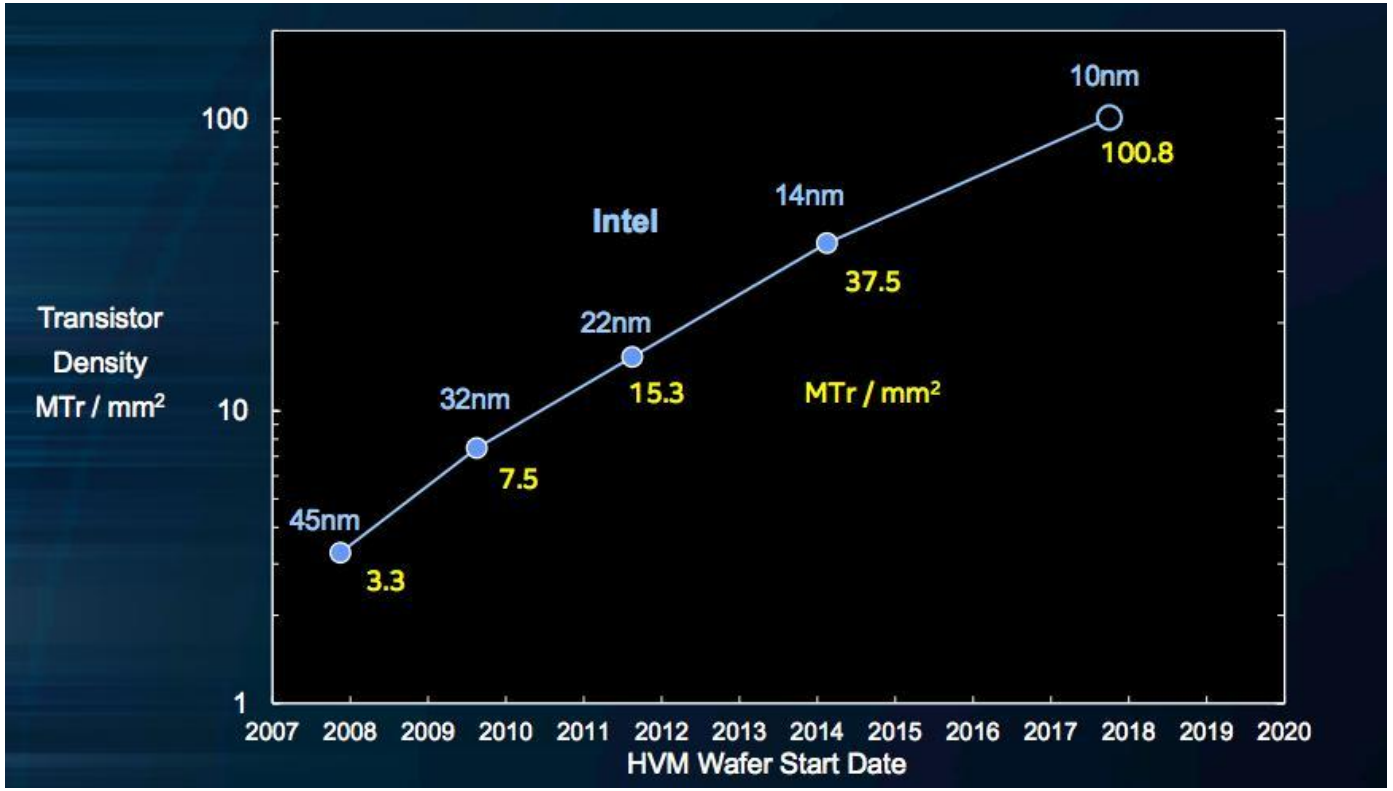
Казанский федеральный
УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ

МАГНИТНЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В СПИНТРОНИКЕ

Вахитов Искандер
инженер-проектировщик ФЦКП КФУ
м.н.с. НИЛ Синтеза и Анализа Тонкопленочных Структур (SATS Lab)

Современная полупроводниковая электроника

Число транзисторов на чипе 1982 – 10^5 (технология 1,5 микрона)
(Размер чипа ~ 1 см^2) 2003 – 10^8 (технология 90 нм)
2018 – 10^{10} (технология 5 нм)



7-нанометровый техпроцесс.
6,9 млрд транзисторов

7-нанометровый техпроцесс
6,9 млрд транзисторов

Современная полупроводниковая электроника

Тактовая частота 1982 – 10 МГц
(число операций в секунду) 2003 – 4 ГГц
2018 ~ 4-5 ГГц

14-нанометровый техпроцесс
3,60 ГГц

Двоичные значения битов кодируются в виде заряда электронов на конденсаторе
При изменении состояния бита «выбрасывается» энергия, превращаясь в тепло.

1 зеттабайт = 1024 эксабайт = 10^9 терабайт
(1Eb = 36000 лет HD-TV видео)

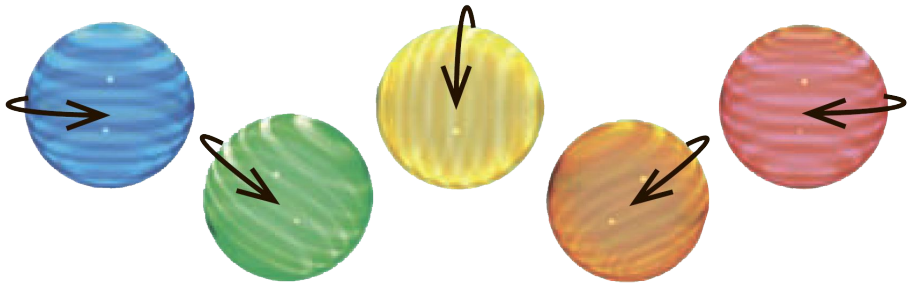
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ

ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ

ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕ

по всем параметрам мы близки к пределам физических возможностей существующих технологий

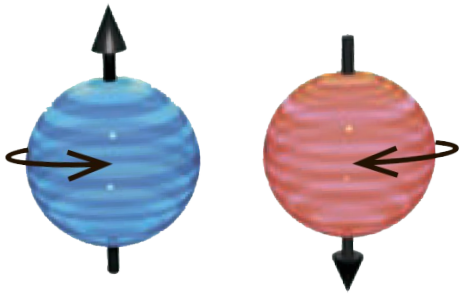
Спинтроника



Что такое спин?

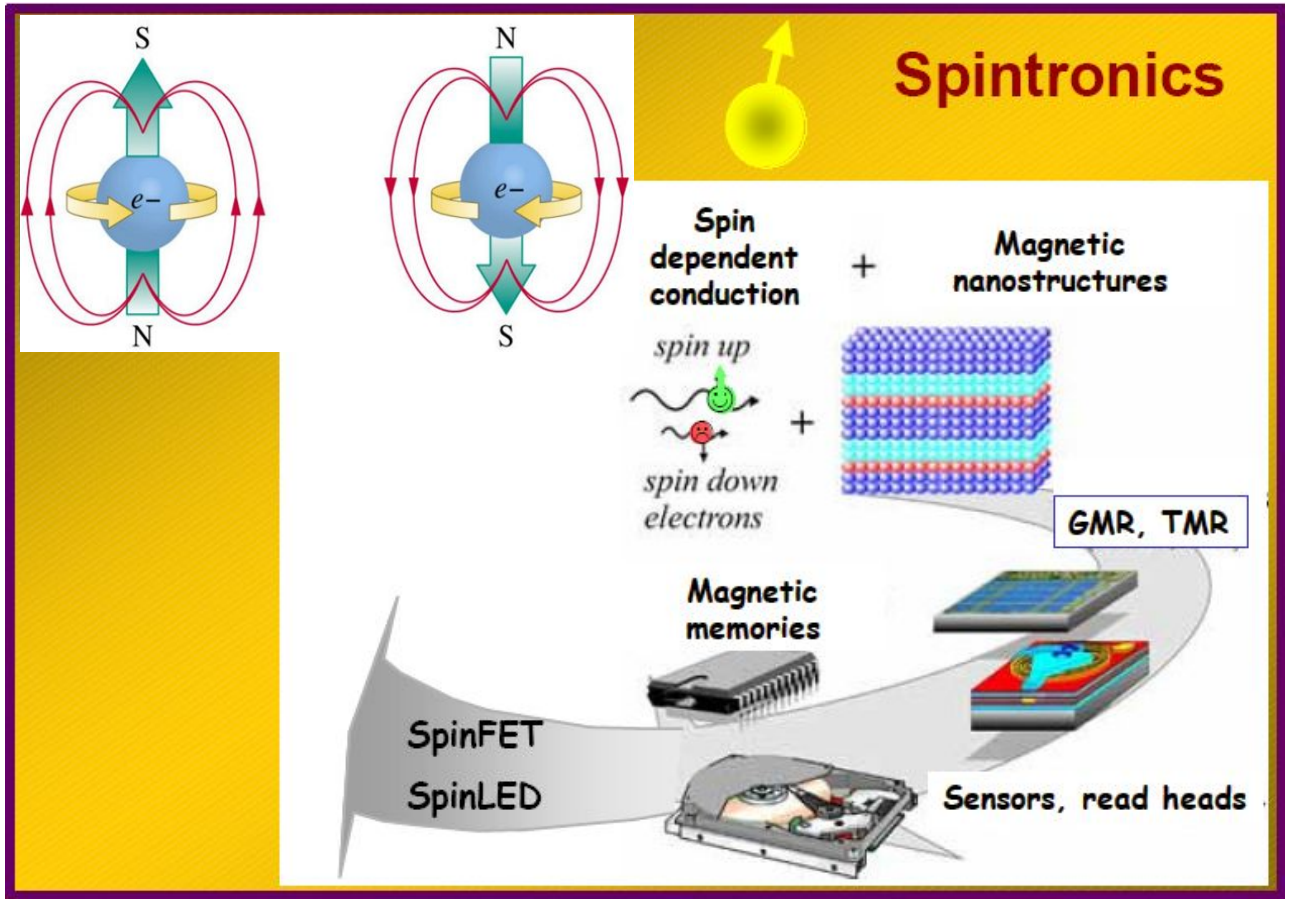
В дополнение к массе и электрическому заряду электроны имеют собственный момент импульса частицы называемого спином

Спин электрона может находиться в одном из двух состояний – либо «спин-вверх», либо «спин-вниз».



Спинтроника

Основа СПИНТРОНИКИ – магнитные наноструктуры



Дорожная карта развития – от академической науки к крупномасштабному производству

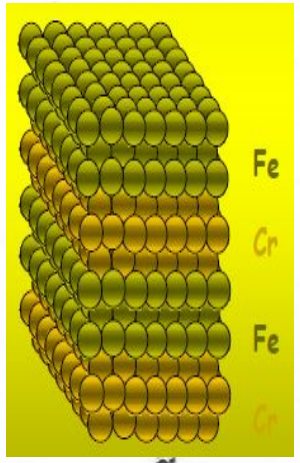
Открытие гигантского магнитосопротивления

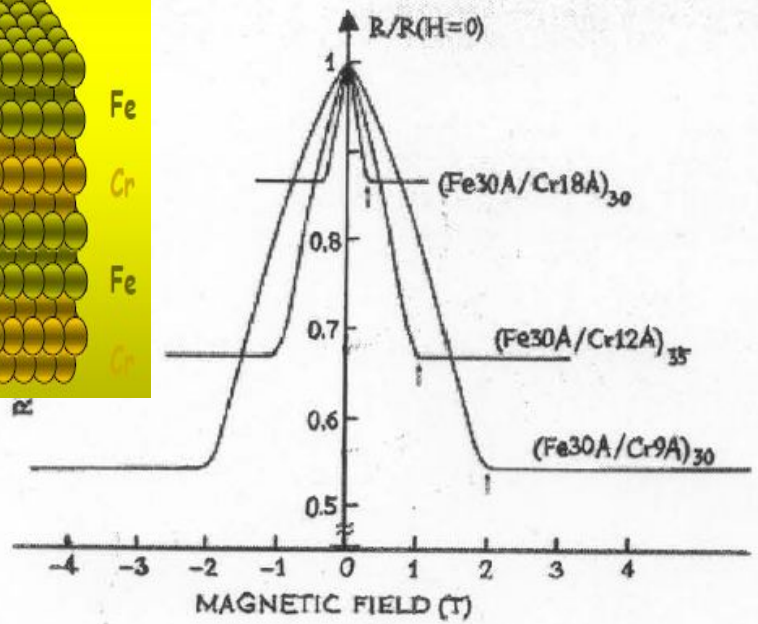
Discovery of **G**iant **M**agneto**R**esistance in Fe/Cr Multiayers

M.N.Baibich *et al*, PRL 61, 2472 (1988)*
G.Binasch *et al*, PRB 39, 4828 (1989)

Проф. A. Fert (France)

Nobel Prize 2007



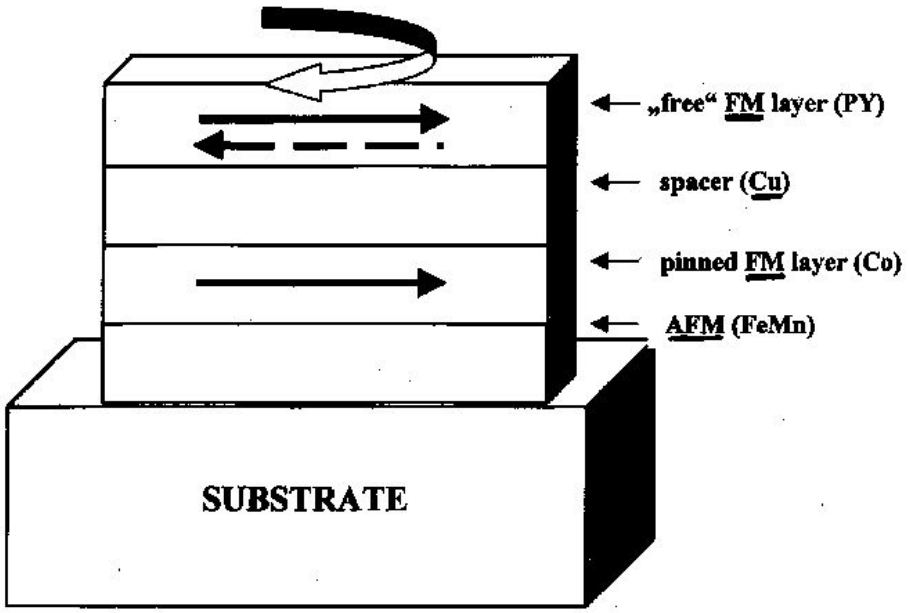


Проф. P. Gruenberg (Germany)

Nobel Prize 2007

Спинтроника

Спиновый клапан Дені́
(сенсор слабого магнитного поля)



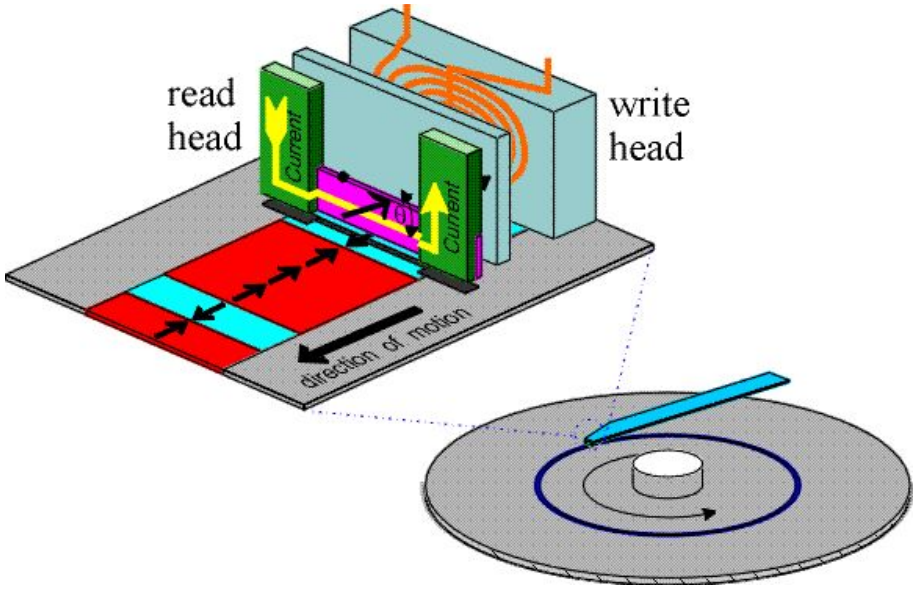
Single valve – 12-15% at room temperature

Double valve – 23-25% at room temperature

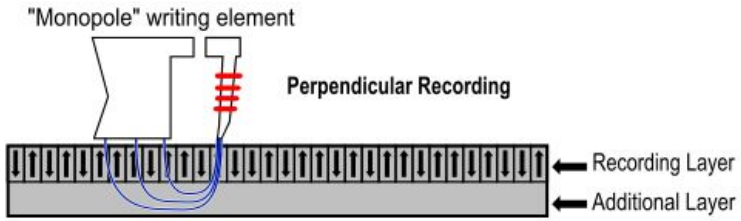
Применение ГМС в магнитной записи информации

Среды для магнитной записи – ферромагнитные металл. пленки, плотность записи – **до 3 Гигабит/см^2**
(1 **Гигабит** ~ 1 миллиард бит)
(1 **нанометр** ~ 1 миллиардная метра)

Головки записи-чтения на эффекте **гигантского магнитосопротивления** в ферромагнитных мультислоях – ширина дорожки записи – 200 нм, длина записи бита –100 нм



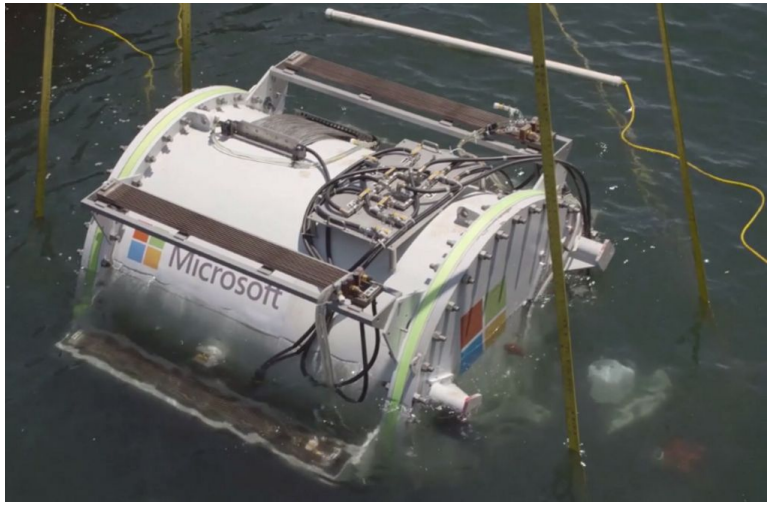
Современная спинтроника



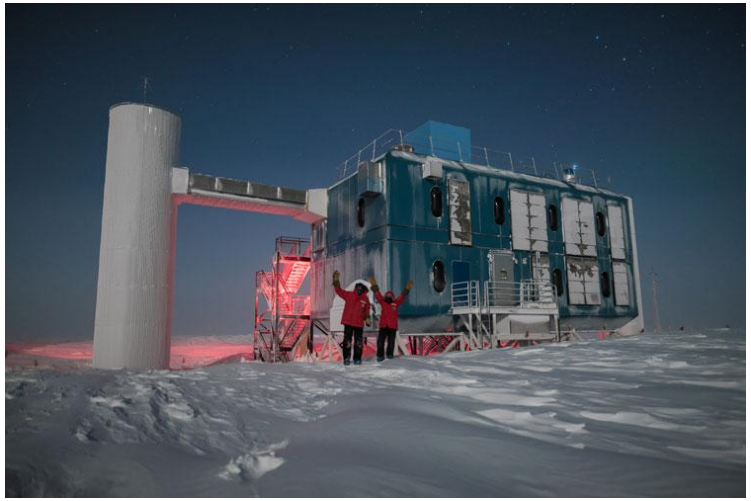
Дата-центры

Facebook Luleå Data Center
(Швеция)

Google Hamina
(Финляндия)



Microsoft Natick
(тихоокеанское побережье США)

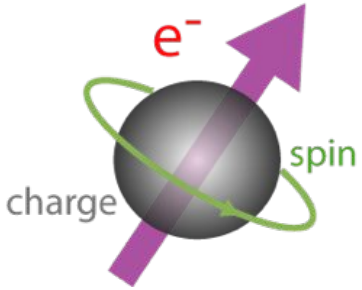


Ice Cube
(полярная станция Амундсена-Скота)

Современная спинтроника

Полупроводники
Вычисление и усиление

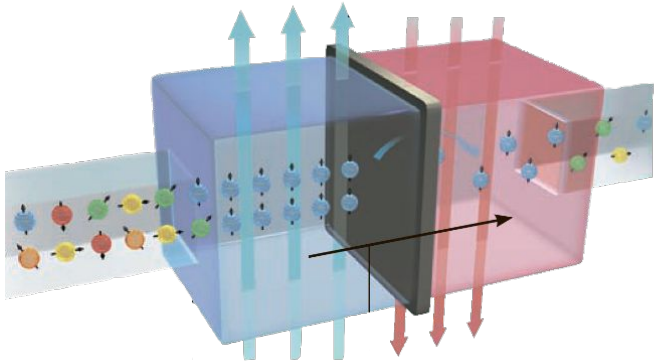
Технологическая база
Электроника

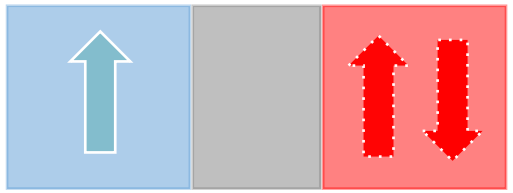


Ферромагнетики
Хранение информации

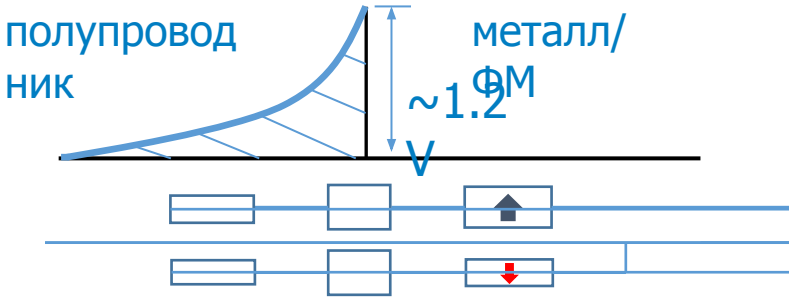
Технологическая база
Магнитная память

"Is it possible to create magnetic semiconductors that work at room temperature?"

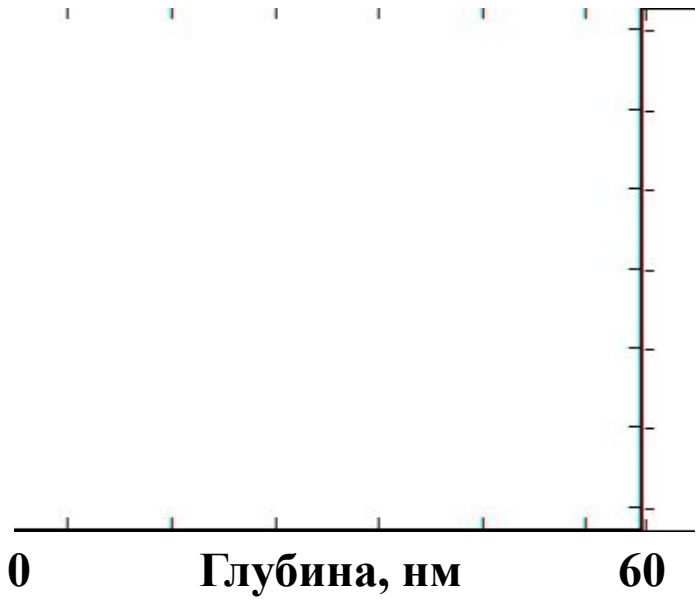




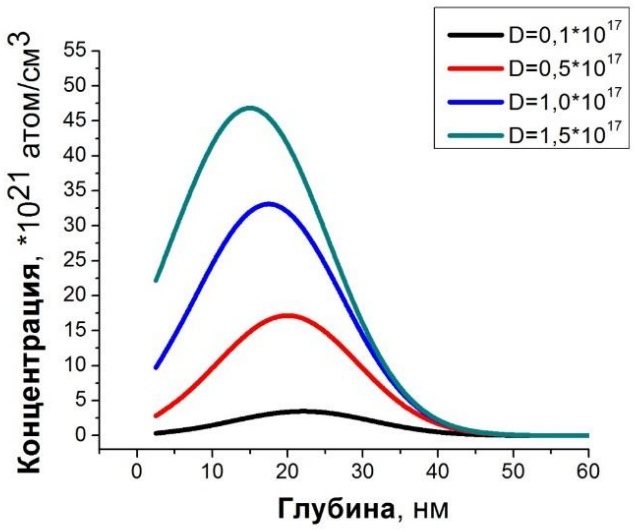
Магнитные полупроводники – материалы, обладающие одновременно полупроводниковыми и ферромагнитными свойствами



Ионная имплантация



Анимация имплантации ионов Fe в TiO_2. Красные линии траектории движения ионов Fe, голубые – выбитые атомы кислорода и зеленые - выбитые атомы титана.



Глубинные профили распределения 40 кэВ ионов Fe в матрице TiO_2 при разных дозах имплантации.

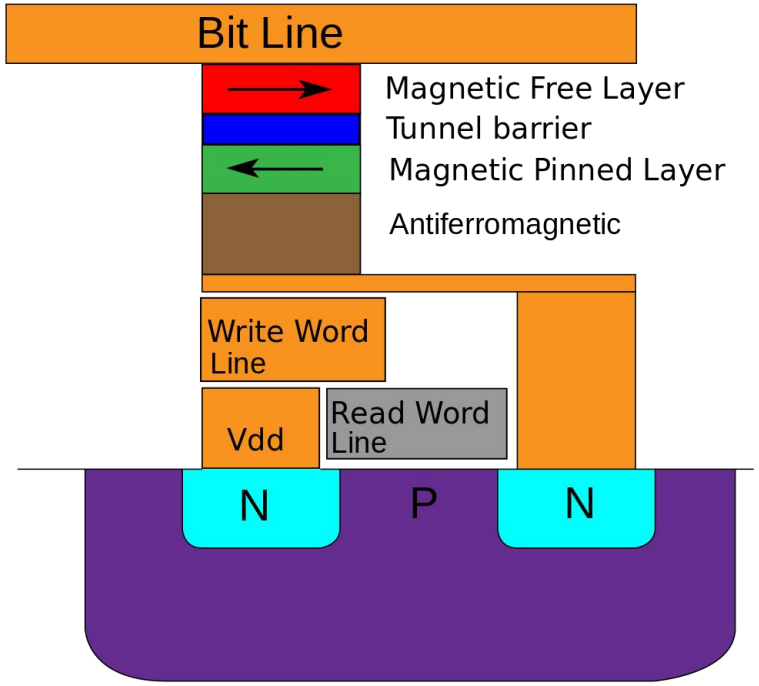
✔ Особо отметим, что ионно-лучевая технология создания магнитных полупроводников идеально приспособлена для интегрирования с современной кремниевой технологией производства основных элементов микроэлектроники.

Магниторезистивная оперативная память

Магниторезистивная оперативная память (MRAM, Magnetoresistive RAM - запоминающее устройство с произвольным доступом, которое хранит информацию при помощи магнитных моментов, а не электрических зарядов.

Важнейшее преимущество этого типа памяти — энергонезависимость, то есть способность сохранять записанную информацию.

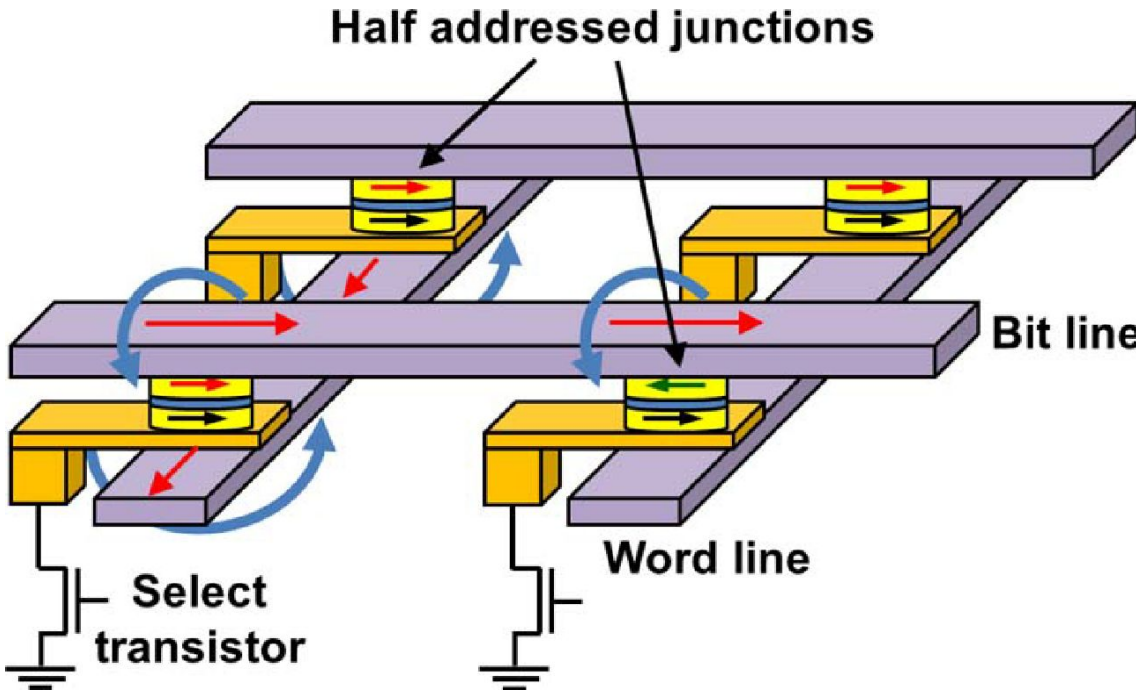
Технологии MRAM основана на эффекте туннельного магнетосопротивления (MTJ).



Магнитные элементы MTJ состоят из 3 слоев: два ферромагнитных слоя (сверху и снизу), разделенных тонким слоем диэлектрика (туннельный барьер).

Сопротивление ячейки изменяется в зависимости от взаимной ориентации намагниченностей в ферромагнитных слоях.

Традиционная технология MRAM



Каждая ячейка лежит между двумя линиями записи, размещёнными под прямым углом друг к другу, одна над, а другая под ячейкой. Когда ток проходит через них, в точке пересечения линий записи наводится магнитное поле, которое воздействует на перезаписываемый слой.

Требует достаточно большого тока, необходимого для создания поля.

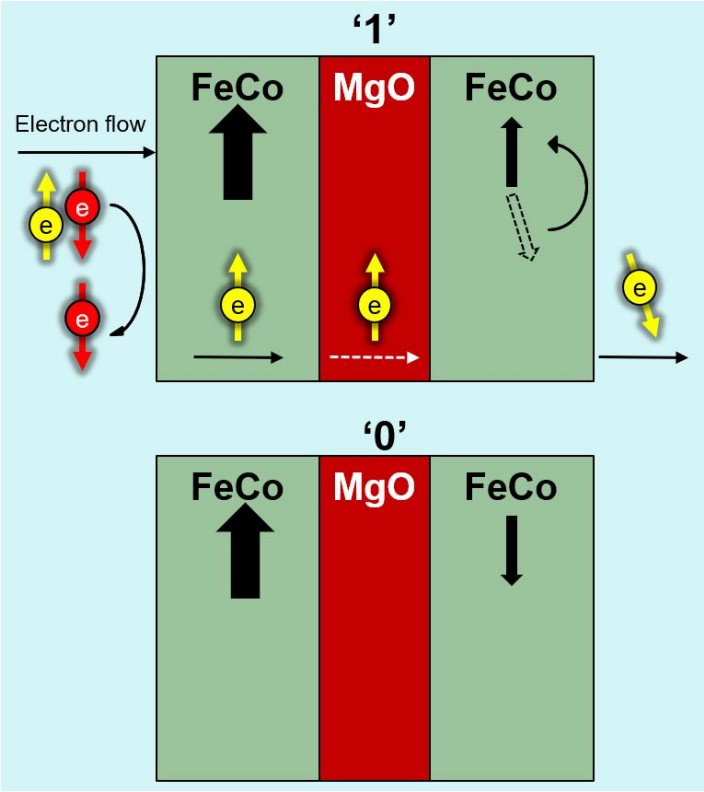
С уменьшением размера микросхем придёт время, когда индуцированное поле перекроет соседние ячейки на маленькой площади, что приведёт к возможным ошибкам записи.

Устройство памяти организовано по принципу сетки, состоящей из отдельных «ячеек», содержащих элемент памяти и транзистор.

MRAM

Magnetic Tunnel Junction (MTJ)

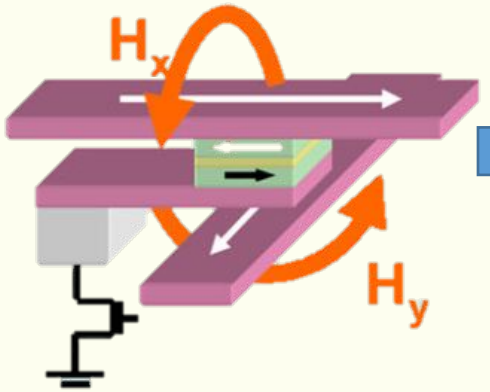
- Два ФМ слоя разделены оксидом;
- Два состояния сопротивления:



- Переключение свободного слоя:
  (i) Магнитное поле → MRAM
  (ii) Спин поляризованный ток→ STT-MRAM

Magnetic Random Access Memory (MRAM)

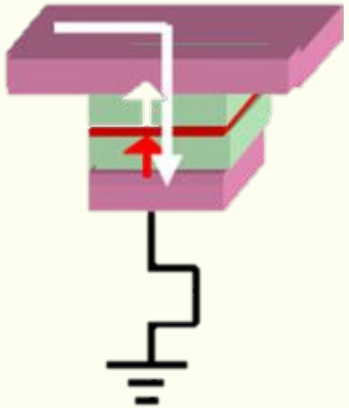
(i) MRAM



(ii) STT-MRAM

Улучшает:
Выбор битов;
Потребляемая мощность;
Масштабируемость;

(ii) STT-MRAM



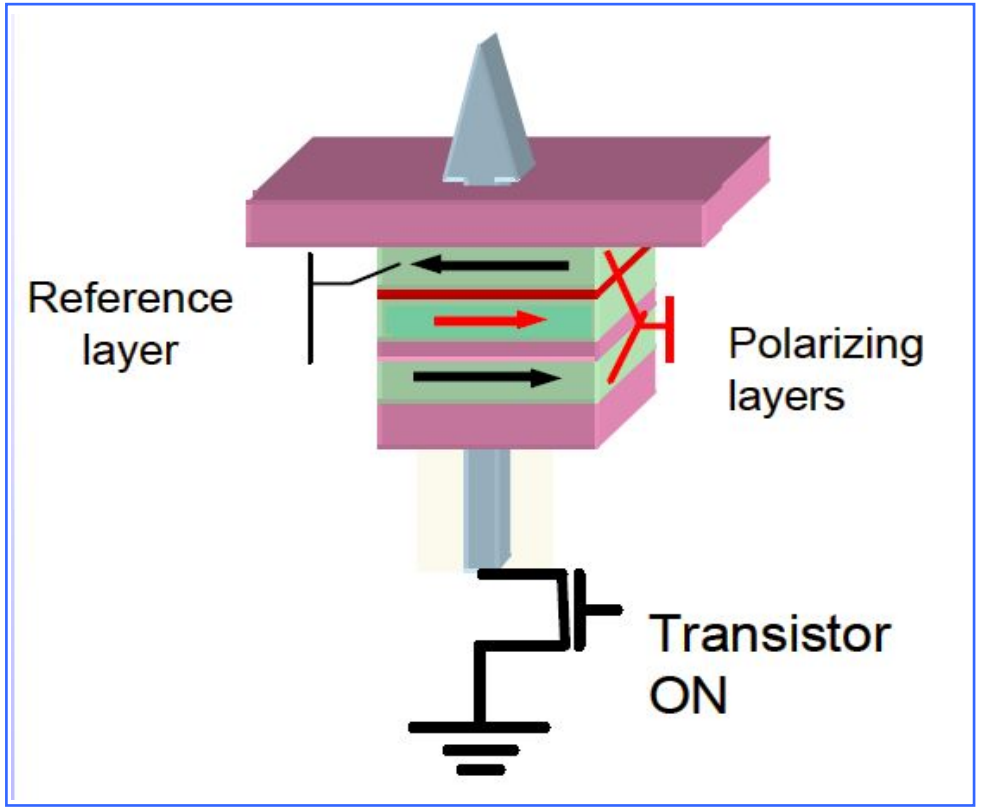
<u>Perpendicular MTJ (pMTJ):</u>

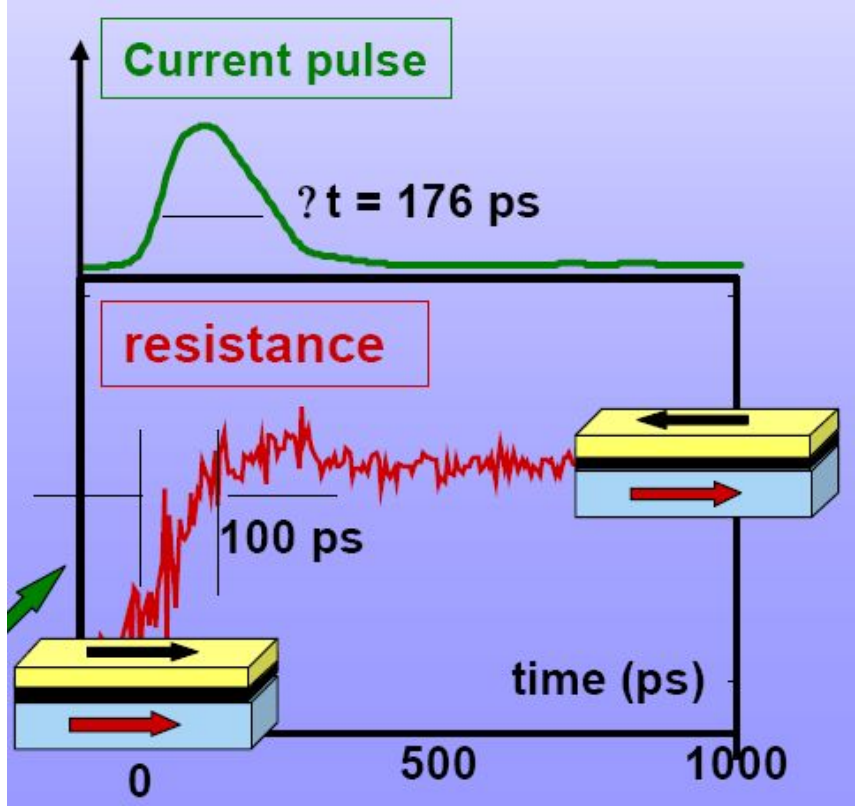
✔ Низкие токи переключения;
✔ Термическая стабильность, независимая от анизотропии формы.

Rev. Mod. Phys. **89**, 2 (2017)

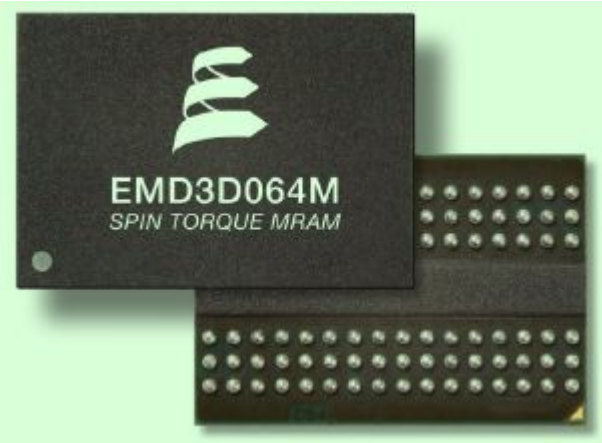
Спин-торк магниторезистивная память STT-MRAM

Технология переноса спинового момента (spin-torque-transfer-STT) или переключения с помощью переноса спина использует электроны с заданным состоянием спина («поляризованные»). Проходя через свободный ферромагнитный слой, их вращающий момент передается намагниченности этого слоя и переориентирует ее.



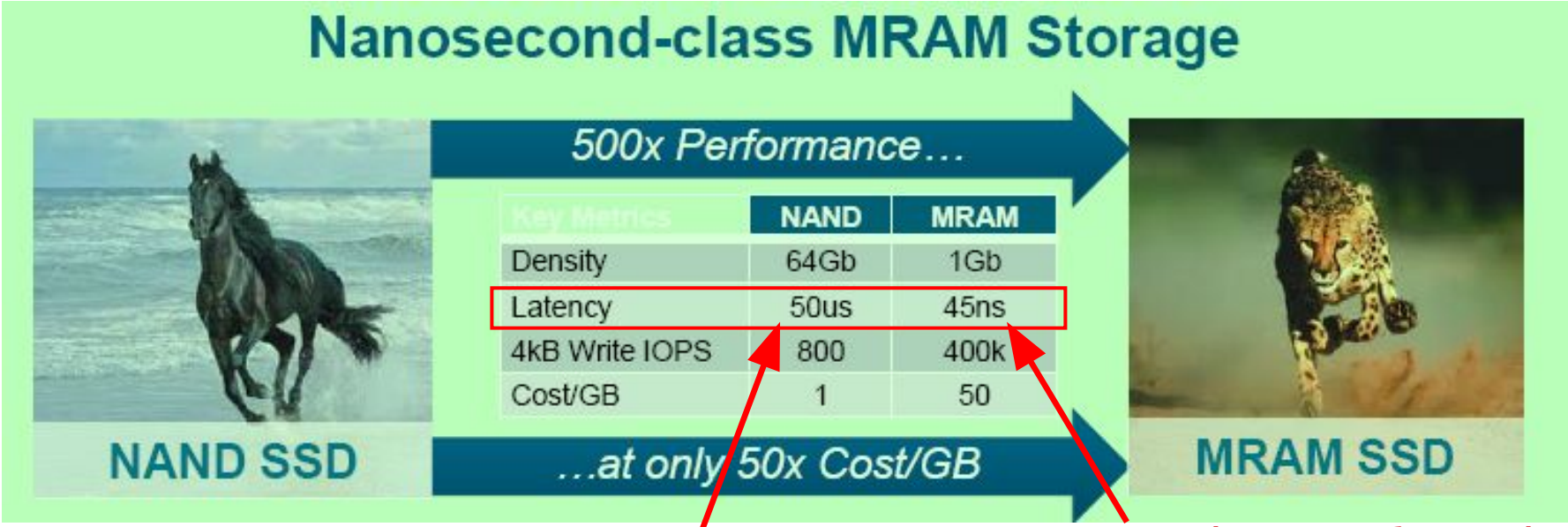


STT-MRAM первое серийное производство



EVERSPIN TECHNOLOGIES
The MRAM Company™

Планка серийного DDR3 формата на STT-MRAM

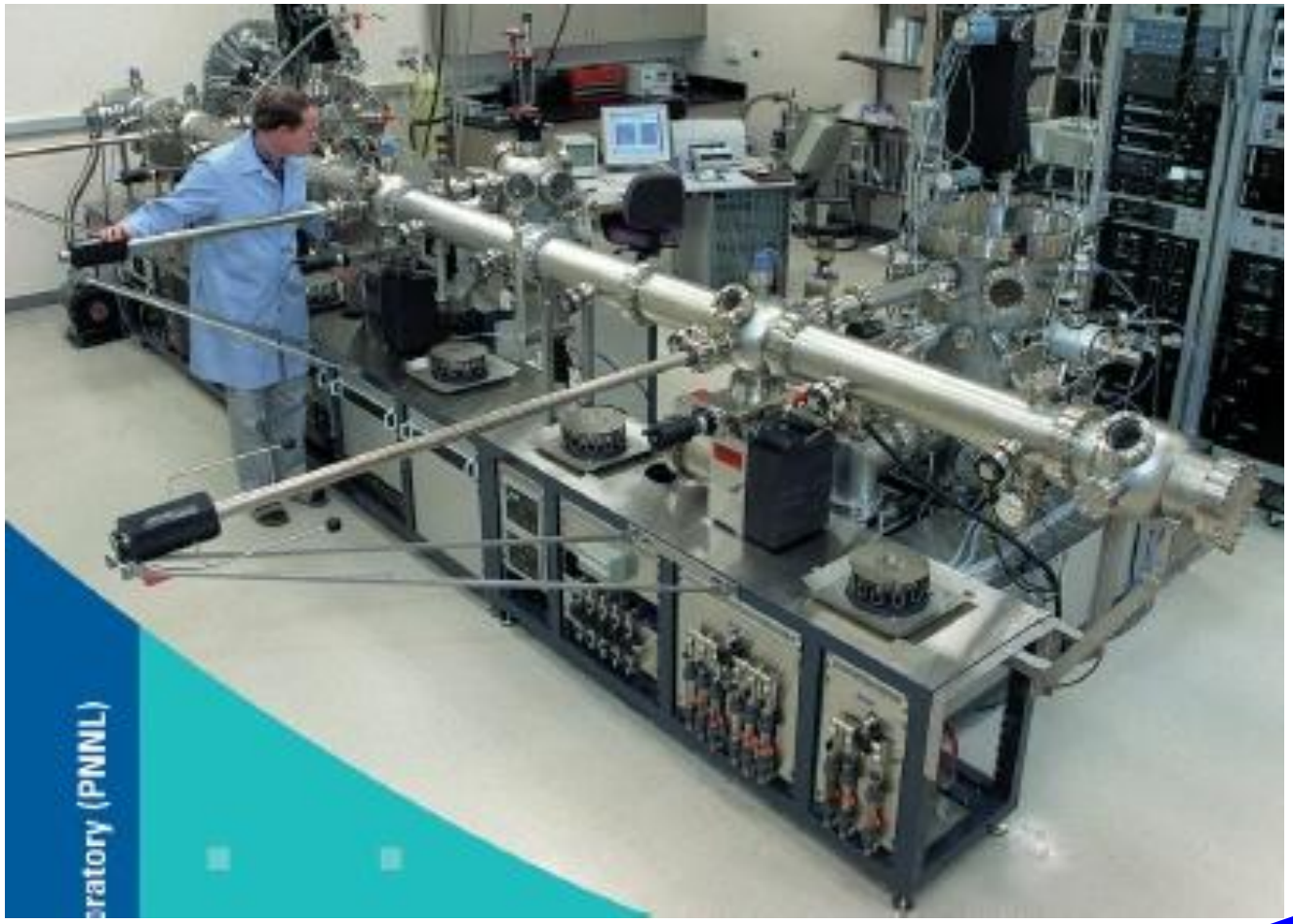


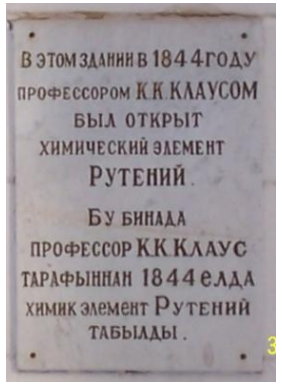
Key Metrics	NAND	MRAM
Density	64Gb	1Gb
Latency	50us	45ns
4kB Write IOPS	800	400k
Cost/GB	1	50

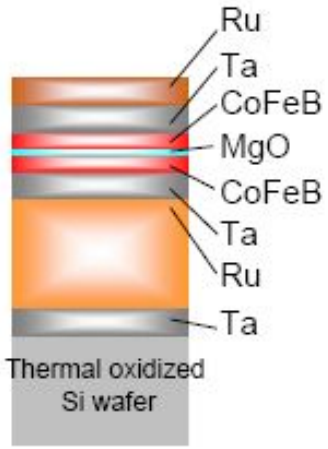
Твердотельная флеш-память

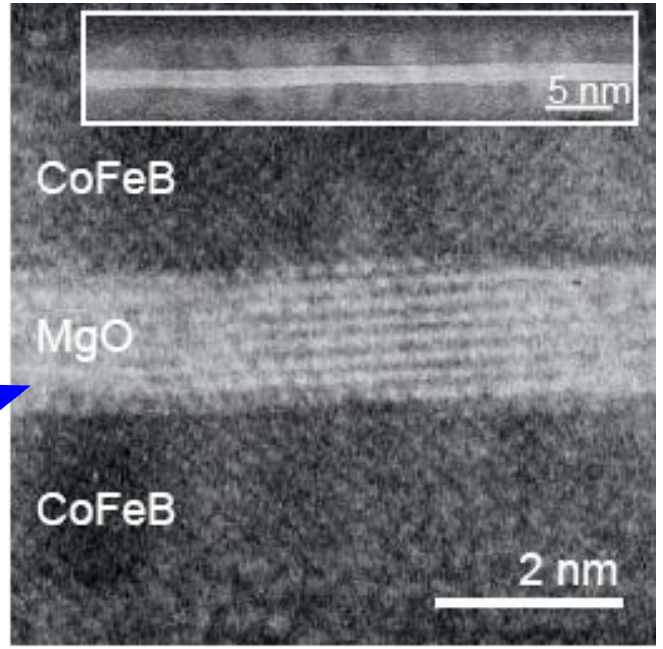
ST-MRAM память (1000 раз быстрее)

Как это делается





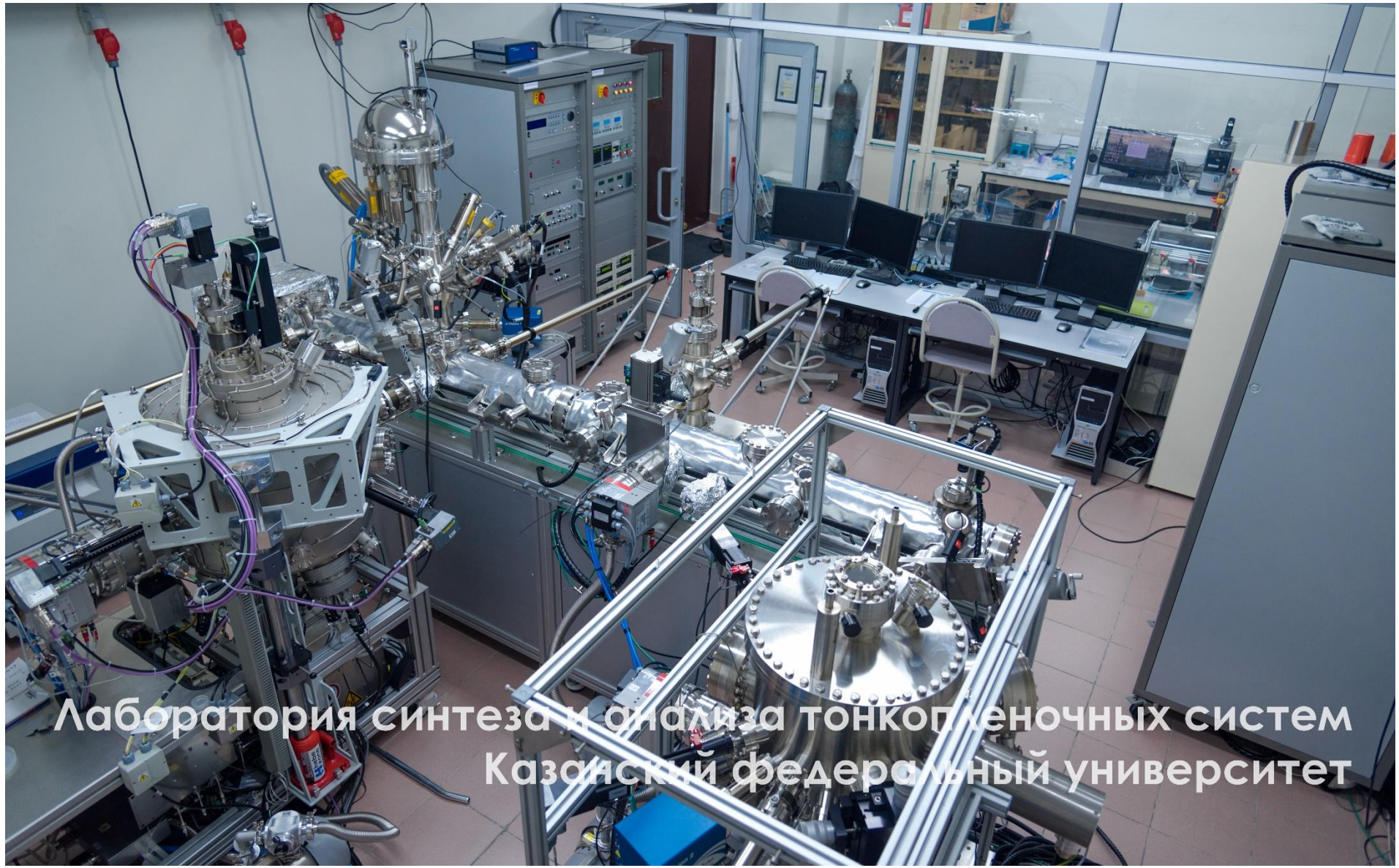




Толщина оксидного барьера – 8 монослоев

При изготовлении используется Рутений (Ru) - химический элемент, открытый в Казанском ИУ

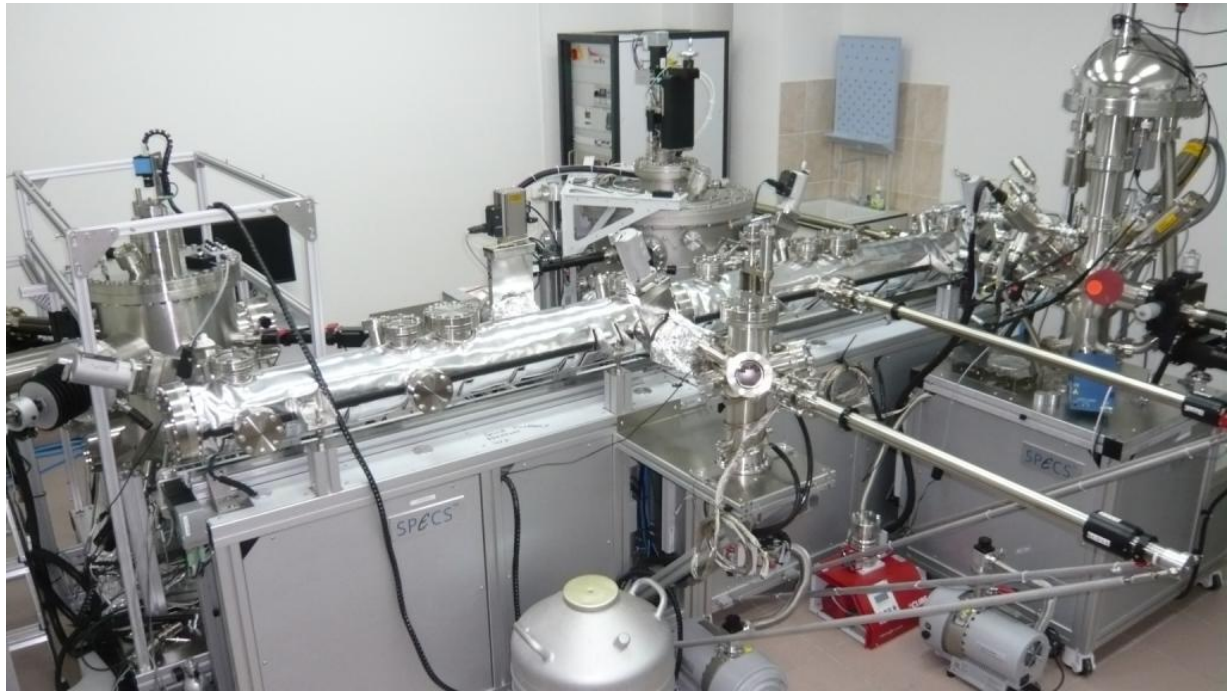
Как это делается в КФУ



Лаборатория Синтеза и Анализа Тонкопленочных Структур

Высоковакуумная установка для напыления ультратонких пленок магнитных и немагнитных металлов, полупроводников, диэлектриков и функциональных гетероструктур на их основе

Общий вид со стойками управления



SATS Lab

Установка была изготовлена по индивидуальному заказу немецкими компаниями SPECS (http://www.specs.com/) и BESTEC (http://www.bestec.de/), Берлин, Германия

Комплектация и основные параметры:

Шлюзовая камера загрузки-выгрузки подложек и образцов
Линия перемещения образцов между камерами
Камера молекулярно-лучевой эпитаксии
Камера магнетронного распыления
Аналитическая камера
Пять стоек управления базовыми компонентами установки
Три многопроцессорных компьютера управления технол. процессами
Две системы охлаждения замкнутого цикла
Шесть откачных систем на основе турбомолекулярных насосов

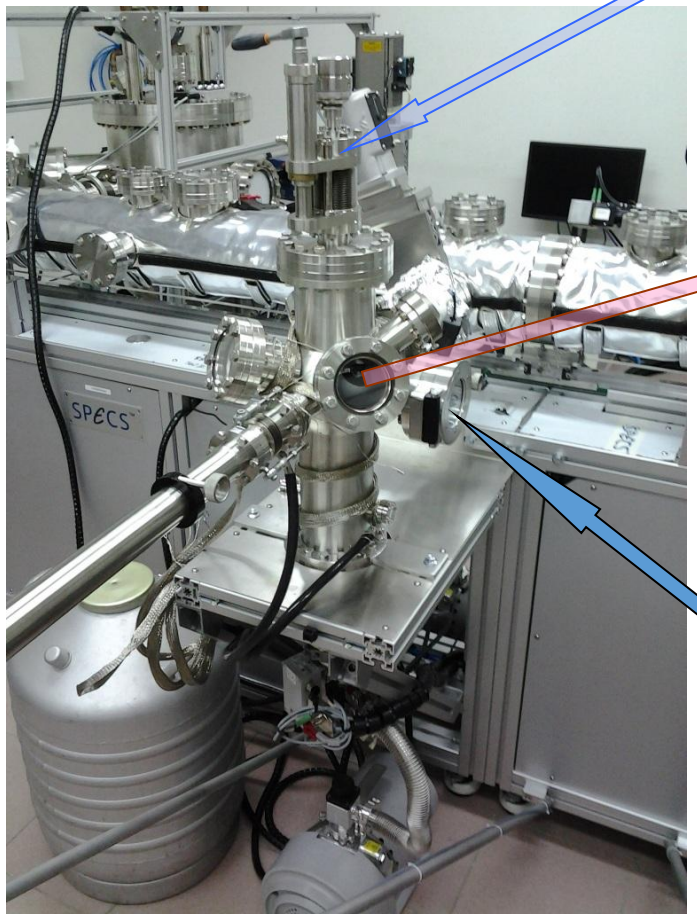
Вакуум:

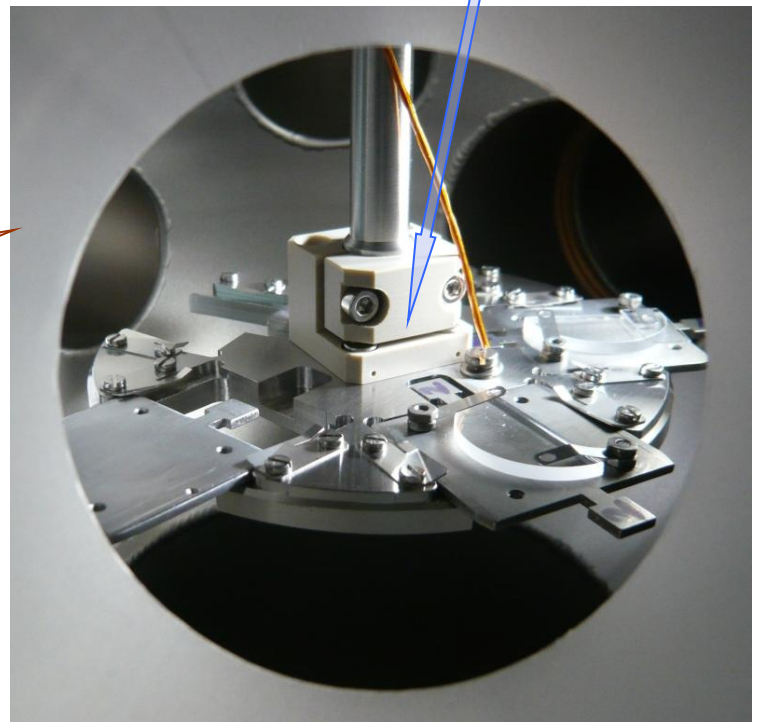
Безмасляный вакуум с давлением не хуже $5*10^{-10}$ мбар (магнетронная камера ~ $5*10^{-9}$ мбар)
1 мбар = 0.001 атмосферного давления

Позволяет синтезировать пленки с контролируемой толщиной от монослоя до микрон

Шлюзовая камера загрузки-выгрузки подложек и образцов

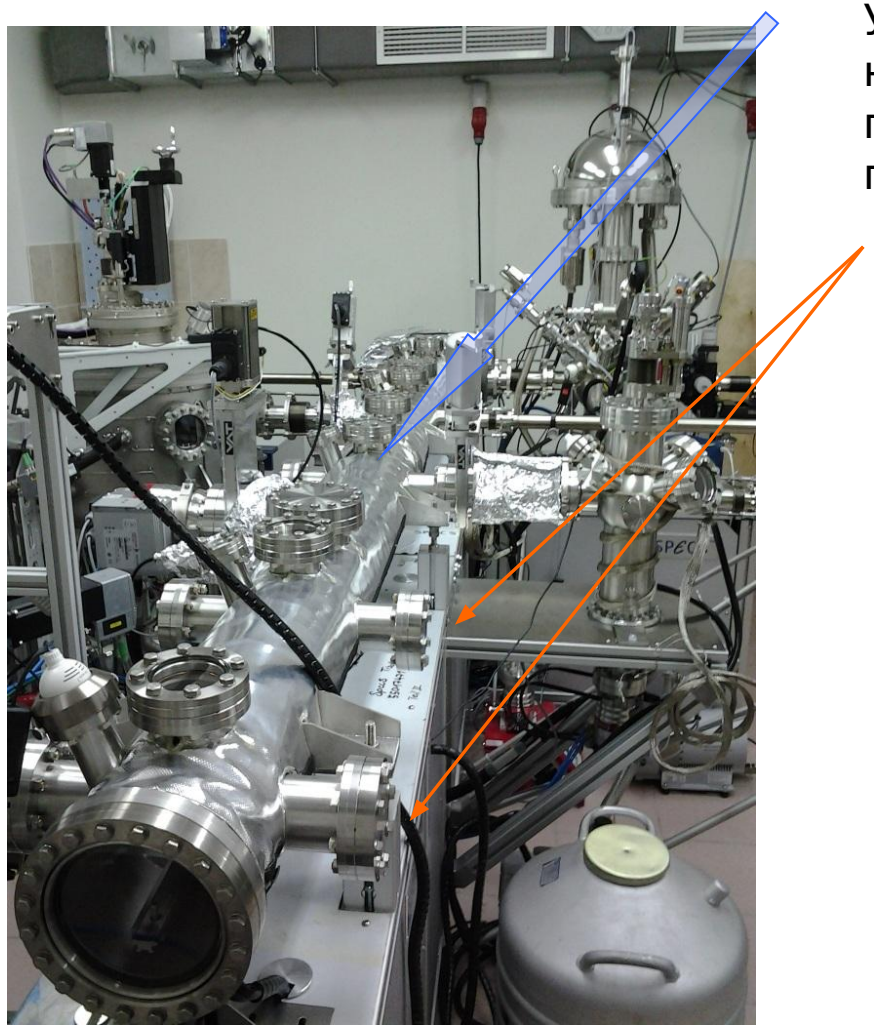
Манипулятор с карусельным держателем на 5 подложек



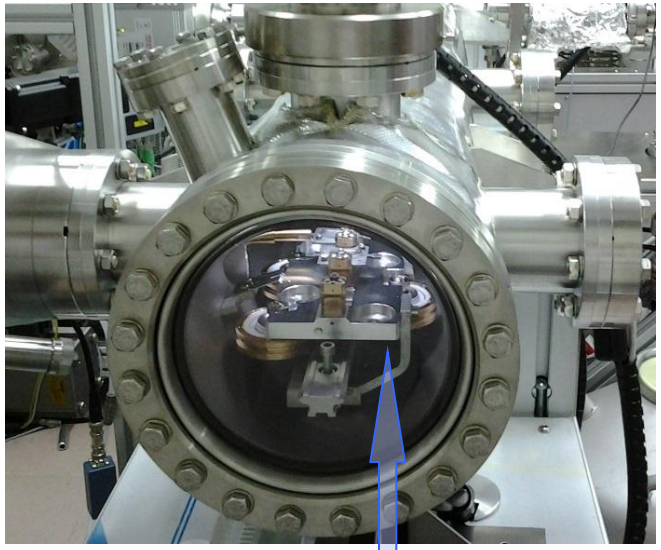


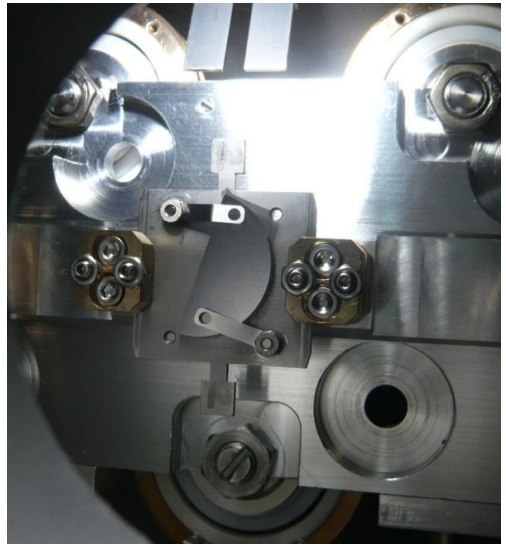
Дверка, открывающаяся после заполнения камеры сухим азотом или аргоном

Линия перемещения образцов между камерами



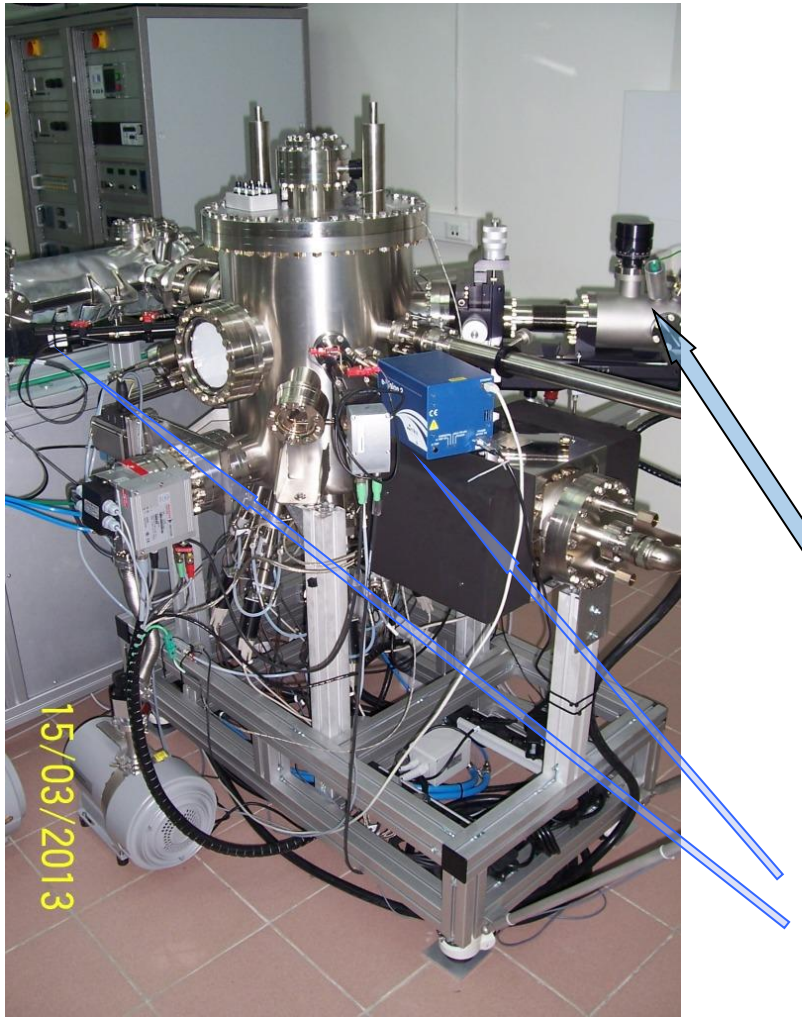
Установка построена по принципу открытой архитектуры, позволяет наращивание в обе стороны сегментами линии переноса образцов по 1.5 метра. В данной конфигурации имеет 2 свободных порта (на переднем плане) для присоединения еще одной вакуумной камеры.





Перемещение образцов осуществляется кареткой с 3-мя гнездами для образцов и бесконтактным приводом

Камера молекулярно-лучевой эпитаксии



Источники: предусмотрены фланцы для 8 испарителей, установлено 7: 2 электронно-лучевых, 3 высокотемпературных, 1 для средних температур и 1 для легкоплавких металлов, с охлаждаемым устьем.

Ионная пушка с широким пучком для очистки и травления поверхности подложек и образцов.

RHEED (Reflection High-Energy Electron Diffraction) дифракция электронов высокой энергии в геометрии отражения и
LEED (Low Energy Electron Diffraction) дифракция низкоэнергетичных электронов для помонослойного контроля роста ультратонких пленок и определения качества их кристалличности и эпитаксиальности.

Манипулятор с 6 степенями свободы для позиционирования и вращений подложки

Две скрещенные заслонки, управляемые шаговыми двигателями, для получения пленок переменной толщины или переменного легирования в 2-х направлениях

Управление камерой МЛЭ

Левая стойка (сверху вниз):

- контроль питания стойки;
- управление режимами электронно-лучевых испарителей (две одинаковые секции ниже секции питания);
- ручное управление заслонками испарителей (в середине);
- управление температурой эффузионных ячеек (пять секций ниже);
- контроллер питания сервоприводов заслонок.

Правая стойка (сверху вниз):

- Контроль питания стойки;
- Управление турбомолекулярной системой откачки камеры и контроль давления в ней;
- Управление и индикация кварцевого измерителя скорости осаждения и толщины пленки;
- Управление и контроль температуры подложки во время роста пленки;
- Управление режимами ионной пушки (очистка и травление поверхности подложки и пленок);
- Управление узлом дифракции медленных электронов;
- Управление узлом дифракции высокоэнергетичных электронов в режиме отражения;
- Управление и контроль ионно-сублимационного вакуумного насоса;
- Управление и контроль отжига камеры молекулярно-лучевой эпитаксии.

Камера магнетронного распыления

Магнетроны:
предусмотрены фланцы для **9** магнетронов, установлено **6**:
3 для немагнитных материалов и 3 для ферромагнитных материалов.
Источники питания:
2 постоянного тока, 2 переменного тока и 1 импульсный постоянного тока с 5-ю коммутируемыми электронным способом выходами.

Три натекателя: плазмообразующий газ – аргон, два реактивных газа, например, азот и кислород

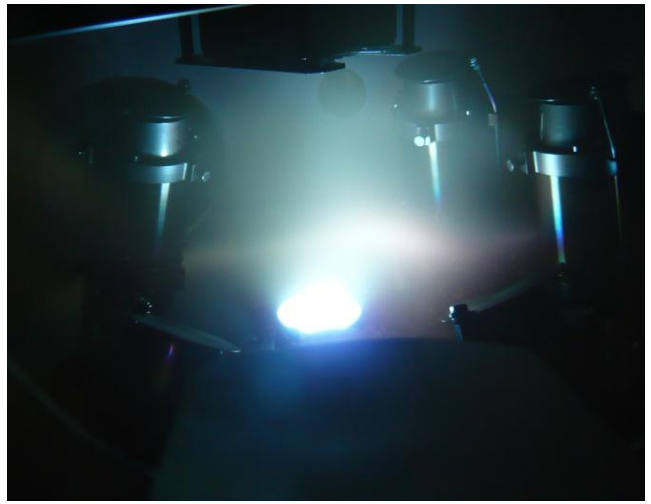
Манипулятор с 2 степенями свободы для позиционирования и вращений подложки

Две скрещенные заслонки, управляемые шаговыми двигателями, для получения пленок переменной толщины или переменного легирования в 2-х направлениях

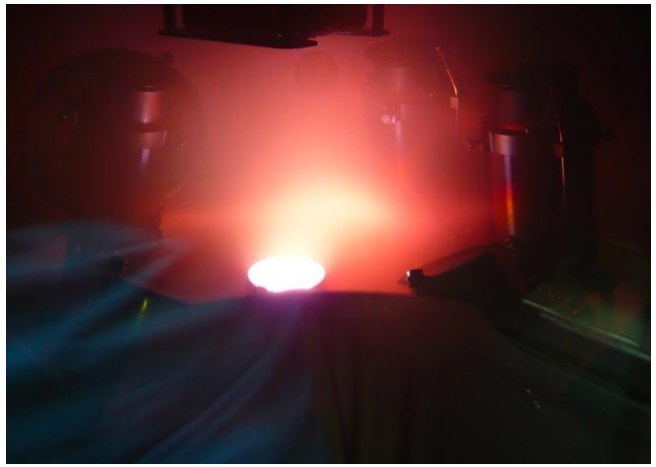
Кварцевый контроль толщины напыляемых пленок

Автоматизированный контроль температуры подложки

Камера магнетронного распыления



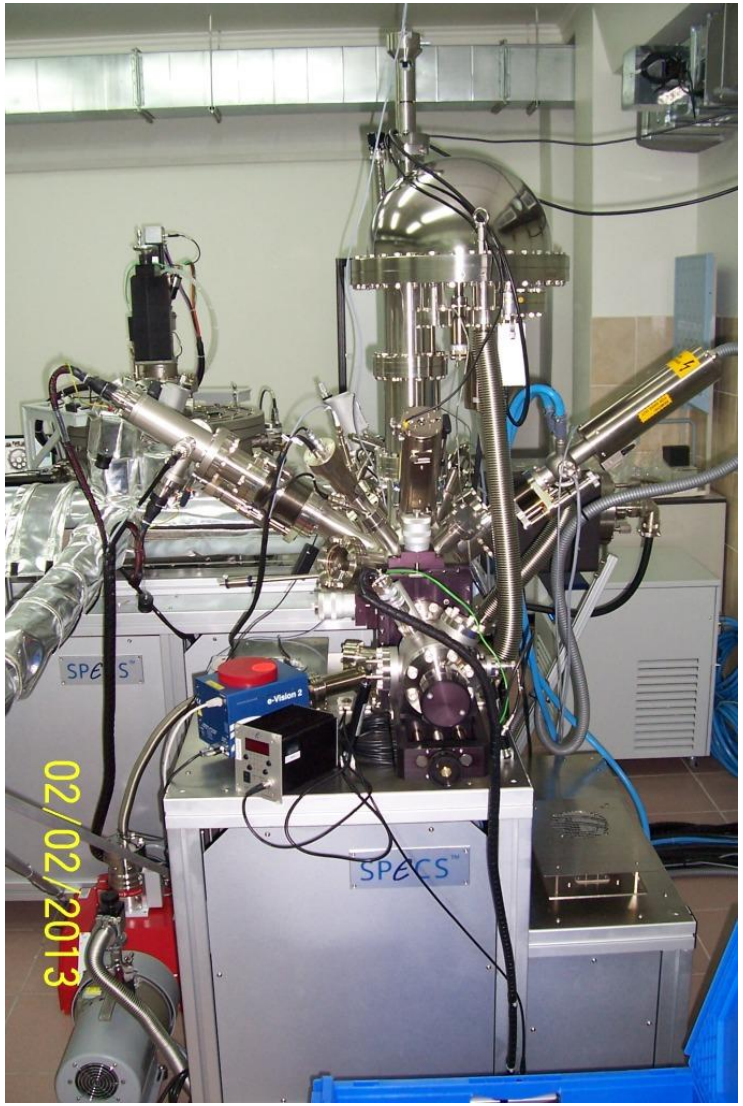
Ar



Ar+N_2

Угол наклона магнетронов регулируемый: от конфокального положения до соосного индивидуально для каждого.

Аналитическая камера



Аналитическая камера - прежде всего, часть технологического процесса. Позволяет анализировать и образцы, загруженные снаружи через шлюзовую камеру.

В аналитической камере реализованы следующие методы исследования поверхностей и тонких пленок:

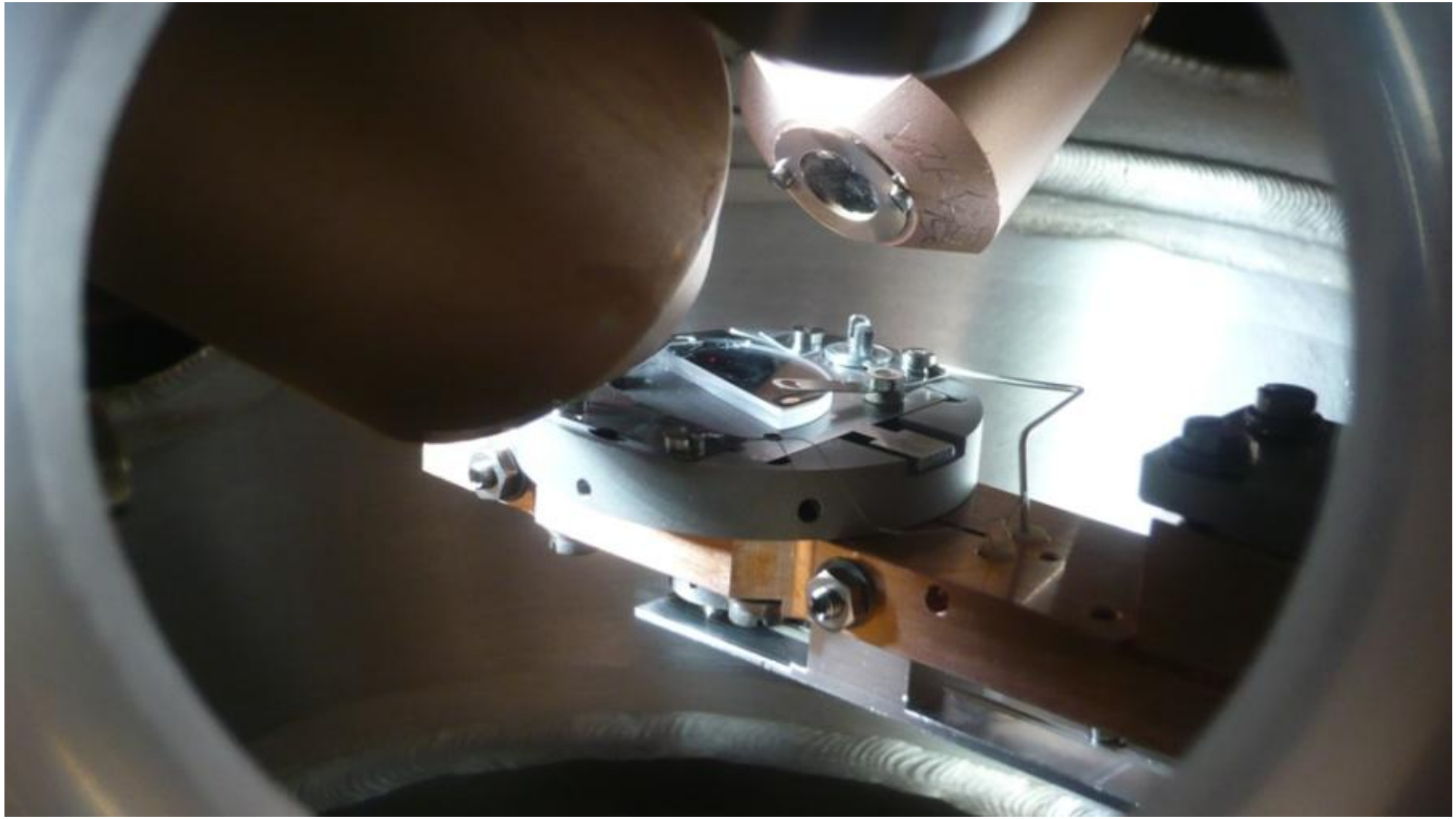
- Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XPS);
- Оже-спектроскопия (Auger);
- Масс-спектроскопия вторичных ионов (SIMS);

А также методики технологической подготовки и обработки образцов:

- Травление ионным пучком локально и сканированием площадки 5x5 мм^2 с варьируемой энергией ионов аргона;
- Очистка поверхности подложки или образца ионным пучком ионов аргона с варьируемой энергией;
- Отжиг подложек и образцов в вакууме.

Позволяет определять элементный состав с чувствительностью 0.1% с различных глубин, позволяет делать глубинное профилирование гетероструктур.

Аналитическая камера



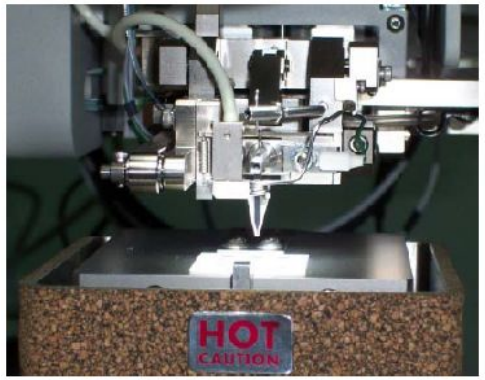
Инфраструктура высоковакуумной установки

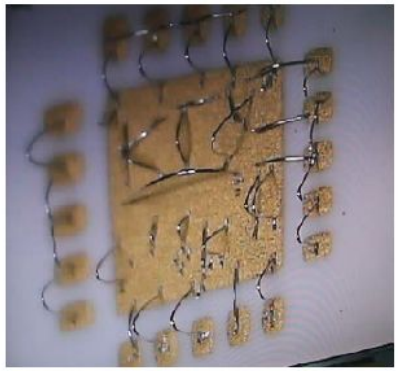
Автоматизированная дисковая алмазная пила (США)

Пила автоматизирована по 3-м осям (x,y,z), мин. шаг перемещения –2.5 мкм, точность позиционирования – 10мкм. Запоминает до 30 программ резки и насечки. Снабжена всеми аксессуарами, включая вакуумный столик –присоску для насечки полупроводниковых дисков на чипы (dicing). Циркуляционный насос охл. Жидкости и мембранный вакуумный насос для столика –присоски показаны на фото справа. Диски из спеченного алмаза толщиной 100-300 мкм способны разрезать любой материал подложек.

Инфраструктура высоковакуумной установки

Ультразвуковая микроразварка контактов (США)

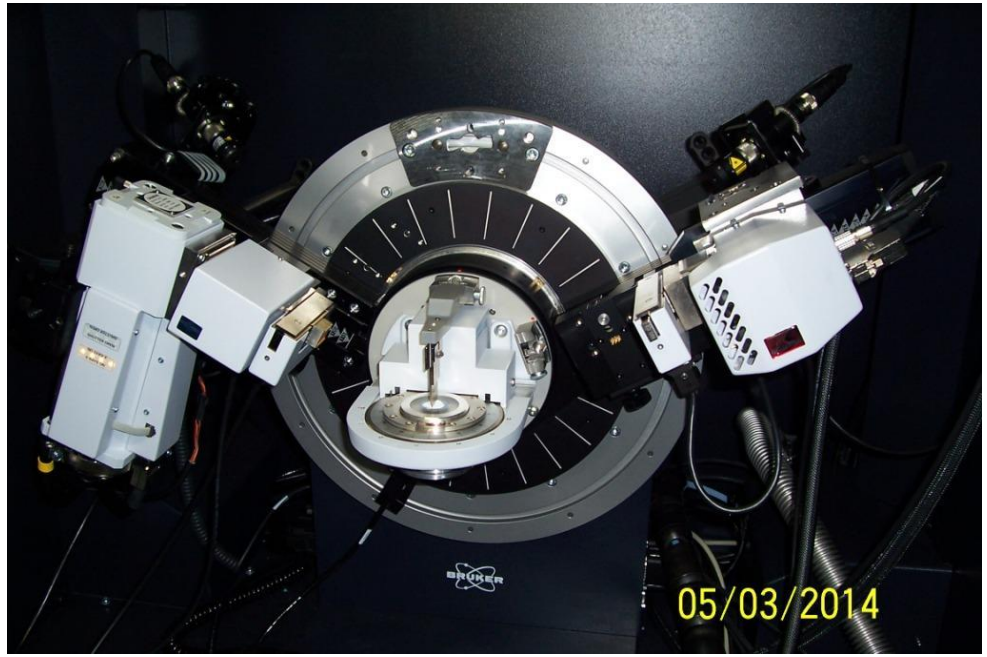




Аппарат ультразвуковой микросварки контактов, универсальный: две точки, соединяемые проволокой, могут быть клин-клин, клин-шар, шар-клин, шар-шар. Имеются инструменты для сварки алюминиевой проволокой толщиной 25 мкм и 38 мкм, золотой проволокой толщиной 25 мкм, а также алюминиевая и золотая проволоки этих толщин. Примеры разварки контактов на тестовом шаблоне и реальном чипе на кремниевой подложке показаны справа. Разварка осуществлена алюминиевой проволокой толщиной 38мкм (~толщина волоса).

Оборудование других подразделений

Рентгеновский дифрактометр с возможностью малоугловых измерений тонких пленок (НИЛ ФСКС) (BRUKER Advance D8, Германия, специальной комплектации)



Рентгеновский дифрактометр, адаптированный для работы с порошками и поликристаллами, крупными монокристаллами (ориентирование подложек) и тонкими однослойными и многослойными пленками.
Оснащен проточным криостатом для работы при низких температурах (до 80К) и печью, для работы при высоких температурах (до 1000К).

Оборудование других подразделений

Установка для измерений физических свойств в широком диапазоне температур и магнитных полей (Quantum Design PPMS-9, США)

диапазон магнитных полей – ±9 Тесла;
диапазон температур – 1.8-1300 К;

Назначение комплекса:

- исследования магнитных свойств материалов (магнитная восприимчивость, намагниченность),
- измерение удельной теплоемкости,
- исследования теплопроводящих свойств,
- исследования свойств переноса заряда (удельное сопротивление, эффект Холла, критический ток).

Спасибо за внимание!