

Теоретические и экспериментальные исследования перспективного квантового регистра в канале нанотранзистора с fin-каналом

В.Ф. Лукичев, К.В. Руденко, В.В. Вьюрков

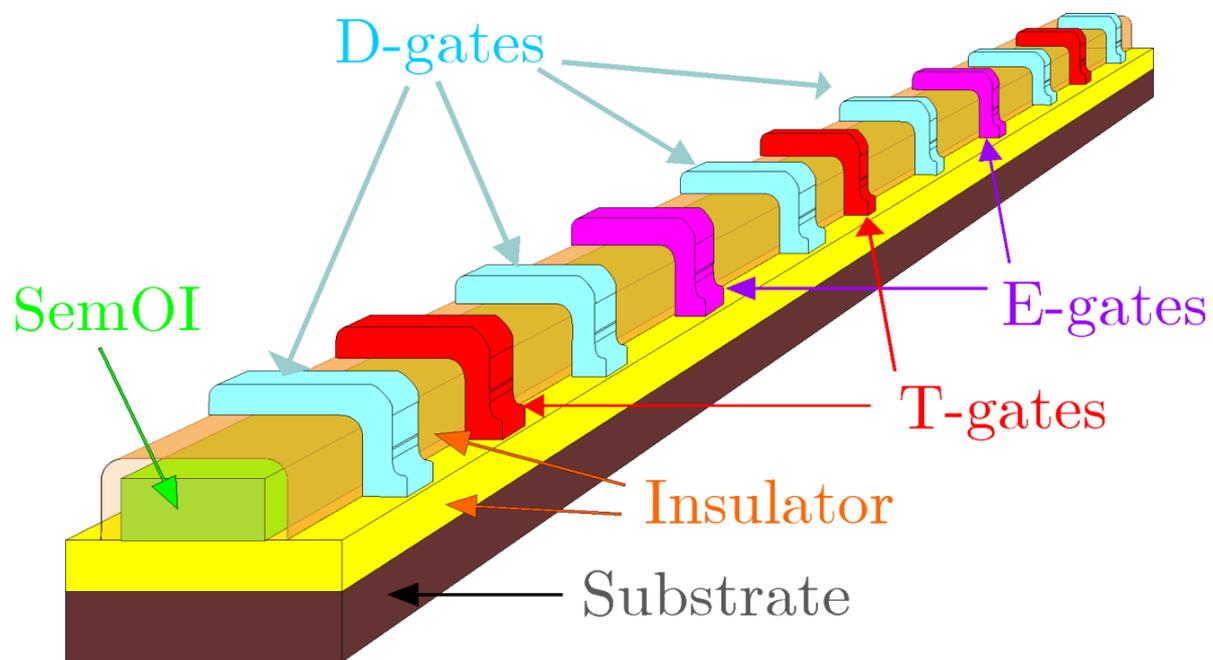


Физико-технологический институт РАН

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- **Конечная цель** – универсальный полномасштабный квантовый компьютер.
- **Промежуточные цели** – квантовые симуляторы:
 - поиск глобального минимума с помощью квантового отжига (quantum annealing аналогично DWaveSys);
 - квантовые блуждания фотоэлектрона в молекуле хлорофилла и др.

Предложенный масштабируемый квантовый регистр

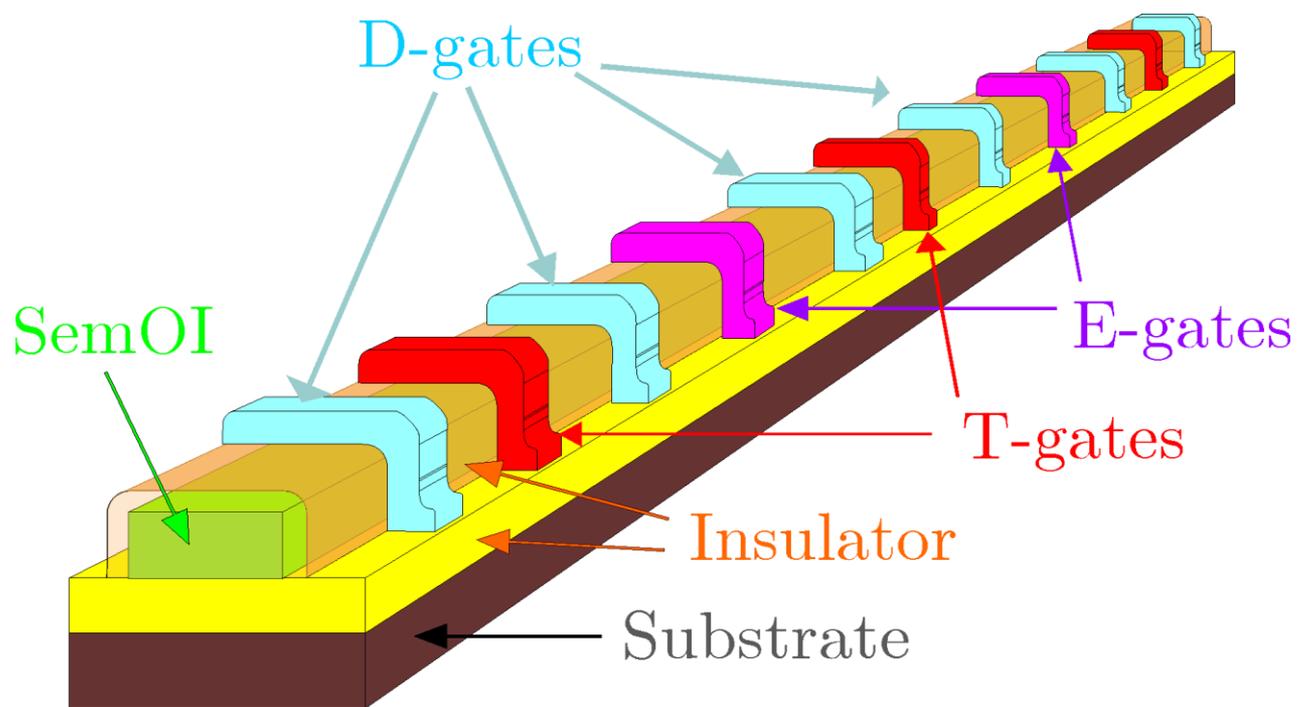


Квантовый регистр является многозатворным полевым транзистором и может быть изготовлен на технологическом оборудовании ФТИАН. Количество кубитов в цепочке может быть увеличено.

Предыстория

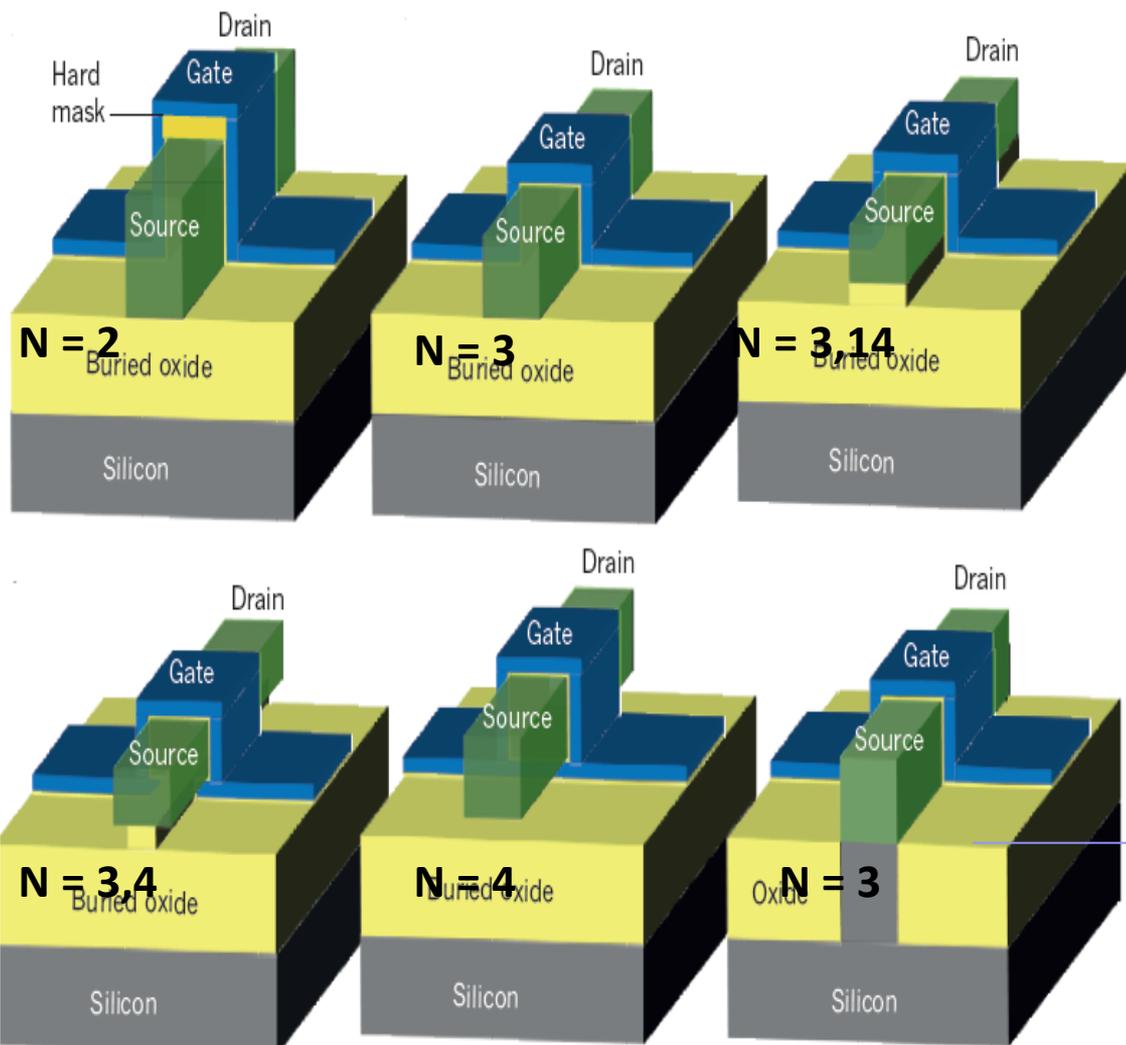
- **Квантовый компьютер на основе двойных квантовых точках**
- . *Fedichkin, M. Yanchenko, K.A. Valiev, Nanotechnology 11, 387 (2000) 141, 146 39.*
- **Квантовый компьютер без перемещения заряда (борьба с декогерентизацией)**
- *V. Vyurkov, S. Filippov, L. Gorelik. Quantum computing based on space states without charge transfer. Physics Letters A 374, 3285–3291 (2010)*
- **Измерение состояния квантового регистра в канале транзистора в режиме кулоновской блокады тока**
- *M. Rudenko, V. Vyurkov, S. Filippov, A. Orlikovsky. Quantum register in a field-effect transistor channel. Int. Conf. “Micro- and nanoelectronics – 2014”, Moscow, Russia, October 6-10, 2014, Book of Abstracts, p. q1-05*

Конструкция «квантового регистра в канале транзистора», предложенная во ФТИАН

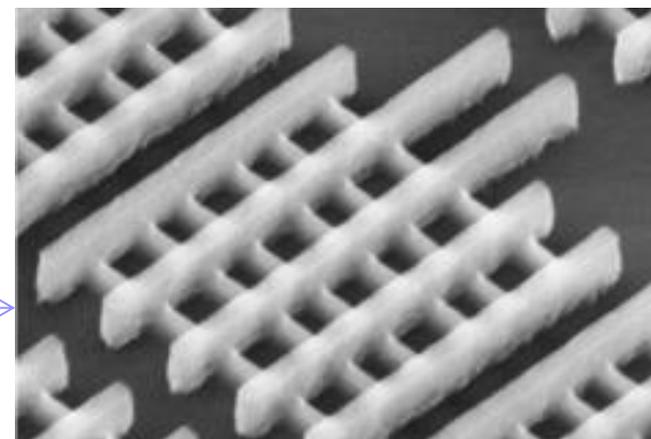


Регистр напоминает многозатворный полевой транзистор и может быть изготовлен на технологическом оборудовании ФТИАН

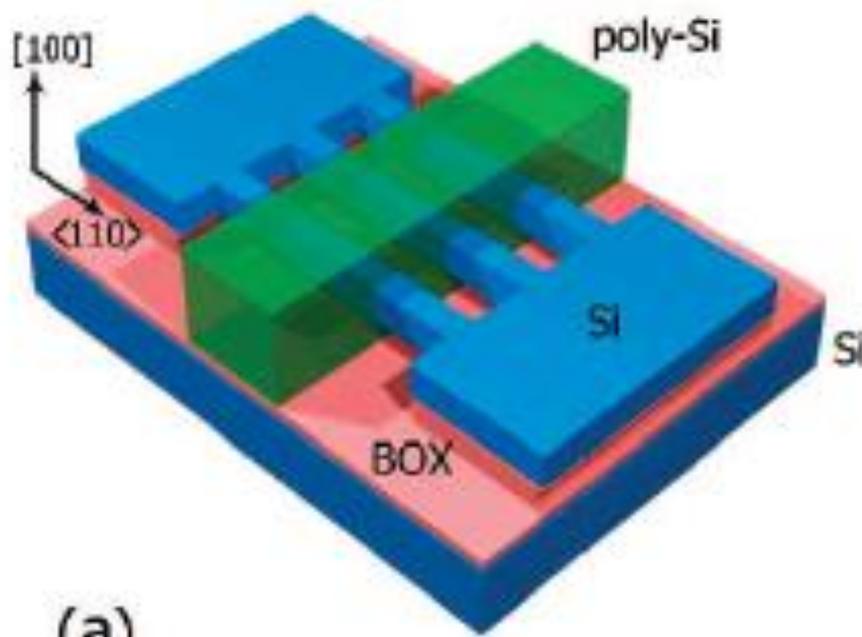
Для сравнения: перспективные конструкции транзисторов для УБИС



Intel Corp.



*Многоканальный транзистор –
прообраз ансамблевого квантового
регистра, предложенного во ФТИАН*



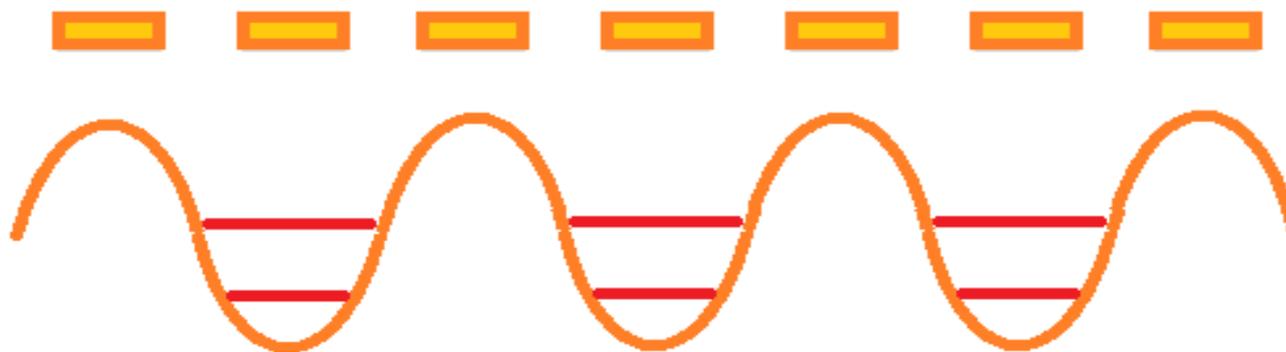
Почему кремний?

- Кремниевая технология позволяет формировать наиболее совершенные структуры.
- Граница Si/SiO₂ обладает рекордно низкой концентрацией дефектов.
- Значительно подавлены процессы перезарядки ловушек (1/f шум).

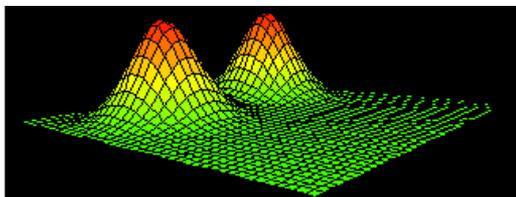
Конструкция кубита из двух двойных квантовых точек

- В каждой из точек постоянно находится половина электрона. Таким образом, прямое кулоновское взаимодействие является неизменным и может быть скомпенсировано.
- Состояние кубита описывается двумя фазами, энергия любых состояний кубита одинакова.
- Реализуется идея **вычислений в основном состоянии**, что подавляет процессы декогерентизации.

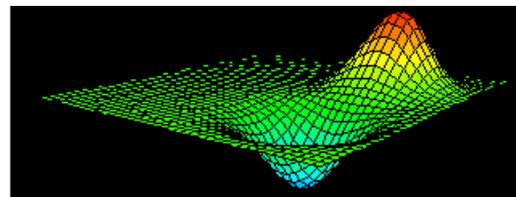
Вычисления производятся на состояниях электронов в квантовых точках в канале транзистора



Потенциальный рельеф в канале, управляемый затворами
Базисные состояния двойных квантовых точек (DQD)



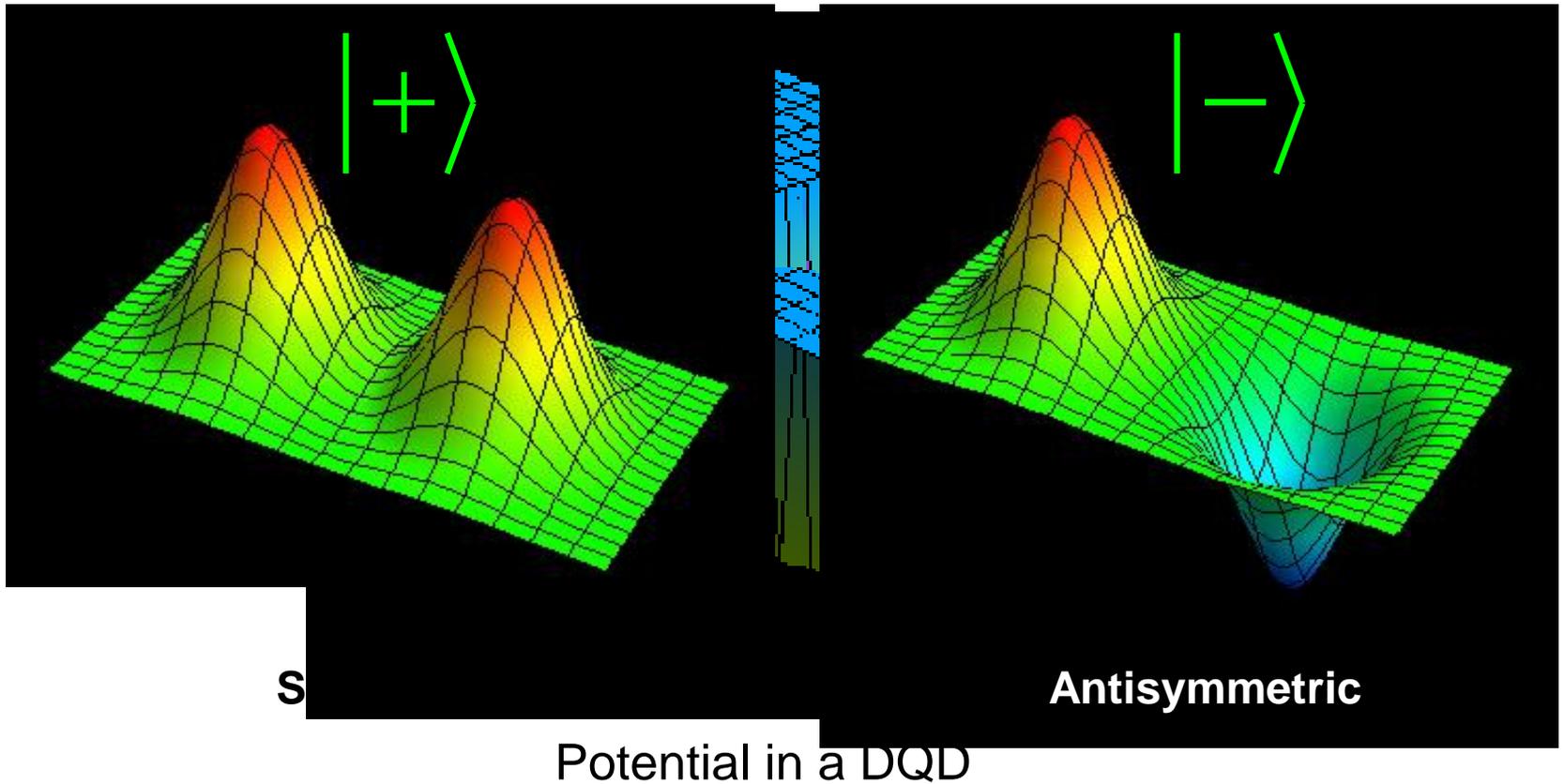
Симметричное состояние



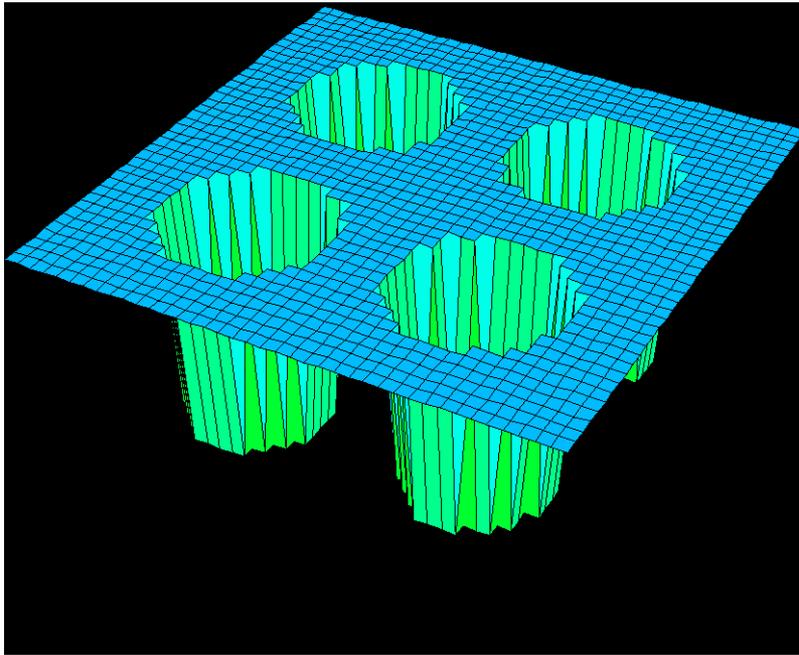
Антисимметричное состояние

Basic states in a DQD

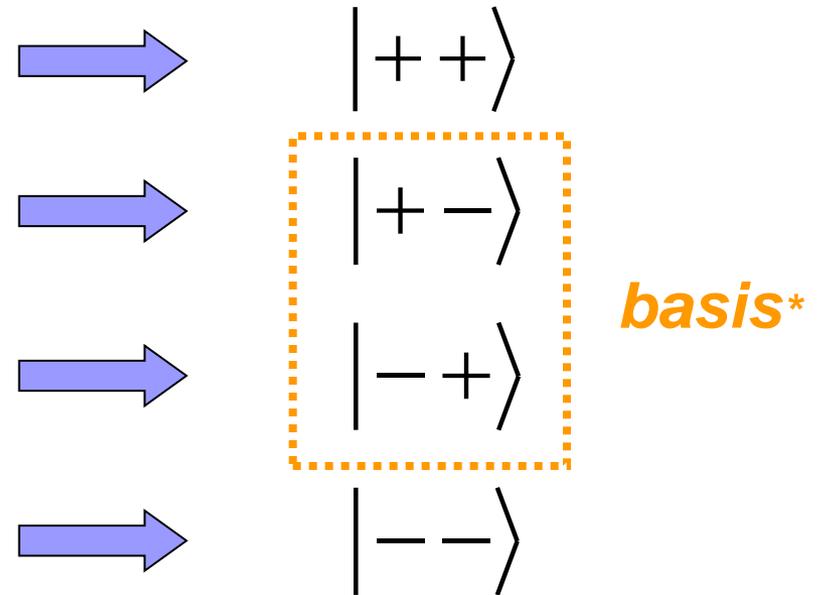
Electron wave-function in a DQD



Basic states of two DQDs (without charge transfer !)



Potential in two DQDs



Wave-function of two electrons in two DQDs

Basic states of a qubit

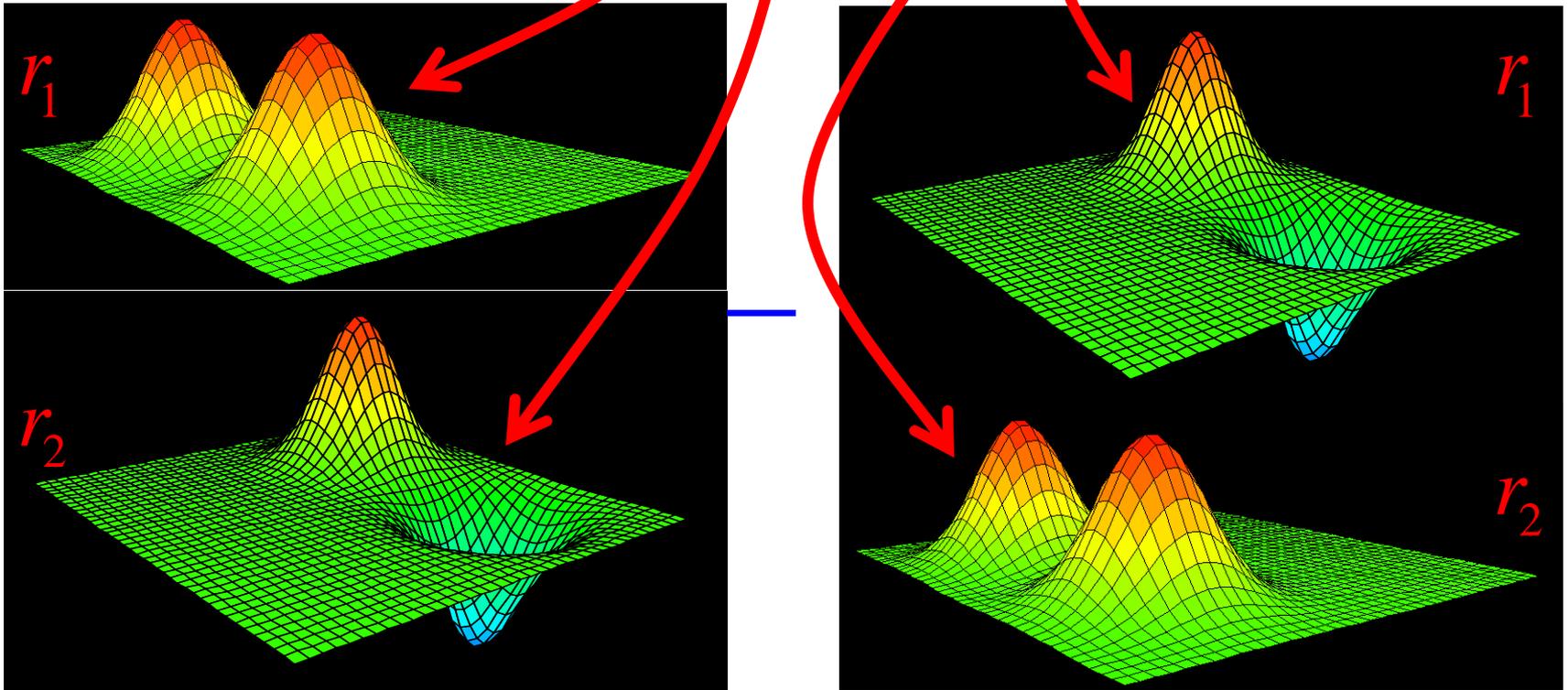
Spin-polarized electrons:

$$|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|+1 -2\rangle - |+2 -1\rangle)$$

$$|1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|-1 +2\rangle - |-2 +1\rangle)$$

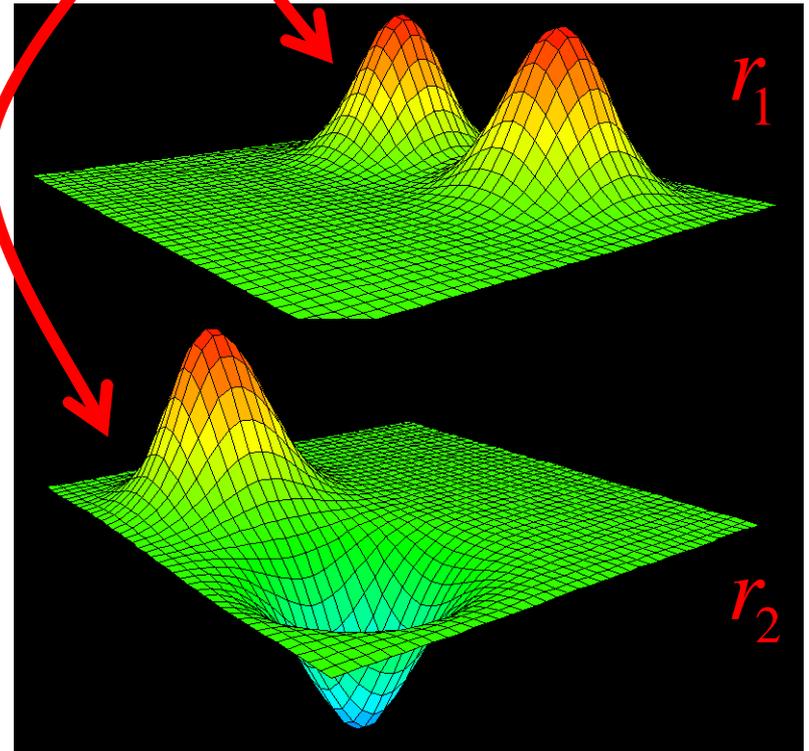
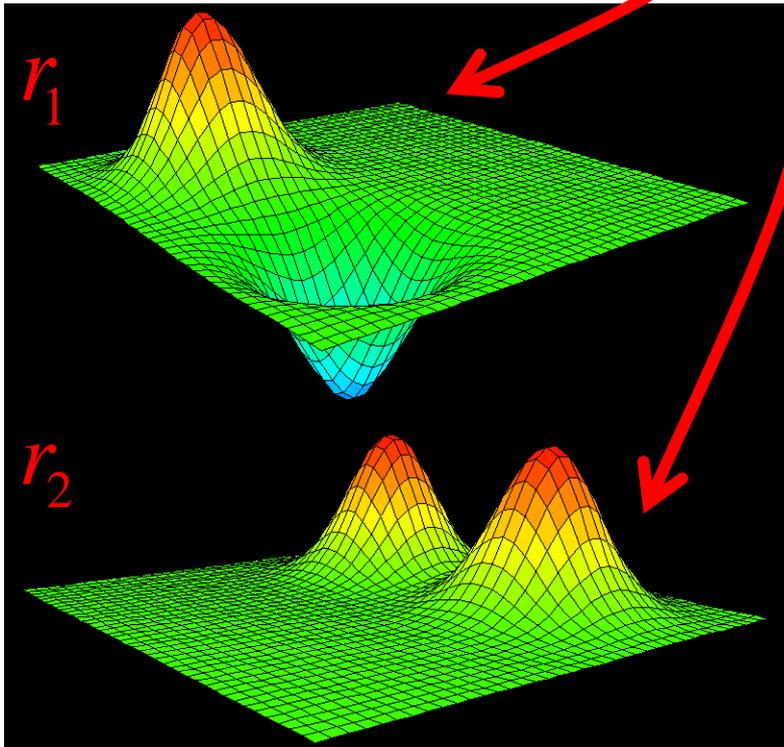
Qubit states

$$|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|+1 -2\rangle - |+2 -1\rangle)$$



Qubit states

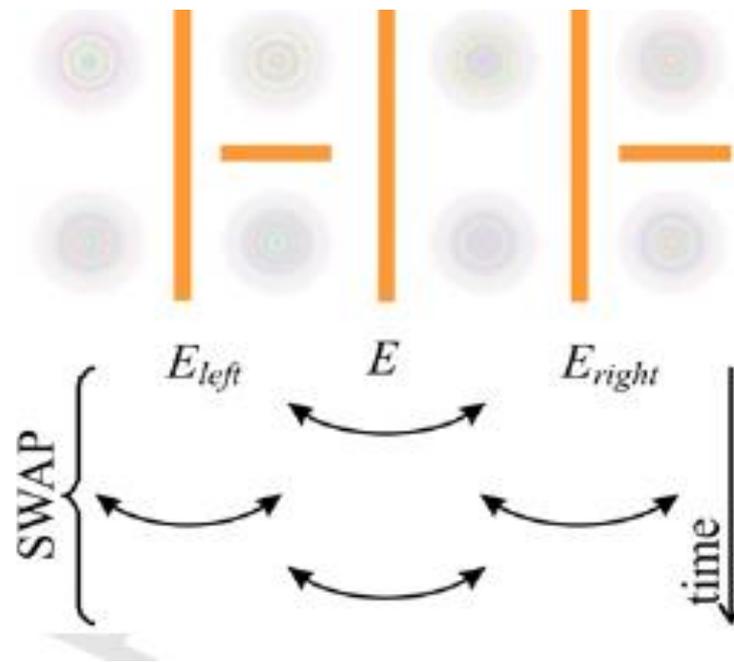
$$|1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (| -_1 +_2 \rangle - | -_2 +_1 \rangle)$$



Выполнение двухкубитных квантовых операций

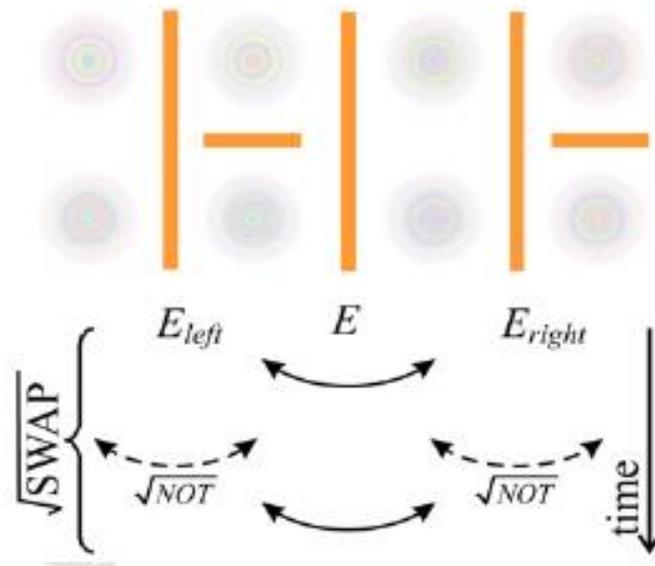
- Доказано выполнение двухкубитных квантовых операций SWAP (обмен состояниями), $\sqrt{\text{SWAP}}$ и CNOT, достаточных для универсального квантового компьютера.
- Взаимодействие кубитов основано на управляемом обменном взаимодействии спин-поляризованных электронов.

Realization of SWAP-gate



Цепочка квантовых точек свернута для удобства рассмотрения

Realization of $\sqrt{\text{SWAP}}$



$\sqrt{\text{SWAP}}$:

$$\begin{aligned} \sqrt{\text{SWAP}} &= \hat{E} \cdot \sqrt{\text{NOT}_1} \sqrt{\text{NOT}_2} \cdot \hat{E} \\ &= \frac{1}{2i} \begin{pmatrix} 2i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & i & i & -1 & 0 \\ 0 & i & 1 & -1 & i & 0 \\ 0 & i & -1 & 1 & i & 0 \\ 0 & -1 & i & i & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2i \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Цепочка квантовых точек свернута для удобства рассмотрения

Realization of CNOT-gate

As far as matrices 4×4 are concerned, a controlled phase shift gate is given by the formula [2]

$$(\hat{Z}_1(\pi/2) \otimes \hat{Z}_2(-\pi/2)) \cdot \sqrt{SWAP} (\hat{Z}_1(\pi) \otimes \hat{I}_2) \cdot \sqrt{SWAP}, \quad (23)$$

where \hat{Z} is the phase shift gate. In a similar way, direct calculation shows that in our case

$$\begin{aligned} \hat{\Pi} &= [(\hat{Z}_1(\pi/2) \otimes \hat{Z}_2(-\pi/2)) \cdot \sqrt{SWAP}]^2 \\ &\quad \times (\hat{Z}_1(\pi) \otimes \hat{I}_2) \cdot \sqrt{SWAP}. \end{aligned} \quad (24)$$

Eventually, the CNOT operation looks like

$$CNOT = (\hat{I}_1 \otimes \hat{H}_2) \cdot \hat{\Pi} \cdot (\hat{I}_1 \otimes \hat{H}_2), \quad (25)$$

where \hat{H} is Hadamard's transformation:

$$\hat{I}_1 \otimes \hat{H}_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (26)$$

Борьба с декогерентизацией- 1

- Общий прием подавления шумов – ансамблевый квантовый регистр, предложенный во ФТИАН – множество регистров, работающих параллельно.

Борьба с декогерентизацией- 2

- 1. Технологический разброс параметров кубитов,
- 2. случайные статические заряженные дефекты,
- 3. постоянное кулоновское взаимодействие кубитов
- **компенсируются при настройке кубитов.**

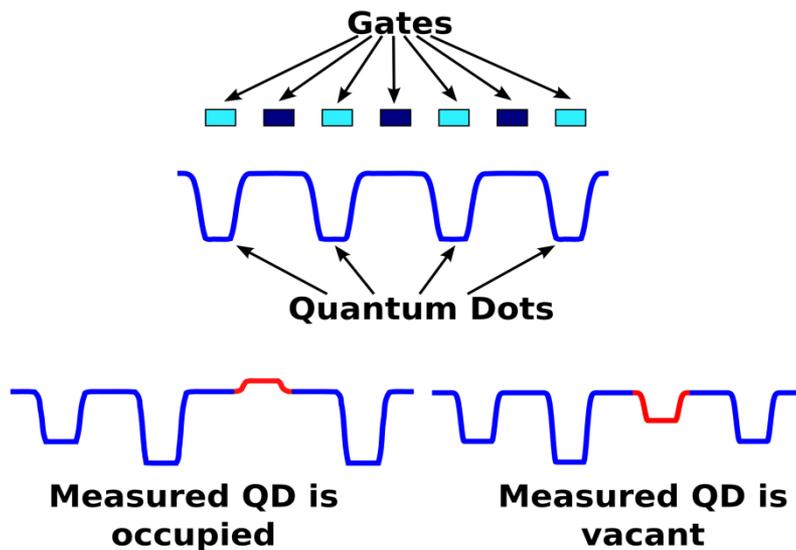
Борьба с декогерентизацией- 3

- 4. Тепловой шум управляющих электродов,
- 5. взаимодействие с фононами,
- 6. перезарядка ловушек
- подавляются понижением температуры, выбором материала (кремния) и специальной конструкцией кубитов.

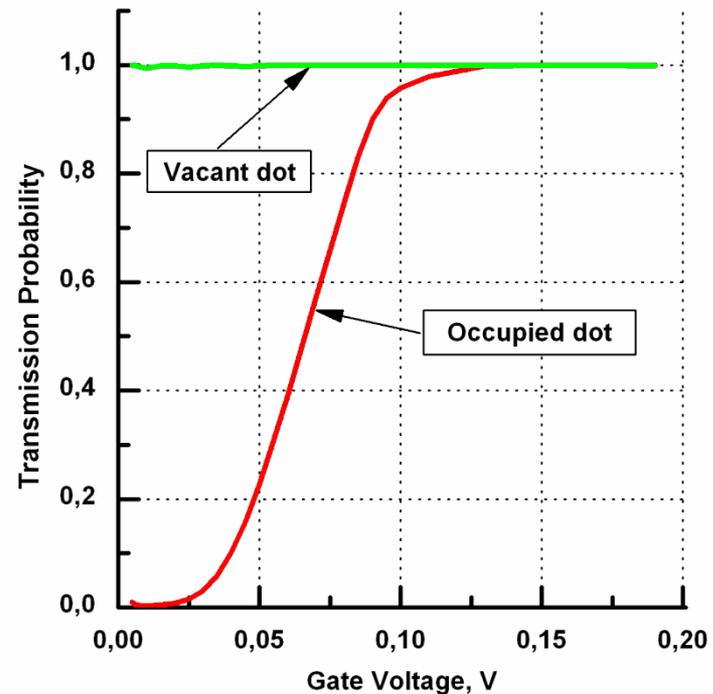
Измерение конечного состояния регистра – считывание результата

- Пропускание тока по каналу при создании условий кулоновской блокады для измеряемой квантовой точки.
- Кубиты измеряются поочередно.
- Измерения необходимы и при настройке кубитов.

Измерение состояния регистра с помощью пропускания тока по каналу



Создание условий кулоновской блокады для определения, находится ли электрон в измеряемой квантовой точке



Ток от напряжения на затворе измеряемой квантовой точки

Technology and diagnostics

Technology setup

- Electron lithography RAITH-150 (Germany)
- Optical lithography M-576
- Electron-beam spattering Balzers UMS-500
- Plasma Atomic Layer Deposition (Oxford Instruments)
- Magnetron deposition
- Pilot plasma processing line (IPT RAS):
 - Anisotropic etching (Oxford Instruments);
 - Dielectrics deposition;
 - Plasma immersion ion implantation.
- Rapid annealing RTA AST-100 (Germany)

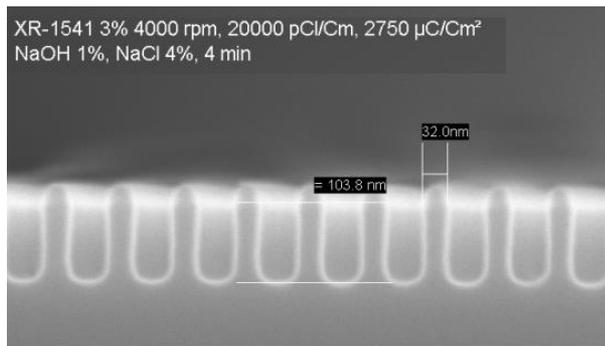
Diagnostics

- SEM Leo Supra (Carl Zeiss, Germany)
- SIMS IonTOF (ION-TOF GmbH)
- AFM Nanopics 2100 (KLA Tencor, USA)
- Spectral ellipsometer Woolam (USA)
- Electrical characterization:
 - Keithley 4200-SCS (USA)
 - Micromanipulator 7100 (USA)

Сквозное анизотропное травление HfMG-стека селективно к области S/D



PlasmaLab 100Dual
(Oxford Instruments
Plasma Technology)



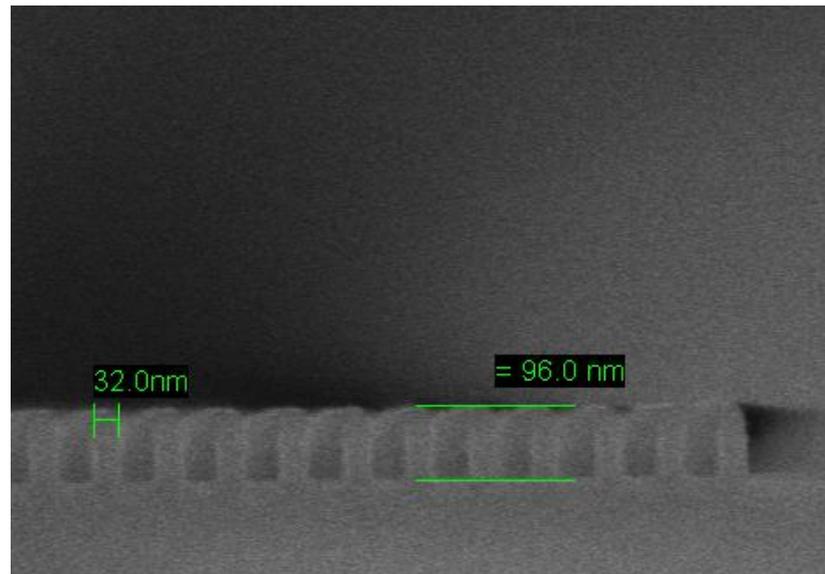
Оптимизированный процесс анизотропного травления поликремния в плазме C4F8/SF6.

Сохранение критического размера с точностью 1 нм

Трехшаговый процесс ПХТ в кластере PlasmaLab 100 Dual:

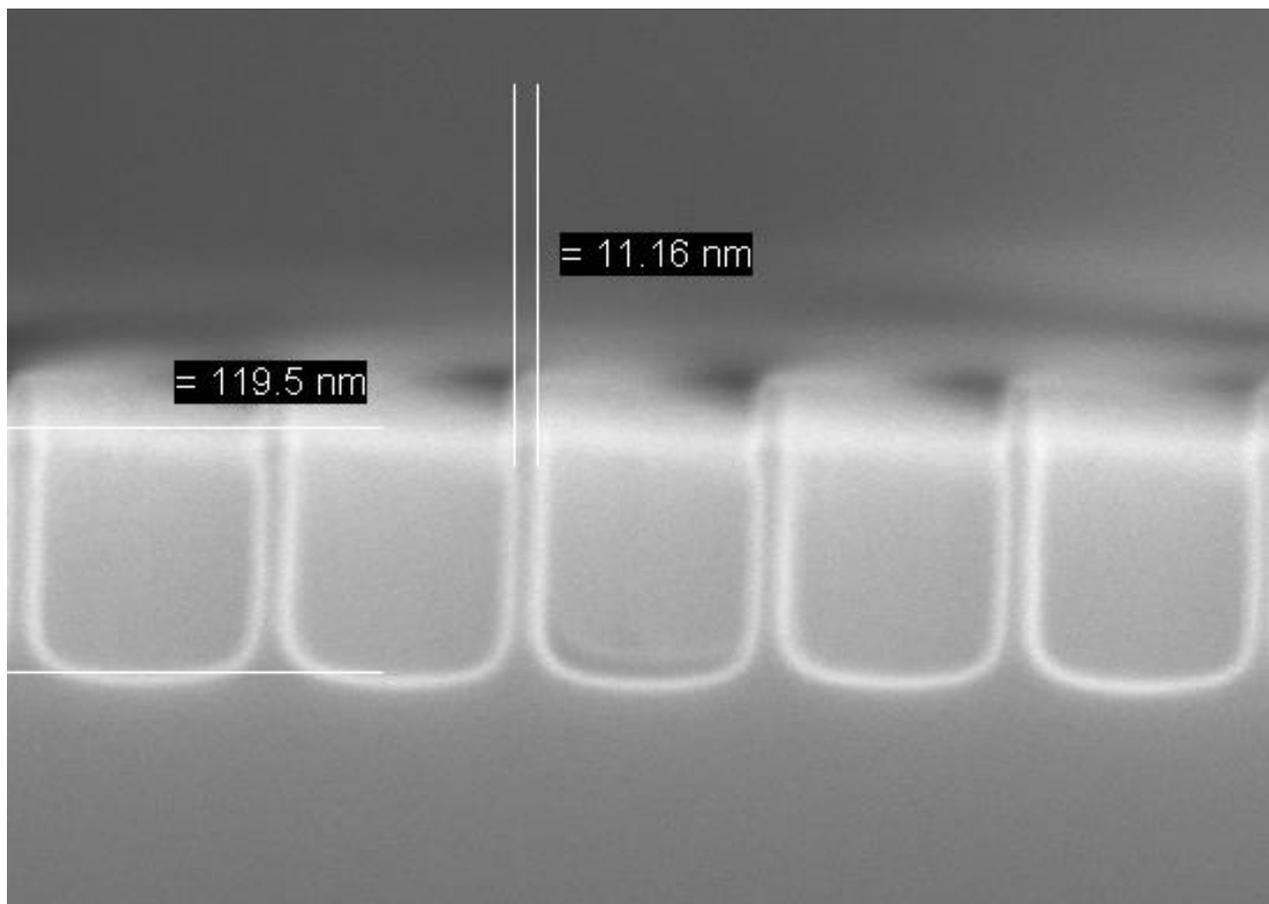
- Камера 1: Слой poly-Si: Плазма SF6/C4F8 , S (poly-Si/TaN) = 20
- Камера 2: Слой TaN+HfN: Плазма BCl3/N2 recipe 1, S(TaN/HfO2) = 10
- Камера 2: Слой HfO2+IL: Плазма BCl3/N2 recipe 2, S(HfO2/Si) = 25-35

Si recess < 1 нм



Результат анизотропного травления стека poly-Si(50нм)/TaN(15 нм)/HfN(2нм) селективно к нижележащему слою диэлектрика HfO2. Остаточная толщина электронного резиста 25-27 нм.

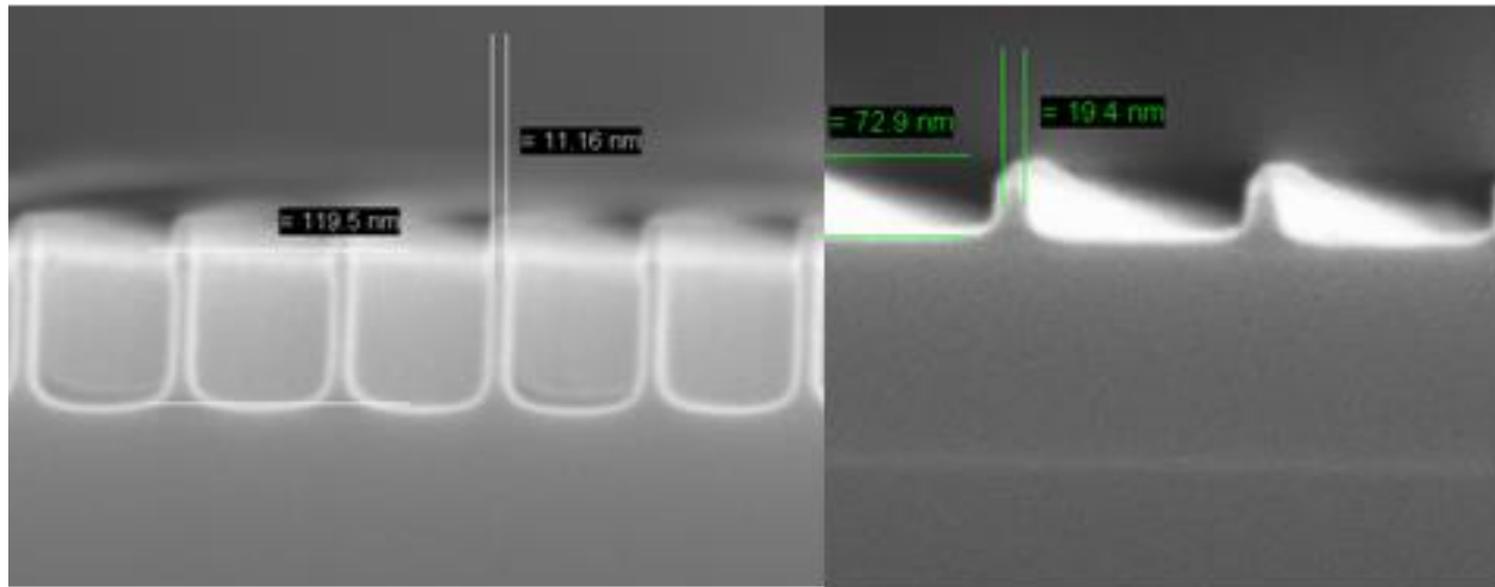
Результат 2017 года. Возможности прецизионного анизотропного плазменного травления. Кремниевые Fin-структуры, CD = 11 нм



Маска электронного резиста HSQ XR-1541.
Точность переноса CD в процессе ПХТ ~ 1 нм (разрешение РЭМ)

Silicon nanowires at IPT RAS: I

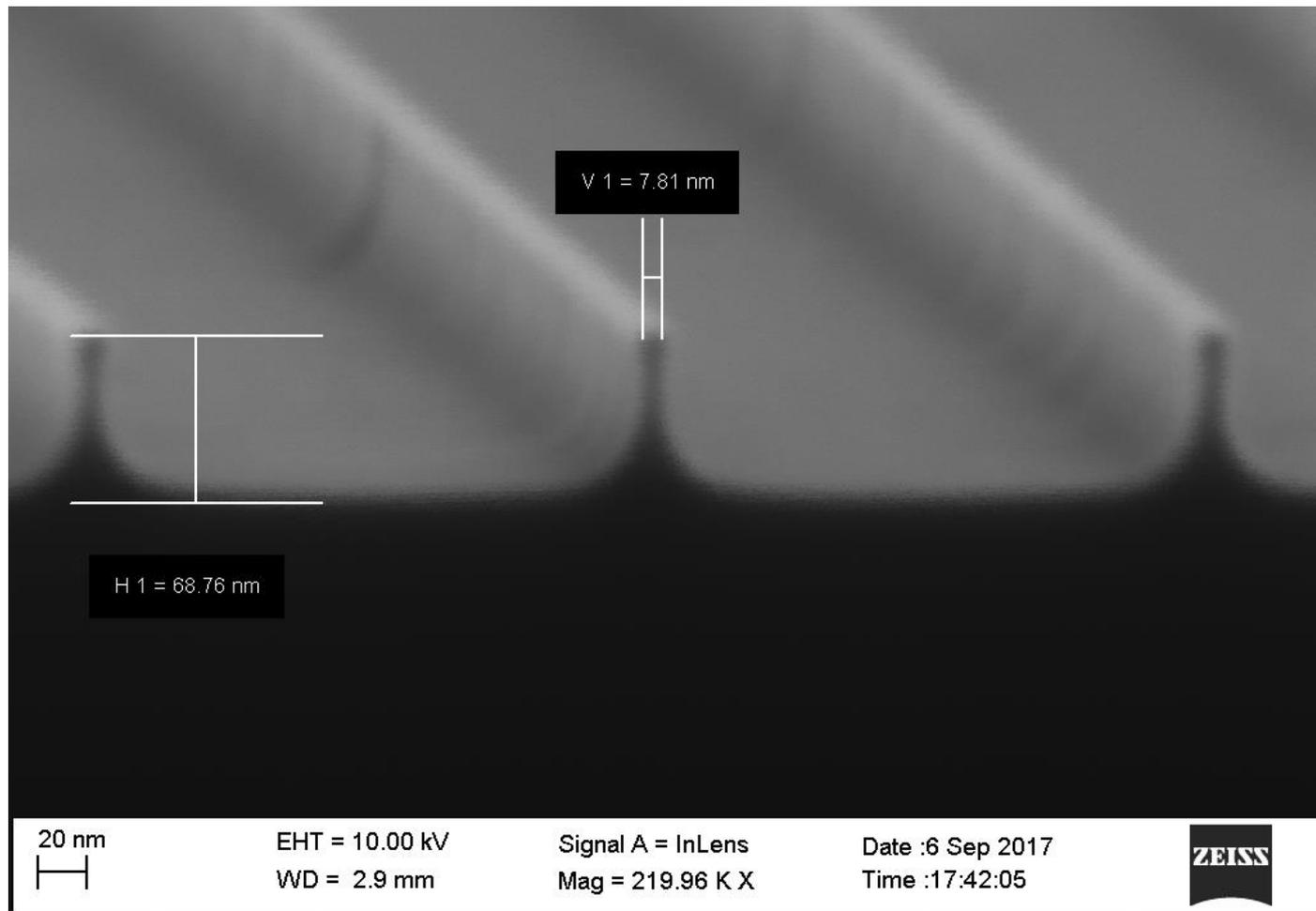
Plasma etch



11 nm fins on Si

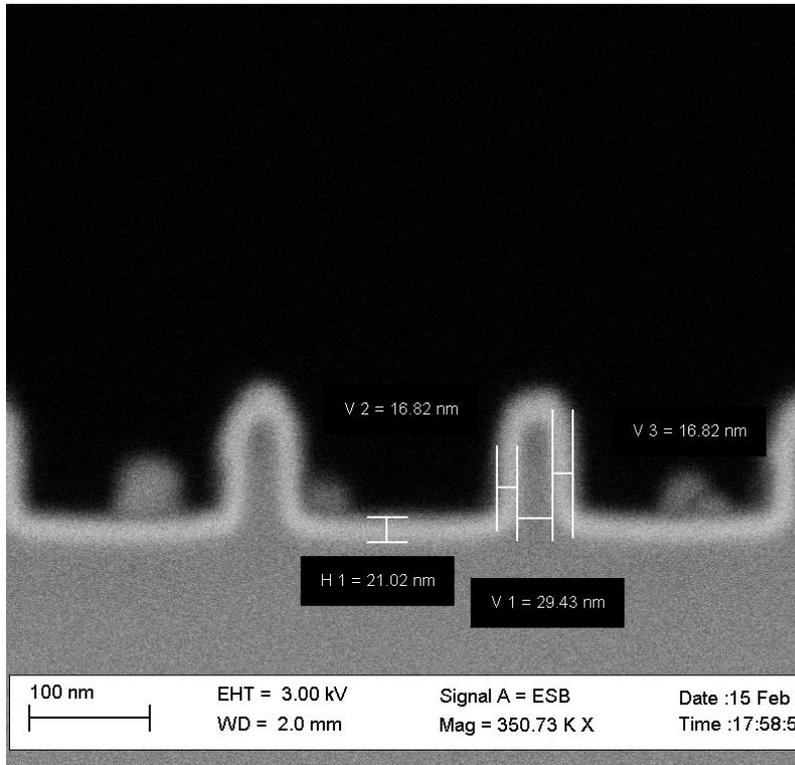
Process was transferred to SOI

Результат 2017 года. Кремниевые Fin-структуры с удаленным нарушенным слоем, CD = 7.8 нм

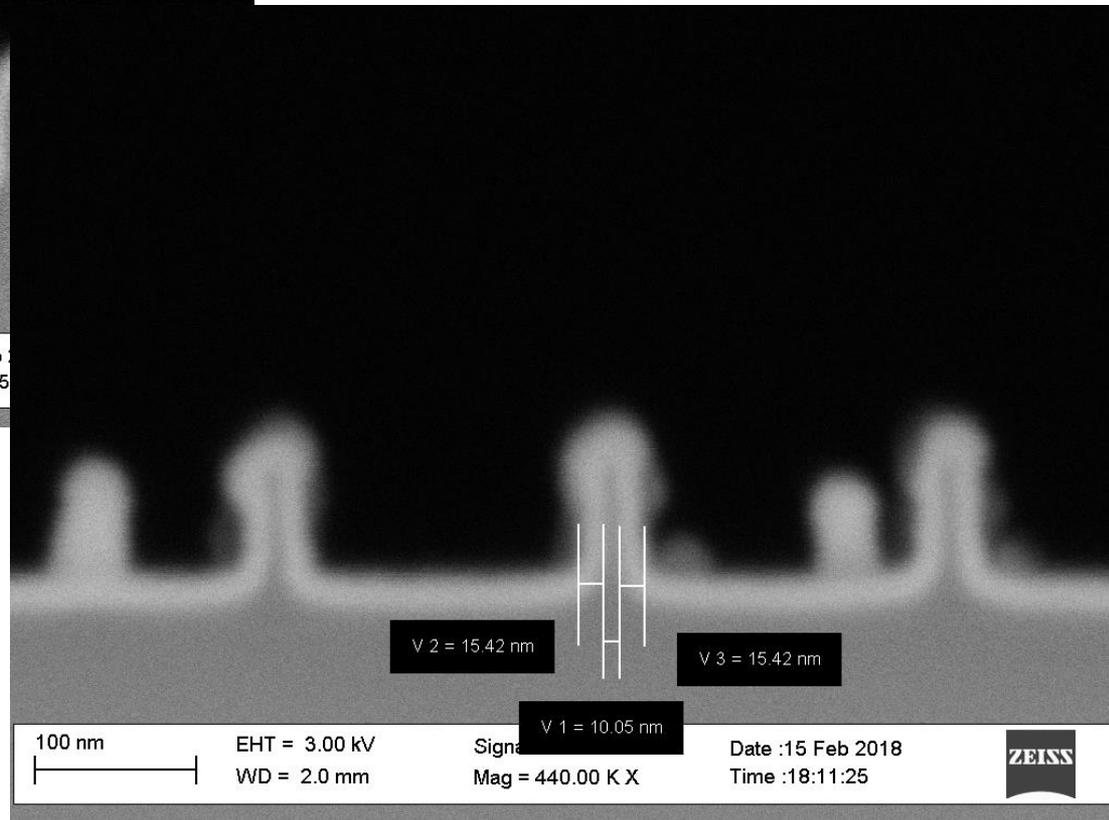


Результат 2018 года. Кремниевые Fin-структуры с осажденными ALD-слоями HkMG-стека TaN(10 нм)/HfO₂(5 нм)

Fin-структуры, CD = 10 нм, стек HkMG 16 нм

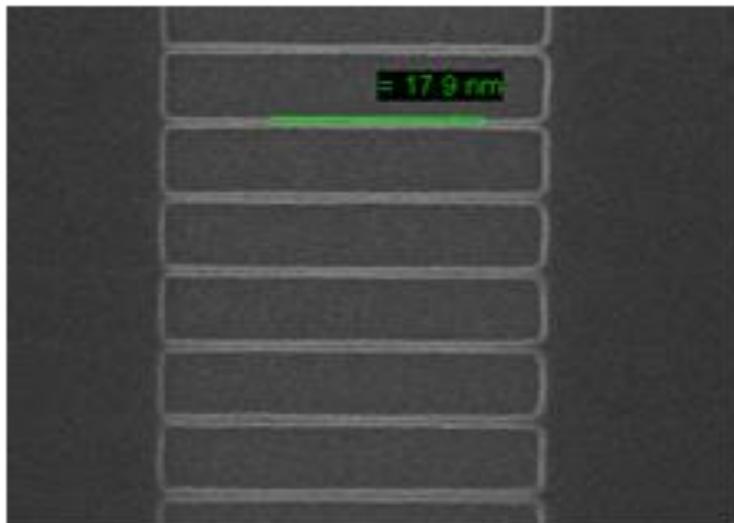


Fin-структуры, CD = 30 нм, стек HkMG 16 нм

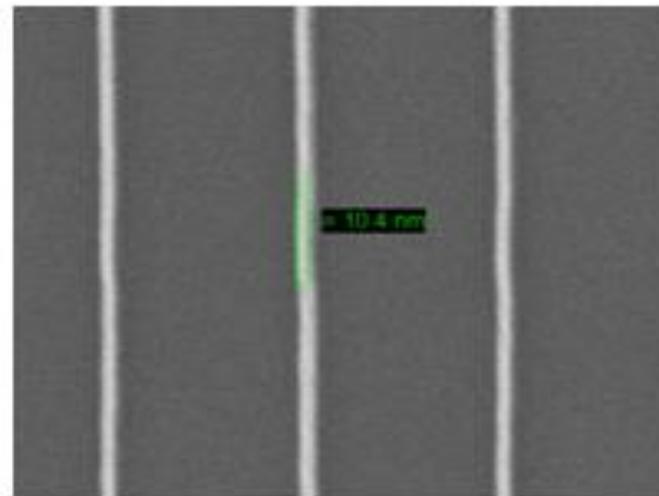


Silicon nanowires at IPT RAS

Structures



NW on SOI array



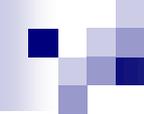
Released Si NW (top view) on SOI
after HF etch

ВЫВОДЫ

- Предложена конструкция твердотельного квантового регистра на основе кремниевого полевого транзистора типа fin-FET.
- В регистре подавлены все основные процессы декогерентизации.
- **Регистр может быть изготовлен** во ФТИАН.
- **Требуется** криогенная многоканальная измерительная аппаратура.

СПАСИБО

за **СПАСИБО**
за **ВНИМАНИЕ!!!**



THANK YOU !!!
THANK YOU !!!

Milestones

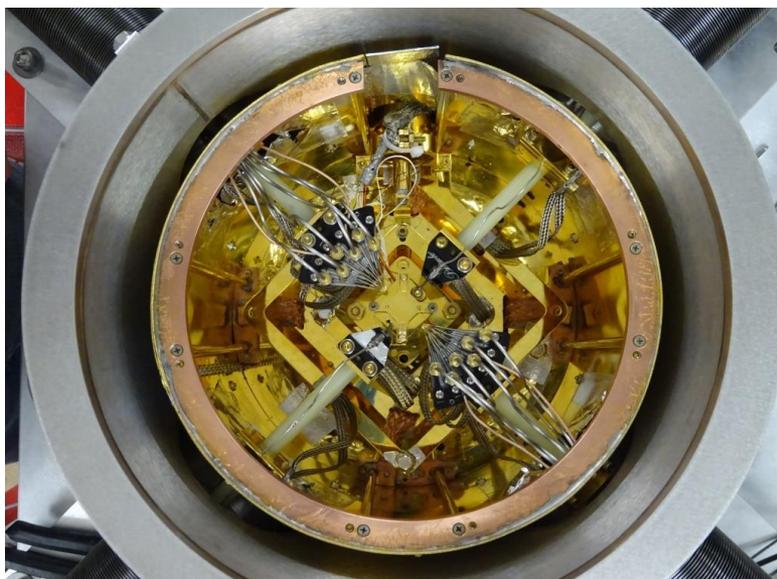
- **Manin** (1980) and **Feynman** (1982): proposals to use a quantum system for simulation of a quantum system.
- ***Grover's algorithm*** (1996): selection in unsorted data base of N elements
 - Classical $\sim N$;
 - Quantum $\sim N^{1/2}$;
- ***Shor's algorithm*** (1994) of factorization (undermines modern secret communication).
 - Classical factoring algorithm $(2^{\log N})^{1/2}$
 - Shor's quantum factoring algorithm $O(\log N^3)$

Технический облик квантового регистра

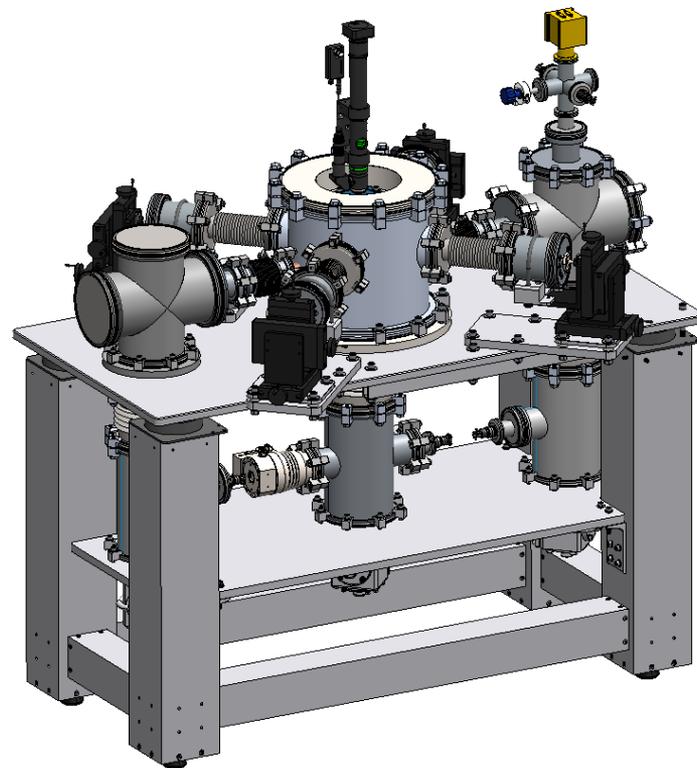


Интегральная схема регистра, подключенная к управляющей и измерительной системе.

Лабораторный облик



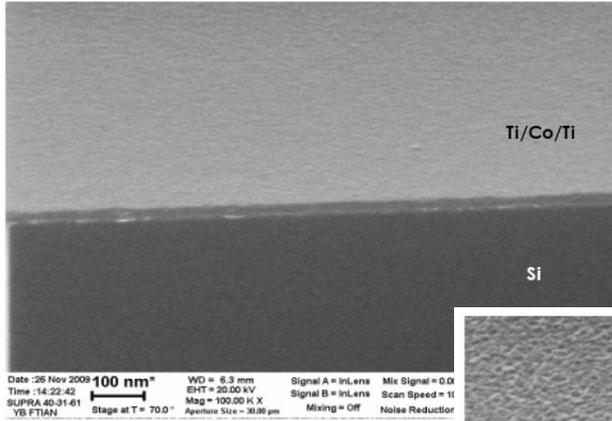
Микросхема регистра с контактами



Измерительная установка

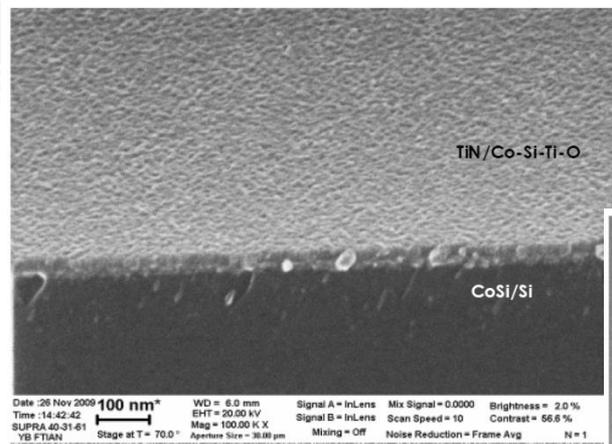
Contacts to ultra-thin SOI

Ti(8 nm)/Co(10 nm)/Ti(5 nm)/Si

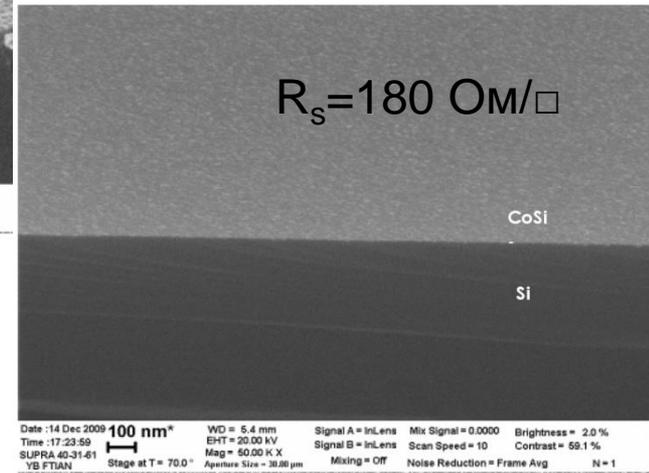


RTA-1 (N₂)

RTA-2,
selective chemical etching

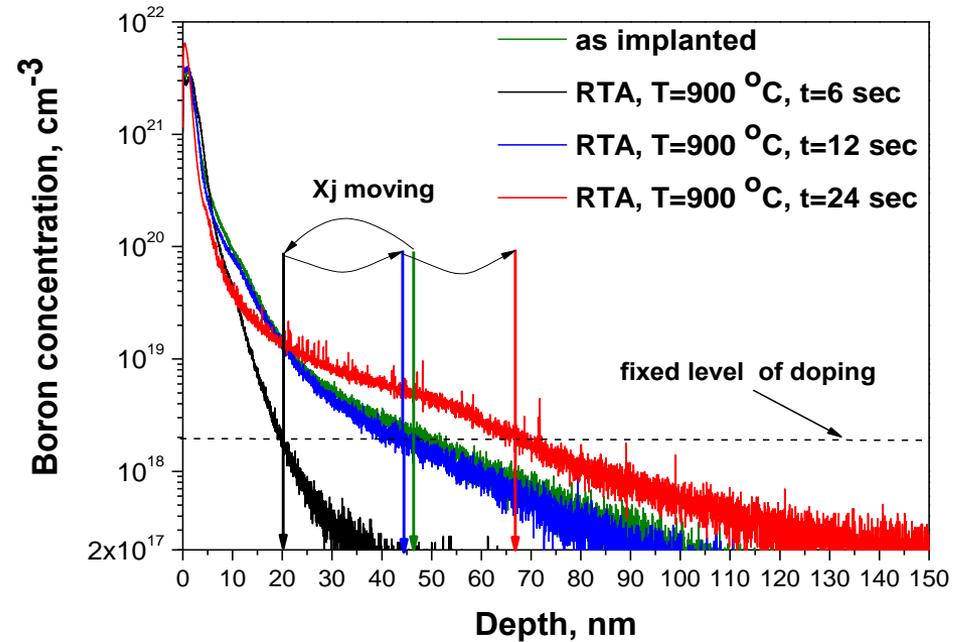


CoSi₂(12 nm)/Si



Technology: TIME – SALISADE

Ultra-shallow ion implantation

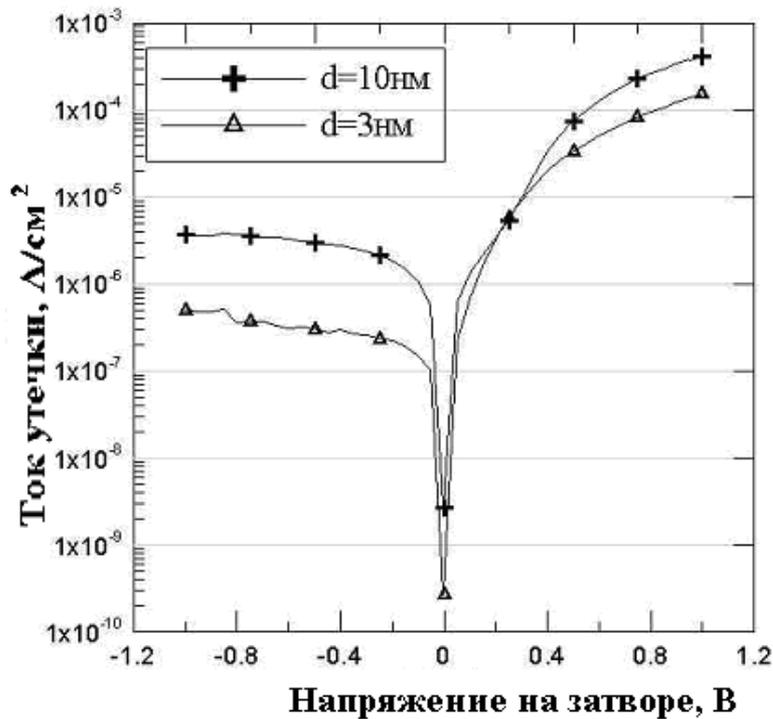


New technique: plasma immersion implantation.

Advantages: $I_{\text{ion}} > 10 \text{ mA/cm}^2$ at $E_i < 5 \text{ keV}$,

$D > 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ per 1 min.

High-k gate dielectrics



Formation:

- Surface pre-treatment in high vacuum.
- Electron-beam evaporation of HfO₂ or ZrO₂.

- 1) Low charge density on dielectric/Si interface.
- 2) Low leakage current.

Параметры сформированных подзатворных диэлектриков

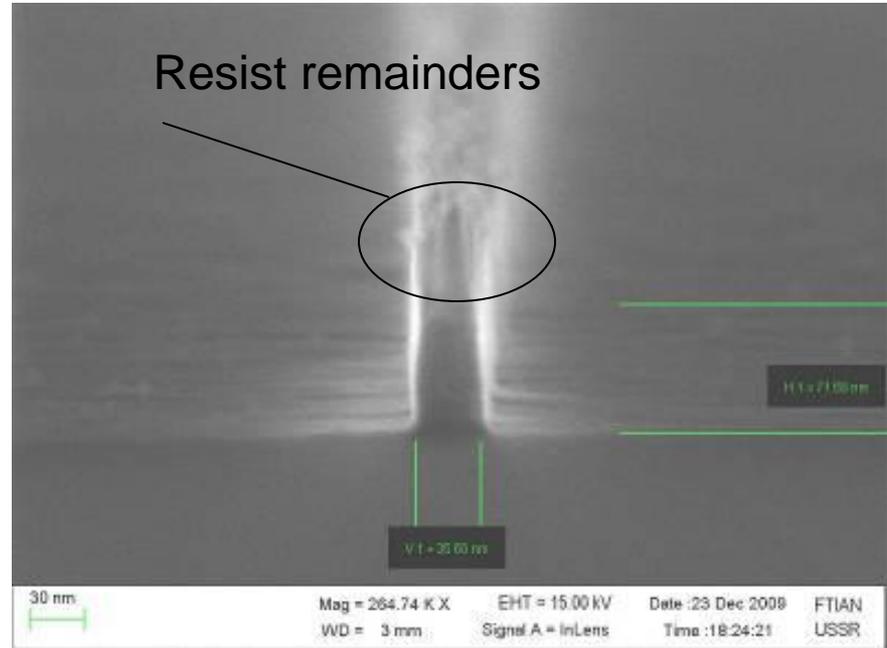
Материал	Толщина	$\epsilon_{\text{отн.}}$	Ток утечки (при 1 В)	Плотность встроенного заряда на границе Диэлектрик/Si
ZrO ₂	3 – 5 нм	18-21	$< 5 \cdot 10^{-6} \text{ A/cm}^2$	$(3-3.7) \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$
HfO ₂	3 – 5 нм	20-21	$< 3 \cdot 10^{-6} \text{ A/cm}^2$	$(7-9.9) \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$

Metal gate



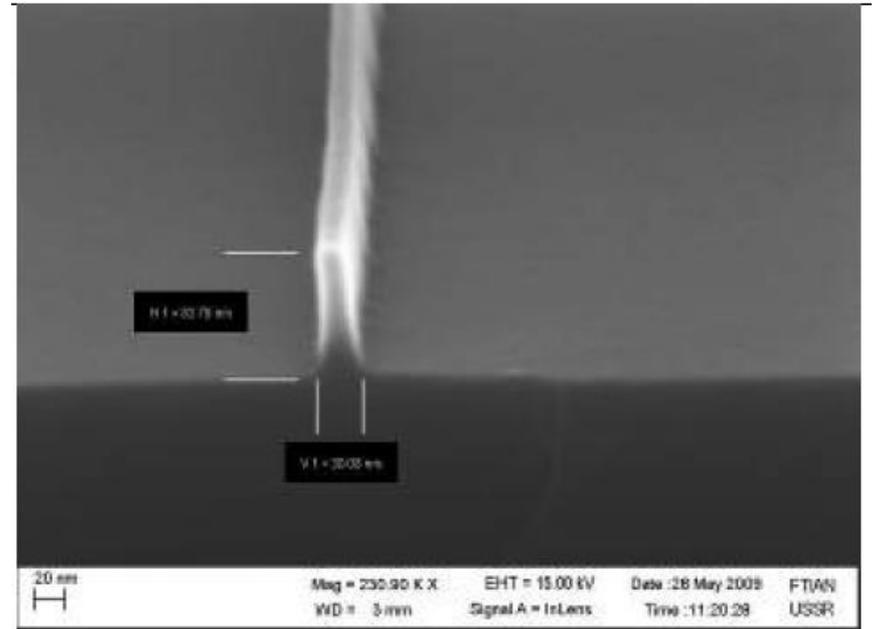
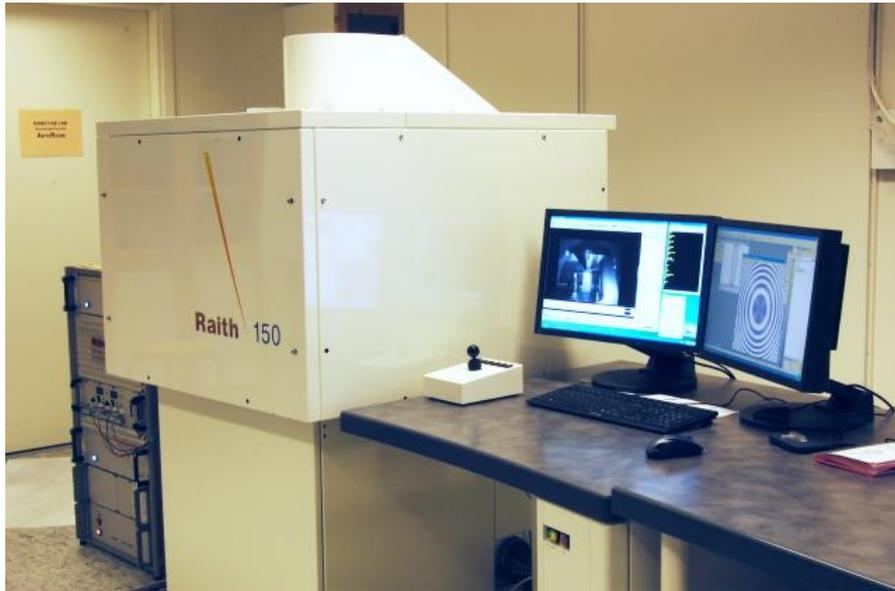
Plasma etching setup
designed at IPT RAS in 2006.

In situ diagnostics: spectral end-point
detector.



Tungsten gate 30 nm

Electron-beam lithography for $CD < 45$ nm



Resist mask 30 nm for gate formation

PMMA-950-K2 as electron negative resist (overexposure dose).

Classical computer: bits

Bit

Discrete $|0\rangle$ or $|1\rangle$

Bits

Classical register $|1\rangle|0\rangle|1\rangle|1\rangle|0\rangle\dots$ N
integer numbers

Sequential computing

Quantum computer: qubits

Qubit

Analog

Qubit **compositional state** $\Psi = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$,
 $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$

Qubits

Quantum register (**entangled state**)

2^N -dimensional Hilbert space:

2^N complex numbers \Rightarrow big memory capacity

$2^{300} >$ number of atoms in Universe

Quantum parallelism of calculation

Great acceleration of several algorithms!

Entangled states



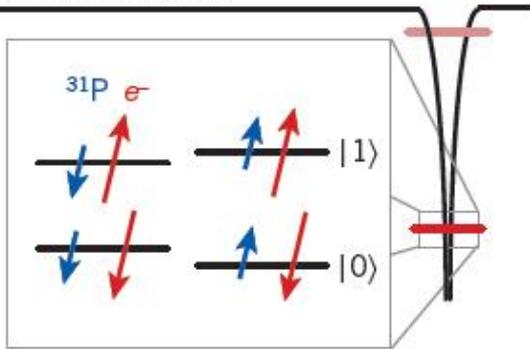
Five demands to quantum computers: guidelines for inventors

- 1) Quantum register is composed of qubits, i.e. two-level quantum systems (a large-scale QC contains at least 1000 qubits);
- 2) Initialization procedure is to be provided;
- 3) Performance of one- and two-qubit operations with the accuracy not worse than 0.01%;
- 4) Decoherence processes of quantum register to be much suppressed;
- 5) Read out of a final state as precise as possible.

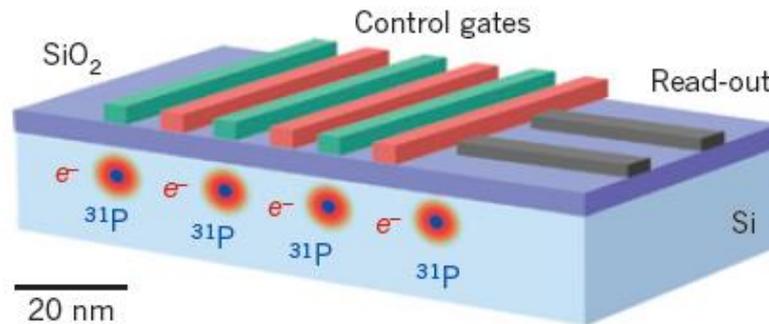
Atoms and quantum dots as qubits

Donors

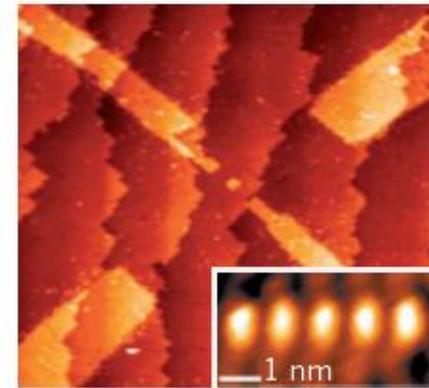
Si conduction band



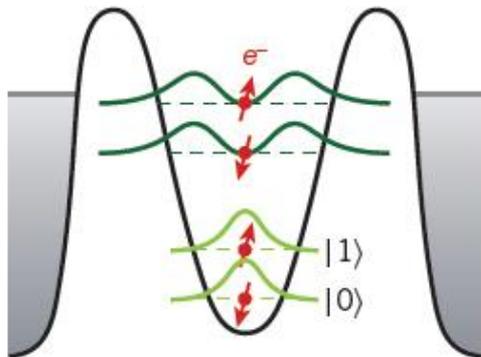
Donor architecture



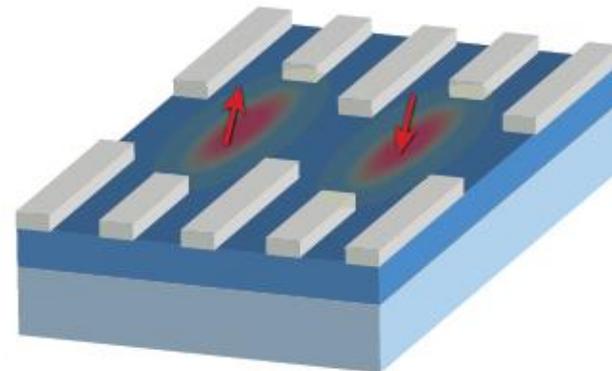
STM lithography of donors



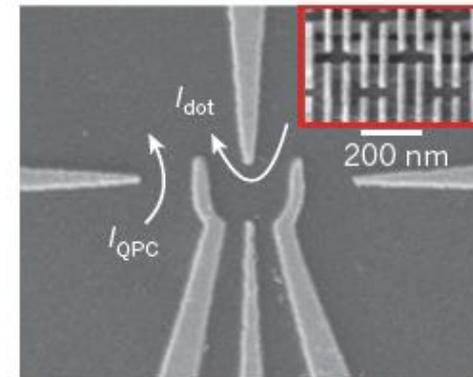
Quantum dots



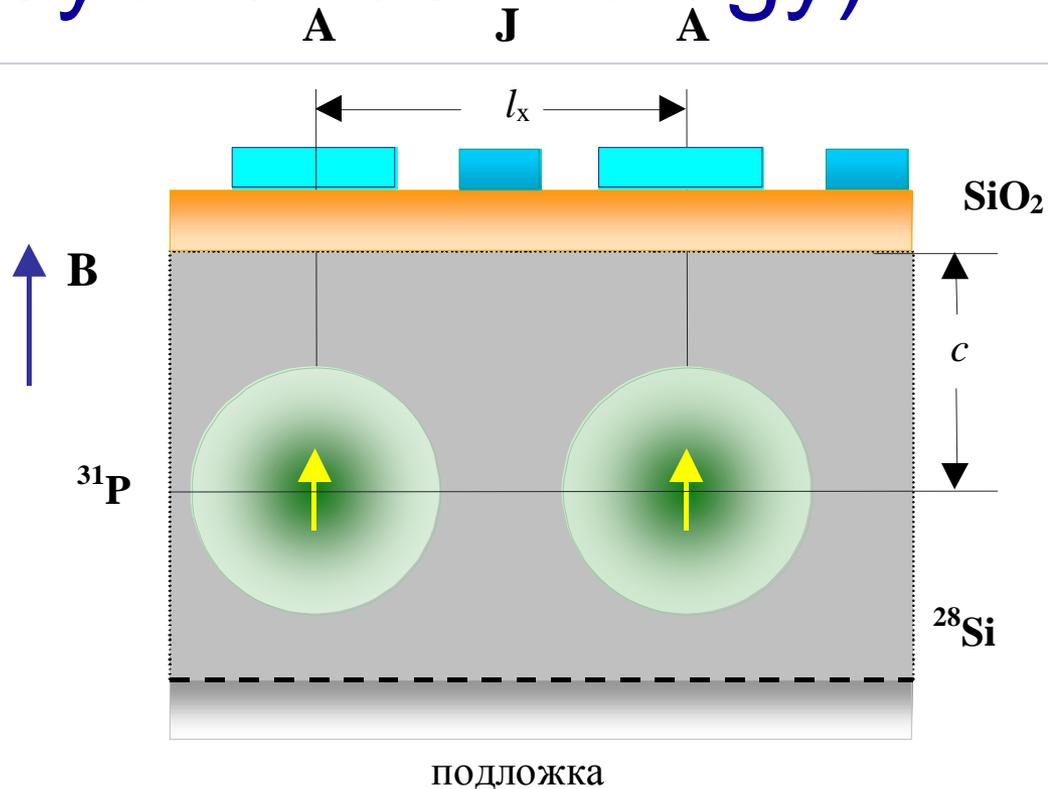
Quantum dot architecture



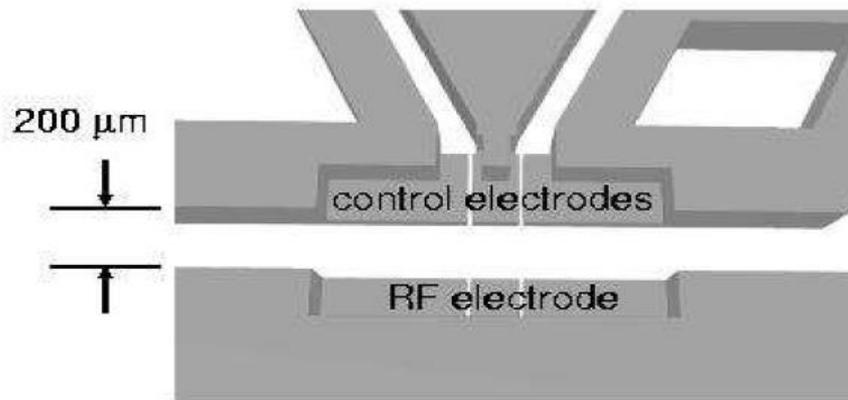
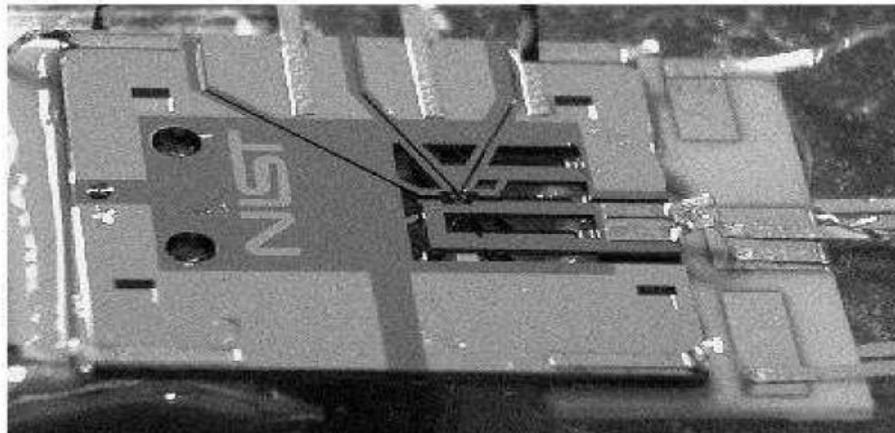
SiGe quantum dot



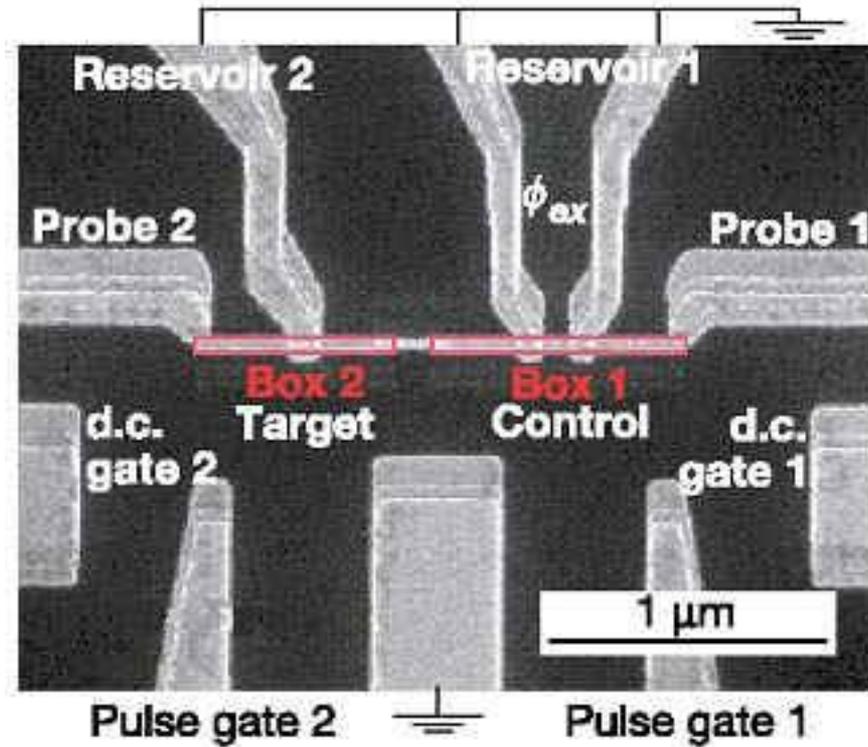
Kane's quantum computer, 1998 (still beyond technology)



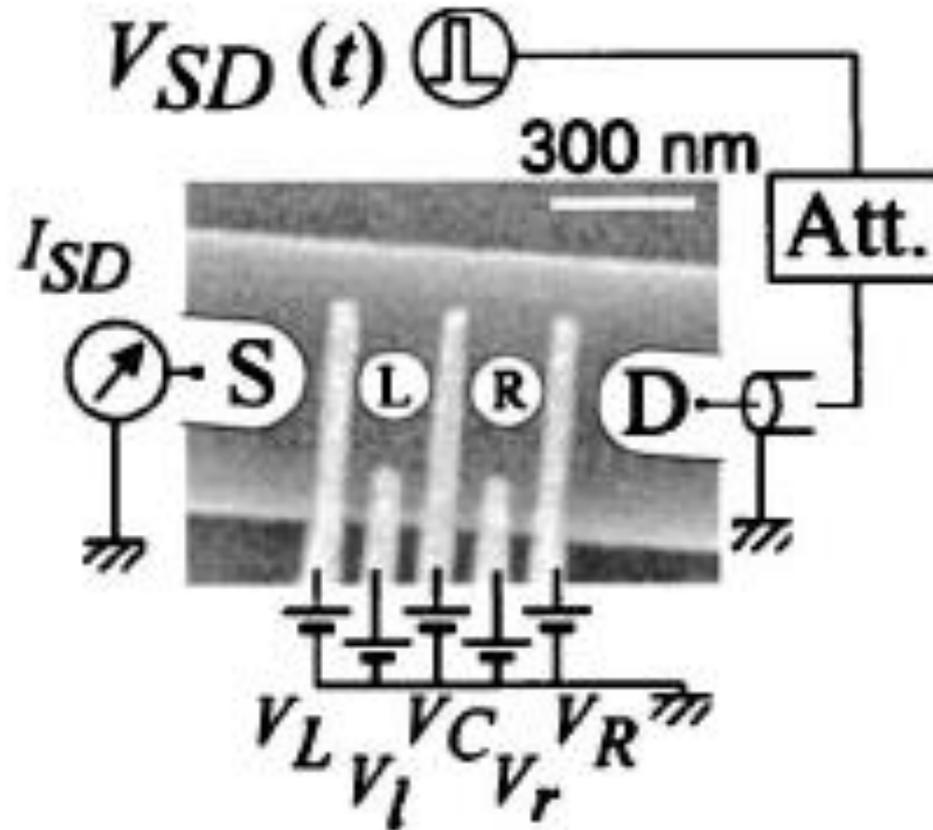
Ions in traps (plasma instabilities seem possible)



Two superconducting qubits (current fluctuations)

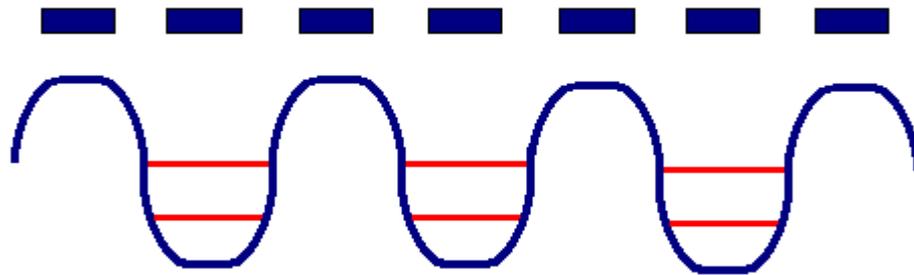


Double quantum dots defined in 2DEG



Potential defined quantum dots

GATES



POTENTIAL RELIEF ALONG THE CHANNEL

Confinement energy

$$\varepsilon_0 \sim \hbar^2 \left[\frac{1}{m_t d_{Si}} + \frac{1}{m_l D} \right]$$

$$m_t = 0.19m_0, m_l = 0.98m_0$$

$$d_{Si} \sim 2nm, D \sim 10nm$$

$$\varepsilon_0 \sim 0.02eV$$

Coulomb repulsion energy

$$\varepsilon_C \sim 0.01eV$$

=> one electron in a dot



Light at the end of the tunnel



