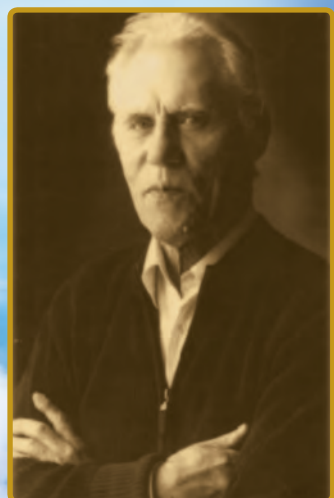


# ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ РАН

1988 – 2013



25  
лет

## Избранные научные результаты института

Москва 2013

**Основной целью Института является выполнение фундаментальных научных исследований и прикладных разработок в области физики и технологии элементной базы информационных и вычислительных систем.**

**Основными направлениями деятельности Института являются:**

- квантовые методы обработки информации и архитектура высокопроизводительных вычислительных систем, физика элементной базы квантовых компьютеров;
- физика и технология элементной базы микро- и нанoeлектроники, микро- и наносистемной техники;
- рентгеновские методы анализа структуры многослойных наносистем;
- математическое моделирование приборов и технологических процессов микро- и нанoeлектроники;
- разработка источников низкотемпературной плазмы, ионных пучков и ионноплазменных технологий;
- разработка методов мониторинга технологических процессов и диагностики микро- и наноструктур, физика наномангнетиков.

**Структура института:**

*Лаборатория микроструктурирования и субмикронных приборов*

*Лаборатория физики квантовых компьютеров*

*Лаборатория физики поверхности микро- и нанoeлектронных структур*

*Лаборатория ионно-лучевых технологий*

*Лаборатория математического моделирования физико-технологических процессов*

*Лаборатория архитектуры высокопроизводительных вычислительных систем*

*Лаборатория технологии микро- и наносистем*

*Ярославский филиал ФТИАН РАН*

Зав. лабораторией, академик Орликовский Александр Александрович

Зав. лабораторией, д.ф.-м.н. Богданов Юрий Иванович

Зав. лабораторией, д.ф.-м.н. Чуев Михаил Александрович

Зав. лабораторией, д.т.н. Маишев Юрий Петрович

Зав. лабораторией, д.ф.-м.н. Махвиладзе Таризель Михайлович

Зав. лабораторией, к.ф.-м.н. Цуканов Александр Викторович

Зав. лабораторией, чл.-корр. РАН Лукичев Владимир Федорович

Директор ЯФ ФТИАН РАН, д.ф.-м.н, Рудый Александр Степанович



Директор ФТИАН РАН,  
академик РАН  
**Орликовский А.А.**



Зам. директора по науке,  
чл.-корр. РАН  
**Лукичев В.Ф.**



Зам. директора по общим  
вопросам  
**Скалкин С.И.**



Ученый секретарь, к.т.н.  
**Кальнов В.А.**



Директор ЯФ ФТИАН РАН,  
д.ф.-м.н.  
**Рудый А.С.**

## ***Научно-образовательный центр «Демидовский Центр нанотехнологий и инноваций»***

НОЦ создан в 2007 году на базе Ярославского государственного университета им. П.Г.Демидова и Физико-технологического института РАН с целью развития научной, образовательной и инновационной деятельности в сфере наноэлектроники и наноматериалов.

Научный руководитель НОЦ – профессор, доктор технических наук, директор ФТИАН, академик РАН Александр Александрович Орликовский.

### **Основные направления деятельности НОЦ**

1. Образовательная деятельность: развитие и реализация существующих вузовских программ подготовки и новых образовательных программ в сфере нанотехнологий, системы подготовки специалистов высшей квалификации, системы повышения квалификации и переподготовки специалистов в области нанотехнологий, системы мониторинга инновационной деятельности в области нанотехнологий, инновационной инфраструктуры, наноиндустрии Ярославского региона.
2. Научно-исследовательская деятельность: разработка физических основ микро- и наноэлектроники, методов моделирования и визуализации процессов нанотехнологии в электронике, методов моделирования и исследования свойств наночастиц и массивов наночастиц, перспективных технологий для микро- и наноэлектроники, методов манипулирования нанообъектами, методов диагностики наноструктур, способов и устройств для физической реализации квантовых вычислений, наноприборов и наномашин.

## **Центр коллективного пользования научным оборудованием «Диагностика микро- и наноструктур» Ярославского государственного университета и Физико-технологического института РАН**

Центр коллективного пользования научным оборудованием «Диагностика микро- и наноструктур» создан при Ярославском госуниверситете 1 ноября 2006 г., приказ №382, решение Ученого совета ЯрГУ от 24.10.2006 г.

Центр входит в национальную *нанотехнологическую сеть*.

### **Центр участвует в мероприятиях Федеральных целевых программ:**

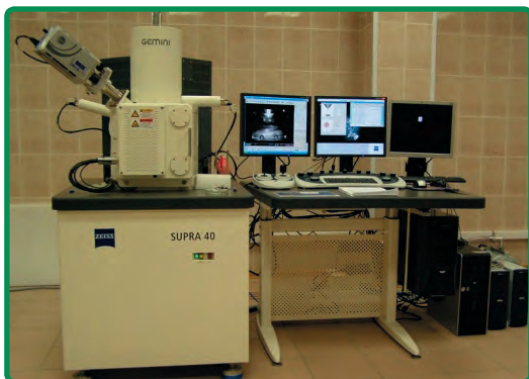
- Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы.
- Научные и научно-педагогические кадры инновационной России.

### **Центр располагает самым современным аналитическим и диагностическим оборудованием.**

- Заказной анализ широкого класса объектов методами:
  - вторичной ионной масс-спектрометрии (IMS-4F);
  - времяпролетной ионной масс-спектрометрии (IONTOF SIMS5);
  - электронной сканирующей микроскопии (Supra 40);
  - туннельной сканирующей микроскопии (GPI-Cryo-SEM);
  - электронно-ионной сканирующей микроскопии (Quanta 3D 200i);
  - просвечивающей электронной микроскопии (Tecnai G2 F20 U-TWIN);
  - зондовой микроскопии (CMM 2000) и профилометрии (модель 130);
  - оже-спектроскопии (PHI-660);
  - ИК фурье-спектроскопии (IFS 113-v);
  - рентгеноструктурного анализа (ARL X'tra);
  - Рамановской спектроскопии (EnSpector R532).

## Центр коллективного пользования «Диагностика микро- и наноструктур»

Центр объединяет оборудование Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова (ЯрГУ) и Ярославского Филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технологического института Российской академии наук (ЯФ ФТИАН РАН).



Сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения *Zeiss Supra-40* с рентгеновским энергодисперсионным анализатором *INCAEnergy Oxford Instruments*



Двулучевая система *Quanta 3D 200i* от *FEI™*

- Сканирующий электронный микроскоп (SEM)
- Ионный сканирующий микроскоп с сильноточным сфокусированным пучком ионов галлия (FIB)
- Газо-инжекционная система *GISPlatinumdeposition(FEI™)* для прецизионного нанесения слоя платины
- Микроманипулятор *Omniprobe model 100.7 (Omniprobe Inc.)*
- Энергодисперсионный кремниевый дрейфовый детектор *Apollo X(AmetekInc.)* для микрорентгеноспектрального анализа



Просвечивающий электронный микроскоп *Tescan TF20-TF30 UT FEI Company*

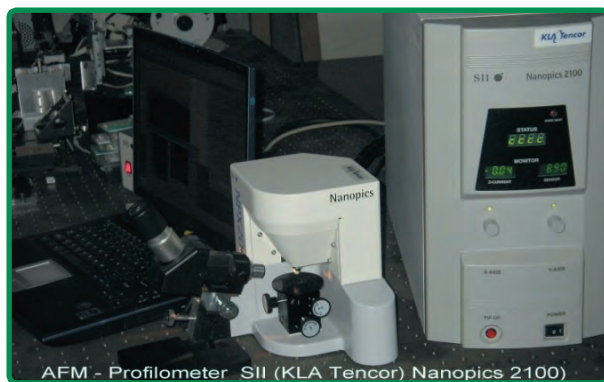


Рентгеновский дифрактометр *ARL XTRA TemoTechno*



Времяпролетный масс-спектрометр *ION-TOF*

## Современное аналитическое оборудование ФТИАН



Атомно силовой микроскоп-профилометр  
*Nanopics 2100 (SII - KLA Tencor)*



Оптический интерференционный микроскоп  
*Zygo New View 5000* - универсальный анализатор  
топологии трехмерных структур

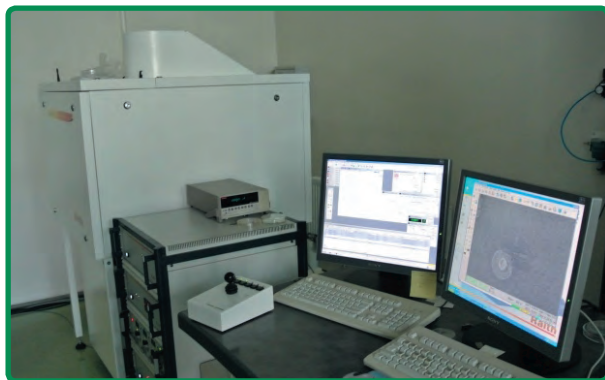


Установка для измерения электрических параметров  
микро- и нанoeлектронных структур  
методами I-V, C-V - метрии *Keithley 4200-SCS (USA)* и  
зондовая станция *Micromanipulator 7000 (USA)*

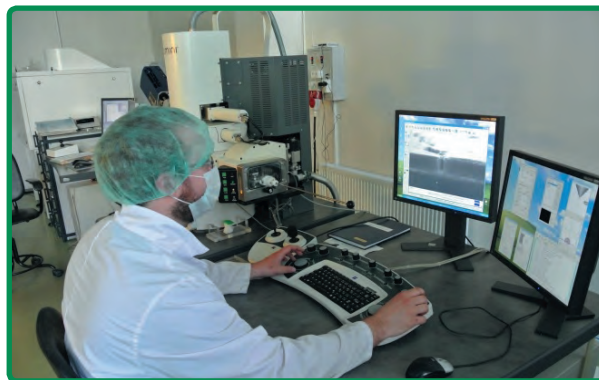


Спектральный эллипсометр *M 2000X*  
(Woolam Co., USA) для измерения оптических  
характеристик и толщин слоев многослойных  
микроэлектронных структур с точностью 0.1 нм,  
спектральный диапазон 245 - 1000 нм

## Технологическое оборудование для проведения процессов литографии



Установка электронной литографии *Raith-150*



Растровый электронный микроскоп  
*SmartSEM Supra 55VP*



Установка двухсторонней оптической литографии –  
*Suss MA6/BA6 (Gen2)* (Германия)



Установка химической подготовки пластин  
*WBS-1600 Sawatec* (Германия)



Установка нанесения, термообработки и проявления  
фоторезиста – *WBS-1600 Sawatec* (Германия)

## Технологическое оборудование для создания микро- и нанoeлектронных структур



Установка плазмостимулированного атомно-слоевого осаждения тонких пленок (P-ALD) *FlexAl* (*Oxford Instruments, UK*) для роста подзатворных *High-K* диэлектриков, материалов металлических затворов, барьерных и каталитических слоев. Возможна обработка пластин 50 - 200 мм.



Двухкамерный кластер *Dual Plasmalab 100 ICP 380 System* (*Oxford Instruments, UK*) для плазмохимического травления микро- и нанoeлектронных структур во фтор- и хлорсодержащей HDP плазме низкого давления. Возможна обработка пластин 100, 150, 200 мм.

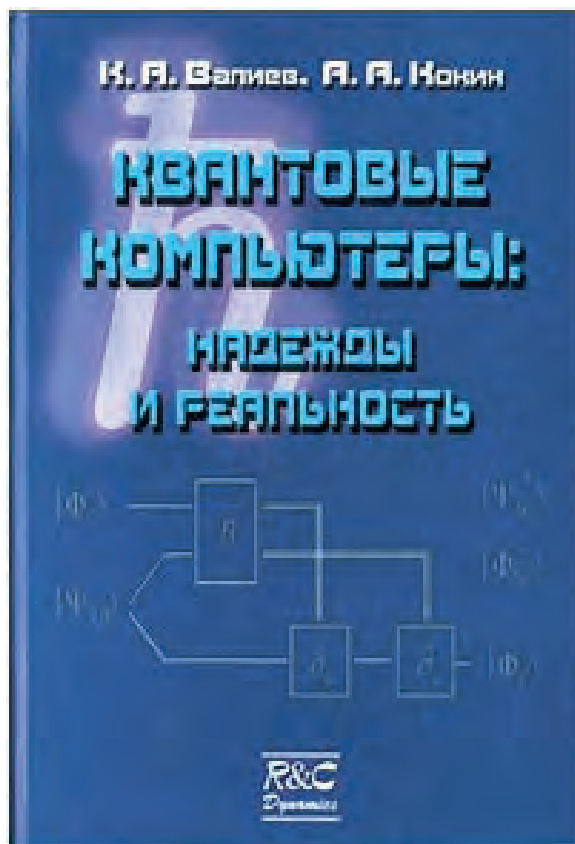


Установка быстрого термического (фотонного) отжига и термического окисления (БТО) *As-One 100* (*AnnealSys, France*) для термообработок микроэлектронных структур, отжига ультратонких имплантированных слоев в кремнии. Возможна обработка пластин 100 мм

## Монографии и сборники научных трудов



## Исследованиям в области физики квантовых компьютеров в ФТИАН 15 лет



Лаборатория физики квантовых компьютеров создана в Физико-технологическом институте РАН в мае 1998 года. По инициативе и под руководством академика К.А. Валиева была развернута активная деятельность по исследованию и разработке квантовых алгоритмов, квантовых элементов и устройств для задач квантовой информатики.

Одно из постоянных направлений работы лаборатории – это всесторонний критический анализ современного состояния и перспектив развития квантовой информатики.

Валиев К.А., Кокин А.А. «Квантовые компьютеры: надежды и реальность». РХД. Москва- Ижевск. Второе исправленное издание 2002 г.

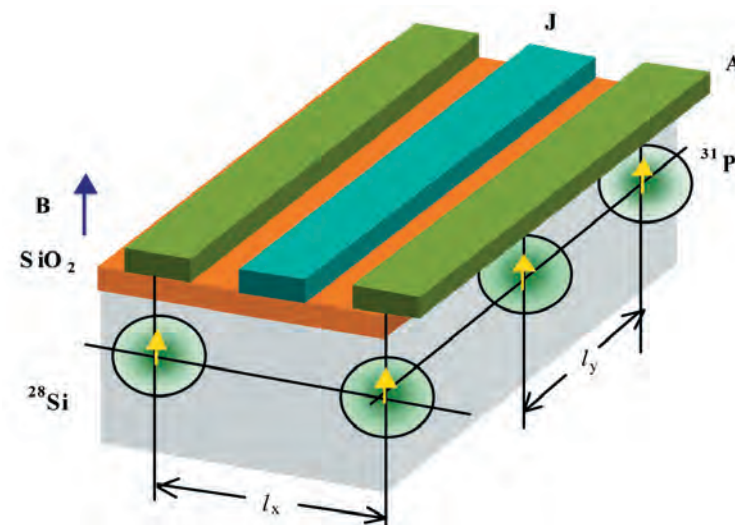
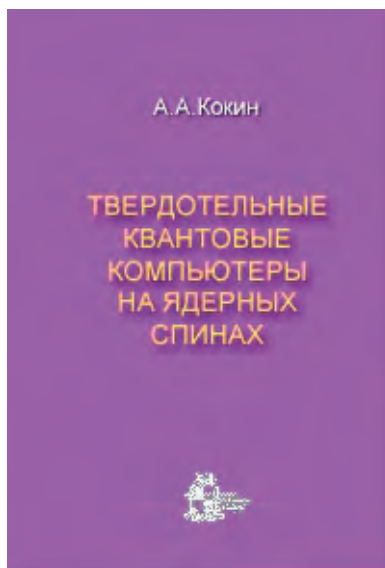
Кокин А.А. Твердотельные квантовые компьютеры на ядерных спинах. Институт компьютерных исследований. Москва-Ижевск. 2004.

Ю.И.Богданов, К.А. Валиев, А.А.Кокин. Квантовые компьютеры: достижения, трудности реализации и перспективы // Микроэлектроника. 2011. Т.40. №4. С.243-255.

Ю.И. Богданов, А.А. Кокин, В.Ф. Лукичев, А.А. Орликовский, И.А. Семенихин, А.Ю. Чернявский. Квантовая механика и развитие информационных технологий // Информационные технологии и вычислительные системы. 2012. №1. с.17-31.

## Ансамблевый кремниевый ЯМР квантовый компьютер на ядерных спинах

Разработана и детально исследована модель ансамблевого кремниевого ЯМР квантового компьютера. Переход к ансамблю эквивалентных параллельно работающих квантовых регистров существенно увеличивает уровень сигнала на выходе компьютера, а схема планарного кремниевого ансамблевого регистра позволяет использовать технику ЯМР и технику двойного электронно-ядерного резонанса для инициализации, измерения и контроля состояния кубитов.



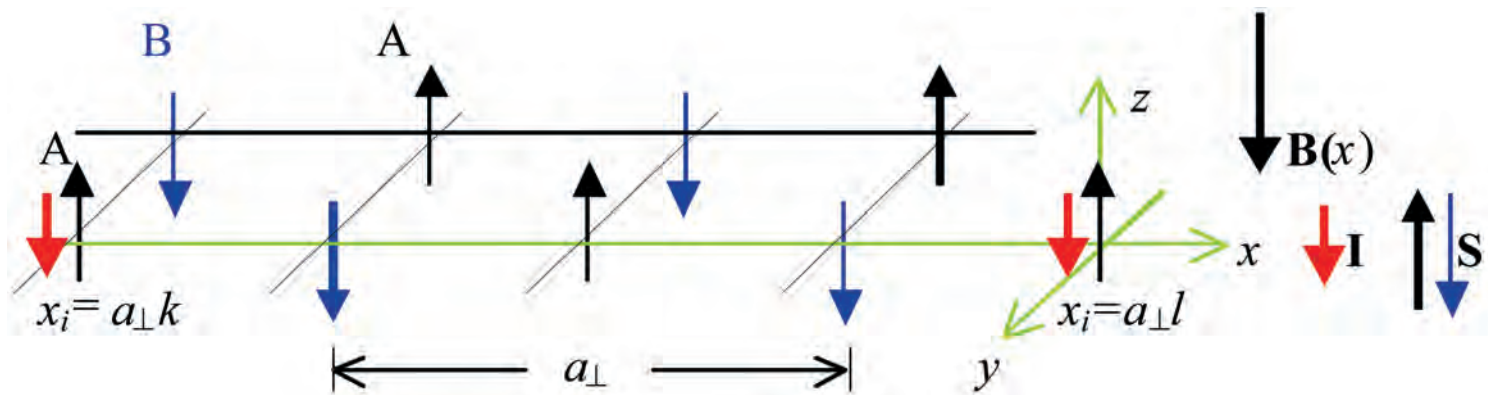
На рисунке справа представлена схема расположения донорных атомов  $^{31}\text{P}$  под полосковыми затворами для двух ячеек регистра и трех элементов в ансамблевой модели ЯМР квантового компьютера.

Валиев К.А., Кокин А.А. Проблемы реализации полномасштабного квантового компьютера на ядерных спинах в кремниевой наноструктуре. // Труды ФТИАН, 2005, т.18, с. 19-36.

А.А.Кокин. Анализ перспектив вариантов полномасштабных твердотельных квантовых регистров, использующих ядерные спины в качестве кубитов. // Труды ФТИАН 2012, том 22. стр. 6-22.

## Модель полномасштабного квантового регистра на основе цепочки ядерных спинов в тонкой пластине антиферромагнетика

Предложена и детально исследована модель полномасштабного квантового регистра на основе регулярной одномерной цепочки из изотопов с ядерными спинами  $I = 1/2$ , замещающих основные изотопы в тонкой пластине однодоменного безспиновой антиферромагнетика с легкой осью анизотропии. Наличие неоднородности внешнего магнитного поля обеспечивает не только различие резонансных частот отдельных кубитов в квантовом регистре, но и возможность управления взаимодействием между удаленными спинами.

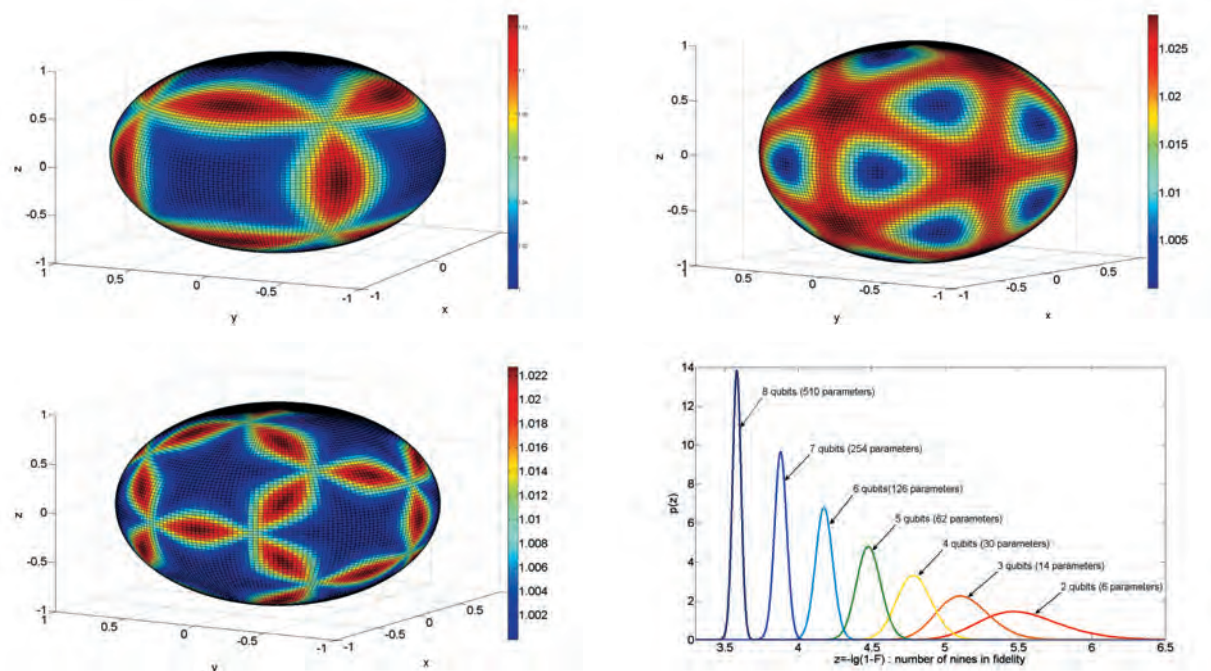


На рисунке представлена схема расположения электронных (S) и ядерных (I) спинов в двухподрешеточной легкоосной антиферромагнитной пластине до фазового перехода типа опрокидывания.

Kokin A.A., Kokin V.A. Antiferromagnet-based nuclear spin model of scalable quantum register within homogeneous magnetic field // Quantum Computers & Computing, 2008, v.8, pp. 78-125.  
Кокин А.А., Кокин В.А. О косвенном взаимодействии между ядерными спинами в легкоосном антиферромагнетике // Теоретическая и математическая физика, 2011, том 168, № 3, стр. 467-481.

## Методология анализа полноты, адекватности и точности реализации квантовых вентилей

Основное препятствие на пути реализации концепции полномасштабных квантовых компьютеров – это декогерентизация квантовых состояний, обусловленная квантовыми шумами. С целью существенного повышения уровня исследований в рассматриваемой области совместно с Московским государственным университетом им. М.В. Ломоносова и Математическим институтом РАН им. В.А. Стеклова разработана новая методология оценивания качества и эффективности квантовых информационных технологий, основанная на анализе полноты, адекватности и точности реализации квантовых вентилей. Эффективность предложенного подхода была продемонстрирована в работах с оптическими и сверхпроводниковыми кубитами.



На рисунке справа внизу представлена точность восстановления состояния Белла и GHZ- состояния в зависимости от числа кубитов.  
На остальных рисунках с помощью сферы Блоха иллюстрируется точность различных протоколов квантовой томографии.

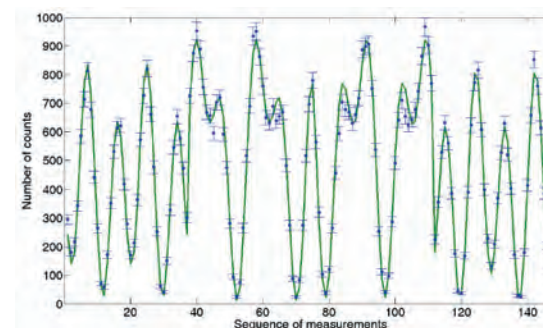
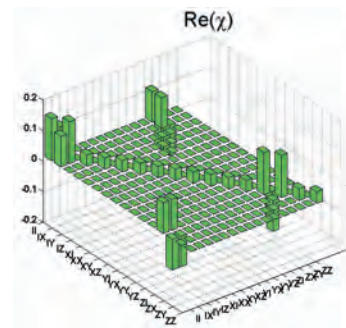
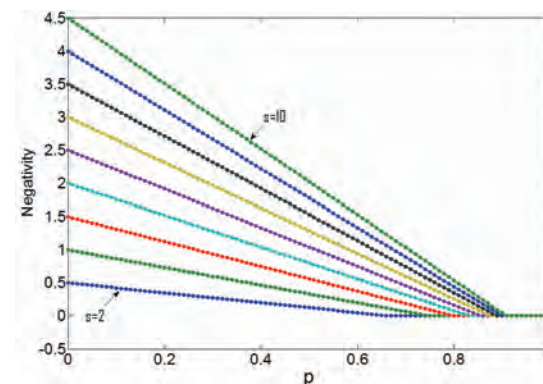
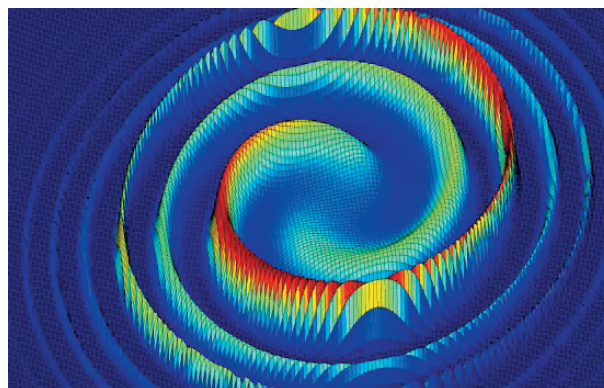
Ю.И. Богданов. Унифицированный метод статистического восстановления квантовых состояний, основанный на процедуре очищения // ЖЭТФ. 2009. Т.135. Вып.6.с.1068-1078.

Bogdanov Yu.I., Brida G, Genovese M., Kulik S.P., Moreva E.V., and Shurupov A.P. Statistical Estimation of the Efficiency of Quantum State Tomography Protocols // Phys. Rev. Lett. 2010. V.105. 010404. 4p.

Yu. I. Bogdanov, G. Brida, I. D. Bukeyev, M. Genovese, K. S. Kravtsov, S. P. Kulik, E. V. Moreva, A. A. Soloviev, A. P. Shurupov. Statistical Estimation of Quantum Tomography Protocols Quality// Phys. Rev. A. 2011. V.84. 042108.19 p.

## Исследование влияния квантовых шумов на качество элементной базы квантовых компьютеров

Методы численного анализа и статистического моделирования с учётом влияния квантовых шумов, а также результатов экспериментальных и технологических исследований позволяют дать исчерпывающую оценку качеству и эффективности проектируемых квантовых регистров. Посредством обратной связи развитый подход позволяет наилучшим образом распорядиться имеющимися ресурсами для оптимизации процесса разработки квантовых информационных технологий.



На рисунке слева сверху иллюстрируется динамика квантовой системы в фазовом пространстве, справа сверху - разрушение сцепленности в квантовых операциях под действием шума, слева внизу - визуализация  $\chi$ -матрицы для вентиля CNOT под действием деполяризующего шума, справа внизу- восстановление квантового состояния в задаче исследования явления фотоупругости.

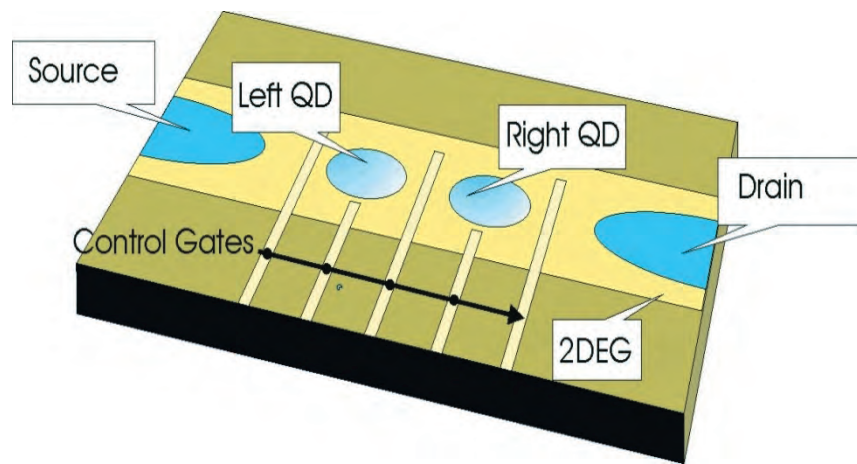
Ю.И. Богданов, В.Ф. Лукичёв, С.А. Нуянзин, А.А. Орликовский. Квантовые шумы и контроль качества элементной базы квантовых компьютеров на сверхпроводниковых фазовых кубитах // Микроэлектроника. 2012. Т.41. №6. с.387-398.

Yu.I. Bogdanov, A.Yu. Chernyavskiy, A.S. Holevo, V.F. Luckichev, A.A. Orlikovsky. Modeling of quantum noise and the quality of hardware components of quantum computers// Proceedings of SPIE. 2013. V. 8700. Art. 87001A.

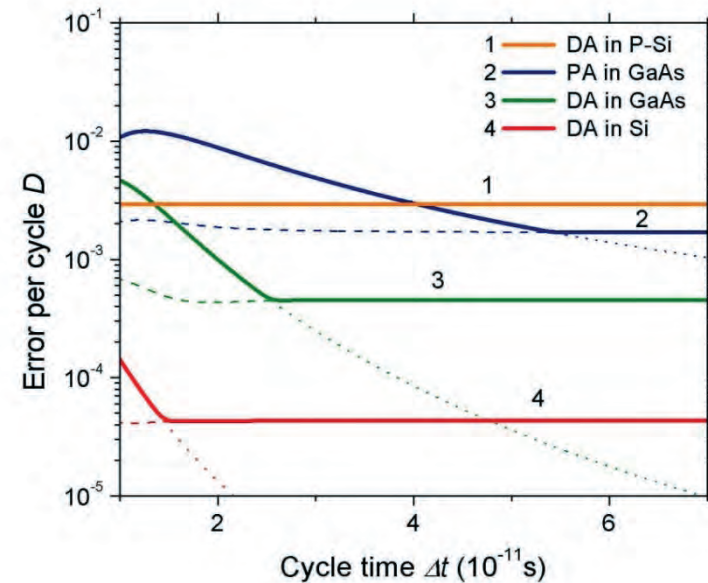
Yu. I. Bogdanov, A. A. Kalinkin, S. P. Kulik, E. V. Moreva, V. A. Shershulin. Quantum polarization transformations in anisotropic dispersive medium // New Journal of Physics. 2013. V.15. 035012. 24 p

## Кубиты на пространственных степенях свободы электрона в двойных квантовых точках

Впервые предложен когерентный квантовый бит (кубит), использующий для хранения и переработки информации пространственные степени свободы электрона в полупроводниковой наноструктуре. Конструкция кубита основывается на симметричной паре квантовых точек, разделённых туннельным барьером. Логические «0» и «1» кодируются не спином электрона, а его пространственным положением в соответствующей точке. Доказано, что, с учётом всех основных механизмов потери когерентности: рассеяния электрона на акустических и оптических фононах, взаимодействия с электромагнитным окружением и контактами, существует область параметров с высокой степенью когерентности пространственных состояний электрона в двойной точке, достаточной для эффективной квантовой обработки информации.



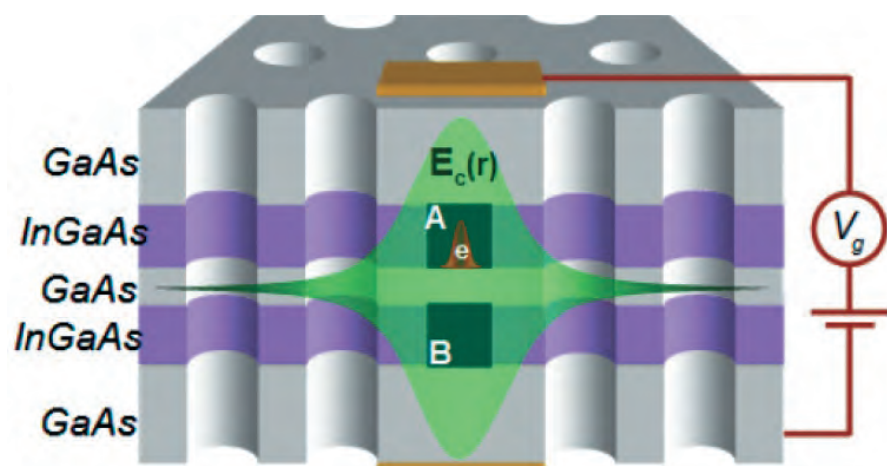
Конструкция полупроводникового кубита, включающая в себя две квантовые точки (в центре) и управляющие металлические затворы



Зависимость числа сбоя в пересчёте на одну элементарную операцию в зависимости от длительности такта квантовых вычислений для Si и GaAs квантовых точек

## Дизайн и контроль одноэлектронных зарядовых кубитов на двойных квантовых точках (ДКТ)

Показано, что с помощью комбинации однофотонного поля полупроводникового резонатора и поля электростатического затвора можно добиться реализации произвольных одно- и двухкубитных вентилях на зарядовых кубитах. Разработана простая и эффективная схема генерации запутанных девятикубитных состояний Шора.



Схематическое изображение двойной квантовой точки, помещенной в пучность однофотонного поля резонатора (дефект в двумерном фотонном кристалле).

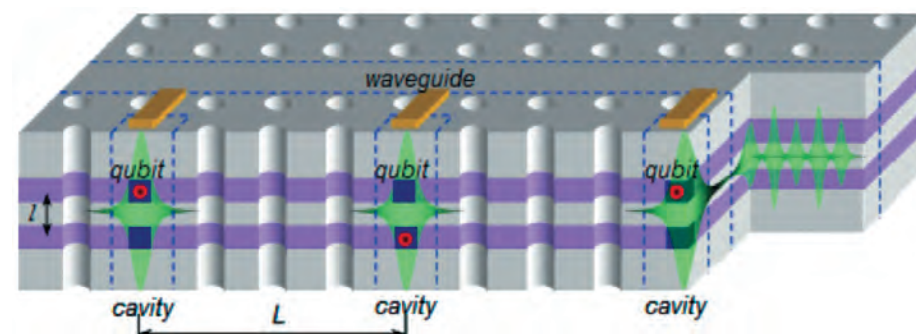
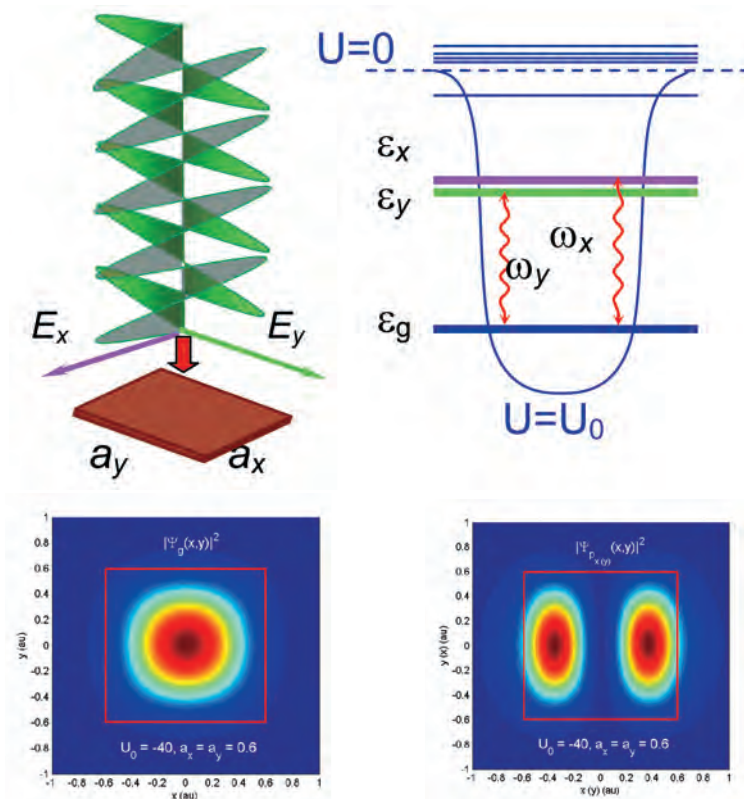


Схема квантового регистра на основе массива ДКТ, помещенных в пучности мод индивидуальных резонаторов – дефектов фотонного кристалла, которые, в свою очередь, взаимодействуют через общий волновод.

## Новый алгоритм, позволяющий реализовать квантовые операции в кластере из полупроводниковых квантовых точек

Внешний управляющий лазерный импульс вызывает циклическую эволюцию электрона в структуре, если его частота равна частоте перехода, соответствующей одной из восьми зарядовых конфигураций кластера. Этот процесс приводит к фазовому сдвигу данного трехкубитного состояния. Продемонстрирована возможность осуществить произвольную квантовую операцию в логическом подпространстве трех кубитов.



Контроль состояния квантовой точки (зарядового кубита) при помощи двух резонансных лазерных импульсов и распределение электронной плотности в основном и возбужденных состояниях КТ

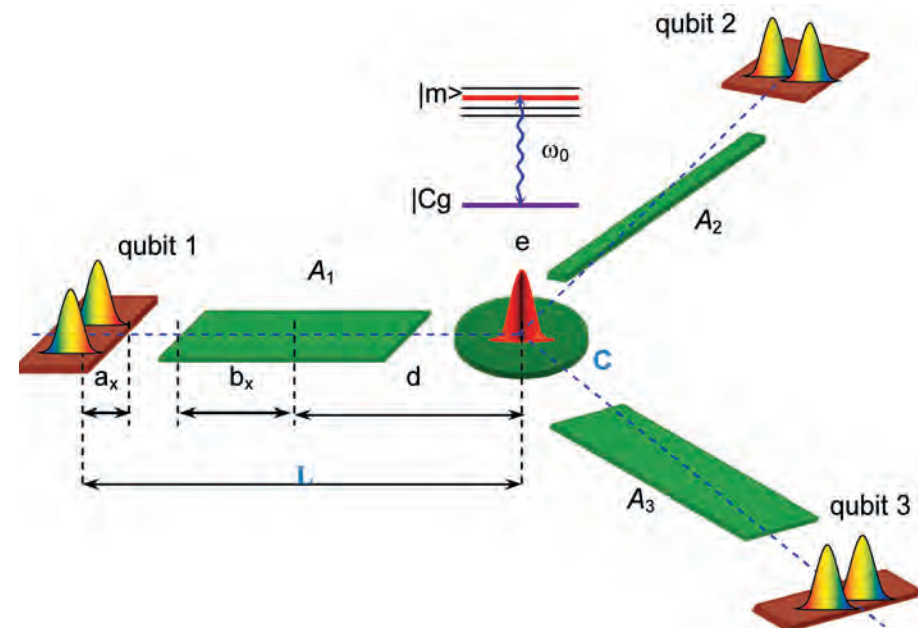


Схема трехкубитного кластера и вспомогательной структуры.

Tsukanov A.V. Indirect coupling in a cluster of quantum-dot-based charge qubits // Journ. Comp. Theor. Nanoscience. A Special Issue on Technology Trends and Theory of Nanoscale Devices for Quantum Applications. 2010. V. 7. P. 1727.

## Новая схема обработки квантовой информации в алмазной наноструктуре, содержащей NV-центры

Одиночный NV-центр, помещенный в высокочастотный дисковый резонатор, играет роль спинового кубита, эволюцией которого управляют микроволновые, электрические и оптические импульсы. Кубит взаимодействует с полем резонатора путем когерентного обмена фотонами. Запутывание состояний двух произвольных центров происходит за счет регулирования их оптических частот относительно частоты волновода посредством электростатического управления.

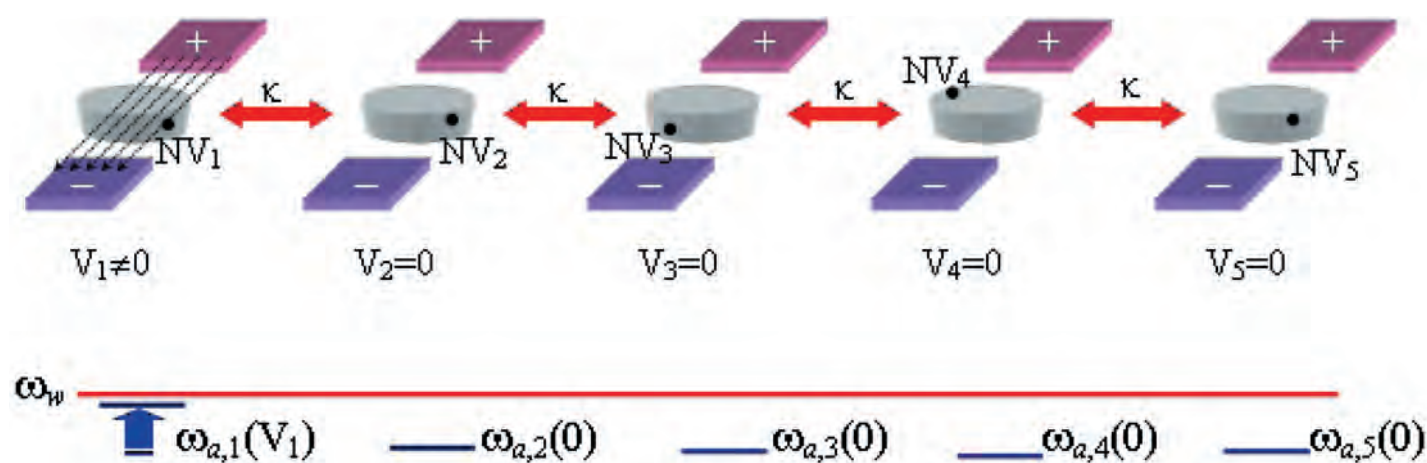


Схема квантового регистра из пяти NV-кубитов на основе квазилинейной фотонной наноструктуры. Частоты  $\omega_{a,k}$  оптических переходов центров контролируются при помощи электрического поля, создаваемого системой затворов, на которые подаются разности потенциалов  $V_k$  ( $k = 1 - 5$ ). Показана схема настройки частоты первого центра в резонанс с частотой  $\omega_w$  моды волновода.

## Квантование проводимости металлических наноконтактов молибдена

Впервые продемонстрировано фундаментальное квантование проводимости наноконтактов молибдена. Эксперимент проводился при комнатной температуре и нормальных условиях посредством пьезомеханического перемещения двух молибденовых проводников. Удалось наблюдать ступенчатое возрастание сопротивления контакта. Полученные гистограммы проводимости демонстрируют пик, соответствующий одному кванту проводимости.

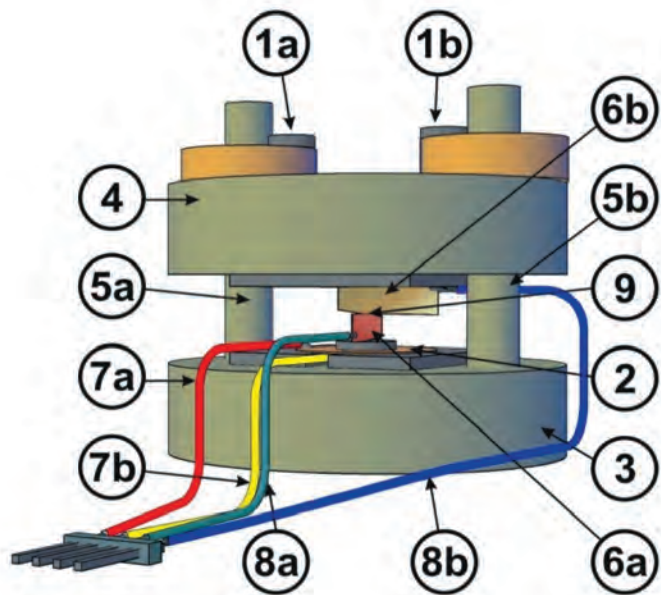
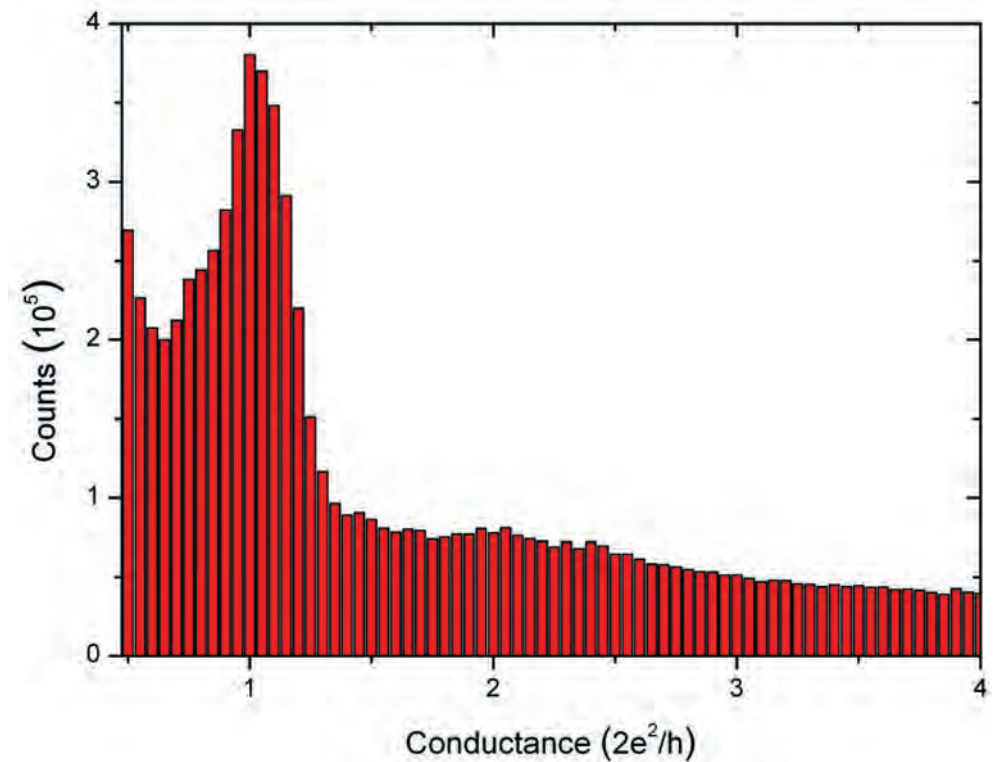


Схема устройства контроля положения молибденовых проводников. 9 – область формирования наноконтакта.

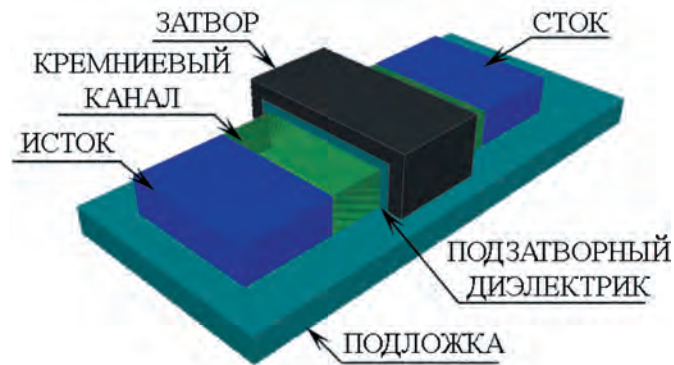


Гистограмма значений проводимости наносужения, образующегося при размыкании молибденовых контактов.

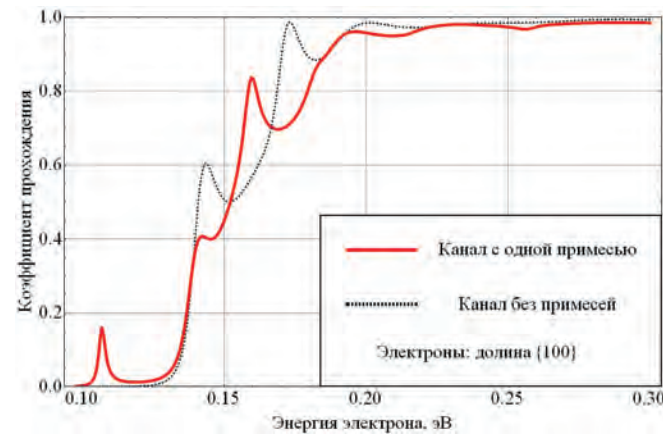
Л. Федичкин, А. Борисов, А. Конин, Р. Петрухненко, М. Чернышев, В. Рубаев. Влияние квантовых эффектов на электронный транспорт в молибденовых наноконтактах. Микроэлектроника, т. 41, с. 5-9 (2012)

## Полевой транзистор в ультратонком слое кремния

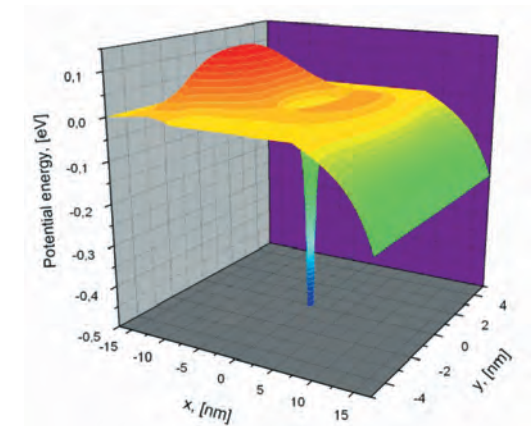
Разработана эффективная программа квантового моделирования полевых нанотранзисторов на основе структур «кремний на изоляторе». Проведен расчет характеристик нанотранзисторов с учетом типичных неоднородностей в канале.



Конструкция полевого транзистора на сверхтонком слое кремния: тонкий канал огибается затвором.



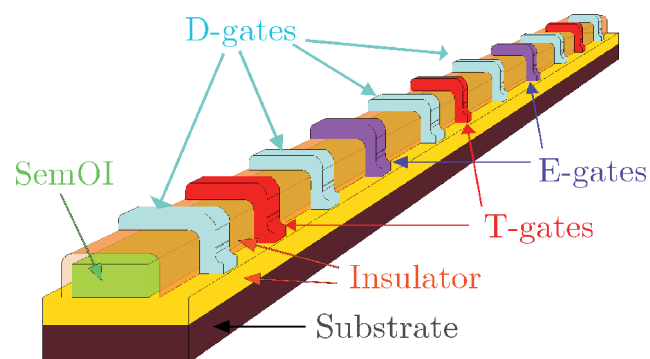
Рассчитанные коэффициенты прохождения электронов из контакта истока в контакт стока, отражающие квантовый характер транспорта в канале. Осцилляции вызваны интерференцией волн в идеальном канале и при наличии одиночной заряженной примеси.



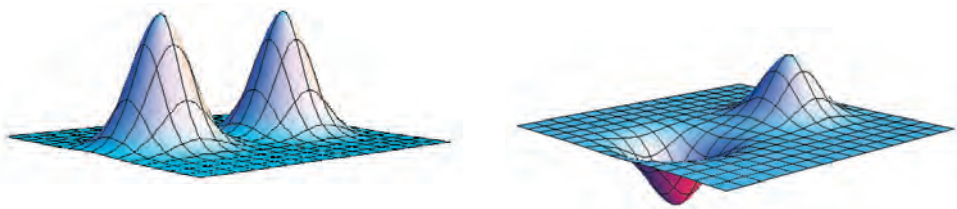
Потенциальный рельеф в канале транзистора при наличии одиночной заряженной примеси.

## Квантовый компьютер на пространственных кубитах в канале полевого транзистора в сверхтонком слое кремня

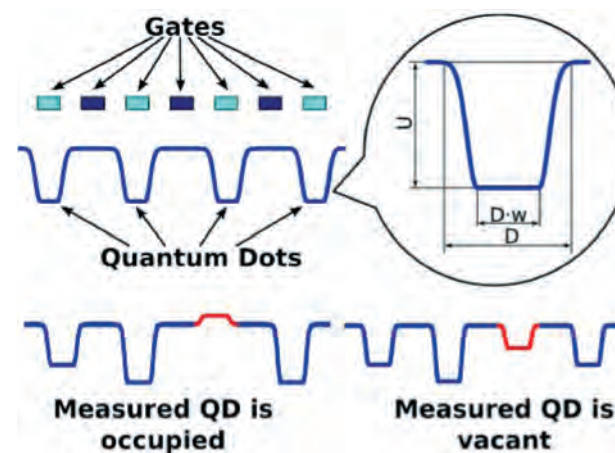
Предложена конструкция квантового компьютера в канале полевого транзистора и создана программа его моделирования. Кубитами являются электроны в двойных квантовых точках, состояния которых формируются и управляются потенциалами затворов с размерами 10-20 нм при температуре 4К, толщина кремниевого канала 2-4 нм. При работе компьютера не происходит перемещения заряда между квантовыми точками. Работа компьютера основана только на фазовых состояниях кубитов. Для измерения конечного состояния кубитов предложено использовать кулоновскую блокаду тока, протекающего через канал, при наличии электрона в измеряемой квантовой точке.



Конструкция компьютера



Волновые функции базовых состояний кубитов на основе двойных квантовых точек: симметричное (слева) и антисимметричное (справа).



Потенциальный рельеф в канале, формируемый затворами (вверху). Создание условий кулоновской блокады тока при измерении состояния кубита (внизу).

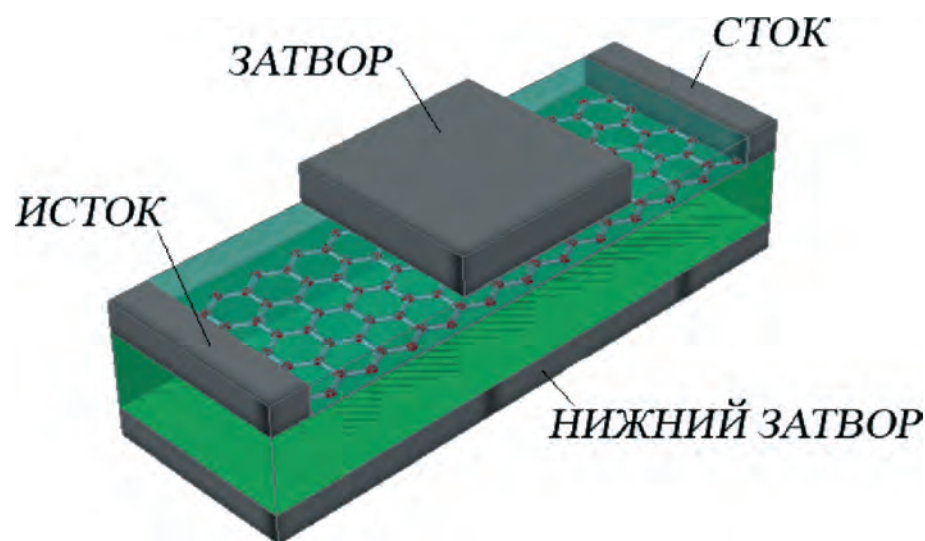
S. Filippov, V. Vyurkov, and A. Orlikovsky. Quantum computing on silicon-on-insulator structure. VII Workshop of the European Network on Silicon on Insulator Technologies (EUROSOI-2011), January 17-19 2011, Granada, Spain, Conference Proceedings, pp. 101-102.

V. Vyurkov, S. Filippov, and L. Gorelik, Quantum computing based on space states without charge transfer. Physics Letters A 374 (2010) 3285-3291.

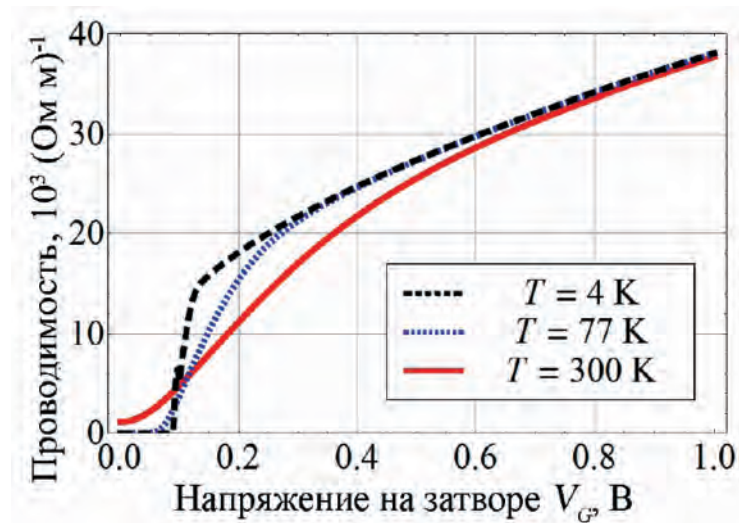
M. Rudenko, V. Vyurkov, S. Filippov, A. Orlikovsky, «Measurement of charge and spin qubits in a transistor channel» // International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2012, Moscow, Russia, October 1-5, 2012, Book of Abstracts, p. P2-14.

## Разработка модели, программы моделирования и расчет характеристик полевых транзисторов на основе графена

Впервые показано, что в баллистических полевых транзисторах с каналом из двухслойного графена может проявляться скачок проводимости при низких температурах, как в одномерных проводниках. При комнатной температуре транзистор обладает высокой крутизной в открытом состоянии, на порядок превосходящей крутизну кремниевых полевых нанотранзисторов.



Схематическое изображение полевого транзистора на основе графена



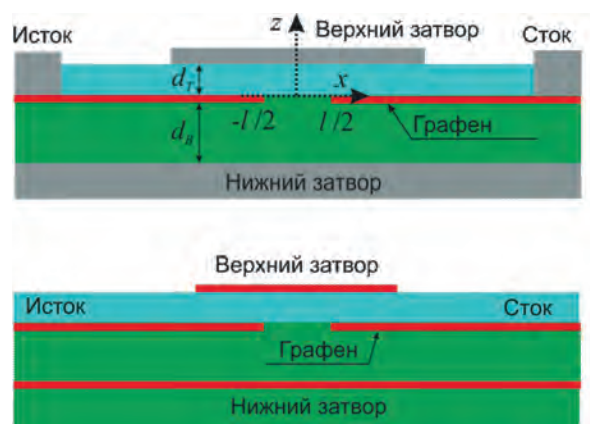
Зависимость проводимости канала транзистора на двухслойном графене от напряжения на затворе, демонстрирующая скачок проводимости при низких температурах

*D. Svintsov, V. Vyurkov, S. Yurchenko, T. Otsuji, and V. Ryzhii.* Hydrodynamic model for electron-hole plasma in graphene. J.Appl. Phys., 111, 083715 (2012).

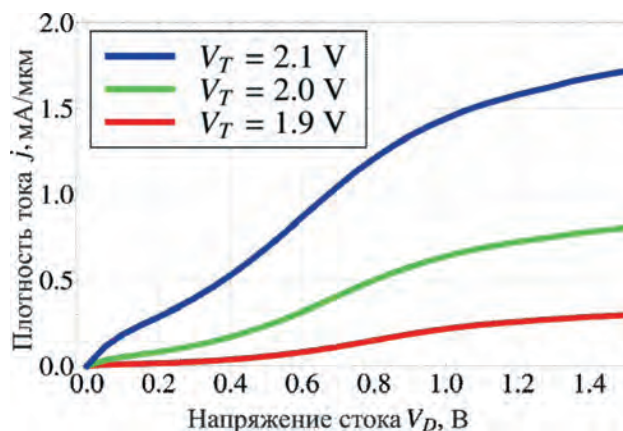
*D. Svintsov, V. Vyurkov, V. Ryzhii, and T. Otsuji.* Effect of “Mexican Hat” on Graphene Bilayer Field-Effect Transistor Characteristics. Japanese Journal of Applied Physics, V.50, (2011) 070112.

## Полностью графеновые полевые транзисторы

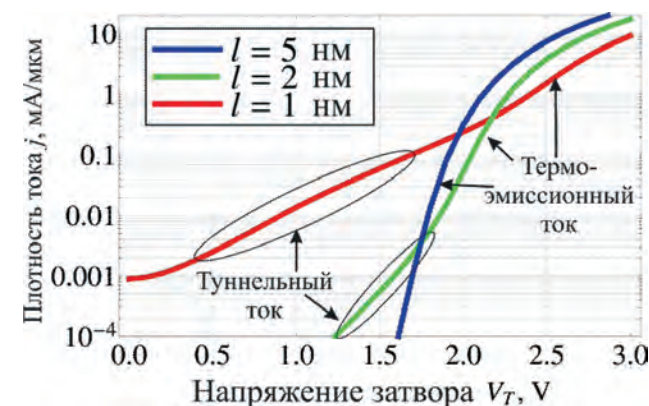
Предложена конструкция и разработана программа моделирования полностью графеновых туннельных транзисторов. Основным элементом конструкции является короткий зазор между контактами истока и стока, туннельный ток через этот зазор управляется напряжением на затворах. Подобные транзисторы совмещают высокий ток открытого состояния, свойственный каналам из графена, с низким током закрытого состояния и наличием насыщения тока в открытом состоянии, что присуще полупроводниковым каналам. Открывается перспектива создания полностью графеновых цифровых схем, в которых и соединения между элементами выполнены из графена.



Конструкция транзистора: транзистор с металлическими затворами (сверху) и полностью графеновый транзистор (снизу).



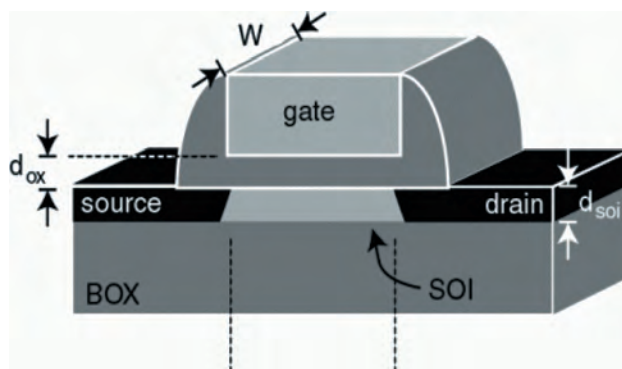
Рассчитанная зависимость тока от напряжения на стоке демонстрирует насыщение.



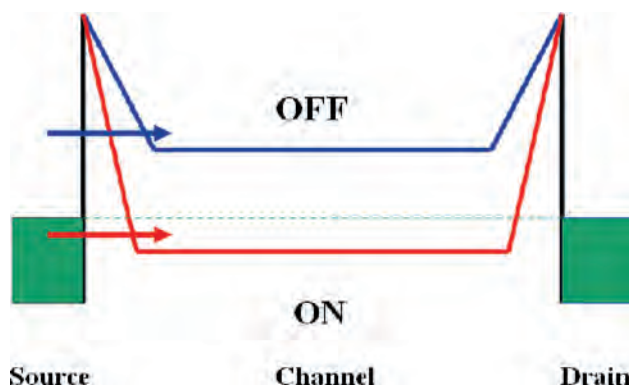
Рассчитанная зависимость тока от напряжения на затворе демонстрирует высокую подпороговую крутизну.

## Кремниевые туннельные транзисторы

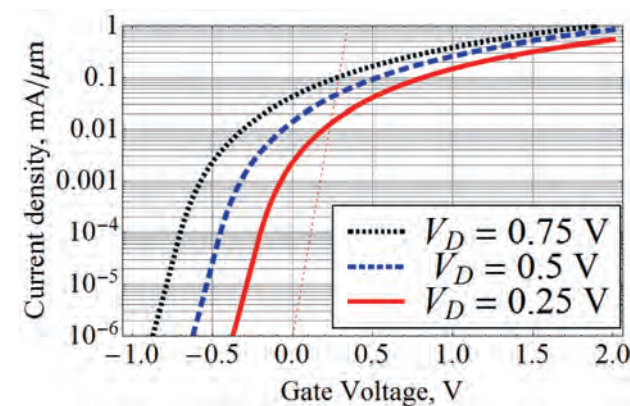
Предложена конструкция полевого транзистора, в котором вместо сильнолегированных омических контактов истока и стока, используются контакты Шоттки. Из-за полного отсутствия легирования длина канала и размер областей истока и стока транзистора могут быть уменьшены до 3-5 нм. Возможно формирование транзистора как в тонком слое КНИ, так и в объемной подложке. Предельная крутизна подпороговой характеристики в представленной на рисунке конструкции составляет 60 мВ напряжения на затворе на декаду тока. Конструкция транзистора может быть изменена таким образом, чтобы включить межзонное туннелирование. В этом случае подпороговая крутизна может быть увеличена до 10 мВ/дек. Разработана программа моделирования туннельных транзисторов.



Структура полевого транзистора с контактами Шоттки



Зонная диаграмма в открытом и закрытом состоянии транзистора



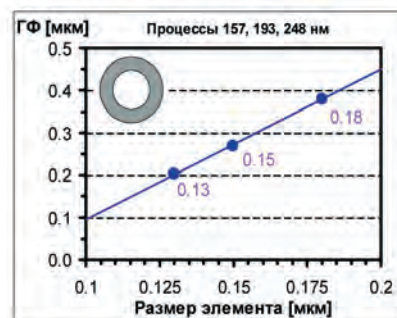
Рассчитанная ВАХ транзистора с толщиной спейсера 3нм

## Моделирование фотолитографических процессов: от суб - 0,5 микронных к нанометровым размерам

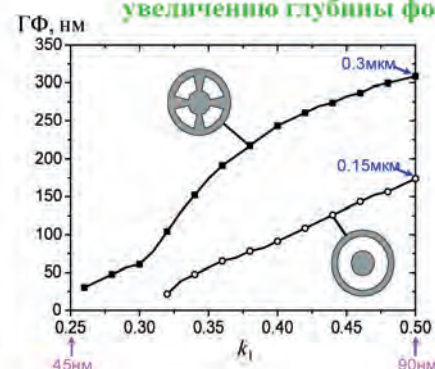
Разработаны и внедрены комплексные модели основных фотолитографических процессов. На их основе созданы многофункциональные пакеты прикладных программ мирового уровня, эффективно используемых для дальнейшего исследования, оптимизации, контроля, диагностики и управления процессом фотолитографической технологии.

### Моделирование оптической литографии

- Сравнительный анализ технологических процессов с суб-0.2-мкм разрешением
  - ограниченная применимость процесса на  $F_2$  лазере
  - малая глубина фокуса в суб-0.1-мкм диапазоне



- Оптимизация формы источника излучения для фотолитографии суб-100-нм разрешения
  - теоретически достижимые значения фактора  $k_1$
  - практические рекомендации по увеличению глубины фокуса

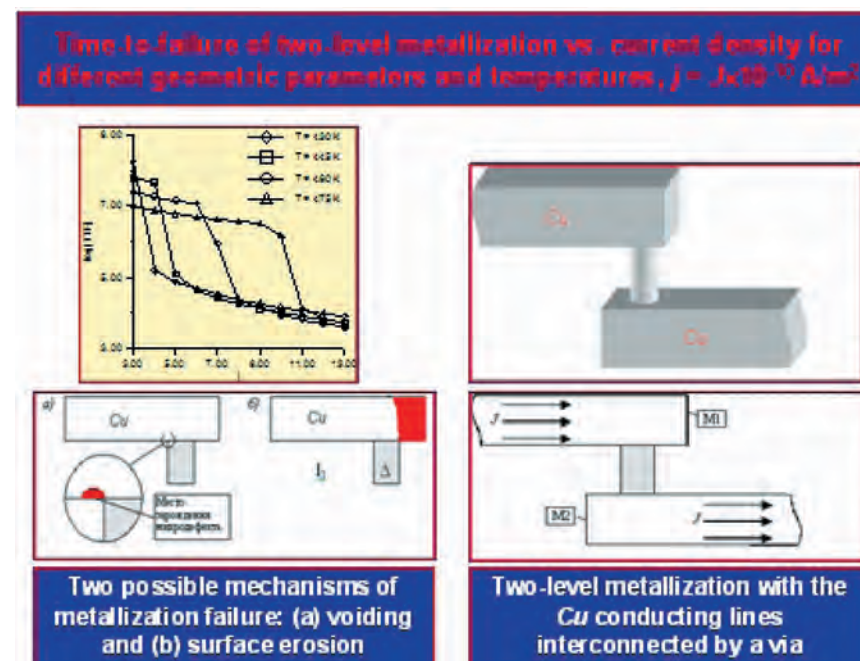


Ивин В.В., Махвиладзе Т.М., Валиев К.А. Теоретическое рассмотрение вопросов выбора оптимальной формы источника в оптической нанолитографии. Микроэлектроника. 2004. Т. 33. №3. С. 163-174.

Ивин В.В., Махвиладзе Т.М., Валиев К.А. Анализ практических применений внеосевых источников в оптической нанолитографии. Микроэлектроника. 2004. Т. 33. №4. С. 259-272.

# Теория и математическое моделирование электромиграционного разрушения многоуровневой металлизации СБИС

Разработана полная трехмерная теория нано- и микропроцессов разрушения тонкопленочных проводников под действием электромиграции, позволяющая провести компьютерное моделирование разрушения различных элементов металлизации ИС в широких диапазонах изменения материальных, геометрических и эксплуатационных параметров.



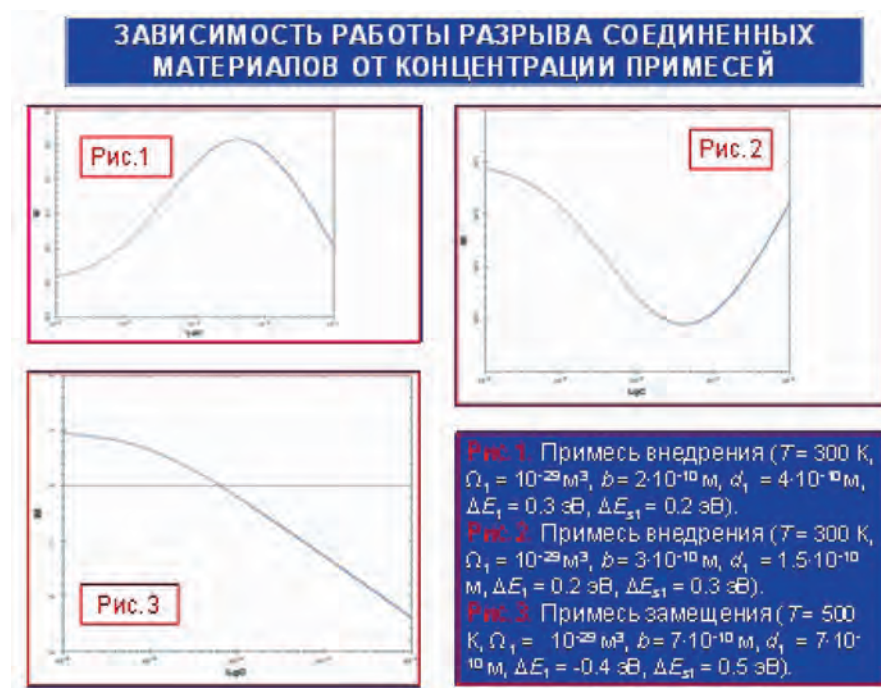
Валиев К.А., Махвиладзе Т.М., Сарычев М.Е. Механизм электромиграции ионов в металлах и диэлектриках // Доклады АН СССР. 1989. Т.306. N 1.С.91-94.

Махвиладзе Т.М., Сарычев М.Е., Житников Ю.В., Боруски Л., Лиу С.-Л. General model for mechanical stress evolution during electromigration // J. Appl. Physics. 1999. V.86. N 6.Р.3068-3075.

Валиев К.А., Гольдштейн Р.В., Житников Ю.В., Махвиладзе Т.М., Сарычев М.Е. Теория и моделирование нано- и микропроцессов разрушения тонкопленочных проводников и долговечность металлизации интегральных микросхем // Микроэлектроника, 2009, Т.38, № 6, С.404-427; 2010, Т.39, № 3. С.163-176.

## Теория влияния точечных дефектов на адгезионную прочность соединенных материалов

Разработана теория адсорбции точечных решеточных дефектов из объема на границу соединенных материалов и влияния этого процесса на прочностные характеристики границ многослойных систем. Выполнены практически важные расчеты зависимости адгезионной прочности границы от концентрации и типа дефектов в объемах материалов.



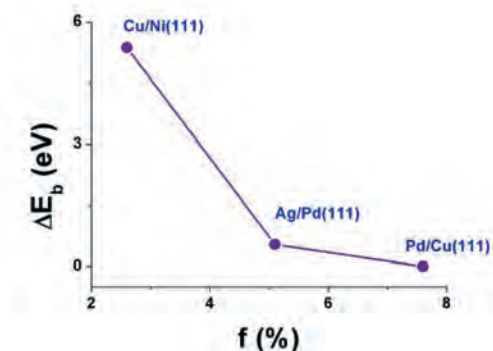
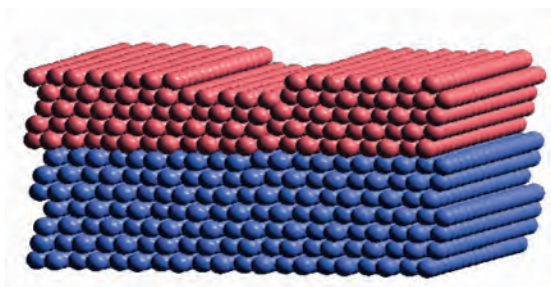
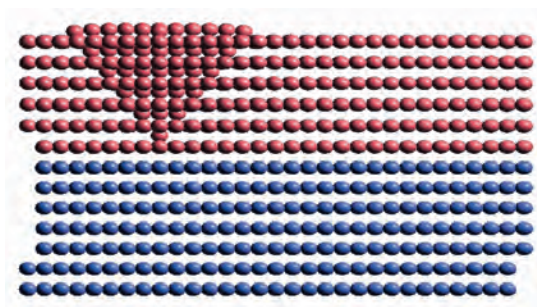
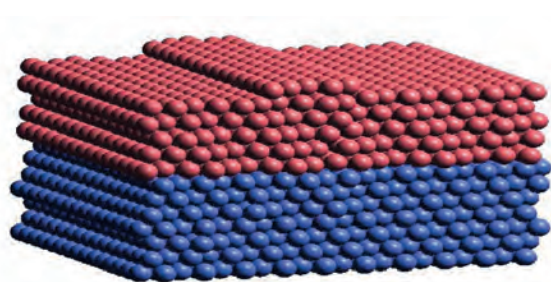
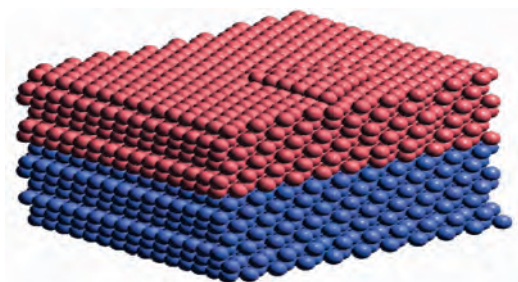
Гольдштейн Р.В., Сарычев М.Е. О влиянии вакансий на поверхностное натяжение на границе соединения двух материалов // Доклады АН. 2001. Т. 380. № 4. С. 476-478.

Гольдштейн Р.В., Махвиладзе Т.М., Сарычев М.Е. Влияние примесей на работу отрыва по границе соединенных материалов // Поверхность. 2009. № 12. С. 73-78.

Гольдштейн Р.В., Махвиладзе Т.М., Сарычев М.Е. Моделирование кинетики адсорбции решеточных дефектов границей соединенных материалов // Поверхность. 2011. № 8. С. 5-11.

## Механизмы релаксации упругих напряжений в гетероэпитаксиальных структурах по данным компьютерного моделирования

Методами молекулярной статики с использованием полуэмпирических потенциалов «погруженного иона» (EAM) исследованы атомные механизмы релаксации упругих напряжений в гетероэпитаксиальных структурах в системах металл/металл. Предложен новый метод Сферического Потенциала Отталкивания для активации редких событий в многоатомной системе. Проведена оценка энергии активации для процессов зарождения дислокаций несоответствия и других локальных дефектов.

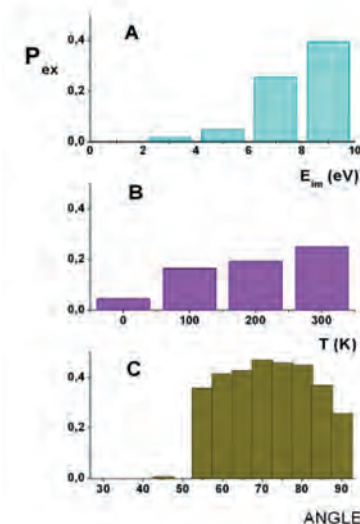
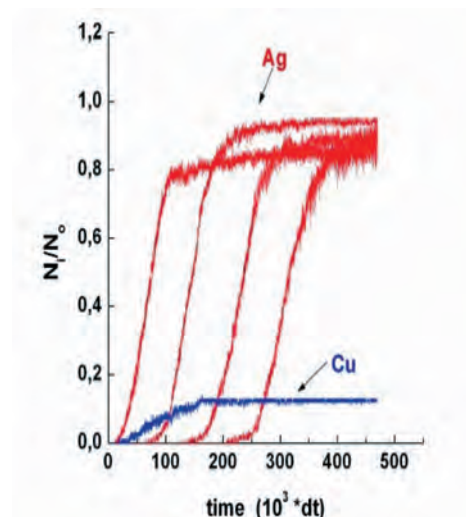
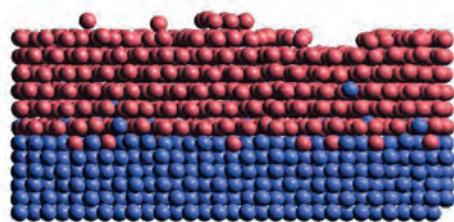


- O. Trushin, E. Granato, S-C. Ying, T. Ala-Nissila, P. Salo. Mechanisms of dislocation nucleation in strained epitaxial layers //Physica Status Solidi B, v.232, N1, p.100-105 (2002).  
O.S. Trushin, E. Granato, S-C. Ying, P. Salo, T. Ala-Nissila. Minimal energy path for dislocation nucleation in strained epitaxial layers //Phys.Rev.B., v.65, p.241408(R), 2002.  
O. Trushin, E. Granato, S. C. Ying, P. Salo, and T. Ala-Nissila. Energetics and atomic mechanisms of dislocation nucleation in strained epitaxial layers // Phys. Rev..B 68, 155413 (2003).  
O. S. Trushin, P. Salo, T. Ala-Nissila, and S. C. Ying. Searching for transition paths in multidimensional space with a fixed repulsive bias potential // Phys. Rev. B, v 69, p. 033405 (2004).  
Yafeng Lu, O. Trushin, W. H. Wang, E. Granato, S. C. Ying, and T. Ala-Nissila. Strain Relief in Cu-PdHeteroepitaxy, // Physical Review Letters, v 94, p. 146105 (2005).

# Атомные механизмы поверхностной и межслойной диффузии в условиях эпитаксии по данным компьютерного моделирования

Методами молекулярной динамики, молекулярной статики и кинетического Монте-Карло исследованы атомные механизмы поверхностной и межслойной диффузии в условиях гомо- и гетероэпитаксии в системах металл/металл. Проведена оценка энергетических барьеров для различных диффузионных смещений адатомов и атомных кластеров. Показано, что многоатомные смещения играют важную роль в динамике атомных кластеров. Исследованы механизмы межслойной диффузии в условиях энергетического напыления.

| Process                                                                             | $\Delta E$ (eV) |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
|    | 0.884           |
|    | 0.686           |
|   | 0.456           |
|  | 0.662           |



- O.S. Trushin, K. Kokko, P.T. Salo, W. Hergert, M. Kotrla. Step roughening effect on adatom diffusion // Phys.Rev.B., v.56, N 19, p.12135-12138, (1997).  
 Trushin O.S., Kokko K., Salo P.T. Film-substrate interface mixing in the energetic deposition of Ag on Cu(001) // Surface Science v.442, p.420-430, (1999).  
 O.S. Trushin, P. Salo, M. Alatalo, T. Ala-Nissila. Atomic mechanisms of cluster diffusion on metal fcc(100) surfaces // Surface Science v 462-465, p.365-369, (2001)  
 P. Salo, J. Hirvonen, I.T. Koponen, O.S. Trushin, J. Heinonen and T. Ala-Nissila. Role of concerted atomic movements on the diffusion of small islands on fcc(100) metal surfaces // Phys. Rev. B, v 64, p.161405(R), (2001).  
 F. Maca, M. Kotrla, O.S. Trushin. Energy barriers for diffusion on stepped Rh(111) surfaces // Surface Science v.454-456, p.579-583, (2000).  
 S. Durukanoğlu, O. Trushin, T.S. Rahman. Effect of step-step separation on surface diffusion processes // Phys.Rev.B, v 73, p.125426 (2006).  
 A. Karim, A. N. Al-Rawi, A. Kara, O. Trushin, T. S. Rahman, T. Ala-Nissila. Diffusion of small two-dimensional Cu islands on Cu(111) by a Self-Learning Kinetic Monte Carlo method // Phys.Rev. B, v.73, p.165411 (2006).

## ***Пилотные установки плазмохимического анизотропного травления и плазмохимического осаждения для создания микро- и наноструктур***

Установки созданы коллективом ФТИАН РАН на основе источника индуктивно-связанной плотной плазмы низкого давления оригинальной конструкции, полностью автоматизированы и предназначены как для исследовательских лабораторий в области микро- и нанотехнологий, так и для применения в производстве. Разработка удостоена золотой медали ВВЦ на выставке «Автоматизация-2005».



**Автоматизированная установка плазмохимического травления «ПлатРАН-150»**



**Автоматизированная установка плазмохимического осаждения диэлектрических пленок «Пластос-150»**

*А.А. Орликовский. Плазменные процессы в микро- и нанoeлектронике. // Микроэлектроника, т.28, 1999, №5, часть 1 (с.344-362), №6, часть 2, (с.415-426).*

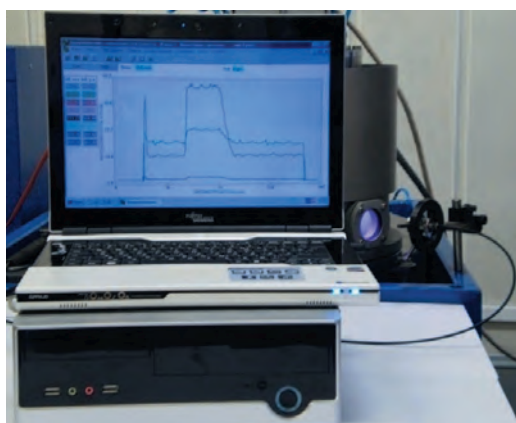
*А.А. Орликовский, К.В. Руденко, С.Н. Аверкин. Прецизионные плазмохимические процессы микроэлектроники на базе серии пилотных установок с масштабируемым ICP-источником плазмы. //Химия высоких энергий, т.40, № 3, с. 220 - 232 (2006).*

## **Автоматизированные средства мониторинга и диагностики плазменных технологических процессов микро- и наноэлектроники**

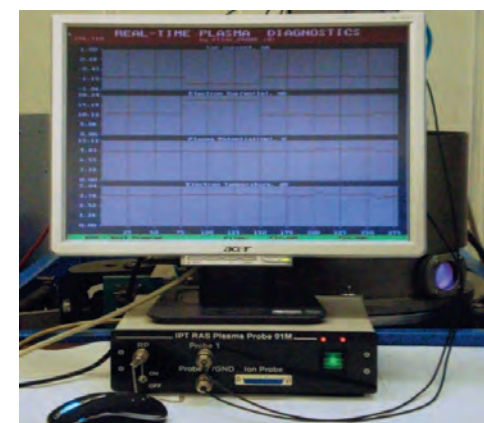
Развита концепция применения невозмущающих методов мониторинга и диагностики плазменных технологических процессов, основанная на контроле параметров плазмы и приповерхностных слоев пластины в реакторе. Разработаны методы, средства и программное обеспечение, предназначенные для применений при разработке новых технологий для мониторинга параметров технологических процессов и контроля состояния камеры реактора, а также в качестве детекторов окончания процессов.



**Автоматизированное устройство мониторинга роста тонких диэлектрических пленок на основе спектрального эллипсометра (Фрязинский филиал ИРЭ РАН - ФТИАН), встроенного в установку плазмохимического осаждения.**



**Автоматизированная система мониторинга процессов плазмохимического травления микроэлектронных структур на основе скоростного акустооптического эмиссионного спектрометра (ВНИИФТРИ-ФТИАН)**



**Автоматизированный диагностический комплекс на основе зонда Ленгмюра для диагностики in situ плазмохимических процессов травления, разработанный во ФТИАНе**

*К.В. Руденко, Я.Н. Суханов, А.А. Орликовский. Диагностика in situ и управление плазменными процессами в микроэлектронной технологии // В кн. «Энциклопедия низкотемпературной плазмы», Под ред. Ю.А. Лебедева, Н.А. Платэ, В.Е. Фортова, М., «Наука», т. XII-5 (2006).*

## Развитие технологий плазменно-иммерсионной ионной имплантации

Впервые в России разработан экспериментальный низковольтный высокодозовый плазменно-иммерсионный ионный имплантер для ультрамелкого легирования стока/истока нанотранзисторов с проектными нормами 130 - 32 нм, обладающий уникальными возможностями ионного 3D-легирования, например, стенок тренчей в структурах DRAM, FIN - структур перспективных многозатворных нанотранзисторов.



### Основные характеристики

- Диаметр обрабатываемой пластины – до 150 мм
- Режим имплантации – иммерсионный, импульсно периодический
- Диапазон энергии ионов – 0.1 – 5 кЭв
- Диапазон доз легирования –  $5 \times 10^{14}$  –  $5 \times 10^{17}$  см<sup>-2</sup>
- Скорость набора дозы –  $10^{14}$  –  $10^{15}$  см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>

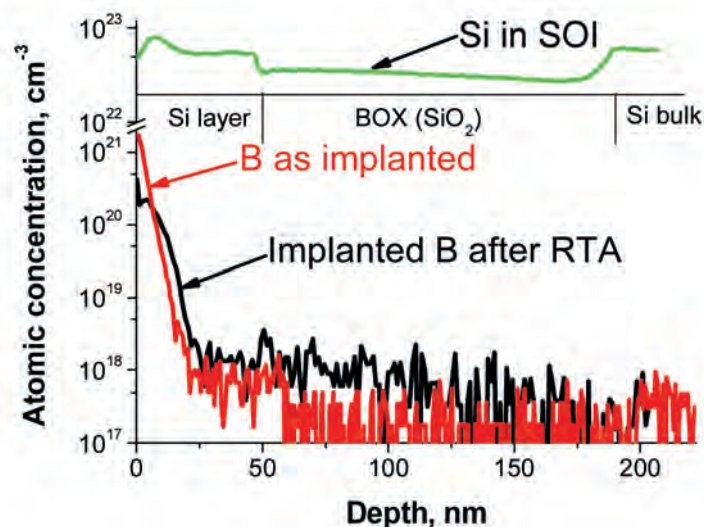
### Уникальные возможности технологии

- Большой флюенс ионов при низких энергиях
- Большая скорость набора дозы
- Время имплантации не зависит от площади пластины
- Прекрасные возможности для 3D легирования непланарных структур
- Легко реализуемая ко-имплантация различных ионов, последовательные процессы имплантации в одной камере
- Диапазон доз легирования простирается вплоть до уровней образования новых фаз, возможно создание структур ионным синтезом.

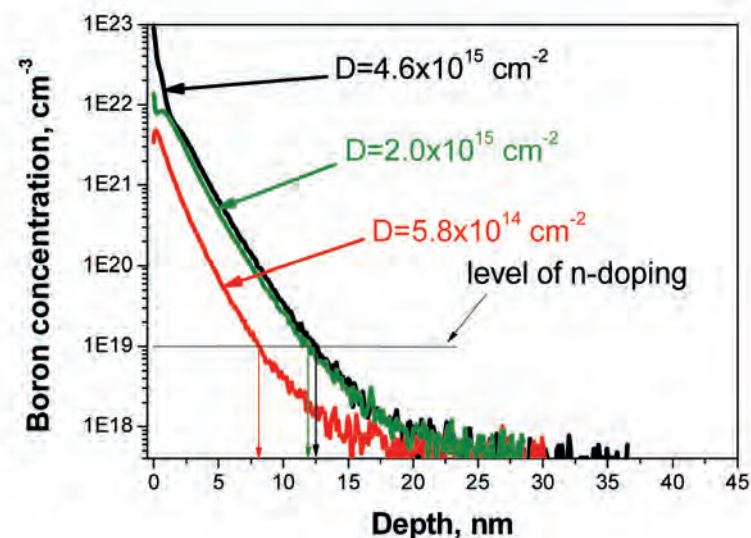
А.А. Орликовский, К.В. Руденко, С.Н. Аверкин. Прецизионные плазмохимические процессы микроэлектроники на базе серии пилотных установок с масштабируемым ICP-источником плазмы // Химия высоких энергий, т.40, № 3, с. 220 - 232 (2006).

## Ультрамелкая ионная имплантация бора в кремниевые структуры полевых нанотранзисторов

Разработаны и исследованы процессы ультрамелкого легирования кремния бором для формирования р-областей стока/истока и околостворного легирования (extensions) нанотранзисторов. Проблема высокодозовой ультрамелкой имплантации легких ионов бора при низких ускоряющих напряжениях решена плазменно-иммерсионными методами. Сформированы сильнолегированные слои с глубиной р-п переходов 7 – 20 нм как на объемном кремнии, так и в структурах с тонким SOI (до 50 нм).



Профиль ультрамелкого (20 нм) легирования структуры SOI бором, полученный в процессе плазменно-иммерсионной имплантации и последующего быстрого отжига. Слоеое сопротивление области стока/истока 500 – 800 Ом/□



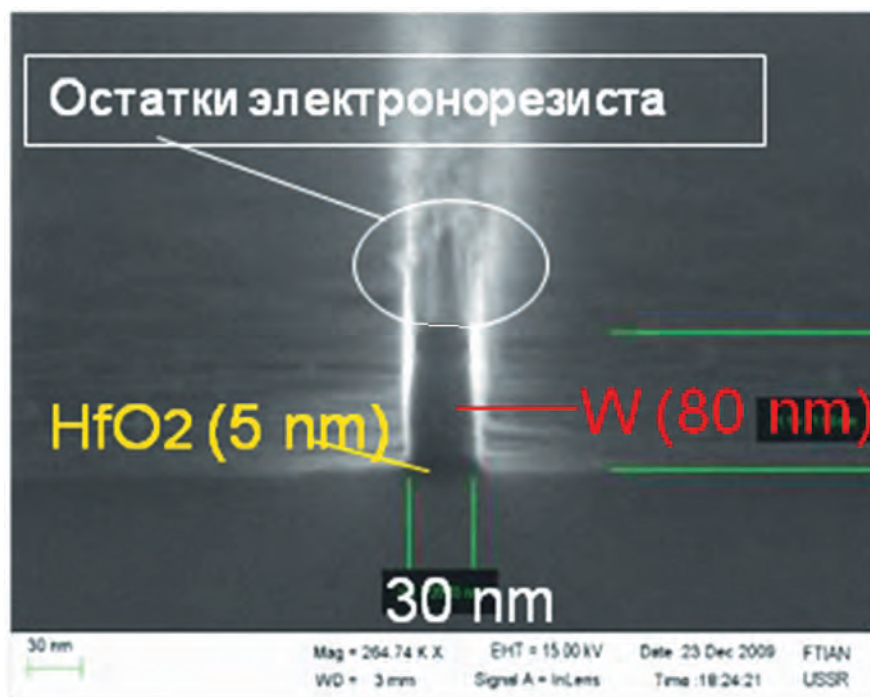
Профили ультрамелкого легирования бором кремния в объемной подложке для областей стока/истока и extension – областей нанотранзистора, удовлетворяющий проектным нормам 32 нм. Слоеое сопротивление 200 – 1000 Ом/□ для слоев 7 – 40 нм

Руденко К.В., Лукичев В.Ф., Орликовский А.А. Технологии плазменно-иммерсионной ионной имплантации для формирования приборных структур наноэлектроники (Пленарный доклад). // Труды VI Международного симпозиума ISTAPC-2011, стр. 37-38.

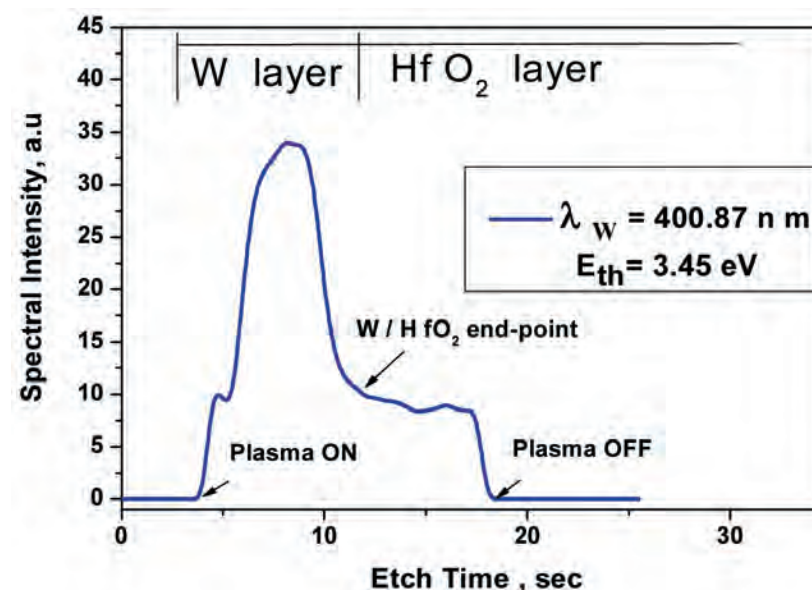
A. Miakonkikh, K. Rudenko, V. Rudakov, A. Orlikovsky. Comparative investigation of ultra-shallow boron implantation into bulk silicon and SOI structures by PIII technique. // Proc. of Intern. Conference on Micro- and Nanoelectronics – 2012, Zvenigorod, Book of Abstracts, p. 03-19 (2012).

## Исследование новых процессов анизотропного плазмохимического травления структур кремниевой наноэлектроники

Исследования в области физики и технологии затворных структур кремниевых МДП-нотранзисторов (так называемых НКMG-FET транзисторов) с проектными нормами 32 нм и менее с использованием high-K подзатворных диэлектриков и металлических затворов. Разработаны процессы селективного по отношению к  $\text{HfO}_2$ , травления наноразмерных металлических затворов и процессы высокоселективного, по отношению к кремнию, травления high-K диэлектрика. Таким образом, разработаны технологические основы создания «НКMG-стеков» нанотранзисторов.



Затворный стек МДП-нотранзистора Si/W/ $\text{HfO}_2$ /Si с длиной канала 30 нм



Эмиссионный спектральный мониторинг процесса травления металлического затвора с высокой чувствительностью (окна травления < 5% площади пластины).

I.I. Amirov, S.N. Averkin, V.F. Lukichev, V.A. Kalnov, A.A. Orlikovsky, and K.V. Rudenko. Plasma processing in micro- and nanoelectronics: process design, in situ process diagnostics, and concept of equipment. Nanotechnology International Forum, 1-3 November, 2010, Moscow. (2010).

А.А. Орликовский, В.Ф. Лукичев, К.В. Руденко, А.С. Рудый. Критические элементы нанотранзисторов: физика, технология и материалы // Интеграл, №4, с.10-17. (2010).

## Диагностика и мониторинг плазмохимических процессов травления и осаждения микроэлектронных структур

На основе разработанных методов и средств диагностики *in situ* плазменных технологических процессов развиты методы контроля параметров анизотропного травления и плазмостимулированного осаждения, которые позволяют обеспечить надежность плазменных технологических процессов при создании микро- и наноструктур.

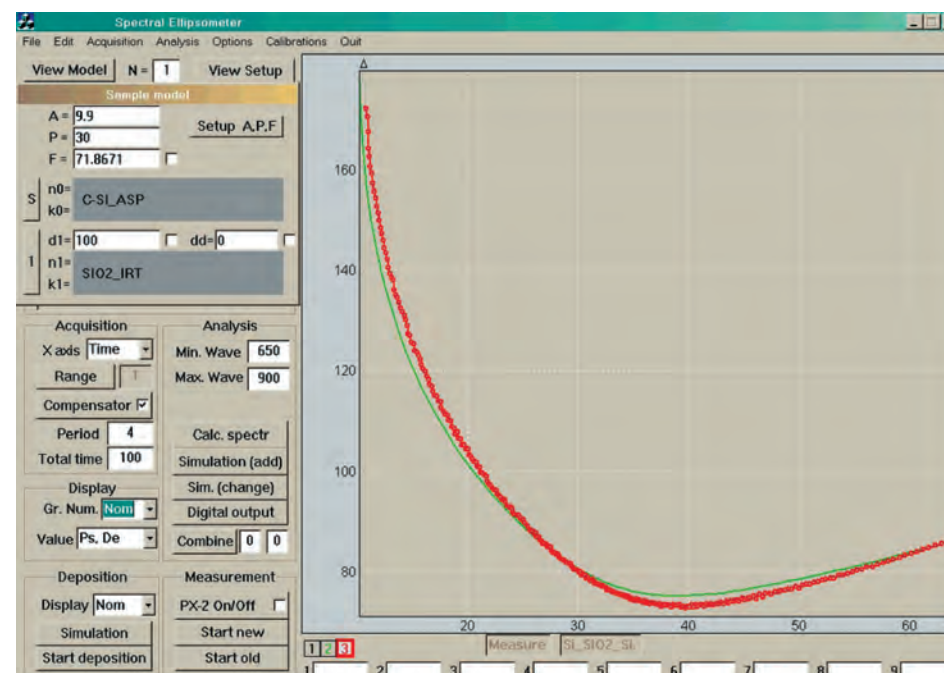
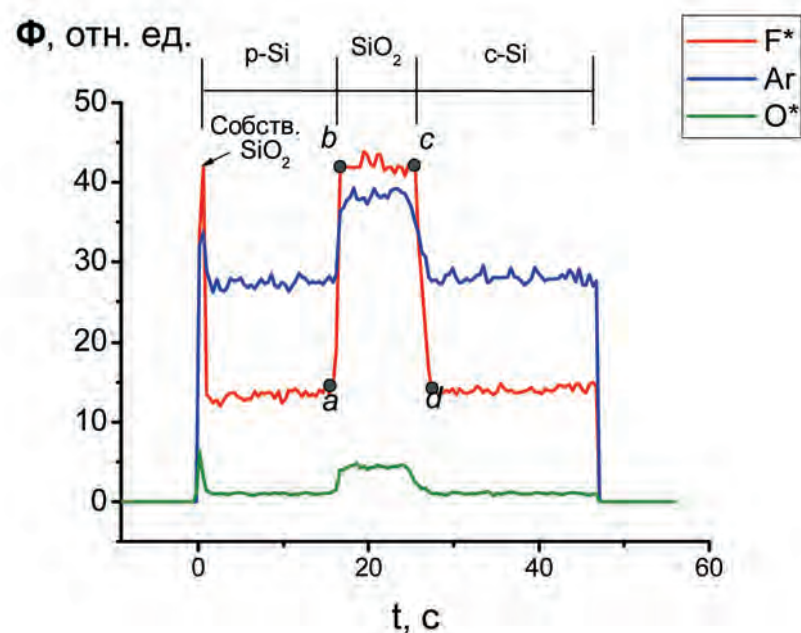


Иллюстрация возможностей мониторинга плазмохимического травления затворного стека poly-Si/ $SiO_2$ /Si методом эмиссионной оптической актинометрии. *In situ* анализ данных обеспечивает определение скорости травления слоев, момента окончания их травления, однородности процесса по площади пластины.

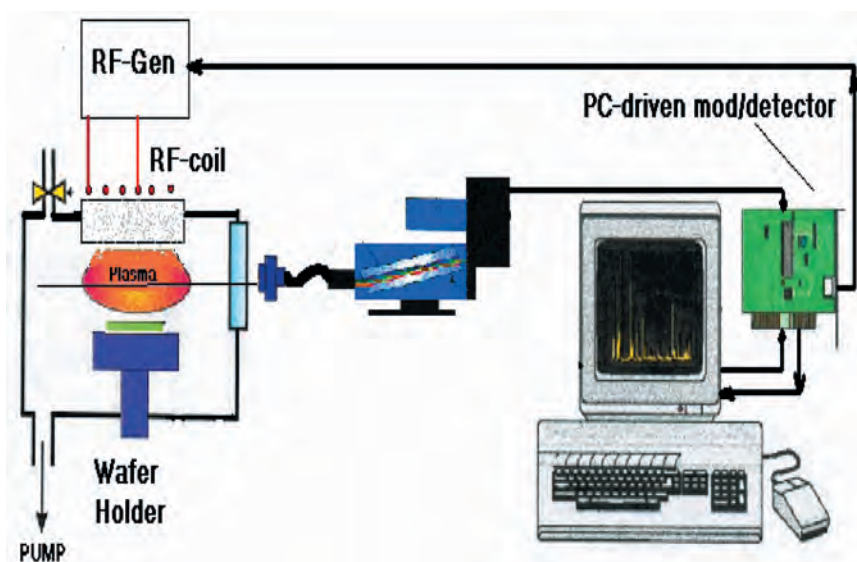
Эллипсометрический контроль *in situ* плазмостимулированного роста диэлектриков. Процесс автоматически останавливается при достижении заданной толщины.

К.В. Руденко, А.В. Мяконьких, А.А. Орликовский. Мониторинг плазмохимического травления структур poly-Si/ $SiO_2$ /Si: зонд Ленгмюра и оптическая эмиссионная спектроскопия. // Микроэлектроника, т.36, № 3, с. 206 - 221. (2007).

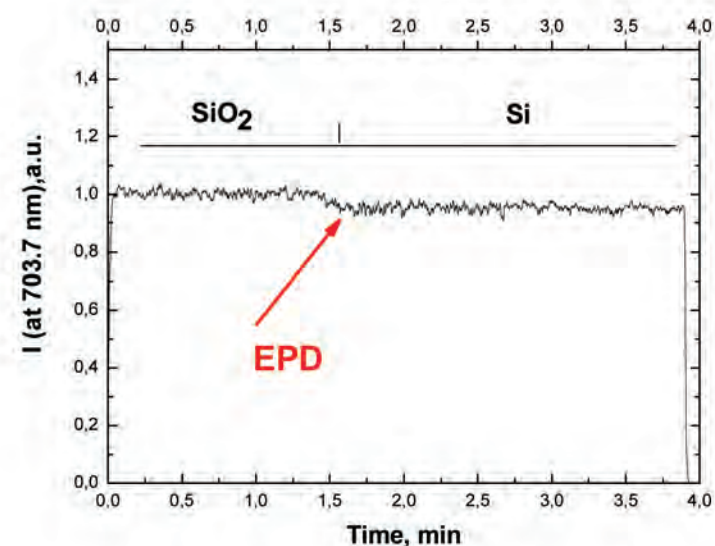
К.В. Руденко. Диагностика плазменных процессов в микро- и нанoeлектронике // Химия высоких энергий, т. 42, № 3, стр. 242-249 (2009).

## Спектральное детектирование момента окончания процесса плазмохимического травления в окнах малой площади

Предложен и исследован способ, защищенный патентом РФ, решающий проблему определения момента окончания плазмохимического травления (EPD) микроэлектронных структур при предельно малой площади окон травления. Традиционный метод, использующий эмиссионную спектроскопию активных компонентов плазмы в реакторе, не позволяет надежно выделить момент EPD из шумовой составляющей сигнала при площади окон травления менее 5-7% площади пластины. Модуляция плазмообразующего генератора и фазовое/синхронное детектирование сигнала плазмы позволили на порядок повысить чувствительность метода.



Принцип фазового детектирования эмиссионной линии фтора при мониторинге процесса плазмохимического травления во фторсодержащей плазме



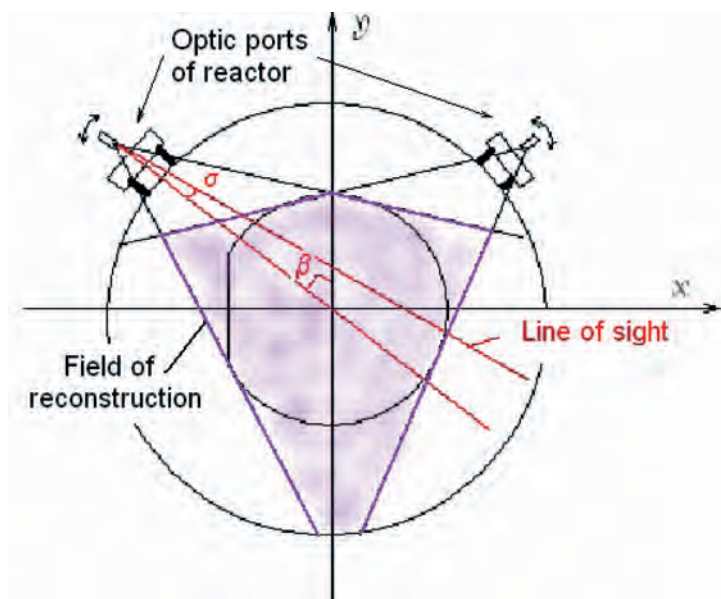
Определение момента окончания травления (EPD) структур контактных отверстий в слое SiO<sub>2</sub> методом фазового детектирования спектрального сигнала. Площадь окон травления 0.9% площади пластины.

К.В. Руденко, Я.Н. Суханов, Н.И. Базаев. Возможности синхронного детектирования эмиссионного сигнала плазмы при мониторинге травления структур SiO<sub>2</sub>/Si // Микроэлектроника, т.32, № 4, с.271-276 (2003).

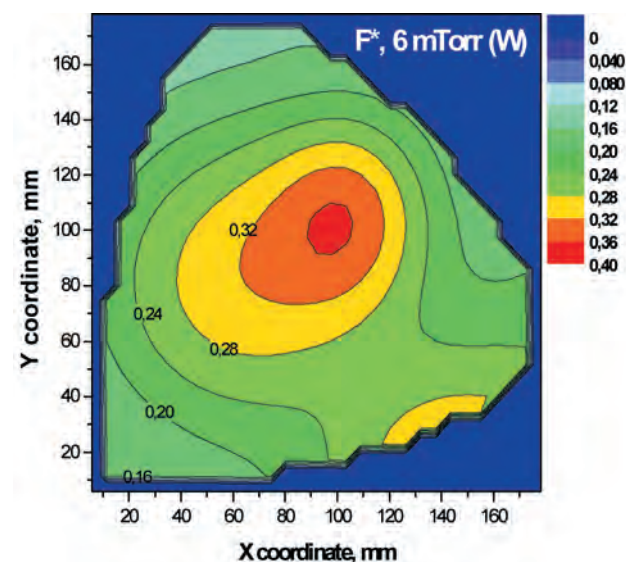
К.А. Валиев, А.А. Орликовский, К.В. Руденко, Ю.Ф. Семин, Я.Н. Суханов. Способ контроля момента окончания травления в плазме ВЧ и СВЧ разряда в технологии изготовления полупроводниковых приборов и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2248645, МКИ H01L 21/66 от 12.02.2003.

## Малоракурсная эмиссионная томография плазмы в технологических реакторах микроэлектроники

Предложено использовать томографические методы для оптимизации конструкции реакторов с широкоапертурными источниками плотной плазмы и параметров процессов. Развита алгоритмы и программное обеспечение для малоракурсной эмиссионной томографии плазмы, основанные на методах классической реконструктивной томографии. Алгоритмы двухракурсной томографии плазмы проверены экспериментально в широкоапертурном плазменно-иммерсионном имплантере на плазме газа  $\text{BF}_3$ .



Предложенная веерная схема томографического сканирования, совместимая с промышленными плазмохимическими реакторами микроэлектроники.

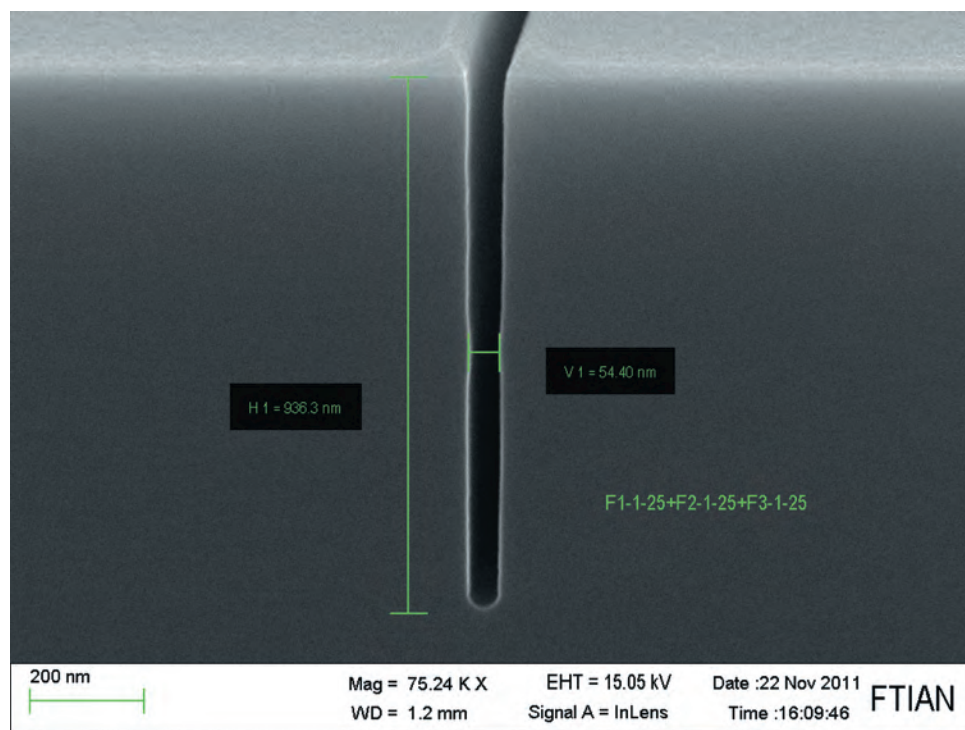


Пример реконструкции плотности радикалов фтора в плазме  $\text{BF}_3$  по сечению реактора. Томография обнаруживает существенный спад концентрации частиц над периферийной областью пластины, что можно преодолеть, оптимизируя давление в реакторе.

Фадеев А.В., Руденко К.В., Лукичев В.Ф., Орликовский А.А. Оптимизация томографического алгоритма реконструкции плазменных неоднородностей в технологических реакторах микроэлектроники. Микроэлектроника, т.40, № 2 (2011).

## Разработка процессов глубокого анизотропного травления кремния для перспективных структур МЭМС и НЕМС

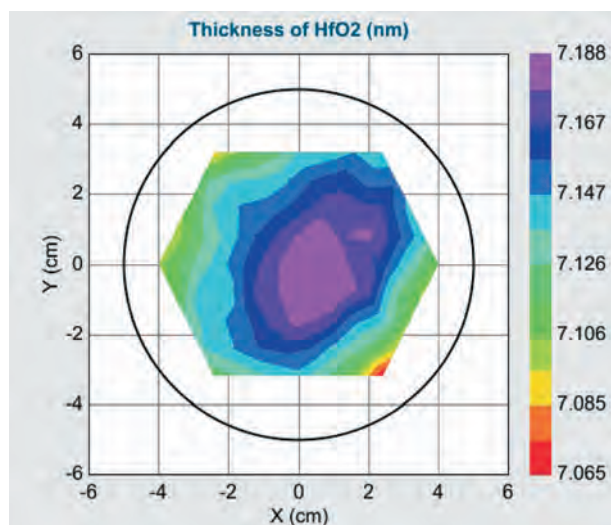
Усовершенствован двухстадийный процесс глубокого анизотропного травления кремния, в результате чего значительно снижена шероховатость стенок канавки. Усовершенствованный процесс позволяет формировать глубокие «трени» через суб-100 нм аперттуру с гладкими вертикальными стенками, закругленным дном и аспектным отношением более 30. Технология реализована на установке плазмохимического травления «ПлатРАН-150», разработанной во ФТИАНе.



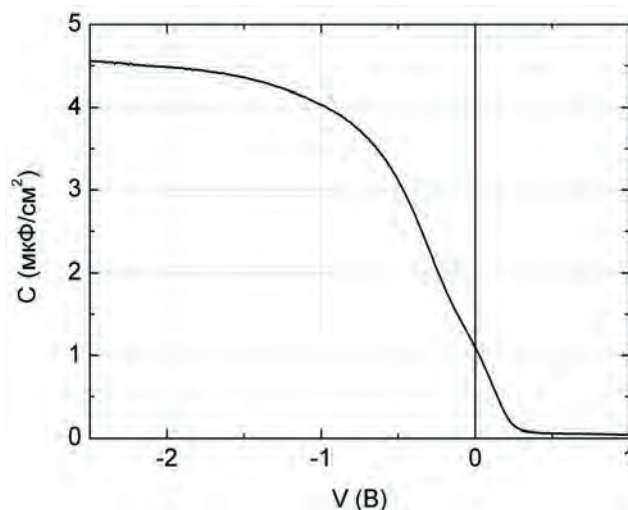
Аверкин С.Н., Жихарев Е.Н., Лукичев В.Ф., Орликовский А.А., Рылов А.А., Тюрин И.А. Анизотропное плазмохимическое травление глубоких канавок суб-100 нм ширины в кремнии через электронорезистную маску. Интеграл, 2013 (в печати).

## Формирование тонких слоев подзатворных диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью

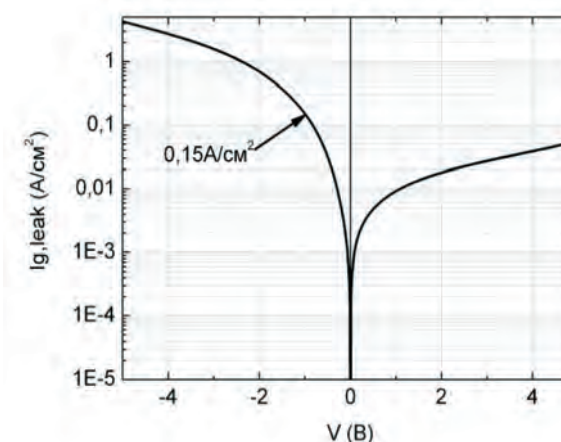
Исследованы процессы осаждения оксида гафния с целью формирования слоев подзатворных диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью в МДП-нанотранзисторах. Разработаны технология получения тонких слоев оксида гафния методом электронно-лучевого испарения с предварительной подготовкой поверхности в высоковакуумной установке BalzersUMS-500 P и технология осаждения методом плазмостимулированного атомно-слоевого осаждения (P-ALD) на установке FlexAl (Oxford Instruments, UK) под контролем спектральной эллипсометрии *in situ*. Получены и исследованы пленки диоксида гафния толщиной 2-7 нм. Измерены оптические характеристики, подтверждающие стехиометрический состав пленок, проведены C<sub>V</sub>-измерения затворных «стеков».



Распределение толщины пленки HfO<sub>2</sub> по 100 мм пластине. Неоднородность не превышает 0,7%



Вольтфарадная характеристика затворной структуры транзистора Me/HfO<sub>2</sub> (5нм)/Si.



Вольтамперная характеристика затворной структуры транзистора Me/HfO<sub>2</sub> (4.2нм)/Si

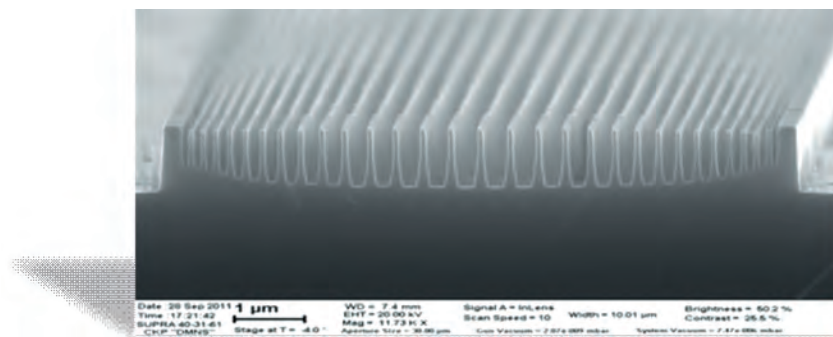
Полученные значения диэлектрической проницаемости пленки HfO<sub>2</sub> (23 - 25,2) и токов утечек в составе затворных структур (0,15 A/cm<sup>2</sup> при 1В) существенно лучше допустимых значений, предсказанных в ITRS на 2018 г. для перспективных нанотранзисторов УБИС процессоров и схем с малым потреблением энергии.

А.Г. Васильев, Р.А. Захаров, А.А. Орликовский, А.Е. Рогожин, М.С. Сонин, И.А. Хорин, Электрофизические характеристики затворных структур с HfO<sub>2</sub>, сформированных методом электронно-лучевого испарения// Микроэлектроника, Т. 38, 2009, С. 361-368.

A.Miakonkikh, A. Rogozhin, K. Rudenko, and A. Orlikovsky, Properties of thin HfO<sub>2</sub> gate dielectric formed in Atomic Layer Deposition process, Book of Abstracts, International Conference Micro- and Nanoelectronics-2012, Zvenigorod, Russia, 1-5 October, 2012.

## Физические основы реактивного ионного травления

Впервые создана технология глубокого анизотропного травления кремния с ингибитором (бромом) глубоких «тrenchей» с вертикальными стенками в кремнии. Позднее анизотропное травление кремния в бромсодержащей плазме стало общепризнанной в мировой практике технологией. Впервые дано теоретическое описание апертурного эффекта. Изучены три механизма апертурного эффекта: ограничение доставки ионов и радикалов на травящуюся поверхность и переосаждение продуктов реакции. Показано, что ограничение доставки ионов и радикалов является доминирующим. Теоретически изучены физические ограничения процесса анизотропного реактивно-ионного травления.



Использование апертурного эффекта позволяет реализовать технологию 3D профиля кремниевых структур при формировании элементов наноэлектроники и наномеханики, специализированных дифракционных решеток оптического и рентгеновского диапазона, фотонных и фононных кристаллов с наноразмерными элементами.

Автаева С.Н., Барышев Ю.П., Валиев К.А., Исаев К.Ш., Никифоров И.Е., Орликовский А.А., Оторбаев Д.К., Соколов А.Б. Исследование низкотемпературной плазмы CF<sub>3</sub>Br и процесса глубокого анизотропного травления кремния в диодном реакторе. Труды ФТИАН, ред. К.А.Валиев, т.6, М. Наука, 1993, с.3-16.

Abachev M.K., Baryshev Yu.P., Lukichev V.F., Orlikovsky A.A. Aperture effect in plasma etching of deep silicon trenches. Vacuum, 1991, v.42, N1-2, p.129-131.

Yunkin V.A., Lukichev V.F., Orlikovsky A.A., Fisher D., Voges E. Experimental study and computer simulation of aspect ratio dependent effects observed in silicon reactive ion etching. Microelectron. Eng., 1996, v.30, pp.345-348.

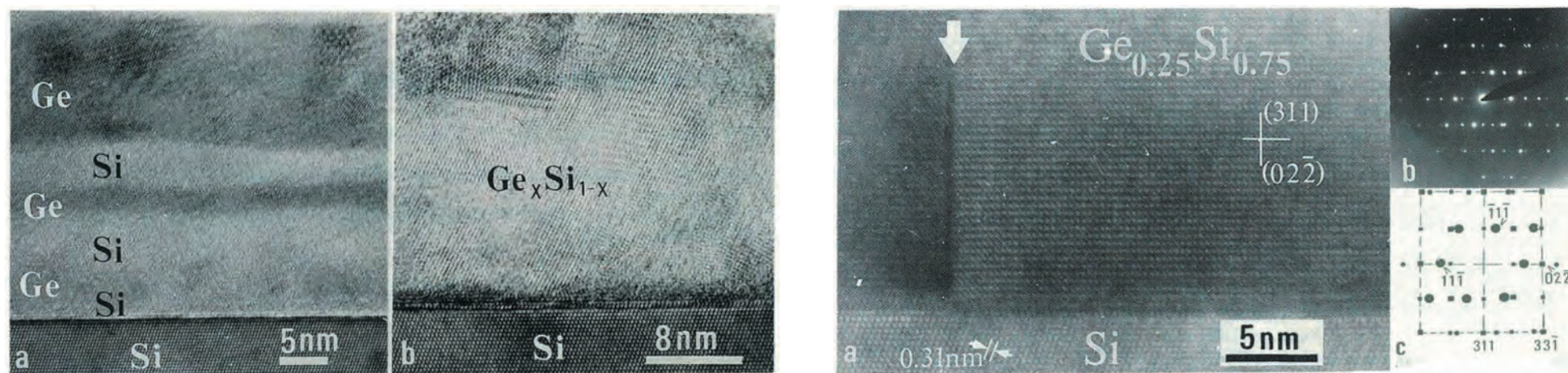
Лукичев В.Ф., Орликовский А.А. Предельные возможности плазмохимического травления. Труды ФТИАН., ред. К.А.Валиев, М. Наука, 1996, т.10, с.57-63.

V.F. Lukichev and V.A.Yunkin. Scaling of silicon trench etch rates and profiles in plasma etching. Microelectronic Eng., 46 (1999), p. 315 – 318.

Abachev M.K., Baryshev Yu.P., Lukichev V.F., Orlikovsky A.A. Modeling of deep silicon etching in multicomponent plasma. Vacuum, 1992, vol.43, p.565.

## Гетероструктуры $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ с низкой плотностью дислокаций, полученные в результате отжига многослойных структур $\text{Ge}/\text{Si}$

Методом МБЕ выращены многослойные структуры  $\text{Ge}/\text{Si}$  переменной толщины (от 0,1 до 15 нм) с результирующей толщиной 80 – 150 нм на  $\text{Si}$  (111). При температуре 700°C формируется полностью релаксированный слой  $\text{Ge}_{0,25}\text{Si}_{0,75}$  на  $\text{Si}$  (111) с плотностью дефектов не выше  $3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$ .



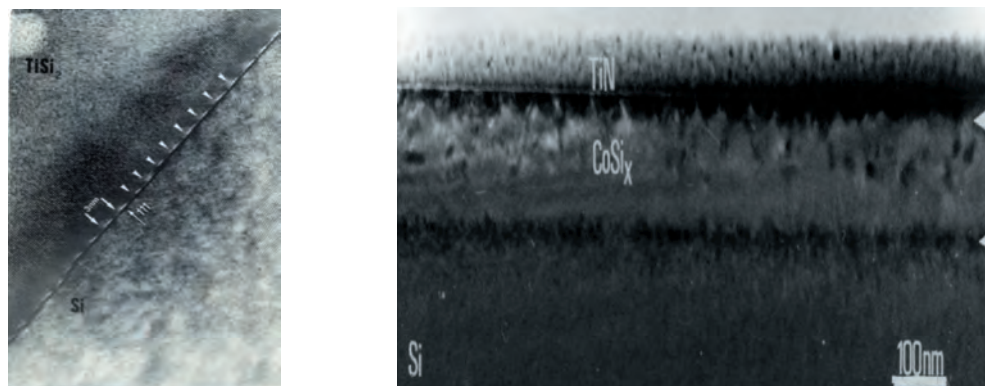
Bondorenko V.I., Lebedev O.I., Antipov M.V., Vasiliev A.G., Orlikovsky A.A. HREN investigation of  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  heterostructures formation. ICEM 13, Paris, 1994, p.153-154.

Антипов М.В., Васильев А.Г., Васильев А.Л., Киселев Н.А., Лебедев О.И., Орликовский А.А. Исследования многослойных структур  $\text{Ge}/\text{Si}$  переменной толщины. Труды ФТИАН, ред. К.А. Валиев, «Наука» т.8, 1994, с.110-127.

Kiselev N.A. Lebedev O.I., Vasiliev A.L., Antipov M.V., Valiev K.A., Vasiliev A.G., Orlikovsky A.A. Investigation of multilayered  $\text{Ge}/\text{Si}$  structures with varying thicknesses. Vacuum, v. 46, N3, p. 269-276, 1995.

## Физические основы технологии силидизации контактов в глубоко субмикронных КМОП СБИС

В области проблем металлизации кремниевых СБИС выполнены приоритетные исследования физических основ самосовмещенной технологии силидизации контактов в глубоко субмикронных КМОП СБИС на основе дисилицида титана ( $\text{TiSi}_2$ ) и дисилицида кобальта ( $\text{CoSi}_2$ ), изучена стабильность многослойных систем металлизации  $\text{Si-TiSi}_2\text{-Al}$  и  $\text{Si-TiSi}_2\text{ (TiN)-W-Al}$ , развит новый подход к формированию металлизации в результате фазового расслоения в системах  $\text{Ti-Co-N/CoSi}_2\text{/Si}$  в условиях поверхностно-диффузионных реакций в процессе нанесения, найдены условия формирования планарных границ  $\text{TiSi}_2$  и  $\text{CoSi}_2$  с Si и надежных барьерных слоев в современных системах соединений на основе Cu.



ПЭМ изображения структур  $\text{TiSi}_2\text{/Si}$  и  $\text{TiN/CoSi}_x\text{/Si}$ .

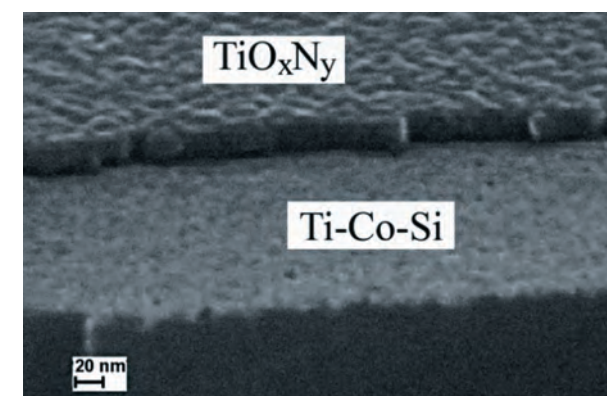
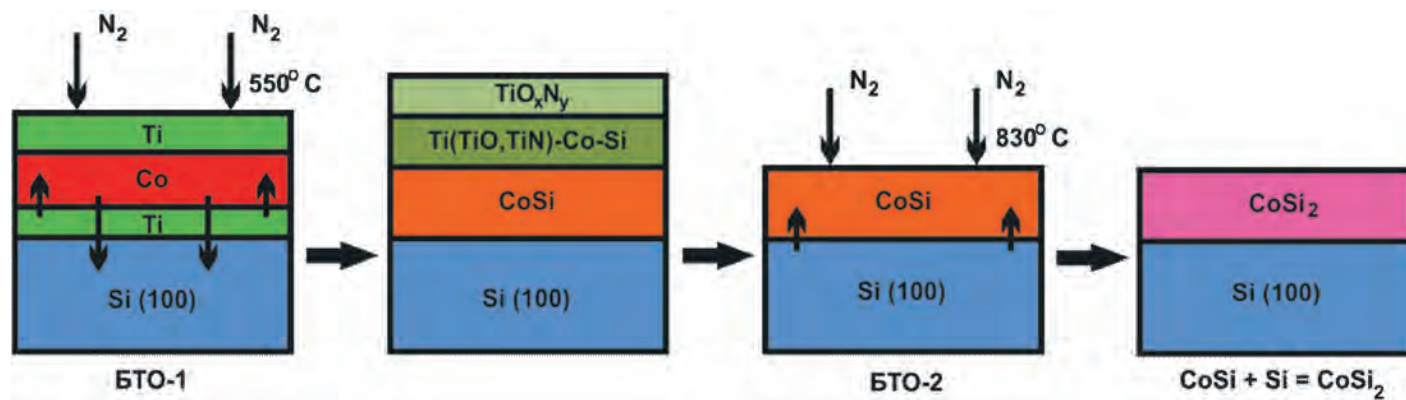
K.A. Valiev, A.G. Vasiliev, A.A. Orlikovsky, A.L. Vasiliev, A.L. Golovin, R.M. Imamov, N.A. Kiselev. Structure and properties of  $\text{TiSi}_2$  films on Si, obtained by Ti and Si co-evaporation in high vacuum. *II Vacuum*, vol. 42, No.18, p. 1191–1201.

Васильев А.Г., Захаров Р.А., Родатис В.В., Лобинцов А.В., Орликовский А.А., Хорин И.А. Фазообразование в многокомпонентных системах Ti-Co-Si-N и Ti-Co-N приповерхностно-диффузионном механизме формирования тонких пленок на Si и  $\text{SiO}_2$ , *Микроэлектроника*, Т. 30, № 5, с. 345-352 (2001).

Vasiliev A.L., Aindow M., Vasiliev A.G., Orlikovsky A.A., Horin I.A. Phase Formation in Ti (Ta)-Ni and Co-Ti Films Deposited on (001)Si in  $\text{N}_2$  Atmosphere. *II Mat. Res. Soc. Proc.*, Symposium N, V. 745, N4.10 (2003).

## Формирование ультратонких силицидных слоев на основе кобальта для омических контактов

Для создания силицидных слоев используется двухстадийная быстрая термическая обработка (БТО). На первой стадии из исходной структуры Ti/Co/Ti/Si формируется «жертвенный» слой, состоящий из  $\text{TiO}_x\text{N}_y$  и Ti-Co-Si. Образование  $\text{TiO}_x\text{N}_y$  сопровождается захватом остаточных примесей (O, C и N) из исходной пленки и поверхности Si-подложки. После удаления «жертвенного» слоя состав структуры соответствует моносилициду кобальта (CoSi), который на второй стадии БТО трансформируется в высокопроводящую фазу  $\text{CoSi}_2$ .



Схематическое изображение технологического процесса образования слоя  $\text{CoSi}_2$  толщиной 12 нм и поверхностным сопротивлением 20 Ом/□ с использованием БТО в среде азота

СЭМ-изображение верхней части «жертвенного» слоя

Рудаков В.И., Денисенко Ю.И., Наумов В.В., Симакин С.Г. Особенности формирования  $\text{CoSi}_2$  при двустадийном быстром термическом отжиге структур Ti/Co/Ti/Si (100). Письма в ЖТФ, 2011, Т.37, вып.3, С.36-44.

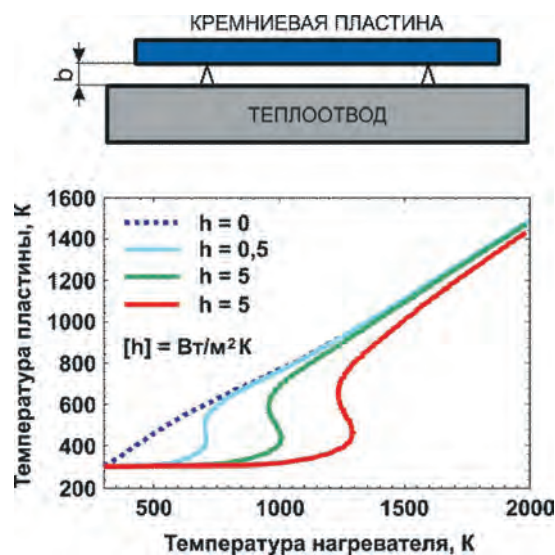
Рудаков В.И., Денисенко Ю.И., Наумов В.В., Симакин С.Г. Контроль образования ультратонких слоев  $\text{CoSi}_2$  при быстром термическом отжиге структур Ti/Co/Ti/Si (100). Микроэлектроника, 2011. Т. 40. Вып.6. С. 389-394.

Рудаков В.И., Денисенко Ю.И., Наумов В.В., Симакин С.Г. Формирование и методика исследования ультратонких слоев силицида кобальта в структурах Ti/Co/Ti, TiN/Ti/Co и TiN/Co на кремнии. ЖТФ, 2012, Т.38, вып.21, С.48-55.

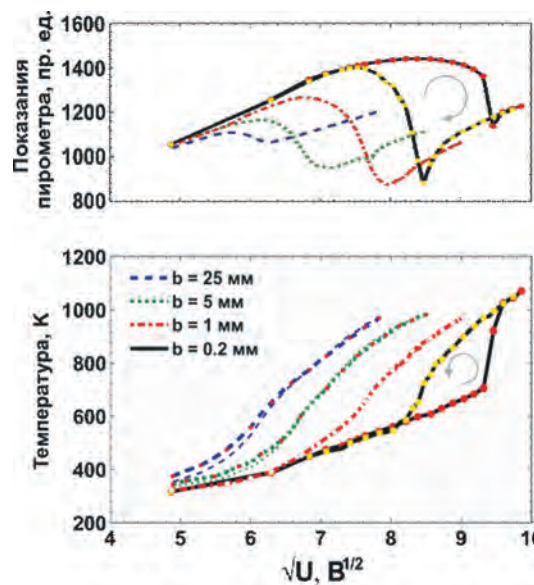
Рудаков В.И., Богоявленская Е.А., Денисенко Ю.И., Овчаров В.В., Куреня А.Л., Руденко К.В., Лукичев В.Ф., Орликовский А.А., Плис Н.И. Получение и свойства ультратонких слоев для изготовления элементов КНИ МДП-нотранзистора. Российские нанотехнологии, 2013, Т. 8, №3-4, С. 68-73.

## Бистабильность и гистерезис в кремниевой пластине, вызванные тепловым пробоем при нагревании пластины мощным некогерентным излучением

При облучении кремниевой пластины мощным потоком некогерентного излучения может наблюдаться тепловой пробой, сопровождающийся бистабильностью и гистерезисом. Для проявления эффекта температурной бистабильности необходим интенсивный теплоотвод, включающий, наряду с радиационной, кондуктивную или конвективную составляющую.



Теоретические кривые для различных значений коэффициента теплообмена  $h = 2\alpha/b$ , где  $\alpha$  – теплопроводность газа



Зависимость показаний пирометра и термопары от напряжения  $U$  на лампах для различных значений ширины зазора  $b$

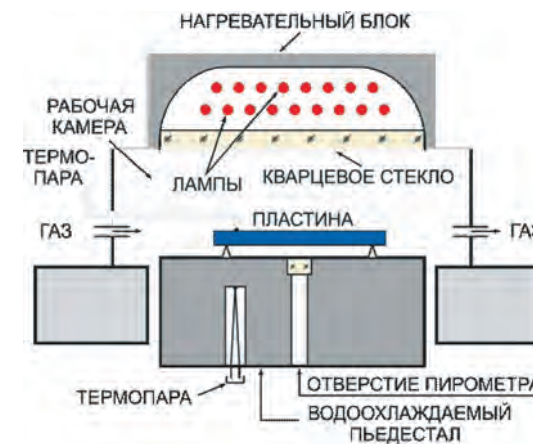


Схема термического реактора с водоохлаждаемым пьедесталом для наблюдения эффекта бистабильности

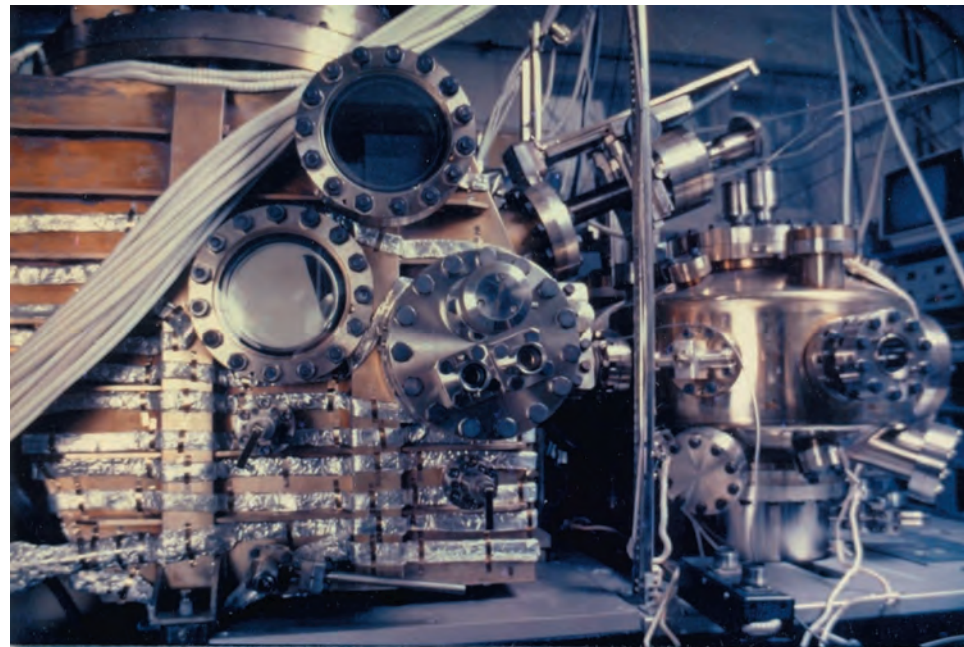
В.И. Рудаков, В.В. Овчаров, В.П. Пригара. Бистабильность при радиационном теплообмене. Письма в ЖТФ, 2008, том. 34, вып. 16. С. 79-86.

V.I. Rudakov, V.V. Ovcharov, A.L. Kurennya, V.P. Prigara. Bistable behavior of silicon wafer in rapid thermal processing setup. Microelectronic Engineering, 2012, V. 93, PP. 67-73.

Valery I. Rudakov, Aleksey L. Kurennya, Vladimir V. Ovcharov, Valeriy P. Prigara. Temperature oscillation in a silicon wafer under constant power of incoherent irradiation by heating lamps in a thermal chamber of RTP set up. Proceedings of SPIE, 2013. V. 8700. PP. 870006-1-11.

## Молекулярно-пучковая эпитаксия арсенида галлия на кремнии

Выполнен цикл исследований по молекулярно-пучковой эпитаксии арсенида галлия на кремнии (с замыслом о создании оптических связей на больших кремниевых кристаллах). Благодаря применению изовалентного легирования (In) на начальных стадиях роста получены тонкие (100 нм) слои арсенида галлия на кремнии с низкой плотностью дислокаций.



*Joshkin V.A., Oktyabrsky S.R., Orlikovsky A.A., Bogonin I.A.* Low temperature preannealing for carbon removal from Si surface in GaAs-on-Si molecular beam epitaxial growth. *Journal of Crystal Growth*, 132 (1993), p. 209-214.

*Богонин И.А., Иошкин В.А., Квит А.В., Орликовский А.А.* Влияние легирования индием на рост арсенида галлия на кремнии при молекулярно-лучевой эпитаксии. *Микроэлектроника*, 1993, т. 22, с. 71-81.

*Joshkin V., Orlikovsky A., Oktyabrsky S., Dovidenko K., Kvit A.* Biaxial compression in GaAs thin films grown on Si. *Journal of Crystal Growth*. 147 (1995), p. 13-18.

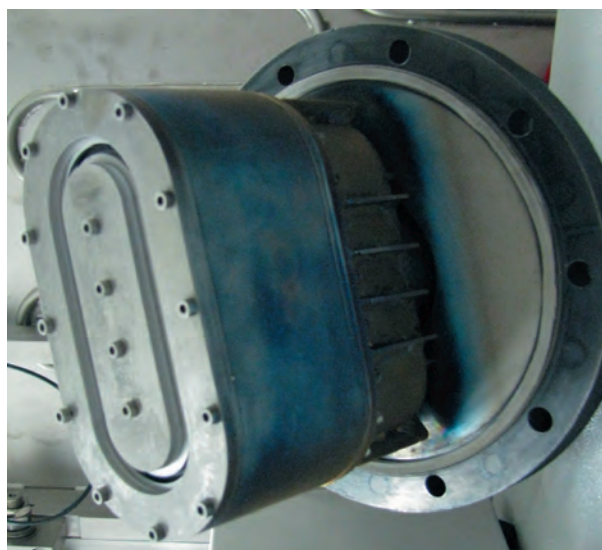
*V.A. Joshkin, A.V. Kvit, I.E. Givargizov, A.A. Orlikovsky, B.G. Zhurkin.* Redistribution and incorporation of Si in GaAs due to indium doping. *Materials Science and Engineering*. B26 (1994), p. 7-11.

## ***Источники ионов для реактивного ионно-лучевого травления и осаждения пленок из инертных и химически активных газов***

Разработана серия источников ионов для реактивного травления и осаждения тонких пленок. Достоинства и технологические возможности ионно-лучевых технологий: высокая направленность воздействия, обеспечивающая высокую прецизионность; возможность получения вертикальных ступенек при травлении через маску; отсутствие ухода размеров элементов; возможность формирования пучков ионов как инертных, так и химически активных газов; возможность управления энергией ионов в широких пределах; высокая однородность и воспроизводимость обработки; разрешающая способность, нм...< 20 (при травлении через резистивную маску с аспектным отношением 50:1); селективность травления, например,  $\text{SiO}_2:\text{Si}$  20:1.



**«Радикал» с трубчатым пучком**



**«Радикал» с ленточным пучком**



**«Радикал М-250» многопучковый**

Маишев Ю.П., Терентьев Ю.П., Шевчук С.Л. Источники ионов и ионно-лучевые технологии нанесения и травления пленочных структур для микро- и нанoeлектроники. (Часть 1). «Интеграл», №5 (49). 2009. С. 10–12.

Маишев Ю.П., Терентьев Ю.П., Шевчук С.Л. Источники ионов и ионно-лучевые технологии нанесения и травления пленочных структур для микро- и нанoeлектроники. (Часть 2). «Интеграл», №6 (50). 2009. С. 18–19.

## ***Источник пучков быстрых атомарных и молекулярных нейтральных частиц***

Разработан источник быстрых атомарных и молекулярных нейтральных частиц. Источник работает с инертными и химически активными газами; степень нейтральности формируемых пучков – до 100 %, диапазон энергии частиц - (100 -1500) эВ; отсутствует накопление объёмного заряда в диэлектрическом материале, приводящего к появлению дефектов в режимах осаждения или травления слоёв; отсутствует накопление поверхностного заряда в диэлектрическом материале, приводящего к искажению траекторий частиц кулоновским полем вблизи краёв топологических элементов ИС и невозможности влияния на процесс осаждения или травления слоёв.



**Источник быстрых нейтральных частиц с ленточным пучком**

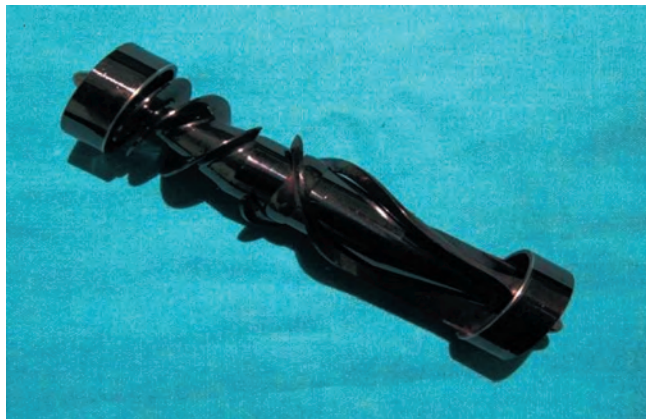
*Маишев Ю.П., Шевчук С.Л., Матвеев Т.Н.* Физические принципы формирования пучков быстрых атомов резонансной перезарядкой пучков ионов // Квантовые компьютеры, микро- и наноэлектроника: физика, технология, диагностика и моделирование / Отв. ред. В.Ф. Лукичев. М.: Наука. 2008. (Труды ФТИАН; Т. 19, С. 69 - 77).

Патент Российской Федерации №2 395133 С1 от 10.03.2009 «Источник быстрых нейтральных частиц».

Патент Российской Федерации №2 468 465 С2 от 27.12.2010 «Источник быстрых нейтральных частиц».

## ***Осаждение углеродных алмазоподобных пленок из пучков ионов***

В 2012 году впервые в России в ФНЦ трансплантологии и искусственных органов им. В.И. Шумакова осуществлена имплантация человеку осевого насоса, так называемого «искусственного сердца», предназначенного для поддержания функции кровообращения. Все поверхности деталей и узлов насоса покрывались тонкой углеродной алмазоподобной пленкой (АПП) с целью исключения тромбообразования, а также снижения трения в опорах насоса. Осаждение АПП проводилось методом реактивного ионно-лучевого синтеза. Насос проработал девять месяцев у человека перед пересадкой ему донорского сердца. За этот период ротор насоса совершил 3,3 миллиарда оборотов, что не вызвало изменений в покрытых АПП деталях и узлах насоса.



**Ротор осевого насоса**



**Опора ротора**

Ю.П.Маишев<sup>1</sup>, С.Л.Шевчук<sup>1</sup>, Г.Р.Иткин<sup>2</sup>, В.А.Мальгичев<sup>3</sup>. Осаждение углеродных алмазоподобных пленок из пучков ионов для создания искусственного сердца.

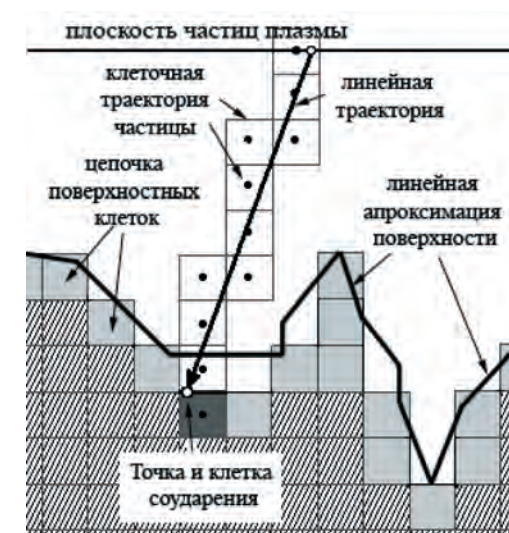
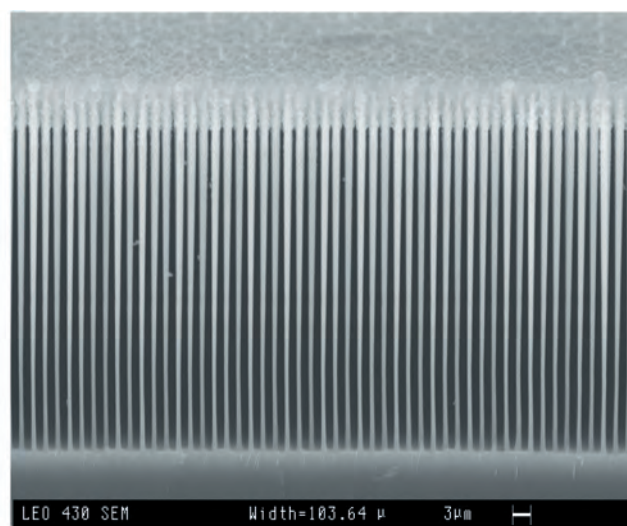
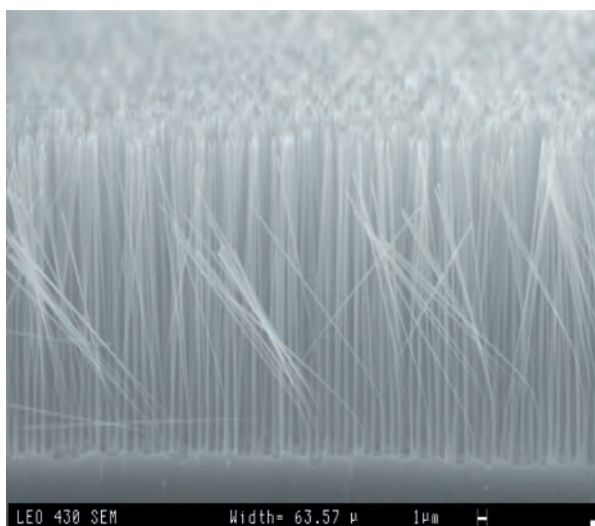
<sup>1</sup>Физико-технологический институт РАН,

<sup>2</sup>Федеральный научный центр трансплантологии и искусственных органов им. академика В.И. Шумакова Минздравсоцразвития России,

<sup>3</sup>ООО «ДОНА-М». Доклад на научной сессии ОНИТ РАН «НАНОТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЫ», г. Санкт-Петербург, март 2013 г.

## Плазмохимические процессы травления высокоаспектных структур в кремнии

Проведены исследования глубокого анизотропного травления Si в циклическом, двухстадийном процессе в плазме  $\text{SF}_6/\text{C}_4\text{F}_8$  ВЧИ разряда для получения высокоаспектных микроструктур. Создан программный комплекс моделирования формирования таких структур, который позволяет определять влияние большинства технологических параметров на получение заданного профиля травления.



Амиров И.И., Морозов О.В., Изюмов М.О., Кальнов В.А., Орликовский А.А., Валиев К.А. Плазмохимическое травление глубоких канавок в кремнии с высоким аспектным отношением для создания различных элементов микромеханики. // Микросистемная техника. 2004. Т.12. С.15-18.

Амиров И.И., Алов Н.В. Формирование микроструктур на поверхности кремния во фторсодержащей плазме в циклическом процессе травление/пассивация. Химия высоких энергий. 2008. Т.41.№4. С.164-168.

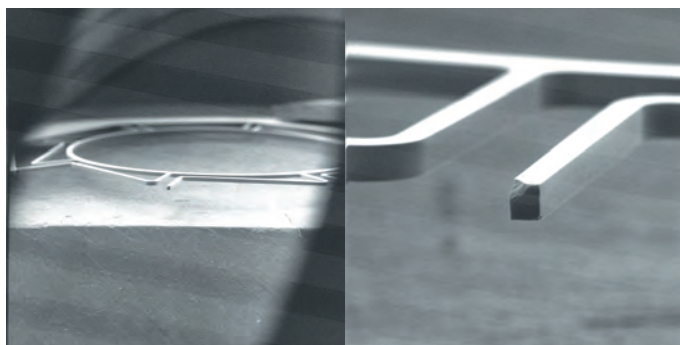
Шумилов А.С., Амиров И.И. Моделирование формирования глубоких канавок в кремнии в плазмохимическом, циклическом травление/пассивация процессе // Микроэлектроника. 2007. Т.36. № 4. С. 295-305.

Шумилов С.А., Амиров И.И., Лукичев В.Ф. Моделирование эффектов формирования глубоких канавок в кремнии в плазмохимическом циклическом процессе. // Микроэлектроника. 2009. Т. 38. №6. С. 428-435.

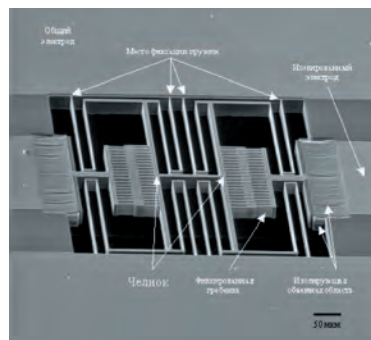
Амиров И.И., Морозов О.В., Постников А.В., Кальнов В.А., Орликовский А.А., Валиев К.А. Плазменные процессы глубокого травления кремния в технологии микросистемной техники. Труды ФТИАН. Квантовые компьютеры, микро-нанoeлектроника. М., Наука. 2009. Т. 20. С.159-174.

## Развитие технологий плазменных процессов формирования трехмерных микро- и наноструктур

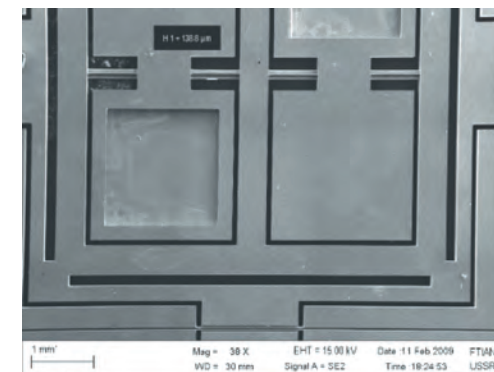
Выполнены исследования в области разработки конструкции, математического моделирования и технологии изготовления изделий микросистемной техники. Разработаны маршруты изготовления на основе технологии формирования микроструктур с использованием плазмохимического циклического процесса (травление/пассивация) кремния во фторсодержащей плазме. Изучены условия получения высокоаспектных структур в кремнии, созданы экспериментальные образцы микроакселерометров и микрогироскопов для систем навигации нового поколения.



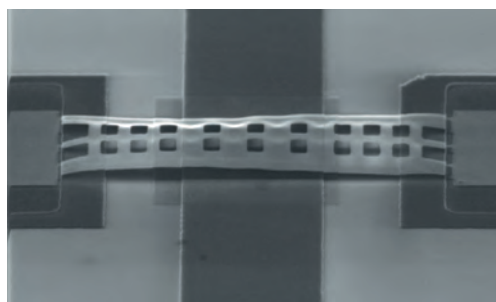
микрогироскоп



микроконденсатор



микроакселерометр

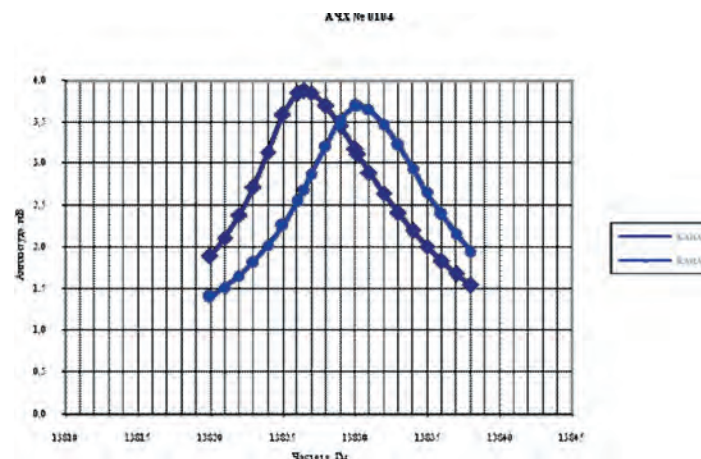
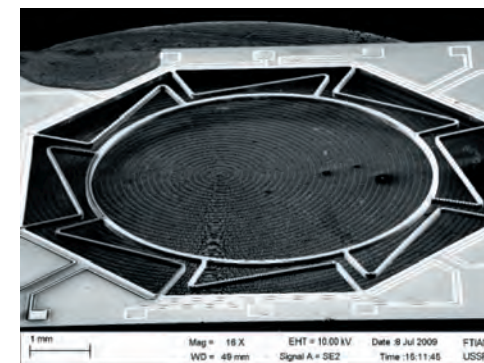
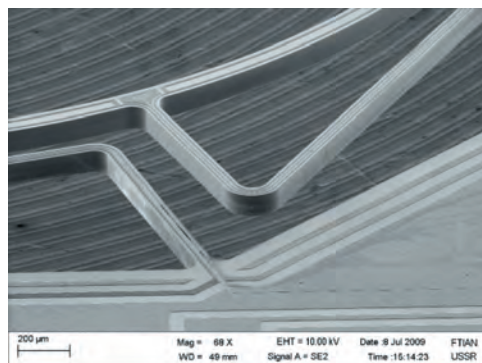
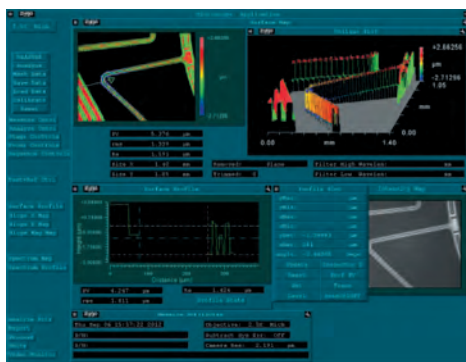


переключатель

О.В. Морозов, А.В. Постников, И.И. Амиров, В.А. Кальнов. Технология изготовления микроэлектромеханических устройств на основе изолированных областей в пластине кремния. // Материалы 16 Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности России» Москва. 2010. 9-11 сентября. С.205-210.  
Патент на изобретение № 2403647. Способ формирования электрически изолированных областей кремния в объеме кремниевой пластины. Зарегистрировано 10.10.2010.  
Уваров И.В., Морозов О.В., Козин И.А., Постников А.В., Амиров И.И., Кальнов В.А. Динамические характеристики чувствительного элемента микрогироскопа с повышенным фактором демпфирования. // Микро- и наносистемная техника. 2011. №6.

## Разработка технологии изготовления чувствительного элемента микрогирокопа для систем навигации

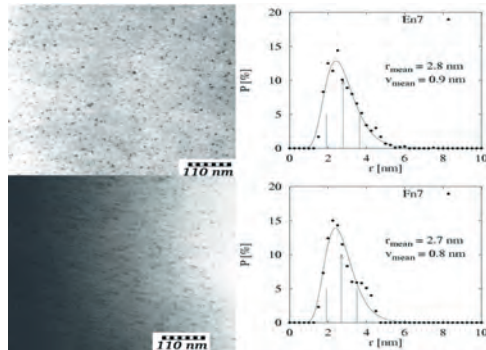
Совместно с Раменским приборостроительным КБ и ОАО «Инерциальные Технологии «Технокомплекс» проведены обширные исследования по разработке конструкции, технологии изготовления микрогирокопа на основе МЭМС – технологий для современных систем навигации.



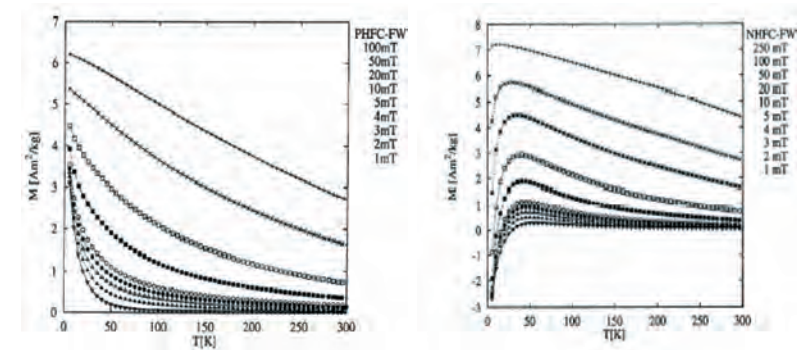
Кальнов В.А., Лукичев В.Ф., Амиров И.И., Саломатин А.К., Соловьев В.М., Соловьев Ю.В. Плазменные процессы глубокого травления кремния в технологии микросистемной техники // Всеросс.науч-практ.конф."Навигация, наведение и управление летательными аппаратами". - Тез.докл., - М.-Раменское, 20-21 сент.2012. - С.78-79.

# Гамма-резонансная спектроскопия наномагнетиков

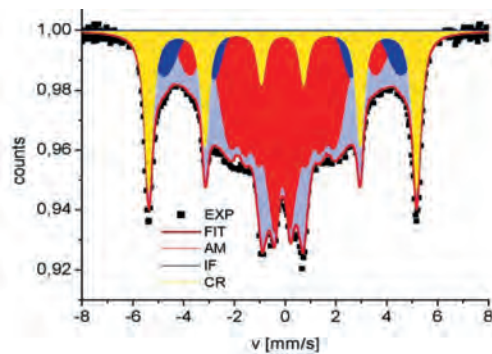
Предложен и реализован подход для анализа гамма-резонансных спектров и кривых намагничивания магнитных наночастиц в рамках единой модели магнитной динамики ансамбля однодоменных частиц, который широко используется для диагностики магнитных наноматериалов



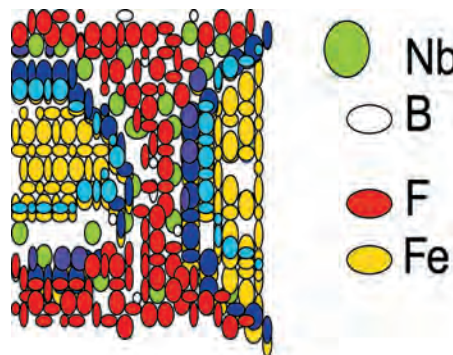
Просвечивающая электронная микроскопия



Кривые намагничивания



Мессбауэровские спектры ядер  $^{57}\text{Fe}$



Модель наноструктуры  $\text{Fe}_{84-x}\text{Cu}_1\text{Nb}^x\text{B}^{13}$



Магнитные датчики

A.M. Afanas'ev, M.A. Chuev, J. Hesse. Relaxation Mossbauer spectra under rf magnetic field excitation. Phys. Rev. B56 (1997) 5489-5499.

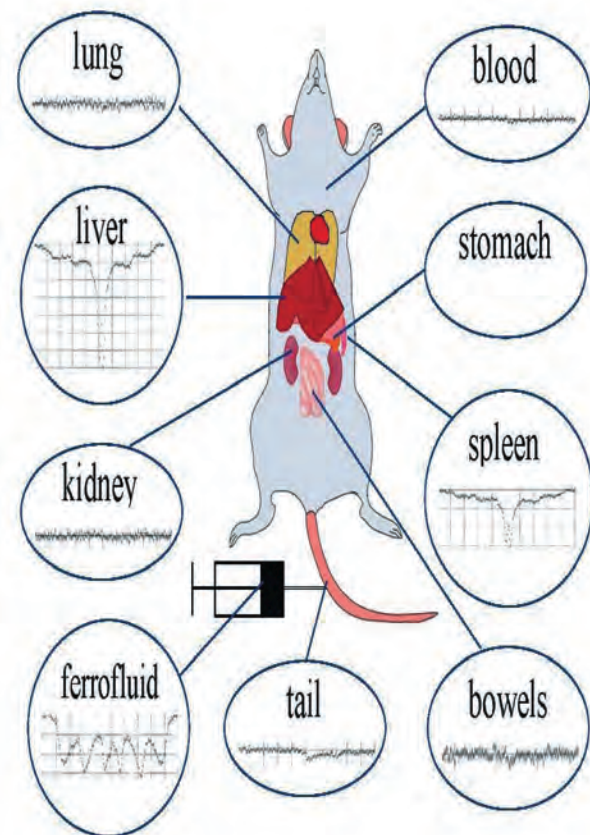
A.M. Afanas'ev, M.A. Chuev, J. Hesse. Relaxation-stimulated resonances in Mossbauer spectra under rf magnetic field excitation. J. Phys.: Cond. Matter 12 (2000) 623-635.

M.A. Chuev, J. Hesse. Non-Equilibrium Magnetism of Single-Domain Particles for Characterization of Magnetic Nanomaterials. In "Magnetic properties of solids" (ed. K.B. Tamayo). NewYork: NovaScience Publishers, 2009, pp. 1-104.

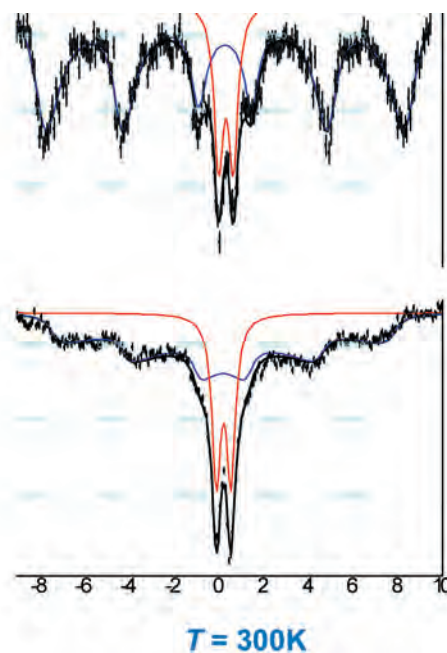
М.А. Чуев. Многоуровневая релаксационная модель для описания мессбауэровских спектров наночастиц в магнитном поле. ЖЭТФ 141 (2012) 698-722.

# Разработка методики прецизионной нанобиодиагностики на основе мессбауэровской спектроскопии (ФТИАН и НИЦ «Курчатовский Институт»)

Биораспределение

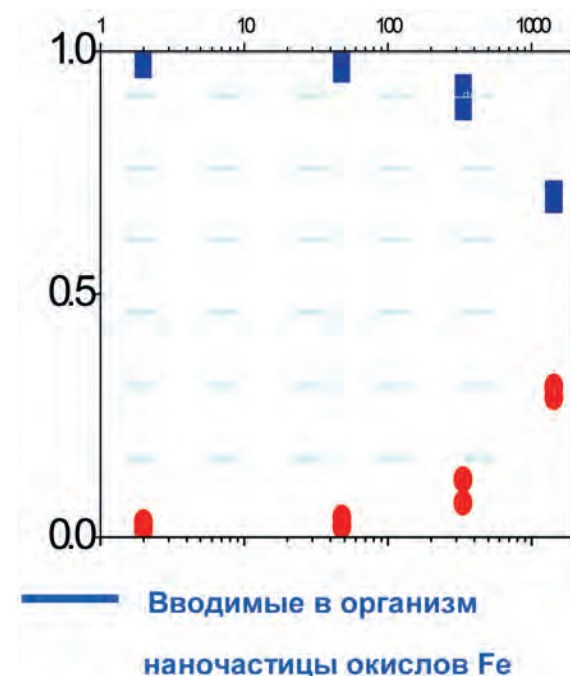


Селезенка мыши



— Ферритин (присутствие в организме)

Биодеградация



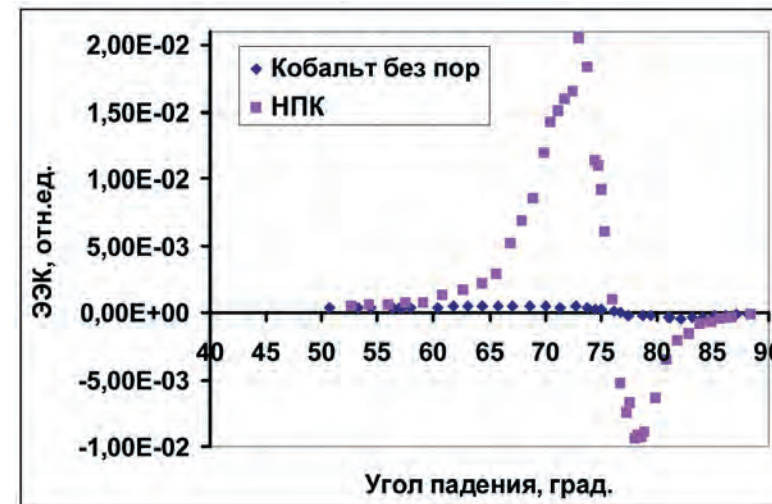
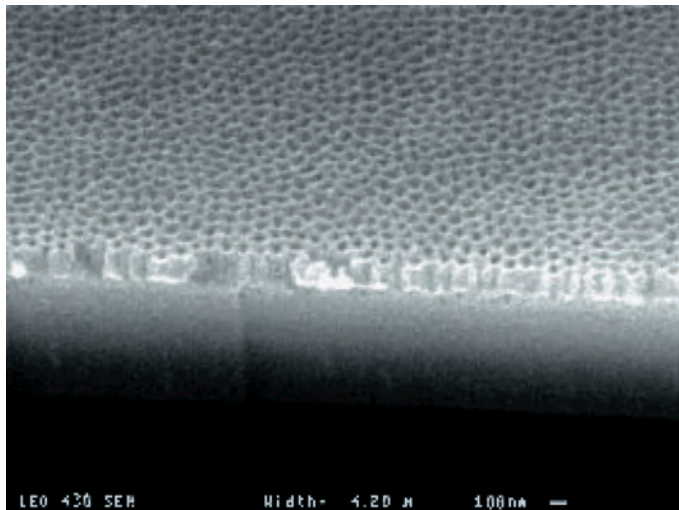
М.А. Чуев. О механизме температурной эволюции «симметричной» магнитной сверхтонкой структуры мессбауэровских спектров магнитных наночастиц квадрупольному дублету линий. Письма в ЖЭТФ 2011, Т.94, Вып.4, С.312-317.

М.А. Чуев. Multi-level relaxation model for describing the Mössbauer spectra of single-domain particles in the presence of quadrupolar hyperfine interaction. J. Phys.: Condens. Matter 2011. V. 23. No.426003 (11pp).

М.А. Чуев. Эффективный метод анализа сверхтонкой структуры гамма-резонансных спектров с использованием профиля Фойта. Доклады АН 2011. Т. 438. Вып. 6. С. 747-751.

## Усиление экваториального эффекта Керра в наноразмерных структурах

Обнаружено явление относительного изменения интенсивности отраженного света ( $\lambda=632$  нм) в магнитном поле 80 Э для тонкопленочных магнитных структур (порядка 10 нм), нанесенных на перфорированную пленку алюминия посредством анодирования. Обнаруженное явление интерпретируется в рамках теории поверхностного плазмон-поляритона и может использоваться при разработке информационных устройств нового поколения.



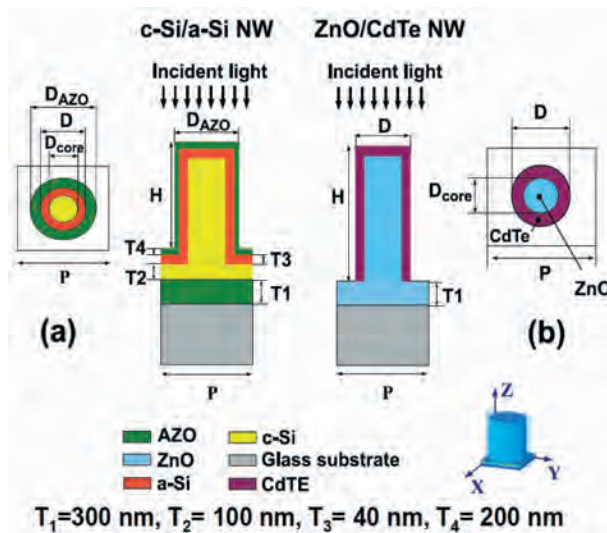
Перфорированная пленка алюминия толщиной 600 нм

Ваганова Е.И., Мироненко А.А., Папорков В.А., Рудь Н.А., Рудый А.С., Проказников А.В. Усиление фотоэлектрического отклика наноструктурированием поверхности, Микроэлектроника, 2011, т. 40, № 1, с. 36-44.

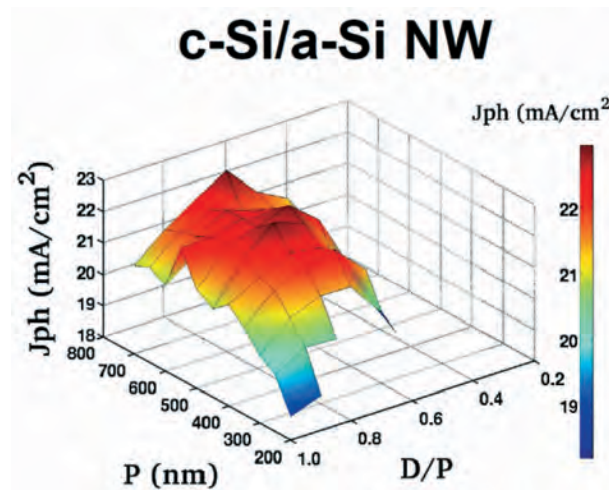
Проказников А. В., Можаяев А. В., Маковийчук М. И. Разработка программного комплекса для исследования трехмерного динамического моделирования формирования кластеров, Двенадцатая международная научно-практическая конференция «Современные Информационные и Электронные Технологии» (СИЭТ-2011), 2011, Украина, г. Одесса, т. 1, с.35.

## Солнечные элементы с высокой эффективностью

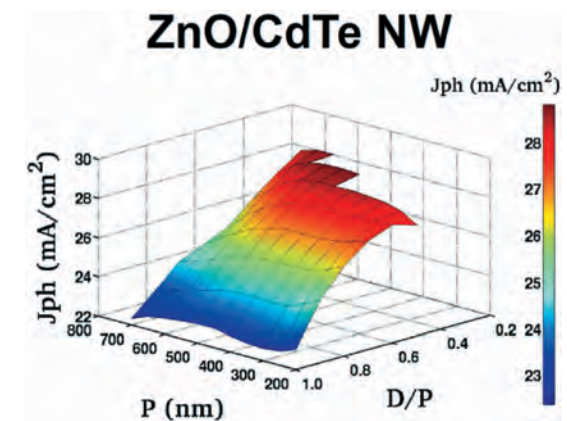
В сотрудничестве с Болонским университетом (Италия) проводятся исследования с целью увеличения эффективности солнечных элементов за счет применения нанотехнологий. Ведется разработка солнечных элементов на основе массива кремниевых, а также ZnO/CdTe-нанопроволок. В этой работе создан программный комплекс точного решения уравнений Максвелла в средах с большой пространственной неоднородностью диэлектрической проницаемости.



Структура и параметры нанопроволок в солнечном элементе



Плотность фототока для кремниевой нанопроволоки c-Si/a-Si при потоке солнечной энергии 1000 Вт/м². Средняя высота нанопроволок H=10 мкм.



Плотность фототока для нанопроволоки ZnO/CdTe при потоке солнечной энергии 1000 Вт/м². Средняя высота нанопроволок H=10 мкм.

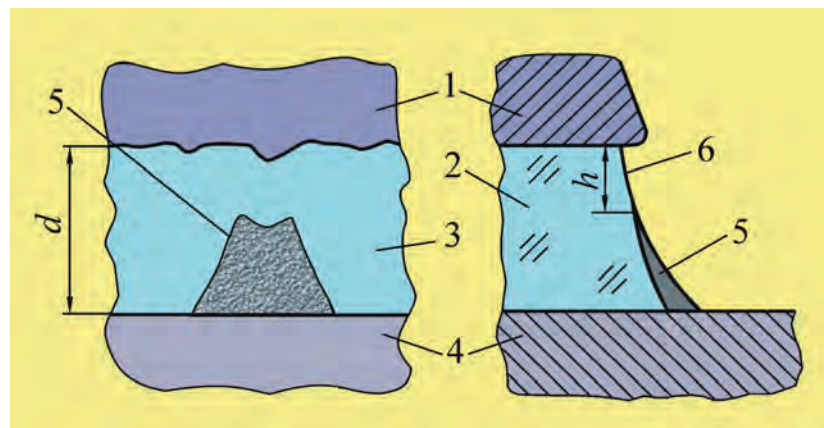
I. Semenikhin ; M. Zanucoli ; C. Fiegna ; V. Vyurkov ; E. Sangiorgi. Computationally efficient method for optical simulation of solar cells and their applications»// Proc. SPIE v. 8700, International, p. 870012-1.

M. Zanucoli, C. Fiegna, A. Kaminski-Cachopo, J. Michallon, E. Sangiorgi, I. Semenikhin, V. Vyurkov. «Numerical Simulation of Vertical Silicon Based Heterojunction Solar Cells», 3rd International conference Silicon PV 2013, Hamelin, Germany, March 25-27, 2013.

M. Zanucoli, J. Michallon, I. Semenikhin, A. Cachopo, E. Sangiorgi, C. Fiegna, «Optical simulation of ZnO/CdTe and c-Si/a-Si vertical nanowires solar cells», 14th International Conference on ULTIMATE INTEGRATION ON SILICON (ULIS-2013), March 19-21, 2013, University of Warwick, UK.

## Память на самоформирующихся проводящих наноструктурах

Предложена энергонезависимая электрически перепрограммируемая память на самоформирующихся проводящих наноструктурах, основанная на явлении электроформовки в открытых «сэндвич»-МДМ-структурах. Проводящая среда (слой, обогащённый Si) образуется на поверхности свободного торца плёнки диэлектрика ( $\text{SiO}_2$ ) в высоком электрическом поле за счёт деструкции молекул  $\text{SiO}_2$  под действием потока электронов. Информация кодируется величиной туннельного тока через изолирующий зазор шириной  $h$  между катодом и проводящей средой (наноструктурой).  $h$  может изменяться в диапазоне нескольких нанометров путём приложения к МДМ-структуре импульсов напряжения определённой длительности и амплитуды, большей порогового значения  $U_{th} \approx 3$  В. Неразрушающее считывание обеспечивается измерением тока при напряжениях, меньше порогового. Разработаны, изготовлены и испытаны 4 варианта конструкции элемента памяти, последний из которых обладает уникальным сочетанием технических характеристик (см. ниже).



Схематическое изображение открытой «сэндвич»-МДМ-структуры после электроформовки: 1 – край верхнего электрода из вольфрама; 2 – слой  $\text{SiO}_2$  (толщина  $d=15 - 25$  нм); 3 – свободный торец  $\text{SiO}_2$  (изолирующая щель); 4 – нижний электрод из нитрида титана; 5 – проводящая среда (наноструктура); 6 – изолирующий зазор переменной ширины  $h$ .

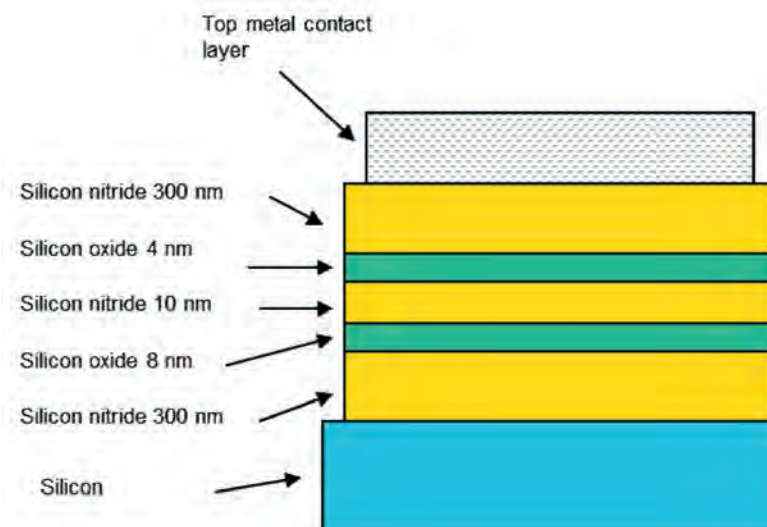
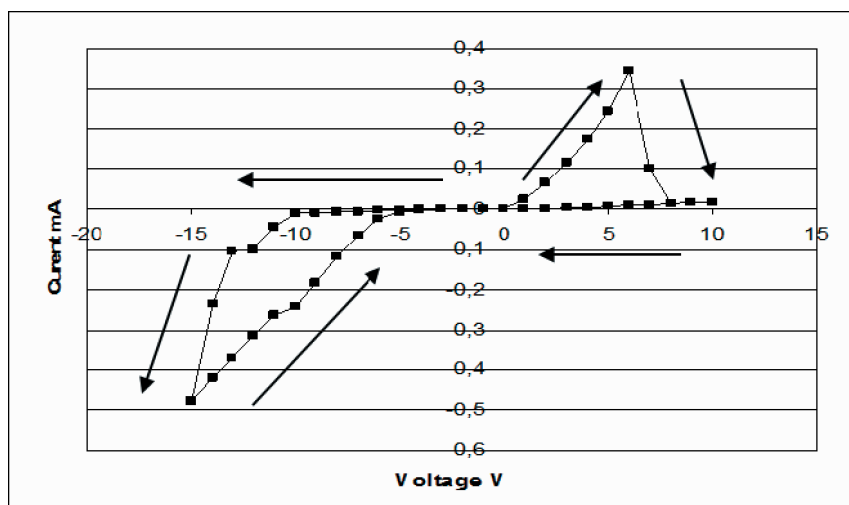
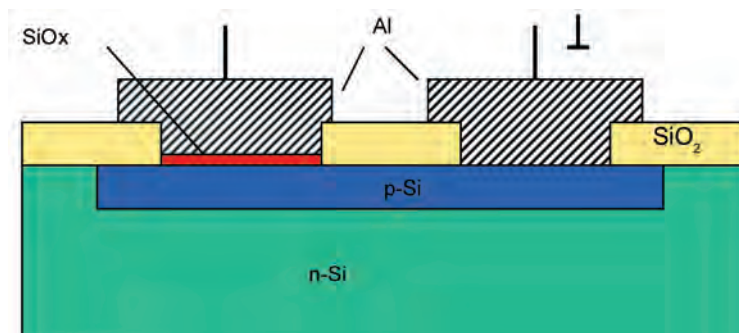
### Основные характеристики памяти

Высокая радиационная стойкость: допустимая накопленная доза составляет более 1 Мрад. Высокая термическая стойкость: информация в матрицах сохраняется при температурах более  $200^\circ\text{C}$ . Высокое быстродействие: время записи информации в ячейку может составлять порядка 10 нс. Простота и высокая надёжность считывания информации: отношение токов высоко- и низкопроводящего состояний может составлять  $10^3 - 10^5$ . Согласованность с кремниевой технологией: при изготовлении матрицы памяти используются только процессы стандартной кремниевой технологии, поэтому а) матрица памяти может быть относительно легко изготовлена на одном чипе со схемами управления; б) для изготовления запоминающего устройства могут быть использованы стандартное технологическое оборудование. Потенциально высокая плотность записи информации: собственно элемент памяти реально является наноструктурой и занимает площадь  $10 - 100$  нм<sup>2</sup>.

Мордвинцев В.М., Кудрявцев С.Е., Левин В.Л. Электроформовка как процесс самоформирования проводящих наноструктур для элементов энергонезависимой электрически перепрограммируемой памяти // Российские нанотехнологии. 2009. Т. 4. № 1-2. С. 174-182.

Мордвинцев В.М., Кудрявцев С.Е. Исследование электрических характеристик элементов памяти на самоформирующихся проводящих наноструктурах в виде открытой «сэндвич»-структуры TiN-SiO<sub>2</sub>-W // Микроэлектроника. 2013. Т. 42. № 2. С. 93-104.

## Исследование и разработка элементов памяти на базе эффекта переключения проводимости



Орликовский А.А., Бердников А.Е., Мироненко А.А., Попов А.А., Черномордик В.Д., Перминов А.В. Способ формирования обладающего эффектом переключения проводимости диэлектрического слоя // Патент РФ на изобретение № 2449416 от 27 апреля 2012 г.

A.E. Berdnikov, S.V. Vasilev, A.A. Mironenko, A.A. Popov, A.V. Perminov, V.D. Chernomordick, V.N. Gusev. Incorporation in grow film previously produced nanosize particles during low frequency PECVD Bookofabstract. II International Conference on Modern Problems in Physics of Surfaces and Nanostructures (ICMPNS-2012), 23-25 May, 2012, Yaroslavl, Russia. Poster P3-14, p.142.

## Разработка исследовательского проекта мультиархитектурной вычислительной суперсистемы

На основе предложенных концепций построения неоднородных вычислительных суперсистем разработан исследовательский проект мультиархитектурной вычислительной суперсистемы. В ее состав входит вычислительная подсистема, объединяющая большое число процессоров и подсистем, ориентированных на различные формы параллелизма. Эти формы параллелизма на аппаратном уровне отражаются не только на архитектуре и системе команд процессоров, но и на структуре всех уровней памяти, подсистемы ввода-вывода и средств межузлового обмена. Взаимная адаптация аппаратуры и программ обеспечивает более высокую эффективность и стимулирует создание новых вычислительных методов и моделей параллельного программирования. В состав системы также входят мониторинг-моделирующая подсистема, периферийная подсистема и набор функционально-специализированных сетей, обеспечивающих пересылку данных, взаимодействие программ и управление вычислительными процессами.



Митропольский Ю.И. Концепции построения неоднородных вычислительных суперсистем // Сборник «Распределенная обработка информации». Труды Пятого Международного семинара. Новосибирск: Институт физики полупроводников СО РАН. 1995. С. 42 – 46.

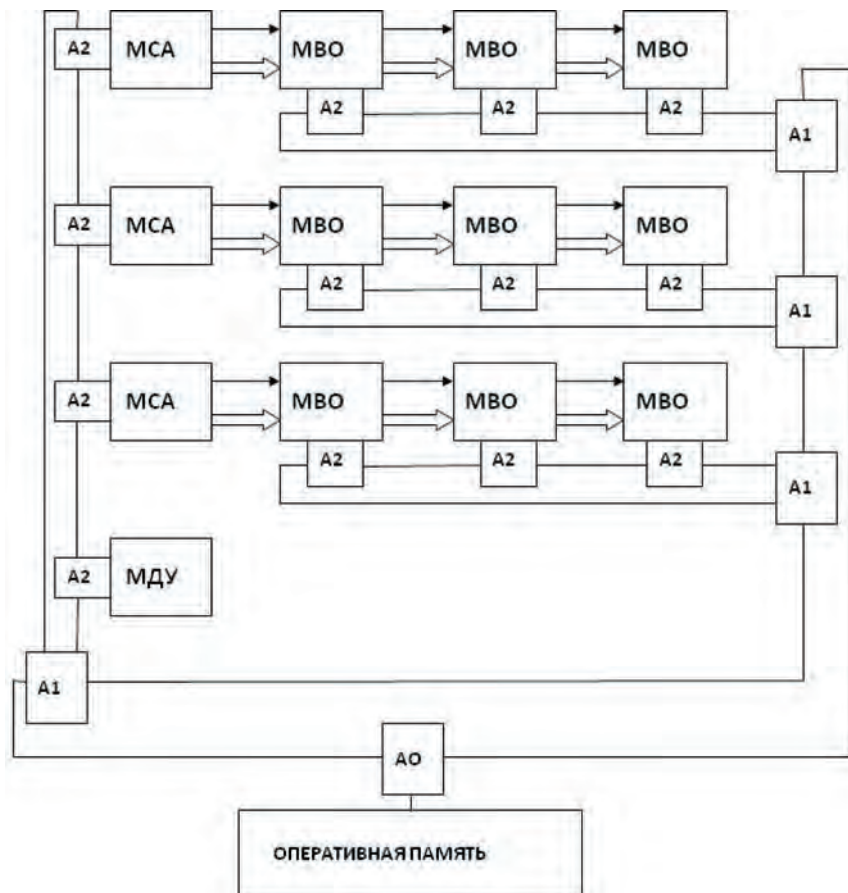
Митропольский Ю.И. Мультиархитектурная вычислительная суперсистема // Труды Первой Всероссийской научной конференции «Методы и средства обработки информации». М.: МГУ. 2003. С. 131 – 136.

Митропольский Ю.И. Развитие технологии, архитектуры и методов проектирования высокопроизводительных вычислительных систем // Труды Физико-технологического института РАН / Гл. ред. А.А. Орликовский, ФТИАН, М.: Наука, Т. 21, 2011, С. 31-55.

Митропольский Ю.И. Развитие концепции построения мультиархитектурных вычислительных систем // Многопроцессорные вычислительные и управляющие системы (МВУС-2009) // Материалы Международной научно-технической конференции. Т.1. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009, С. 100-103.

## Разработка многомодульной масштабируемой основной машины

Одной из целей исследований является многократное повышение производительности унипроцессора, выполняющего одну программу. Так унипроцессором является многомодульный масштабируемый процессор. Он является основой построения многомодульной масштабируемой основной машины, предназначенной для выполнения прикладных программ. В состав процессора входят модули скалярной и адресной обработки (МСА) и векторной обработки (МВО). Последние программно, логически и топологически могут быть объединены в цепочку. Если программа содержит сложные векторные функции или наборы связанных между собой векторных вычислений, то длина цепочки векторных операций, выполняемых параллельно, может достигать десятков. Число модулей в машине может достигать тысячи, что соответствует получению нескольких тысяч результатов в такт. В состав машины также входят модуль диспетчерского управления (МДУ), оперативная память и сеть объединения модулей.



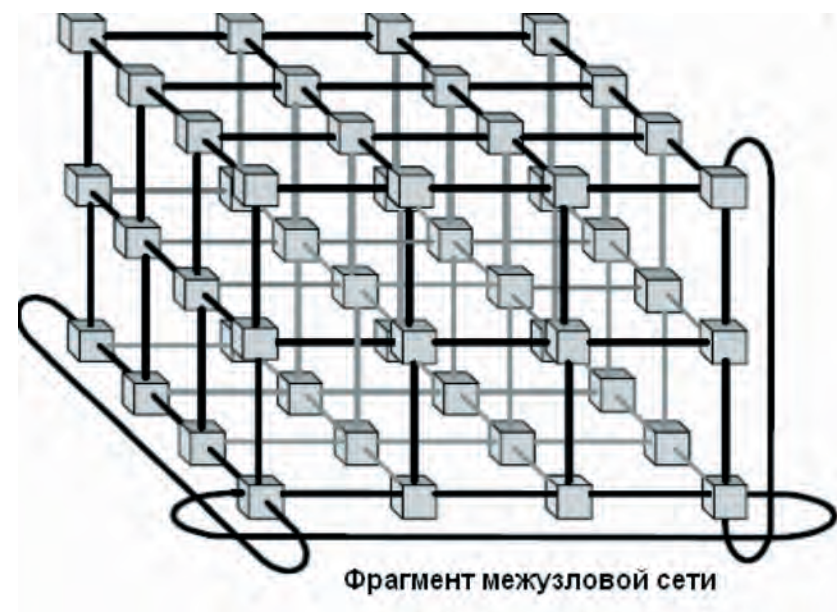
Митропольский Ю. И. Мультиконвейерный унипроцессор // Сборник «Вычислительные машины с нетрадиционной архитектурой. Супер ВМ». Выпуск 5. Неоднородные вычислительные суперсистемы. М.: ИВВС РАН. 1997. С. 50 – 64.

Митропольский Ю.И. Архитектура мультиконвейерного модульного масштабируемого унипроцессора // Труды Шестого Международного семинара «Распределенная обработка информации». Новосибирск: Институт физики полупроводников СО РАН. 1998. С. 30 - 34.

Митропольский Ю.И. Проект многоуровневой масштабируемой мультиархитектурной вычислительной системы // Труды Четвертой международной конференции РАСО '2008 «Параллельные вычисления и задачи управления», 27-29 октября 2008 г., Москва, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова.

## Сетевая структура мультиархитектурной вычислительной системы

Сетевая структура мультиархитектурной вычислительной системы основана на построении сети памяти, межузловой сети, сети управления и диагностической сети. Сеть памяти, имеющая иерархическую структуру, включает средства обмена между устройствами памяти различных уровней, в том числе обменно-редактирующие машины, обеспечивающие программно-управляемую адресацию данных. Сеть межузлового обмена, имеющая горизонтальную структуру, включает сетевые машины в вычислительных узлах и многомерную систему коммутации и обеспечивает взаимодействие параллельных программ. Сеть управления, входящая в состав мониторинно-моделирующей подсистемы, состоит из управляющих машин, имеющих во всех вычислительных узлах, мультикомпьютерах и других структурных образованиях системы.





117218, Москва, Нахимовский пр-кт, д. 34  
тел.: (499) 129-00-46, факс: (499) 129-31-41  
[www.ftian.ru](http://www.ftian.ru)