, по словам изобретателей, представляет собой лучший из существующих детекторов заряда, имеющий чрезвычайно высокую чувствительность. Измерение тока, протекающего через транзистор, позволяет измерить частоту колебаний бруска.

В настоящее время ученые работают над тем, чтобы приспособить созданное устройство для измерения квантовых эффектов в макрообъектах.

По материалам *Physics Web*.

Составил Ю. Г. Свидиненко

ОБСУЖДАЕМ ПРОЕКТЫ

С. В. Спасский

ВЕНТИЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Есть направление физики, сама история которого, в том числе и на протяжении всего XX века, показывает, что дело с этим направлением обстоит очень не просто и с категорическими формулировками в нем надо быть очень осторожным. Проблема впервые была сформулирована Максвеллом. В упрощенном виде — это идея разделения частиц, находящихся в тепловом движении, по направле-

ниям их скоростей с помощью различных микроУстройств. Исторически вопрос был увязан с законами термодинамики (что не совсем справедливо) и над ним повисло некое "табу", отраженное в учебниках и справочниках по физике. Этим запретом, вообще говоря, было перекрыто целое направление, развитие которого могло бы иметь огромное как теоретическое, так и практическое значение. В настоящее время, с одной стороны, идут интенсивные поиски новых источников энергии (особенно экологически чистых). С другой стороны, стремительно развиваются новые технологии

(нанотехнологии). Поэтому поисковый процесс снова и снова возвращается к данному вопросу.

Идея использования для разделения молекул по направлениям их скоростей мембран с отверстиями, которым пытались как-то придать вентильные качества, не нова. Автору встречались, например, предложения использовать среду продолговатых частиц, обладающих выраженным магнитным или электрическим моментом. Для создания асимметричных условий на мемbrane предлагалось использовать сильное магнитное или электрическое поле с одной стороны мембранны для продольной ориентации частиц (вдоль оси отверстий) с целью увеличения вероятности их проникновения через узкие отверстия мембранны с этой стороны. В отношении такой идеи были высказаны сомнения по поводу возможности создания сильного продольного поля по одну сторону мембранны и очень низкую способность этого поля ориентировать частицы в условиях реальных температур.

Также не нова идея получения вентильных качеств отверстий мембранны только за счет механических свойств самих отверстий мембранны. Например, рассматривалась идея получения нужного результата с помощью придания отверстиям конической формы. В этом случае было показано теоретически, что данные отверстия с жесткими стенками не будут обладать вентильными свойствами.

В качестве одной из попыток положительно решить проблему была проанализирована возможность добиться вентильных качеств отверстий мембранны с помощью различных покрытий поверхности мембранны и поверхностей отверстий в ней. Конкретно, в данной статье предлагается к рассмотрению один из этих методов, наиболее простой и прозрачный, для того, чтобы добиться главного — попытаться полностью снять "табу" с данного направления физики, открыть эту тему для публичного обсуждения, привлечь к вопросу коллективную мысль, специалистов бурно развивающейся области нанотехнологий.

Итак, предлагаемая полезная модель относится к области нанотехнологий. Для придания отверстиям мембранны асимметричных свойств в отношении атомов или молекул, находящихся в тепловом движении, в зависимости от того, с какой стороны мембранны частицы попадают в них, предлагается покрыть стенки отверстий "ворсинками"

(линейными короткими молекулами), имеющими сильный (статистически) уклон вдоль оси отверстия в направлении одной из сторон мембранны. Предполагается, что диаметр и высота отверстий должны быть одного порядка с длиной свободного пробега частиц (для упрощения анализа). Хотя, похоже, допускаются и большие значения. Предполагается, что в этом случае для частиц с наклонными траекториями условия отражения от стенок отверстий становятся существенно различными в зависимости от того, с какой стороны мембранны частица попадает в отверстие. Ожидаемый результат — на различные стороны мембранны должно оказываться разное давление частиц. "Вертушка", "крыльшки" которой содержат вышеописанные мембранны, и помещенная в герметичный сосуд, должна приводиться во вращение. Процесс отбора энергии вращения от вертушки не представляет сложности, например, с помощью магнитного привода. Стенки камеры должны хорошо обеспечивать подвод тепла. Конечно, возникает масса технических проблем. Например, требуется оптимизация по длине "ворса", плотности покрытия им стенок, состава рабочих частиц и т. д. Труден вопрос создания боковой поверхности отверстий с наклонным "ворсом".

Но идея, похоже, вполне рабочая. Предполагаемая сложность технического ее осуществления не должна тормозить ее развитие. Можно вспомнить в качестве примера историю развития вычислительной техники, явного занижения в оценках ее потенциальных возможностей на начальных этапах. Нельзя недооценивать силу коллективной мысли.

Скорее всего аналогичный эффект может быть получен и без мембранны с отверстиями, а на объектах, поверхности которых покрыты упомянутым ворсом, уклон которого направлен локально в одну сторону.

Таким образом, обсуждение предложенной модели имеет как теоретическое, так и практическое значение. Ее практическое значение в случае ее технической реализации трудно переоценить, хотя бы в плане экологии и снижения риска техногенных катастроф. В случае признания учеными ее корректности Россия могла бы получить немалую пользу, закрепив за собой права на нее на международном уровне.

**С. А. Щиганов, д-р физ.-мат. наук,
И. П. Тихонов, канд. техн. наук**

К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ — ВЗГЛЯД ИЗ РФФИ

Рыночные реформы в России изменяют лицо российской науки. Вопросы инноваций, практического использования интеллектуального продукта сегодня актуальны даже в НИИ теоретического профиля. В материалах заседания Правительства РФ 22 января 2004 г. отмечалось: "Организация поддержки... приоритетов в рамках деятельности фондов осуществляется на всех этапах инновационного цикла, начиная с фундаментальных исследований (РФФИ) и до начальных стадий реализации инновационных проектов (Фонд поддержки малых предприятий в научно-технической сфере (Фонд МП НТС), Российский фонд научно-технического развития Минобрнауки РФ) на конкурсной основе с проведением комплексной экспертизы проектов. Система фондов призвана устранить имеющиеся разрывы в цепи "наука — технология — производство — рынок".

РФФИ, начиная с 1997 г., проводит целенаправленную деятельность в интересах продвижения результатов фундаментальных исследований в практическую сферу. Наиболее весомым практическим шагом на этом пути явился проведенный в 2002—2004 гг. совместно с Фондом МП НТС Конкурс инновационно ориентированных фундаментальных проектов (Конкурс "инно"). Главной задачей конкурса явилась разработка механизма превращения знания в общественно полезный продукт на примере продвижения тех ранее поддержанных РФФИ фундаментальных исследований, в ходе работы над которыми исследователи получили не только яркие фундаментальные результаты, но и обнаружили возможность их прикладного применения. Дальнейшее использование результатов в ходе этого конкурса осуществлялось совместно с малыми предприятиями, работающими в сфере создания научноемкой продукции.

Инициатива двух государственных фондов встретила горячий отклик научной общественности. Подчеркивалось, что инновационный процесс должен стать результатом эффективного сотрудничества работников двух сфер: фундаментальной науки, генерирующей новое знание, и прикладной сферы, превращающей эти знания в общественно полезный научноемкий товар.

В целом на Конкурс РФФИ "инно" поступило более 500 заявок, из которых эксперты отобрали 87. Сейчас, когда выполнение проектов завершено, можно говорить о многих важнейших, а порой и выдающихся результатах. Приведем несколько примеров.

"Разработка нового метода и прибора для сверхчувствительного детектирования органических и биоорганических соединений в жидкостях и газах".

Руководитель работ — С. М. Никифоров (Институт общей физики РАН). В результате выполнения проекта сконструирован уникальный прибор, с помощью которого можно в считанные секунды не только обнаружить в воздухе следовые количества наркотиков и взрывчатки, но и идентифицировать и буквально пересчитать все до единой молекулы этих опасных веществ.

"Разработка, изготовление и испытание газо-ион-селективных сенсоров на основе супрамолекулярных систем".

Руководитель — академик А. Ю. Цивадзе (Институт физической химии РАН).

Ученые синтезировали совершенно новые вещества с удивительными свойствами (так называемые супрамолекулярные системы) со строгой и четкой архитектурой и чрезвычайно интересными свойствами. На основе этих соединений можно сделать исключительно селективные и чувствительные сенсоры для анализа газов и биологических жидкостей, а также определять концентрацию различных, в первую очередь, ядовитых газов и содержание в биологических жидкостях, например, крови, ионов натрия и калия.

Опираясь на опыт, приобретенный при проведении Конкурса "инно", РФФИ в 2004 г. объявил о проведении нового конкурса, получившего название Конкурс ориентированных фундаментальных исследований (Конкурс ОФИ). Его главная задача, так же как и в Конкурсе "инно", — дальнейшее продвижение результатов ранее поддержанных в научных организациях фундаментальных исследований, в которых исследователи получили перспективные фундаментальные результаты, а также обнаружили возможность их использования в инновационном процессе. Таким образом, ставилась цель продолжения финансирования на конкурсной основе наиболее перспективных фундаментальных исследований в научных организациях страны до такой степени их научной проработки, когда становится реальным вовлечение этих результатов в хозяйственный оборот. В соответствии с этим в этом конкурсе основной упор сделан на отбор и дальнейшее финансирование тех работ, которые, начавшись с фундаментальной идеи и про-

демонстрировав результаты, перспективные для практического использования, нуждаются в дополнительном финансировании для доведения этих результатов до инновационно привлекательного вида. Немаловажным фактором в оценке ожидаемых результатов проектов являлась степень завершенности разработок: как правило, они должны быть доведены до уровня прототипа, демонстрирующего ключевые преимущества новой технологии.

Продолжение затем следующих стадий инновационного цикла (прикладных, маркетинговых исследований и т. д.) должно проводиться за счет других источников: средств других фондов, средств малых, средних и крупных предприятий, которым должны передаваться эти, теперь уже доработанные, результаты фундаментальных исследований.

Следует отметить, что Конкурс ОФИ также вызвал большой интерес среди научного сообщества России. Всего было подано более 800 заявок, около трети из них относится к физическим наукам. Среди организаций безусловным лидером является РАН — 63 % и научные организации Высшей школы — 25 %. В результате проведения конкурса было поддержано 164 проекта со среднегодовым финансированием примерно 650—700 тыс. руб. (при этом общая продолжительность проекта, как правило, составляет два года).

В настоящее время Советом РФФИ признано целесообразным регулярное проведение конкурсов ориентированных фундаментальных исследований как части разрабатываемой государственной системы по доведению результатов фундаментальных исследований до инвестиционно привлекательного вида.

АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

В этом номере мы начинаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области физики, математики, информатики, механики, химии и биологии и поддержанных Российской фондом фундаментальных исследований (РФФИ) по итогам конкурса 1999 г. Эти отчеты представляют определенный интерес для специалистов в области микро- и наносистемной техники. Общий список работ опубликован в "Информационном бюллетене РФФИ", № 7, 1999 г. (<http://www.rfbr.ru>).

Квантовый транспорт в атомных и молекулярных проволоках

Номер проекта: 99-02-16131
Год представления отчета: 2002

Важнейшим результатом, полученным в ходе выполнения проекта, является открытие сверхпроводимости в индивидуальных молекулах. В молекулах тубуленов (углеродных нанотрубках) была обнаружена собственная и индуцированная сверхпроводимость, в молекулах ДНК — только индуцированная сверхпроводимость.

Институт проблем технологий микроэлектроники и особо чистых материалов РАН

Оптические переходы в самоорганизующихся наноструктурах и квантовых точках на основе SiGe

Номер проекта: 99-02-16980
Год представления отчета: 2002

В диапазоне температур осаждения Ge развита МЛЭ технология роста SiGe самоорганизующихся наноструктур на Si(001). Для температур осаждения Ge 600 °C и 700 °C найдены условия роста для получения однородных (разброс меньше 10 %) по размерам островков. Методами комбинационного рассеяния света и рентгенодифракционного анализа обнаружено растворение Si в наноструктурах

во всем исследованном интервале температур роста. Предложен механизм растворения Si в островках, связанный с ускоренной упругими напряжениями поверхностной и объемной диффузией кремния из области максимальных упругих напряжений у основания островков. Впервые в исследованном температурном диапазоне с помощью методов рентгеновской дифракции и комбинационного рассеяния света получены конкретные значения состава и упругих напряжений самоорганизующихся наноструктур GeSi/Si(001), сформированных при различных температурах. Установлена связь между размерами и составом островков, выращенных при различных температурах. Выполнены исследования спектров фотолюминесценции структур с GeSi/Si(001) самоорганизующимися наноструктурами, выращенных при различных температурах. Установлена связь между параметрами (размерами, составом, упругими напряжениями) наноструктур и положением линии фотолюминесценции, связанной с излучательной рекомбинацией дырок, локализованных в островках, и электронов, находящихся в Si на гетерогранице II типа с островком. Показан различный характер зависимости от мощности оптической налочки для линии фотолюминесценции от островков и линий, связанных с излучательной рекомбинацией носителей заряда на дефектах кристалличес-

ской решетки. Получены GeSi структуры с самоорганизующимися наноостровками, имеющими в спектрах фотолюминесценции сигнал в области 1,55 мкм вплоть до комнатной температуры.

Институт физики микроструктур РАН

Сегнетоэлектричество в соединениях на основе белковых аминокислот

Номер проекта: 99-02-18307

Год представления отчета: 2002

Выращены монокристаллы белковых аминокислот глицина (альфа- и гамма-модификаций), аланина, валина, глутаминовой кислоты, аспарagine и лизина гидрохлорида (L- и DL- модификаций). Синтезированы и выращены монокристаллы следующих соединений на основе белковых аминокислот: фосфиты и фосфаты глицина, аланина, валина и дисеринсульфат моногидрат. Для всех выращенных монокристаллов проведены рентгенодифракционные исследования и установлен ди- фракционный класс симметрии. В интервале температур 100–300 К измерены температурные зависимости пьезоотклика кристаллов. В большей части исследованных кристаллов обнаружено наличие пьезоэффекта при значительном усилении пьезоотклика при снижении температуры. Из этих данных следует, что в кристаллах серинфосфата L-модификации и в кристаллах дисеринсульфата моногидрата DL-модификации, по-видимому, происходят фазовые переходы, выяснение механизма которых требует дальнейших исследований.

Рентгеноструктурные исследования подтверждают наличие фазового перехода, причем переход происходит в несоразмерную фазу.

Проведены исследования влияния постоянного электрического поля на диэлектрическую проницаемость выращенных кристаллов глицинфосфита в области сегнетоэлектрического фазового перехода 224 К. Поведение диэлектрической проницаемости в зависимости от электрического поля проанализировано в рамках теории фазовых переходов Ландау. Показано, что фазовый переход в этих кристаллах является переходом первого рода, близким к трикритической точке.

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

Фотонные кристаллы на основе синтетических опалов: оптические и структурные исследования

Номер проекта: 99-02-18284

Год представления отчета: 2002

При выполнении проекта была исследована картина трехмерной дифракции света на кристаллической решетке синтетического опала, состоящей из шаров SiO₂. Установлено, что при моно-

хроматическом освещении картина рассеяния представляет собой ряд дифракционных рефлексов, число и положение которых зависит от взаимной ориентации падающего луча и системы кристаллографических плоскостей. Экспериментальные данные интерпретированы в рамках модели, согласно которой основной вклад в дифракционные картины вносит квазибрэгговская дифракция света на плотноупакованных слоях (111) двойникованной кубической гранецентрированной решетки с дефектами упаковки. Рассеяние света на ростовой плоскости (111) по своим параметрам значительно ближе к идеальному брэгговскому, чем рассеяние на других (неростовых) плоскостях типа (111). Это следует, в частности, из угловой ширины дифракционных пиков, которая составляет примерно 10° при отражении от ростовой плоскости (111) и примерно 20° при отражении от неростовой плоскости типа (111). Уширение связано с одномерной неупорядоченностью чередования плотноупакованных слоев вдоль оси роста Z, которая приводит к беспорядку во всех слоях кроме ростовых (111). Кроме того, на основе анализа положения и ширины одномерной запрещенной фотонной зоны была получена информация о ростовых особенностях структуры опала вдоль ростовой оси Z.

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

Порядок, хаос и фрактальные структуры при фазовых переходах и резонансных явлениях в конденсированных средах

Номер проекта: 99-02-17404

Год представления отчета: 2002

В одноосных магнитных пленках экспериментально обнаружены новые типы бипериодических полосовых доменных структур и фазовых переходов между ними. Методом динамического установления выполнен численный расчет сингулярных распределений вектора намагниченности в монопериодических доменных структурах и разработан алгоритм для определения магнитостатического поля трехмерных бипериодических магнитных структур. Численными методами построен полный фазовый портрет динамической системы из двух плоских компланарных намагниченных тел, обладающих моментами инерции, и показано, что такая система представляет собой киральный объект. Изучено влияние флуктуаций на упорядочение распределения магнитного момента в пластинах и мембранах в окрестности ориентационных фазовых переходов. Предсказана возможность возникновения обусловленных магнитострикцией сверхструктур в двухслойных и многослойных средах типа ферромагнетик — немагнитный упругий материал при ориентационных фазовых переходах.

Установлено, что в сегнетоэластическом кристалле со стрикционной связью параметра порядка и деформаций могут существовать линейные и нелинейные поверхностные волны, обусловленные капиллярными эффектами. Экспериментально обнаружены и интерпретированы особенности динамической восприимчивости одноосных пленок ферритов-гранатов в окрестности точки Кюри. Доказана возможность возбуждения стохастического резонанса при наличии центров пиннинга для движения доменных границ в двумерных магнетиках или гибких макромолекул в разбавленном полимерном растворе. Предсказаны новые типы светоиндуцированных фазовых переходов в магнетиках. Выведены интегральные уравнения переноса в локально неравновесных магнитоупорядоченных средах. Показано, что в локально неравновесном состоянии отсутствует жесткая связь между спином и магнитным моментом.

*Институт радиотехники и электроники РАН,
Фрязинское отделение*

Порядок, хаос и фрактальные структуры при фазовых переходах и резонансных явлениях в конденсированных средах

Номер проекта: 99-02-17404
Год представления отчета: 2002

В одноосных магнитных пленках экспериментально обнаружены новые типы бипериодических полосовых доменных структур и фазовых переходов между ними. Методом динамического установления выполнен численный расчет сингулярных распределений вектора намагниченности в монопериодических доменных структурах и разработан алгоритм для определения магнитостатического поля трехмерных бипериодических магнитных структур. Численными методами построен полный фазовый портрет динамической системы из двух плоских компланарных намагниченных тел, обладающих моментами инерции, и показано, что такая система представляет собой киральный объект. Изучено влияние флуктуаций на упорядочение распределения магнитного момента в пластинах и мембранах в окрестности ориентационных фазовых переходов. Предсказана возможность возникновения обусловленных магнитострикцией сверхструктур в двухслойных и многослойных средах типа ферромагнетик — немагнитный упругий материал при ориентационных фазовых переходах. Установлено, что в сегнетоэластическом кристалле со стрикционной связью параметров порядка и деформаций могут существовать линейные и нелинейные поверхностные волны, обусловленные капиллярными эффектами. Экспериментально обнаружены и интерпретированы особенности динамической восприимчивости одноосных пле-

нок ферритов-гранатов в окрестности точки Кюри. Доказана возможность возбуждения стохастического резонанса при наличии центров пиннинга для движений доменных границ в двумерных магнетиках или гибких макромолекул в разбавленном полимерном растворе. Предсказаны новые типы светоиндуцированных фазовых переходов в магнетиках. Выведены интегральные уравнения переноса в локально неравновесных магнитоупорядоченных средах. Показано, что в локально неравновесном состоянии отсутствует жесткая связь между спином и магнитным моментом.

*Институт радиотехники и электроники РАН,
Фрязинское отделение*

Магнитные и электрические свойства структур с наноразмерными ферромагнитными и немагнитными металлическими кластерами вблизи порога перколяции

Номер проекта: 99-02-17071
Год представления отчета: 2002

Для определения механизма влияния магнитного поля на процессы электронного транспорта в гранулированных структурах синтезированы гранулированные пленки с наночастицами Co (Fe, Co, В), (Co, Nb, Ta) в аморфной матрице а-SiO₂ и гранулированные пленки с наночастицами Co, Cu (Co, Cu) в матрице аморфного гидрогенизированного углерода а-C:H. Структура пленок была исследована с помощью рентгеновской дифракции, малогоуглового рентгеновского рассеяния, ИК-спектроскопии, просвечивающей электронной микроскопии, ионным рентгеноспектральным методом, методами резерфордовского обратного рассеяния и ядерных реакций на дейtronах. Исследованы вольт-амперные характеристики и магнитосопротивление в зависимости от приложенных электрических и магнитных полей, концентрации гранул, частоты и температуры. Методом спинволнового рассеяния определены особенности проводимости гранулированных пленок и релаксация спиновых возбуждений ферромагнитных кластеров в СВЧ диапазоне. В рамках s-d-обменного взаимодействия построена модель спиновых возбуждений и релаксации в гранулированных структурах, содержащих металлические ферромагнитные наночастицы в изолирующей аморфной матрице. Определено магнитосопротивление гранулированных структур в рамках одноорбитальной модели, когда туннелирование между гранулами обладает s-s-характером. Получены следующие результаты:

1. Магнитное поле влияет на электронный транспорт в гранулированных структурах путем изменения поляризации электрона, туннелирующего через обменно-расщепленные локализованные состояния

между кластерами. При этом туннелирование электрона между кластерами через локализованные состояния носит неупругий, резонансный характер.

2. Локализованные электронные состояния в матрице вблизи уровня Ферми играют определяющую роль в поглощении микроволнового излучения. Основной вклад в процесс поглощения дают спин-поляризационные возбуждения, при которых изменение направления спина гранулы сопровождается переходом электрона с переворотом спина между двумя подуровнями расщепленного локализованного состояния в матрице и изменением поляризации этого локализованного состояния.

3. В гранулированных структурах ниже порога перколяции неупругое резонансное туннелирование между кластерами через локализованные состояния вносит существенный вклад в зависимость проводимости от температуры.

4. На электронный транспорт в гранулированных структурах значительное влияние оказывает образование электронных кластерных состояний (ЭКС) на группе гранул. Проявления ЭКС наблюдались на гранулированных пленках а-C:H(Cu). Существование ЭКС проверено на пленках а-C:H(Co) методом малоуглового рентгеновского рассеяния.

5. Методом спинволнового рассеяния обнаружено, что время релаксации спиновых возбуждений гранул в структурах а-C:H(Co), а-SiO₂(Co, Nb, Ta) и а-SiO₂(Fe, Co, В) является очень малой величиной. Это приводит к чрезвычайно большой ширине линий ФМР.

6. В ИК-спектрах пленок а-C:H(Co) обнаружена дополнительная область поглощения, которая определяется переходом электронов с уровня Ферми Со-кластеров в зону проводимости а-C:H.

Научно-исследовательский институт "Домен"

Особенности терагерцовой динамики в сегнетоэлектриках и стеклах

Номер проекта: 99-02-16697
Год представления отчета: 2002

Обнаружено, что интенсивность центрального пика в сегнетоэлектрике ниобата лития не зависит от степени стехиометричности кристалла и наличия легирующих примесей. Сделан вывод о том, что центральный пик является собственной характеристикой материала, а не индуцирован дефектами. Показано, что при температурах, близких к комнатной и ниже, спектральная форма центрального пика в ниобате лития не зависит от температуры, в то время как интенсивность меняется примерно в 2 раза при изменении температуры от 80 до 300 К. Экспериментально обнаружено, что бриллюэновские линии вносят дополнительный вклад в амплитуду центрального пика на частотах меньше 10 ГГц. Теоретический анализ набора эксперимен-

тальных исследований на различных материалах показал, что сила связи с релаксационными модами бриллюэновских линий и терагерцовых колебаний одинакова. Показано, что формализм мягкой моды, используемый в теории структурных фазовых переходов в сегнетоэлектриках, может быть применен для описания квазиупругого рассеяния света в стеклах и переохлажденных жидкостях. При этом роль температуры фазового перехода играет так называемая критическая температура T_c (T_c > T_g), предсказываемая моделью связанных мод. Проведен критический анализ собственных и литературных данных по структуре стекол. Показано, что стекла характеризуются наличием структурных неоднородностей нанометрового масштаба.

На ряде примеров продемонстрирована высокая методическая эффективность моделей, учитывающих нанометровую неоднородность стекол для интерпретации экспериментов в стеклах и переохлажденных жидкостях. Реализован уникальный эксперимент по наблюдению угловой зависимости (q-зависимости) низкочастотного КРС в диапазоне частот 0,1–2 ТГц. Эксперимент показал наличие q-зависимости при частотах ниже 0,2 ТГц. Величина наблюденного эффекта позволила сделать вывод о том, что терагерцовые колебания в стеклах являются сильно локализованными собственными состояниями акустического типа. Показано, что квазиупругое рассеяние света в стеклах в области частот 1 ГГц – 1 ТГц вызвано релаксационной частью колебательной функции отклика. Основной вклад в релаксационный отклик дают два механизма: ангармоничность колебаний и релаксация элементов структуры стекол в двухъямных потенциалах. На основе данных по рассеянию света в области частот 1 ГГц – 1 ТГц показано, что в оксиде бора преобладает первый механизм, в силикатном стекле – второй.

Определен фотон-фононный коэффициент связи в стеклах оксида бора с различной температурной обработкой. Анализ результатов показал, что существуют два типа колебательных возбуждений с разной частотной зависимостью коэффициента связи. Показано, что отжиг стекла вблизи температуры стеклования приводит к подавлению плотности терагерцовых колебательных состояний (бозонный пик) со стороны низкочастотной части спектра. Впервые обнаружены спектры 1/f шума в гигагерцовой области частот при температурах, близких к температуре стеклования. Механизмы релаксации, приводящие к 1/f спектрам, пока полностью не ясны. Разработана методика определения плотности колебательных состояний стекол по данным низкотемпературной теплоемкости, использующая решение интегрального уравнения методом регуляризации по Тихонову.

Институт автоматики и электрометрии СО РАН

ИНФОРМАЦИЯ

Организационный комитет

Стемпковский А. Л. председатель,
чл.-корр. РАН,
ИППМ РАН

Рябов Г. Г. заместитель
председателя,
чл.-корр. РАН

Члены организационного комитета:

Борискин В. С. ИППМ РАН
Гридин В. Н. д. т. н., ЦИТП РАН
Козлов Ю. Ф. д. т. н., Минобрнауки
России
Мальцев П. П. д. т. н., СПП РАН
Норенков И. П. д. т. н., МГТУ
им. Н. Э. Баумана
Соколов И. А. чл.-корр. РАН, ИПИ РАН
Чапкевич А. Л. д. т. н., ОАО МКНТ
Чаплыгин Ю. А. чл.-корр. РАН, МГИЭТ
(ТУ)
Щелоков А. Н. к. ф.-м. н., ИППМ РАН

Программный комитет

Норенков И. П. председатель, д. т. н.,
МГТУ им. Н. Э. Баумана

Члены программного комитета

Бобков С. Г. к. т. н., НИИСИ РАН
Корячко В. П. д. т. н., РГРТА
Курейчик В. М. д. т. н., ТРТУ
Приходько П. С. д. т. н., ОАО "НИИМЭ
и "Микрон"
Петричкович Я. Я. к. т. н., ГУП НПЦ
"ЭЛВИС"
Петросянц К. О. д. т. н., МГИЭМ(ТУ)
Русаков С. Г. д. т. н., ИППМ РАН
Скрылев А. С. д. т. н., ФГУП "Пульсар"
Стенин В. Я. д. т. н., МИФИ(ГУ)
Сауров А. Н. к. т. н., ГНЦ РФ ГУ НПК
"Технологический
Центр" МИЭТ

Секретариат Конференции (ИППМ РАН)

Куроедова Наталья Васильевна,
т. 532-5708 — информация
Егорова Валентина Владимировна,
т. 532-5579 — публикации
Горская Зоя Алексеевна, т. 531-8890 —
регистрация участников,
размещение

Министерство образования и науки РФ
(Федеральное агентство по науке и инновациям)

Российская академия наук
(Отделение информационных технологий и вычислительных систем — ОИТВС РАН)

Российский фонд фундаментальных исследований

ОАО Московский комитет по науке и технологиям

Секция научного совета ОИТВС РАН "Проблемы автоматизации проектирования микропроцессоров
и сверхбольших интегральных схем"

Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН

Журнал "Информационные технологии"

Московский государственный институт электронной техники (ТУ)

Орган изъято

Всероссийскую научно-техническую конференцию

"ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ

МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ — 2005"

(МЭС—2005)

11—14 октября 2005 г.

Лечебно-оздоровительный центр

Генпрокуратуры РФ "Истра"

(Московская область, Истринский район)

Основные обсуждаемые темы

Методы и средства автоматизации проектирования МЭС:

- методы и алгоритмы функционально-логического моделирования;
- методы моделирования электрических характеристик СБИС, методы смешанного и аналогового поведенческого моделирования в схемотехническом проектировании;
- методы и алгоритмы автоматизации топологического проектирования
- методы приборно-технологического моделирования СБИС;
- методы моделирования межсоединений в СБИС, включая проблемы экстракции и редукции цепей

Опыт разработки МЭС

Опыт разработки и методология проектирования цифровых, аналоговых, фоточувствительных и смешанных МЭС и др.

Системы на кристалле и IP-блоки (СНК):

- архитектуры систем реализуемых в виде СНК;
- средства САПР для СНК и МЭС;
- проблемы включения в СНК компонентов различной физической природы или технологий;

- проблемы использования в СНК продуктов интеллектуальной собственности (IP-блоков).

Спонсорам конференции предоставляется возможность технической презентации

Ключевые даты

До 15.04.2005 — прием тезисов докладов.

До 30.04.2005 — информация о включении доклада в программу конференции.

До 15.08.2005 — прием оформленных докладов.

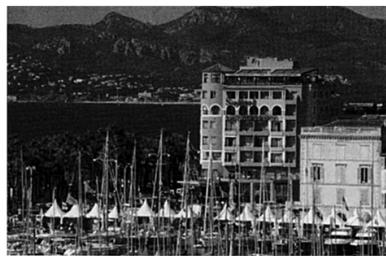
11.10.2005 — приезд участников; открытие конференции.

14.10.2005 — закрытие конференции; отъезд участников

Сроки представления докладов

Доклады с экспертным заключением на возможность опубликования должны быть представлены не позднее 15 августа 2005 г. по адресу:

124681 Москва, ул. Советская, д. 3,
Институт проблем проектирования
в микроэлектронике РАН, Оргкомитет
МЭС—2005, а также **обязательно** по
электронной почте: boriskin@ippm.ru



11th Annual IEEE
International Mixed-Signals Testing Workshop
June 27-29, 2005

<http://tima.imag.fr/conferences/imstw05>

Hotel Sofitel Le Méditerranée, Cannes, France

General Chair:
 S. Mir, TIMA, France

Program Co-Chairs:
 A. Richardson, U. Lancaster, UK
 K.-T. Cheng, UCSB, USA

Program Vice-Chairs:
 B. Kaminska, Pultronics, USA
 S. Sunter, LogicVision, Canada

Publicity Chair:
 B. Courtois, TIMA, France

Publications Chair:
 M. Lubaszewski, UFRGS, Brazil

Program Committee:

J. Abraham, U. Texas, USA
 K. Arabi, PMC Sierra, Canada
 F. Azais, LIRMM, France
 I. Bell, U. Hull, United Kingdom
 J. Carbonero, ST Microelectronics, France
 L. Carro, UFRGS, Brazil
 A. Chatterjee, Georgia Tech, USA
 B. Courtois, TIMA, France
 S. Demidenko, U. Monash, Malaysia
 J. Figueras, UPC, Spain
 G. Force, Texas Instruments, USA
 J. Franca, I. Sup. Técnico, Portugal
 D. Goodman, Ardent, USA
 G. Gronthou, Philips, Netherlands
 J.-L. Huang, National Taiwan Univ., Taiwan
 J. Huertas-Diaz, U. Sevilla, Spain
 A. Ivanov, U. British Columbia, Canada
 D. Keezer, Georgia Tech, USA
 H. Kerkhoff, MESA/U. Twente, Netherlands
 M. Lubaszewski, UFRGS, Brazil
 L. Milor, Georgia Tech., USA
 F. Novak, Josef Stefan Inst., Slovenia
 A. Osseiran, Edith Cowan Univ., Australia
 J. Pineda, Philips, Netherlands
 M. Renovell, LIRMM, France
 A. Rueda, U. Sevilla, Spain
 S. Sattler, Infineon, Germany
 M. Slamani, IBM, USA
 M. Soma, U. Washington, USA
 B. Straube, Fraunhofer IIS/EAS, Germany
 C. Su, U. National Chiao Tung, Taiwan
 P. Teixeira, INESC, Portugal

Liaisons:

IEEE: B. Kaminska, USA
 IEEE Europe: J. Figueras, UPC, Spain
 IEEE Asia-Pac: C. Su, Taiwan
 IEEE Latin-America: M. Lubaszewski, Brazil
 IEEE North-America: A. Ivanov, Canada

Local Organization: TIMA, F
 Finance: C. Benis/J. Parrau
 Audiovisuals: G. Prenat/F. Faure
 Website: G. Vitry
 Submissions and Proceedings: L. Rufer

Preliminary Call for Papers

The IEEE International Mixed-Signals Testing Workshop (IMSTW) is a forum for discussing all aspects of testing, design-for-test and reliable design of integrated mixed-signals/mixed-technology circuits and systems. This includes testing and design verification of mixed-signals/mixed-technology circuits (SoC), printed wiring boards and systems-in-packages. The technology spectrum includes analog, mixed-signals, high-speed IO, RF, MEMS, optics and more. Test topics such as design-for-test techniques, BIST, fault diagnosis, test generation, on-line and off-line testing, fault modeling, fault simulation and design of fault tolerant systems are all considered. Mixed-signals infrastructure, embedded core testing and application specific topics are also welcome

The IMSTW workshop is held annually, alternating between Europe and North America. The workshop is sponsored by the IEEE Computer Society Test Technology Technical Council.

The IMSTW Program Committee invites authors to submit papers in the above areas. Submissions should consist of either an extended summary of at least 750 words or a full paper. Authors of accepted submissions will be encouraged, though not obliged, to prepare a final version of their paper to be included in the informal workshop proceedings. A selection of papers will be invited to be re-submitted for a journal special issue.

The Workshop will take place in the Hotel Sofitel Le Méditerranée, in the French Côte d'Azur. The hotel is situated in the bay of Cannes, at the foot of the old town, bordered by beaches of fine sand, in front of Lerins Islands, and overlooking the yacht harbour and the Croisette.

Key Dates:

| | |
|-----------------------------|----------------------------------|
| Submission deadline: | February 28 th , 2005 |
| Notification of acceptance: | April 8 th , 2005 |
| Camera-ready full papers: | May 9 th , 2005 |

General Information

S. Mir
 TIMA Laboratory
 46 Av. Félix Viallet, 38031 Grenoble, France
 Tel.: +33 476574895
 Fax.: +33 476473814
 E-mail: Salvador.Mir@imag.fr

Program Information

A. Richardson
 Lancaster University
 Bailrigg Lancaster, UK-LA1 4YR Lancaster, UK
 Tel.: +44 7887 748313
 Fax.: +44 1524 381707
 E-mail : a.richardson@lancaster.ac.uk

Local Information

L. Rufer
 TIMA Laboratory
 46 Av. Félix Viallet, 38031 Grenoble, France
 Tel.: +33 4 76574306
 Fax.: +33 4 76473814
 E-mail: Libor.Rufer@imag.fr

K.-T. Cheng

Electrical and Computer Eng. Department
 University of California
 Santa Barbara, CA 93106-9560, USA
 Tel. : +1 805 893-7294
 Fax.: +1 805 893-3262
 E-mail: timcheng@ece.ucsb.edu



ESSDERC ESSCIRC 2005

Grenoble - France - 12-16 September 2005

CIRCUIT EXHIBITION

The European Solid-State Circuits Conference (ESSCIRC) and the European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC) '05 will be held in Grenoble – France from 12 - 16 September 2005. ESSCIRC and ESSDERC have a long, established tradition of high quality conferences dealing with all aspects of solid-state circuits, devices and technologies. This joint meeting is an event of major importance on the European scale. About 1000 conference attendees are expected. A vendor exhibition is also going to be organized.

Details can be found at www.essderc2005.com or www.esscirc2005.com

A circuit exhibition will also be organized. Three categories of circuits will be considered: Education, Research, Industry. The circuits must have been fabricated by the submission deadline. Plots of the circuits will be exhibited and a catalogue will be edited. The circuit exhibition is sponsored by CMP. Arrangements are being made with other services like CIC in Taiwan, CMC in Canada, ICC in China, IDEC in Korea, MOSIS in USA and VDEC in Japan to ensure a smooth coordination. The submission deadline is 17 June 2005.

Details can be found at <http://cmp.imag.fr/Announcmt.html>

For more information contact:
B. COURTOIS
Co-General Chair
ESSCIRC-ESSDERC '05
Director CMP

Bernard Courtois - Co-General Chair ESSDERC-ESSCIRC'05
TIMA-CMP - 46 avenue Felix Viallet - 38031 Grenoble Cedex - France
Tel: + 33 476 57 46 15 Fax: + 33 476 47 38 14 E-mail: Bernard.Courtois@imag.fr

CONTENTS

**Voitsekhovskii A. V., Nesmelov S. N., Kulchitsky N. A.,
Kulchitsky A. N., Melnikov A. A. The Threshold
Characteristics GeSi/Si Heterojunction Detectors with
the Internal Photoemission in a Spectral Range 8–12 2**

The questions of creation of infra-red detectors on epitaxial heterostructures $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ are considered. Calculation of threshold characteristics of photoemission detectors in a spectral range 8–12 microns and the analysis of opportunities of their optimization is carried out by change of their parameters.

**Rynkov D. O., Checha V. V., Schuka A. A. One-Electron
Devices 8**

Modern scientific and technical progress is determining evolution of electronics. The latest advances in field of electronics binding with physics of nanostructure, theirs technology of producing and creating new devices having new functional potentialities. One of these technologies there are creating one-electron devices. This work devote to creating one-electron transistors and devices are based of this.

**Kondratjev A. S., Mitrenin V. B., Senchik K. Ju.,
Vasiljev N. F., Jukhnev A. D. Pump for Mechatronical
Perfuzing Medical Systems 24**

The questions of mechatronical systems design of medical purpose and construction of modules entering into their structure on the basis of principle of "open architecture" are considered. The application of the integrated transmitters and actuators in combination with microprocessor technology ensures the simplicity of modification and the wide spectrum of the mechatronical systems use.

Altshuller G. M., Vaks V. L., Gaikovich K. P.

*Microwave Sounding of the Inner Temperature at the Heating
and Cooling of Living Tissues 28*

For the sounding of the subsurface temperature profile dynamics at the heating and cooling of the human living tissues the method of near-field radiometry that uses the dependence of the depth of the received emission formation is applied. The problems of the temperature distribution retrieval at the measurements of the biological tissues in water and in air are reduced to the solution of the integral Fredholm equations of the 1-st kind.

Burdakov S. F., Kirichenko V. V., Korotynsky A. V.,

*Smoljnikov B. A., Chistjakov V. M. Classification of Foreign
Mini- and Microrobotic Systems of Military Assignment on the
Basis of Lattice-Functional Approach 37*

The necessity of complex approach for classification of mini- and microrobotic systems with regard for functional dimensional and constructible-technological indications is shown.

The definitions of robotic systems (RS) are given. They are based on prevalent influence of technological development level of element base on technical look of the system as a whole. In this case the trends of the dimensional classification RS of the different forms of based (the aerial, water, land and cosmic) permit to detachments of systems in limits of class agreed upon the medium of functioning.

For foreign subscribers:

Joint-stock company MK-Periodica. E-mail: info@periodicals.ru Tel.: +7(095) 684-5008. Fax: +7(095) 681-3798

The journal bought since november 1999.

Editor-in-Chief Ph. D. Petr P. Maltsev

ISSN 1813-8586.

**Address is: 4, Stromynsky Lane, Moscow, 107076, Russia. Tel./Fax: +7(095) 269-5510.
E-mail: it@novtex.ru; http://www.microsystems.ru**

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стромынский пер., 4/1. Телефон редакции журнала **(095) 269-5510**. E-mail: it@novtex.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства

в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Дизайнер Т.Н. Погорелова. Технический редактор И.С. Павлова. Корректор Е. Комиссарова

Сдано в набор 02.02.2005. Подписано в печать 04.03.2005. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 8,08. Заказ 521. Цена договорная

Отпечатано в Подольской типографии — филиал ОАО "ЧПК", 142110, г. Подольск, ул. Кирова, 15