

профессор В.И.Тельнов

# Курс лекций по экспериментальной физике

Весенний семестр 2025 г.

г. Новосибирск

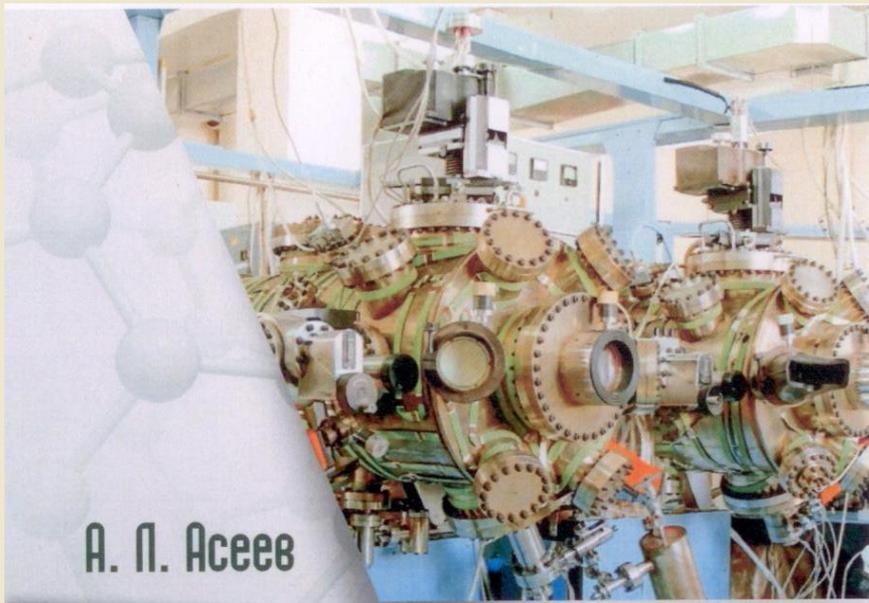
## ПОЛУПРОВОДНИКИ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

*Подготовил: академик РАН А.Л. Асеев*



*Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН  
Новосибирский государственный университет*

Лектор 1 апреля 2025: Павел Викторович Гейдт, [p.geydt@nsu.ru](mailto:p.geydt@nsu.ru)  
к.ф.-м.н., заведующий лабораторией ФДНС АТИЦ ФизФака НГУ



А. П. Асеев

# ПОЛУПРОВОДНИКИ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

**N\*** Новосибирский  
государственный  
университет  
\*НАСТОЯЩАЯ НАУКА

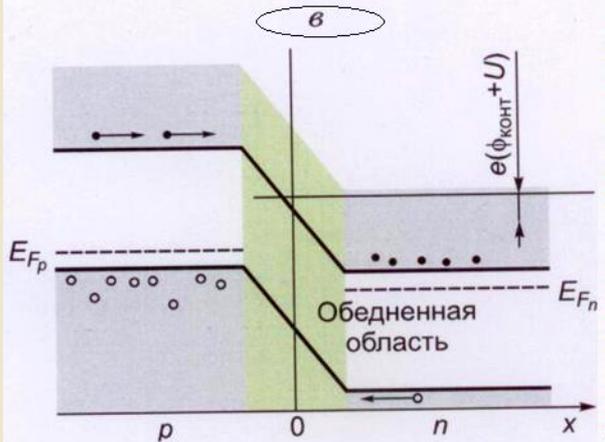
<https://e-lib.nsu.ru/dsweb/Get/Resource-8693/page00000.pdf/info>

## Оглавление

Энергетические зоны и транспорт электронов в полупроводниках .....	4
Изобретение транзистора и история твердотельных электронных устройств.....	9
Полупроводниковые приборы, интегральные схемы и планарная технология .....	15
Полупроводниковые технологии и компьютерная техника в СССР и РФ .....	29
Дерево полупроводниковой электроники .....	34
Полупроводниковые элементы силовой электроники.....	35
Кремний-на-изоляторе, радиационно-стойкая электроника, биосенсоры .....	39
Полупроводниковая память, мемристоры.....	45
Полупроводниковые наноструктуры и нанотехнологии .....	54
2D-электронный газ, целочисленный и дробный квантовые эффекты Холла .....	67
Гетероструктуры для СВЧ-электроники и радиофотоники .....	71
Принц-технология, трубчатые сенсоры .....	74
Элементы солнечной энергетики.....	79
Квантовый транспорт в наноструктурах .....	82
Лазеры с вертикальным резонатором, источники фотонов.....	88
Квантовые точки Ge/Si, плазмоники.....	95
Полупроводниковые элементы тепловидения и терагерцового видения .....	99
Структуры с отрицательным электронным средством и ночное видение.....	109
Эпитаксиальные структуры CdHgTe: фотоприемники и квантовые системы .....	114
Графен: открытие, свойства и перспективы применения.....	122
Квантовые биты в моноизотопном кремнии.....	128
Инфраструктура полупроводниковых нанотехнологий .....	136
Список литературы.....	141
Благодарности.....	143

# ПОЛУПРОВОДНИКИ

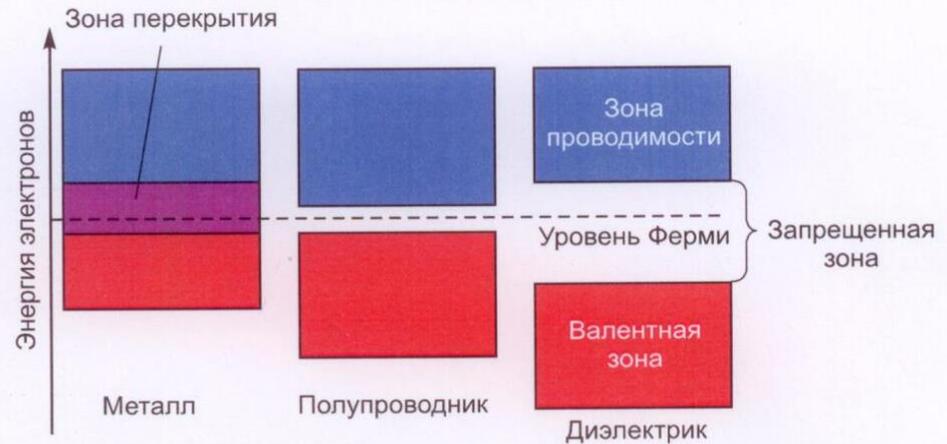
при увеличении температуры сопротивление металлов увеличивается



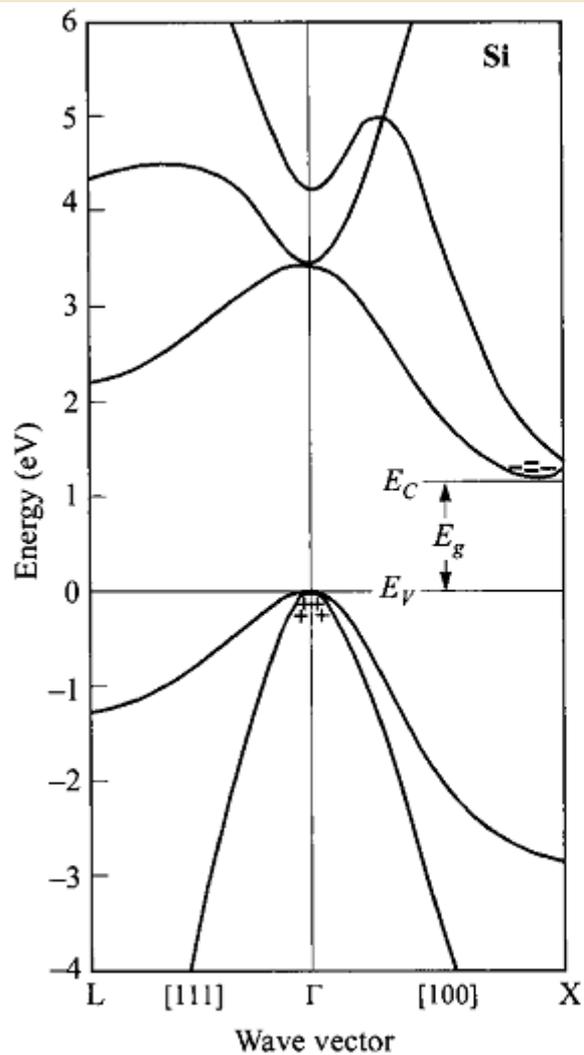
"+" потенциал приложен справа

Энергетическая диаграмма  $p-n$  перехода.  
*a* – состояние равновесия, *б* – при приложенном прямом напряжении, *в* – при приложенном обратном напряжении.

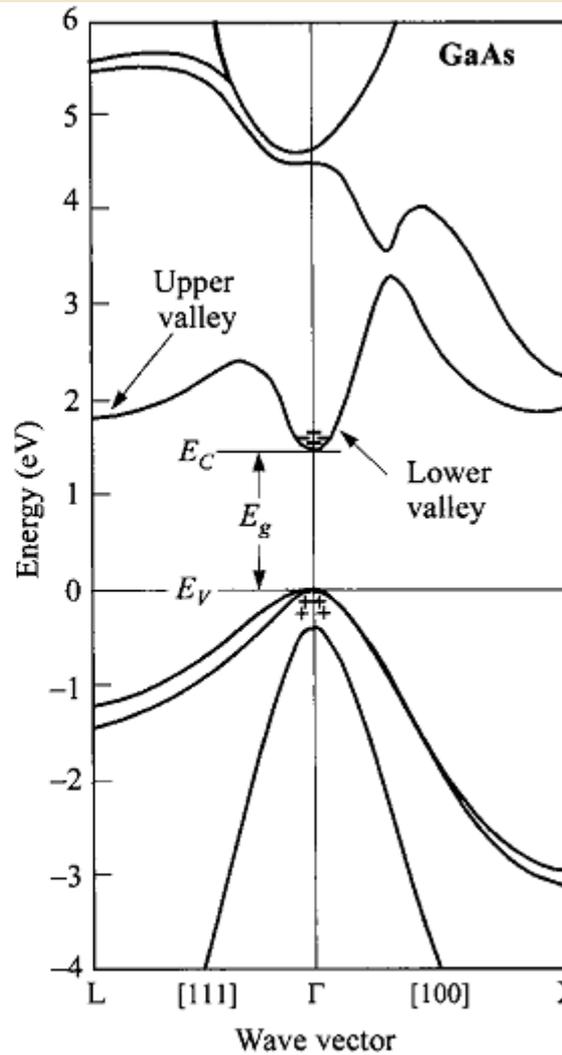
Энергетическая диаграмма  $p-n$  перехода в равновесии (*a*), при прямом смещении (*б*) и при обратном смещении (*в*)



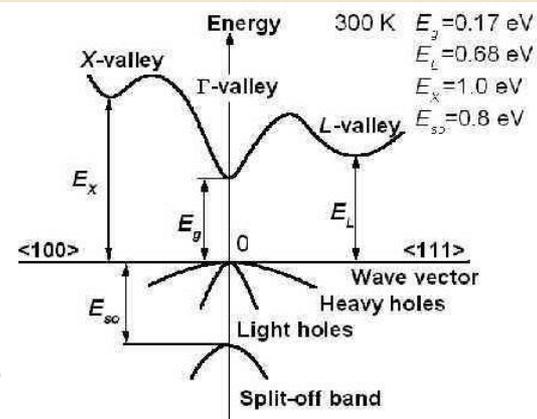
Энергетические зоны металлов, диэлектриков и полупроводников



(a)



(b)



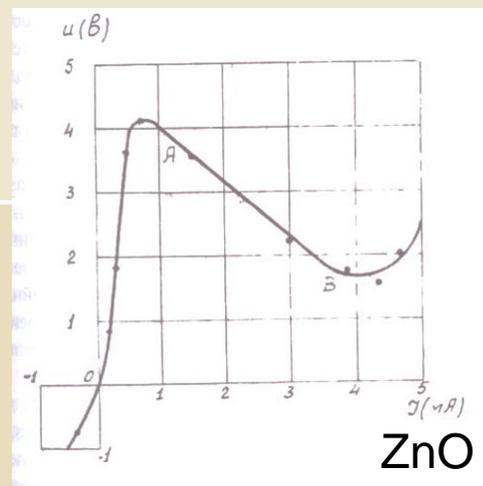
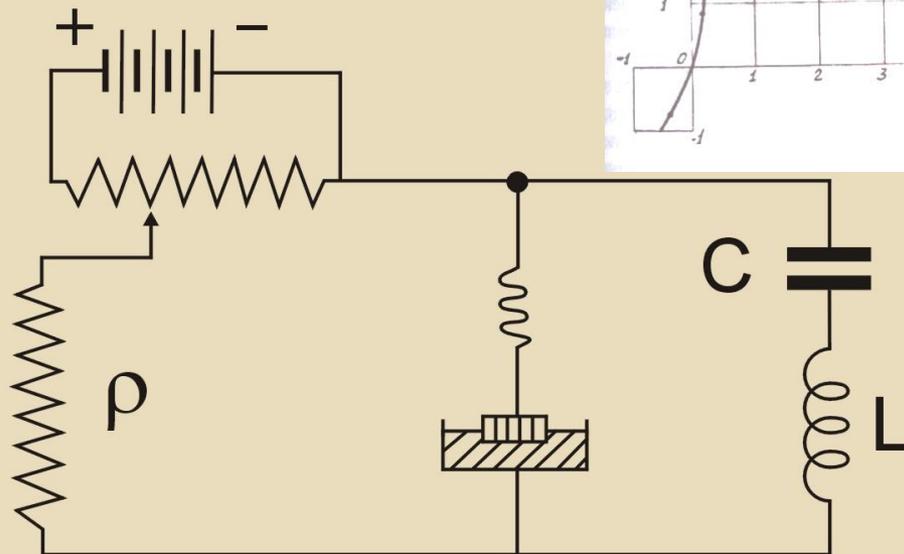
**Структура энергетических зон в полупроводниковых кристаллах.**

*Si – межзонные переходы не прямые. GaAs – прямые межзонные переходы. InSb – эффективная масса дырок в 10 раз превышает эффективную массу электронов и при  $T > 450$  С  $E_F$  находится в зоне проводимости – это вырожденное состояние.*

**Олег Владимирович ЛОСЕВ**  
изобретатель кристаллического гетеродина (кристадина),  
пионер твердотельной электроники и оптоэлектроники

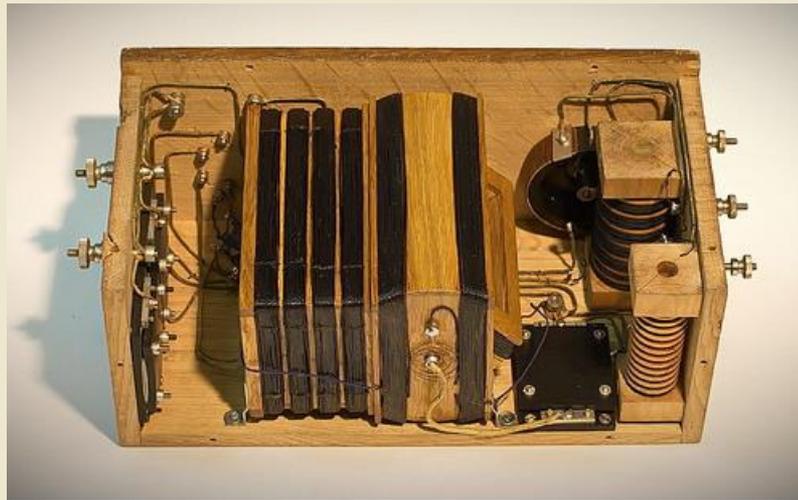


10 мая 1903 - 22 января 1942



- О.В.Лосев, Детектор-генератор; детектор-усилитель, Телеграфия и телефония без проводов, 1922, т.14, с.374-386;
- O.V.Lossev, Oscillatory Crystals, Wireless World and Radio Review, 1924, v.15, pp.93-96;
- O.V.Lossev, Der Krystadyn, Zeitschrift fur Fernmeldetechnik, 1925, Bd.9, ss.132-134;
- O.V.Lossev, Oszillierende Krystalle, Zeitschrift fur Fernmeldetechnik und Geratebau, 1926, Bd.7, ss.97-100.

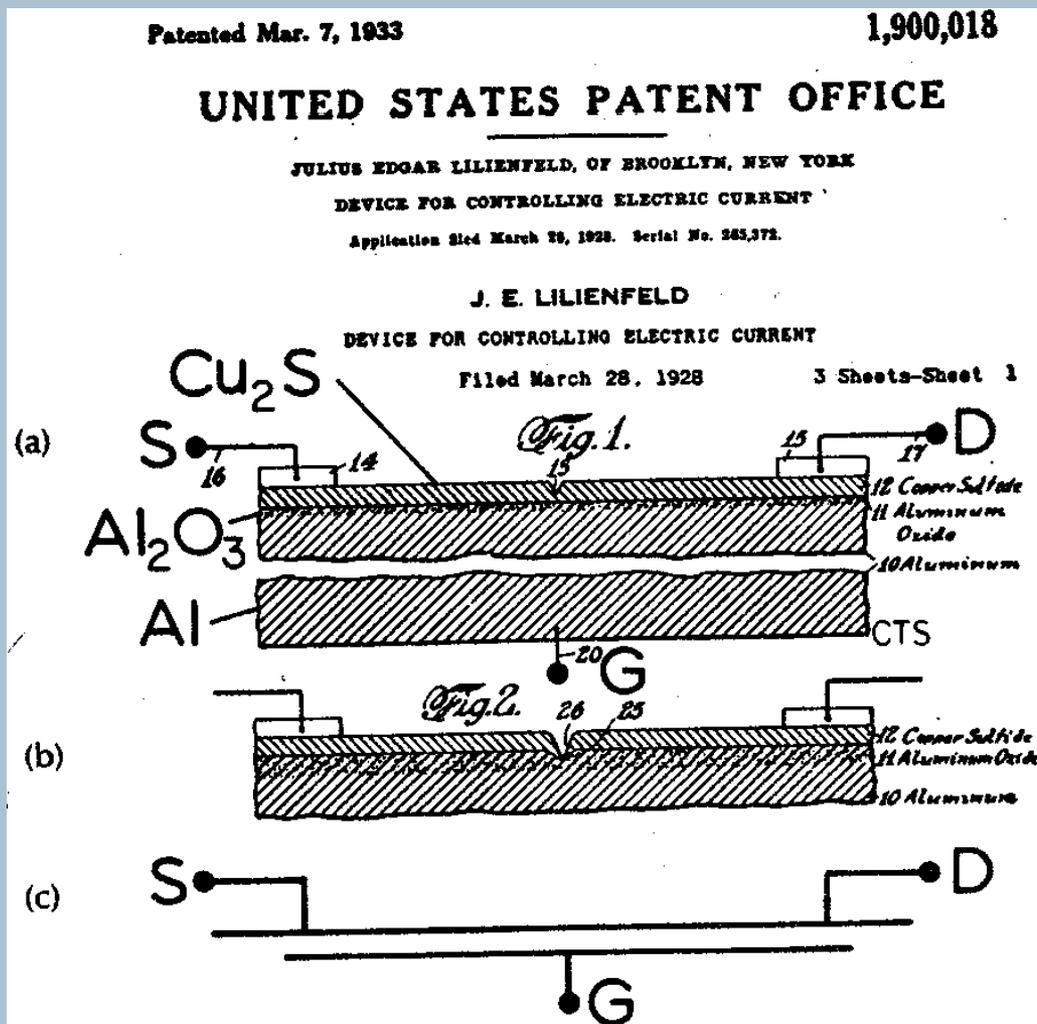
Изобретение кристадина О.В.Лосевым в 1922 г. стало мировой сенсацией и предвестником эры полупроводниковой электроники. Однако лишь много лет спустя явление, экспериментально открытое сотрудником Нижегородской радиолaborатории и советским радиолюбителем, получило объяснение в рамках представлений физики твердого тела и полупроводников и дальнейшее использование. Детектор кристадина оказался прообразом современных туннельных диодов. А метод приема незатухающих колебаний на кристаллический детектор, генерирующий на частоте, близкой к частоте принимаемого сигнала, стал важным вкладом в развитие техники приемников прямого преобразования, которые благодаря простоте схемы и высокому качеству работы с начала 1920-х гг. завоевали широкую популярность в коротковолновой радиосвязи. О.В.Лосев открыл также явление электролюминесценции кристаллов SiC и предвосхитил открытие светодиодов.



*Кристадин Лосева в Центральном музее связи им. А.С. Попова,  
г. С.-Петербург*

# МДП-транзистор: основной прибор кремниевой микро- и наноэлектроники

Патент на МДП – прибор 1928 года Лилиенфельда



Полупроводник—  
сульфид меди

Диэлектрик -  
оксид алюминия

Названия основных  
элементов общепри-  
няты и в наши дни:

Затвор (*Gate*)  
Исток (*Source*)  
Сток (*Drain*)

почти совпадающее  
с современным  
изображение для схем

Ю. Лилиенфельд заявил первый патент на транзистор в 1926 г. это был полевой транзистор — комбинация металла и полупроводника. Второй патент заявлен в 1928 г. (№ 1900018, выдан в 1933 г.): **полевой транзистор**, работающий в режиме обеднения. В 1928 г. заявлено устройство с полевой эмиссией, названное им “электронным триодом”, который можно использовать как генератор рентгеновских лучей или переменного тока (№ 1979275, выдан в 1934 г.).

В 1928 г. произошло еще одно важное событие: патент США на полупроводниковый прибор алюминий-оксид-сульфид меди, предвосхитивший на тридцатилетие его широкое применение в качестве **полевого транзистора металл-диэлектрик-полупроводник**.

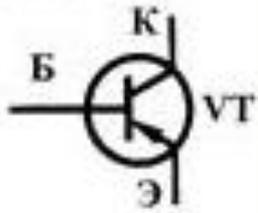


*Юлий Эдгар Лилиенфельд (Julius Edgar Lilienfeld; 18 апреля 1882, Львов — 28 августа 1963, Шарлотта-Амалия, Виргинские острова), физик, изобретатель транзистора. Юлий Эдгар Лилиенфельд родился 18 апреля 1882 г. во Львове в еврейской семье. Учился во Львовском университете и политехническом институте, в Берлине (1900-1904, Фридрих-Вильгельм университет), где слушал лекции, в частности, М. Планка. Доктор наук (1905). С 1910 по 1926 гг. был профессором Лейпцигского университета. В США с 1926 г. Знание инженерных наук помогало Ю. Лилиенфельду в его деятельности изобретателя. Ещё в Германии он сотрудничал с изобретателем и производителем стратостатов Ф. Цеппелином, исследовал рентгеновское излучение. В США разрабатывал новые виды радиоприемников. Исследователь и изобретатель активно общался с коллегами, выдающимися учёными, в своё время, в частности, переписывался с Альбертом Эйнштейном. На своём веку Ю. Лилиенфельд зарегистрировал в Германии 15 патентов, а в США — 60.*

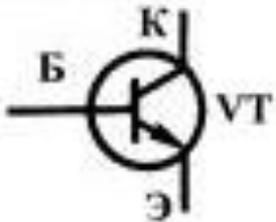
**НАЧАЛО ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭРЫ: ИЗОБРЕТЕНИЕ ТРАНЗИСТОРА В 1947 г.  
Дж. Бардин, В.Шокли и В. Брэттайн**



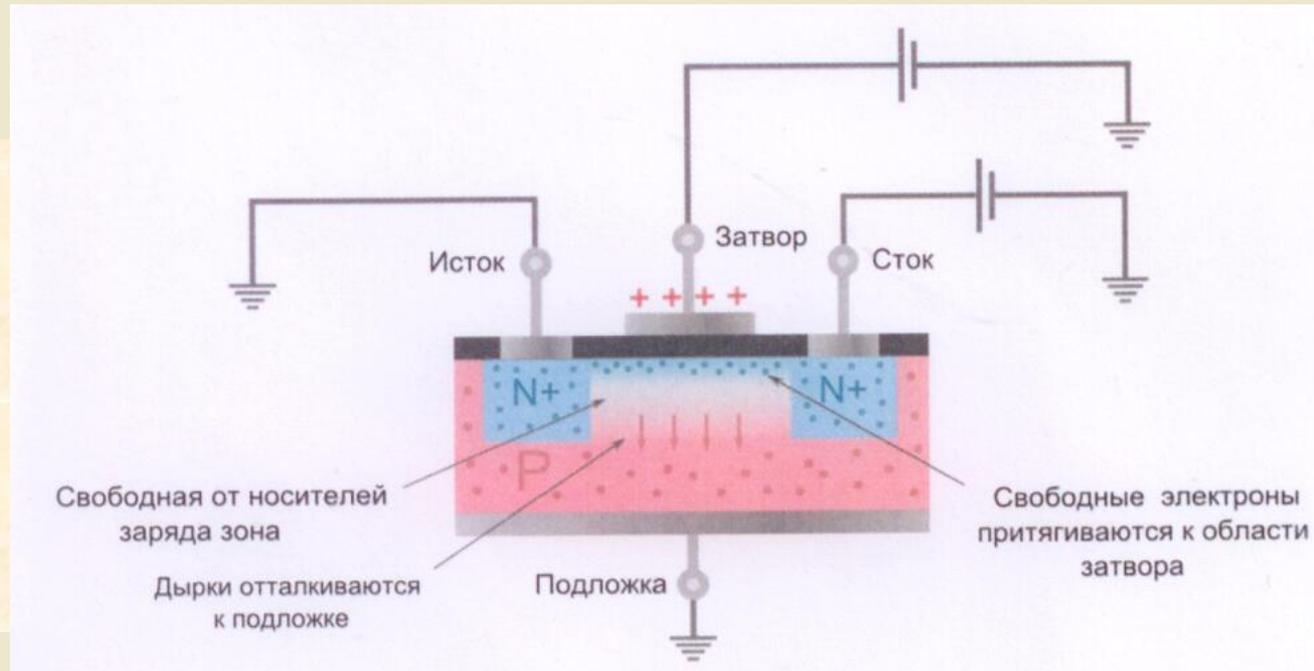
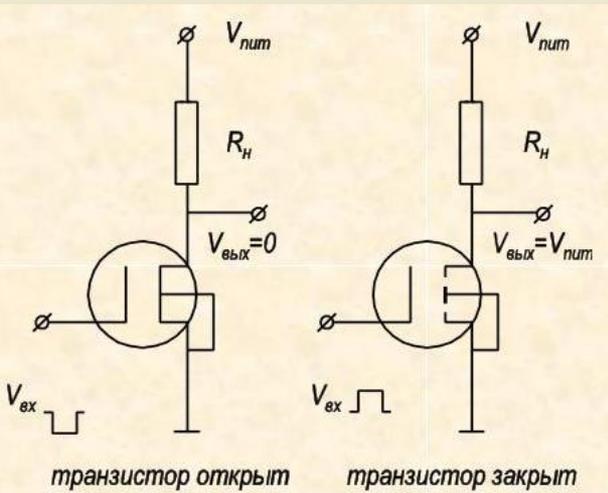
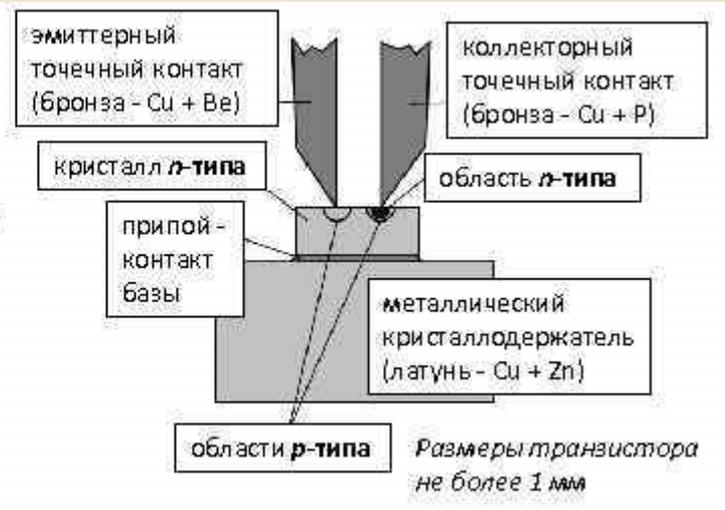
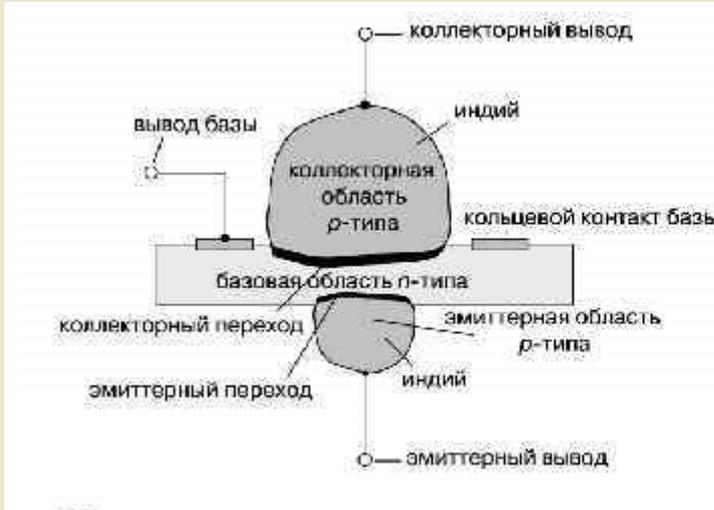
# ТРАНЗИСТОРЫ: точечные, сплавные и полевые



**p-n-p**

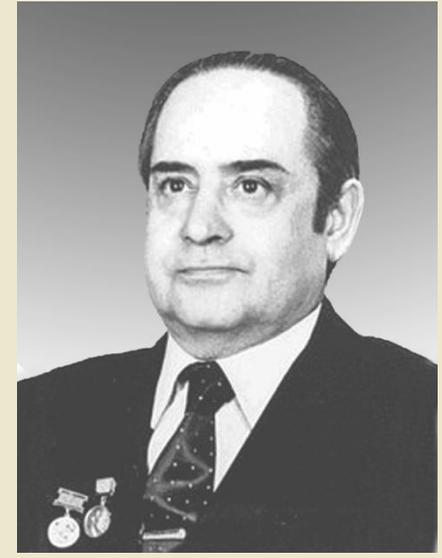
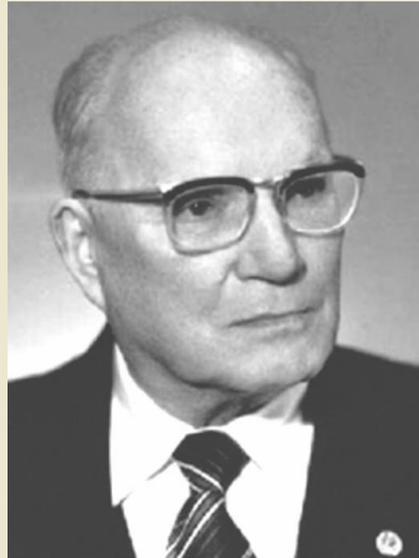


**n-p-n**



# СОЗДАТЕЛИ ПЕРВЫХ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ТРАНЗИСТОРОВ В СССР

Слайд 11  
конец 40-х – начало 50-х годов XX века



**Ржанов Анатолий Васильевич** (9.04.1920, Иваново — 25.07.2000, Новосибирск), д.ф.-м.н., академик, труды по физике диэлектриков и полупроводников. В 1941 г. окончил Ленинградский политехнический институт. Участник ВОВ. В 1948 г. окончил аспирантуру Физического института им.П.Н.Лебедева.

**Тучкевич Владимир Максимович** (29.12.1904, Яновцы — 24 июля 1997, Санкт-Петербург) — д.ф.-м.н., академик, директор ФТИ им. А.Ф.Иоффе, Герой Социалистического труда, лауреат Ленинской (1966) и Сталинской (1942) премий.

**Калашников Сергей Григорьевич** (9.02.1906, Николаев — 1984, Москва) — д. ф.-м. н. В 1930 г. окончил МГУ и работал на физфак е МГУ более 30 лет. С 1944 г. руководитель лаборатории полупроводников Радиотехнического института.

**Красилов Александр Викторович** (14.09.1910, Васильков — 7.07.2003, Москва). Принимал активное участие в развитии вакуумной электроники. В годы войны участвовал в создании радиолампового завода (НЭВЗ) в Новосибирске. Лауреат Сталинской премии 1949 г., директор НИИ «Исток».



**Академик РЖАНОВ Анатолий Васильевич**  
*- основатель и первый директор (1962-1990 г.г.)*  
*Института физики полупроводников*

Опыт исследований поверхностных электронных процессов свидетельствует о крайней важности химической чистоты и структурного совершенства объектов исследования для получения результатов, ценных в научном и техническом отношении. В отношении поверхностных явлений это требование распадается на два.

Во-первых, чрезвычайно высокие требования должны предъявляться к чистоте и совершенству структуры самого кристалла полупроводника, объемные свойства которого должны быть хорошо изучены.

Во-вторых, весьма важным является требование химической определенности и возможной простоты структуры самой поверхности полупроводника или, точнее, границы раздела между полупроводником и покрывающей его защитной пленкой.

А.В.Ржанов  
Электронные процессы на поверхности полупроводников,  
Москва, Наука, 1971, с.8-9.

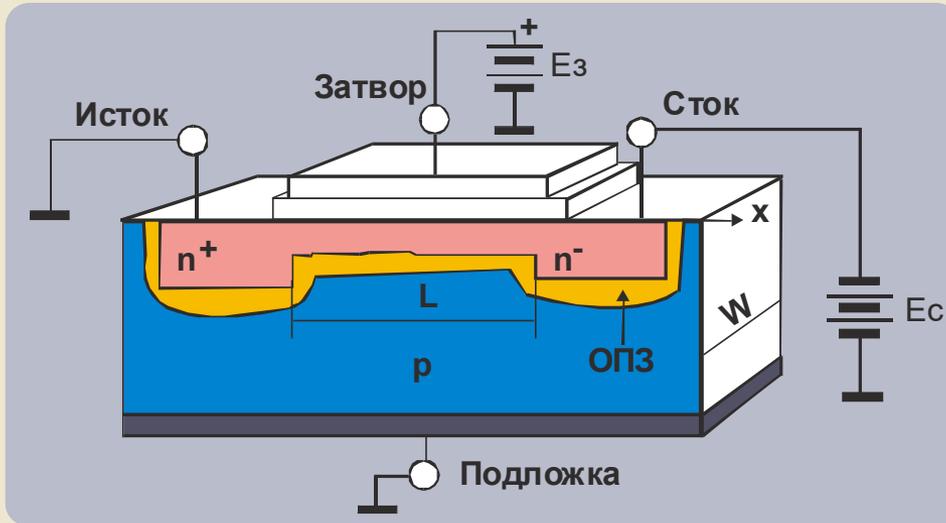


Целый ряд особых проблем возникает в связи с необходимостью создания полупроводниковых сенсорных систем.

Наиболее сложной из этих проблем является, по-видимому, проблема создания «полупроводникового глаза», который, согласно имеющимся представлениям, должен представлять собой матричное фотоприемное устройство, содержащее около  $10^6$  фоточувствительных элементов в сочетании со схемами считывания и предварительной обработки фотосигналов.

А.В.Ржанов, К.К.Свиташев  
Полупроводниковая микроэлектроника и технический прогресс,  
Микроэлектроника, 1982, Т.11. вып.6

# МДП-ТРАНЗИСТОР-ОСНОВНОЙ ПРИБОР КРЕМНИЕВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ



- ✓ Полевой транзистор с изолированным затвором состоит из пластины полупроводника – **подложки** с относительно высоким удельным сопротивлением, в которой созданы две области с противоположным типом электропроводности **исток и сток**.
- ✓ Поверхность полупроводника между истоком и стоком покрыта тонким слоем **диэлектрика** (обычно слоем оксида кремния).
- ✓ На слой диэлектрика нанесен металлический электрод - **затвор**. Получается структура, состоящая из металла, диэлектрика и полупроводника.
- ✓ Поэтому полевые транзисторы с изолированным затвором часто называют **МДП- транзисторами или МОП- транзисторами** (металл - оксид- полупроводник).

## Решение проблемы поверхностных состояний - ключ к созданию современных МДПТ

Основные усилия разработчиков полупроводниковых приборов с 1948 по 1960 год было сосредоточено на стабилизации их характеристик

Решающим этапом в этой деятельности надо считать работу М.М.Аталла, М.Танненбаум, Е.Д.Шейбнер **“Stabilization on silicon surface by thermally grown oxide”** Bell.S.T.J.v.38,N3,p.122(1959)

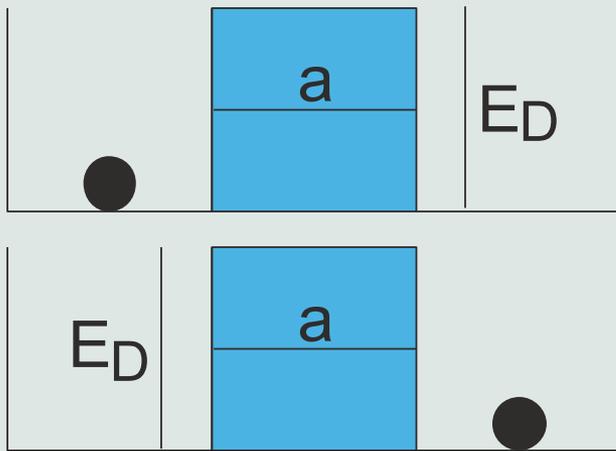
Сразу же за этим появилась первая публикация о создании транзистора с изолированным затвором:  
D.Kahng, M.M.Atalla. **“Silicon – silicon dioxide field induced surface device”**  
Proc.Conf.Sol.St.Dev.Pittsburgh,PF,1960

Проблемы физики поверхности полупроводников рассмотрены в монографии:  
А.В. Ржанов **“Электронные процессы на поверхности полупроводников”**, Москва, Наука, 1971г.

Г.Я.Красников «Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов», в 2-х частях, Москва, Техносфера, 2002, 2004;

Г.Я.Красников, Н.А.Зайцев «Система кремний-диоксид кремния субмикронных СБИС», Москва, Техносфера, 2003, 383 с.

# Оценка минимальных параметров разделительного барьера для переключения вычислительных состояний



Для осуществления операций в вычислениях бинарной логики необходимо иметь два состояния, разделённые энергетическим барьером.

Понятие разделительного барьера подразумевает низкую вероятность спонтанного перехода между двумя состояниями (ямами).

Минимальный разделительный барьер соответствует вероятности  $\Pi = 0,5$

$$\Pi_{classic} = \exp\left(-\frac{E_b}{k_B T}\right)$$

$$\frac{1}{2} = \exp\left(-\frac{E_b}{k_B T}\right) \quad \longrightarrow \quad E_b = k T \ln 2 = 0.017 \text{ eV (300 K)}$$

Выражение Шеннона-Неймана-Ландауэра для минимальной энергии для однобитовой операции

*Zhirnov et.al. Proc. IEEE 91,1934 (2003)*

# Определение минимальных параметров транзистора, как элемента бинарной логики

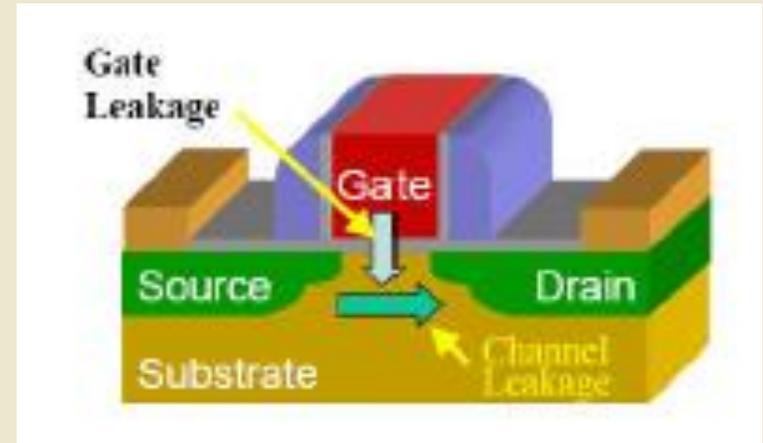
Из соотношений  
неопределённости  
Гейзенберга:

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar \quad \Delta E \Delta t \geq \hbar$$

$$x_{\min} = \frac{\hbar}{\Delta p} = \frac{\hbar}{\sqrt{2m_e E_{\min}}} = \frac{\hbar}{\sqrt{2m_e k_B T \ln 2}} = 1.5 \text{ nm} (300 \text{ K})$$

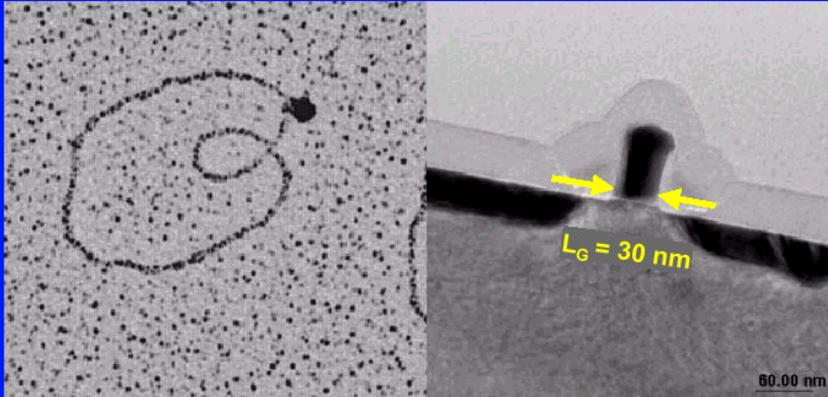
$$t_{\min} = \frac{\hbar}{\Delta E} = \frac{\hbar}{k_B T \ln 2} = 0.04 \text{ ps}$$

$$n_{\max} = \frac{1}{x_{\min}^2} 4.7 \cdot 10^{13} \text{ элементов/см}^2$$



**Вычисленные параметры**  
близки к параметрам  
транзисторов,  
разрабатываемых в настоящее  
время.

## Transistors as Small as DNA



10 nm gold particle attached to Z-DNA antibody  
[ John Jackson & Inman. *Gene* 198984-226 ]

30 nm gate length ( $L_G=30$ )  
Intel Research Transistor



Copyright © 2001 Intel Corporation

<http://intel.com/labs/>

При уменьшении площади транзисторов падает емкость затвора, что требует уменьшения толщины подзатворного диэлектрика и перехода на диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью – оксиды Al, Hf, Zr, Ta, Ti и др.

$$I_D = \frac{W}{L} \mu C_{inv} \frac{(V_G - V_T)^2}{2},$$

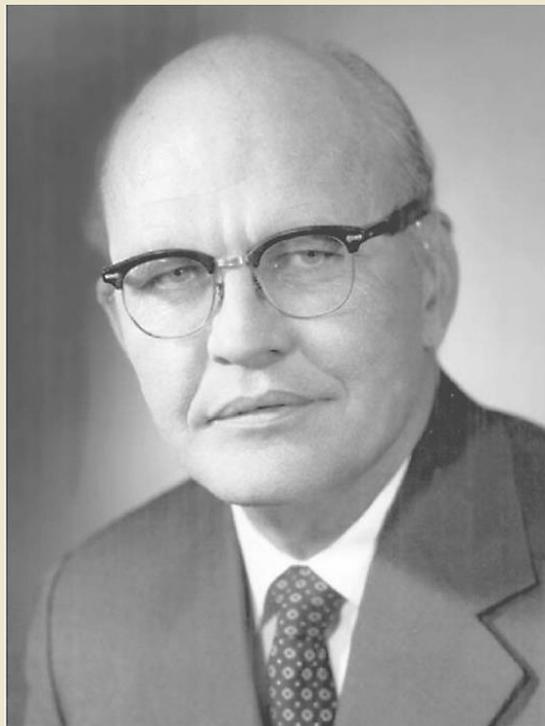
$$C = \frac{\kappa \epsilon_0 S}{d},$$

*Ток насыщения и емкость транзистора*

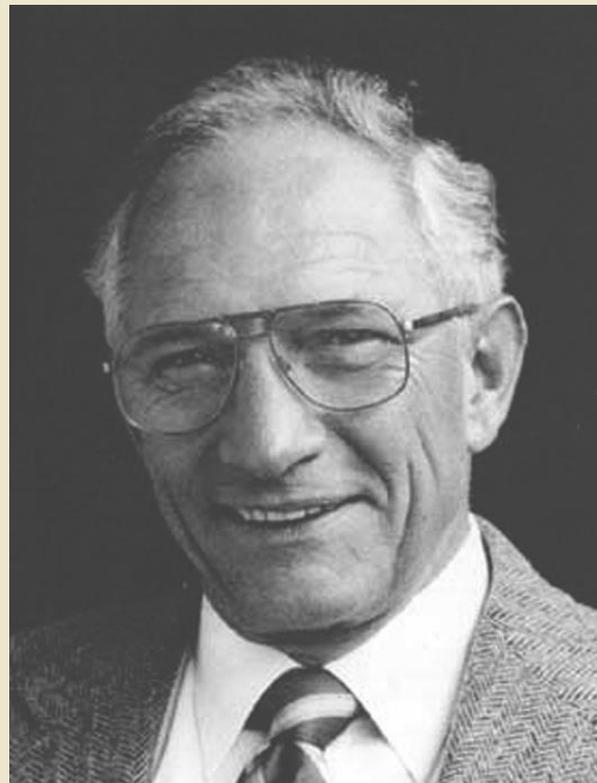
Коэффициенты низкочастотной диэлектрической проницаемости для наиболее распространенных диэлектриков:

SiO<sub>2</sub> - 3,9; Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> - 7,0; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 10; HfO<sub>2</sub> – 12-40; ZrO<sub>2</sub> - 12-40; Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> - 25-100; TiO<sub>2</sub> - 40-170; Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 16; MgO - 9,7; SrTiO<sub>3</sub> - 310.

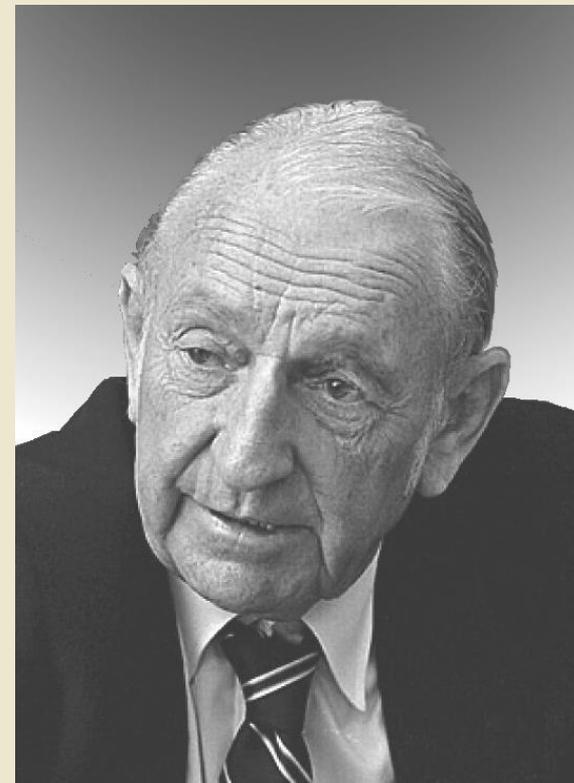
## СОЗДАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ НА КРЕМНИИ И ПЛАНАРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИХ ПРОИЗВОДСТВА



**Килби Джек Сент-Клэр (Jack St. Clair Kilby, 8.11.1923, Джефферсон-Сити – 20.06.2005, Даллас, США) – лауреат Нобелевской премии по физике 2000 г. за изобретение интегральной схемы в 1958 г. в период работы в Texas Instruments .**



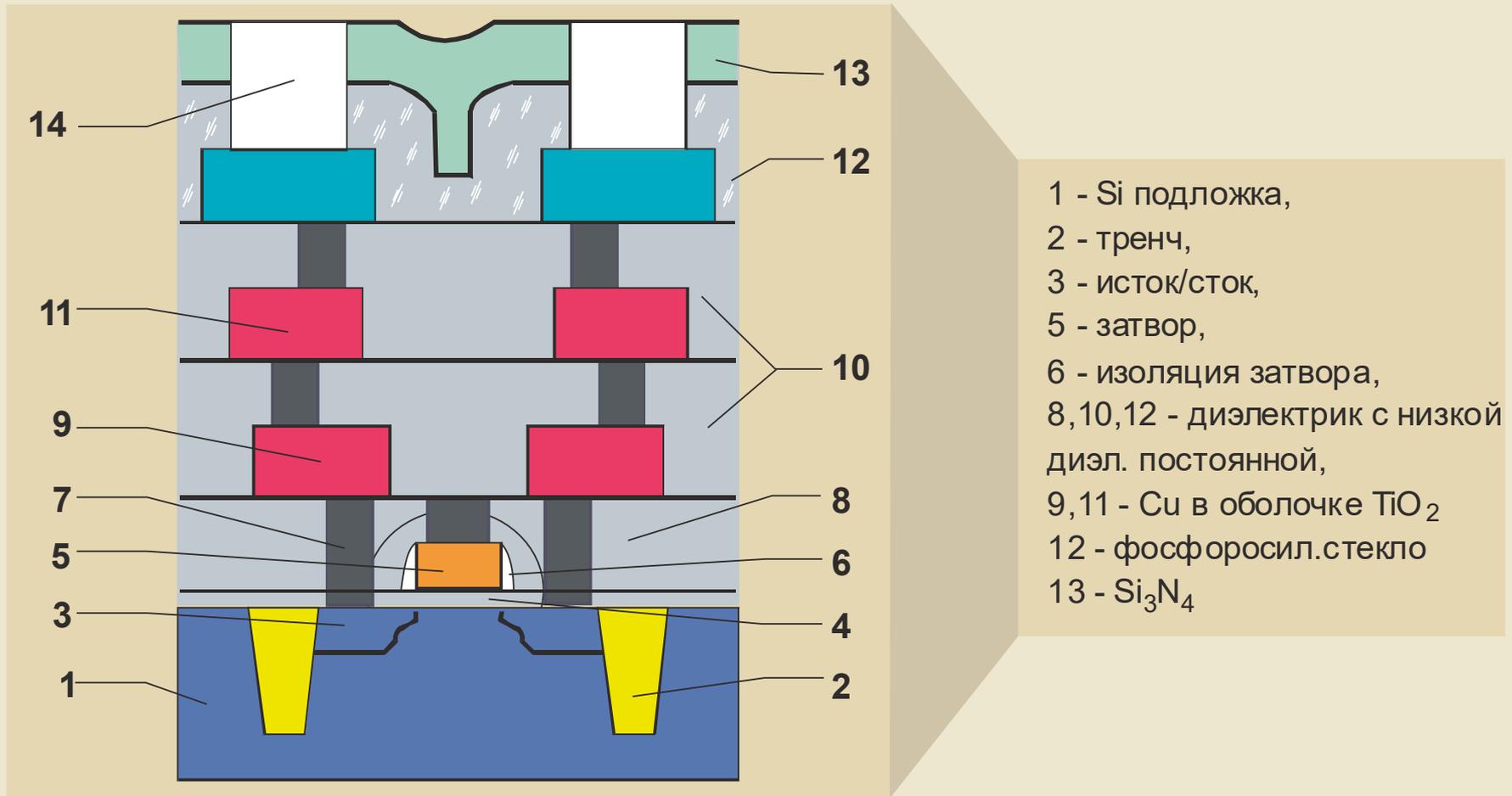
**Нойс Роберт Нортон (Robert Norton Noyce; 12.12.1927, Берлингтон, – 3.06.1990, Остин, США) – работал в Shockley Semiconductor Laboratory, затем в Fairchild Semiconductor. Р.Нойс, практически одновременно с Д.Килби изобрел интегральную микросхему.**



**Жан Амеде Эрни (Jean Amédée Hoerni; 26.09.1924, Женева, Швейцария – 12 января, 1997, Сиэтл, США) – один из создателей кремниевых транзисторов. Разработал планарный процесс производства полупроводниковых интегральных схем.**

## Проблема межсоединений (разводка)

Для предотвращения увеличения задержки в качестве проводников вместо Al применяется медь. А в качестве межслоевого диэлектрика – фосфоросиликатное стекло и различные силсеквиоксаны с  $\epsilon < \epsilon \text{ SiO}_2$



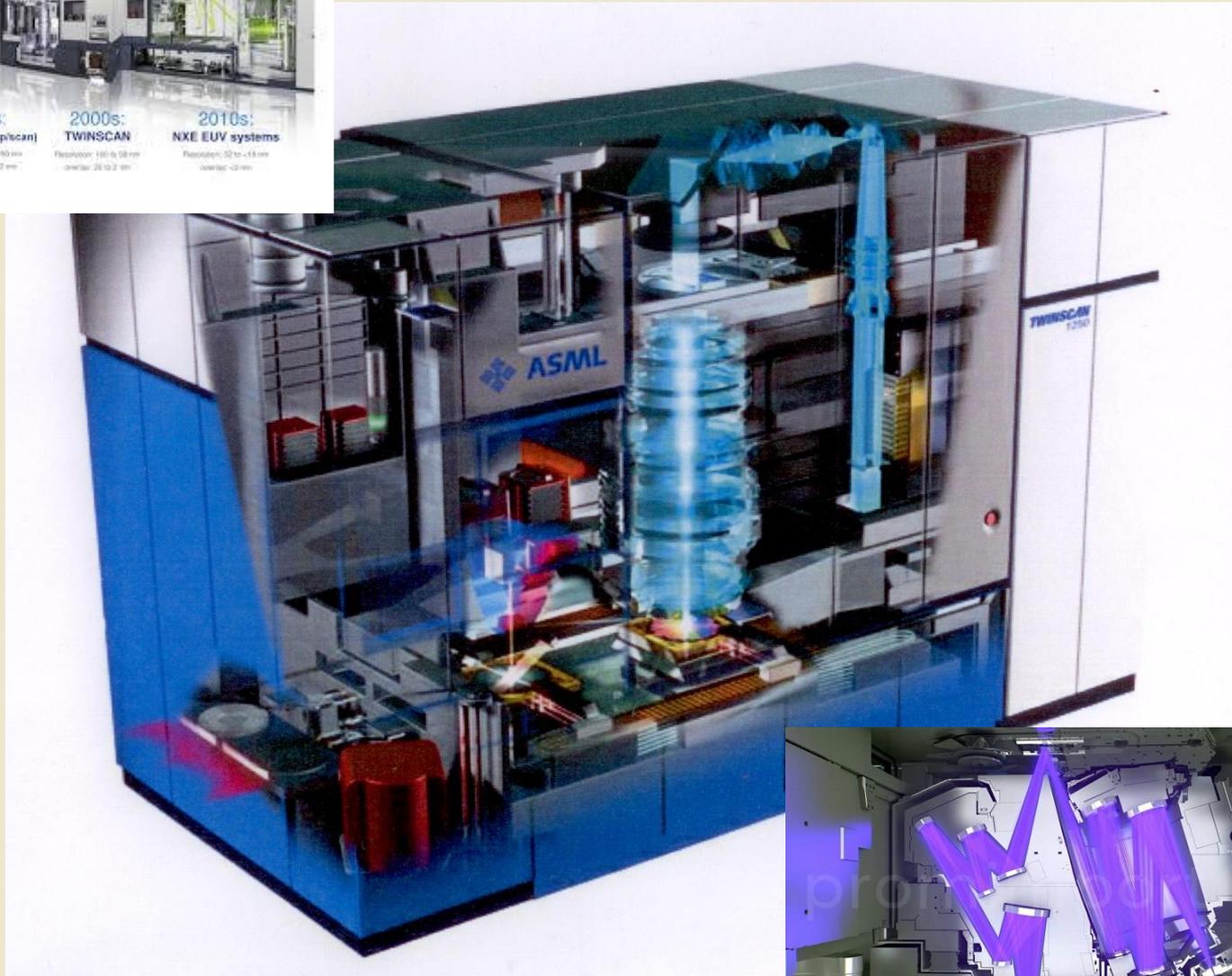
# МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ КРЕМНИЙ – ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ СОВРЕМЕННОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ



450 мм

300 мм

# УСТАНОВКА МИКРОФОТОЛИТОГРАФИИ TWINSCAN XT:1250 ФИРМЫ ASML

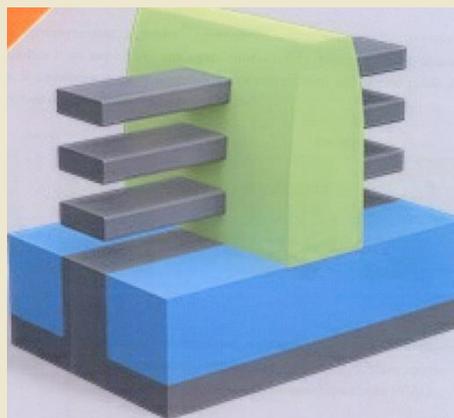
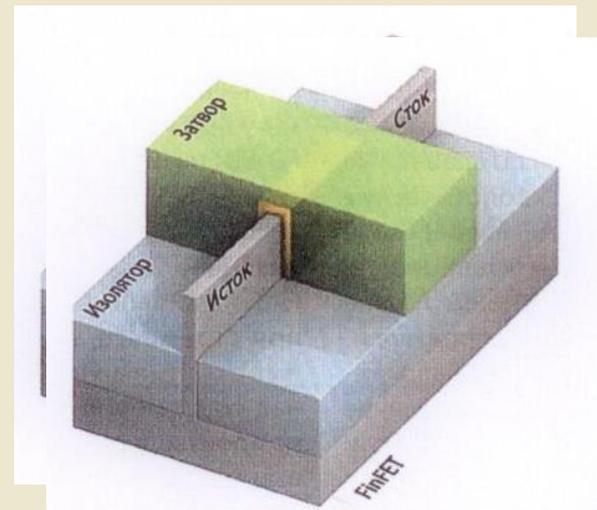
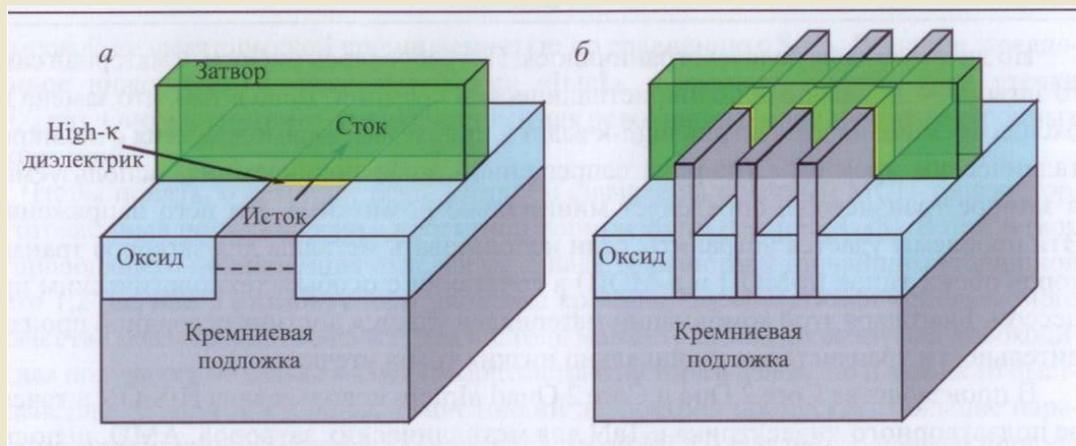


# ВЕДУЩИЕ МИРОВЫЕ ПРОИЗВОДИТЕЛИ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ

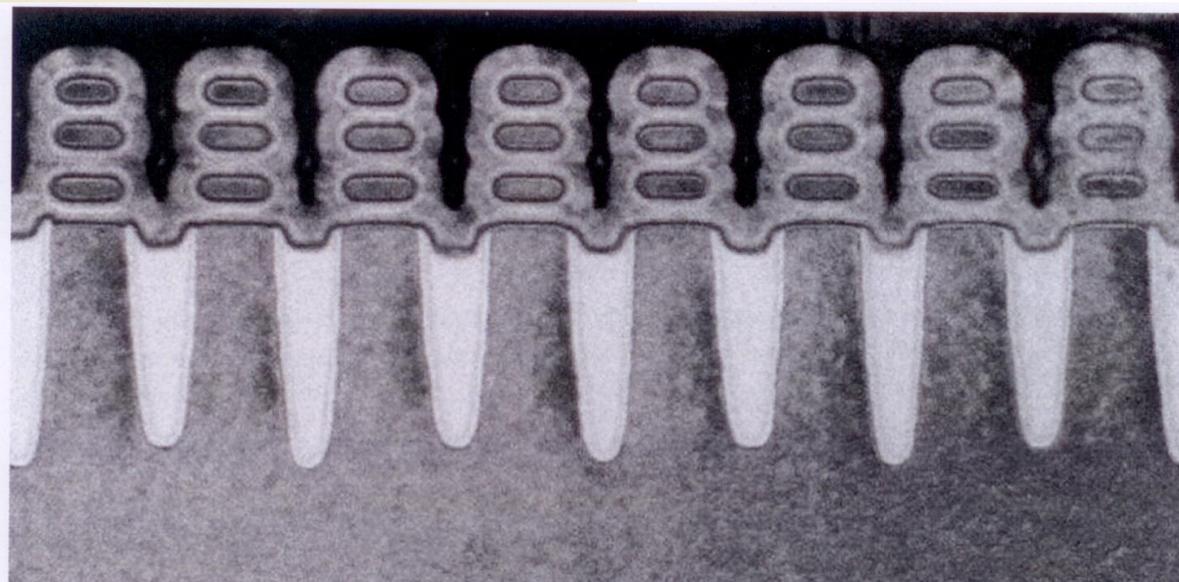
В настоящее время дальнейшее уменьшение длины затвора FET от **22 нм до, последовательно, 14, 10, 7, 5 нм и 3 нм осуществляется различными конструкциями FET:**

- ❖ Классический планарный нанопроволочный FET на полностью обедненных носителях заряда тонких структурах кремний-на-изоляторе - FD FET. Этот тип конструкции развивается STMicroelectronics, IMEC (Европа), IBM, Global Foundries (США) и другими;
- ❖ Новая конструкция нанопроволочных трехмерных непланарных FET, называемых «плавниковыми» или «трехзатворными» - Fin FET или TriGate FET развивается Intel, AMD, Samsung, Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC) и другими;
- ❖ Вертикально интегрированные микросхемы предельной плотности – IBM, Samsung, Taiwan Semiconductor Manufacturing Company;
- ❖ В России основное производство микросхем сосредоточено в ПАО «Микрон» вместе с АО «НИИ Молекулярной электроники» (г. Зеленоград);
- ❖ Литографическое оборудование для российской микроэлектроники разрабатывается и производится предприятием «Планар» в Республике Беларусь».

# Современная кремниевая электроника: эволюция МДП-транзистора

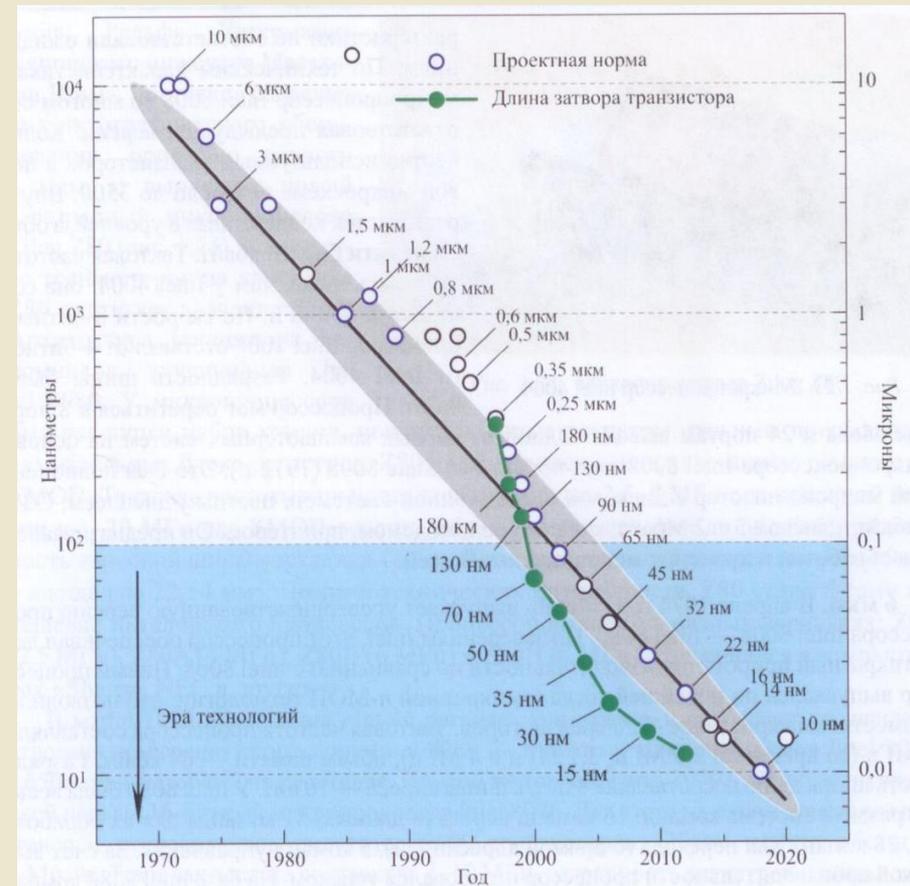
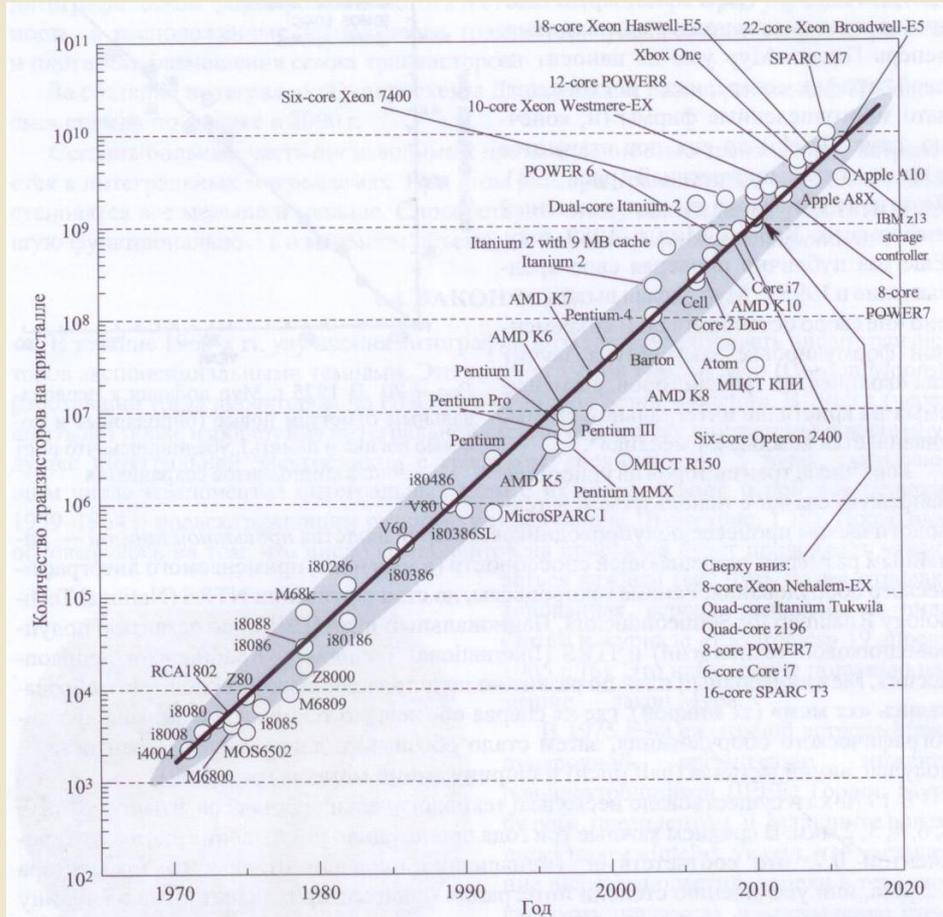


**5 нм нанопластинчатый  
МДП-транзистор с  
круговым затвором,  
Gate All Around FET**



**TSMC, Samsung, IBM, Intel**

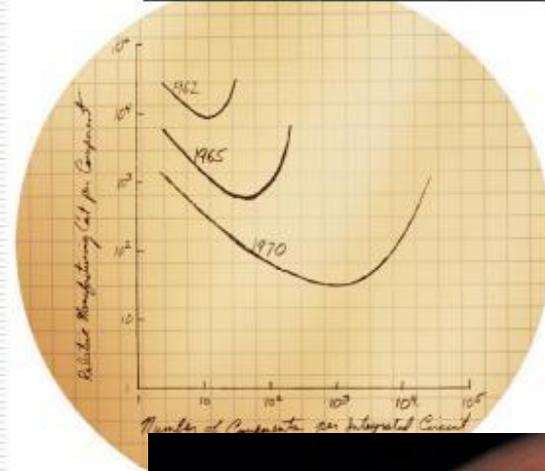
# ИЗМЕНЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ТРАНЗИСТОРОВ НА КРИСТАЛЛЕ МИКРОСХЕМ, ПРОЕКТНОЙ НОРМЫ И ДЛИНЫ ЗАТВОРА ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ПО ГОДАМ - ЗАКОН МУРА (MOORE'S LAW)



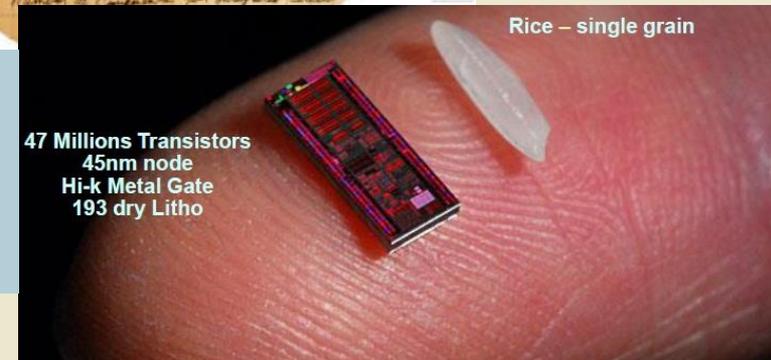
Про топологическую норму: с 2014 года из "классической планарной" в «эффективную объёмную на чипе» силами маркетологов Samsung.

# Закон Мура

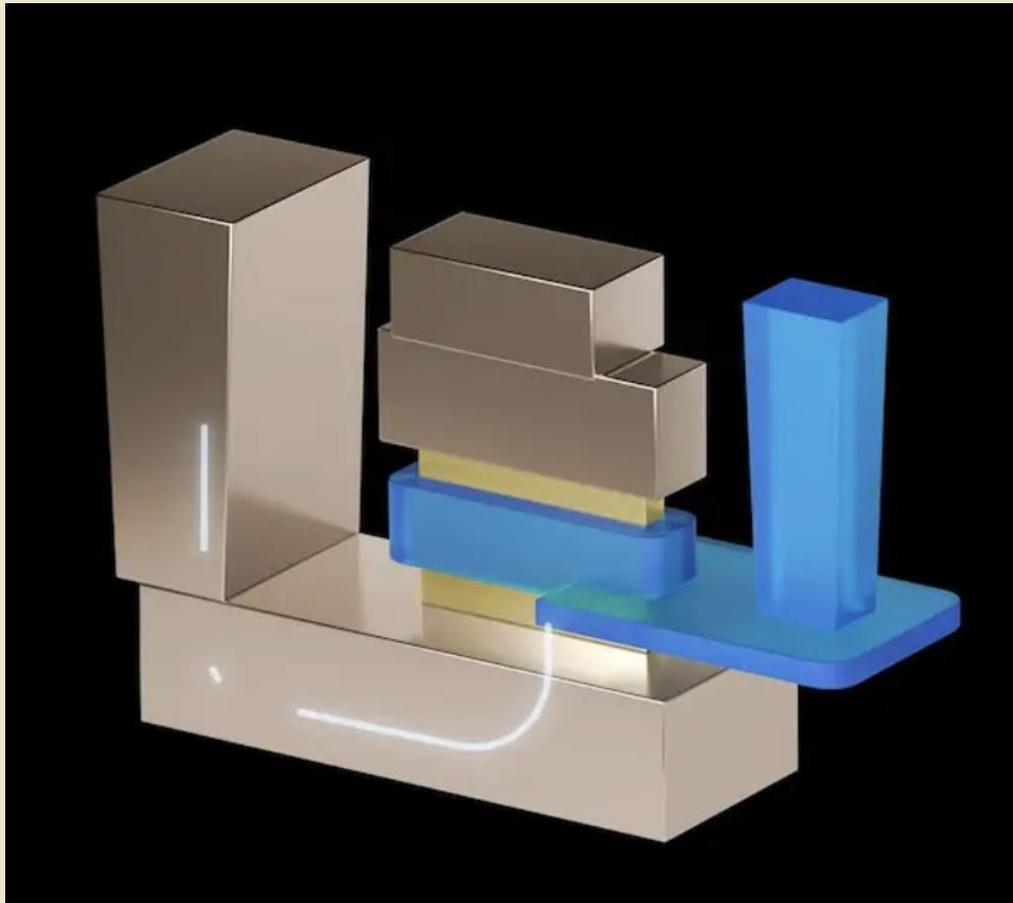
- В 1978 году авиабилет по маршруту Нью-Йорк-Париж стоил около 900 долларов, а перелет длился около 7 часов. Если бы авиаиндустрия развивалась в соответствии с законом Мура, то сегодня авиабилет на тот же маршрут стоил бы менее цента, а перелет занял бы менее одной секунды.
- За время существования корпорации Intel (то есть с 1968 года) себестоимость производства транзисторов упала до такой степени, что теперь обходится примерно во столько же, сколько стоит напечатать любой типографский знак — например, запятую.



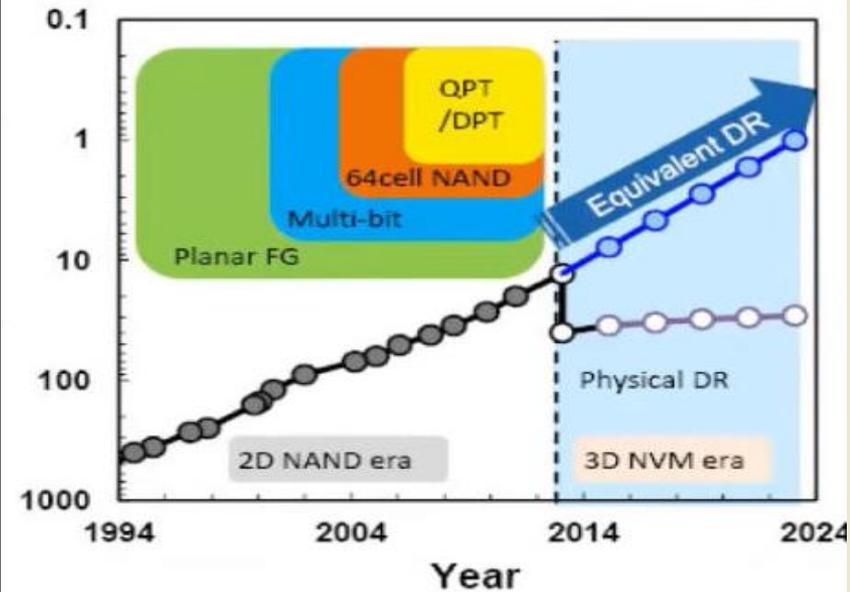
Подобный прогресс в автомобильной промышленности привел бы к цене автомобиля в несколько центов, а на одной заправке бензобака можно было бы преодолеть расстояние от Земли до Луны.



# VTFET – Вертикально ориентированный полевой транзистор с разноуровневым расположением истока и стока

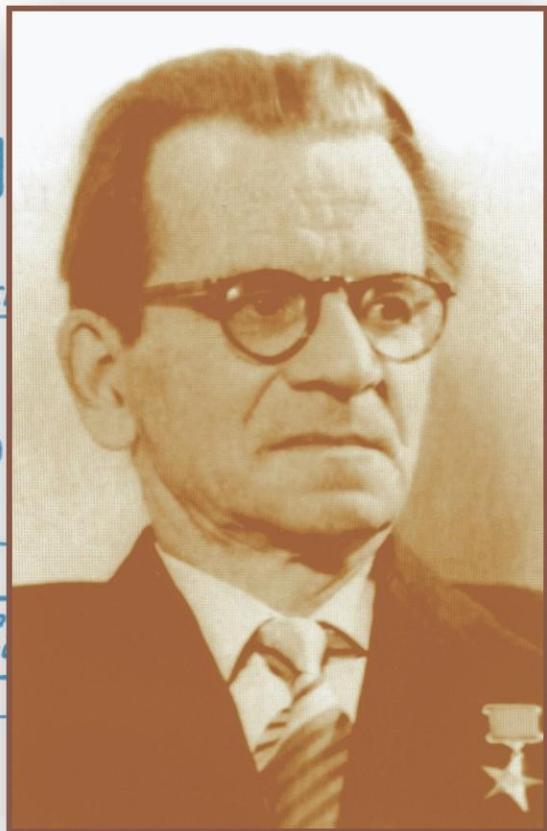


67<sup>th</sup> Annual International Electron Devices Meeting, December 11-15, 2021, San Francisco.

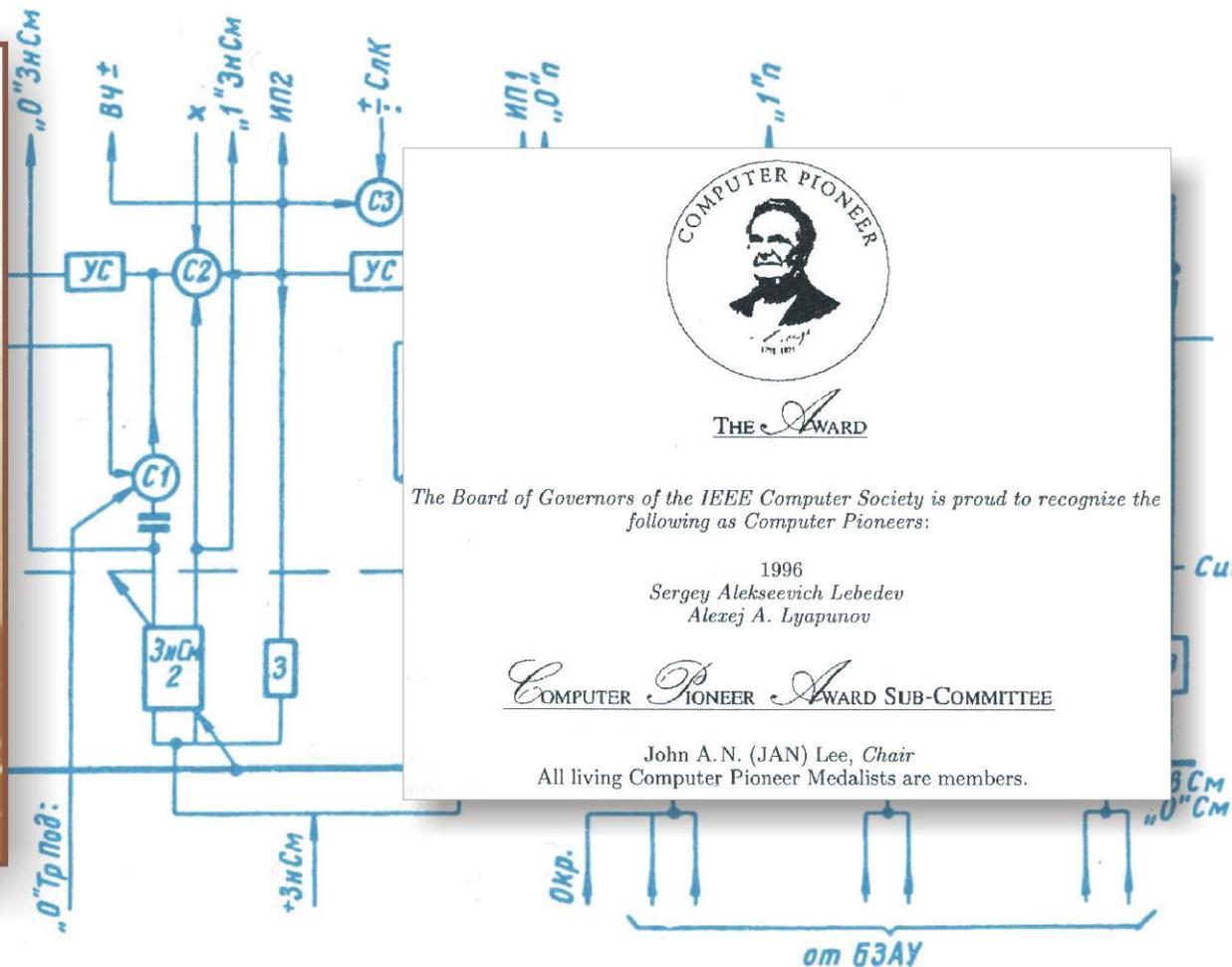


Предложенная IBM и Samsung технология VTFET в два раза повышает производительность интегральных микросхем, на 85% снижает энергопотребление и обеспечивает действие закона Мура на ближайшие годы.

## Сергей Алексеевич ЛЕБЕДЕВ - основоположник отечественной электронной вычислительной техники



1902-1974 гг.



С.А. Лебедевым и учеными его школы создано три поколения ЭВМ и мощных вычислительных систем (ламповые ЭВМ: МЭСМ, БЭСМ, М-20 и др.; полупроводниковые ЭВМ: БЭСМ-6 и др.; машины и системы с использованием интегральных схем: 5Э26, Эльбрус-2 и др.).

## The Russians Are Coming

*Supercomputer Maker Elbrus Seeks to Join x86/IA-64 Melle*

### Сравнительные характеристики микропроцессоров E2k (Эльбрус Интерн.) и Merced (Фирма Intel)

Микропроцессор	E2K	Merced
Тактовая частота, ГГц	1,2	0,8
Производительность, SPECint95 / SPECfp95	135 / 350	45 / 70
Размер кристалла, мм <sup>2</sup>	126	300
Энергопотребление, Ватт	35	60
Пропускная способность шины, Гбайт/сек	15	н/д
Кэш (Кбайт)	64 / 256	н/д
Пиковая производительность, GFLOPS	10,2	н/д

# БАГЕТ

Вопрос к вам:  
Зачем важна «конфиденциальность»?



ЭВМ для обработки конфиденциальной информации

# РОССИЙСКАЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ

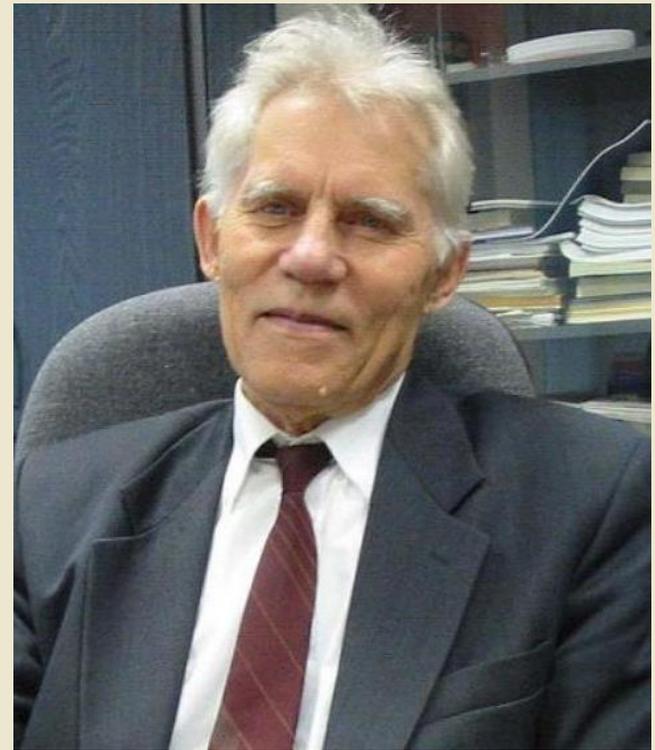
ЗАО «Международный центр SPARC технологий» (г.Москва) - ведущий в России разработчик микропроцессоров «Эльбрус» с проектными нормами 130 нм (2005 г.), **90 нм (2010 г.), 65 нм (2014 г.)** и 14 нм (2020 г.). Микропроцессоры применяются, в основном, для построения вычислительных комплексов «Эльбрус-3М» для нужд систем ПВО и ПРО Минобороны РФ. Изготавливаются на заводах АО «НИИМЭ» и ПАО «Завод Микрон» (г. Зеленоград) и «Taiwan Semiconductor Manufacturing Company» (TSMC) по российской документации. Представляют собой двух- и четырехядерные системы со встроенными кэш памятью, контроллерами оперативной и периферийной памятью и по скорости обработки данных превышают или сравнимы с процессорами Pentium.



Компактная материнская плата «Монокуб-М», ядро которой — процессор «Эльбрус-2СМ», производимый АО «НИИМЭ» и ПАО «Завод «Микрон» по технологии 90 нм.

Выдающийся ученый и специалист в области теории спектроскопии (магнитный резонанс, молекулярное рассеяние и поглощение света), по которым были защищены кандидатская (1958) и докторская (1963) диссертации. К.А.Валиев внес основополагающий вклад в становление и развитие отечественной микроэлектроники, возглавив в 1965-1978 гг. НИИ молекулярной электроники и завод «Микрон» в подмосковном Зеленограде. Основал и заведовал кафедрой интегральной электроники и микросистем МИЭТ. Под руководством К.А.Валиева созданы первые отечественные интегральные микросхемы гражданского и специального назначений, что обеспечило необходимый паритет в развитии отечественных ЭВМ и систем для обороны и безопасности страны. В числе научных заслуг – развитие физики субмикронной литографии для современной микроэлектроники. Внес большой вклад в формирование новых направлений – физики квантовых вычислений, квантовой и информатики и квантовой криптографии.

**В 2020 г. Российская Академия наук учредила Золотую медаль им. К.А.Валиева за выдающиеся достижения в области микро- и наноэлектроники.**

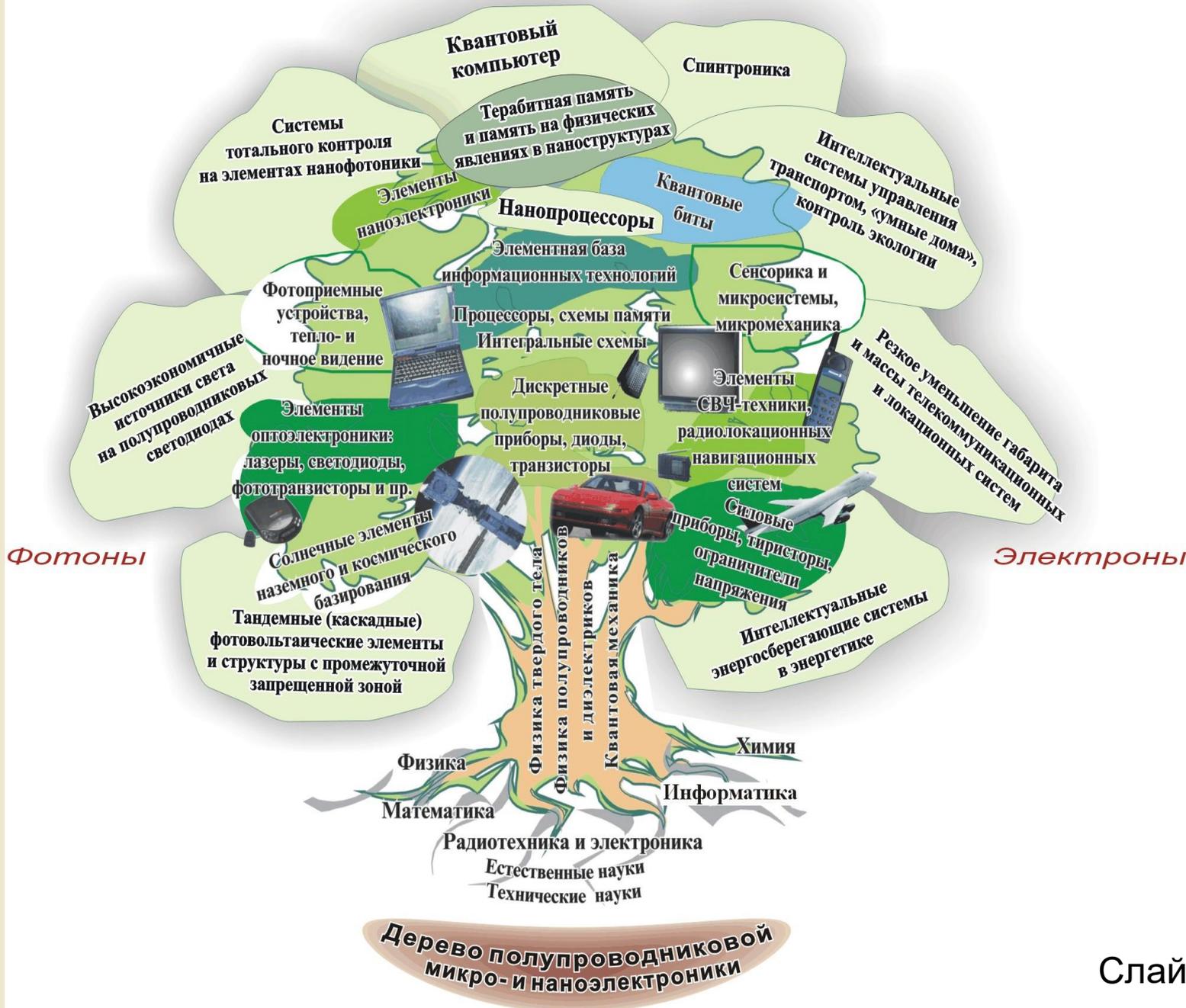


**Валиев Камиль Ахметович** (15.01.1931 года – 28.07.2010 года) – советский и российский физик, д.ф-м.н., профессор, академик АН СССР (1984), основатель, первый директор и научный руководитель Физико-технологического института РАН, лауреат Ленинской премии (1974).

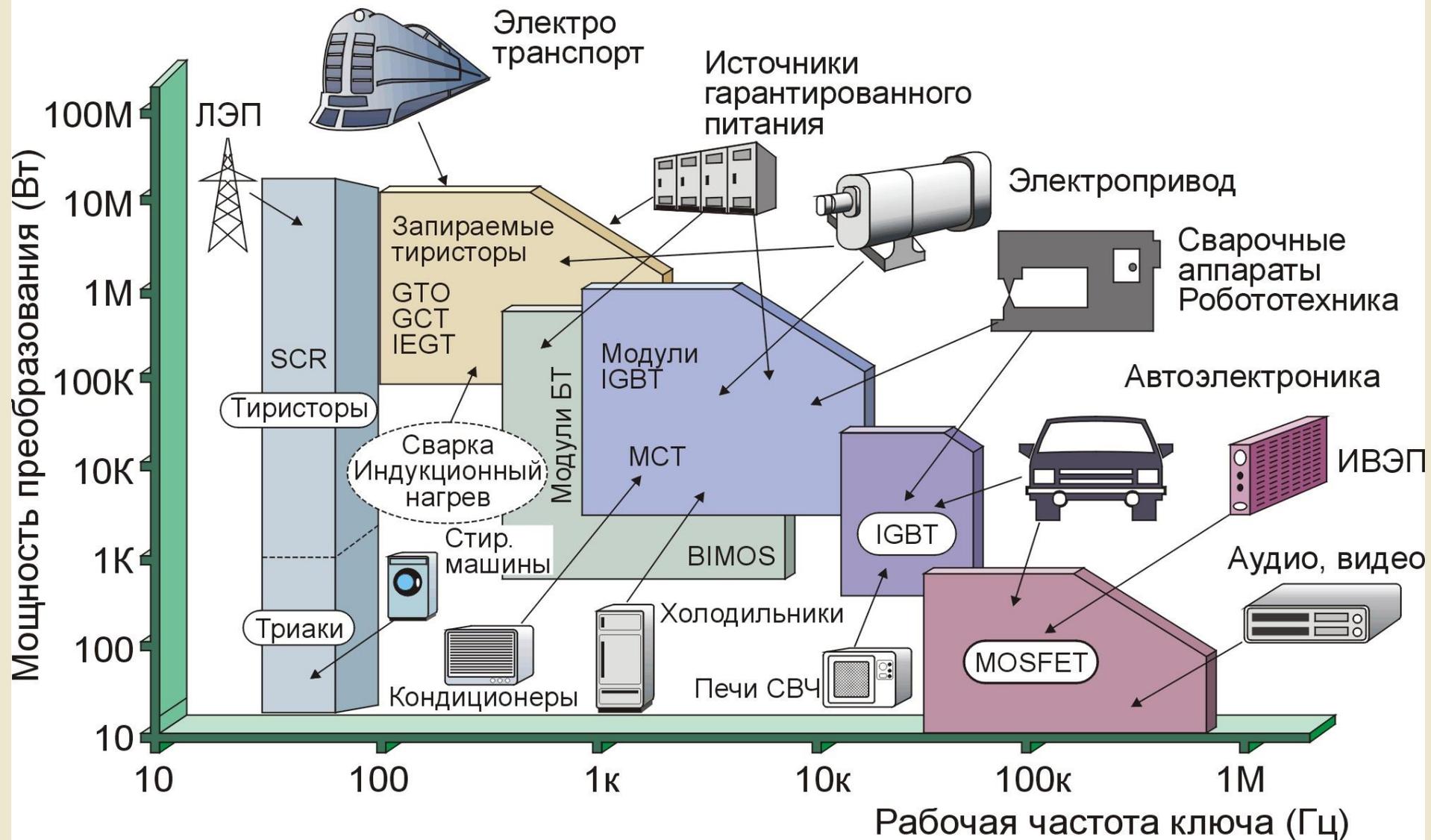
## **Советский космический корабль «Буран»**

*Совершил два витка орбитального полета вокруг Земли с посадкой на космодроме Байконур в автоматическом режиме в **1988** г.*



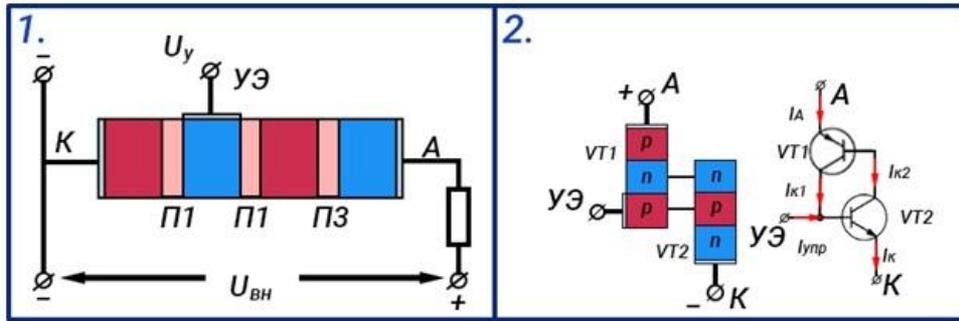


# Области применения элементов силовой электроники и ключевые полупроводниковые приборы

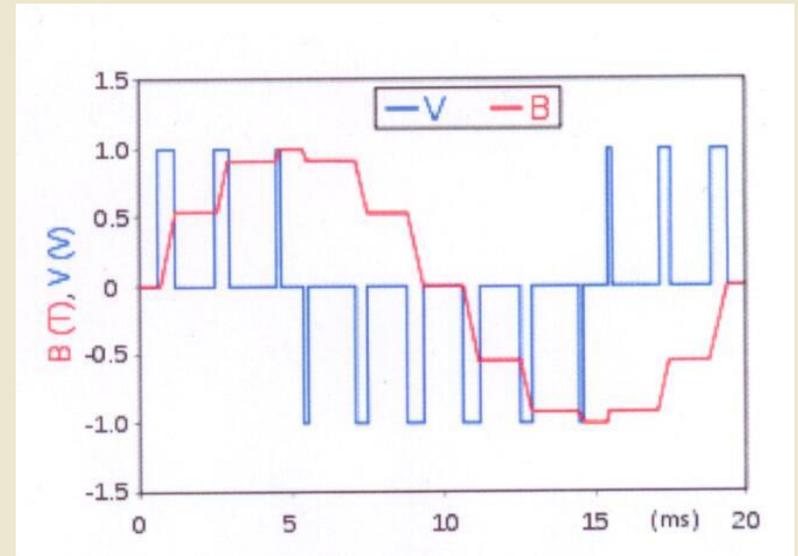
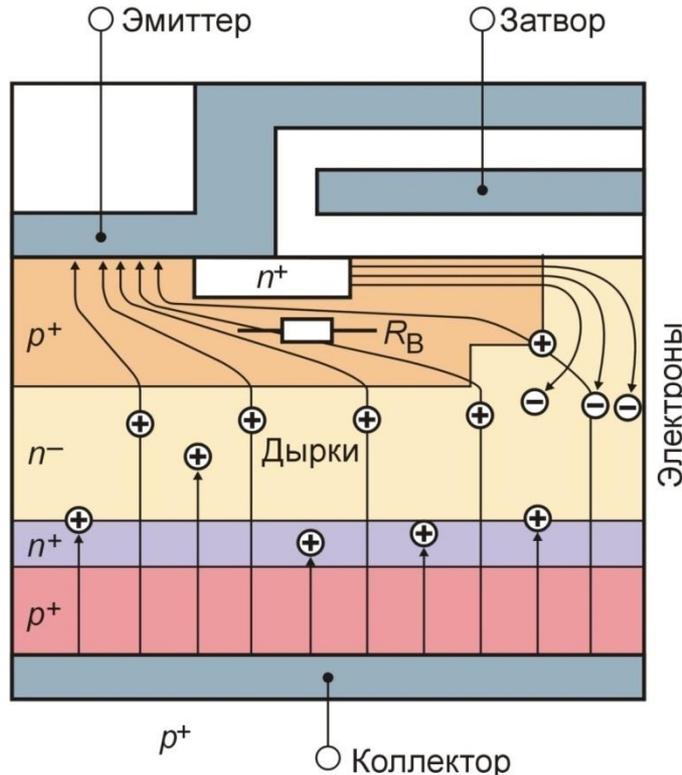


# Тиристор

Для элементов силовой электроники используют высокочистый (по электр. активным примесям менее  $10^{12} \text{ см}^{-3}$ , по эл. неакт. примесям менее  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) высокосовершенный кремний, получаемый методом бестигельной зонной плавки

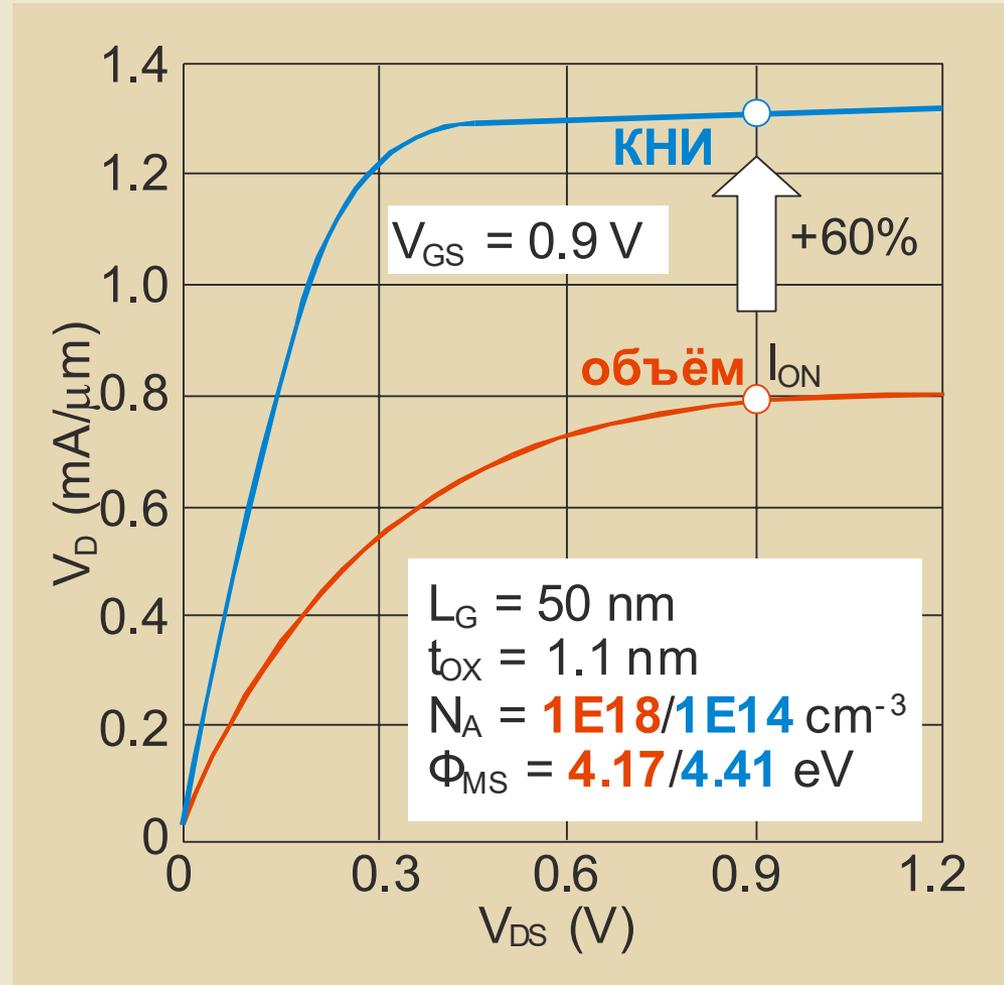
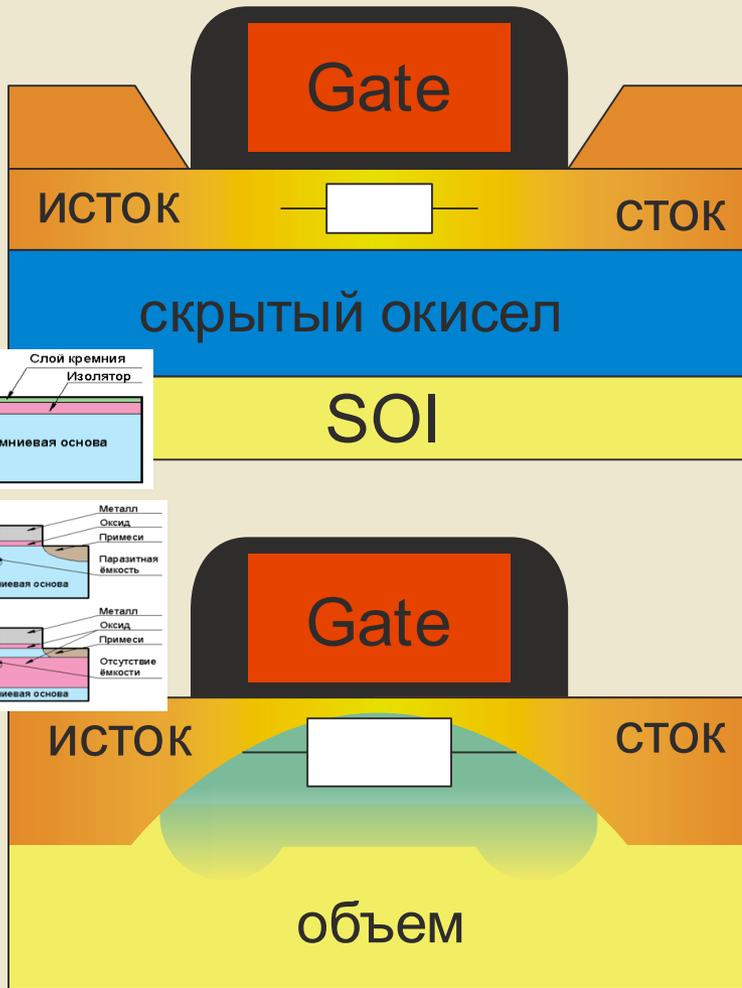


Структура биполярного транзистора с изолированным затвором



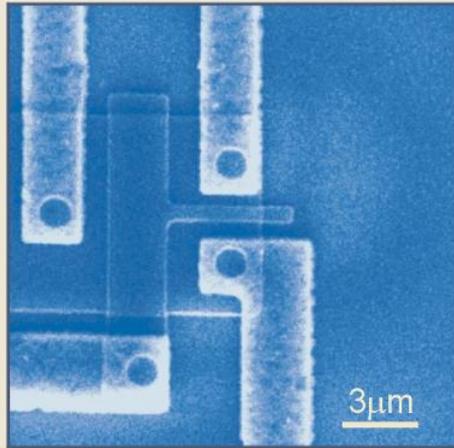
Принцип широтно-импульсной модуляции при управлении электродвигателем.  $V$  - напряжение от ШИ-модулятора и  $B$  - магнитный поток в статоре машины.

# Мотивация перехода к КНИ КМОП транзисторам на ультра тонком кремнии с нелегированной базой

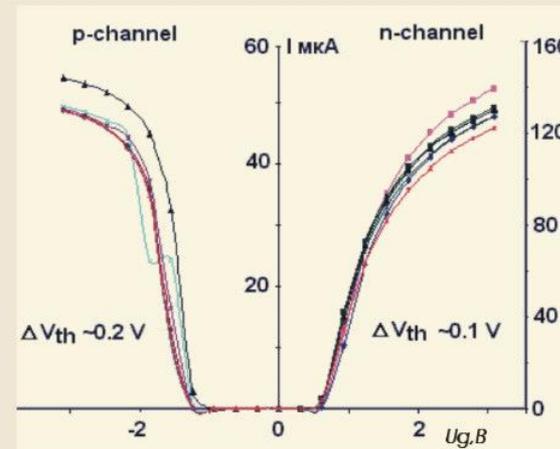
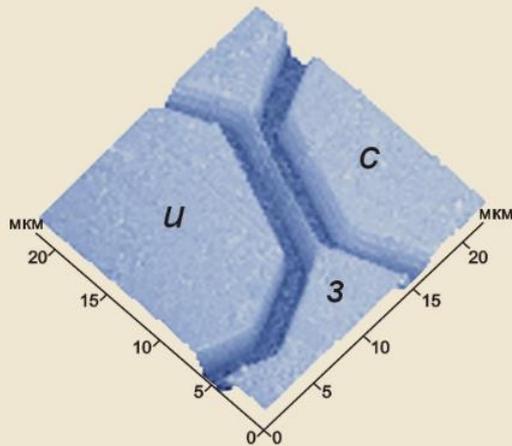
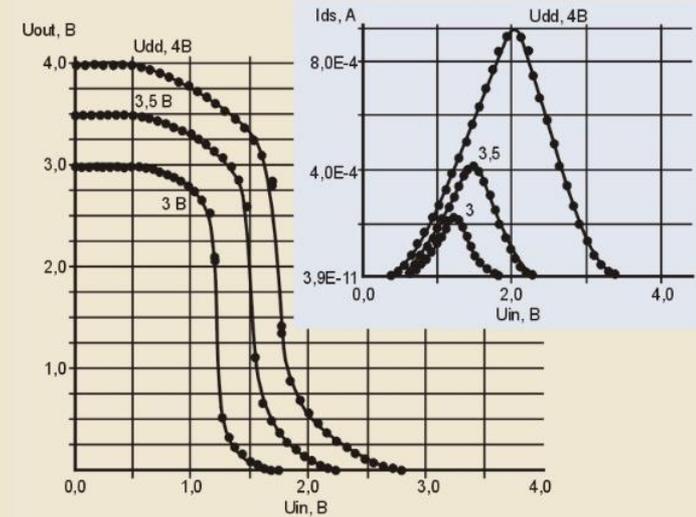
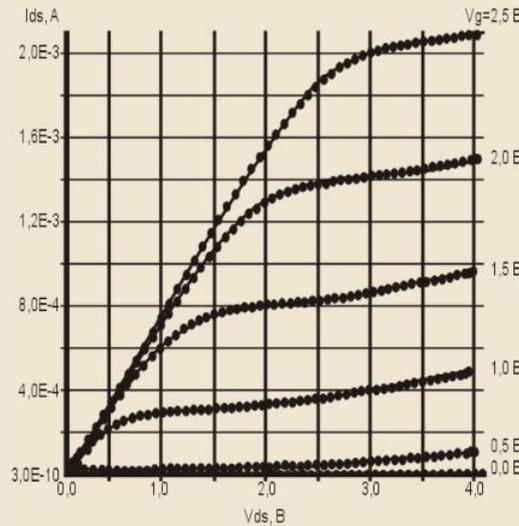


**Наилучшие параметры для нелегированных каналов!!!**

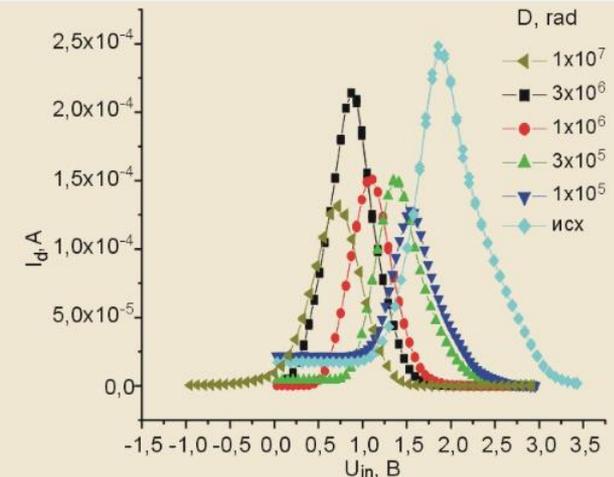
# Структуры кремний-на-изоляторе: материал сверхрадиационно-стойкой электроники и наноэлектроники



КНИ МОП транзистор на основе Si пленки толщиной 100 нм



Изменение порога транзисторов КНИ КМОП ИС при изменении дозы от  $10^3$  рад до 1Мрад. Толщина подзатворного диэлектрика 12 нм (ВНИИТФ  $^{60}\text{Co}$ ).



Изменение порога переключения инверторов  $V_{sw} < 1,2$  В вплоть до доз 10 Мрад (НЗПП  $^{137}\text{Cs}$ ).

В.П.Попов, А.Л.Асеев, В.П. Володин, В.Н.Марютин  
Микросистемная техника, 9 (2002)

О.В. Наумова, И.В. Антонова, В.П. Попов, Ю.В. Настаушев, Л.В. Литвин, Т.А. Гаврилова, А.Л.Асеев.  
Физика и техника полупроводников. 2003, т.37, в.10, с. 1253-1259



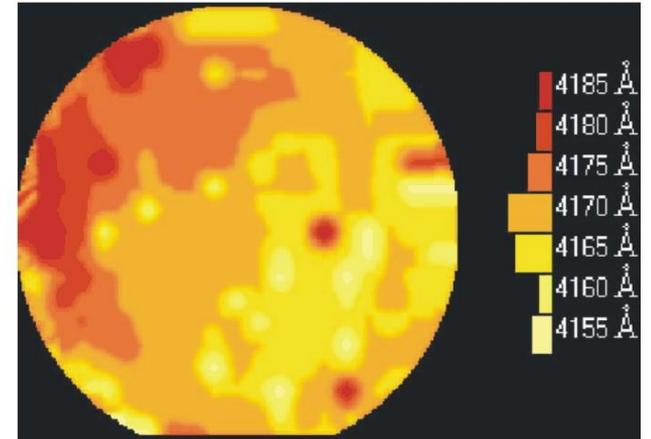
# ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

## СТРУКТУРЫ КРЕМНИЙ-НА-ИЗОЛЯТОРЕ - НОВЫЙ МАТЕРИАЛ МИКРО - И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

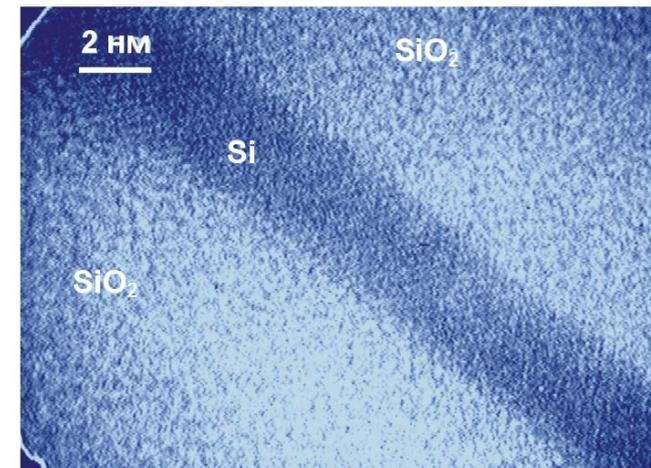
### Параметры структур КНИ (Метод DeleCut)

Толщина отсеченного слоя кремния	0.001- 1.5 мкм, типичные значения 400-500нм
Разброс толщины слоя кремния на пластине диаметром 100мм	1 500 ± 5 нм 200 ± 0.5 нм 4 ± 0,2 нм
Ориентация отсеченного слоя кремния	(100) или (111)
Концентрация свободных носителей в пленке кремния	$10^{14}$ $10^{20}$ см <sup>-3</sup>
Подвижность носителей в пленке кремния	400-500 см <sup>2</sup> /Вс
Плотность состояний на границе раздела Si/SiO <sub>2</sub>	$< 10^{12}$ см <sup>-2</sup> эВ <sup>-1</sup>
Макродефекты в слое кремния	Как в исходном кремнии
Напряжение пробоя диэлектрика толщиной 0.2 ÷ 0.4мкм	≥ 200 В
Токи утечки на 1 см <sup>2</sup>	< 0.1 нА
Толщина захороненного диэлектрика	20 ÷ 2 000 ± 3 нм

### Разброс толщины слоя кремния

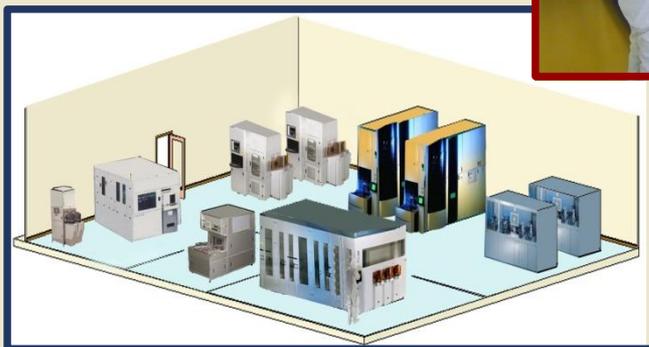
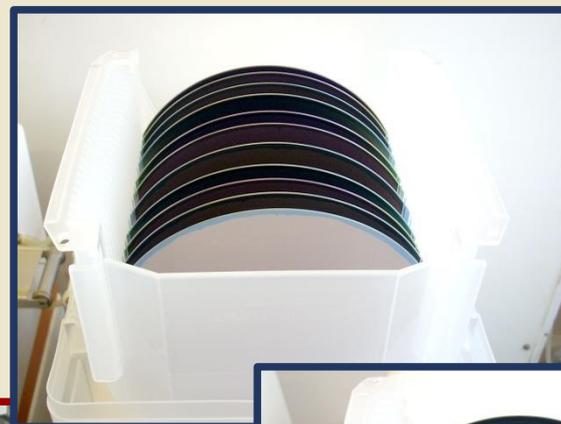


### Атомарно-гладкий интерфейс



# Изготовление КНИ структур для nano- и биоэлектроники в ИФП СОРАН

*Рост рынка КНИ обеспечен увеличением доли высокопроизводительных процессоров на КНИ, объём выпуска которых превысил 30%. Сдерживающий фактор для рынка - 3-4х кратная цена КНИ в сравнении с объёмным кремнием. Доля технологии Smart Cut<sup>®</sup> на рынке КНИ > 80%.*



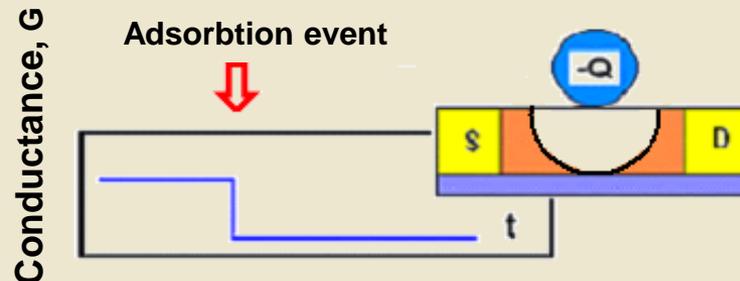
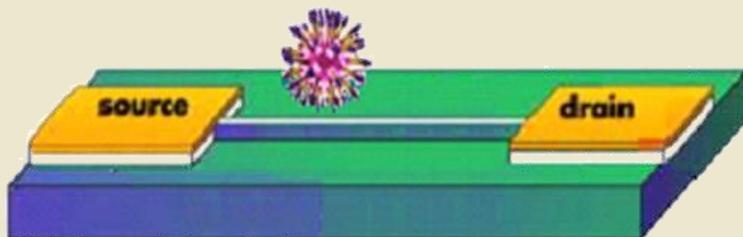
*За 15 лет на опытной линии ИФП изготовлено более 5 тыс. КНИ пластин диаметром 100 и 150 мм для приборов микро-, nano- и биоэлектроники.*

*Оборудование выработало ресурс. Стоимость для новой линии (200 мм, 5 тыс. шт./год) - до 500 млн. руб.; (300 мм, 30 тыс. шт./год) – до 900 млн. руб. Стоимость чистых помещений – 400 млн.руб.*

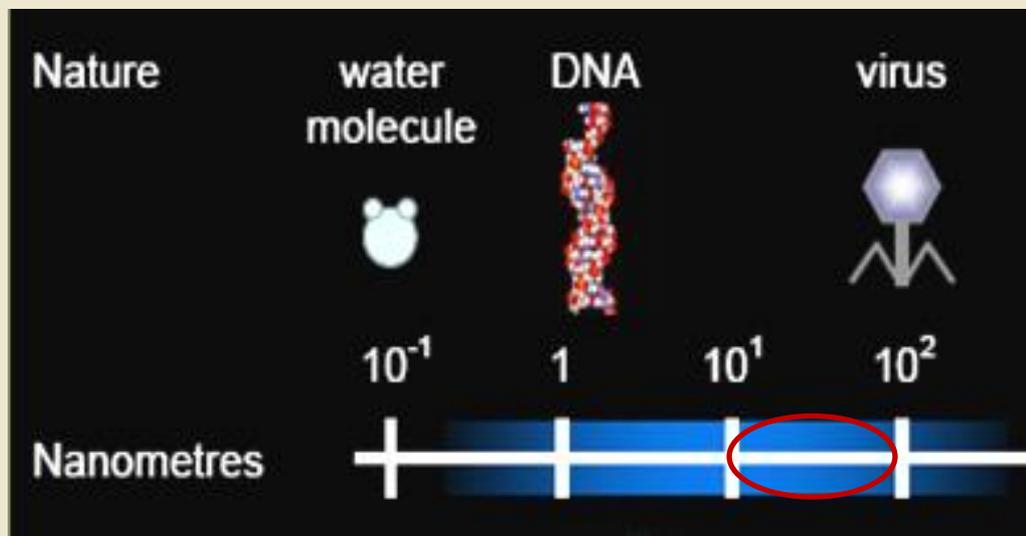
*В.П.Попов, О.В.Наумова, И.Е.Тыщенко и др., ФТП, Микроэлектроника и т.д. (1998 - 2012)*

# КНИ нанопроволочный транзистор в качестве сенсора биологических молекул, вирусов и бактерий

$$\Delta G \sim \exp(-e\Delta\phi_S/k_B T)$$



Устройство работает как чувствительный полевой транзистор с открытым затвором. Заряженная адсорбированная наночастица действует как локальный затвор. Предел чувствительности – единичная частица на нанопроволочный затвор.

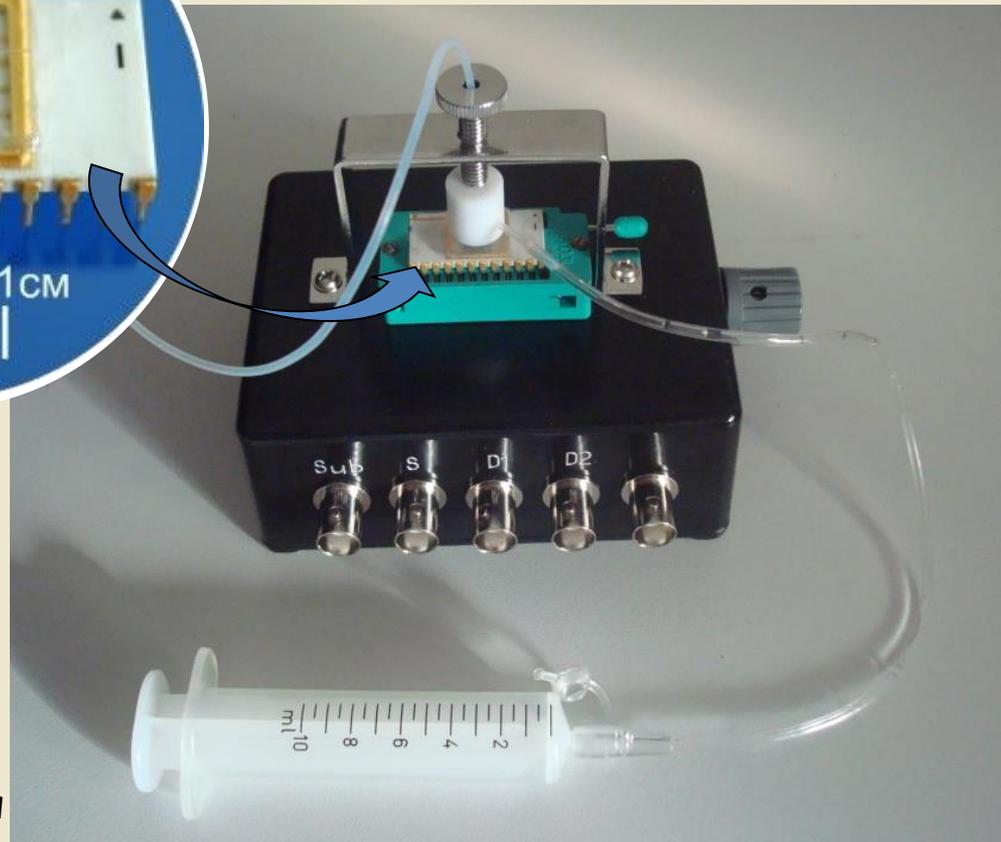
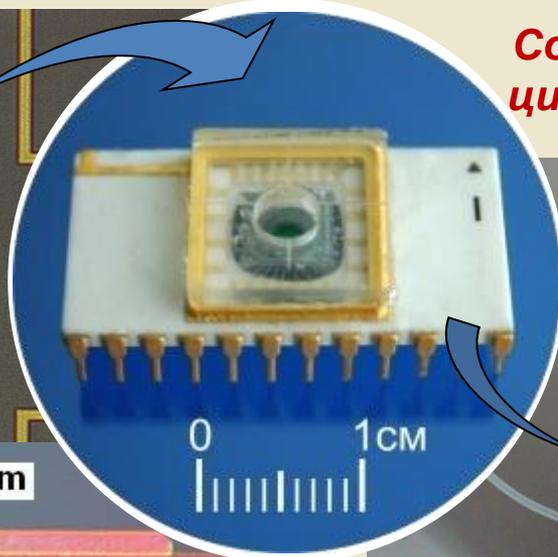
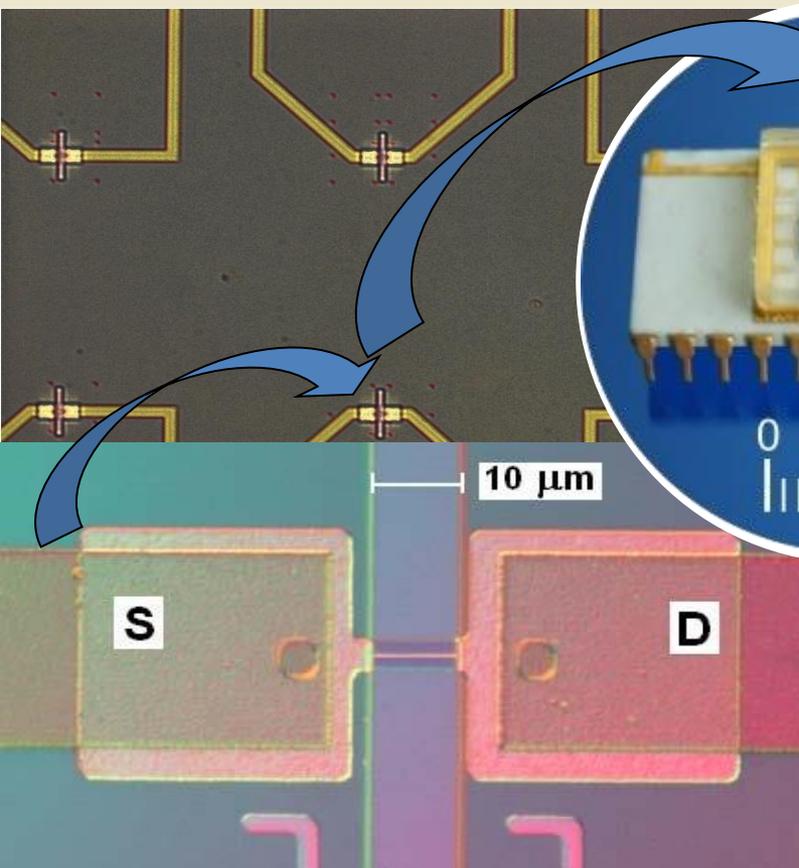


Диаметр нанопроволоки должен быть сравним с размером наночастицы

протеины

# Нанопроволочный сенсор биомолекул

*Совместно с Институтом биомедицинской химии им.В.Н.Ореховича РАН*



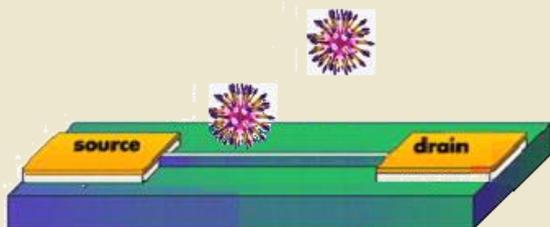
- толщина КНИ ( $W_{NW}$ ) (10 – 40) нм
- ширина нанопроволоки: (50 – 100) нм
- длина – 10  $\mu\text{m}$
- число на чип – 20
- диаметр рабочей зоны - 2 мм

*Прототип биосенсора с жидкостной микроячейкой и электронным чипом с чувствительностью  $\sim 1$  фМ*

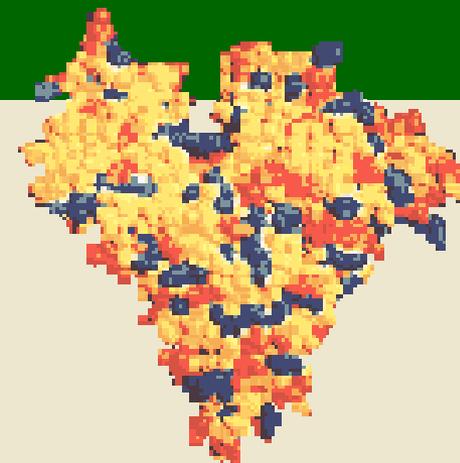
*Стабилизация поверхности КНИ НПТ с помощью PEALD нанесения слоя оксида алюминия нанометровой толщины: В.П.Попов и др. ФТП, 2016, т.50, в.5, с.643-649.*

# Бычий сывороточный альбумин (БСА)

$d \sim 5 \text{ nm}$ ,  $MW \sim 66 \text{ kDa} \sim 10^{-19} \text{ g}$

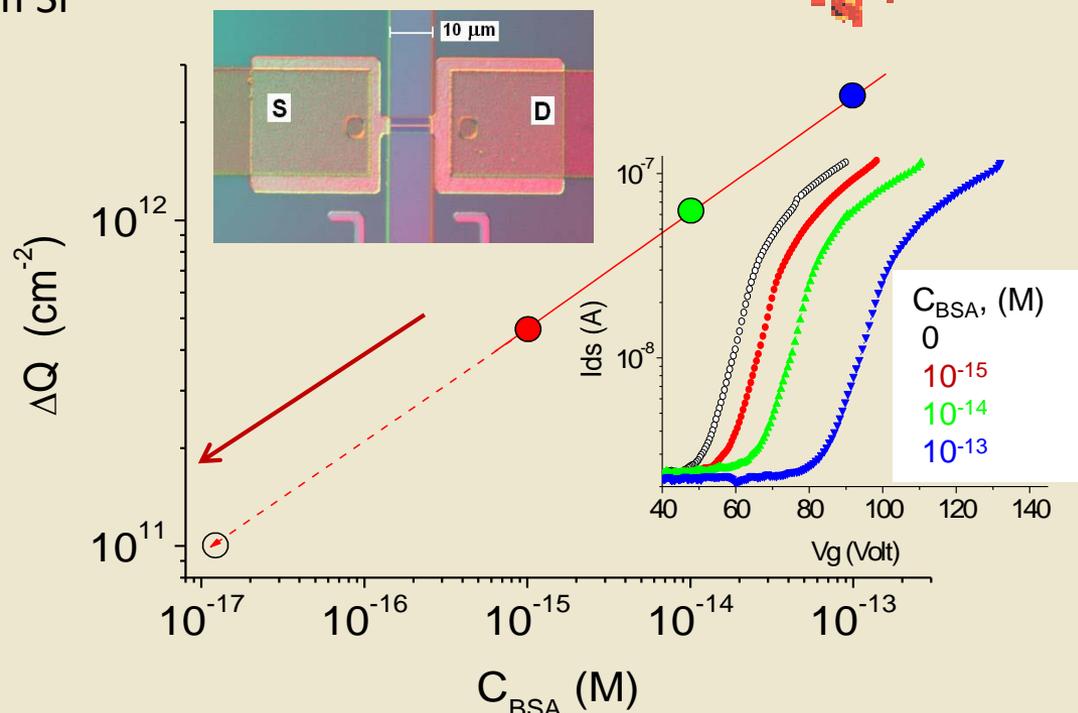
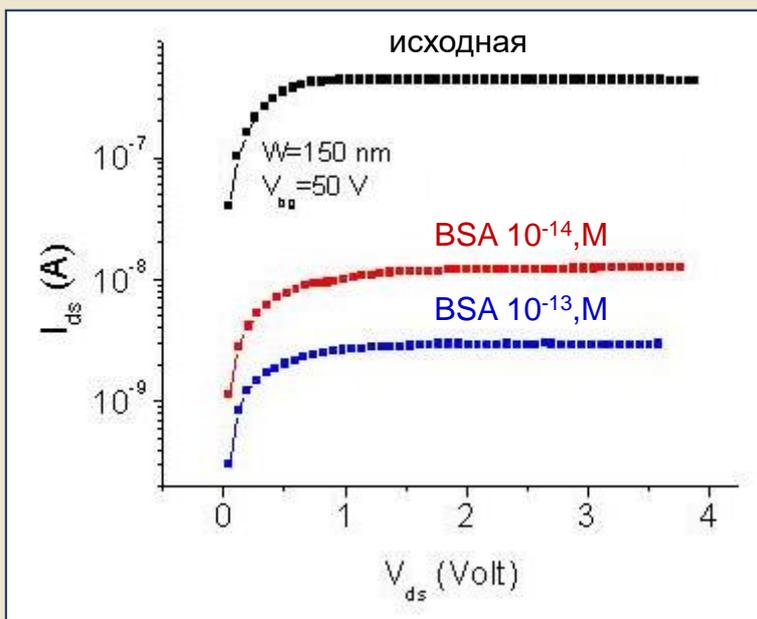


Blue - positive charge (основания)  
 Red - negative charge (кислоты)  
 Yellow - neutral ones (нейтралы)



5 mM PBS ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), pH 7.4

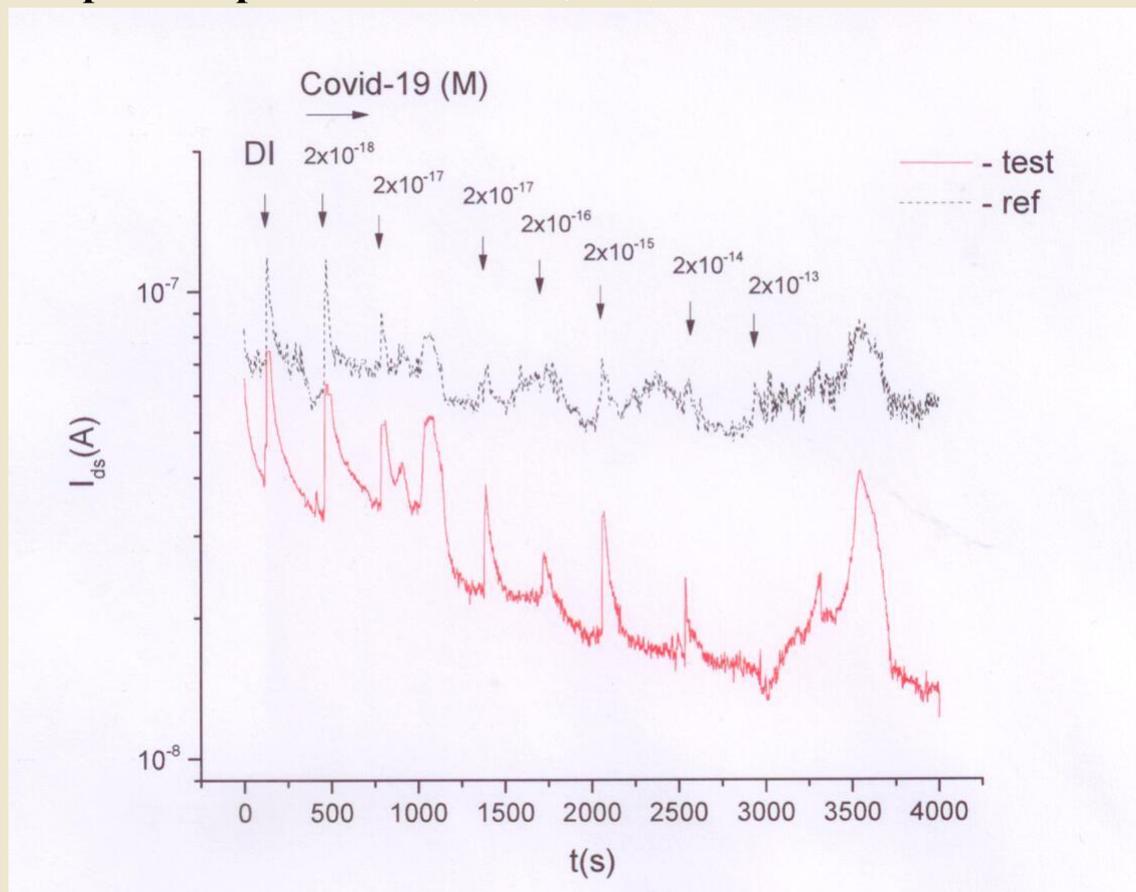
15 nm Si



Сток-истоковые  $I_{ds}-V_{ds}$  и сток-затворные  $I_{ds}-V_g$  характеристики до и после иммобилизации молекул БСА

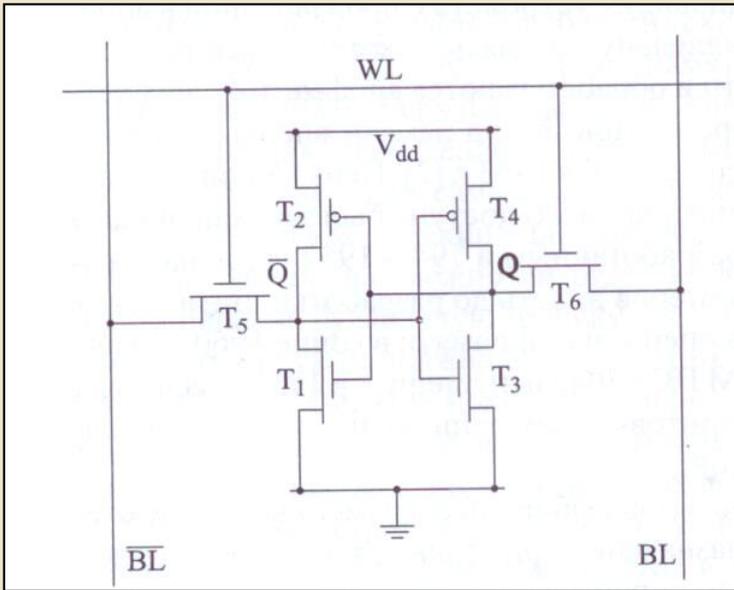
Предел чувствительности:  $C_{BSA} = 10^{-17} \text{ M} \rightarrow N \sim 10^{-3} \text{ ng/ml} \rightarrow N \sim 6 \text{ [BSA/мкл]}$

О.В.Наумова, В.М.Генералов, Э.Г.Зайцева, А.В.Латышев, А.Л.Асеев, С.А.Пьянков, И.В.Колосова, Г.Г.Ананько, А.П.Агафонов, Е.В.Гаврилова, Р.А.Максютов, А.С.Сафатов, **Биосенсоры на основе КНИ-нанопроволочных транзисторов для биомедицины и вирусологии, Микроэлектроника 2021, т.50, №3, с.166-174.**

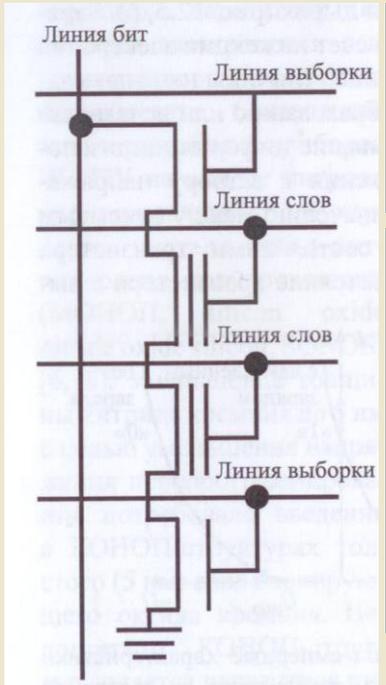


V.Generalov, O.Naumova, D.Shcherbakov, A.Safatov, B.Zaitsev, E.Zaitseva, G.Buryak, D.Sheglov, A.Chermiskina, I.Merkuleva, A.Aseev, **Indication of the Coronavirus Model Using a Nanowire Sensor, MDPI Proceedings of the 1<sup>st</sup> Intern. Electronic Conf. on Biosensors, 2020, v.60, 50.**

# ЭЛЕМЕНТЫ ПАМЯТИ: УСТРОЙСТВА И МАТЕРИАЛЫ

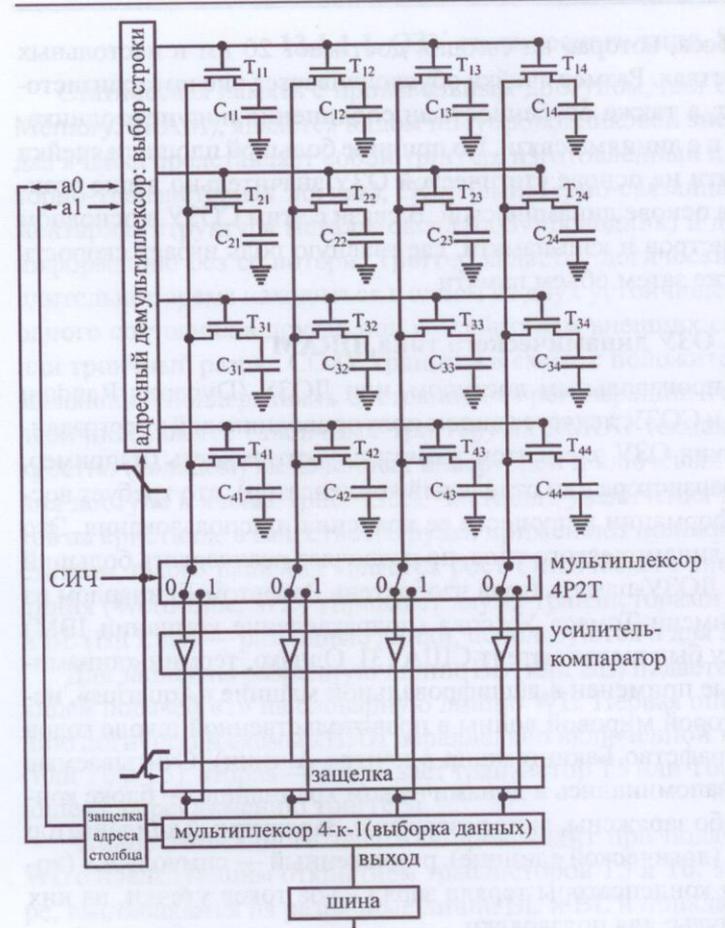


Полупроводниковая энергозависимая память оперативных запоминающих устройств: Статическая память с произвольным доступом (СОЗУ), Static Random Access Memory (SRAM)

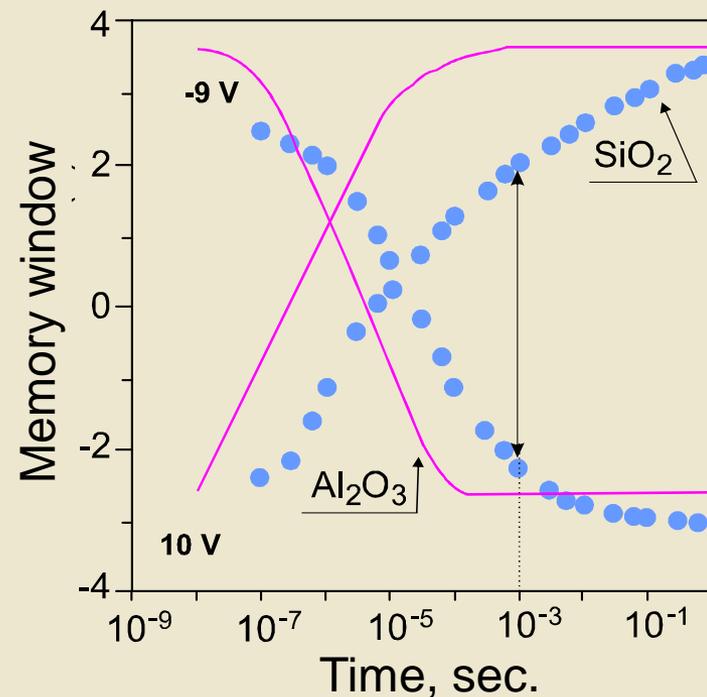
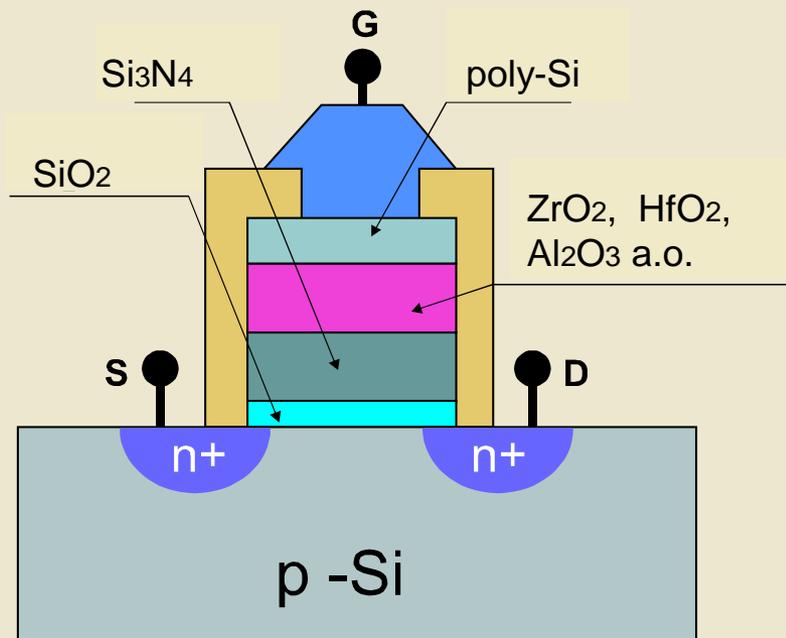


ОЗУ динамического типа (ДОЗУ), Dynamic Random Access Memory (DRAM)

Флэш-память: Электрически перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство (ЭППЗУ) с архитектурой НЕ-И (NOT-AND, NAND), Electrically erasable programmable read only memory (EEPROM)



# Запоминающее устройство на основе Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> с использованием high-k диэлектриков в качестве блокирующего слоя

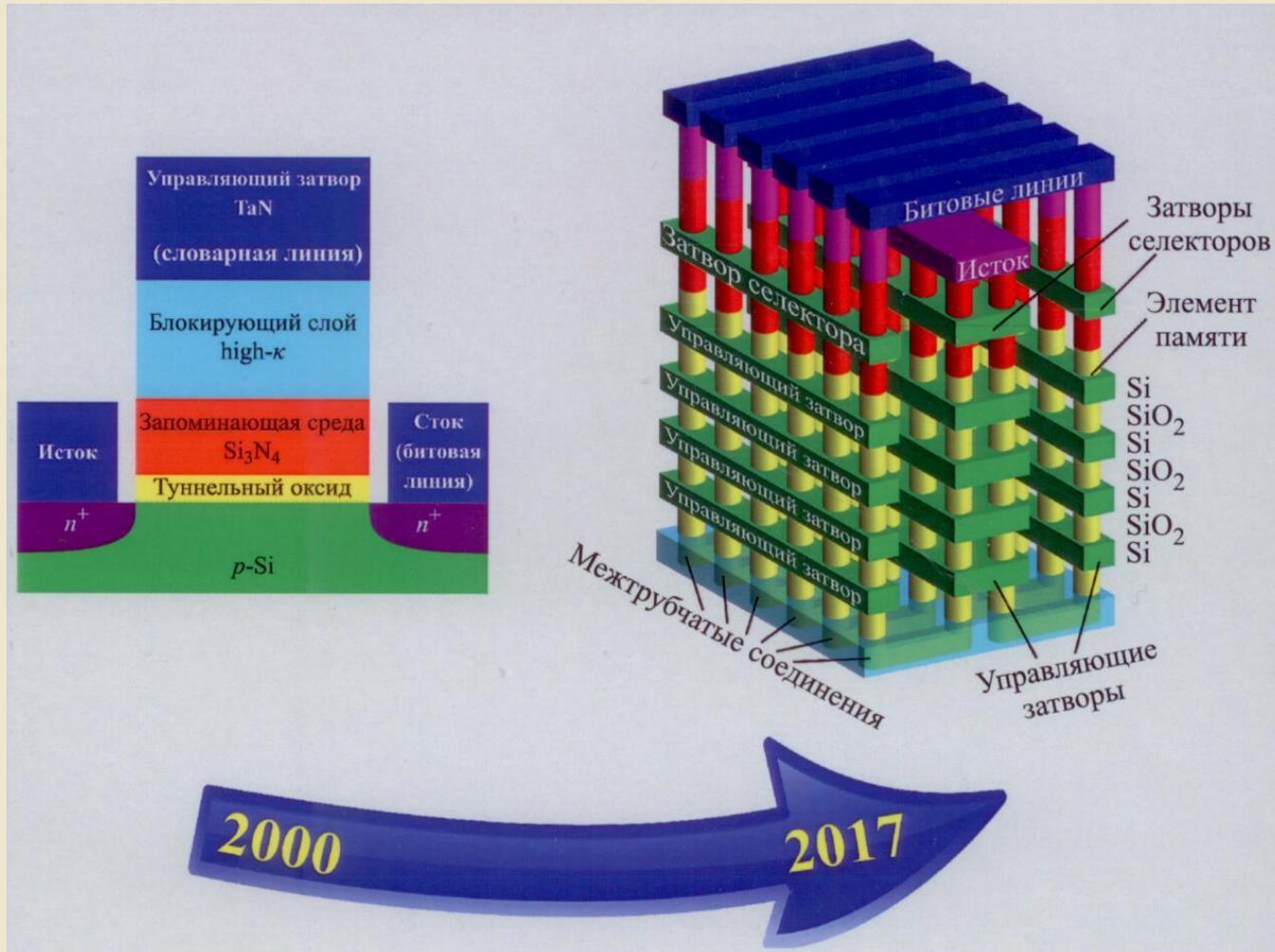


*Применение блокирующих слоев high-k диэлектриков ведет к увеличению быстродействия ЭПЗУ, уменьшает напряжение перепрограммирования и увеличивает «окно» памяти*

*V.A.Gritsenko, K.A.Nasyrov, Yu.N.Novikov, A.L.Aseev, S.Y.Yoon, Jo-Won Lee, H.H.Lee, C.W.Kim, A new low voltage fast SONOS memory with high-k dielectric, Solid State Electronics 2003, v.47, No.10, p.1651-1656;*

*V.A.Gritsenko, K.A.Nasyrov, D.V.Gritsenko, Yu.N.Novikov, A.L.Aseev, S.Y.Yoon, J.-W. Lee, J.H.Lee, C.W.Kim, A new memory element on silicon nanoclusters in a ZrO<sub>2</sub> insulator with a high permittivity for electrically erasable read-only memory, Semiconductors 2005, v.39, No.6, p.716-721.*

# Реализация фирмой “Samsung” трехмерной вертикальной NAND флэш-памяти на основе транзисторов с плавающим затвором емкостью до 1 Тбит

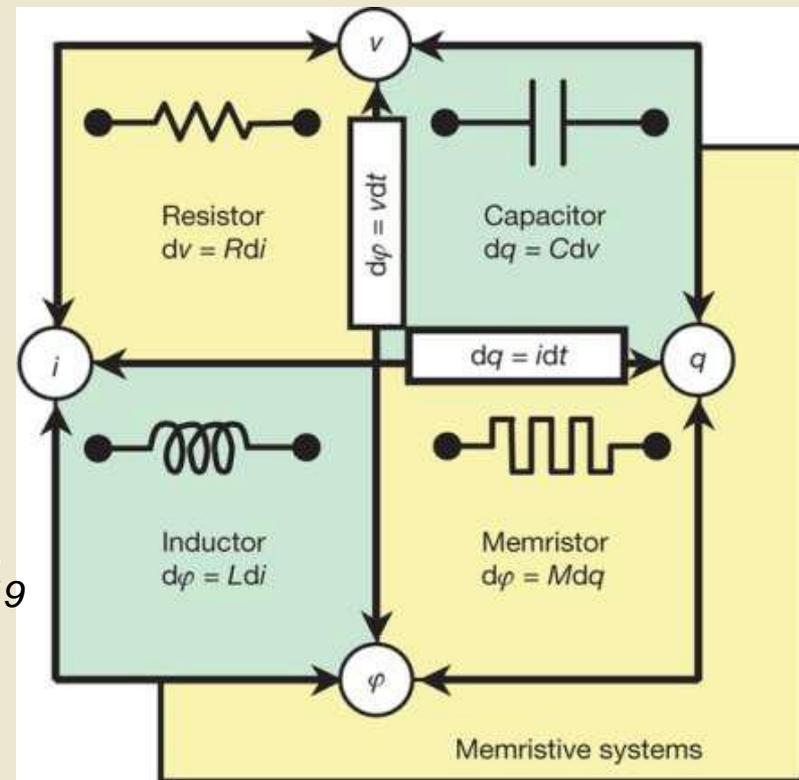
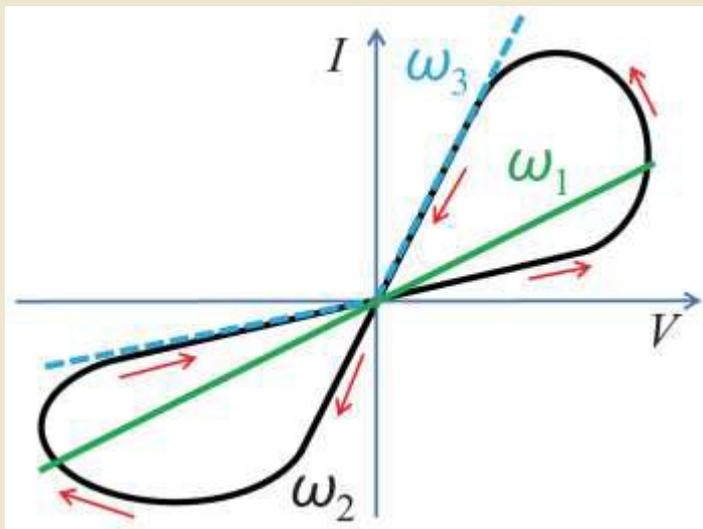


Достижению этого результата способствовало 10-летнее сотрудничество фирмы “Samsung” с Институтом физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН и патенты В.А.Гриценко «Элемент памяти для ЭПЗУ» №2003 103 143/09 от 03.02.2003; №2003 109 077/09 от 31.03.2003.

# Мемристор

Введен теоретически в 1971 [1], получен физически в 2008 [2]:

- Двухполюсный пассивный элемент;
- Сопротивление зависит от истории: величины ранее приложенного напряжения и тока;
- Самопересекающаяся петля гистерезиса, зависящая от частоты [3].



[1] Chua, L. Memristor - The Missing Circuit Element. *IEEE, Transactions On Circuit Theory CT-18*, 507–519 (1971);

[2]: D.B.Strukov, G.S.Snider, D.R.Stewart, and R.S. Williams, *Nature* 453, 80 (2008);

[3] Y. V. Pershin and M. Di Ventra, *Advances in Physics* 60, 145–227 (2011).

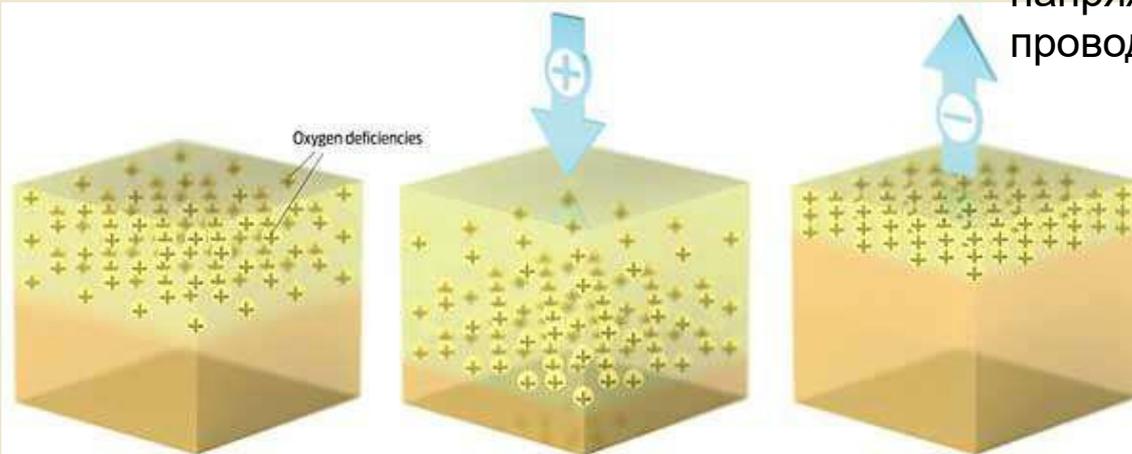
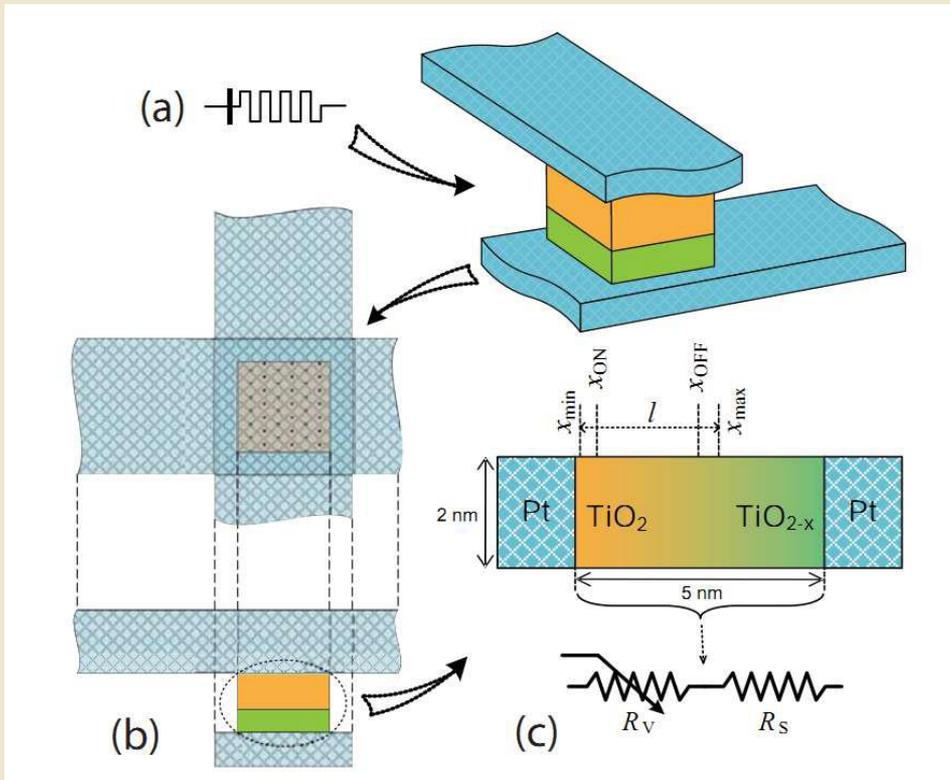
## МЕМРЕЗИСТИВНОСТЬ

Дефицит кислорода в  $\text{TiO}_{2-x}$  проявляется как “пузырьки” вакансий кислорода, разбросанных по верхнему слою.

- Положительное напряжение на переключателе отталкивает (положительные) вакансии кислорода в металлическом верхнем слое  $\text{TiO}_{2-x}$ , посылая их вниз в изолирующий слой  $\text{TiO}_2$ .

- Это вызывает движение границы между двумя слоями вниз, увеличивая процент проводящего слоя  $\text{TiO}_{2-x}$  и проводимость всего переключателя.

- Чем больше приложенное напряжение, тем выше становится проводимость переключателя.



## Применение мемристоров

### Резистивная память с произвольным доступом (ReRAM)

- Энергонезависимое, обратимое переключение сопротивления;
- Высокая скорость и высокое отношение ON/OFF;
- Высокая плотность.

**Нейроморфные вычисления** – использование СБИС-систем, содержащих электронные аналоговые схемы, для симуляции нейробиологических архитектур, присутствующих в нервной системе, аналогично биологическим синапсам.

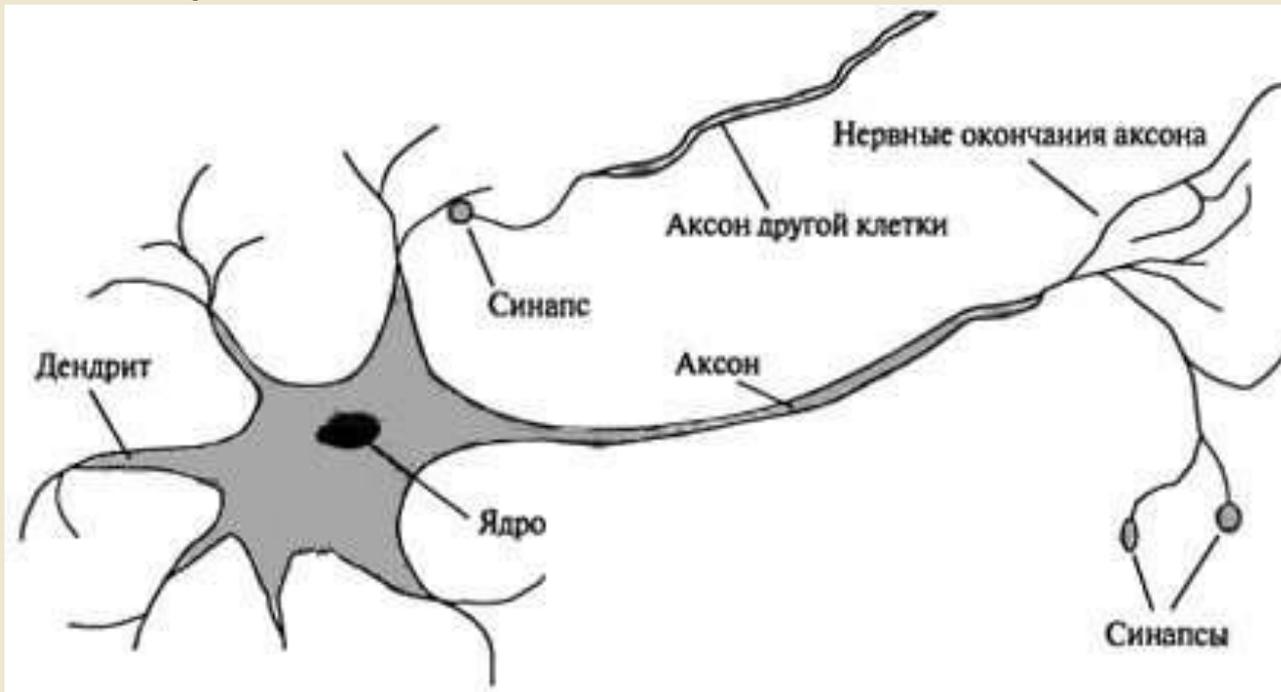
### Цели и задачи при создании искусственных нейроморфных систем

- Обработка сенсорной информации (зрение и слух);
- Исследование механизмов рабочей и кратковременной памяти мозга: изучение принципов комбинирования недавно полученной информации с приходящими позднее стимулами;
- Исследование кодирования информации: выяснение способов трансформации одной кодировки в другую;
- Применение систем искусственного интеллекта в системах автоматического управления (робототехника);
- Нейропротезирование и создание интерфейсов «мозг - компьютер».

## Биологический нейрон

Биологический нейрон – нелинейная динамическая система, динамика которой носит вероятностный характер. Получая электрические импульсы (спайки) от других нейронов через синапсы, нейрон накапливает потенциал в теле клетки.

Накопление необходимого количества потенциала заставляет нейрон выработать импульс, который передается через аксон на синапсы других нейронов. После выработки спайка нейрон переходит в рефрактерный период (порядка 2-30 мс), в течение которого вероятность спайка резко снижается.



### Мозг человека:

- $10^6$  нейронов/см<sup>2</sup>
- $10^{10}$  синапсов/см<sup>2</sup>
- 2 мВ/см<sup>2</sup>
- Полная потребляемая мощность: 20 Ватт

## Универсальная память вычислительных устройств

- Сочетание функций оперативной и внешней памяти;
- Энергонезависимость;
- Низкая стоимость производства;
- Высокая скорость операций чтения и записи;
- Количество циклов перезаписи не менее  $10^{15}$  -  $10^{17}$ ;
- Хранение информации в течение не менее 10 лет;
- Низкое электропотребление;
- Совместимость производства с современными кремниевыми технологическими линейками.

Характеристики различных типов памяти

	<i>Мемристор</i>	<i>DRAM</i>	<i>FLASH</i>	<i>HDD</i>
Время чтения, [нс]	10	10 – 50	25 000	$(5-8) \cdot 10^6$
Время записи, [нс]	0,2 – 20	10 – 50	200 000	$(5-8) \cdot 10^6$
Время хранения информации	годы	менее сек.	годы	Годы
Количество циклов записи	$10^{12}$	$10^{16}$	$10^3 - 10^6$	$10^{15}$
Энергия на запись одного бита, [пДж]	0,1 – 3	2	10 000	$(1-10) \cdot 10^9$

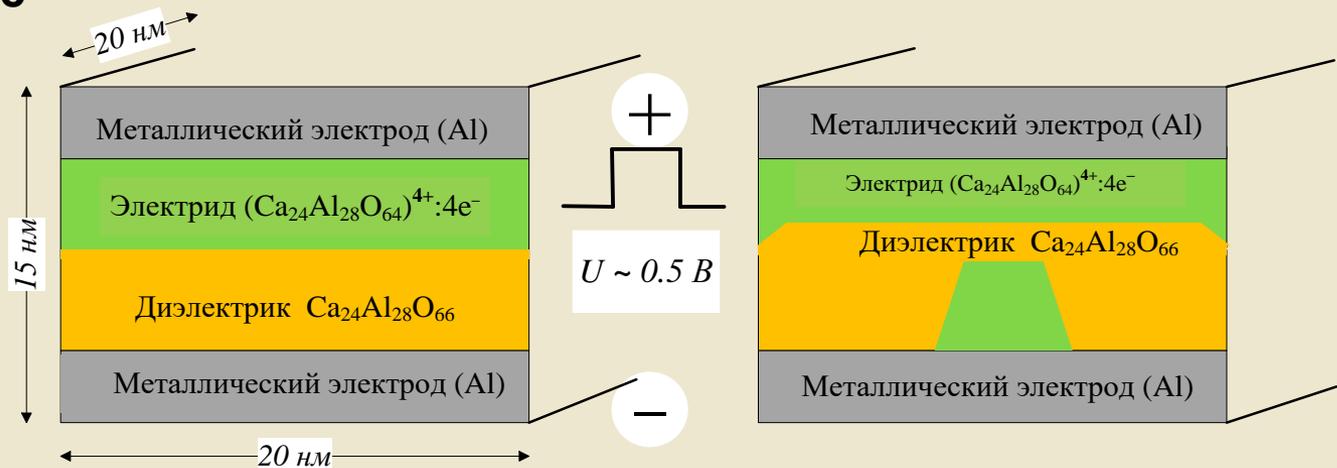
## Новые материалы для универсальной памяти

- Мемристорная память на основе структур Si-TiN-ZrO<sub>x</sub>-TiN с нестехиометрическим оксидом циркония;
- Мемристорные элементы памяти на основе SiO<sub>2</sub> и TaO<sub>x</sub>;
- Магниторезистивная память на основе системы Fe-MgO-Fe;
- Сегнетоэлектрические элементы памяти на основе систем TiN-La:HfO<sub>2</sub>-TiN и TiN-La:Hf<sub>0,5</sub>Zr<sub>0,5</sub>O<sub>2</sub>-TiN, а также сегнетоэлектриков Sc:HfO<sub>2</sub>;
- Мемристоры на перовскитах La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub>, RENiO<sub>3</sub>, YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>;
- Тонкопленочные структуры Металл-Электрид-Диэлектрик-Металл.
- Электриды: ([Ca<sub>24</sub>Al<sub>28</sub>O<sub>64</sub>]<sup>4+</sup> : 4e<sup>-</sup>); двумерный Ca<sub>2</sub>N и другие.

Элемент памяти на MEDM-структуре  
(Metal-Electride-Dielectric-Metal)

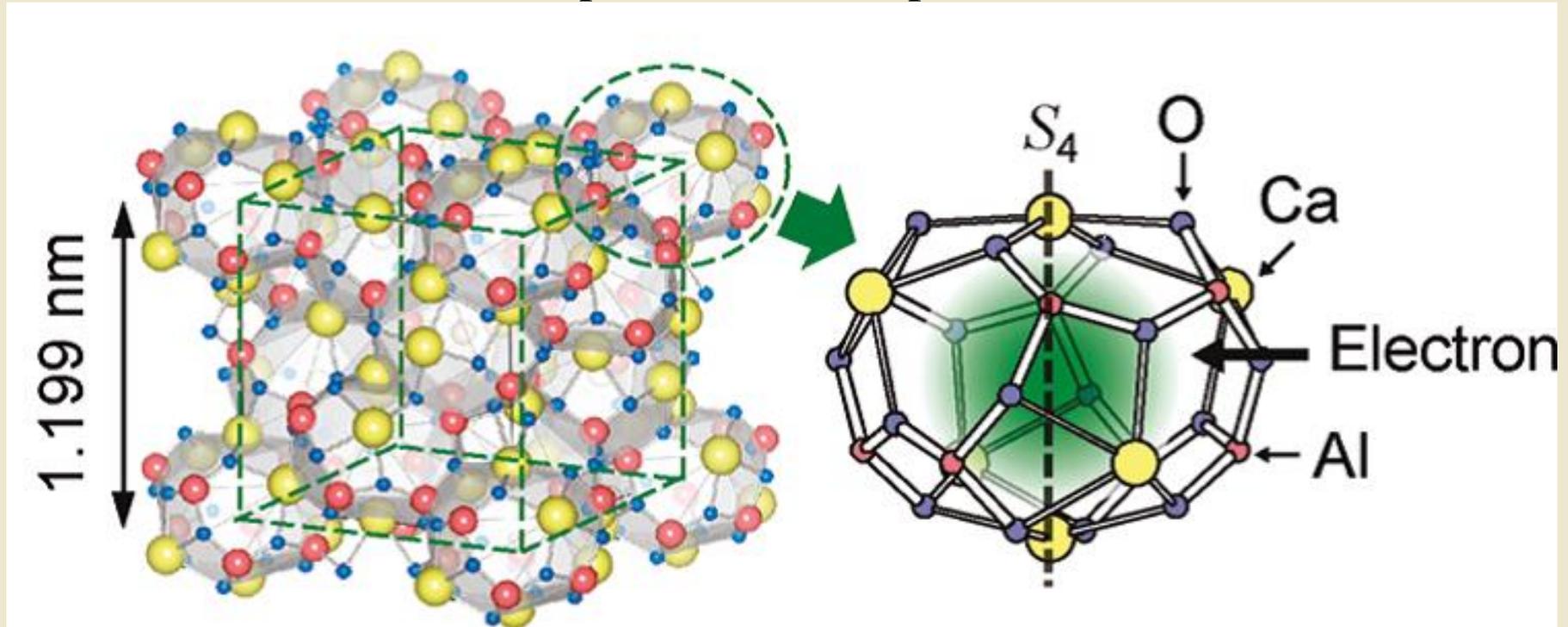
### Исследования:

- **фундаментальные**
- **поисковые**
- **прикладные**



Длительность переключющего импульса  $\sim 0.2$  нс

Электрид  $(\text{Ca}_{24}\text{Al}_{28}\text{O}_{64})^{4+}: 4e^-$  - новый перспективный материал  
микро- и наноэлектроники



Согласно предварительным расчетам элемент памяти на электриде способен выдержать более  $10^{18}$  циклов перезаписи, что позволит использовать такой элемент как ячейку оперативной памяти, и как ячейку регистра процессора, память на электриде ожидается в  $10^2$  раз более быстрой, а по энергопотреблению в  $10^4$  раз более экономичной, чем лучшие образцы оперативной памяти в настоящее время.

*Данные предоставлены зам. генерального директора по развитию АО «НЗПП с ОКБ» О.Г.Сосуновым*

# ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Нано-  
Технология и Диагностика:

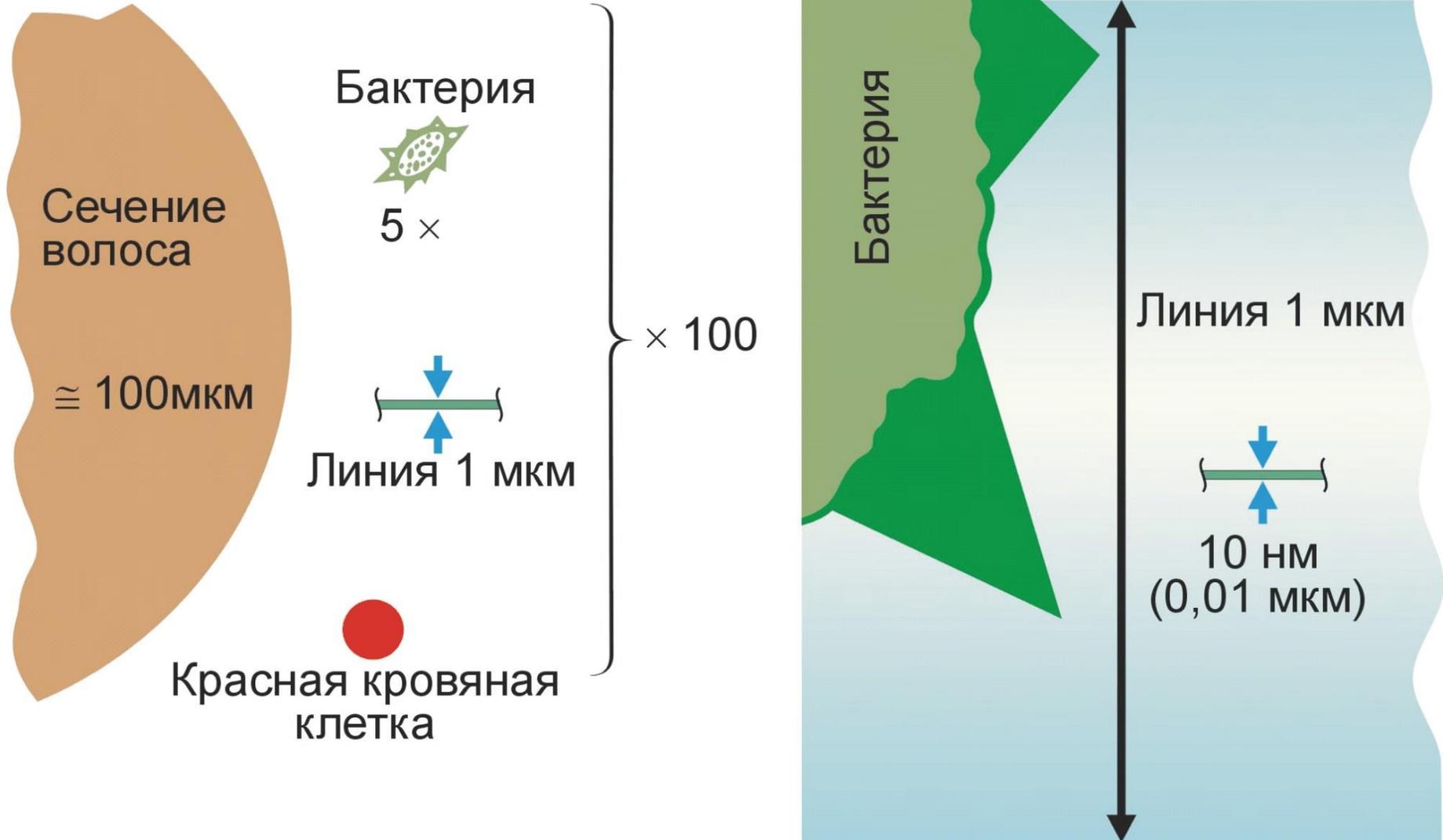
```
graph TD; A[Нано-Технология и Диагностика:] --> B[выращивание, вытравливание, перенос, модификация, изгиб, сдавливание, вспенивание и т.д.]; A --> C[микроскопия и спектроскопия: -графия, -граммы, кристаллограммы, дифрактограммы, -метрия, эллипсометрия (источник сигнала -> образец -> детектор)];
```

выращивание, вытравливание,  
перенос, модификация, изгиб,  
сдавливание, вспенивание и т.д.

микроскопия и спектроскопия:  
-графия, -граммы, кристаллограммы,  
дифрактограммы, -метрия, эллипсометрия  
(источник сигнала -> образец -> детектор)

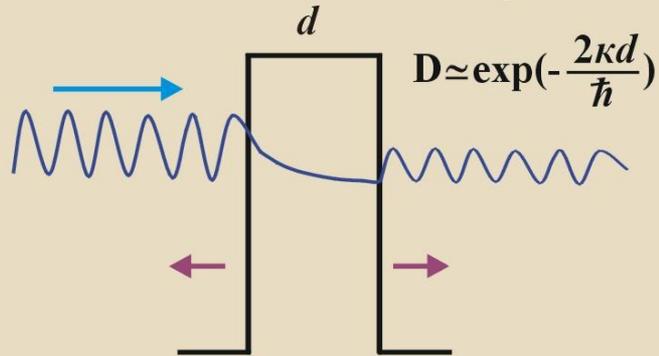
# СХЕМАТИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ РАЗМЕРА ОБЪЕКТОВ

Р. Фейнман (лауреат Нобелевской премии 1965 г.):  
"Там, внизу, еще много места"



# QUANTUM EFFECTS IN NANOSTRUCTURES

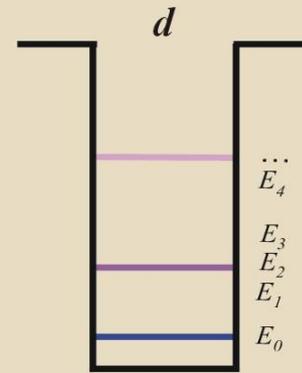
## Electron tunneling



Transparence coefficient

$$D = C \exp \left\{ -\frac{4\pi}{h} \sqrt{2m_e} \int_{x_0}^{x_1} \sqrt{WB - W_e} dx \right\}$$

## Electron states in quantum well



$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2md^2} n^2$$

## Spin phenomena



$$\Delta E \lesssim 10^{-5} \text{ eV}$$

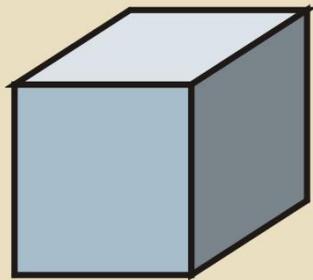
Quantum bits:  
system of two states

$$|Q\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle, \text{ where } |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

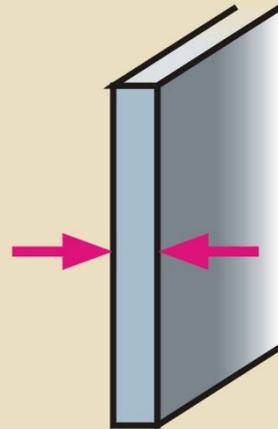
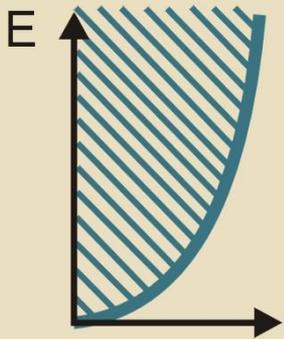
"Entangled" state of  
two-particle system

$$\Psi_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_1 |1\rangle_2 + |1\rangle_1 |0\rangle_2)$$

# Density of states of low-dimensional semiconductor structures



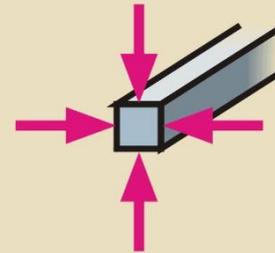
BULK



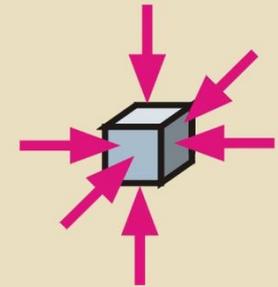
Quantum well



$N(E)$



Quantum wire



Quantum dot



# NOBEL PRIZES

in fields of semiconductors, electronics, quantum physics, nanomaterials and nanotechnologies

1956: **W.Shokley, J.Bardeen and W.Brattain** – *for their research of semiconductors and their discovery of the transistor effect;*

1962: **L.Landau** – *for pioneering theories for condensed matter, especially liquid helium;*

1964: **Ch.Townes, N.Basov and A.Prokhorov** – *for fundamental work in the field of quantum electronics, which has lead to the construction of oscillators and amplifiers based on the maser-laser principle;*

1973: **L.Esaki, I.Giaever and Josephson** – *for experimental discoveries regarding tunneling phenomena in semiconductor and superconductors;*

1977: **P.Anderson, N.Mott and J. van Vleck** – *for for fundamental theoretical investigation of the electronic structure of magnetic and disordered systems;*

1985: **K. Von Klitzing** – *for the discovery of the quantum Hall effect;*

1986: **E.Ruska, G.Binnig and G.Rohrer** – *for the design of the electron microscope and scattering tunneling microscope;*

1987: **J.Bednorz and K.Muller** – *for important breack-through in the discovery of superconductivity in ceramic materials;*

1996: **R.Curl, H.Kroto and R.Smalley** – *for discovering of fullerenes;*

1998: **R.Laghlin, H.Stormer and D.Tsui** – *for the discovery of a new form of quantum fluid with fractionally charged excitations;*

## NOBEL PRIZES

in fields of semiconductors, electronics, quantum physics, nanomaterials and nanotechnologies

2000: **Zh.Alferov, G.Kroemer and D.Kilbi** – *for developing semiconductor heterostructures used in high-speed and optoelectronics and invention of the integration circuits;*

2001: **E.Cornell, W.Ketterle and C.Wieman** – *for the achievement of Bose-Einstein condensation in dilute gases of alkali atoms and fundamental studies of the properties of the condensates;*

2007: **A.Fert and P.Grunberg** – *for the discovery of giant magnetoresistance;*

2009: **Ch.Kao, W.Boyle and G.Smith** – *for groundbreaking achievements concerning the transmission of light for optical communication and for the invention of an imaging semiconductors – the CCD sensor;*

2010: **A.Geim and K.Novoselov** – *for ground breaking experiments regarding the two-dimensional material graphene;*

2011 г. **D.Shekhtman** - *for the discovery of quasicrystals;*

2014: **I.Akasaki, H.Amano and S.Nakamura** – *for the invention of efficient light-emitting diodes which has enabled bright and energy-saving white light sources;*

2016: **D.Thouless, F.Haldane and J.Kosterlitz** – *for theoretical discoveries of topological phase transitions and topological phases of matter;*

2018: **A.Ashkin, G.Mourou and D.Strickland** – *for the optical tweezers and their applications to biological systems and for method of generating high-intensity ultra-short optical pulses.*

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  $p-n$ -ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ  
 ФОСФИД ГАЛЛИЯ—АРСЕНИД ГАЛЛИЯ**

Ж. И. Алфёров, В. И. Корольков и М. К. Трукан

Развитие методов эпитаксиального выращивания различных полупроводниковых кристаллов позволило в настоящее время приступить к систематическому исследованию свойств гетеропереходов, осуществленных в одном монокристалле. Интерес к изучению физических процессов в гетеропереходах в последние годы резко возрос в связи с рядом предложений, сделанных в СССР и за рубежом по использованию гетеропереходов для создания новых полупроводниковых приборов [1-5]. По-видимому, для большинства приборов — лазеров и выпрямителей, фотодетекторов и транзисторов, переключающих диодов и интегральных схем с оптической связью — применение гетеропереходов или существенно повысит основные параметры (КПД, мощность, рабочие частоты) или открывает принципиально новые возможности.

**ИНЖЕКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА  
 ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ  $n-Al_xGa_{1-x}As-p-GaAs$**

Ж. И. Алфёров, В. М. Андреев, В. И. Корольков,  
 Е. Л. Портной и Д. Н. Третьяков

Наличие разрывов зон на границе гетеропереходов приводит к интересной особенности инжекции, теоретическое рассмотрение которой проведено в работе [1]. Эта особенность заключается в том, что при соответствующей зонной схеме гетероперехода плотность инжектированных в узкозонный материал носителей должна при некотором значении приложенного напряжения превысить их плотность в широкозонном материале. Экспериментально до настоящей работы этот эффект не наблюдался.

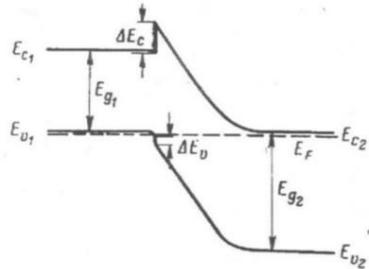
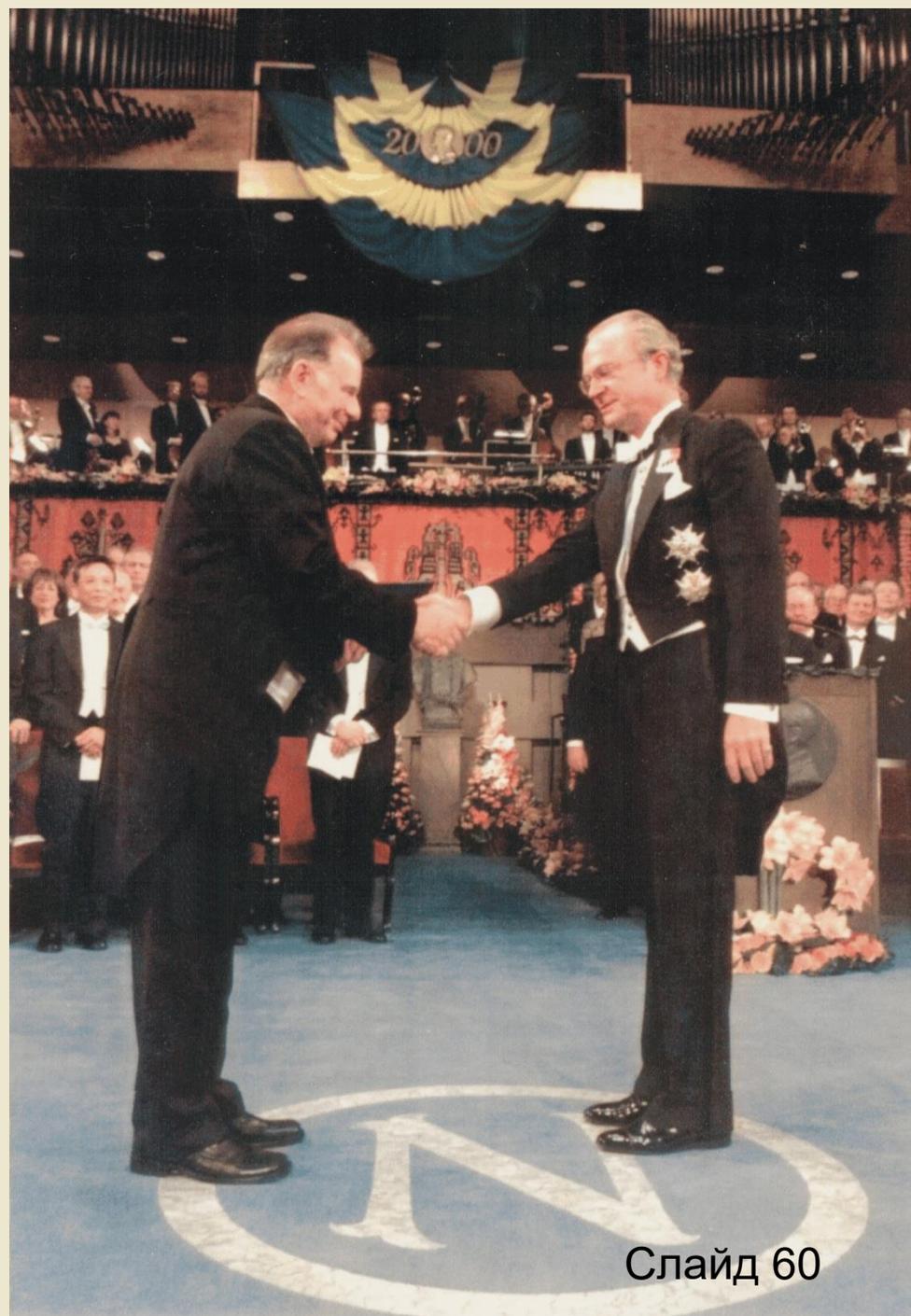


Рис. 1. Зонная модель резкого  $p-n$ -гетероперехода для случая сильно легированного узкозонного и слабо легированного широкозонного материалов.

Эпитаксиальные гетеропереходы в системе  $AlAs-GaAs$  весьма перспективны для создания эффективных эмиттеров благодаря малой разнице в постоянных решетки компонент, так что можно пренебречь поверхностными состояниями на границе раздела, связанными с этим различием. Использувавшиеся в нашем случае составы твердых растворов  $Al_xGa_{1-x}As$  имели содержание Al от 10 до 30%, т. е. в широкозонном полупроводнике сохранялась структура зон, близкая к  $GaAs$ , что позволяет не учитывать возможного эффекта отражения носителей от границы раздела, связанного с различием эффективных масс в обоих материалах.



Почетный доктор Новосибирского государственного университета, Нобелевский лауреат по физике 2014 г. профессор Хироси Аmano в Аналитическом и технологическом исследовательском центре Физического факультета НГУ



15 марта 2019 г.

## Нанотехнологическая инициатива Президента США Б.Клинтона, 2000 г.

- Компактные устройства хранения информации (библиотека Конгресса США на одном чипе):
- Высокопрочные материалы на основе новых форм углерода;
- Наносредства для адресной доставки лекарств к больным органам человека.

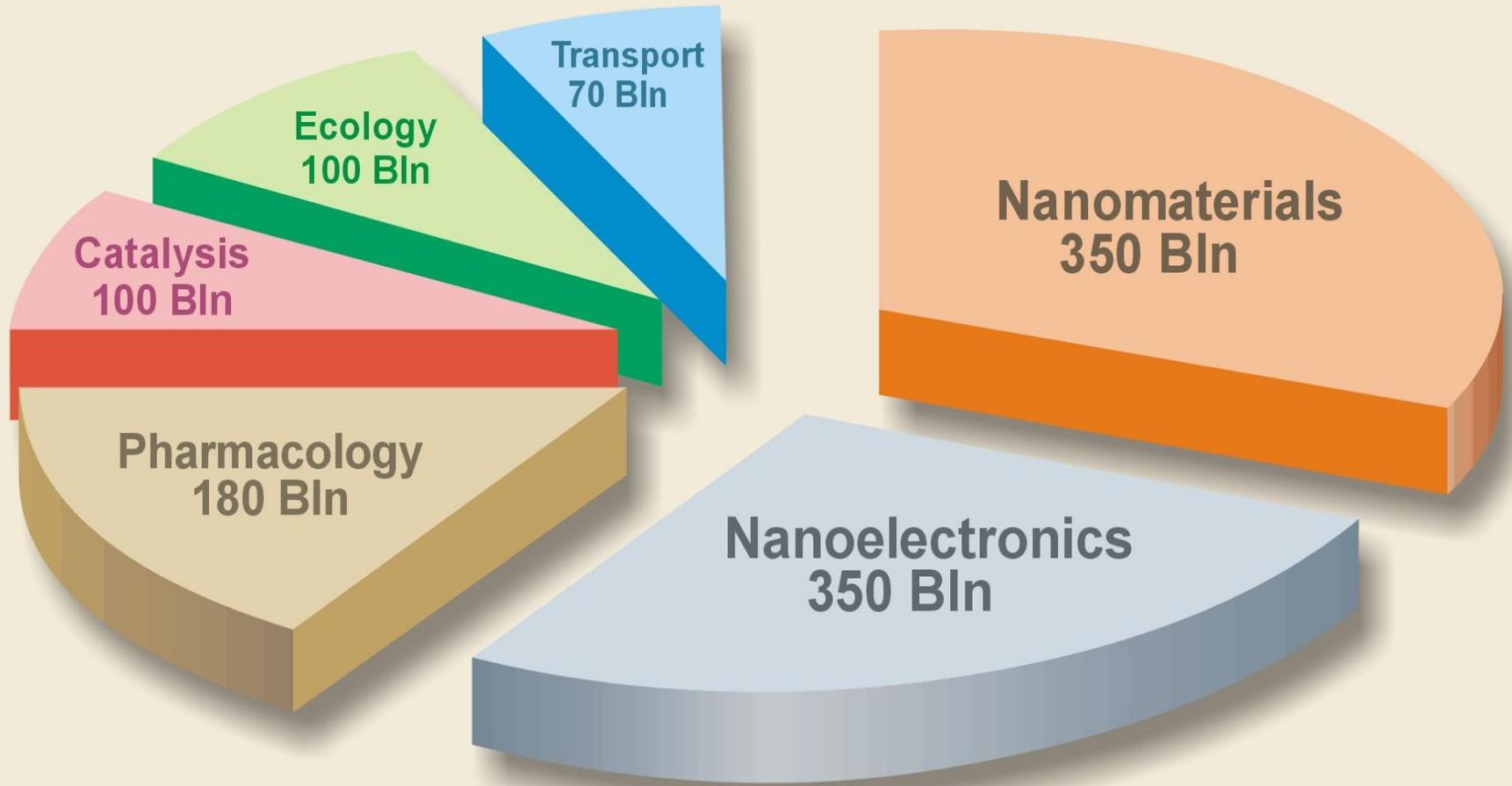
### ***Основные области работ:***

- долговременные фундаментальные исследования в нанонауке и технических приложениях;
- разработка и синтез наносистем с заданными характеристиками;
- применение наноматериалов и наносистем в промышленном производстве, энергетике, в обеспечении национальной безопасности и в здравоохранении;
- образование и обучение нового поколения специалистов, необходимых для быстрого прогресса в нанонауке и нанотехнологиях.

# WORLD MARKET OF NANOTECHNOLOGIES

Forecast

*Totally 1 Trln and more USD per year*



Квалифицировать изделие как **нанотехнологическое** можно, если, по крайней мере, один из его размеров находится в диапазоне от 1 до 100 нм и этот размер **существен для функций квалифицируемого изделия.**

*А.Г.Забродский, ПерстТ, 2004, т.11, в.22.*

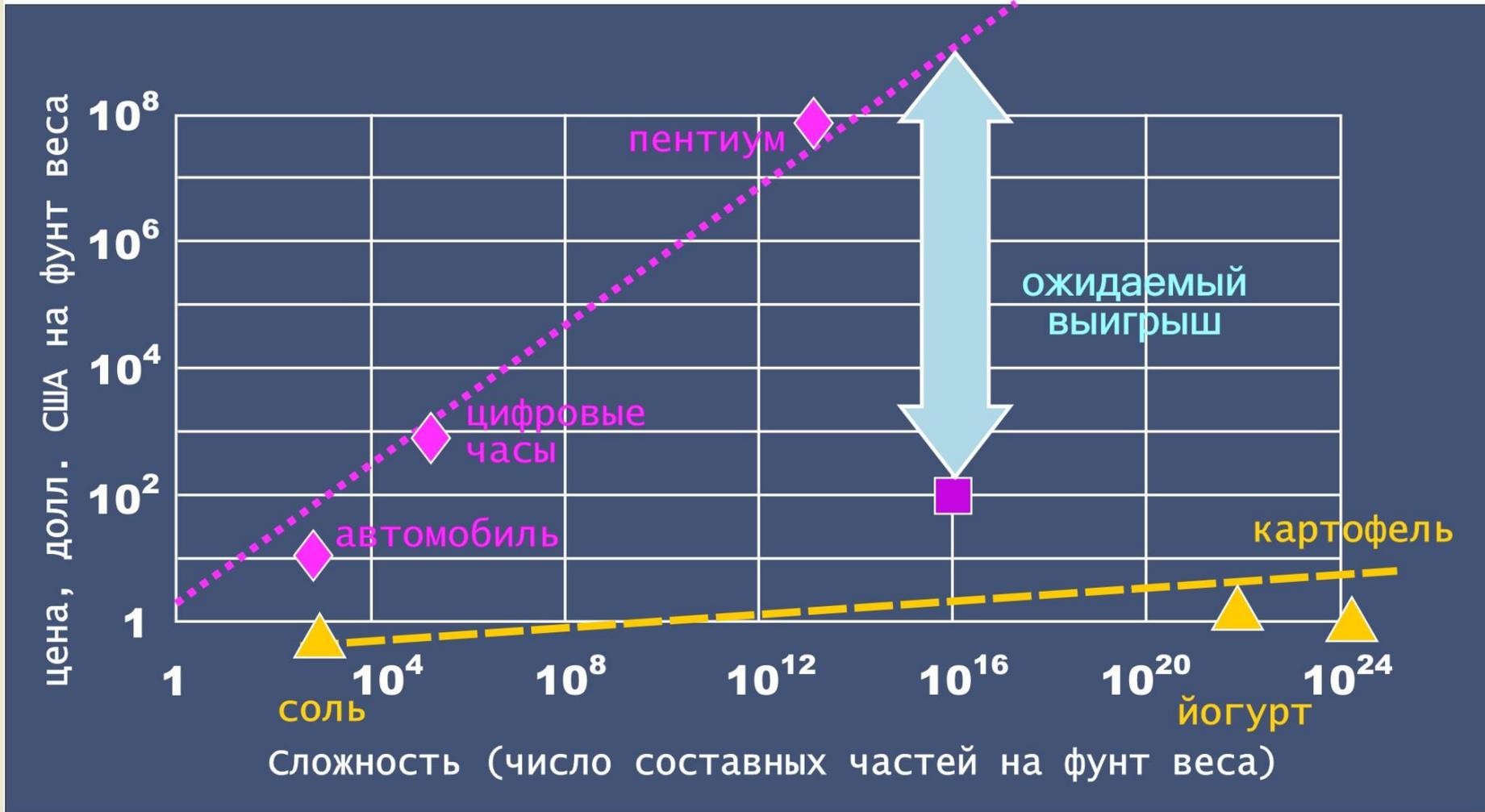
---

**Наноэлектроника:** использование **квантовых свойств наноструктур**, применение методов атомной и зонной инженерии при конструировании элементов наноэлектроники, в технологии наноэлектроники - использование эффектов самоорганизации и реализация принципа «снизу-вверх» по шкале размеров.

*Ж.И.Алферов, А.Л.Асеев, С.В.Гапонов, П.С.Копьев,  
В.И.Панов, Е.А.Полторацкий, Н.Н.Сибельдин, Р.А.Сулис,  
Микросистемная техника, 2003, №8, с.3.*

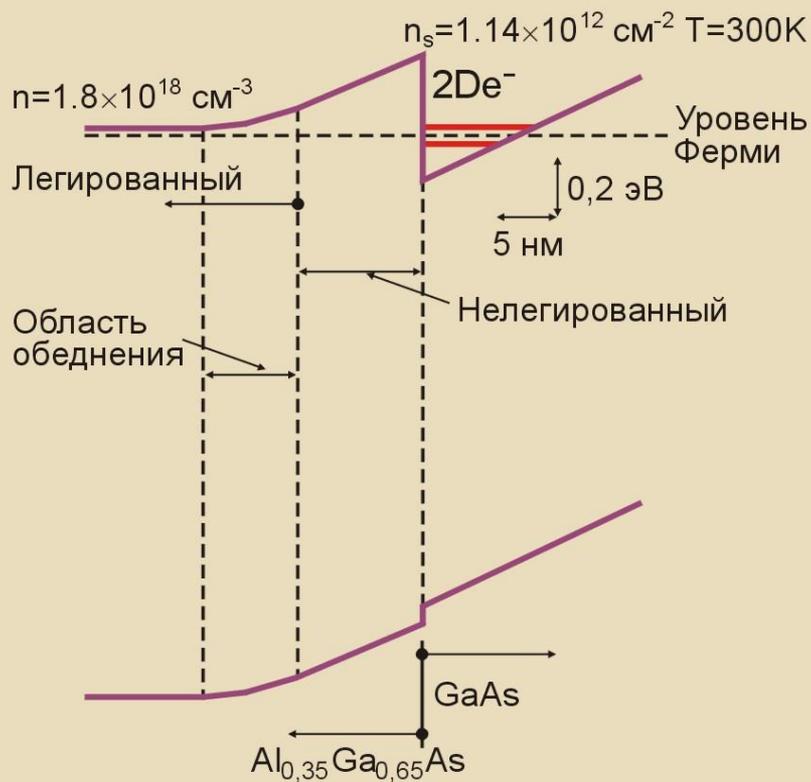
---

Прогнозируемое удешевление продуктов при переходе от традиционных методов создания нанообъектов ("сверху - вниз") к методам молекулярной и атомной само-сборки ("снизу - вверх")





# ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ СО РАН

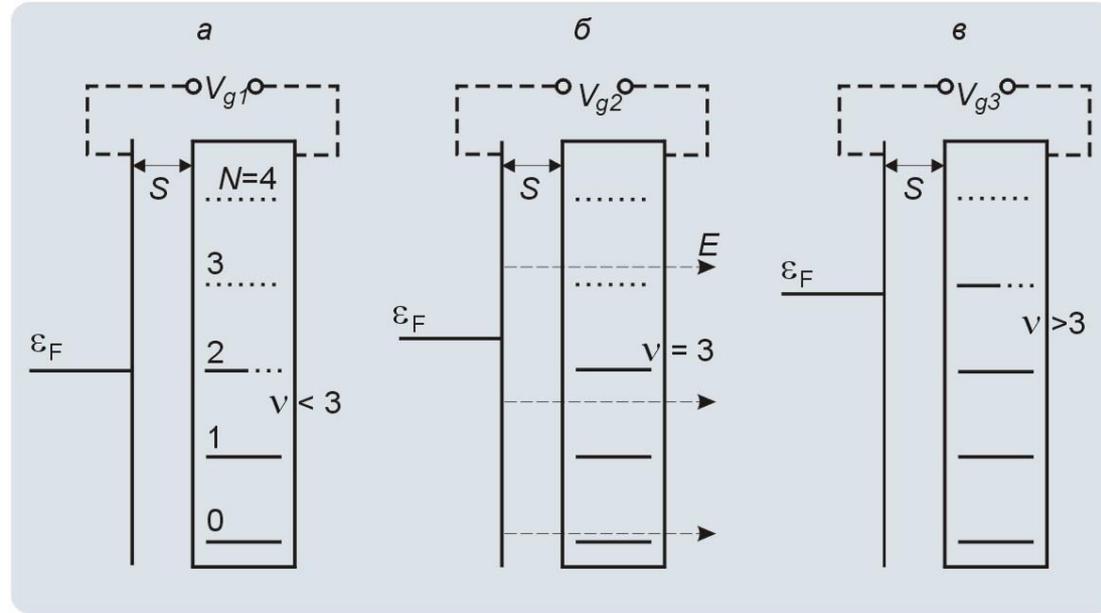
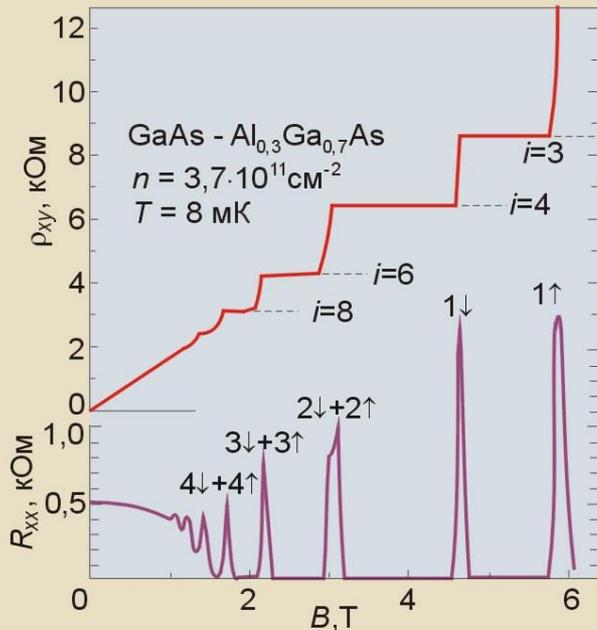
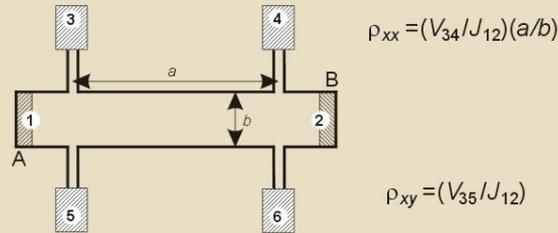


GaAs 10 нм	$T_s = 600^\circ\text{C}$ $T_s = 540^\circ\text{C}$
$\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}:\text{Si}$ $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 60 нм	
спейсер $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ 35 нм	
AlAs 1,13 нм	
GaAs 30 нм	
GaAs 1 мкм	
Подложка GaAs(001) п/и	

## Профиль структуры с $2\text{De}^-$ , выращенной на установке МЛЭ “Катунь-В”

Электрофизические параметры структуры из измерений эффекта Холла:  
 при 300 К -  $\mu_s = 5600 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{c}$ , концентрация электронов  $n_s = 5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$   
 при 77 К -  $\mu_s = 1,4 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{c}$ ,  $n_s = 4,7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$   
 при 4,2 К -  $\mu_s = 1,44 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{c}$ ,  $n_s = 3,6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$

# ЦЕЛОЧИСЛЕННЫЙ КВАНТОВЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА



$$\rho_{xy} = \frac{1}{i} \left( \frac{2\pi\hbar}{e^2} \right) \quad (i = 1, 2, 3, \dots)$$

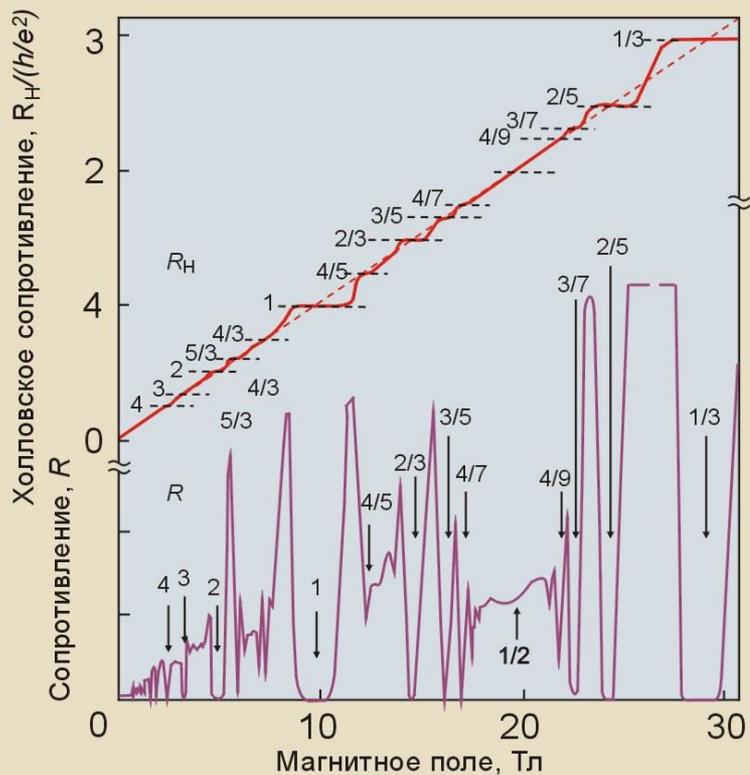
T. Anelo, V. Matsumoto, Y. Uemura, J. Phys.Soc.Japan, 1975, v. 39, p. 279

Э.М. Баскин, Л.И. Магарилл, М.В. Энтин, ЖЭТФ, 1978, т. 75, в.2, с. 723

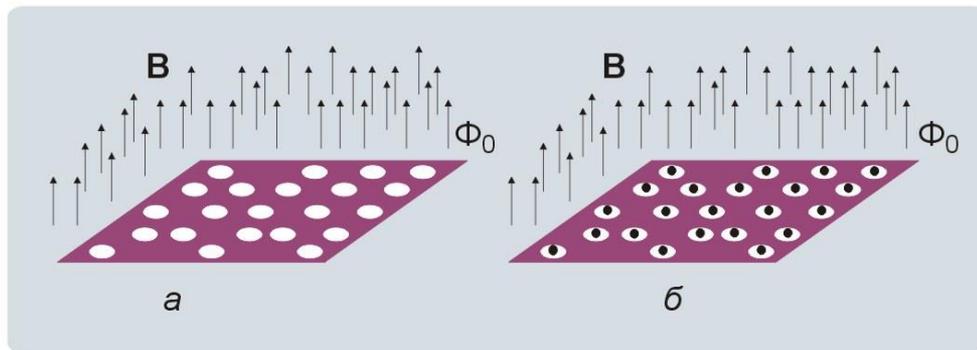
К. фон Клитцинг, Успехи физических наук, 1986, т. 150, в.1, с. 107 - 126

Магнетосопротивление  $R_{xx}$  и холловское сопротивление  $\rho_{xy}$  в зависимости от магнитного поля  $B$  в гетероструктуре GaAs - Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As. Температура  $T = 8$  мК. Электронная плотность в 2D-слое  $3,7 \cdot 10^{11} \text{см}^{-2}$ , подвижность  $\mu = 4,1 \cdot 10^4 \text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ . Стрелками отмечены направления спинов на уровнях Ландау с номером  $N$

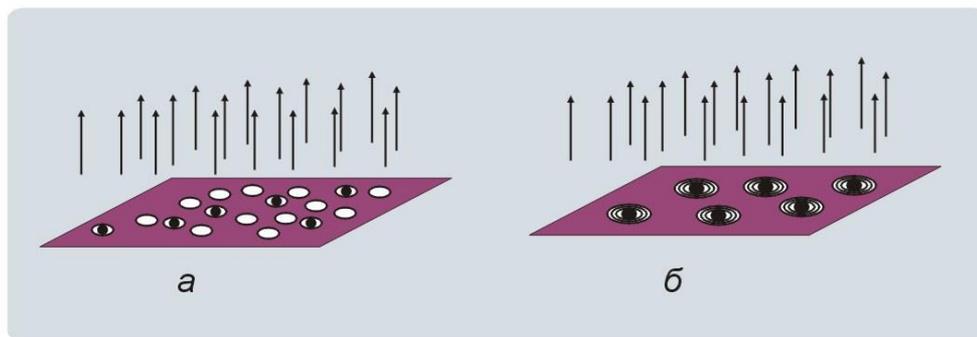
# ДРОБНЫЙ КВАНТОВЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА



Холловское сопротивление  $R_H$  и магнитосопротивление в гетероструктуре GaAs/AlGaAs со сверхвысокой подвижностью

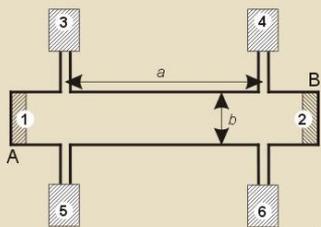


Взаимодействие вихрей магнитного поля и электронов в случае целочисленного эффекта Холла. Полное заполнение уровней Ландау



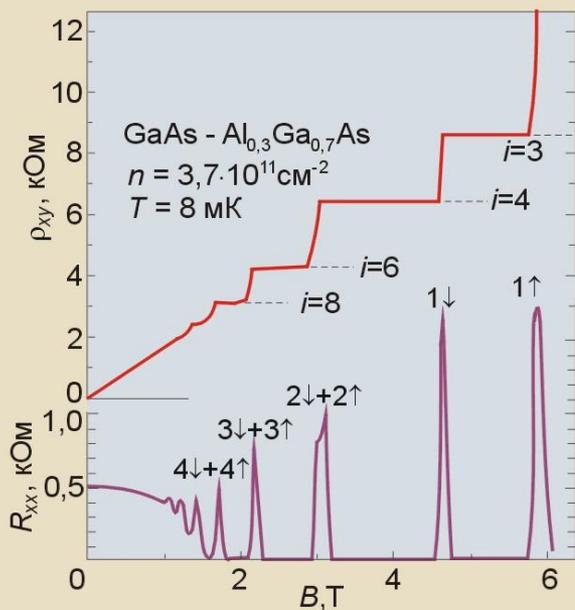
Электрон - вихревое притяжение и образование композитных частиц при дробном заполнении уровней Ландау

# Метрологическое обеспечение нанотехнологий

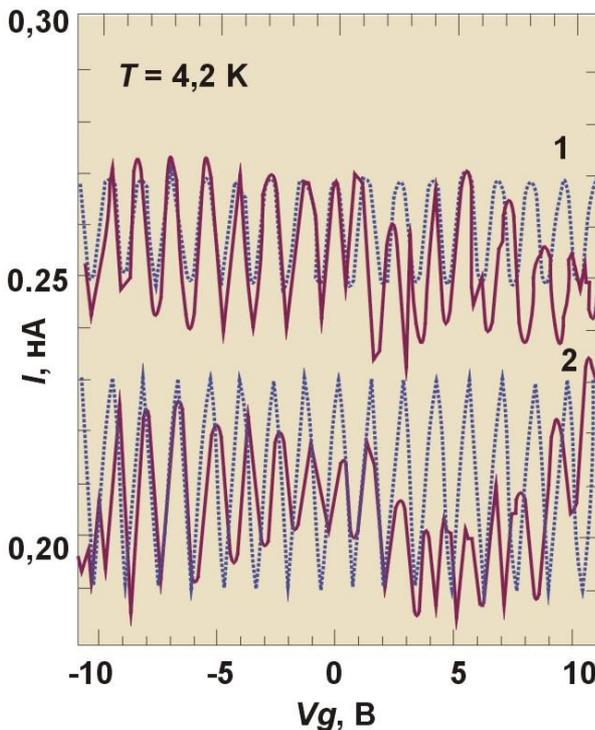


$$\rho_{xy} = \frac{1}{i} \left( \frac{2\pi\hbar}{e^2} \right) \quad (i = 1, 2, 3, \dots)$$

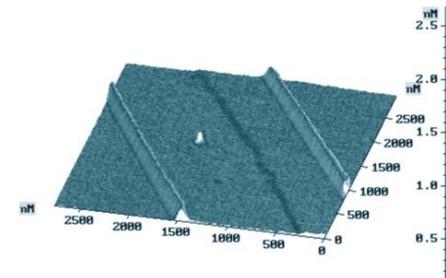
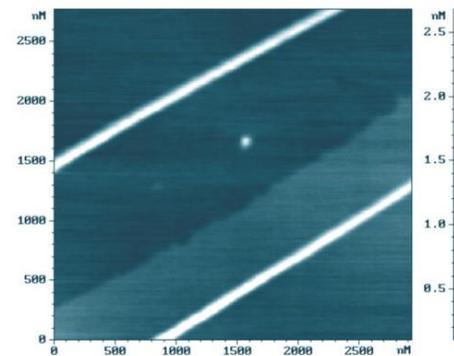
- стандарт электросопротивления (Ом) на основе квантового эффекта Холла;
- стандарт электрического напряжения (Вольт) на основе эффекта Джозефсона;
- стандарт электрического заряда (Кулон) на основе одноэлектронных эффектов в наноструктурах;
- стандарт длины в нанометровом диапазоне (нанометр) на основе моноатомных ступеней на поверхности кремния.



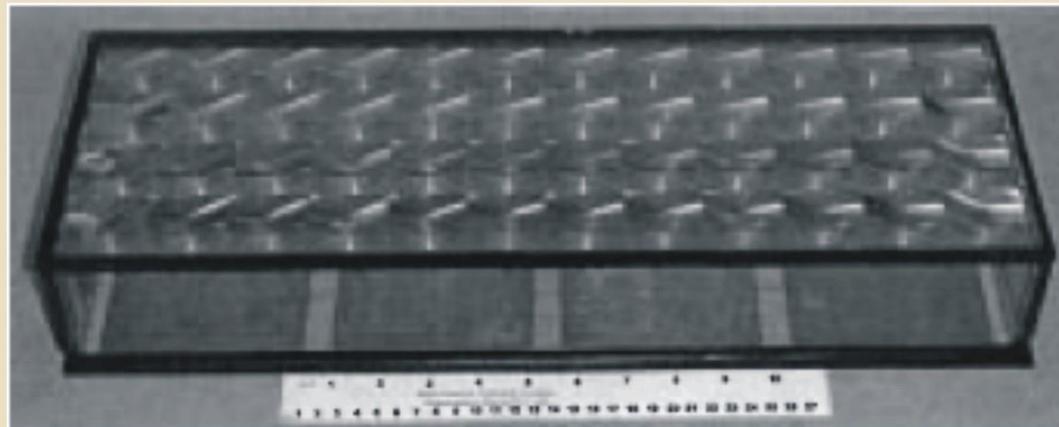
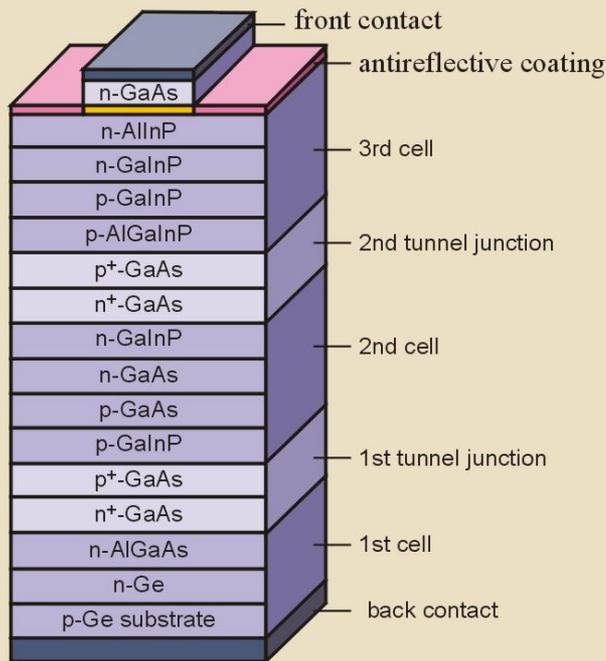
Магнетосопротивление  $R_{xx}$  и холловское сопротивление  $\rho_{xy}$  в зависимости от магнитного поля  $B$  в гетероструктуре GaAs - Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As. Температура  $T = 8 \text{ мК}$ . Электронная плотность в 2D-слое  $3,7 \cdot 10^{11} \text{cm}^{-2}$ , подвижность  $\mu = 4,1 \cdot 10^4 \text{cm}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ . Стрелками отмечены направления спинов на уровнях Ландау с номером  $N$



Одноэлектронные осцилляции в системе с двумя туннельными переходами Ti/TiO<sub>x</sub>



Линии анодного локального окисления с помощью зонда АСМ на поверхности Si(111) с естественным окислом (двухмерное и трехмерное изображения).

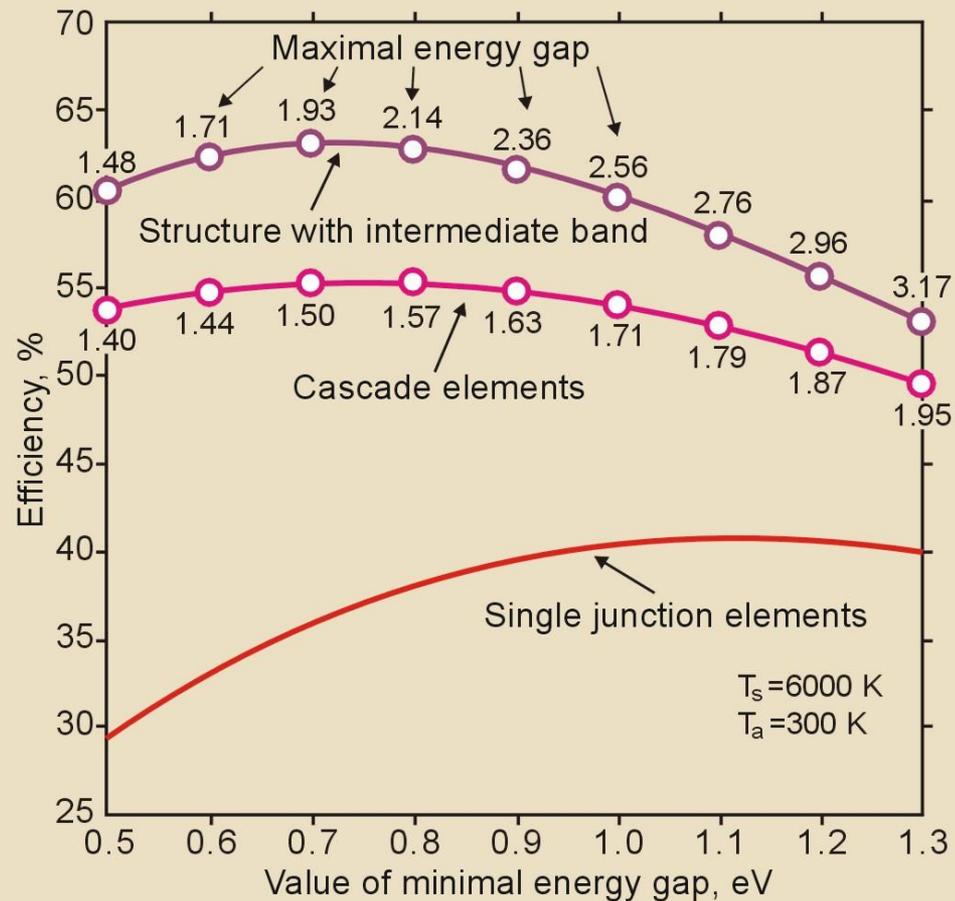
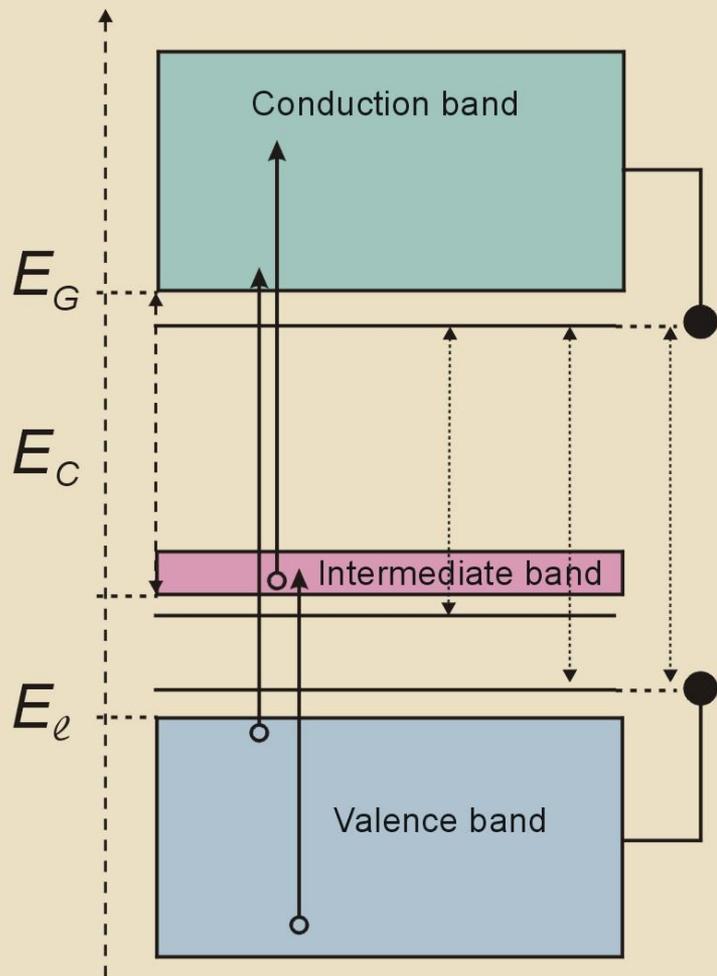


The experimental photo-electric module for transformation of the concentrated solar radiations with the panel from 48 Fresnel lenses

## The theoretical, expected and reached values of efficiency of cascade solar elements

Sunlight spectrum	conversion efficiency,%					
	value	Quantity of p-n - junctions in the cascade				
		1	2	3	4	5
In the conditions of the near-earth Space (AM0)	The theoretical	28	33	38	42	45
	The expected	23	28	33	36	38
	The realised	21.8	27.2	29.3	—	—
In the ground conditions (AM1.5)	The theoretical	30	36	42	47	49
	The expected	27	33	38	42	44
	The realised	25.1	30.3	31.0	—	—
In the ground conditions with concentrators (AM1.5)	The theoretical	35	42	48	52	54
	The expected	31	38	43	47	49
	The realised	27.6	31.1	34.0	—	—

# Prospects for efficiency increase of solar cells in fabrication of semiconductors with intermediated energy band

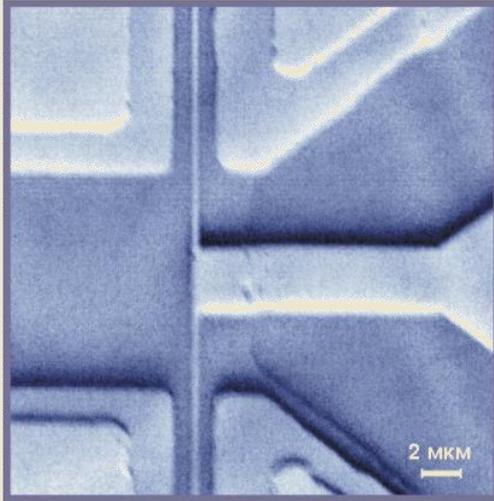


A. Marti, L. Cuadra, and A. Luque

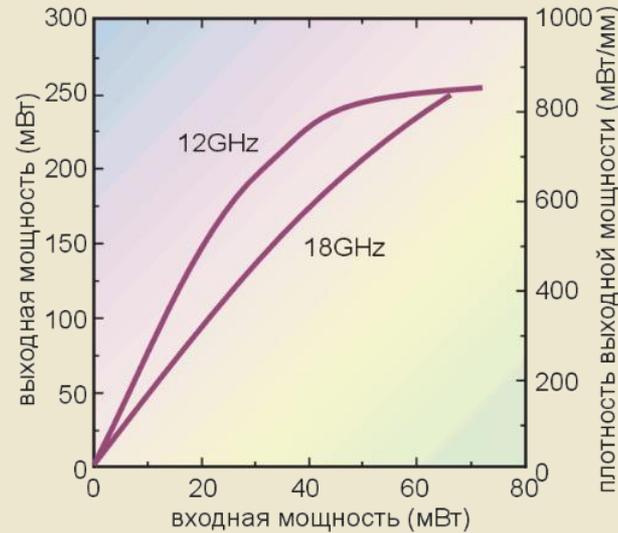
Физика и техника полупроводников, 2004, т. 38, в. 6, 985-987

# Микроволновый полевой транзистор на псевдоморфной эпитаксиальной гетероструктуре AlGaAs/InGaAs/GaAs

Изображение полевого транзистора в сканирующем электронном микроскопе



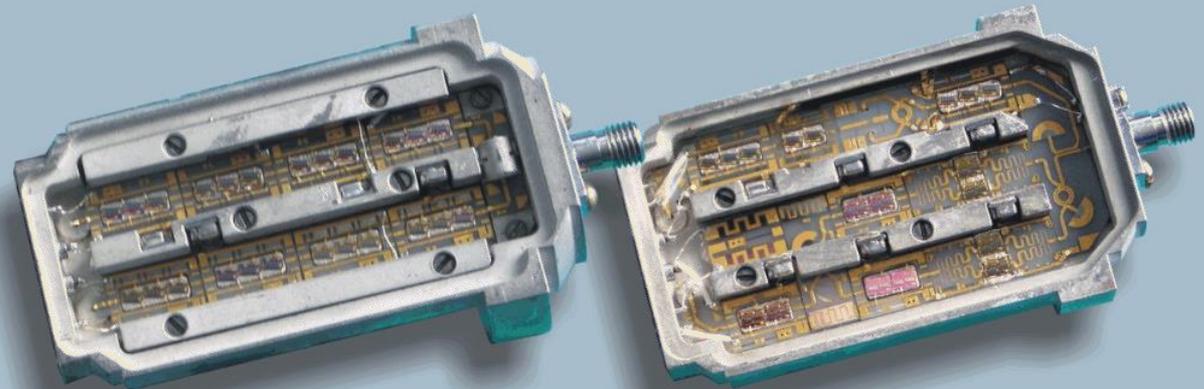
Выходные характеристики транзистора



Структура псевдоморфного полевого транзистора

n <sup>+</sup> -GaAs : Si ( $6 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ )	40 нм
i-GaAs	5 нм
i-Al <sub>0,38</sub> Ga <sub>0,62</sub> As	30 нм
In <sub>0,15</sub> Ga <sub>0,85</sub> As : Si ( $4 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ )	19 нм
i-GaAs	10 нм
i-Al <sub>0,38</sub> Ga <sub>0,62</sub> As	100 нм
i-GaAs	100 нм
(AlAs) <sub>5</sub> (GaAs) <sub>7</sub> ×20 сверхструктура	79 нм
400°C i-GaAs	100 нм
полуизолирующая подложка GaAs	400 мкм

Модули для АФАР с выходной мощностью усилителя 6 Вт на частоте 10 ГГц



Совместно с ОАО «Октава» (Новосибирск) и ОАО «Микран» (Томск)



# GaAs-гетероструктуры для СВЧ приборов

ОКП 177885  
УДК 621.315.592

ОКЗ №  
Группа В51

СОГЛАСОВАНО

Генеральный директор  
ФГУП «НПП «Исток»

А.А. Борисов

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФП СО РАН  
Академик РАН

А.Л. Асеев

СТРУКТУРЫ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СОЕДИНЕНИЙ

ГАЛЛИЯ-ИНДИЯ-АЛЮМИНИЯ-МЫШЬЯКА

Технические условия

ТУ 1778-011-03533808-2010

Разработана конструкция и МЛЭ технология ряда гетероструктур для

- GaAs MESFET
- AlGaAs/InGaAs/GaAs HFET
- AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT
- AlGaAs/GaAs pin-диодов

Создана конструкция и МЛЭ технология гетероструктур delta-(pn)-AlGaAs/InGaAs/GaAs для DpHEMT, не имеющих аналогов в мире

## ИЗДЕЛИЕ АЗ-АП-51 (ОАО «Октава») на 302 КМИС

Блок управления

Блок передатчика с 32-х-элементной АФАР

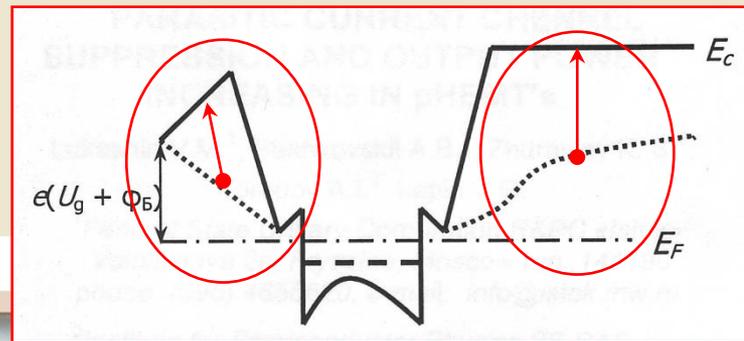
Блок приемника и источников питания



Модуль передатчика (31 шт.)

Модуль приемника (5 шт.)

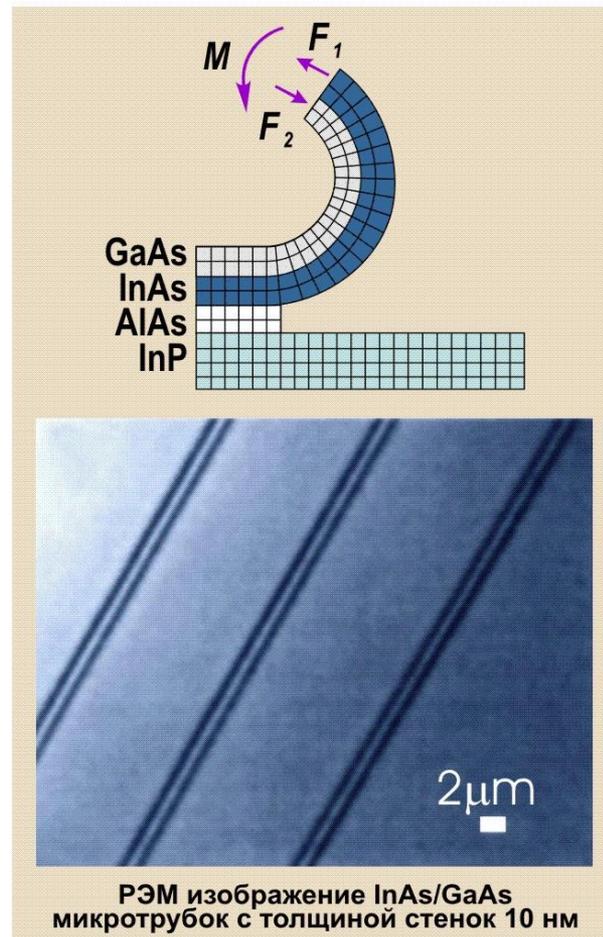
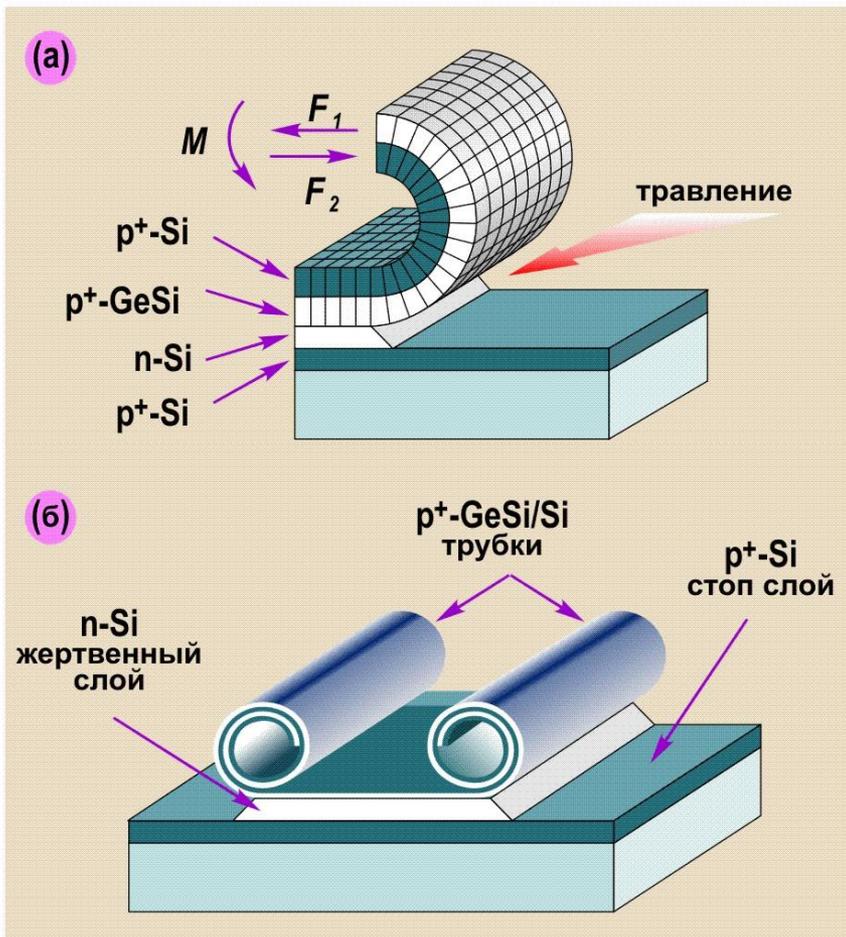
## Зонная диаграмма delta-(pn)-DpHEMT



**Руд=1,6 Вт/мм, Кр>8дБ на 10 ГГц. Данные ФГУП «НПП «Исток».** Параметры delta-(pn)-DpHEMT значительно превосходят параметры лучших зарубежных DpHEMTов.

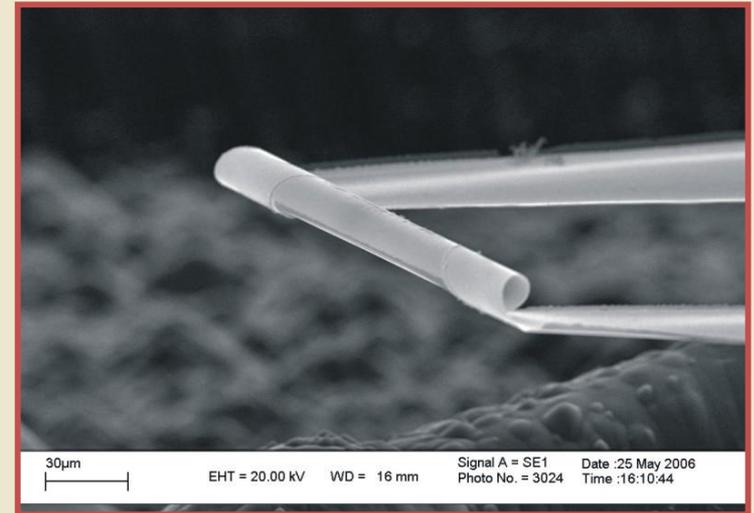
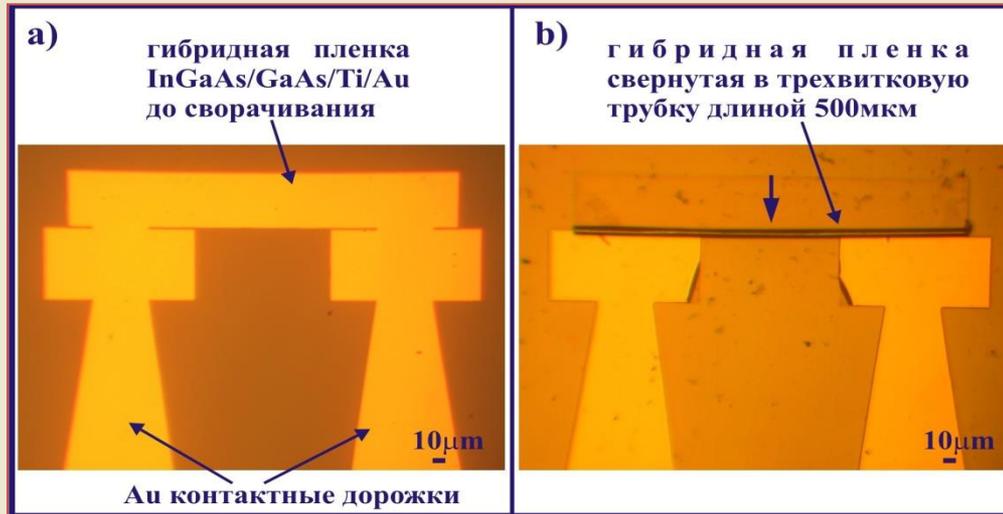


## Изготовление полупроводниковых микро - и нано трубок



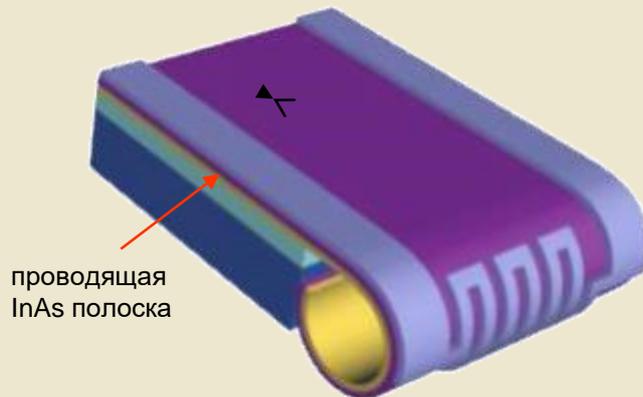
V.Ya.Prinz, V.A.Seleznev, A.K.Gutakovskiy, A.V.Chehovskiy, V.V.Preobrazhenskii, M.A.Putyato, T.A.Gavrilova, Physica E, Low-dimensional systems & nanostructures, 2000, v.6, pp.828-831.  
S.V.Golod, V.Ya.Prinz, V.I.Mashanov, A.K.Gutakovskiy, Semiconductor Science and Technology, 2001, v.16, pp.181-185.  
В.Я Принц в кн: **Нанотехнологии в полупроводниковой электронике**, изд. СО РАН, Новосибирск, 2004, § 2.1, с. 85-120

# «Принцэлектроника» в действии: сверхбыстродействующие термоанемометры на основе полупроводниковых нанотрубок



Гибридный термоанемометр AuTi/InGaAs, изготовленный в едином технологическом процессе с помощью оптической литографии

Au/Ti микротрубка припаяна к держателю

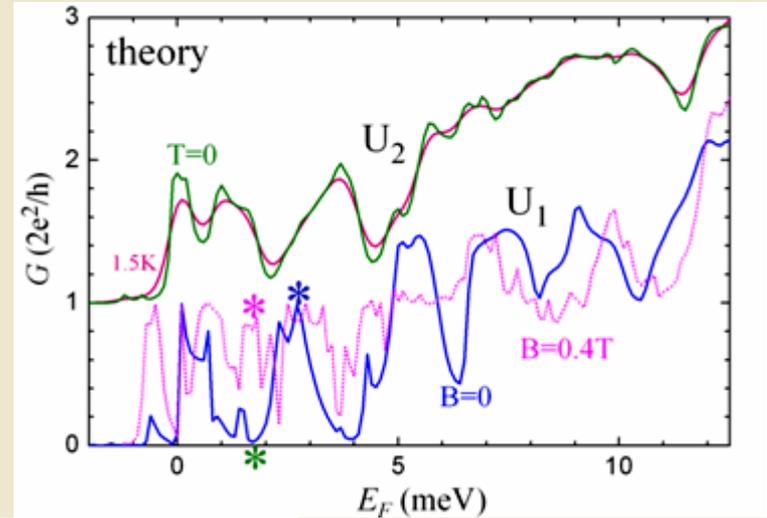
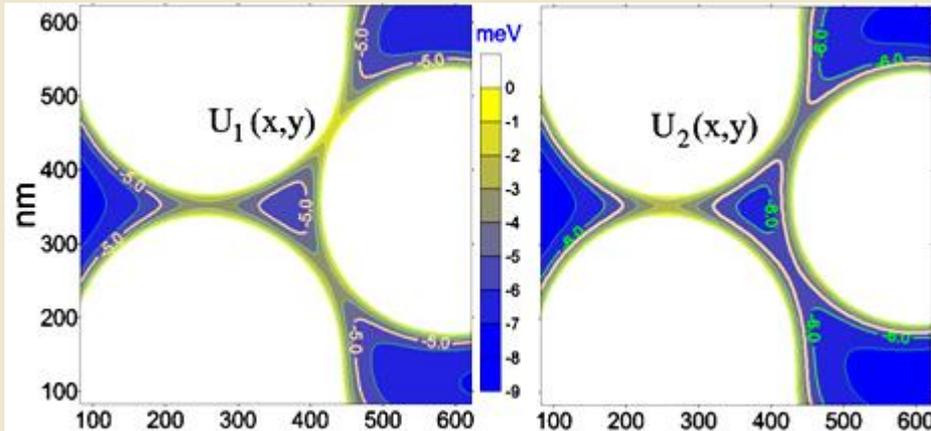


Постоянная времени трубчатых датчиков ~1 мкс (при постоянной времени проволочных датчиков 1 мс). Сверхбыстродействующие и сверхчувствительные термоанемометры используются для фиксации ламинарно – турбулентного перехода при решении проблем устойчивости взлета ракет.

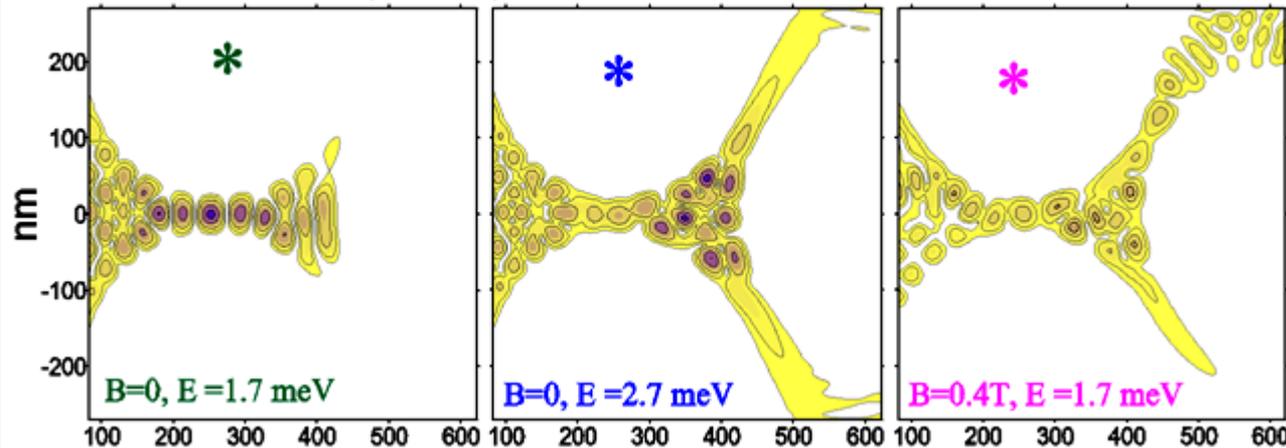
**Институт физики полупроводников СО РАН**  
**Институт теоретической и прикладной механики СО РАН**

# Когерентное рассеяние в малой квантовой точке

Учет асимметрии точки и влияния магнитного поля на транспорт



Probability density distributions in an electron wave for U1



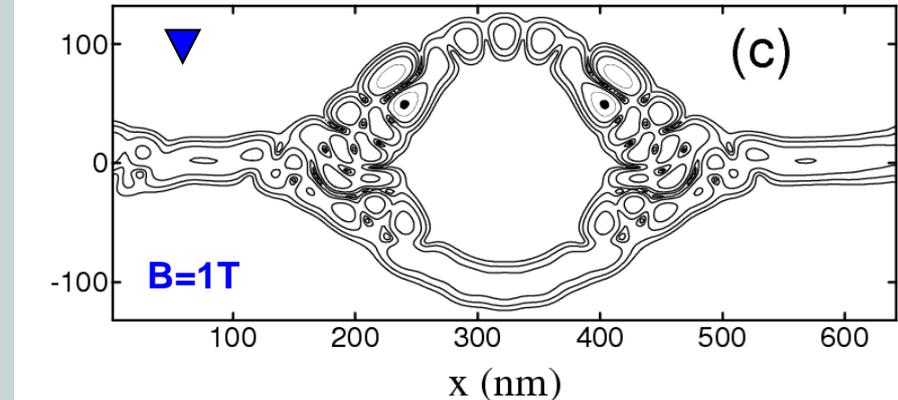
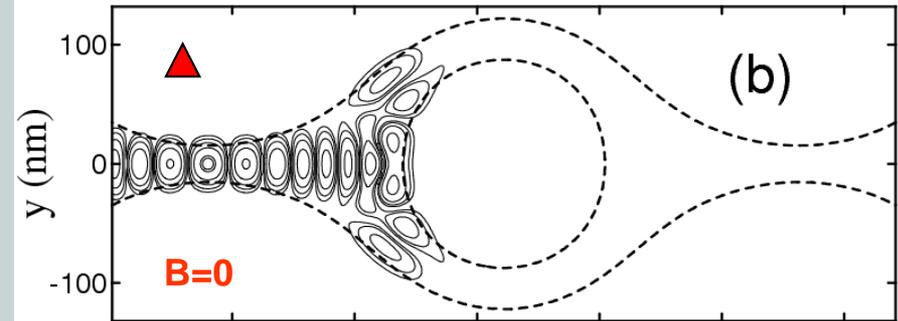
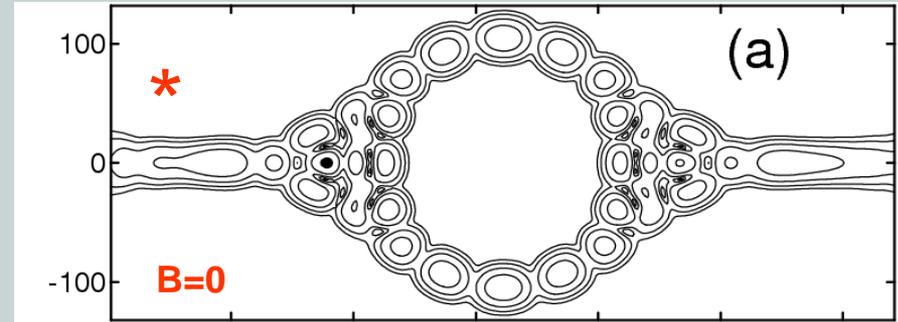
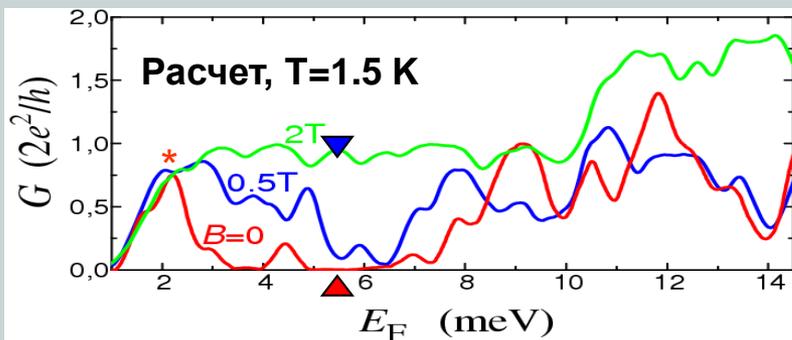
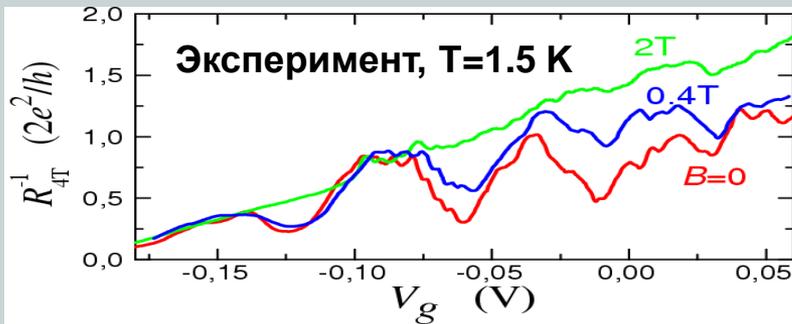
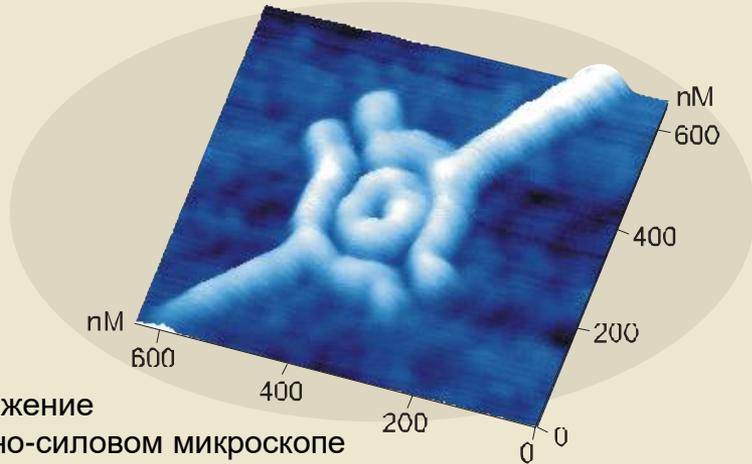
$$C_g = 5.1 \cdot 10^{-17} \text{ F},$$

$$\Delta E_F \approx 2.5 \text{ meV},$$

$$\Delta Q \approx 10 \cdot e$$

**Интерференционные осцилляции с периодом в несколько электронов**

# Осцилляции отрицательного магнитосопротивления в баллистическом малом кольцевом интерферометре



А. А. Быков, Д. В. Номоконов, А. К. Бакаров, О.Эстибаль, Ж.К.Портал, Резонансное обратное рассеяние в субмикронных кольцах, Письма в ЖЭТФ, т.78, 36 (2003).

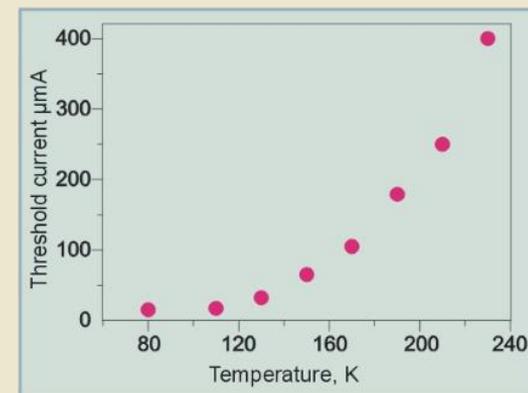
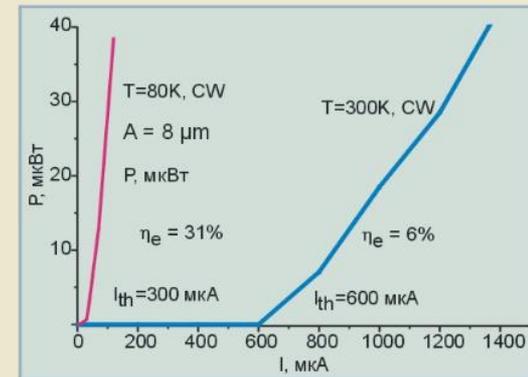
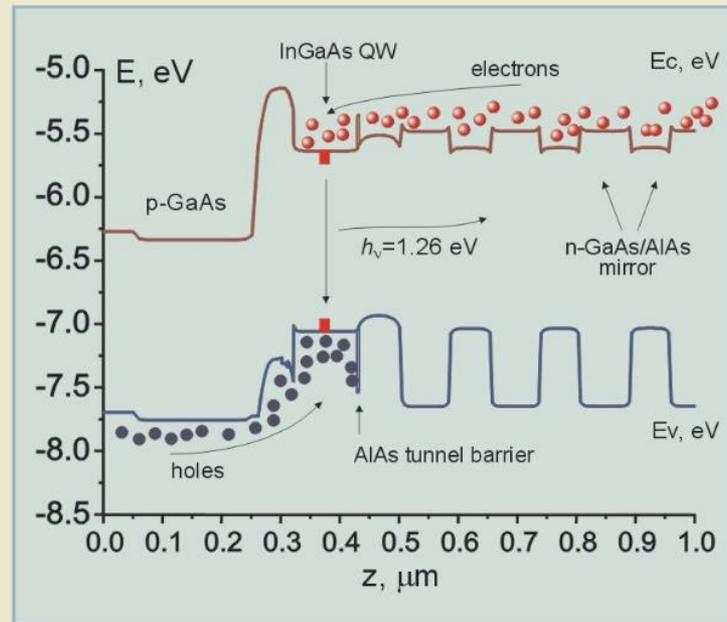
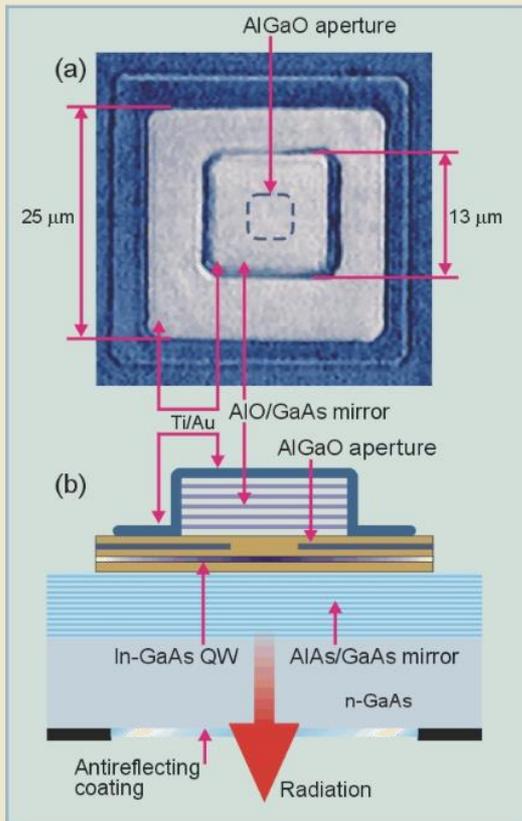
О.А.Ткаченко, В.А.Ткаченко, Д.Г.Бакшеев, "Волновые функции баллистического электрона и отрицательное магнитосопротивление в малом кольцевом интерферометре" Письма в ЖЭТФ, т.79, 351 (2004).



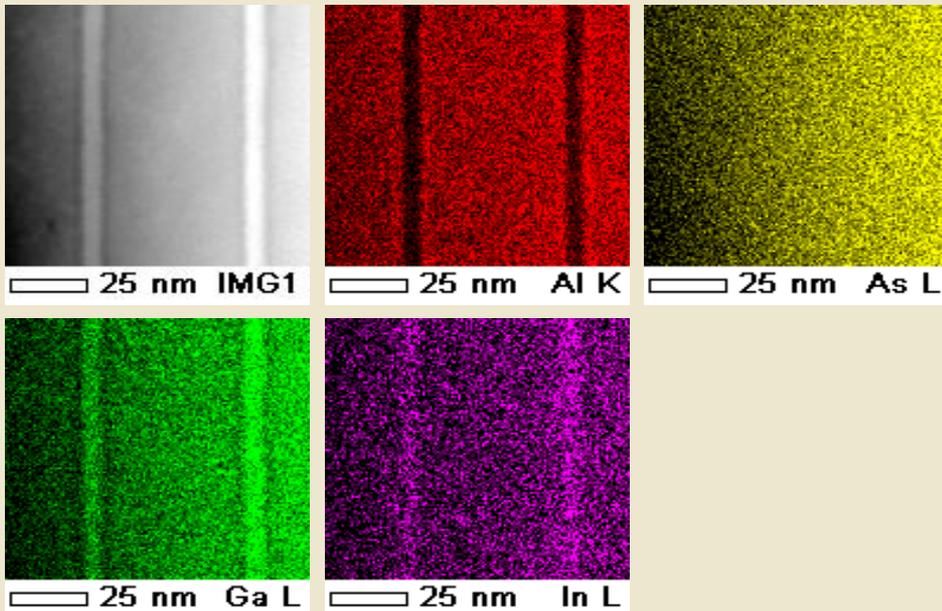
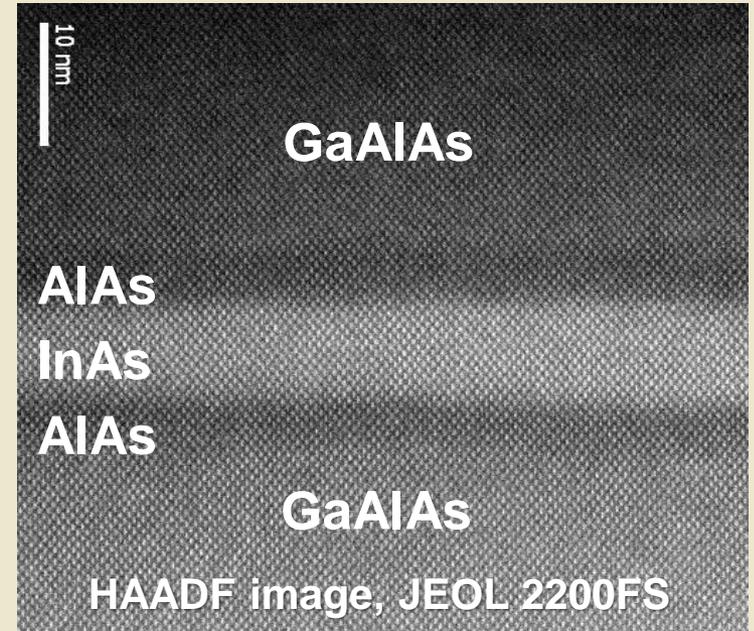
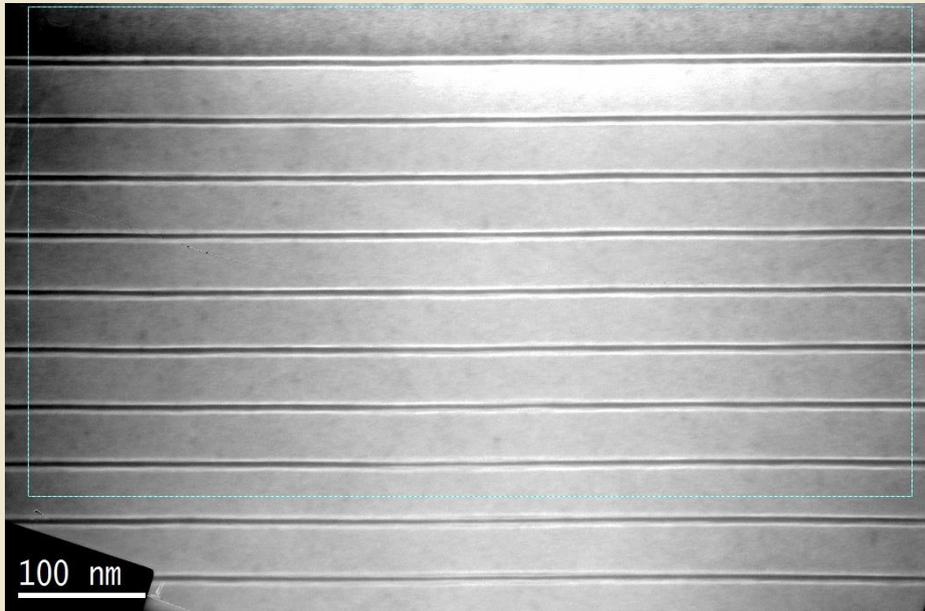
# INSTITUTE OF SEMICONDUCTOR PHYSICS

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES, SIBERIAN BRANCH

## Vertical cavity laser on the base of heterostructures with $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ quantum wells



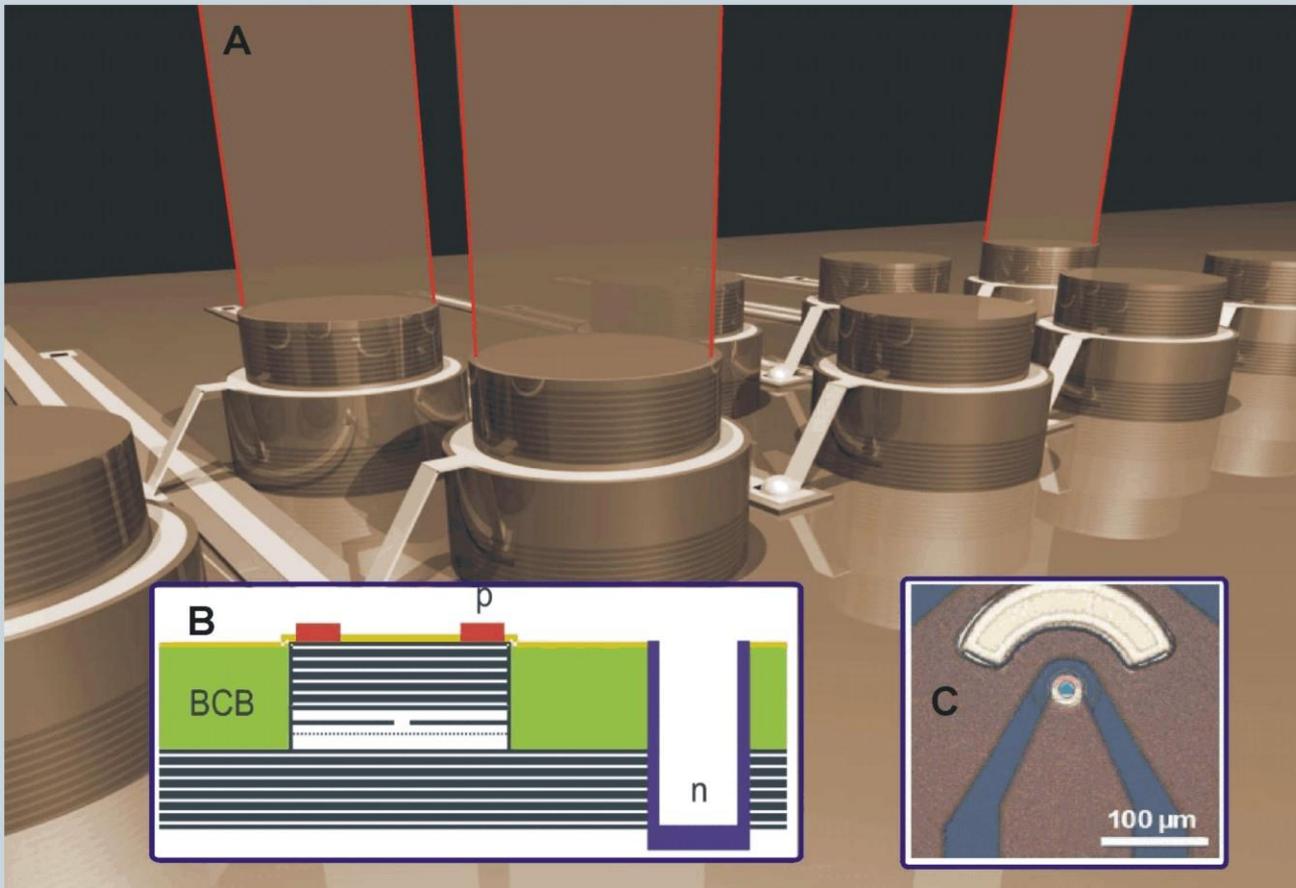
# InAs quantum well between AIAs barriers in the matrix GaAlAs



*High resolution electron microscopy - JEOL-4000EX, 400 kV; EDAX - chemical mapping, JEOL 2200 FS, 200kV.*

*Courtesy by A.K.Gutakovskii and A.I.Toropov, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Novosibirsk*

# High frequency semiconductor vertical-cavity surface-emitting lasers

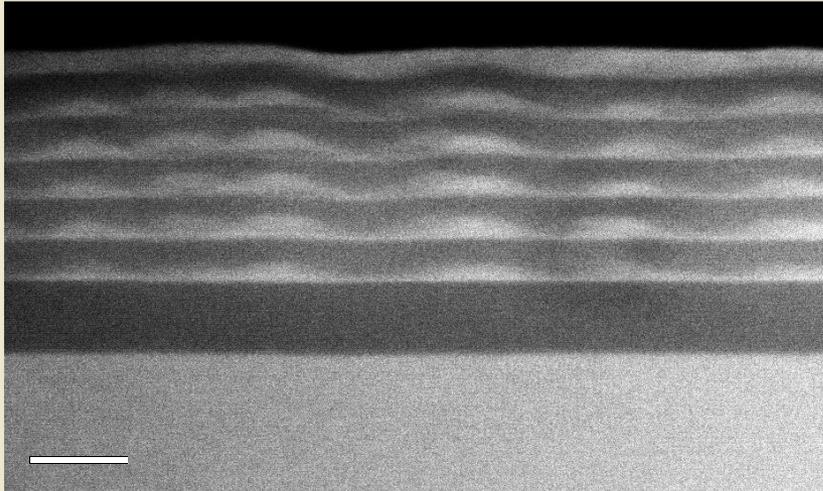


**Schematic sketch of parallel short-distance optical networks based on high frequency semiconductor vertical-cavity surface-emitting lasers (A). Device layout (B) and microscope image (C) of the developed VCSEL with 20 Gb/s Error-Free Operation.**

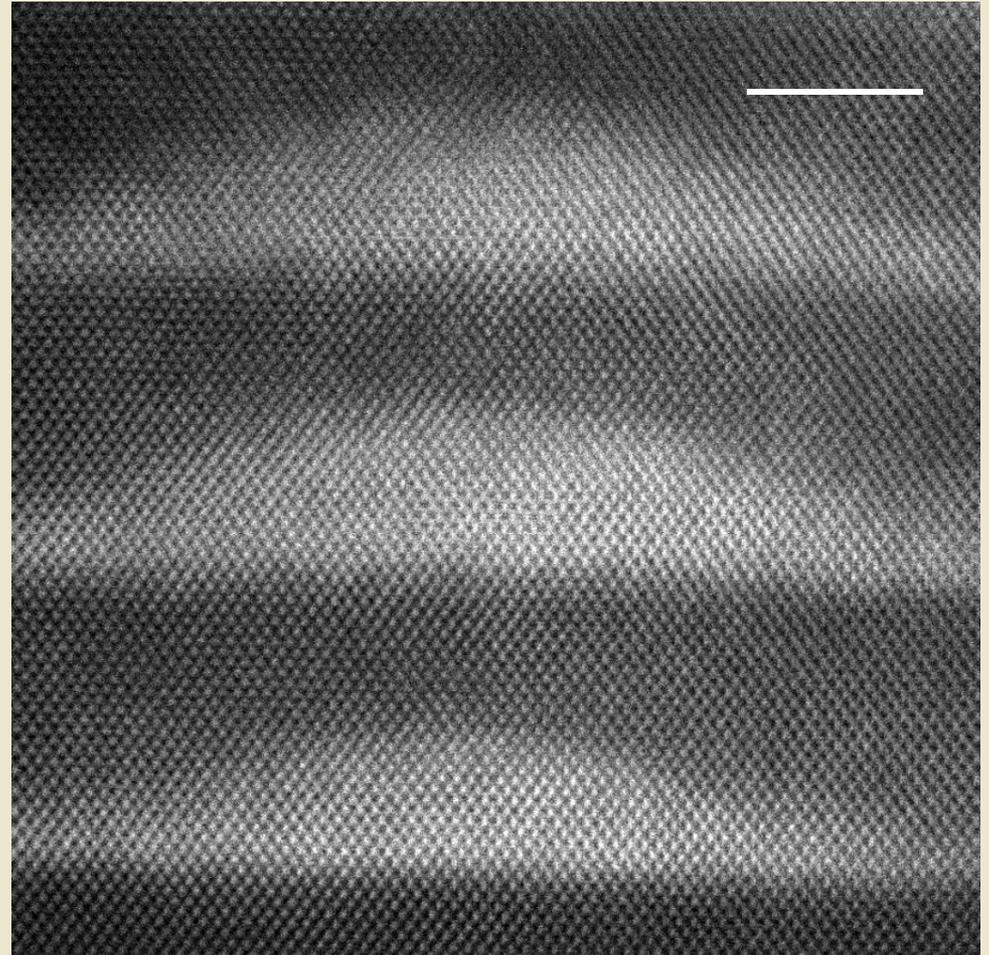
**Arrays of such VCSELs offer the challenge for 1Tb/s optical network**

Institute of Semiconductor Physics, Novosibirsk, Ioffe Physicotechnical Institute, St.-Petersburg, Institut für Festkörperphysik and Center of NanoPhotonics, Technische Universität Berlin, Fraunhofer Institut für Nachrichtentechnik, Heinrich-Hertz-Institut Berlin, NL-Nanosemiconductor GmbH, Dortmund, Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik, Halle, Germany

## InAs “quantum dots” in the AlAs matrix

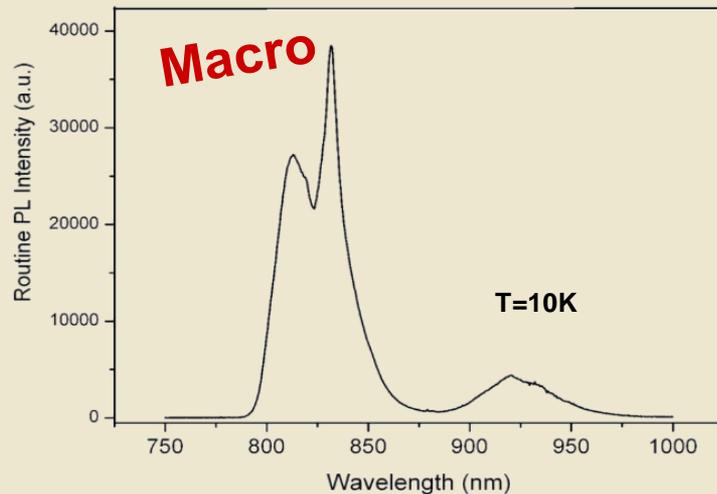


Cross-section (110) STEM images of  
heterosystem (InAs-AlAs)-GaAs(001).  
**Titan 80-300, 300kV**

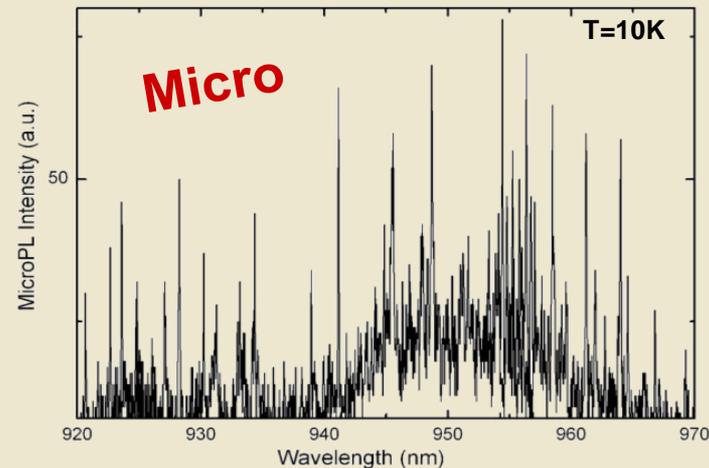


# The comparison of PL spectra of InAs QDs ensemble with electroluminescence spectrum of developed nano-LED.

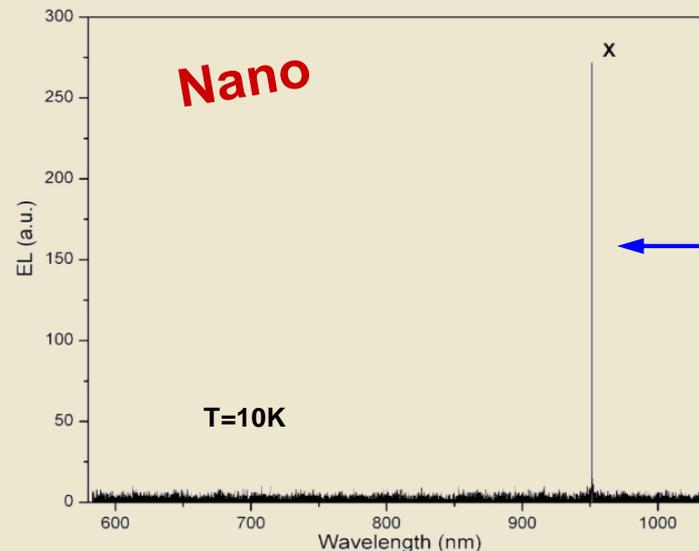
**Macro-PL** spectrum, laser spot diameter  $\sim 100 \mu\text{m}$



**Micro-PL** spectrum, laser spot diameter  $\sim 2 \mu\text{m}$



Application:  
Quantum cryptography;  
Precise spectroscopic systems;  
Precise optical power standards.

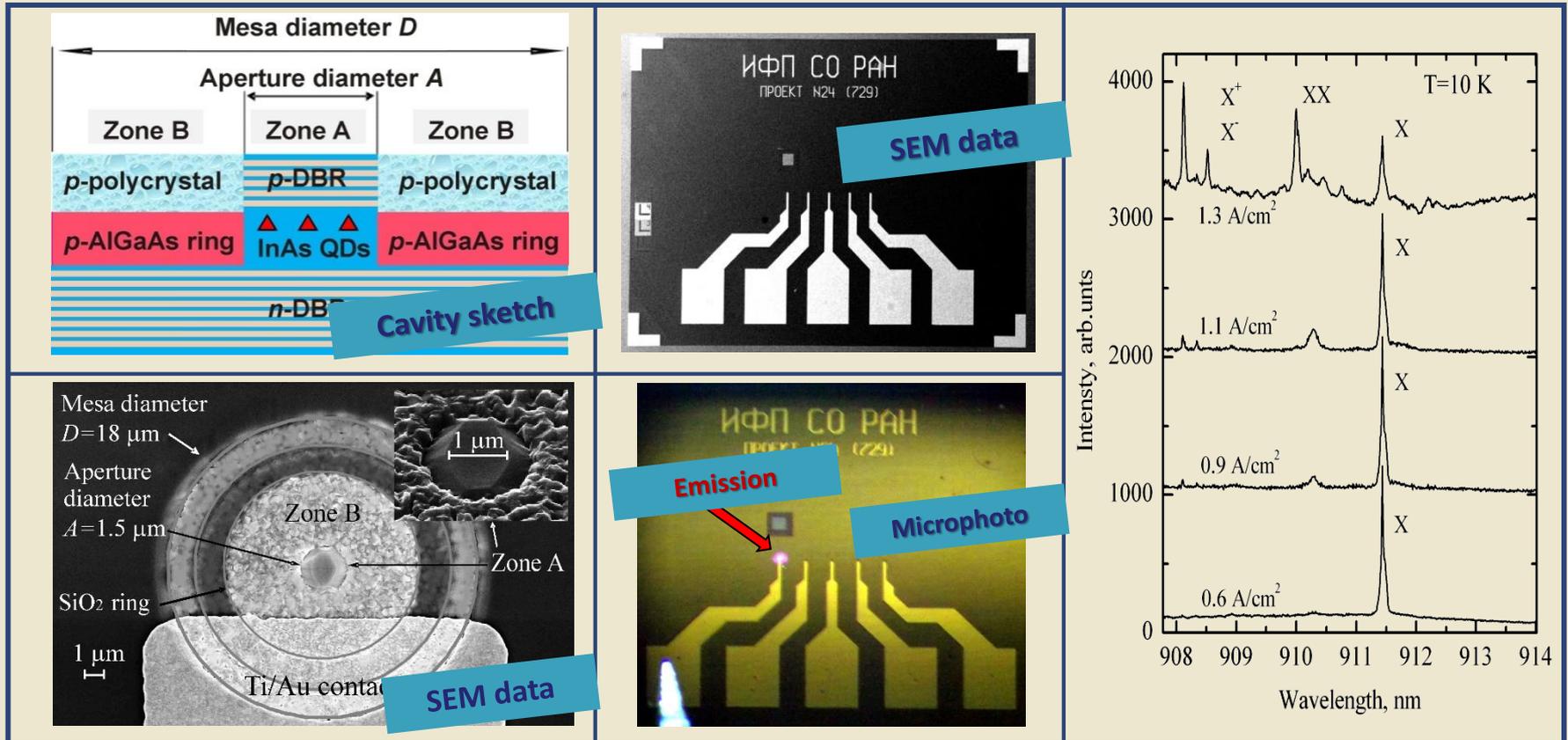


Electroluminescence spectrum with subnanoampere current excitation through submicron oxide aperture.  
Confident addressing to single quantum dot.  
Record-breaking high injection efficiency  $\sim 0.2$   
(1 photon per 5 electrons)

# Single Quantum Dot Emitters

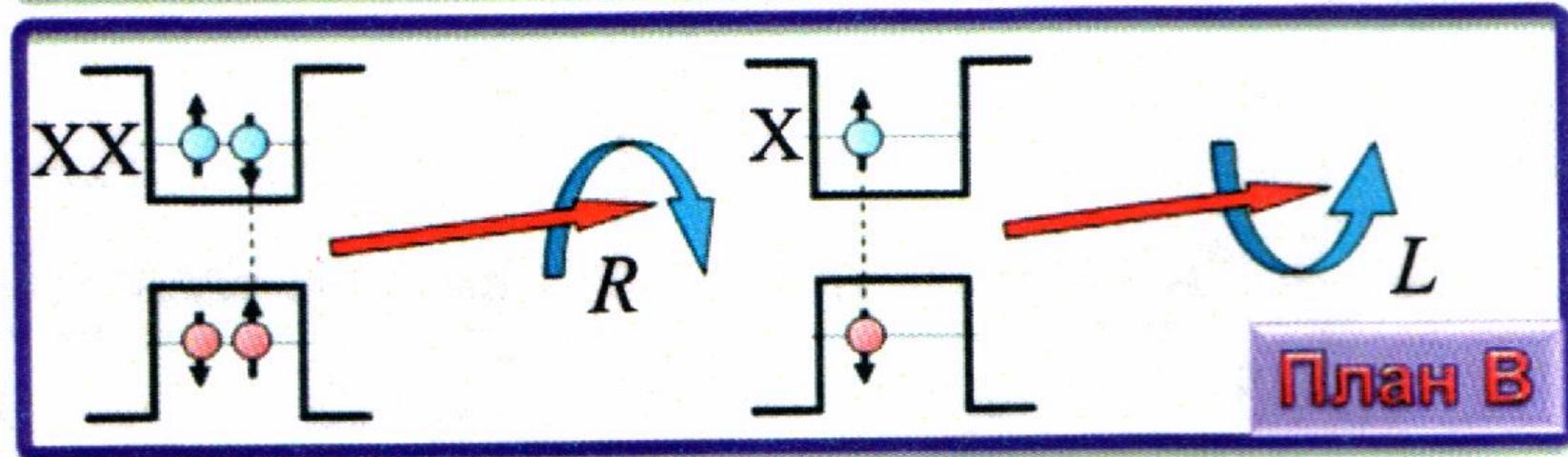
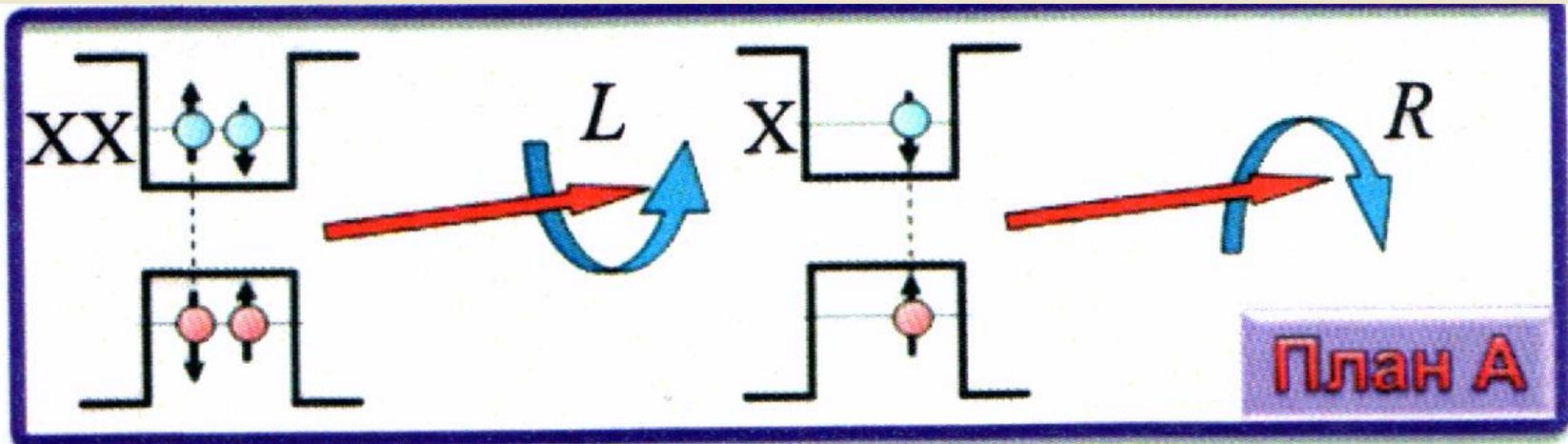
## Single Photon Emitters (SPE) and Entangled Photon Pairs Emitters (EPPE)

The design of semiconductor Bragg microcavity for single photon emitters has been developed and realized. The construction of microcavity assigns the effective current pumping of selective positioned InAs quantum dots in micron size AlGaAs aperture, high external quantum efficiency (up to 80%) and low divergence of output light (numerical aperture  $NA < 0.2$ ).



Electroluminescence of single InAs QD

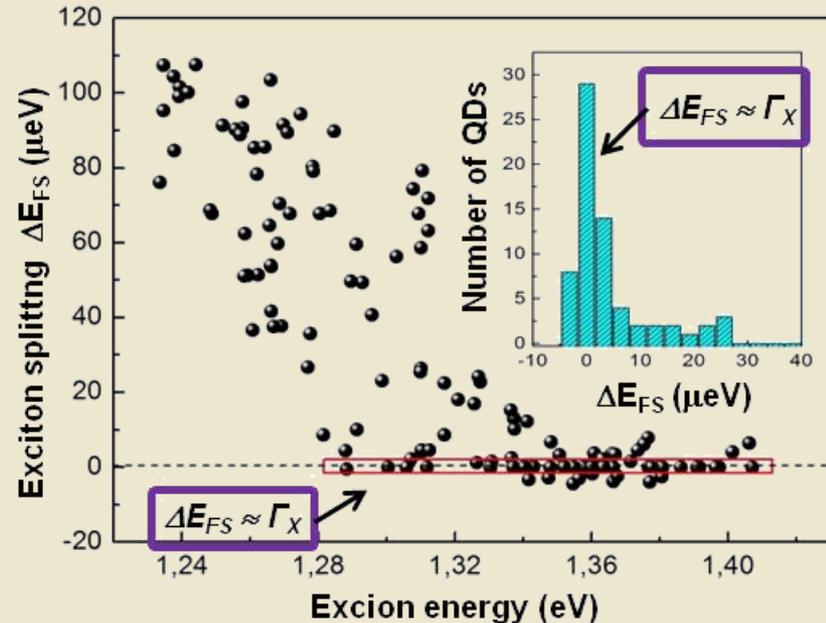
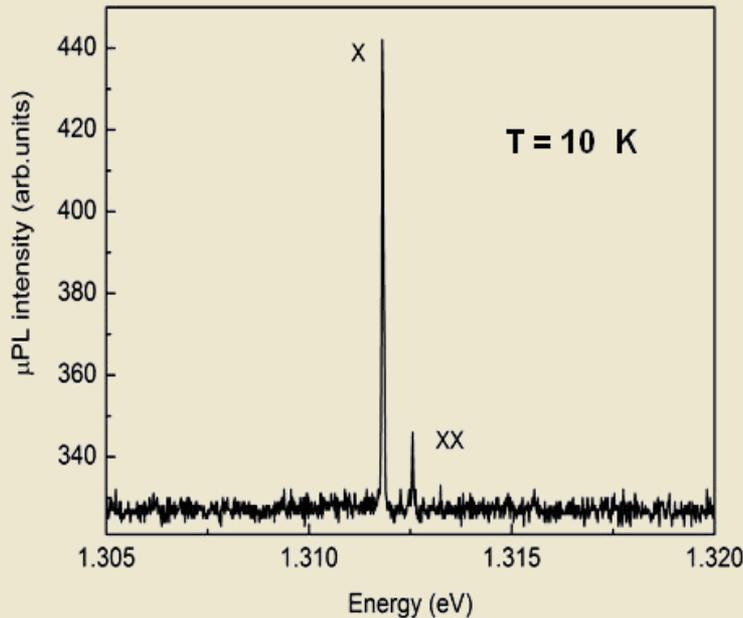
Generation of polarization entangled photonic pairs at recombination process of bi-exiton and exciton in semiconductor quantum dot



# Single Quantum Dot Emitter of Entangled Photon Pairs

Polarization-entangled photon pairs can be emitted by semiconductor QDs in the biexciton–exciton recombination cascade if the exciton states are energy degenerate or their splitting  $\Delta E_{FS}$  does not exceed the natural width of the exciton levels  $\Gamma_X = \hbar/\tau_X$  (where  $\tau_X$  is the exciton lifetime).

The fine structure of the exciton states in InAs quantum dots grown by the Stranski–Krastanov method with short growth interruptions, which provides very small QDs density, has been studied by microphotoluminescence. It has been demonstrated that, for the subassembly of QDs with exciton energies in the range of 1.3–1.4 eV, the condition  $\Delta E_{FS} \approx \Gamma_X$  is valid, **which is a prerequisite for the generation of entangled photon pairs.**

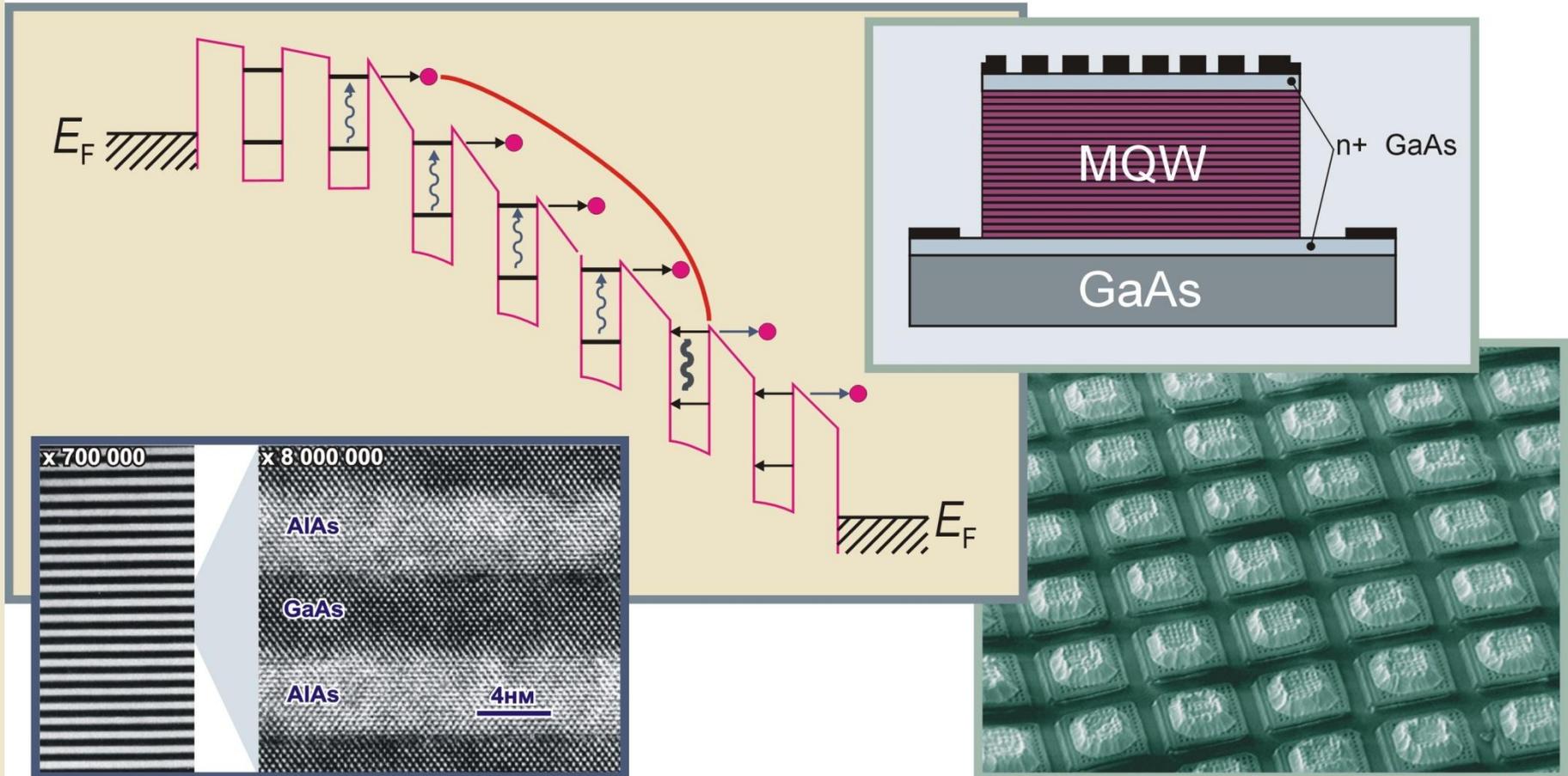


MicroPL spectrum of single InAs QD (**left**). Data on the exciton-state splitting  $\Delta E_{FS}$  for 135 InAs QDs (**right**). Red rectangular box indicates experimental points for which the value of  $\Delta E_{FS}$  is comparable to the natural width of the exciton states. Inset: histogram for the distribution of QDs with respect to the exciton-state splitting in the range of  $\Delta E_{FS}$  from  $-10$  to  $40 \mu\text{eV}$ .

# ТЕПЛОВИДЕНИЕ, НОЧНОЕ ВИДЕНИЕ



## Photosensitive infra-red photosensitive device on multi-quantum well epitaxial structures AlGaAs/GaAs

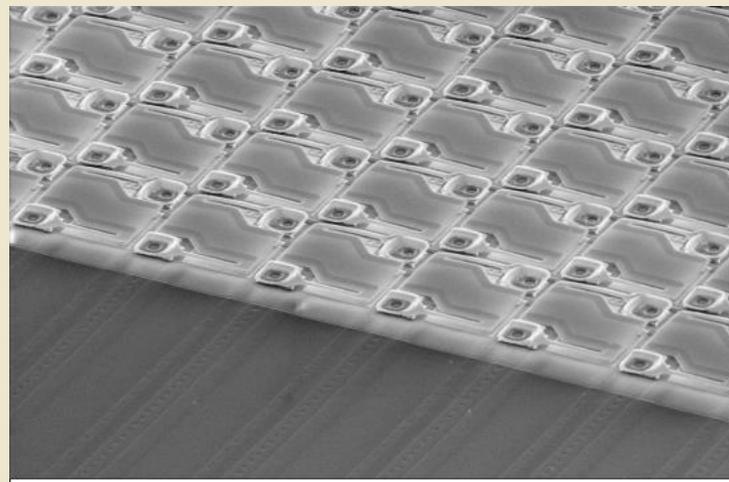
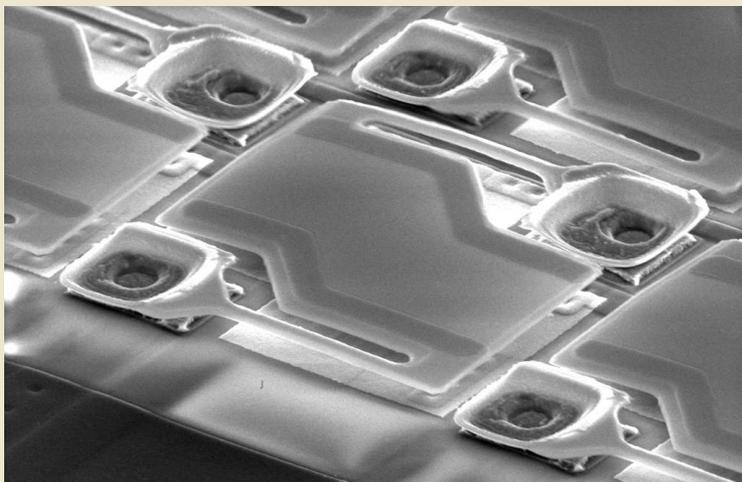


**Thermovision image obtained by means of matrix photodetector within 8 – 12  $\mu\text{m}$  range**

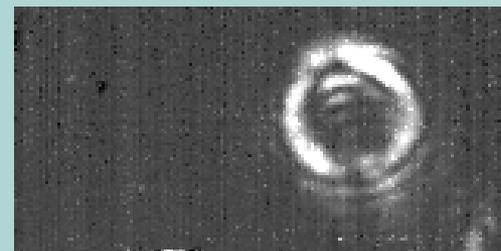
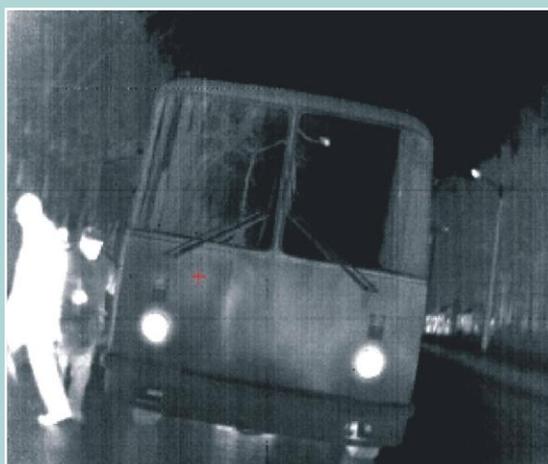


# Неохлаждаемые микроболометрические ФПУ форматом 320x240 и 160x120 для инфракрасного и терагерцового диапазонов

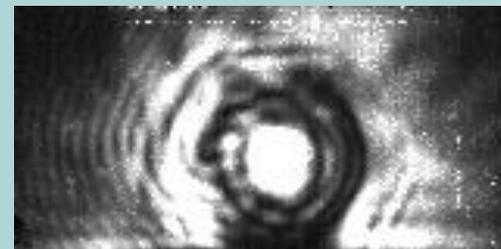
## Матричный микроболометрический приемник ИФП СОРАН



Примеры изображений в инфракрасном  $\lambda = 8-14$  мкм и терагерцовом  $\lambda = 130$  мкм диапазонах



Гайка М8 на отражение за листом бумаги



Гайка М8 на просвет за винипластом толщиной 2 мм

# ИК ФПУ на основе неохлаждаемых матричных микроболометрических приемников

Проведены испытания в Прокопьевской горно-спасательной части, Кузбасс



Общий вид микроболометрической головки (а) и тепловизионной камеры (б)

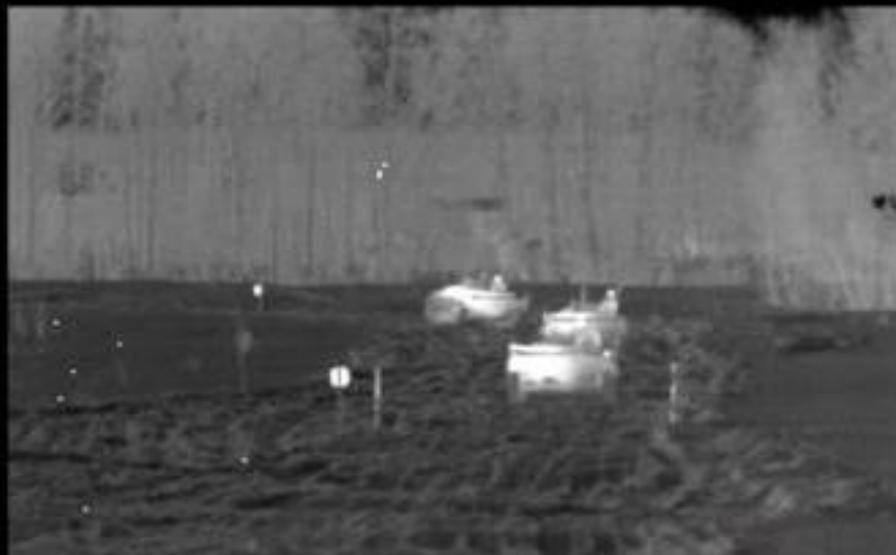


Изображение спасателей в конце задымленного тоннеля на удалении 20 м (а) и реальное изображение тоннеля со степенью задымленности 4 балла.



Разработана серия устройств на основе неохлаждаемых матричных микроболометрических приемников: тепловизионная камера с расширенными функциональными возможностями и с выводом изображения на малогабаритный жидкокристаллический экран форматом 2х3 см; опытный наשלмный прибор для регистрации изображений в условиях ограниченной **ВИДИМОСТИ**

# Тепловые изображения ИК камеры на микроболлометрах формате 320x240



примеры изображений



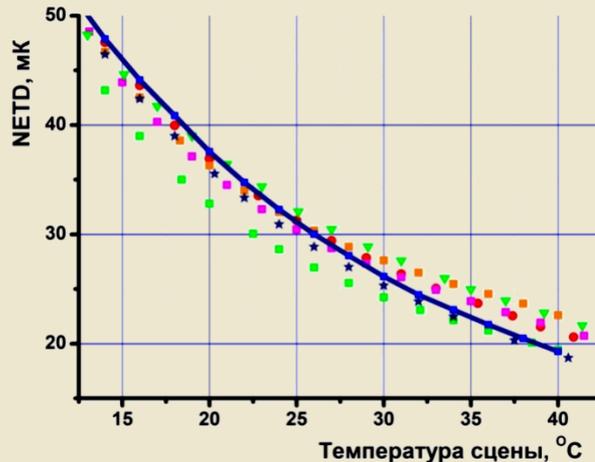
# Медицинский матричный тепловизор "СВИТ"

Сертификат России Ru. АЯ79.Р15452; EC Certificate No. 11 0176 QS/NB



**Назначение:** медицинская, научная термография на основе дистанционного измерения распределения температуры по поверхности объектов.

**Применение в медицине:** не инвазивный метод диагностики в терапии, онкологии, ангиологии, маммографии, хирургии, травматологии, ревматологии, неврологии, эндокринологии, рефлексотерапии, косметологии, фармакологии, педиатрии.



### Технические характеристики:

Спектральный диапазон .....2.6 – 3.0 мкм  
Формат кадра (число пикселей) ...128x128  
Частота кадров..... до 100 Гц  
Температурная чувствительность....25 мК  
Предельная чувствительность .....7 мК  
Охлаждение жидким азотом ...200 мл на 10 ч  
Размеры: ..... диам.110 мм, длина 260 мм  
Вес ..... 3.6 кг  
Интерфейс ..... Hi-Speed USB 2.0

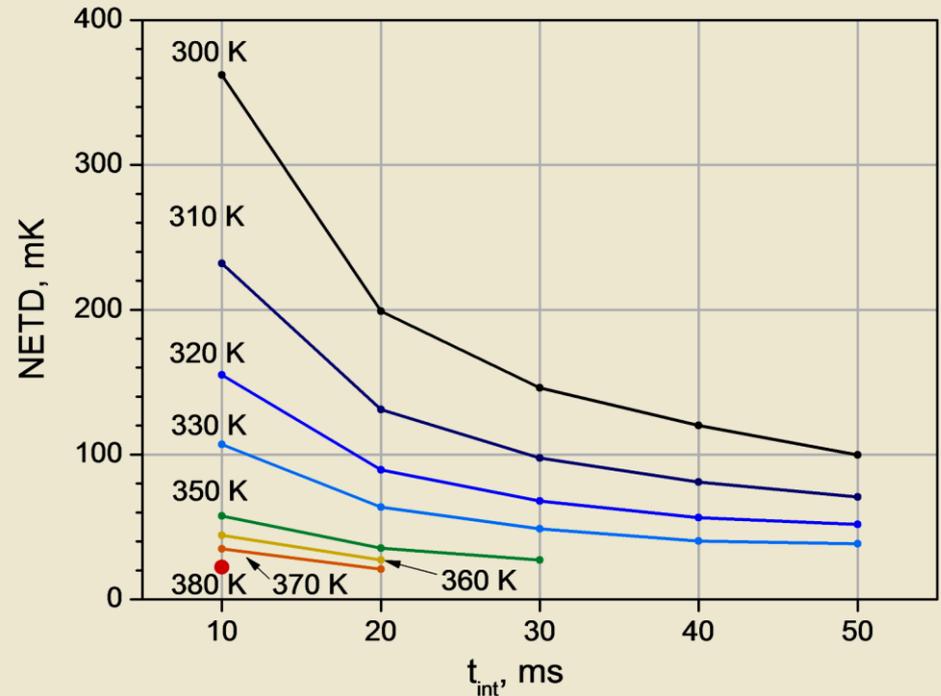
# Инфракрасный сканирующий микроскоп с высоким пространственным разрешением



## Фотоприёмники:

- InAs матрица 128×128 элементов, спектральный диапазон 2.6 – 3 мкм
- InSb линейка 192×2 элемента, спектральный диапазон 3 – 5 мкм

Пространственное разрешение 1.6 мкм



Эквивалентная шуму разность температур для  
ИК микроскопа с 6х кратным объективом

# Быстродействующий ИК-спектрометр на основе линейчатого модуля 1x384 InAs

## Параметры спектрометра

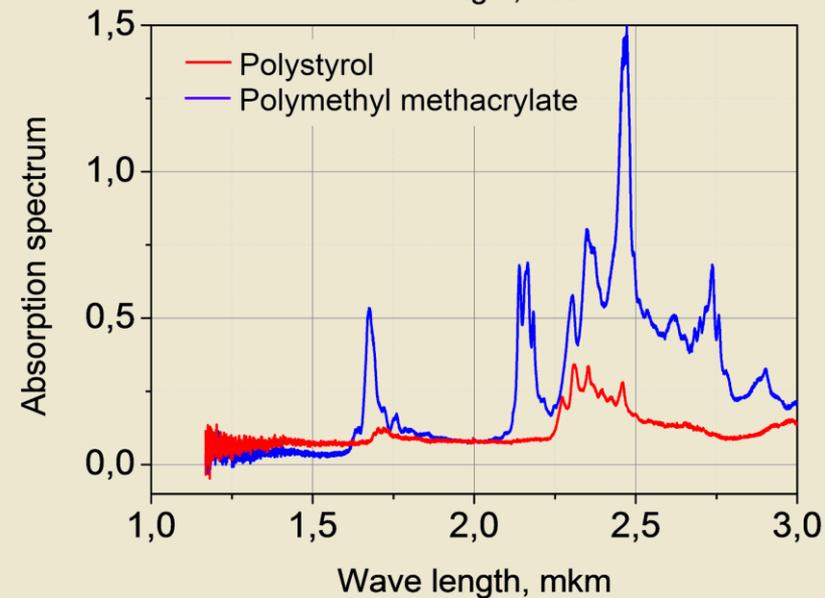
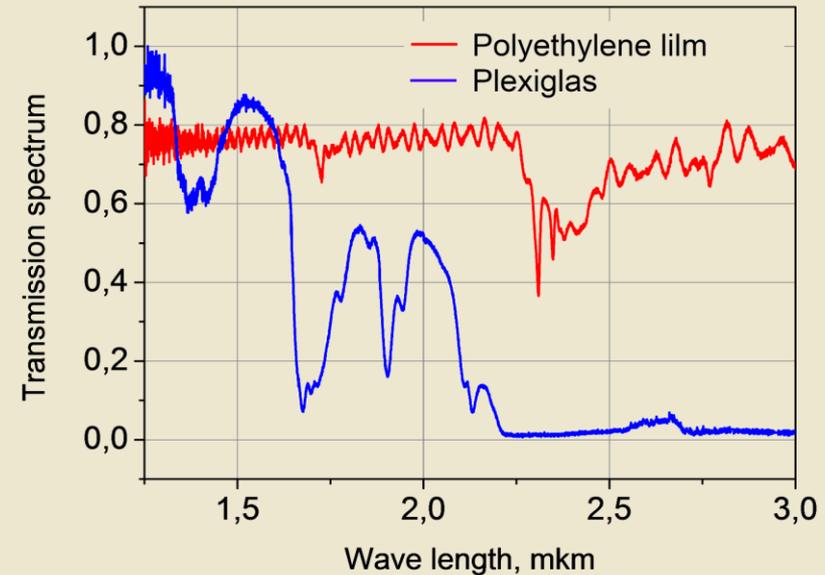
Спектральный диапазон 0.5 – 3.05 мкм

Время накопления элементов 0.2 – 10 мс

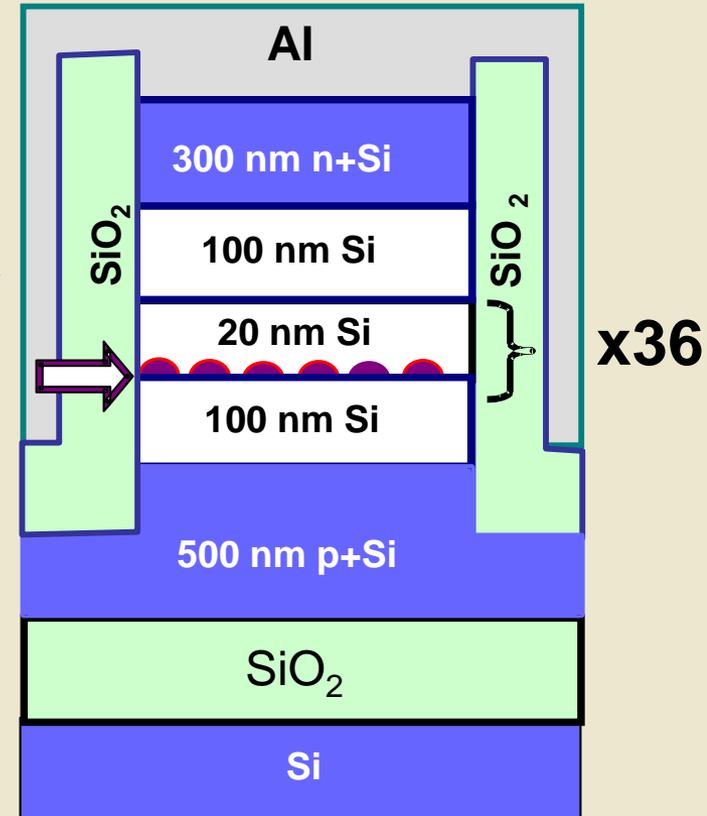
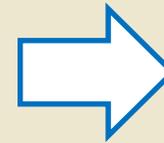
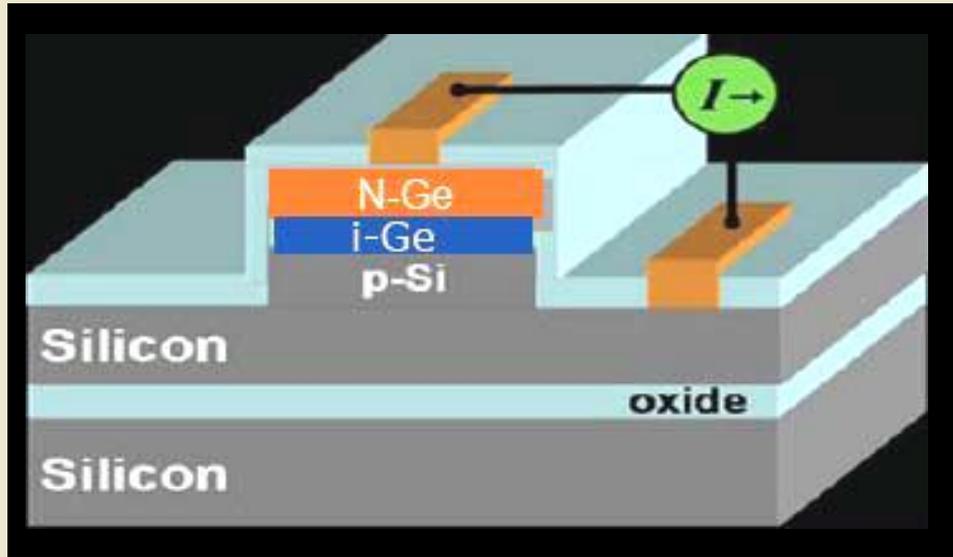
$D^*$  элемента  $1,5 \cdot 10^{12}$  см·Гц<sup>1/2</sup> Вт<sup>-1</sup>

Предельное быстродействие 5000 спектров/с

Динамический диапазон 2000 отн.ед.



# Преимущества фотоприемника на квантовых точках Ge-Si

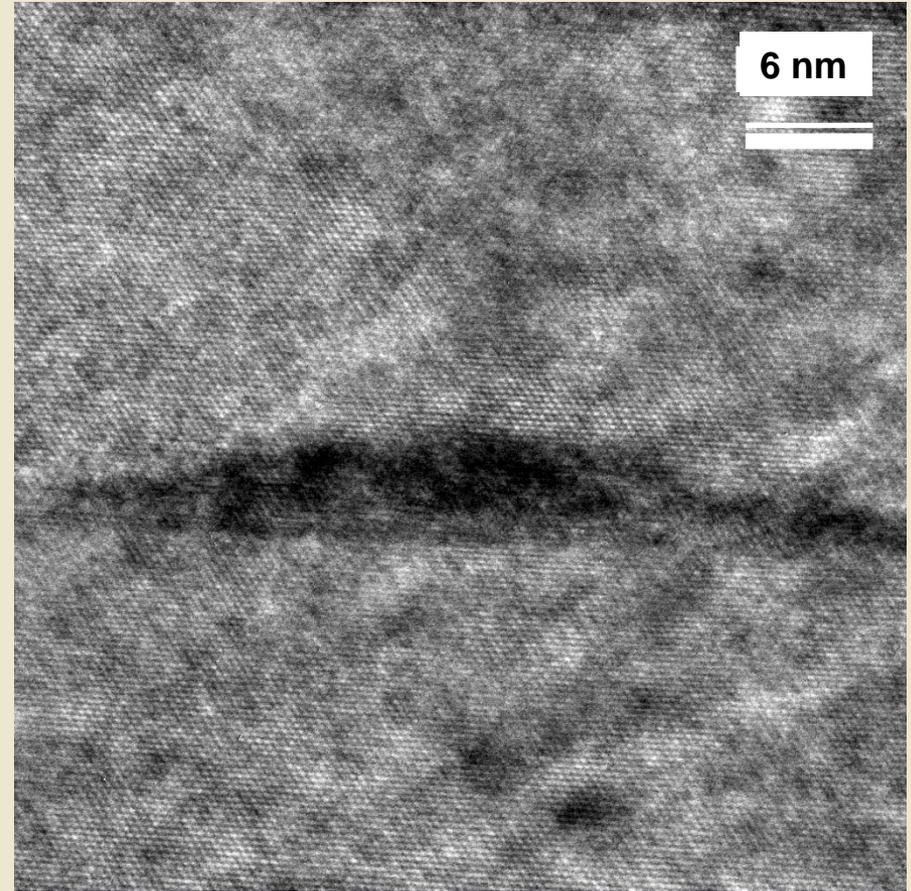
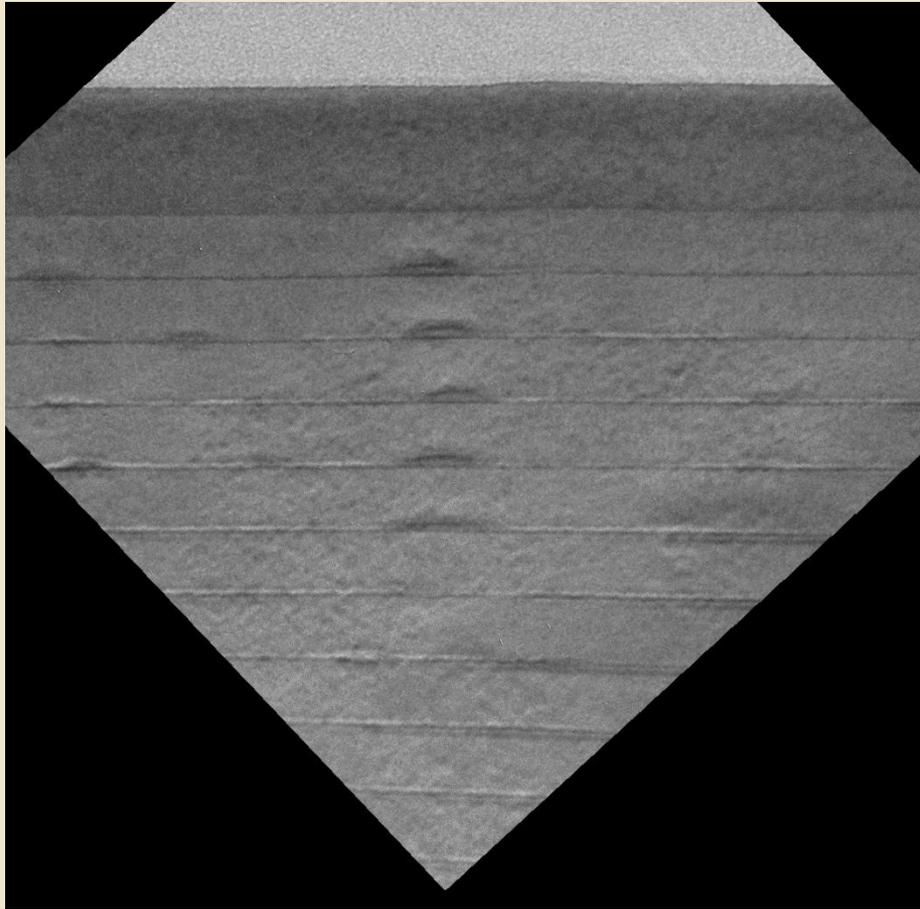


- ❖ Уменьшение темнового тока от  $10^{-1} \div 10^{-2} \text{ A/cm}^2$  до  $10^{-5} \text{ A/cm}^2$  и увеличение температуры работы до комнатной температуры;

- ❖ Внутриподзонные оптические переходы в квантовых точках обеспечивают работу фотоприемников при нормальном падении оптического излучения и малых темновых токах;

- ❖ Технологические процессы приготовления Ge квантовых точек в кремниевой матрице совместимы со стандартными технологиями кремниевой микроэлектроники.

# Вертикально ориентированные островки Ge в матрице Si



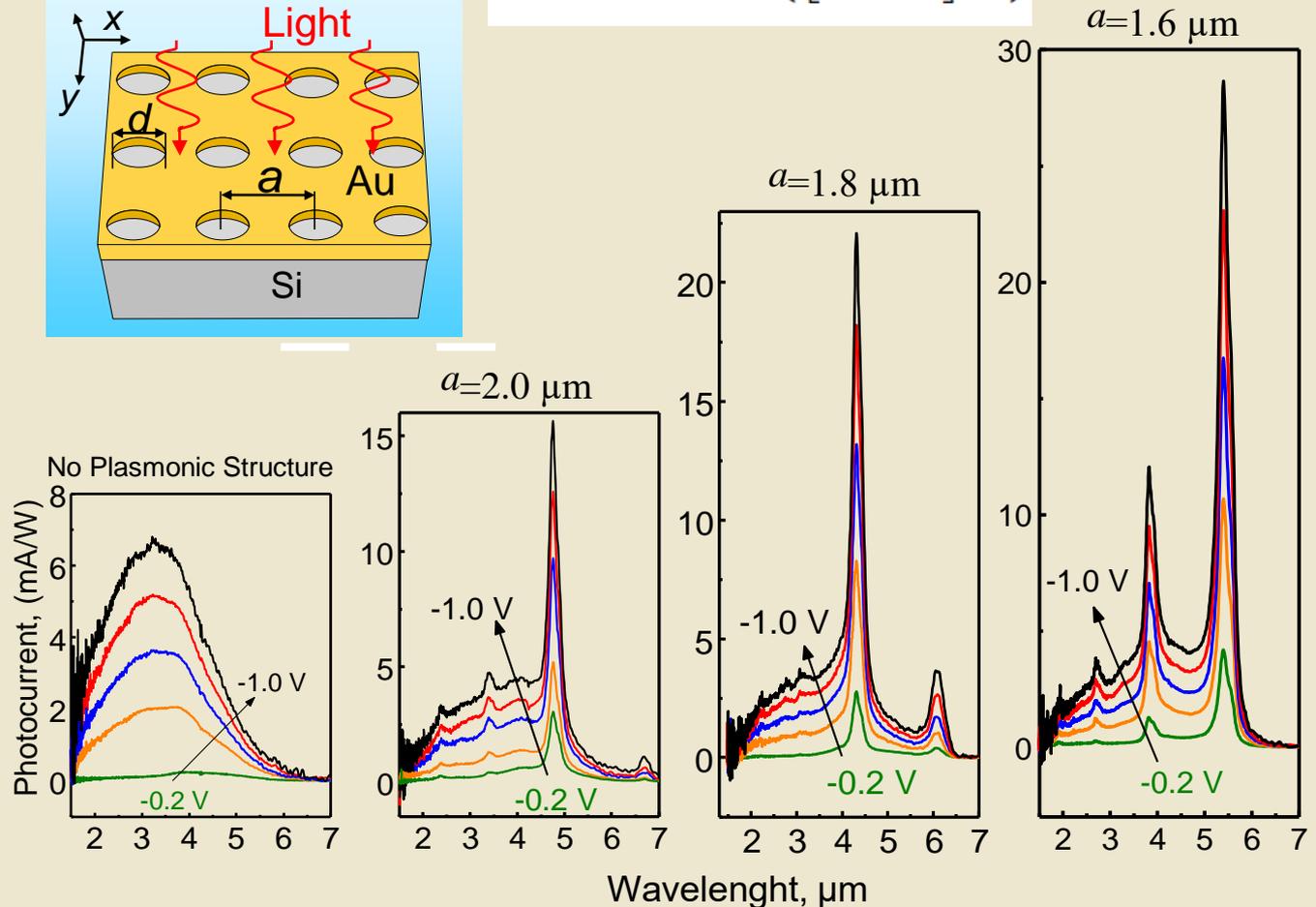
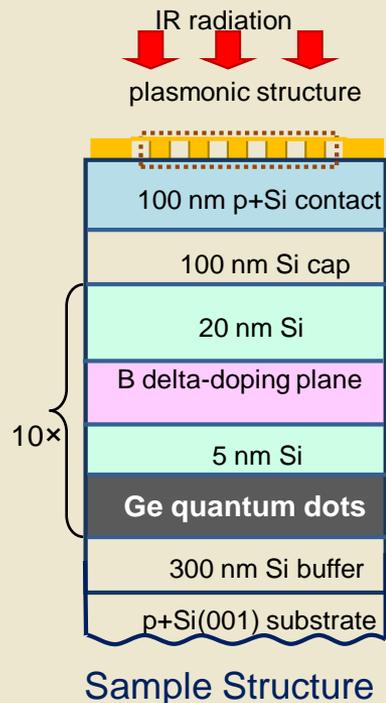
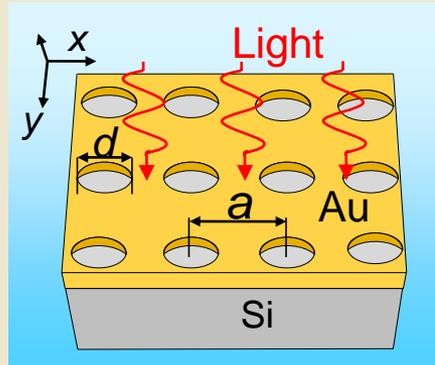
Поперечное (110) высокоразрешающее электронномикроскопическое изображение гетеросистемы (Ge-Si)-Si(001); JEM-4000EX, 400кВ

# Селективное увеличение дырочного фототока фотоприемников с квантовыми точками Ge/Si за счет поверхностных плазмонных поляритонов

$\lambda = 3,5 \mu\text{m}$ , 40 mA/W,  $T=90 \text{ K}$

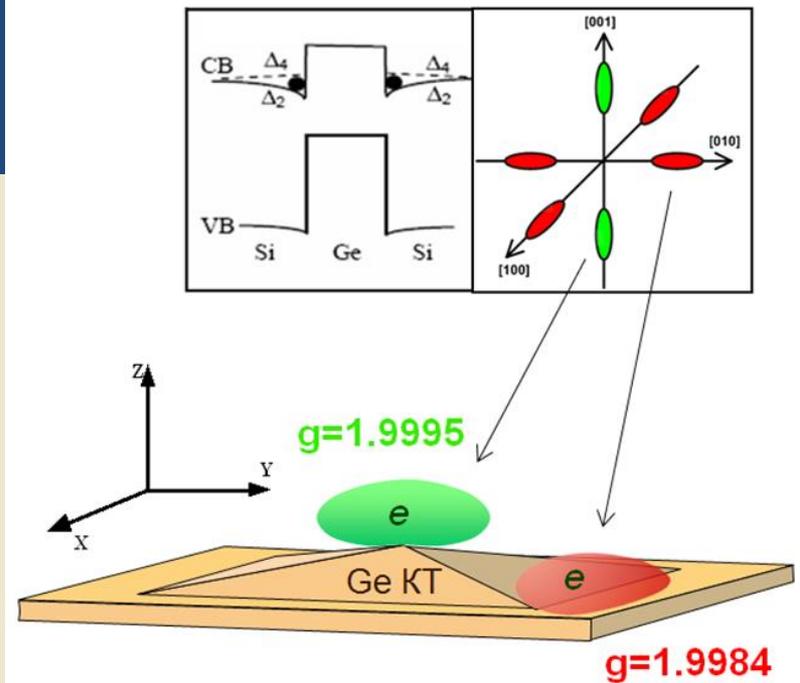
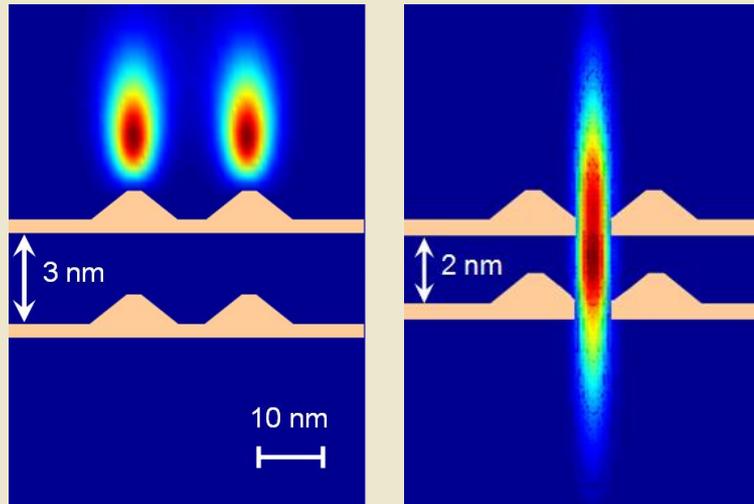
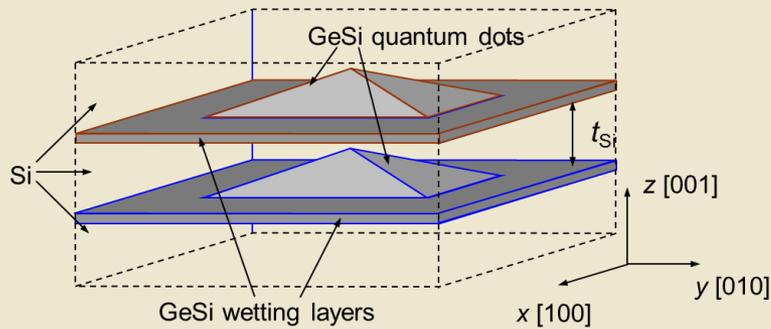
$D^* = 1.4 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$

$$\lambda_{ij} = \frac{d}{\sqrt{i^2 + j^2}} \text{Re} \left\{ \left[ \frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d} \right]^{1/2} \right\}$$



A.I. Yakimov, V.V. Kirienko, A.A. Bloshkin, V.A. Armbrister, and A.V. Dvurechenskii. *J. Appl. Phys.*, 2017, v. 122, p. 133101.

# Электронные состояния в гетероэпитаксиальной системе Ge/Si с квантовыми точками



- Увеличение интенсивности фотолюминесценции в 5-7 раз в двойных слоях КТ;
- Время жизни спиновых состояний по ЭПР измерениям спинового эха  $\tau_s \approx 20 \mu\text{s}$ ;
- Одновременное существование электронов у одной КТ с разными  $g$ -факторами  $\Delta g \approx 0,001$ .

**Открываются возможности выполнения квантовых логических операций на спиновых состояниях электронов в системе Ge/Si с квантовыми точками**

A.F.Zinovieva, A.I. Nikiforov, A.I. Timofeev, A.V. Nenashev, A.V. Dvurechenskii, L.V. Kulik. *Phys. Rev. B* 88, 235308 (2013);

А.Ф. Зиновьева, А.В. Ненашев, А.А. Кошкарев, Т.С. Зароднюк, А.Ю. Горнов, А.В. Двуреченский, *Микроэлектроника* т.47, №4 (2018).



## Электронно-оптические преобразователи 4-го поколения на основе GaAs фотокатодов

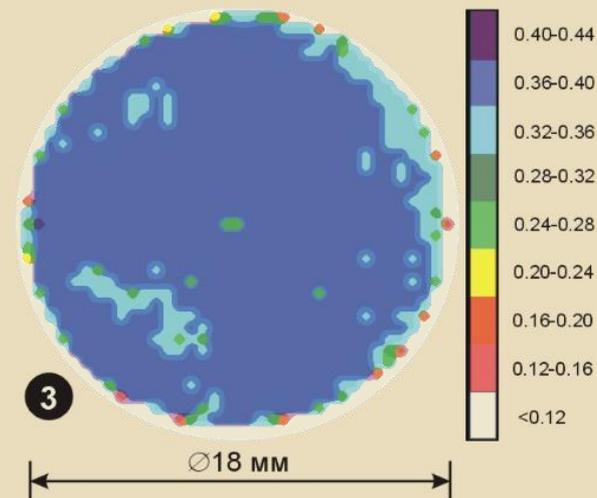
Установка для изготовления фотоэлектронных приборов в металло-керамических корпусах с фотокатодом из арсенида галлия



Внешний вид фотоэлектронных приборов

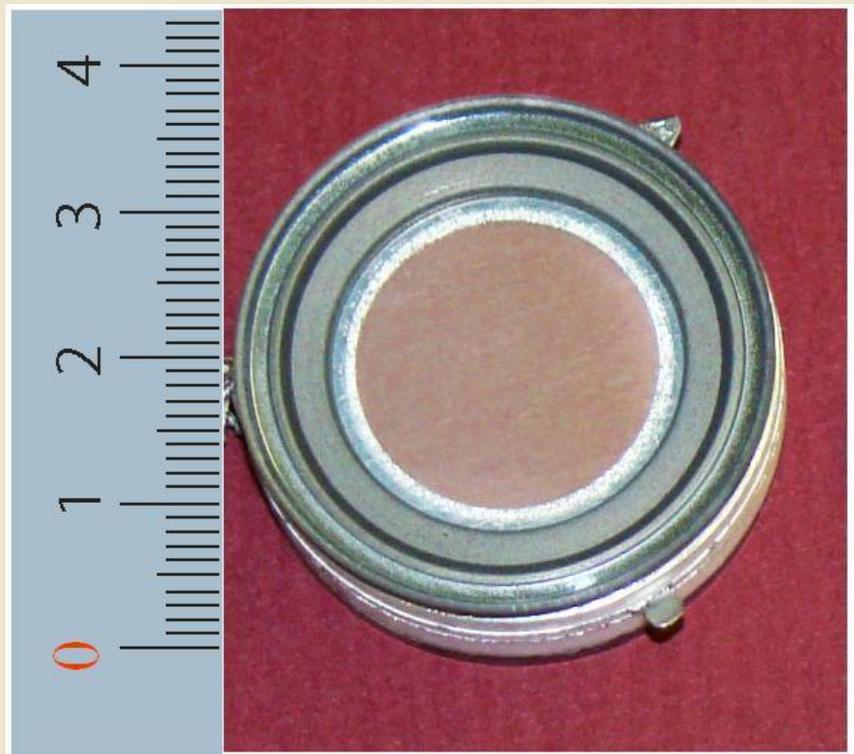


Пространственное распределение квантовой эффективности по площади арсенид-галлиевого фотокатода



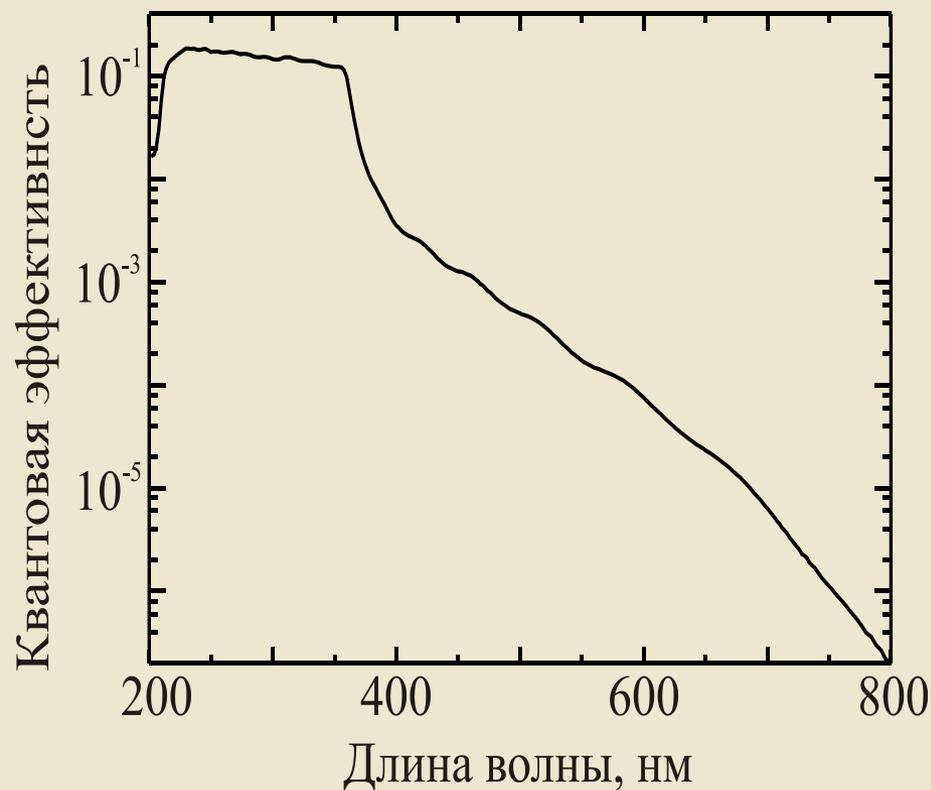
# Планарный вакуумно-полупроводниковый УФ-фотоприёмник с полупрозрачным фотокатодом $p\text{-GaN}(\text{Cs},\text{O})/\text{AlN}/\text{c-Al}_2\text{O}_3$

*В.В. Бакин, С.Н. Косолобов, Г.Э. Шайблер, А.С. Терехов, В.Н. Жмерик, А.М. Мизеров, С.В. Иванов*



Вакуумный фотоприёмник с  $p\text{-GaN}(\text{Cs},\text{O})$  фотокатодом

Спектр квантовой эффективности  $p\text{-GaN}(\text{Cs},\text{O})$  фотокатода.



# Интеллектуальный электронно-оптический преобразователь 5-го поколения

Ночное видение

Диапазон: 0.2÷1.6 мкм

Освещенность:

$\geq 10^{-5} \div 10^{-4}$  лк

Телевидение

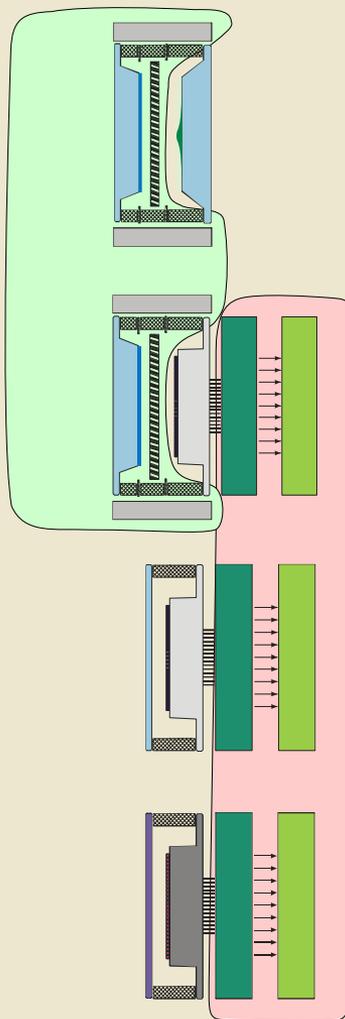
Диапазон: 0.2÷1.9 мкм

Освещенность:

$\geq 5 \times 10^{-3} \div 10^{-2}$  лк

Тепловидение

Диапазон: 5.0÷14 мкм



Унификация базовых узлов и технологий ЭОП 3-5 поколений

Унификация базовых ПЗС- и КМОП технологий электронно-чувствительных, фоточувствительных матриц, коммутаторов, видеопроцессоров и средств отображения информации

**ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНАЯ СИСТЕМА КАДМИЙ-  
РТУТЬ-ТЕЛЛУР: ВЫРАЩИВАНИЕ МЕТОДОМ  
МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ,  
ФОТОПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА ИК-ДИАПАЗОНА,  
НОВЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ**



# Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН

## Лаборатория технологии гетероэпитаксиальных структур КРТ



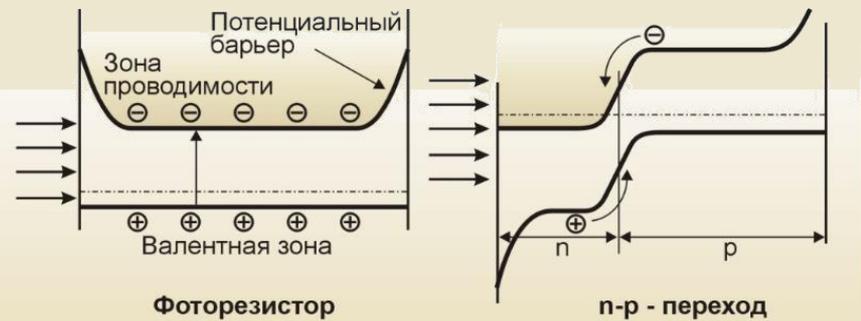
***Визит Почетного председателя Ученого совета ИФП СО РАН Нобелевского лауреата академика Ж.И. Алферова***

# Атомная инженерия наногетероструктур кадмий-ртуть-теллур

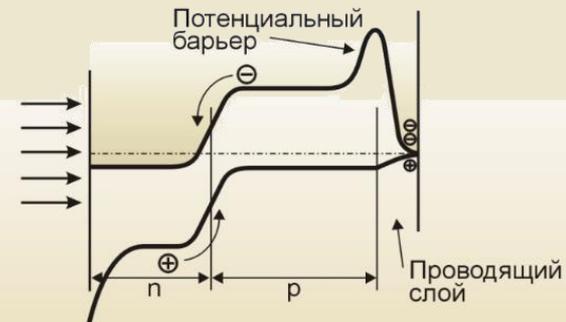
## Использование варизонных слоев МЛЭ КРТ

Изменение состава  $x$  слоев  $Cd_xHg_{1-x}Te$  в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии позволяет изменять ширину запрещенной зоны КРТ.

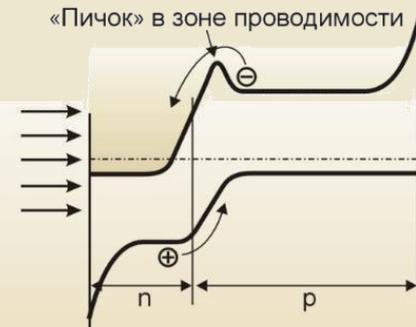
1. Потенциальные барьеры вблизи границ раздела исключают поверхностную рекомбинацию и резко увеличивают время жизни  $\tau$  носителей заряда и чувствительность фотодиодов и фоторезисторов (в  $n$  КРТ  $\tau = 2$  мкс)



2. Структура с проводящим слоем на внутренней границе раздела для уменьшения продольного сопротивления слоя КРТ в матричных приемниках.



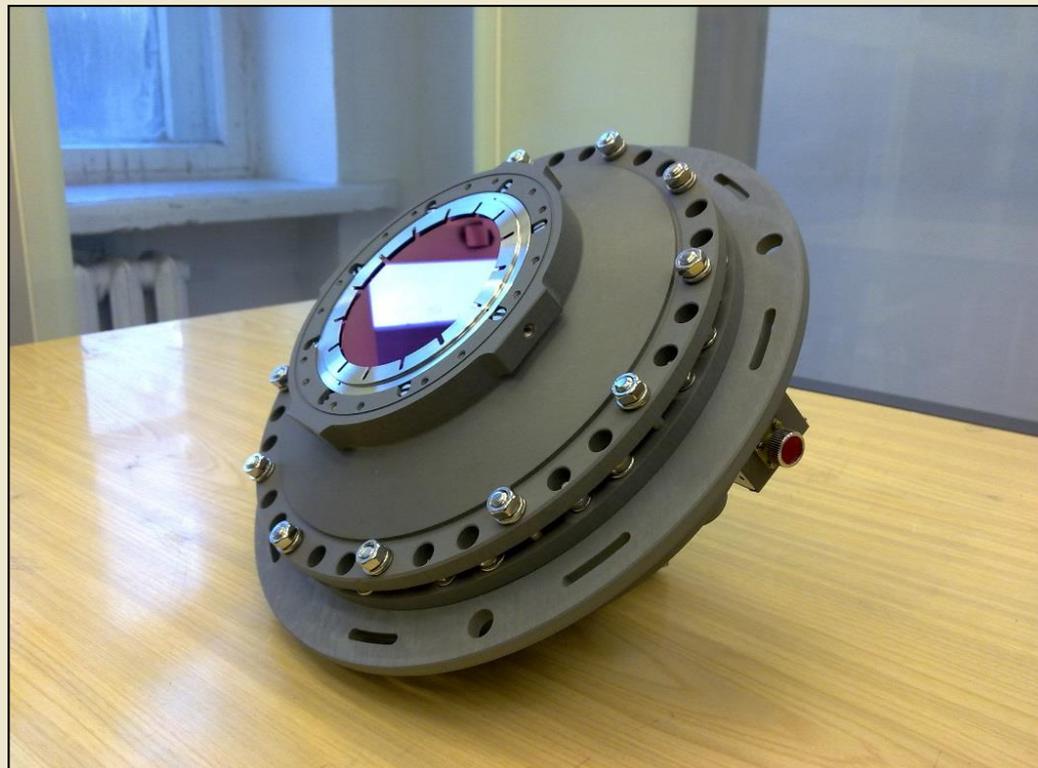
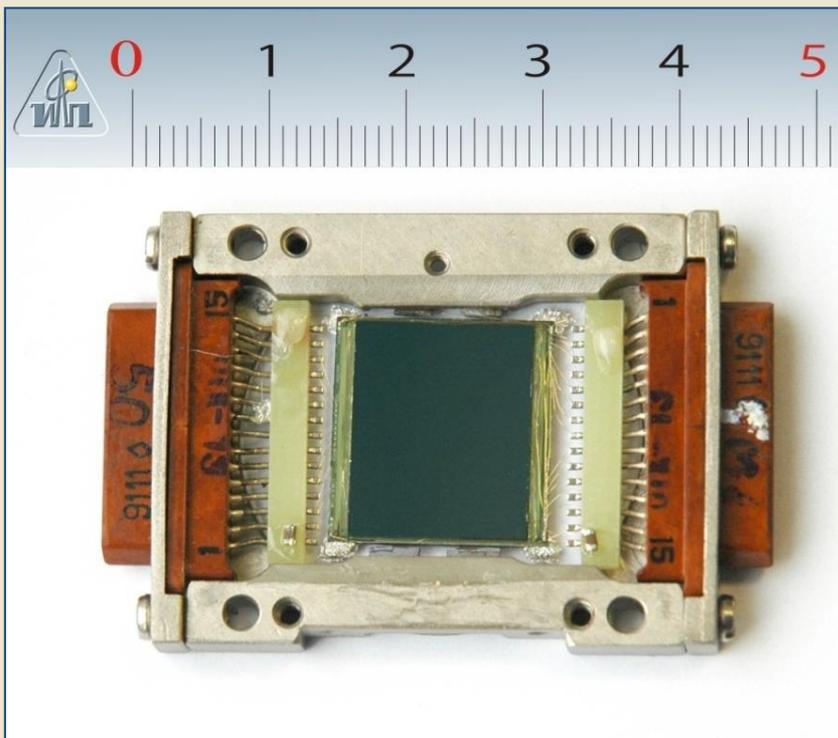
3. P-n переход с «пичком» в зоне проводимости позволяет понизить величину темнового и фоновых токов при сохранении пороговой мощности фотодиодов и эффективно использовать Si мультиплексоры с заданной величиной времени накопления сигнала.



**В настоящее время фирма Raytheon разработала технологию выращивания слоев КРТ на Si подложках диаметром 200 мм**



## Матричные фотоприемные устройства формата 640x512 и 2048x2048 на основе ГЭС МЛЭ КРТ, созданные совместно с АО НПП «Восток»



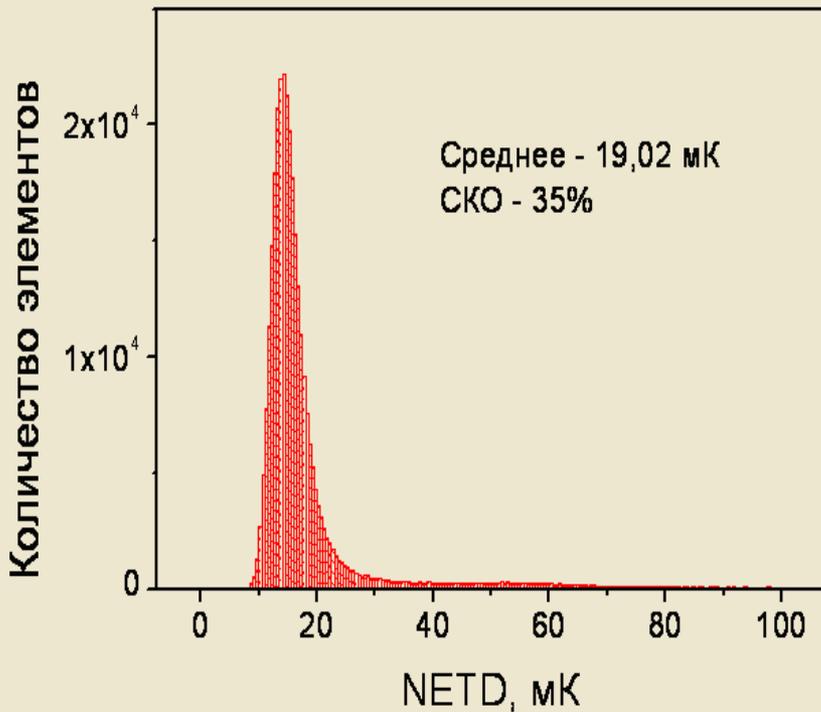
*Разработка и производство матричных фотоприемных устройств охлаждаемого типа относятся к ключевым технологиям. Раньше матрицы тепловизоров для систем вооружений поставлялись из-за рубежа. С вводом санкций поставки прекратились. Но отечественные КБ, НИИ и предприятия оптоэлектроники мобилизовались и начиная с этого года матричные ФПУ поставляются исключительно отечественного производства.*

*Ю.И.Борисов, вице-премьер Правительства РФ*

*12 сентября 2018 г.*



**Гистограмма разности температур эквивалентной шуму фотоприемника 640×512 элементов и пример теплового изображения, полученного с его помощью.**



# Приборы ночного видения, тепловидения и ОЭС, выпускаемые предприятиями г. Новосибирска

Основные направления деятельности ОАО «Новосибирский приборостроительный завод», ныне «Швабе – оборона и защита»: разработка и производство всесуточных тепловизионных и телевизионных комплексов; дневных, ночных, комбинированных и тепловизионных прицелов для всех видов стрелкового оружия; биноклярных наблюдательных приборов с объективами большой светосилы; лазерных имитаторов стрельбы; высокоточных контрольно-измерительных приборов промышленного назначения; астрономических телескопов любительского и полупрофессионального класса.



Комбинированный бинокль день/ночь  
ОАО «Новосибирский приборостроительный завод», ныне «Швабе – оборона и защита»



Монокуляры ночного видения  
ОАО «Катод»

ОАО «Катод» является единственным в России серийным производителем ЭОП третьего поколения. Направления специализации предприятия: создание высокоэффективных фотокатодов, разработка технологии новых типов фотокатодов; разработка новых модификаций и поколений ЭОП; Разработка прогрессивной технологии и оборудования для производства ЭОП; Разработка и поставка приборов ночного видения на базе выпускаемых ЭОП. *В настоящее время разработано и освоено в производстве более 280 модификаций ЭОП.*

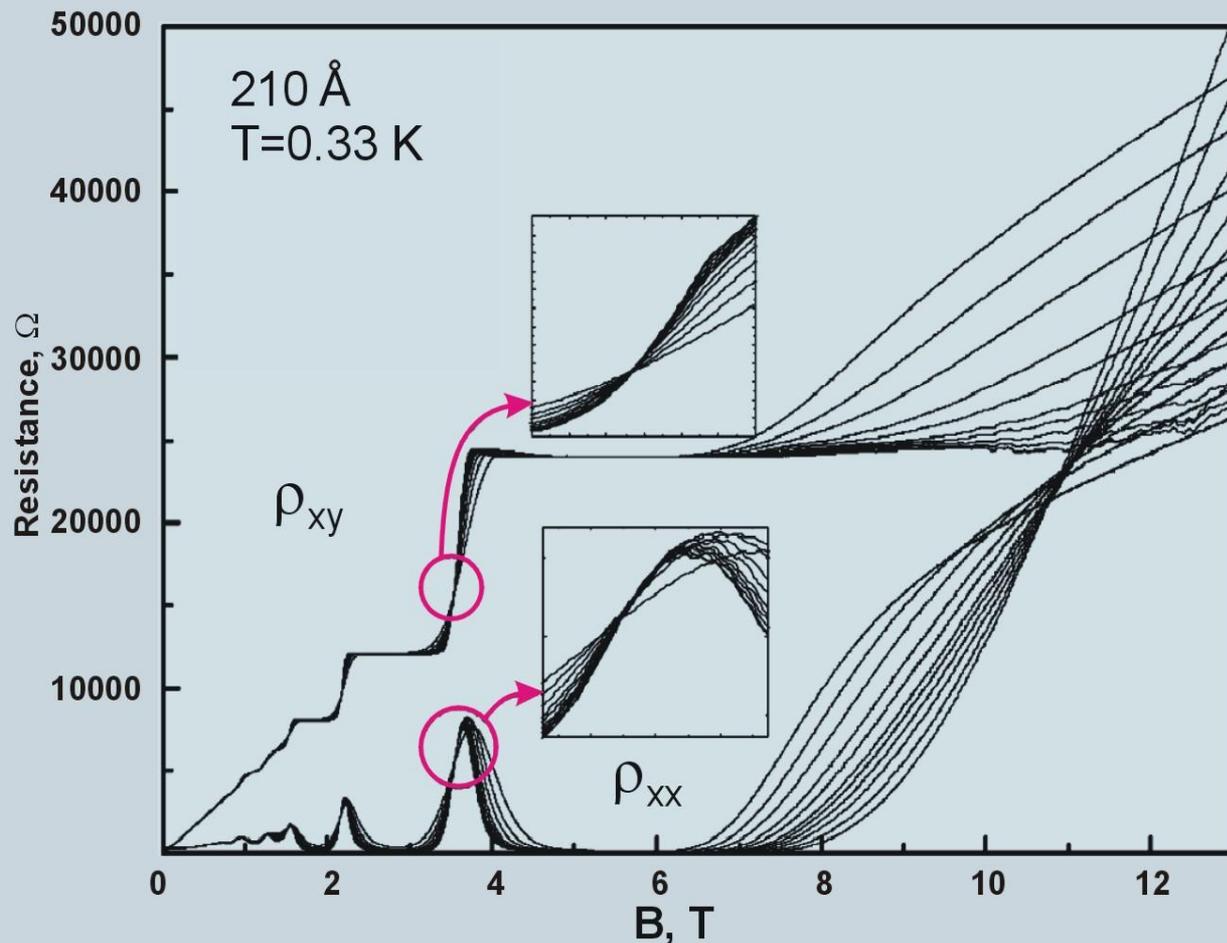
ЗАО «Экран-оптические системы» был первым советским предприятием производящим компоненты ночного видения. Были освоены ЭОП от 0 до 3+ поколений и ФЭУ. Предприятие завоевало имя ведущего производителя ЭОП в России и стал одним из лидеров по выпуску ФЭУ, обеспечивающих нужды медицины, радиационной дозиметрии, научных исследований, геодезии, астронавигации и космической техники.



Сферический фотокатод  
ЗАО «Экран-оптические системы»

# Высокоподвижный двумерный электронный газ и квантовый эффект Холла в HgTe квантовой яме

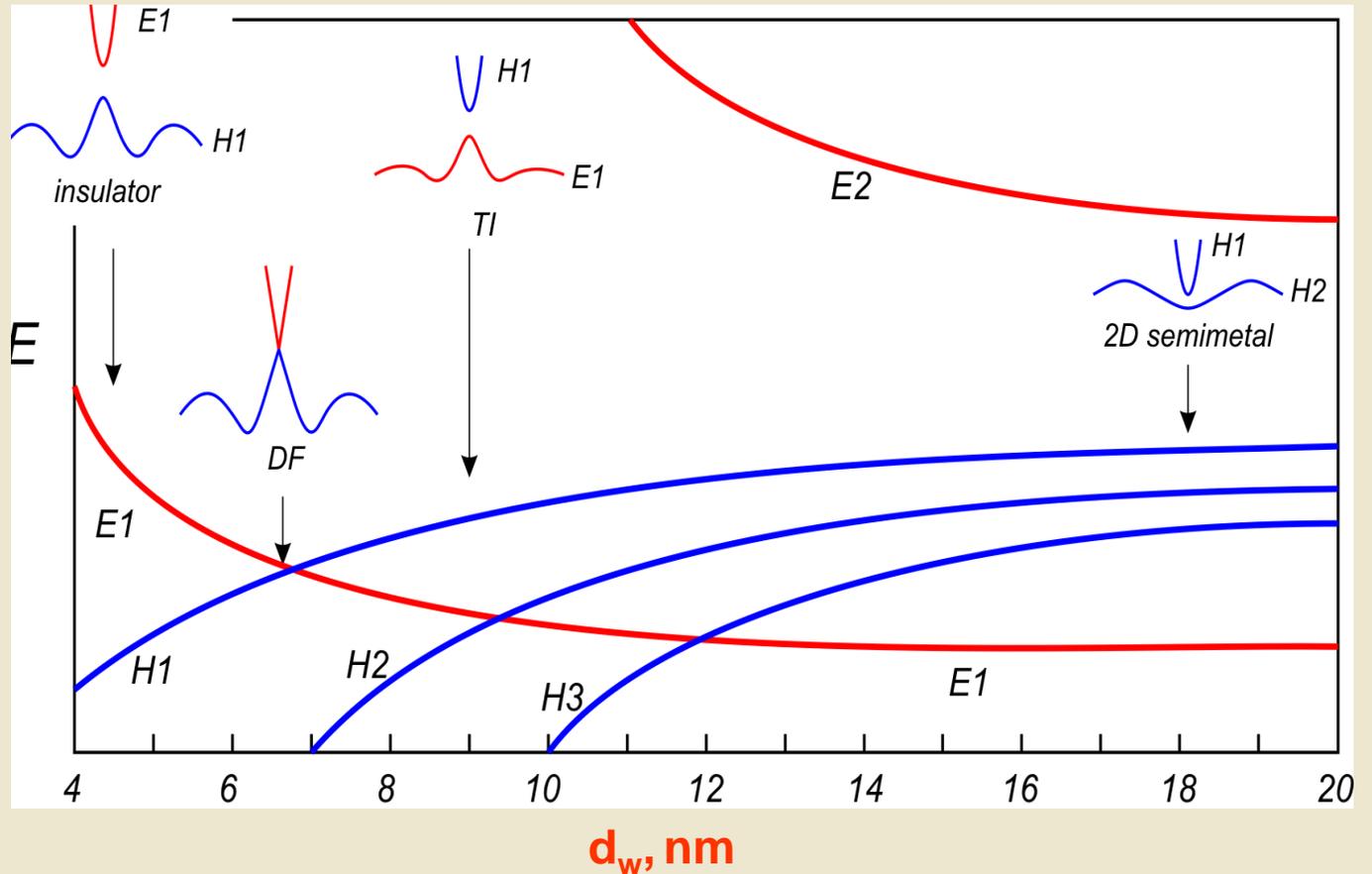
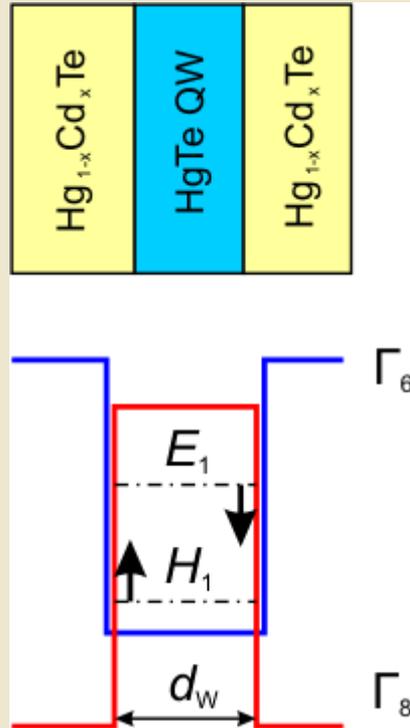
CdTe cap - 40 nm
Cap layer - 5 nm
Doped layer - 10 nm (In)n= $10^{16} \text{ cm}^{-3}$
Spacer - 8 nm
HgTe QW (16, 21 nm)
Cap layer - 5 nm
Doped layer - 10 nm (In)n= $10^{16} \text{ cm}^{-3}$
Spacer - 8 nm
Buffer CdTe - 6 $\mu\text{m}$
Buffer ZnTe - 50 nm
(013) GaAs Substrate



2D electron gas: mobility  $\mu=2 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , electron concentration  $N_s=1.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  for quantum well thickness 21 nm;  $\mu=5 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ,  $N_s=3.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  for quantum well thickness 16 nm.

# Энергетический спектр HgTe квантовой ямы в зависимости от ее толщины

M.I.Dyakonov and A.V.Khaetskii, *JETP*, 1982, 55, 917; Y.Lin-Liu, L.Sham, *PRB*, 1985, 32, 5561; L.G.Gerchikov and A.V.Subashiev, *PSS(b)*, 1990, 160, 443; B.Bernevig et al, *Science*, 2006, 314, 1757; E.G.Novik et al. *PRB*, 2011, 83, 193304; O.E.Raichev, *PRB*, 2012, 85, 045310

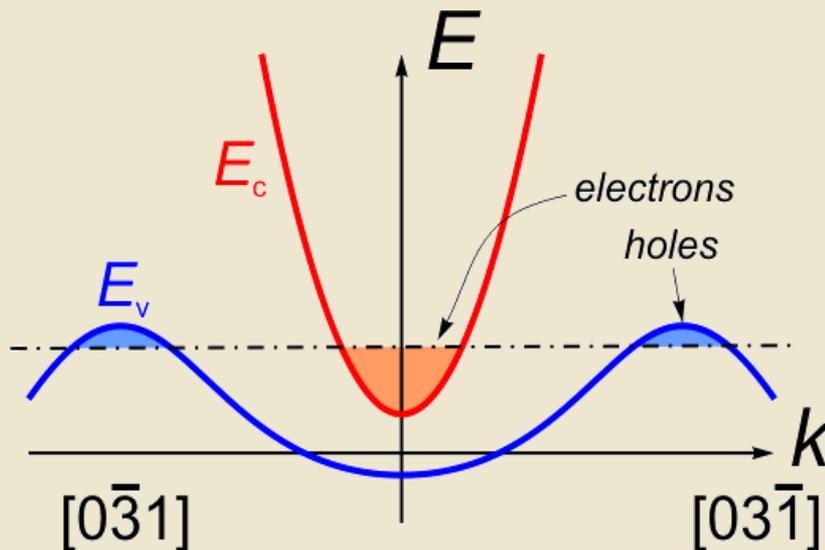


G. M. Gusev, E. B. Olshanetsky, Z. D. Kvon, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretzky, and J. C. Portal, *Phys. Rev. Lett.* 104, 166401, 2010;

M.Orlita, D.M.Basko, M.S.Zholudev, F.Teppe, V.I.Gavrilenko, N.N.Mikhailov, S.A.Dvoretzky, P.Neugebauer, C.Faugeras. A-L.Barra, G.Martinez and M.Potemski, *Nature Physics*, 19 January 2014

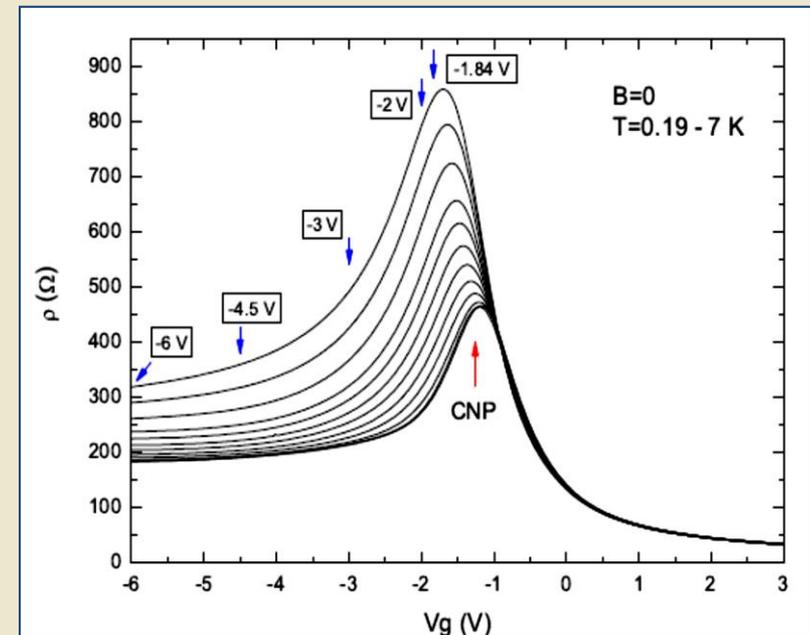
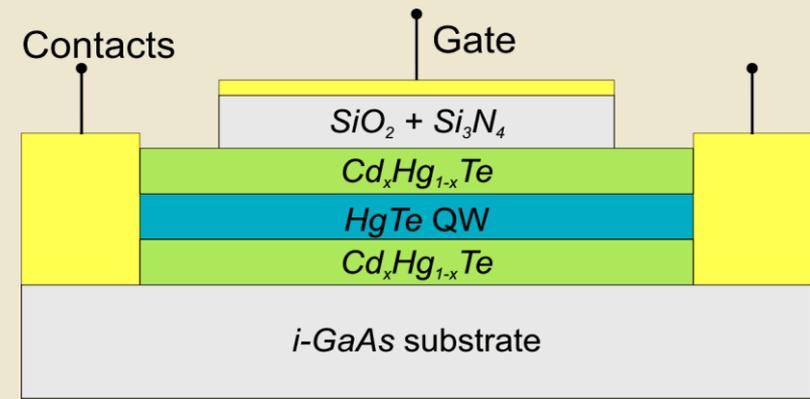
# Двумерный полуметалл в HgTe квантовой яме ( $d_W = 18-20$ нм)

Energy spectrum of a two-dimensional semimetal

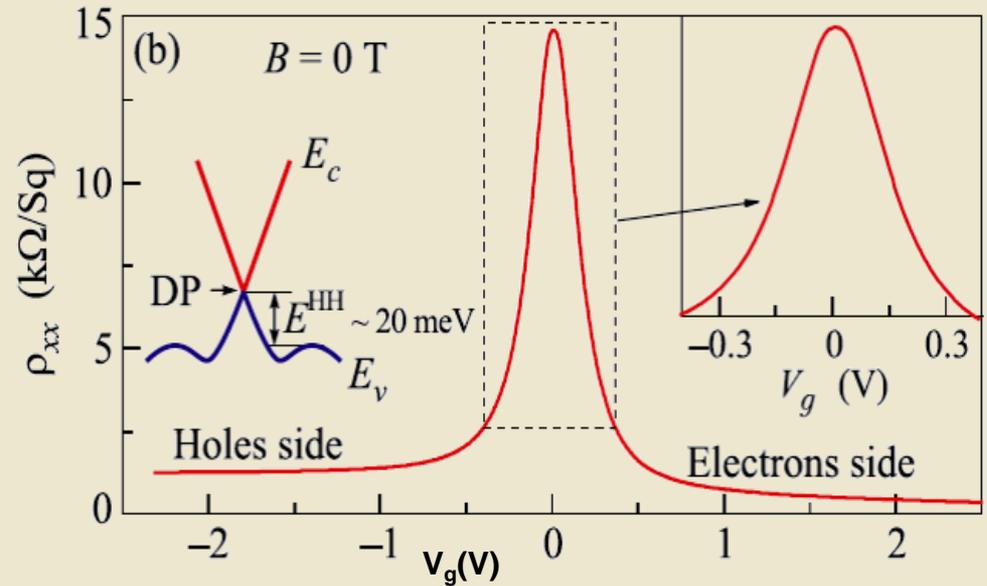
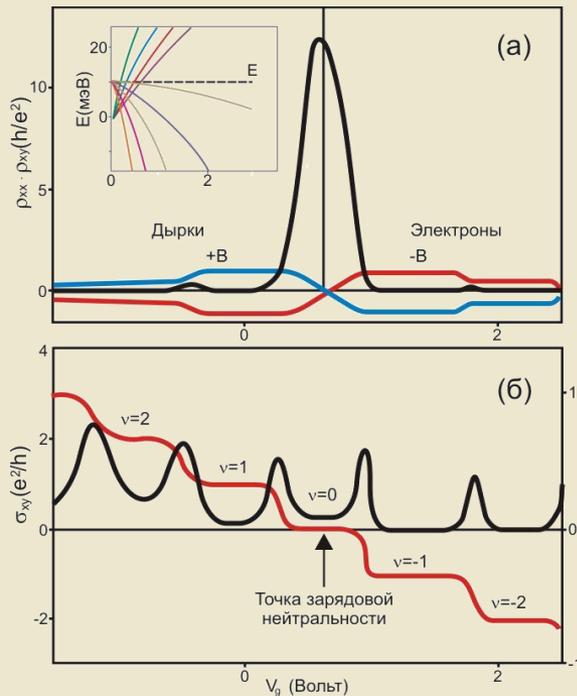


Using the field effect transistor on the basis of HgTe quantum well allows to realize 2D metal–2D semimetal transition by means of a gate voltage. In a 2D semimetal the Landau scattering between electron and holes results in a strong T-dependence of resistance, while, in contrast in one-component system the Landau scattering has no effect on the resistance. The explanation is simple: while the Landau scattering does not change the total momentum of the e-h system, it creates the electron-hole friction which lowers electron and hole mobilities.

Field effect transistor on the basis HgTe quantum well



# Наблюдение квантового эффекта Холла в точке зарядовой нейтральности двумерной электронно-дырочной системы, двумерного топологического изолятора и безмассовых фермионов Дирака в HgTe квантовых ямах



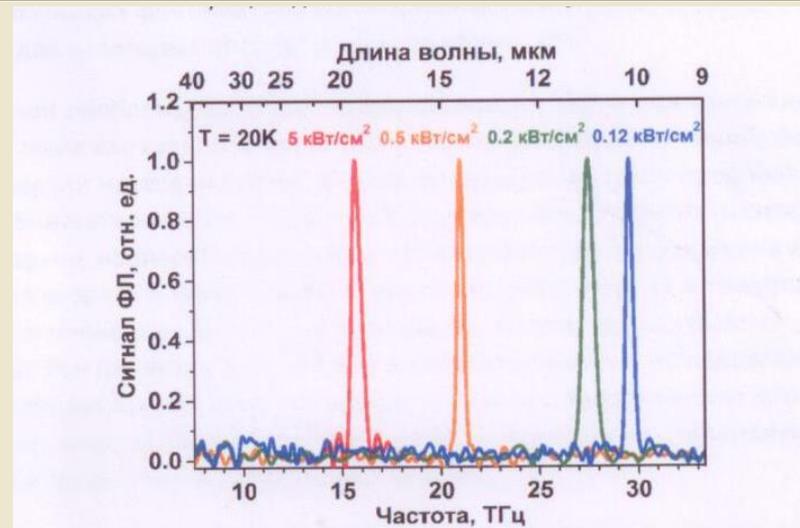
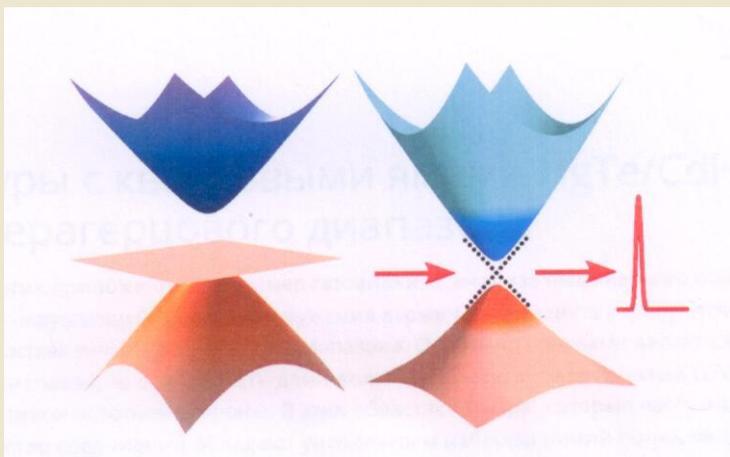
Left: Gate-voltage dependence of the diagonal and Hall components of the resistivity tensor (a) and conductivity tensor (b) at magnetic field  $B=2.8$  T.

Right: The energy spectrum and the experimental resistance versus gate voltage dependence of a system of two-dimensional gapless Dirac fermions. The  $\rho_{xx}(V_g)$  maximum corresponds to the Dirac point (DP). At this point  $\rho_{xx} < h/e^2$  which proves the absence of a gap in the spectrum and the presence of massless dirac fermions in the vicinity of this point.

In the experimental studies carried out in the ISP SB RAS it has been shown for the first time that the edge current states can propagate over macroscopic distances of the order of 1 mm.

The Landau levels spectrum in a system of massless Dirac fermions is characterized by a huge main energy gap which allows the observation of the quantum Hall effect at liquid nitrogen temperatures, while at low temperatures it can be observed in magnetic fields of only few kOe.

# ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ HgTe/CdHgTe ДЛЯ ЛАЗЕРОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

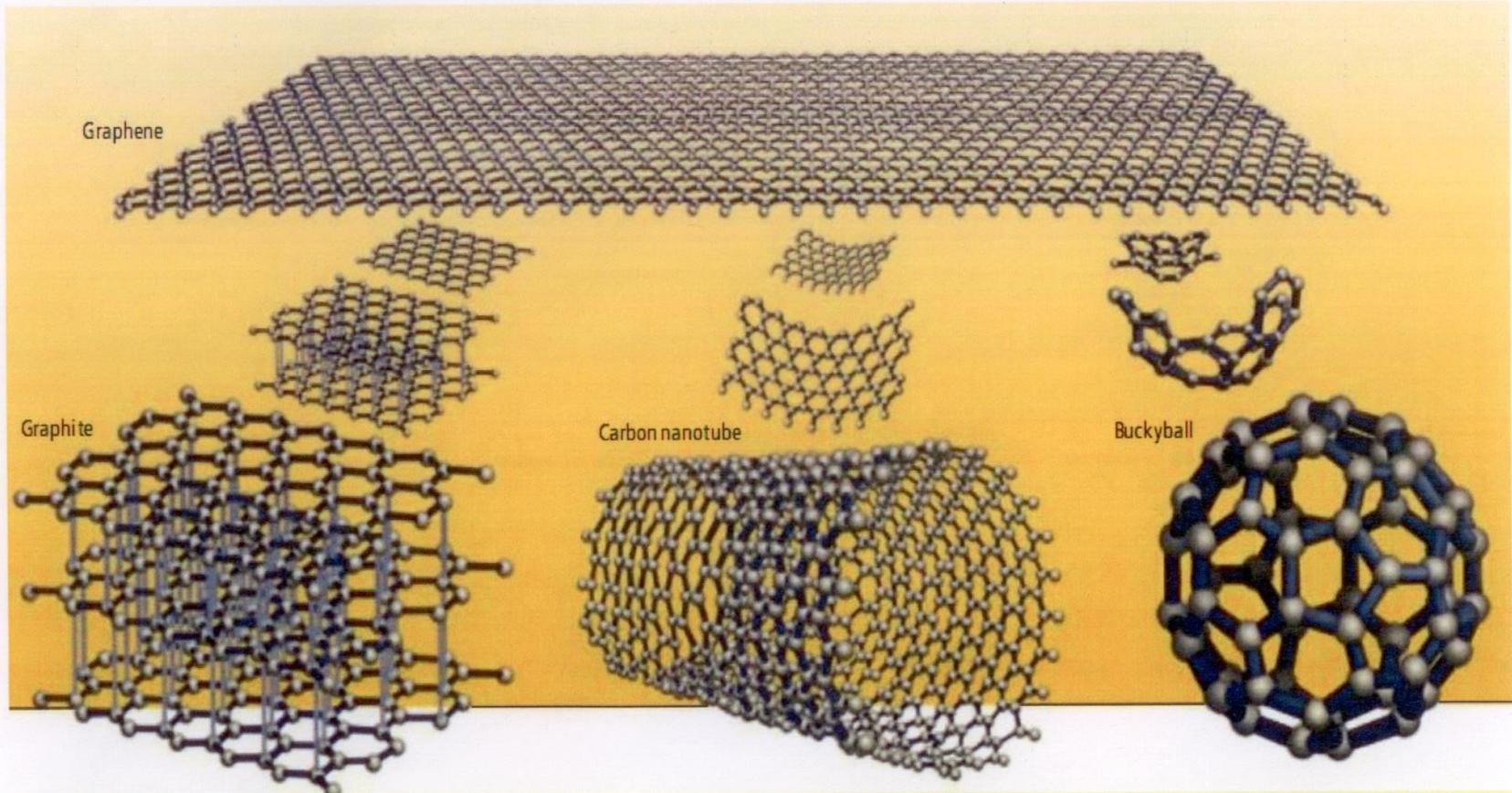


Энергетический спектр носителей в объемном CdHgTe (слева), в квантовой яме HgTe /CdHgTe (справа) и спектры стимулированного излучения в волноводных образцах с квантовыми ямами при  $T=20$  К. Указаны пороговые интенсивности оптической накачки.

При критической толщине квантовой ямы (около 6,3 нм для «нулевой» температуры) спектр носителей становится «графеноподобным». При этом изменением толщины или тонкой перестройкой температуры можно варьировать ширину запрещенной зоны. Таким образом было получено стимулированное излучение вплоть до длины волны 20 мкм и продемонстрирована возможность создания лазеров, работающих в диапазоне длин волн вплоть до 60 мкм в непрерывном режиме при температуре значительно выше температуры жидкого азота.

S.V.Morozov, V.V. Rumyansev, M.A.Faddeev, M.S.Zholudev, K.E.Kudryavtsev, A.V.Antonov, A.M.Kadykov, A.A.Dubinov, N. N. Mikhailov, S. A. Dvoretzky, and V.I.Gavrilenko, *Applied Physics Letters*, 111, 192101, 2017

# Аллотропные модификации углерода



**А.Гейм, К.Новоселов, 2010 г.- графен и его квантовые свойства  
(Начало в 2004. Сегодня индекс цитирования 16 тыс.! )**

## Свойства графена при комнатной температуре

**Самый, самый!**

Графен - одноатомный слой углерода, монокристалл

Эффективная масса электронов равна 0

Ширина запрещённой зоны 0 эВ, линейная дисперсия

Скорость электронов только в 300 раз меньше скорости света

**Гигантская подвижность носителей заряда  $10^6$  см<sup>2</sup>/в сек ( в1000 раз больше чем в Si)**

**Гибкость, прочность, упругая деформация 20-30%, модуль Юнга ~1-10 ТПа**

**Высокая проводимость, плотность тока превышает  $10^9$  А/см<sup>2</sup>**

**Оптическая прозрачность - 98 %**

Химическая инертность

Стабильность

Хорошая теплопроводность  $5 \times 10^3$  Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>

Удельное сопротивление (вдоль плоскости)  $10^{-5}$  ом см

Устойчивость к электромиграции

**Квантовые явления из области мК в область комнатных температур!**

**Квантовый эффект Холла при комнатной температуре. Баллистика - 2 мкм.**

**Одноэлектронный транзистор, работающий при комнатной температуре.**

**Эффект Клейна.**

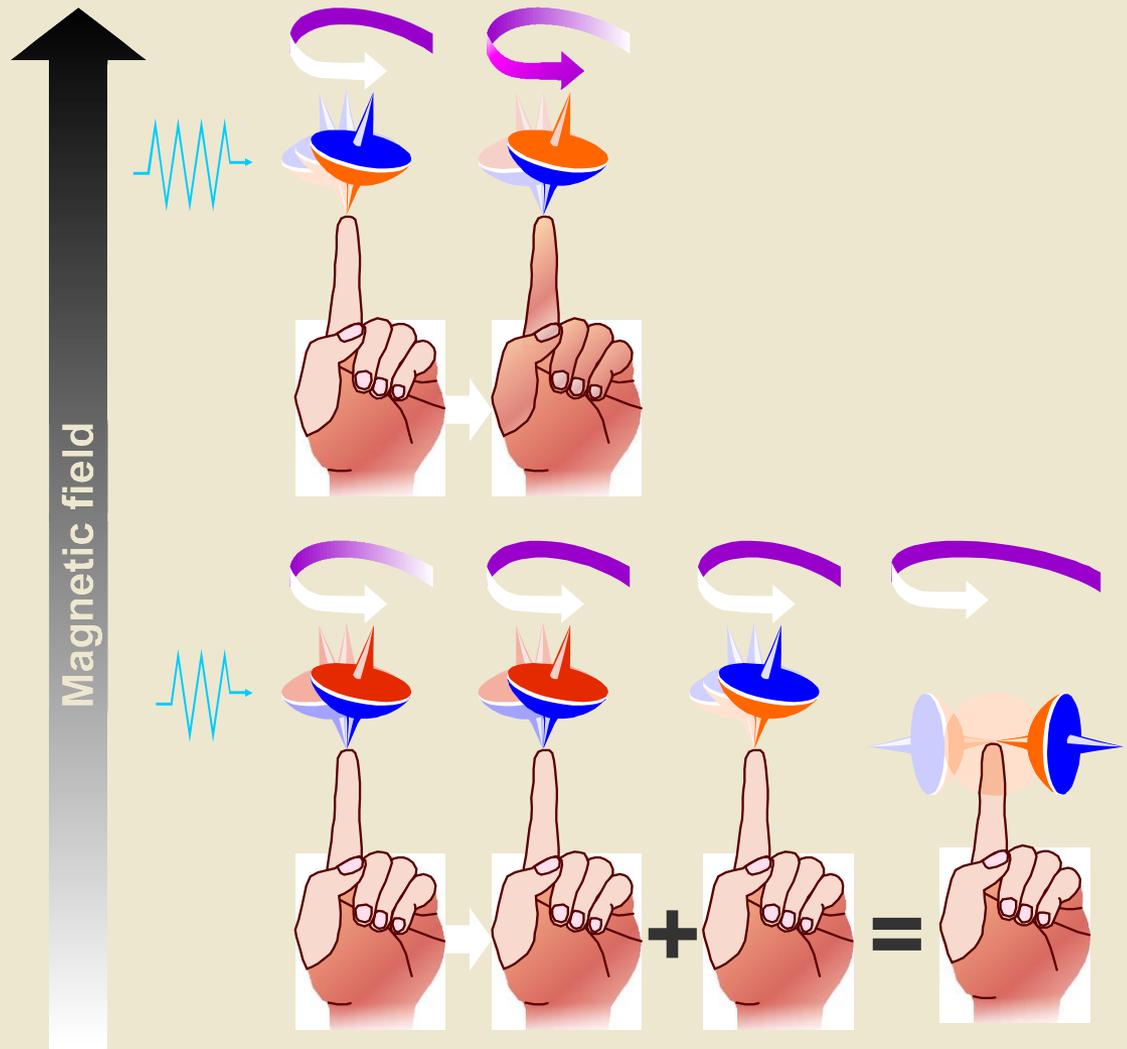
Коммерческая привлекательность

# SPIN STATES OF PARTICLES AS QUANTUM BITS

Spin of particles in magnetic field are oriented along or opposite to magnetic field axis. These two states are equivalent to logic “zero” or “one”.

Impulse of radio-frequency electro-magnetic radiation of defined intensity reorients spin direction. Less intensive impulse reorients spin in intermediate state which compose two logic states.

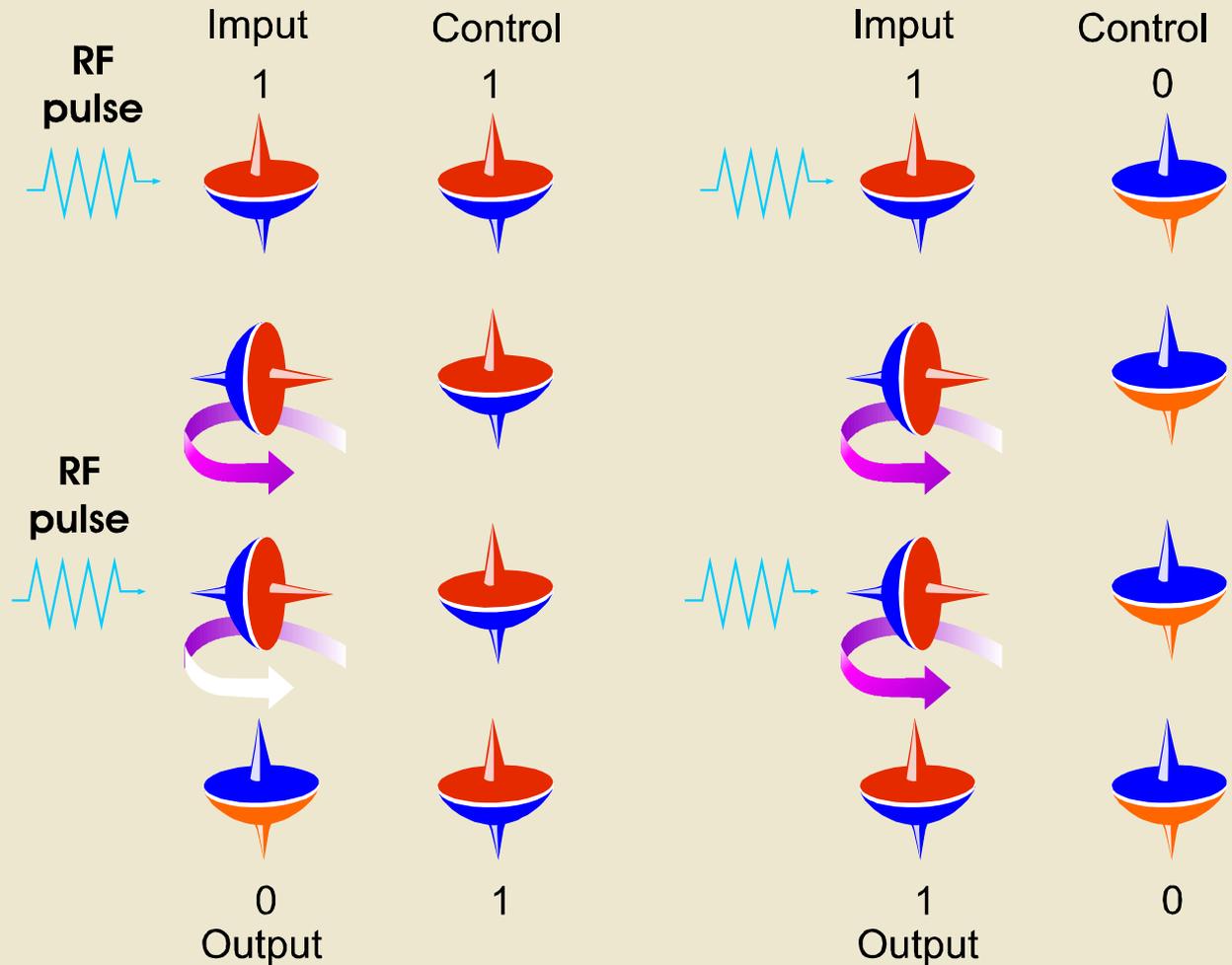
**Quantum mechanical superposition of states is fundamental feature of quantum bits unlike classical bits on MOSFET.**



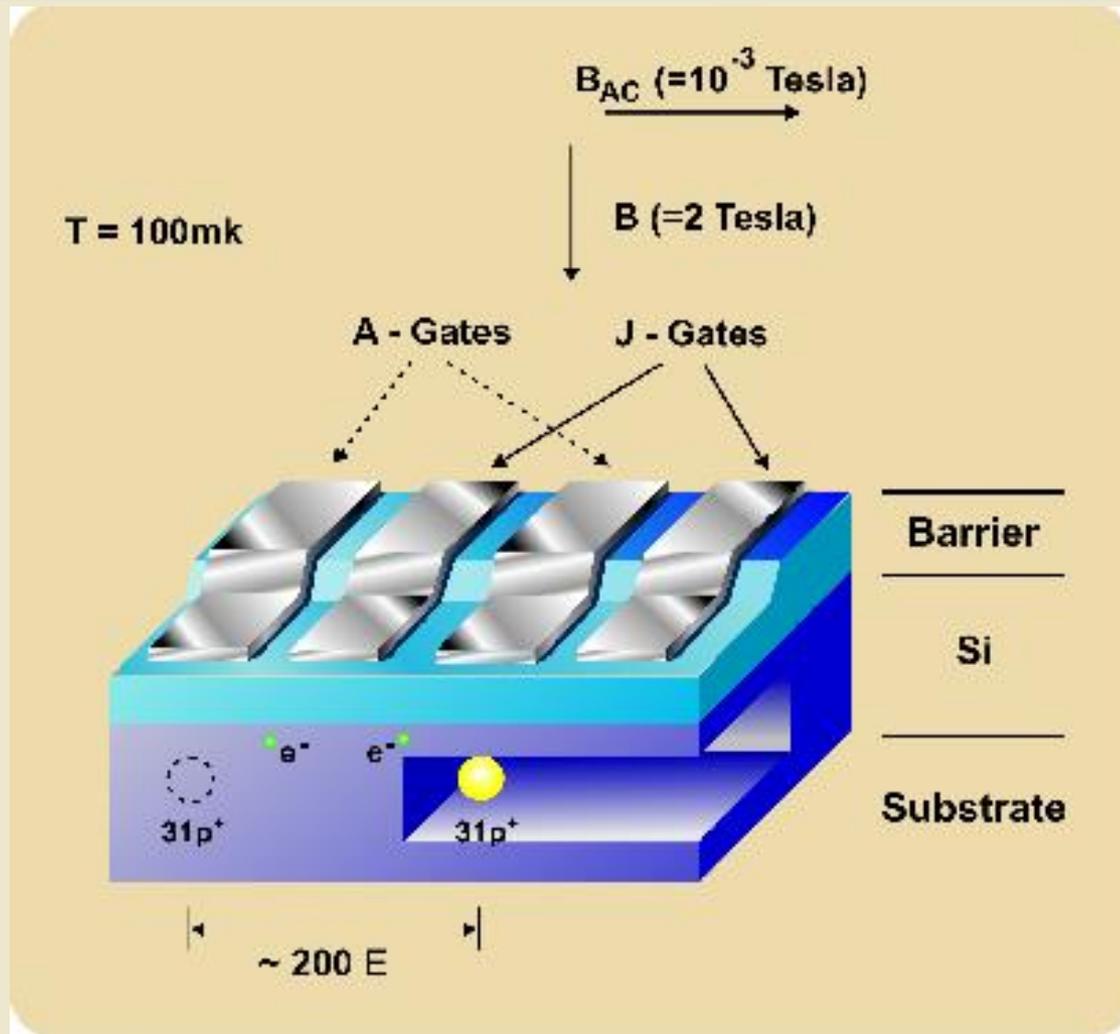
# QUANTUM LOGIC – “CONTROLLED NOT”

Logic operation “Controlled Not” means that state of input qubit depends on state of control qubit similarly classic logic with invertors.

Input qubit may reoriented by impulse of radio-frequency electromagnetic radiation of defined intensity in dependence of state of control qubit.



# FRAGMENT OF QUANTUM COMPUTER WITH TWO QUBITS ON PHOSPHORUS<sub>31</sub> ATOMS IN ISOTOPICALLY CLEAN SPIN LESS Si<sub>28</sub>



*B.E.Kane "A silicon based nuclear spin quantum computer", Nature, 1998, v.393, No.5, p.133-137*

# КВАНТОВЫЙ КОМПЬЮТЕР НА ЯДЕРНЫХ СПИНАХ $P_{31}$ В ИЗОТОПНО ЧИСТОМ $Si_{28}$

- пластина кремния при  $T < 0,1$  К помещается в постоянное магнитное поле  $> 2$  Т;
- А-электроды управляют резонансной частотой ядерно-спинового кубита и осуществляют однокубитные операции;
- J-затворы управляют взаимодействием электронов соседних ядерных спинов, что позволяет проводить двухкубитные операции;
- зарядовое состояние электронов можно определять с помощью одноэлектронной емкостной техники;
- время релаксации спина в  $Si:P$  может достигать тысяч секунд!

*В.Е.Кане "A silicon based nuclear spin quantum computer", Nature, 1998, v.393, No.5, p.133-137 ;*

*К.А.Валиев, А.А.Кокин «Квантовые компьютеры: надежда и реальность», Регулярная и хаотическая динамика, М.-Ижевск, 2001, 350 с.;*

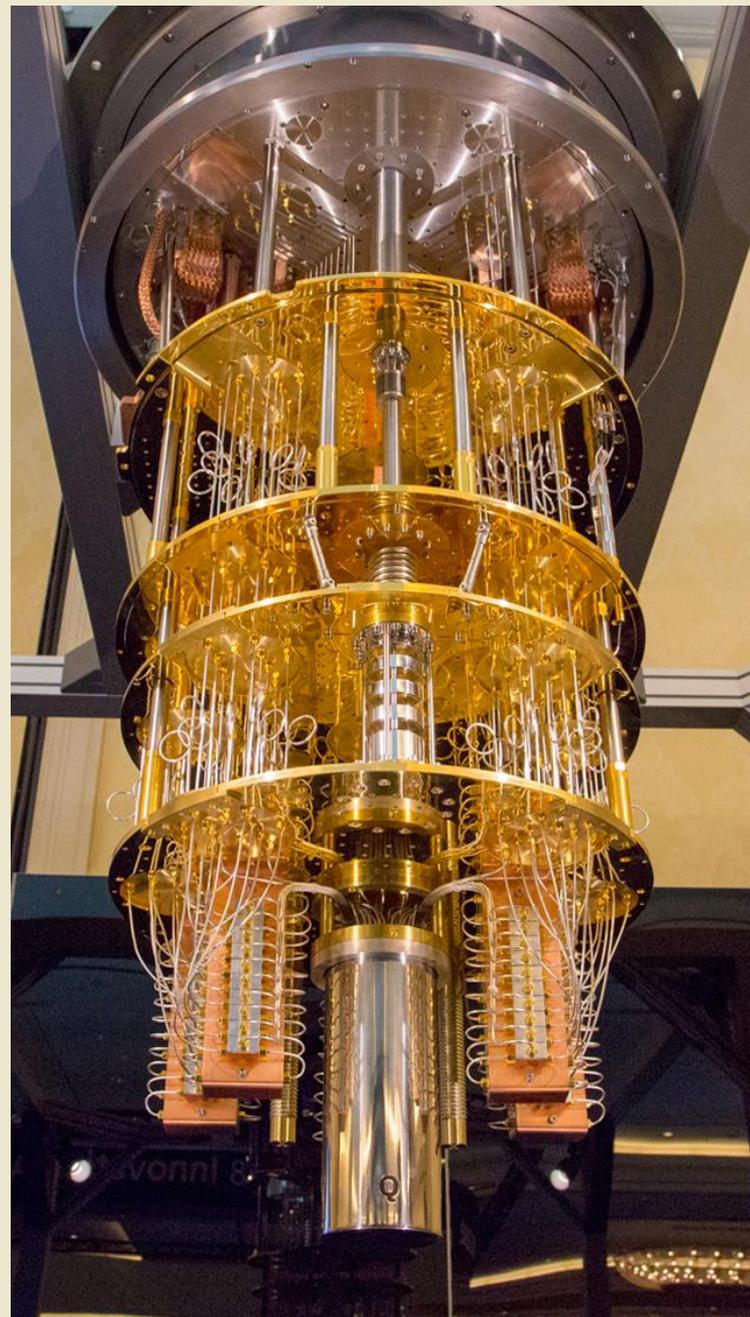
*В.П.Драгунов, И.Г.Неизвестный, В.А.Гридчин «Основы наноэлектроники», Новосибирск, НГТУ, 2004, 496 с.*

# КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- квантовые биты: суперпозиция состояний;
- квантовые регистры: параллелизм вычислений;
- квантовая криптография : абсолютная секретность.

**Квантовый компьютер IBM из 50  
сверхпроводниковых кубитов**

*Рабочая температура 4 К (вверху), < 10 мК  
(в нижней части), время когерентности –  
90 мксек.*





# ИНФРАСТРУКТУРА НАНОСИСТЕМ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

# SEMICONDUCTOR ELECTRONICS: MAIN NANOTECHNOLOGIES

- **Molecular Beam Epitaxy (MBE);**
- **Metal Organic Phase Vapour Epitaxy (MOVPE);**
- **Atomic Layer Deposition (ALE);**
- **Reactive Ion Etching and Deposition;**
- **Silicon (Germanium etc.)-on-Insulator (SOI, GOI etc.);**
- **Nanolithography: Optical, EUV, X-Ray, Electron Beam (stamp and focused), Ion Beam, Probe of Atomic Force Microscope and Scanning Tunneling Microscope;**
- **Nano-Imprinting;**
- **Self Organization Processes (Formation of Quantum Wires, Quantum Dots, Nanotubes, Nanoshells etc.).**

# Equipment for MBE at Rzhanov Institute of Semiconductor Physics



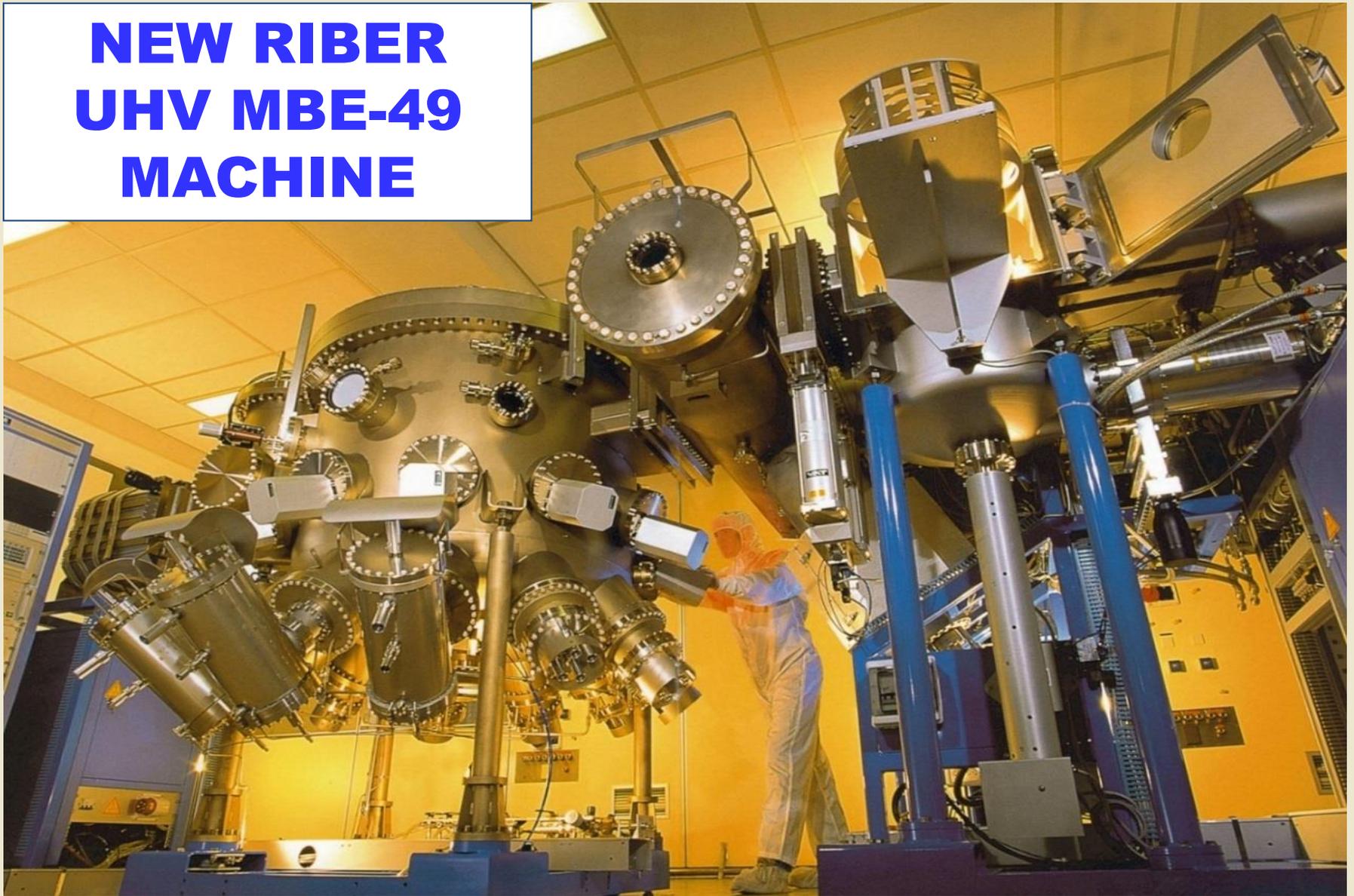


Разработанный в ИФП СО РАН  
пилотный образец  
компактной автоматической  
сверхвысоковакуумной  
установки нового поколения  
для молекулярно-лучевой  
эпитаксии полупроводниковых  
многослойных гетеросистем и  
наноструктур «Катунь 100»

Установка в зависимости от направлений её использования может состоять из нескольких специализированных вакуумных камер: камеры загрузки-выгрузки пластин-подложек с кассетной загрузкой (2 кассеты по 7 пластин диаметром 102 мм); камеры эпитаксиального роста элементарных полупроводников и их твёрдых растворов (Si,Ge), металлических, диэлектрических слоев снабжаются электронно-лучевыми испарителями, газовыми и плазменными источниками молекулярных пучков; камеры для выращивания полупроводниковых соединений  $A_3B_5$ ,  $A_3N$  и  $A_2B_6$  могут содержать до 12 молекулярных источников, в том числе вентильного типа для сурьмы, фосфора и мышьяка.

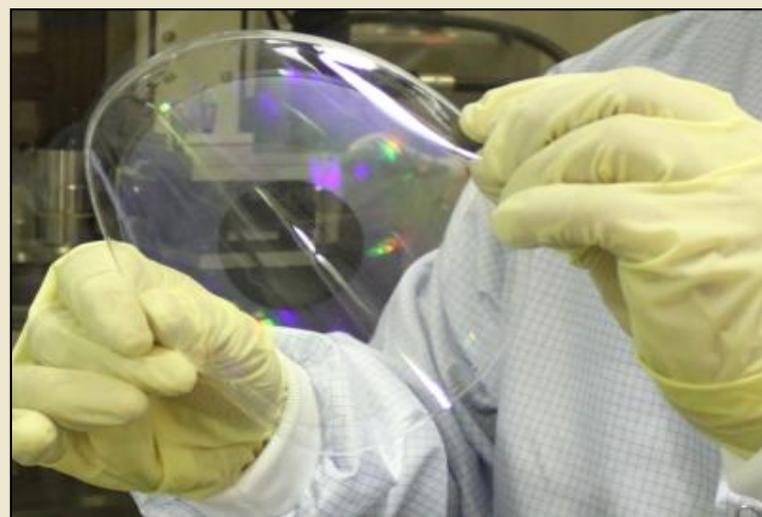


# **NEW RIBER UHV MBE-49 MACHINE**



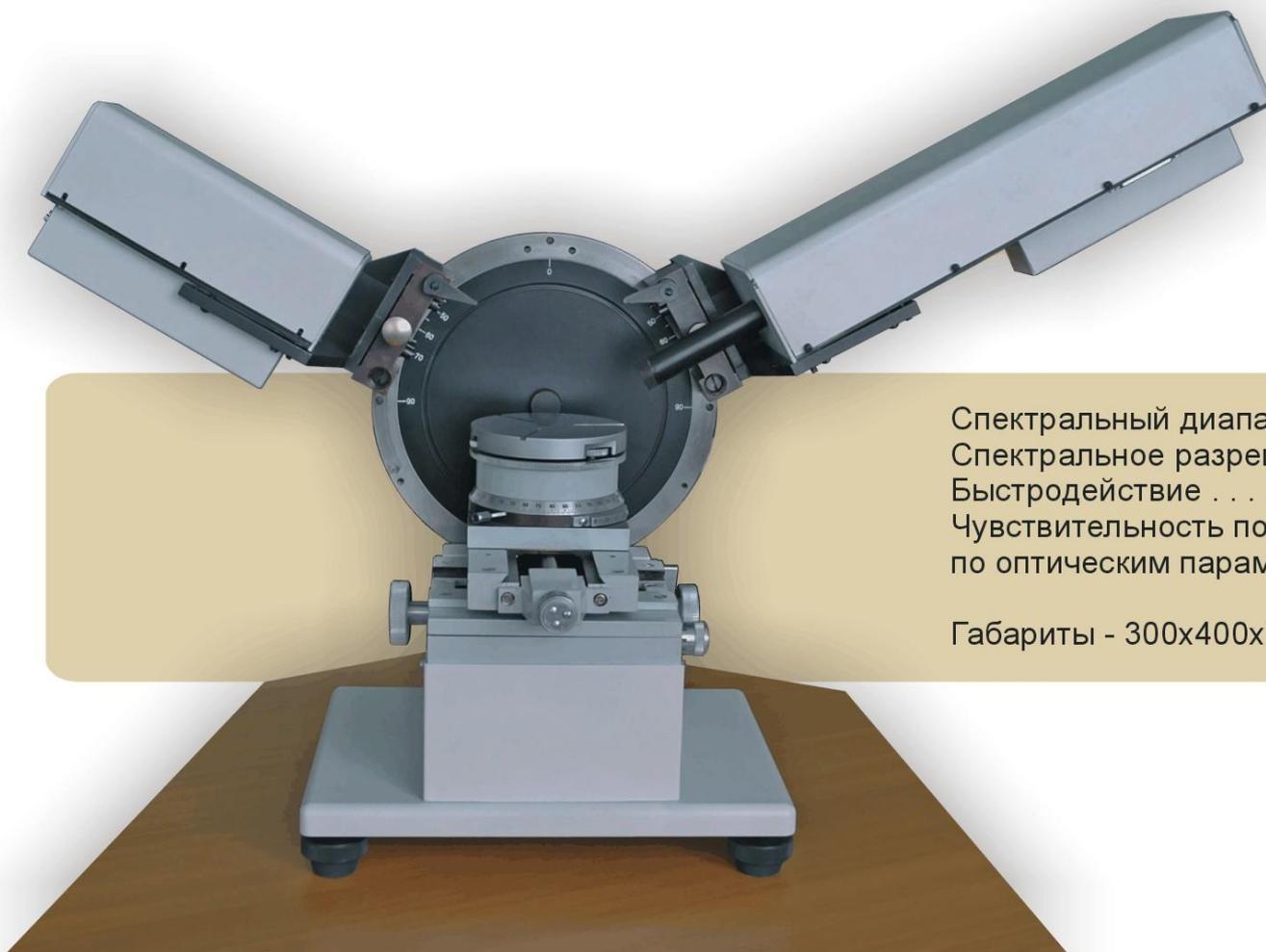
**Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of SB RAS**

# Единственная в России установка высокоточной штамповой нанолитографии, работающая в сверхчистых условиях (чистая комната 1-10 класса)



Ширина линии до 10 нм, диаметр подложки 150 мм.

## Быстродействующий спектральный эллипсометрический комплекс «ЭЛЛИПС-БСЭК»



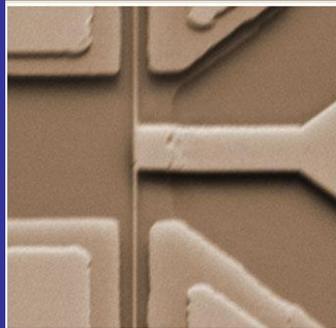
Спектральный диапазон . . . . . 250 - 800 нм;  
Спектральное разрешение . . . . . 1 нм;  
Быстродействие . . . . . 10 сек/спектр;  
Чувствительность по толщине . . . . 0,1 нм;  
по оптическим параметрам . . . . . 0,001

Габариты - 300x400x700 мм; вес не более 25 кг.

*В.А.Швец, Е.В.Спесивцев, С.В.Рыхлицкий, Оптика и спектроскопия, 2004, т.97, в.3, с.514-525.  
В.А.Швец, С.И.Чикичев, В.Ю.Прокопьев, С.В.Рыхлицкий, Е.В.Спесивцев, Автометрия, 2004, в.6, с.61-69.*



# ЦКП Новосибирского государственного университета «Высокие технологии и аналитика наносистем» руководитель к.ф.-м.н. П.В.Гейдт



Элемент транзистора



Биологические отложения со дна  
озера Байкал



Подготовка и переподготовка элитных кадров высшей квалификации; развитие существующей интегрированной инфраструктуры образования и науки

**ЦКП «Наноструктуры» в ИФП им. А.В.Ржанова СОРАН - обеспечение выполнения исследований аналитическими методами по заказам научных, образовательных и производственных организаций в рамках федеральных, региональных и академических программ (рук. академик РАН А.В. Латышев, к.ф.-м.н. Д.В.Щеглов)**



# ПРОЕКТ



## Центр прототипирования изделий био- и наноэлектроники

---

Создание полупроводниковой мини-фабрики в  
Новосибирском Академгородке на основе  
разработок Институты Сибирского отделения РАН  
в рамках проекта развития Академгородок 2.0

---

*Новосибирск, Россия – Кремниевая долина, США  
2017 г.*

---

**Цель проекта состоит в разработке и производстве малых серий принципиально новых продуктов на основе технологий кремниевой наноэлектроники, в числе которых:**

- ❖ Кремниевые лаборатории-в-корпусе (ЛВК) на основе нано-, био-, газовых и электромеханических сенсоров;
- ❖ Элементы на основе эпитаксиальных структур кремний-германий, кремний-кристаллы III-V, кремний-алмаз и структур с квантовыми точками для наноэлектроники ближайшего будущего, включая СВЧ-элементы для телекоммуникационных систем нового поколения, систем квантовой криптографии и квантовых вычислений;
- ❖ Новые типы элементов терабитной памяти.

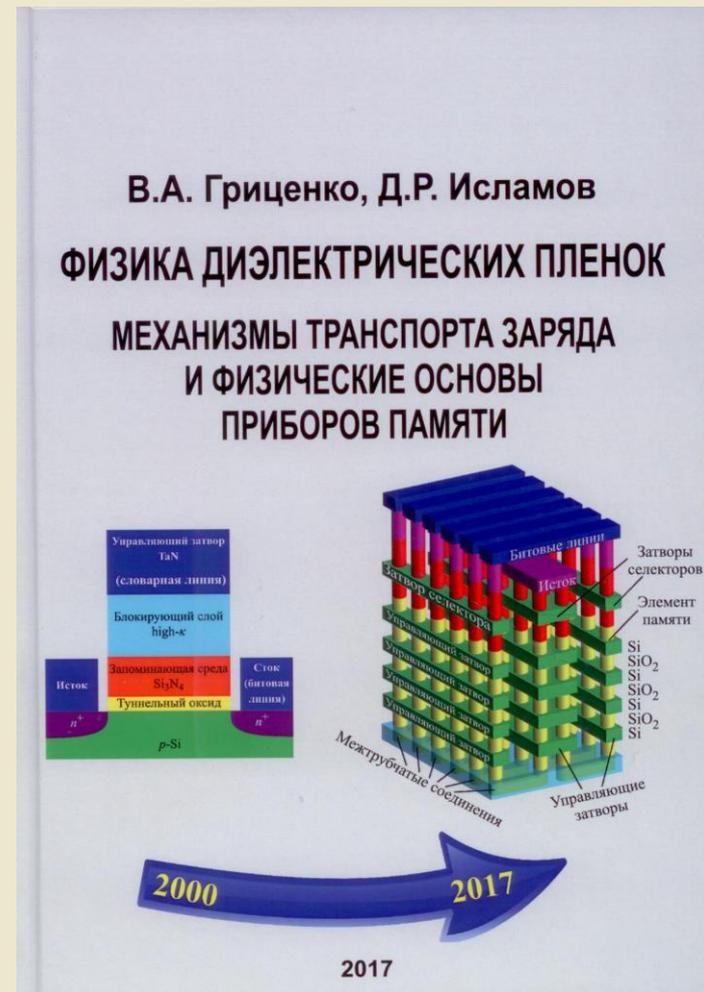
*Предполагается передача разработанных продуктов для крупномасштабного производства на АО «НИИМЭ и ПАО «Микрон» (Зеленоград), ПАО «НЗПП-Восток» и др. (Новосибирск), ЗАО «Микран» и АО НИИПП (Томск), АО «ОНИИП» (Омск), АО «НПП Радиосвязь» (Красноярск) и др.*

---



Под редакцией А.В. Латышева, А.В. Двуреченского и А.Л. Асеева, 2017 г., ELSEVIER, ISBN 9780128105122, 527 с.

Представлено исчерпывающее исследование новейших физических явлений и свойств полупроводниковых наноструктур



Отв. редактор В.А.Гриценко, 2017 г., ИФП СО РАН, изд. Параллель, 352 с.

Монография посвящена физике диэлектрических пленок в полупроводниковых приборах

**N\***  
НГУ



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ  
И БОЛЬШИХ УСПЕХОВ В УЧЕБЕ!**

## Открытие электрона в 1897 г.- Дж. Томсон

Своим становлением электроника обязана английскому физику Джозефу Томсону, открывшему корпускулярную природу катодных лучей и измерившему отношение заряда к массе катодных «корпускул», как их назвал **Дж. Томсон**, которое по его измерениям оказалось в тысячу раз большим, чем для ионов водорода (по современным данным истинное отношение близко к 1800:1). Так был открыт мельчайший носитель отрицательного заряда – электрон. На основе этого открытия Дж. Томсоном была предложена т.н. капельная модель атома, включающего мельчайшие отрицательные заряды в капле положительного заряда.

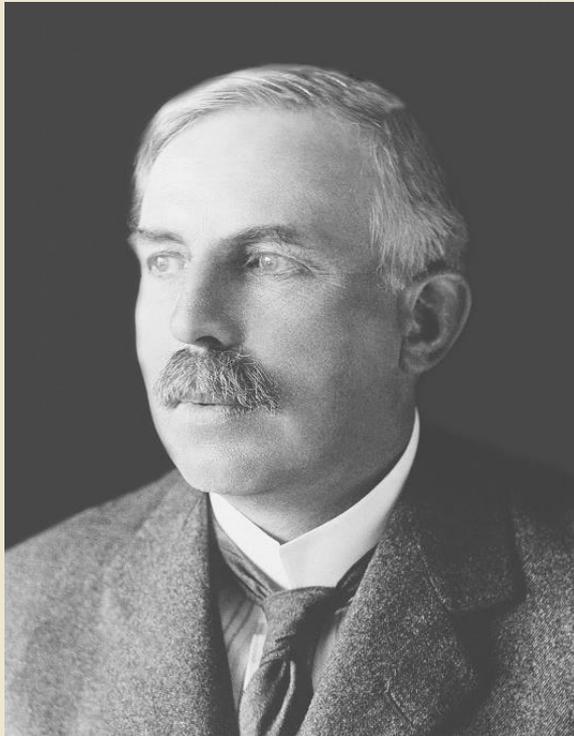


*Сэр Джозеф Джон Томсон (Joseph John Thomson, 18 декабря 1856 — 30 августа 1940) — английский физик, лауреат Нобелевской премии по физике 1906 г. с формулировкой "за исследования прохождения электричества через газы". Наиболее значимыми его исследованиями являются: Явление прохождения электрического тока при малых напряжениях сквозь газ, облучаемый рентгеновским излучением.*

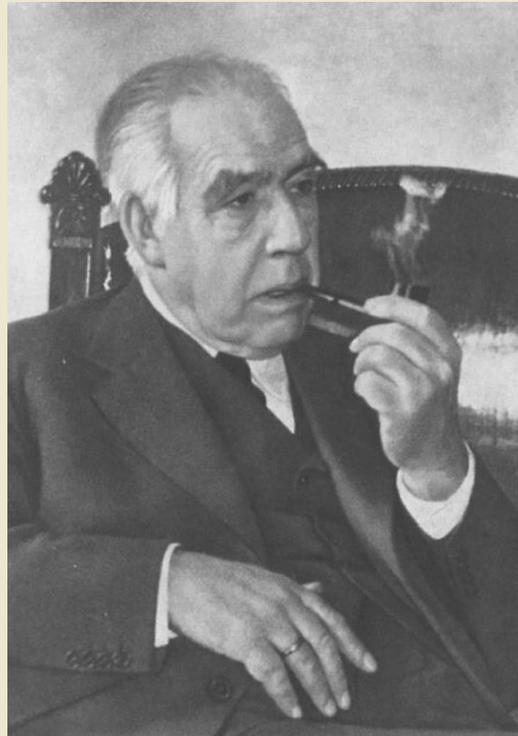
*Исследование "катодных лучей" (электронных пучков), в результате которого было показано, что они имеют корпускулярную природу и состоят из отрицательно заряженных частиц субатомного размера. Эти исследования привели к открытию электрона (1897).*

*Исследование "анодных лучей" (потоков ионизированных атомов и молекул), которое привело к открытию стабильных изотопов на примере изотопов неона:  $^{20}\text{Ne}$  и  $^{22}\text{Ne}$  (1913), а также послужило толчком к развитию масс-спектрометрии.*

## ОСНОВАТЕЛИ СОВРЕМЕННОЙ АТОМНОЙ ФИЗИКИ



**Сэр Эрнест Резерфорд** (*Ernest Rutherford*; 30 августа 1871, Спринг Грув, Новая Зеландия — 19 октября 1937, Кембридж) — британский физик. Известен как «отец» ядерной физики. Лауреат Нобелевской премии по химии 1908 г. «за проведённые им исследования в области распада элементов в химии радиоактивных веществ».

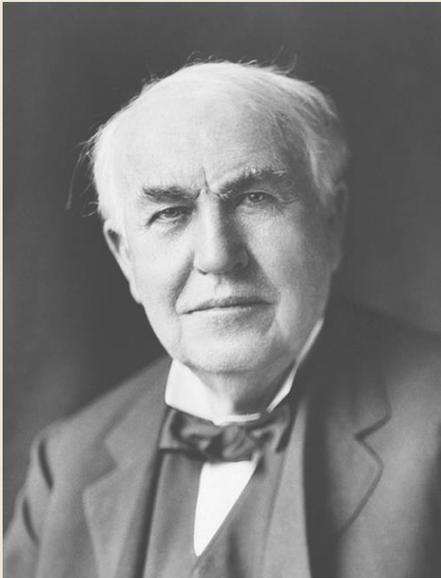


**Нильс Хенрик Давид Бор** (*Niels Henrik David Bohr*; 7 октября 1885, Копенгаген — 18 ноября 1962, Копенгаген) — датский физик-теоретик, создатель первой квантовой теории строения атома, один из основоположников квантовой механики. Лауреат Нобелевской премии по физике 1922 г.

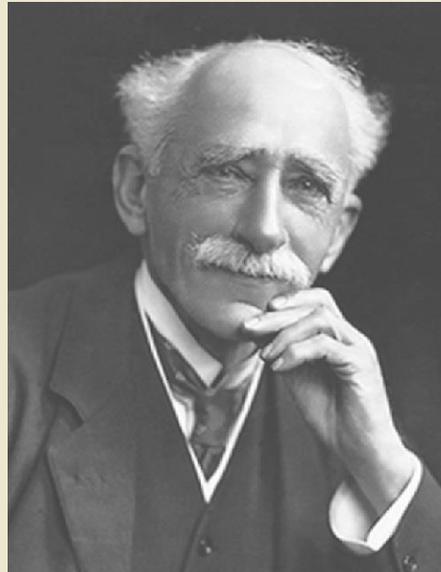


**Эрвин Рудольф Йозеф Александр Шрёдингер** (*Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger*; 12 августа 1887, Вена — 4 января 1961, там же) — австрийский физик-теоретик, один из создателей квантовой механики. Лауреат Нобелевской премии по физике (1933).

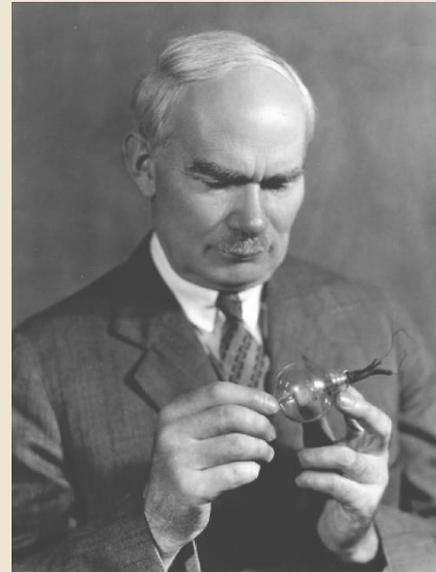
# СОЗДАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМП ДЛЯ РАДИОТЕХНИКИ И РАДИОСВЯЗИ



**Эдисон Томас Альва**  
(*Thomas Alva Edison*; 11.02.1847, Майлен, США – 18.10.1931, Вест Оранж, США) —изобретатель и предприниматель, получил более тысячи патентов. Создал телеграф, телефон, киноаппаратуру, изобрел фонограф, открыл явление термоэлектронной эмиссии, нашедшее применение при создании радиоламп.



**Флеминг Джон Амброс**  
(*Fleming, Sir John Ambrose*, 1849, Ланкастер– 1945, Сидмут, Великобритания), инженер-электротехник, впервые использовал «эффект Эдисона» и изобрел электронную лампу. Лампа Флеминга являлась диодом и позволяла току течь только в одном направлении.

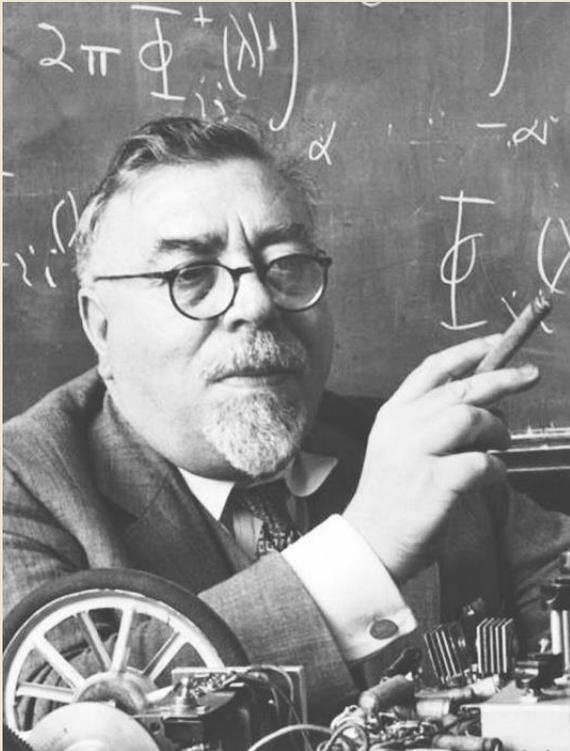


**Форест Ли де (Lee De Forest**; 26.08.1873, Каунсил-Блафс, США – 30.06.1961, США) — Изобрел триод — электронную лампу, которая принимает на входе относительно слабый электрический сигнал и затем усиливает его. Один из отцов «века электроники».

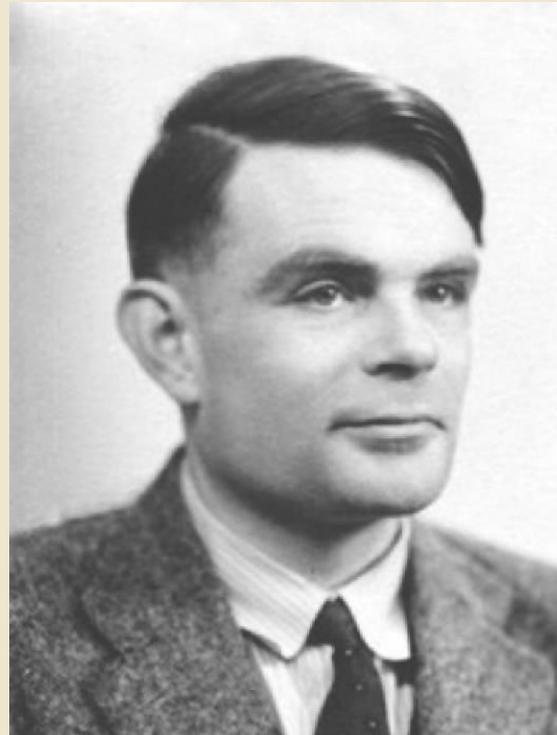


Прямокальный триод УБ-110, широко применявшийся в приемной аппаратуре начала XX века с поперечным расположением прямоугольного анода. Напряжение накала — 2 В.

## СОЗДАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ



**Винер Норберт (Norbert Wiener;** 26.11.1894, Колумбия, США — 18.03.1964, Стокгольм, Швеция) — выдающийся математик и философ, основоположник кибернетики и теории искусственного интеллекта. В 1948 г. опубликовал труд «Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине».



**Тьюринг Алан Мэтисон (Alan Mathison Turing;** 23.06.1912, Лондон, — 7.06.1954, Уилмслоу, Великобритания) — математик, логик, криптограф, основоположник информатики и теории искусственного интеллекта. Предложил в 1936 г. модель компьютера общего назначения и формализовал понятие алгоритма.



**Нейман Джон фон (John von Neumann;** 28.12.1903, Будапешт, Венгрия — 8.02.1957, Вашингтон, США) — сделал важный вклад в квантовую физику, квантовую логику, функциональный анализ, теорию множеств, информатику и др. С его именем связывают архитектуру большинства современных ЭВМ.