

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Перспективы развития ЭВМ и квантовые компьютеры

Проблемы развития ЭВМ, нанотехнологии и новые материалы:

«напряженный» кремний и «high-k» диэлектрики,
GaAs, InP и другие перспективные полупроводники,
углеродные нанотрубки, графен и наноструктуры,
молекулярные кристаллы.

Реализация устойчивых одно- и многоэлектронных состояний в различных системах.
Когерентность состояний. Предельные размеры, быстродействие и энергозатраты.

Вычисления в классической и квантовой физике:

биты и кубиты,
квантовые алгоритмы,
области применения.

Как построить квантовый компьютер:

ионные ловушки, ЯМР, поверхностные наноструктуры
разрушение когерентности как источник ошибок при квантовых вычислениях и их
коррекция.

Перспективы реализации квантовых компьютеров

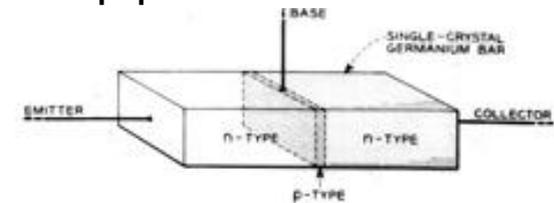
Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

История



Точечный транзистор (1947)

1947 - У. Шокли, Bell Labs, точечный транзистор
1951 - У. Шокли, Bell Labs, биполярный транзистор
1956 - У. Шокли, Нобелевская премия за открытие транзисторного эффекта



Планарный транзистор (1951)

1952 - Bell Labs, продажа лицензий на выпуск биполярных транзисторов (\$ 25000, 26 фирм)

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

История

March 20, 1962 J. A. HOERNI 3,025,589
METHOD OF MANUFACTURING SEMICONDUCTOR DEVICES
Filed May 1, 1959

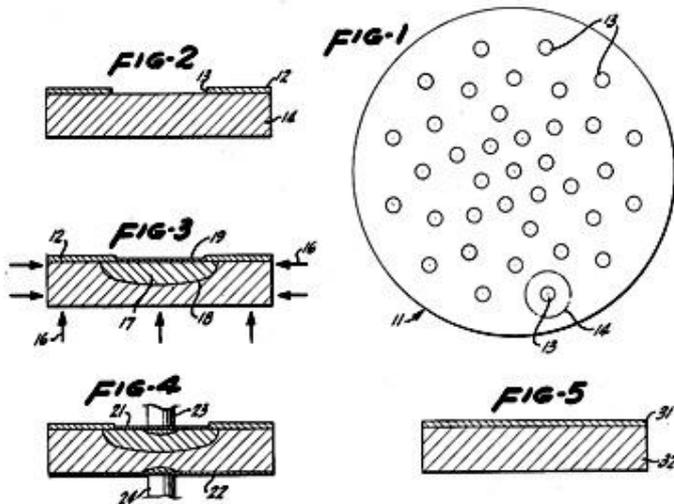


Схема из патента Эрни на
планарный транзистор

1955 - Bell Labs, в производстве уже используются все основные технологические операции микроэлектроники: осаждение изолятора, фотолитография с масками (200 мкм), травление и диффузия

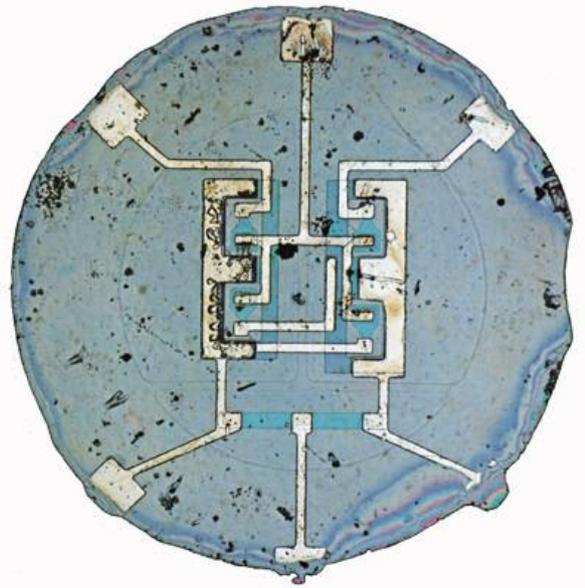
1954 - Bell Labs, транзистор с толщиной базы 1 мкм (частота 170 МГц)
1955 - Bell Labs, первый полевой транзистор



Ручная нарезка маски для
фотолитографии

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

История



Кристалл интегральной схемы
(триггер, 1960)

April 25, 1961 R. N. NOYCE 2,981,877
SEMICONDUCTOR DEVICE-AND-LEAD STRUCTURE
Filed July 30, 1959 3 Sheets-Sheet 2

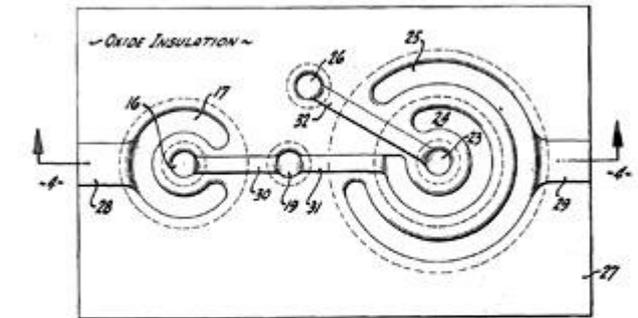


FIG-3

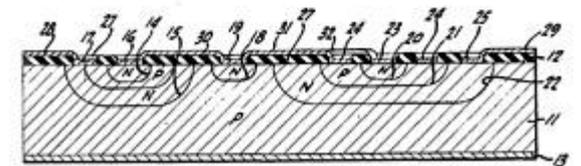


FIG-4

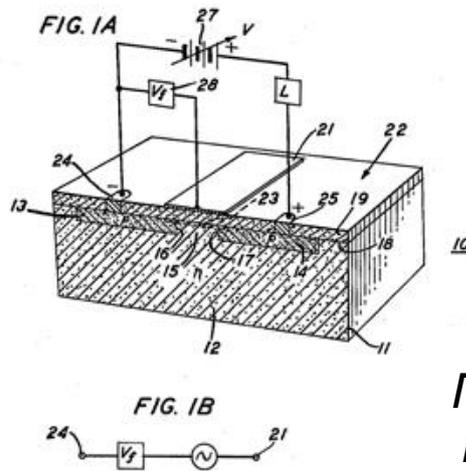
Патент Нойса на планарную
интегральную схему (1959)

- 1952 - Джэффри Даммер, идея интегральной схемы («брусек без проводов»)
- 1958 - Джэк Килби, первая интегральная схема (пять элементов, генератор)
- 2000 - Джэк Килби, Нобелевская премия за создание интегральной схемы

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

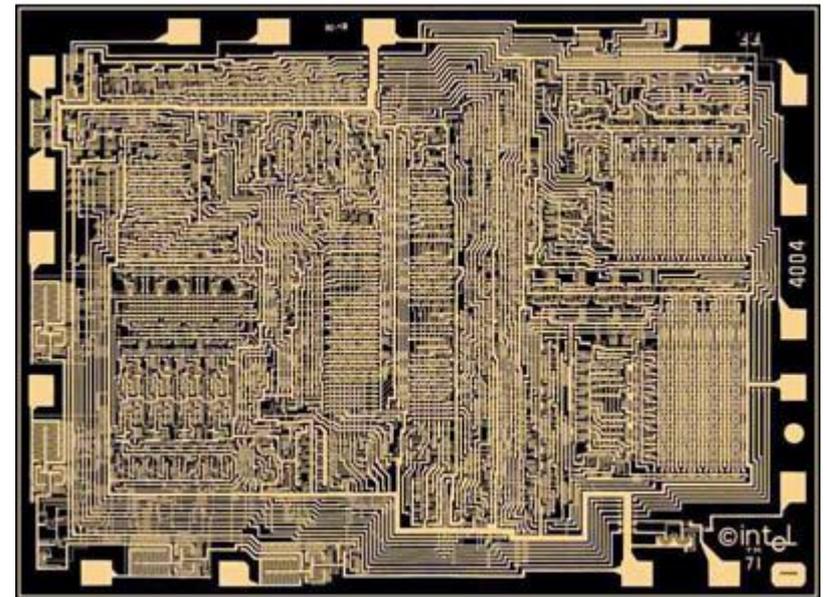
История

Aug. 27, 1963 DAWON KAHNG 3,102,230
ELECTRIC FIELD CONTROLLED SEMICONDUCTOR DEVICE
Filed May 31, 1960



Патент на полевой транзистор (1960)

1959 - Джон Аталла и Дэвон Канг, Bell Labs, полевой транзистор с изолированным затвором (МОП)



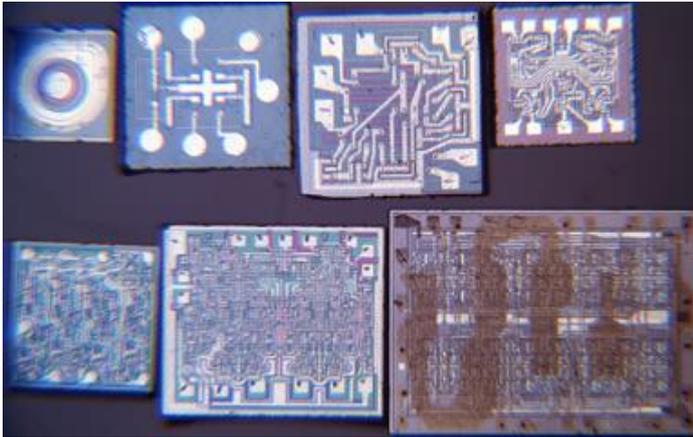
4-битный ЦП Intel i4004

1963 - транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ)

1963 - Фрэнк Уанласс, Fairchild, использование комплементарных МОП (КМОП) структур уменьшает энергопотребление в статике ~1.000.000 раз

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Закон Мура



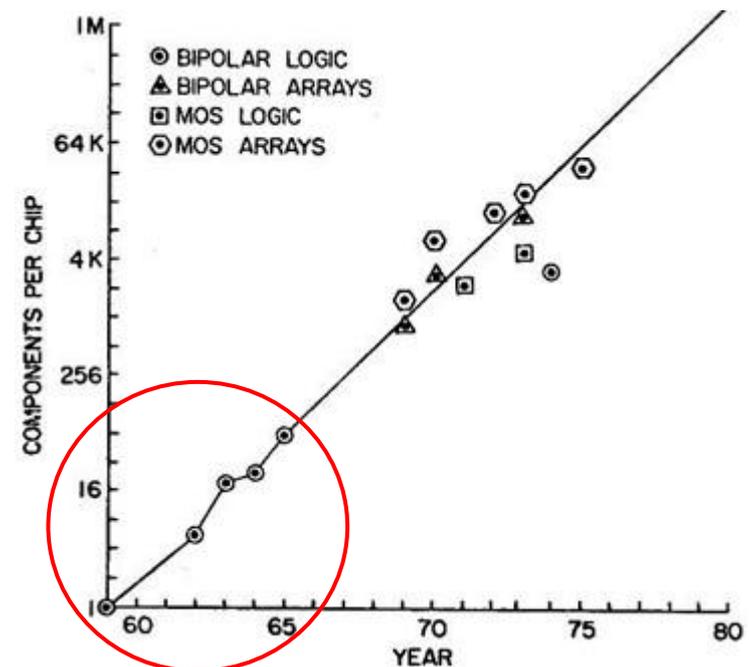
Эти чипы - источник закона Мура

Основной вывод Мура: «Число компонентов на чипе удваивается каждый год»

На базе экстраполяции этой (экспоненциальной) зависимости был сделан прогноз развития микроэлектроники на следующие 10 лет, и этот прогноз оправдался (!!!).

19 апреля 1965 - отредактированная версия доклада публикуется в журнале «Electronics»

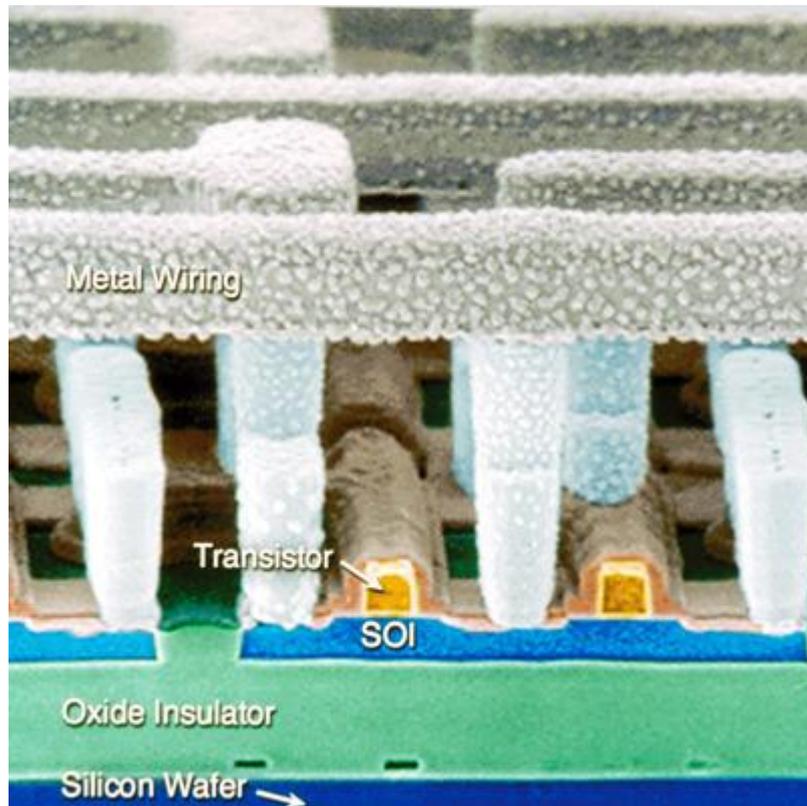
1965 - Гордон Мур, доклад «Будущее интегральной электроники», график (5 точек, период 1959–1964), связывающий число компонентов на чип (и их минимальную цену) и время



Закон Мура (биполярная и полевая логика, память, 1975)

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Кремний на изоляторе



Кремний на изоляторе (IBM, 1998)

1998 - IBM, технология «кремний на изоляторе» (КНИ, SOI): на кремниевой пластине формируется слой SiO_2 (изолятор), а поверх него - тонкий слой Si

Строго говоря, «кремний на сапфире» (КНС) - это тоже КНИ, т.к. сапфир (Al_2O_3) также является изолятором, но технология IBM дешевле и лучше приспособлена к имеющемуся оборудованию. Однако за 13 лет лидер полупроводниковой промышленности, Intel, так это и не заметил и продолжает использовать «bulk silicon», т.е. чистые кремниевые пластины, поскольку они дешевле

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Фотолитография



Современный литографический сканер ASML TwinScan 1950i

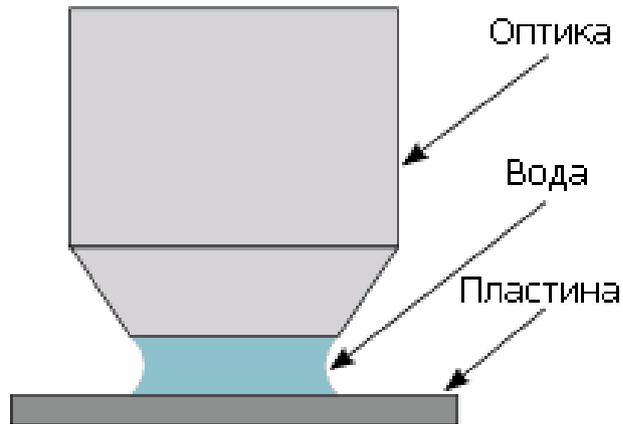
1982 - IBM, внедрение в фотолитографию эксимерных лазеров с длинами волн 248 (KrF) и 193 (ArF) нм.

Поскольку воздух поглощает излучение на длинах волн короче 186 нм, в самых современных техпроцессах с нормами менее 30 нм по-прежнему используются ArF лазеры.

Рано или поздно состоится переход на экстремальный ультрафиолет (ЭУФ, EUV) с длинами волн 13,5 нм (и менее), что заставит использовать вакуумные камеры

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Иммерсионная литография



Иммерсионная литография

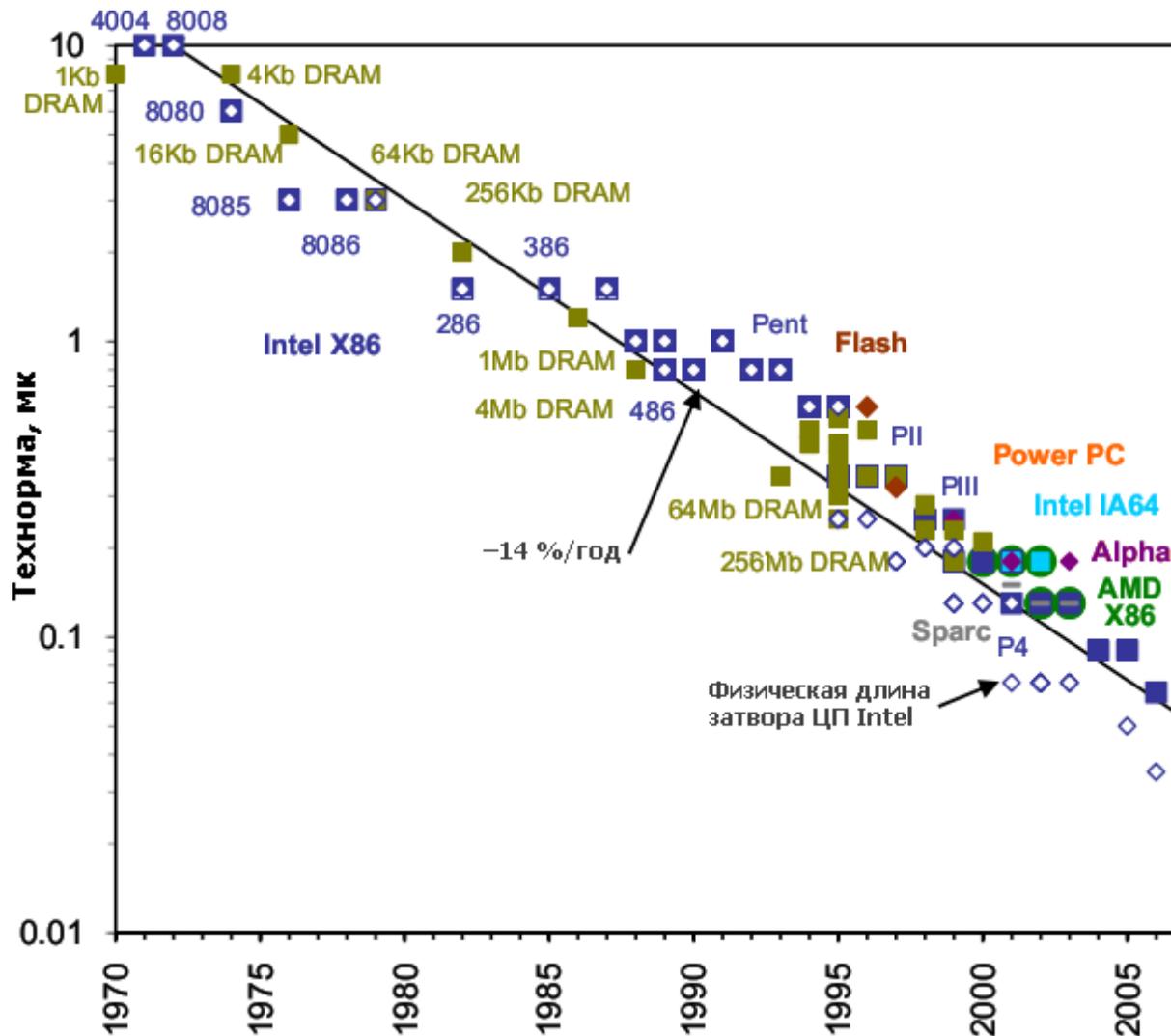
2006 - иммерсионная литография:

пространство между последней линзой и экспонируемой пластиной заполняется не воздухом, а жидкостью (на сегодня - водой). Из-за большего показателя преломления жидкости (1 для воздуха и 1,33 для воды) и соответствующего роста числовой апертуры (NA) это улучшает разрешение на 30–40%.

Intel использует иммерсионную литографию, начиная с техпроцесса 32-нм, а AMD - уже с техпроцесса 45-нм.

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

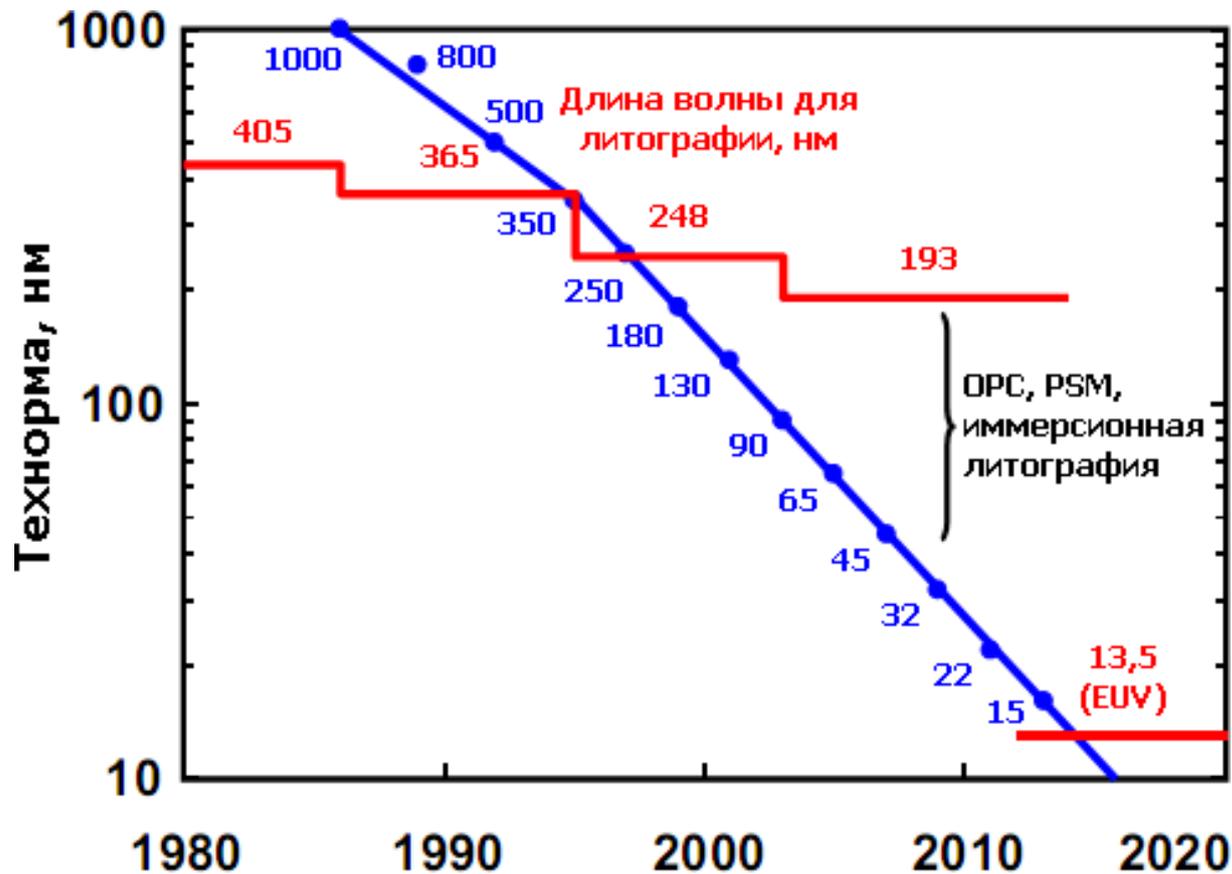
Закон Мура



Технологические нормы сложных микросхем. Падает и их цена - правда, не вдвое, а примерно в 1,5 раза при каждом переходе на очередной техпроцесс

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Закон Мура

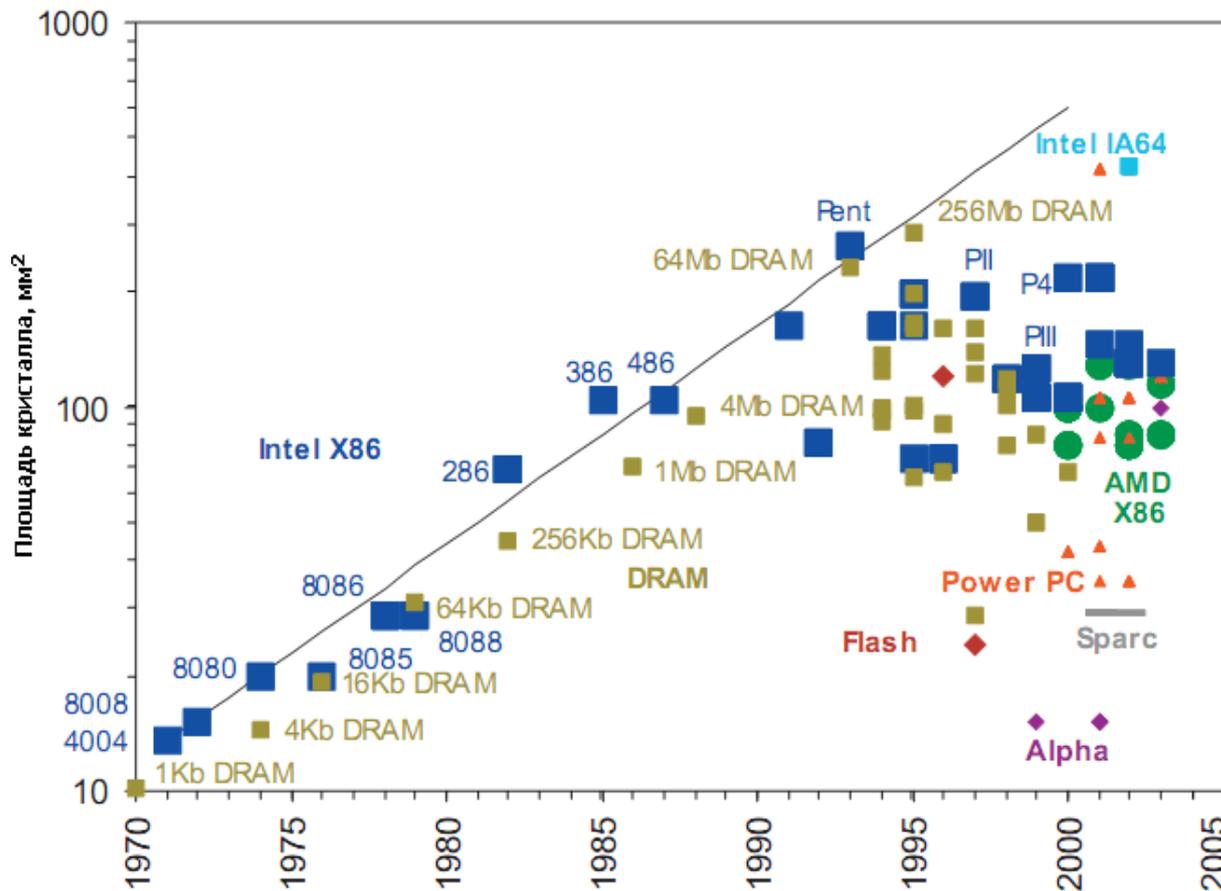


Технологические нормы для процессоров Intel.

По мнению компании, 15-нм техпроцесс должен стать первым, где будет применен экстремальный ультрафиолет (EUV)

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Закон Мура

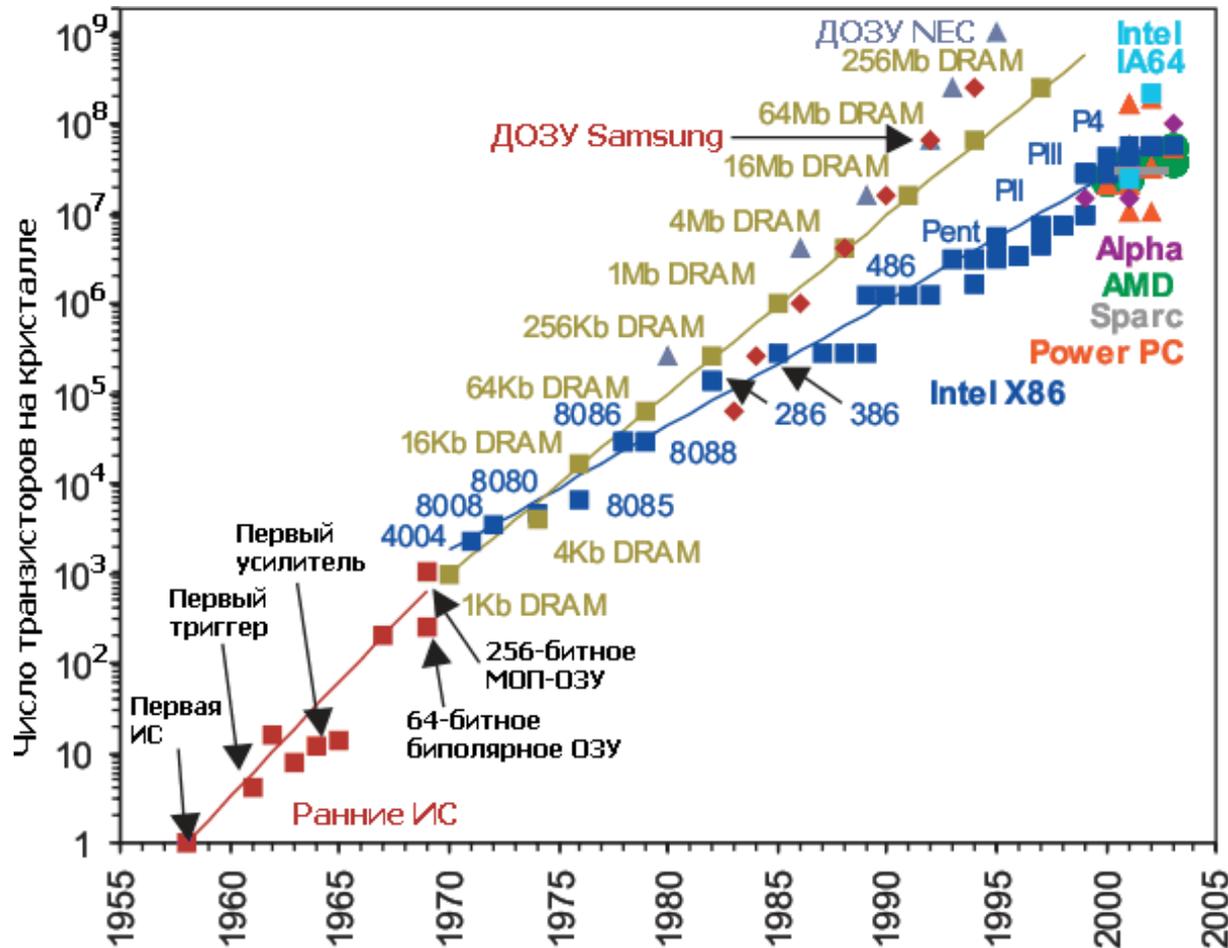


Площадь кристалла для наиболее сложных микросхем (процессоры и память) на указанный по оси абсцисс год.

Тенденция до 90-х годов - увеличение площади на 14% в год (прямая линия) - остановлена, но площадь самых сложных кристаллов достигает 400-500 мм²

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Закон Мура

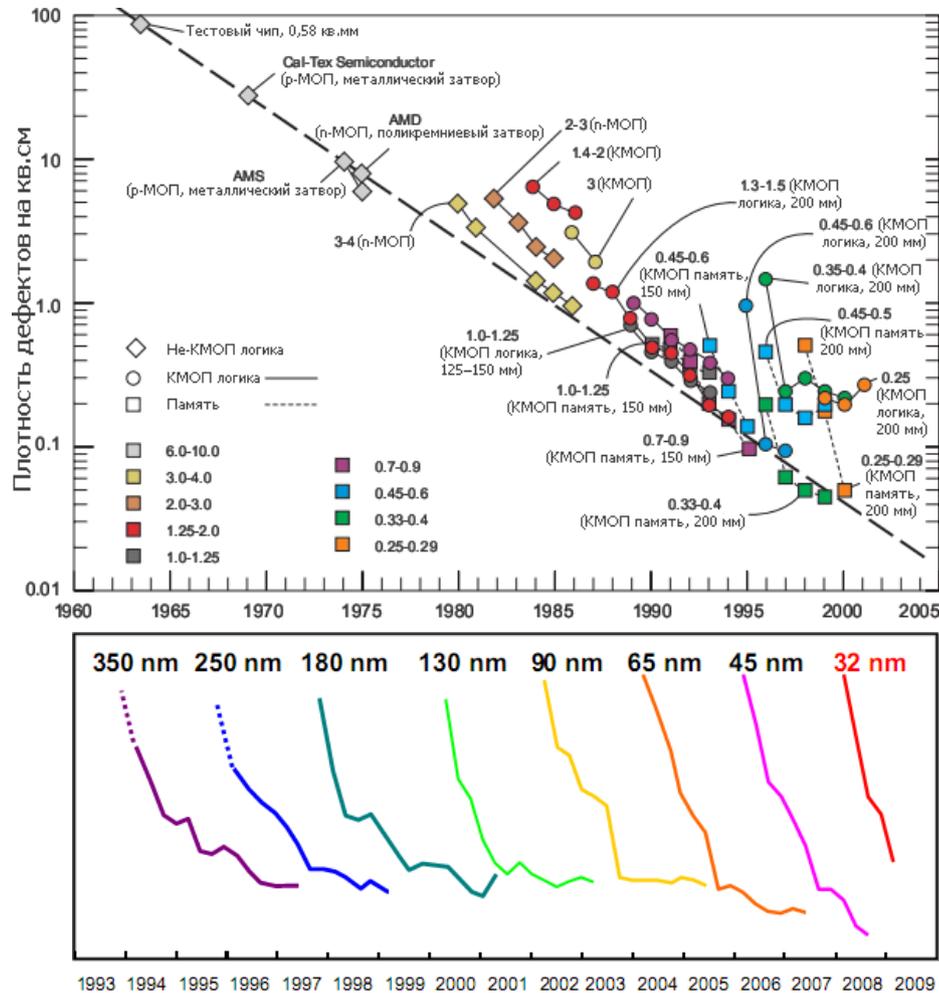


Экспоненциальный рост числа транзисторов на кристалле интегральной схемы.

Начиная с 70-х годов этот рост для микросхем памяти и процессоров идет меньшими темпами - 58 % и 38 % в год

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Закон Мура

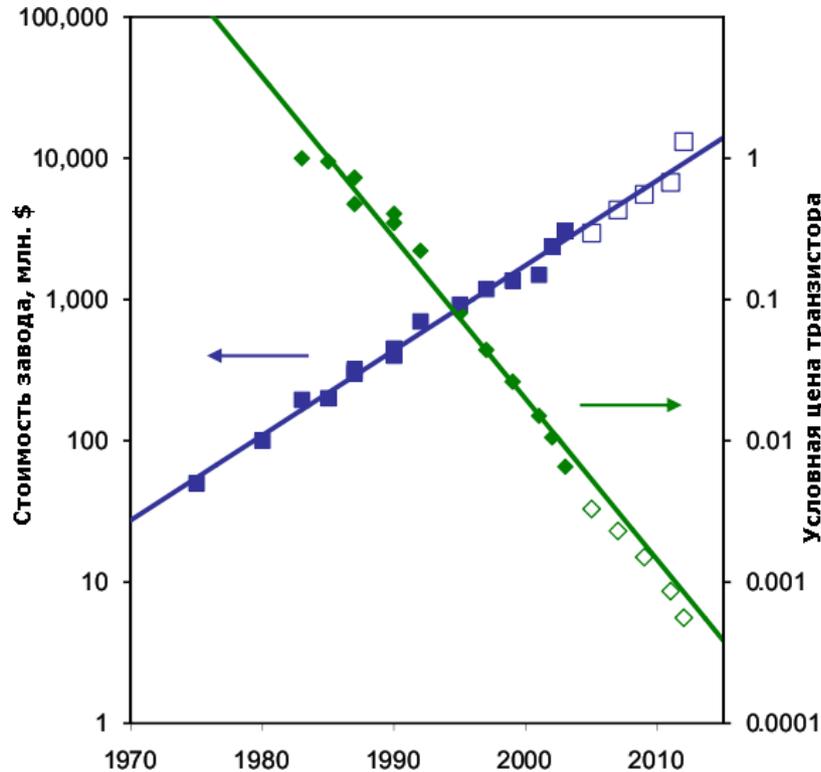


Число дефектов на 1 см² площади кристалла для самых продвинутых фабрик при финишном тестировании. Жирные цифры – технологические нормы в мкм, в скобках - диаметр пластин

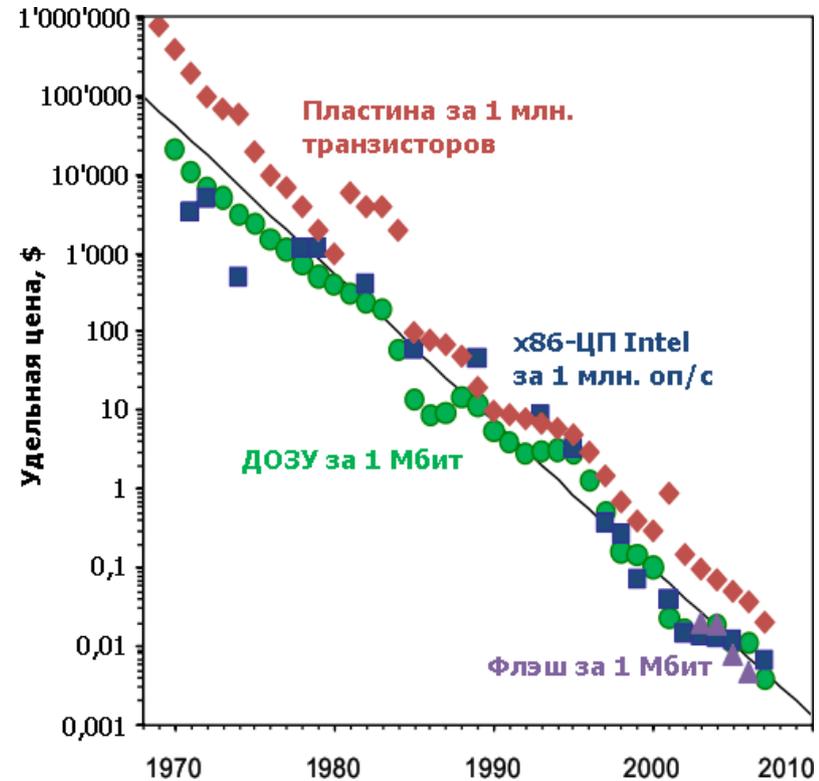
Плотность дефектов для чипов Intel, произведенных по разным технологическим нормам. По оси ординат также используется логарифмический масштаб

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Закон Мура



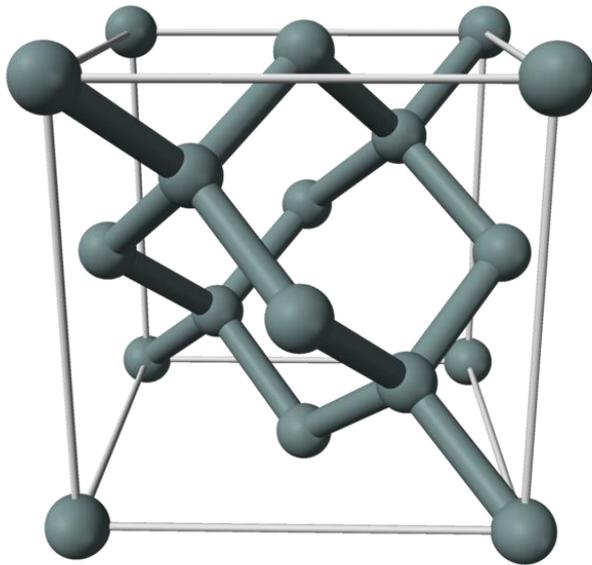
Стоимость современного завода (или его стоимость после обновления) выросла в 70 раз за 30 лет, а цена каждого транзистора упала в 2000 раз



Удельные цены пластины и микросхем за единицу характеристики. Линия соответствует ежегодному падению цены на 35% (в 1,54 раза)

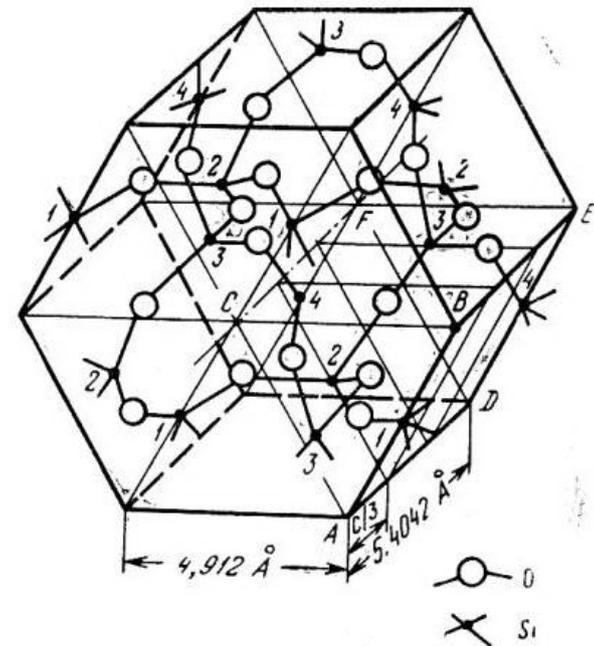
Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Кристаллические решетки Si и SiO₂



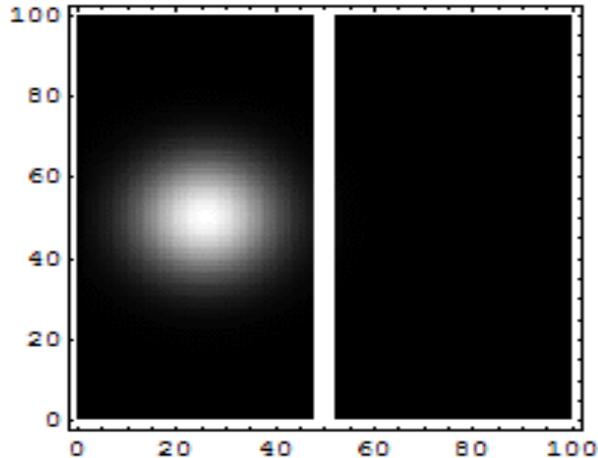
Кристаллическая решетка кремния кубическая гранецентрированная типа алмаза, параметр решетки $a = 0,543$ нм

Кристаллическая решетка α -кварца (SiO₂) ромбоэдрическая. На одну ячейку с параметрами $a = 0,490$ нм и $c = 0,539$ нм приходится три молекулы SiO₂



Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Туннельный эффект



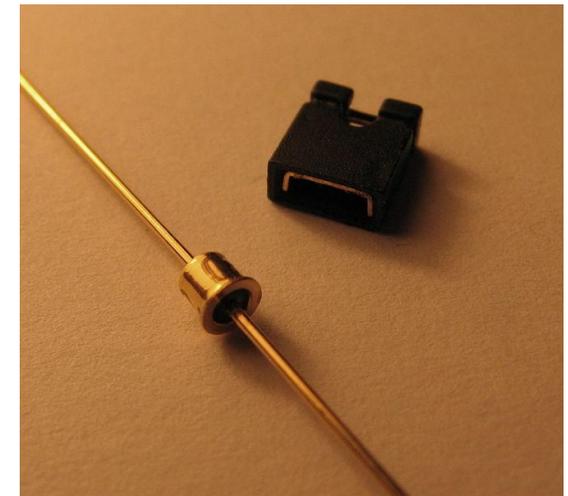
Туннельный эффект - преодоление частицей потенциального барьера в том случае, когда ее энергия (останется неизменной) меньше высоты барьера.

В классической механике это невозможно. Аналог в волновой оптике - проникновение света внутрь отражающей среды на расстояния порядка длины волны при полном внутреннем отражении

Эффект является следствием соотношения неопределенностей

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Ограничения по координате (рост определенности по x) делают импульс p менее определенным. Это «добавляет» недостающую энергию и с некоторой вероятностью частица проникает через барьер, причем ее средняя энергия остается неизменной



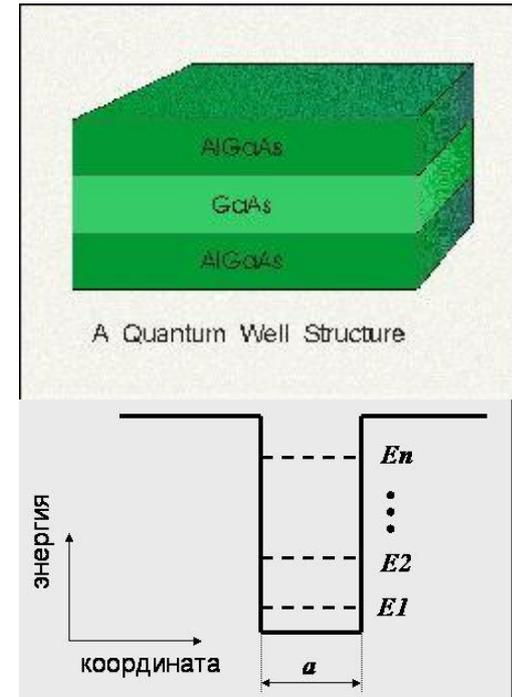
Туннельный диод

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Квантово-размерный эффект

Квантово-размерный эффект - перенормировка и квантование энергии частиц, движение которых ограничено в каких-то направлениях.

Пример - гетероструктура AlGaAs / GaAs / AlGaAs, где движение электронов в слое (GaAs, толщина ~10 нм) ограничено потенциальными барьерами (AlGaAs) и возникают дискретные уровни E_n , соответствующие движению электронов поперек слоя GaAs



Квантовая яма

Перенормировка является следствием соотношения неопределенностей

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

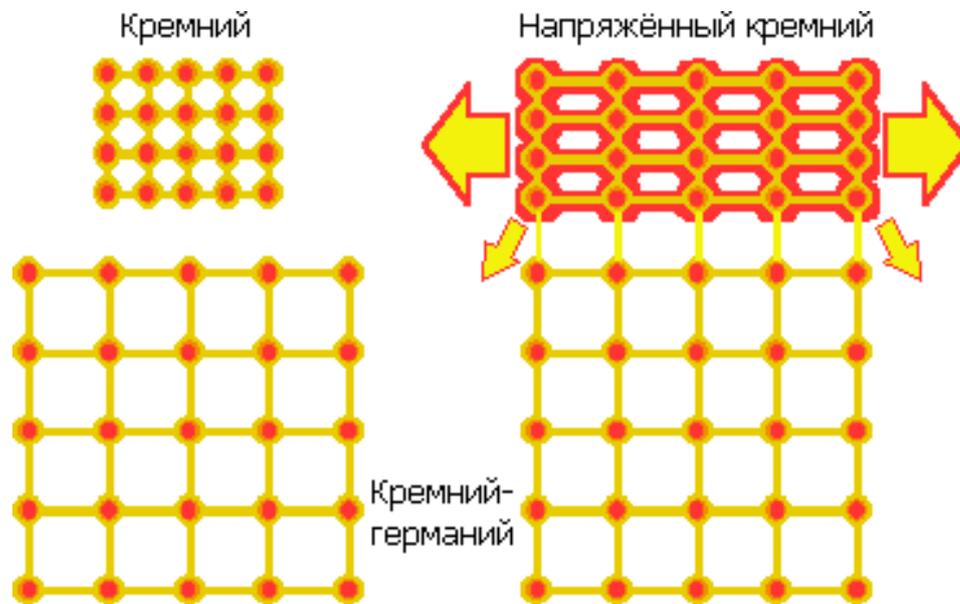
Если ограничить частицу по x в пределах L , возникнет неопределенность $p_x \sim \hbar/L$. Это изменит кинетическую энергию на $\Delta E = \hbar^2/2m^*L^2$



Цвет свечения квантовых точек зависит от их размера

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

«Напряженный» кремний

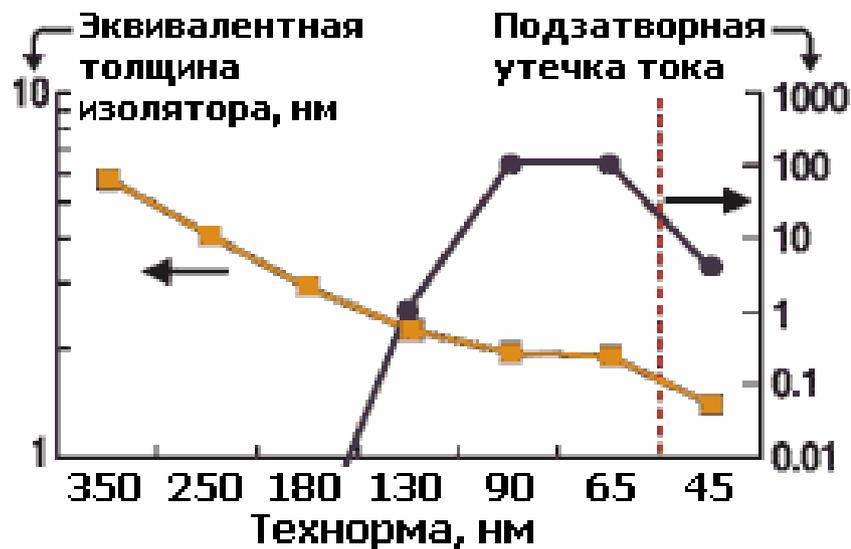


В 2004 технологию «напряженный» кремний» Intel и AMD применили для техпроцесса 90 нм. Для 65 нм была внедрена ионная имплантация германия и углерода в исток и сток. Германий «раздувает» концы транзистора и сжимает канал, что увеличивает скорость дырок (основных носителей заряда в р-канальных транзисторах). Углерод сжимает исток и сток, что растягивает п-канал, увеличивая подвижность электронов. Также весь р-канальный транзистор покрывается сжимающим слоем нитрида кремния

«Напряженный» кремний (IBM, 2001)

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

«High-k» диэлектрики

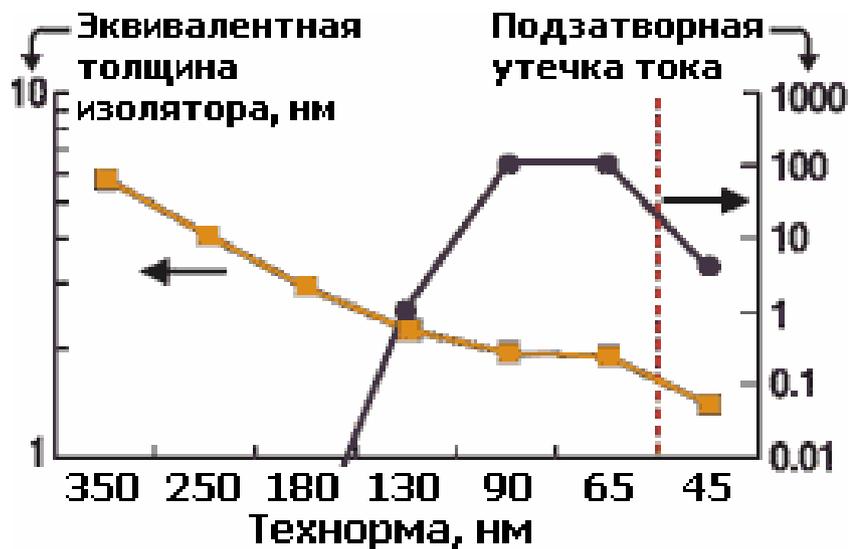


Для 90-нм техпроцесса толщина затвора уменьшилась до 1,2 (Intel) - 1,9 (Fujitsu) нм при периоде решетки кремния - 0,543 нм. В таких условиях электроны начинают туннелировать через диэлектрик, что приводит к утечке тока. Поэтому для 65-нм техпроцесса уменьшились все параметры транзистора, кроме толщины затвора

Толщина подзатворного изолятора в SiO_2 -эквиваленте и относительная утечка тока

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

«High-k» диэлектрики



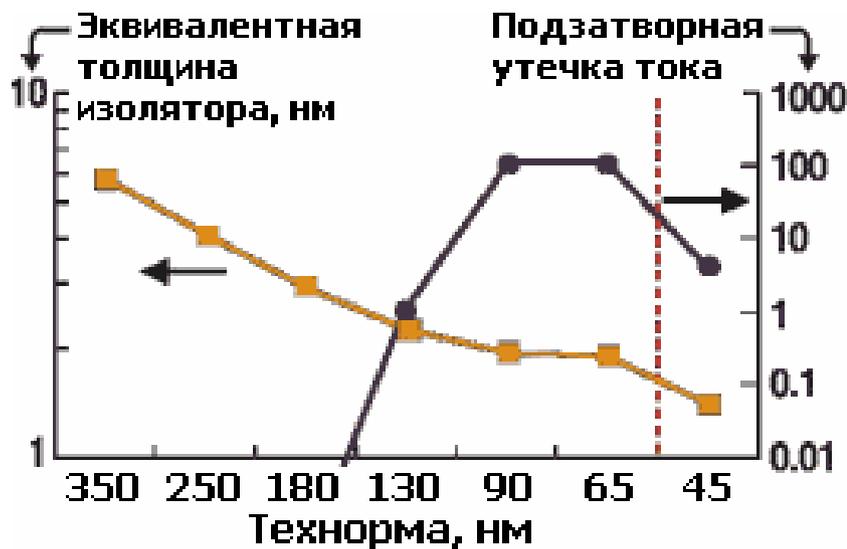
2007 (45-нм техпроцесс) - появление технологии HKMG (high-k metal gate, изолятор с высокой диэлектрической проницаемостью и металлический затвор).

k - относительная диэлектрическая проницаемость. В микроэлектронике «нормальным» считается $k \sim 3,9$ (SiO_2). Материалы с $k > 3,9$ относятся к классу «high-k», а с $k < 3,9$ - к «low-k»

Толщина подзатворного изолятора в SiO_2 -эквиваленте и относительная утечка тока

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

«High-k» диэлектрики

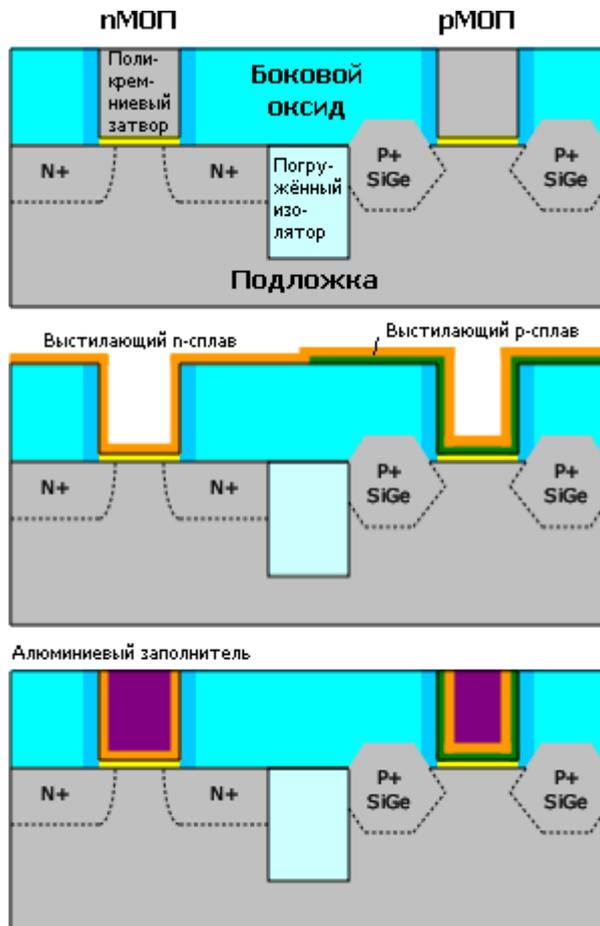


Толщина подзатворного изолятора в SiO_2 -эквиваленте и относительная утечка тока

За счет использования слоя оксинитрида кремния-гафния (HfSiON , $k = 20-40$) толщиной 3 нм в технологическом процессе 45-нм удалось уменьшить утечки тока в 20-1000 раз. Для получения такой же скорости работы старый затвор пришлось бы делать толщиной 1 нм, что было бы катастрофой из-за токов утечки. Приводимые толщины подзатворных изоляторов менее 1 нм являются SiO_2 -эквивалентами и применяются только для расчета частоты, но не утечек

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

«High-k» диэлектрики

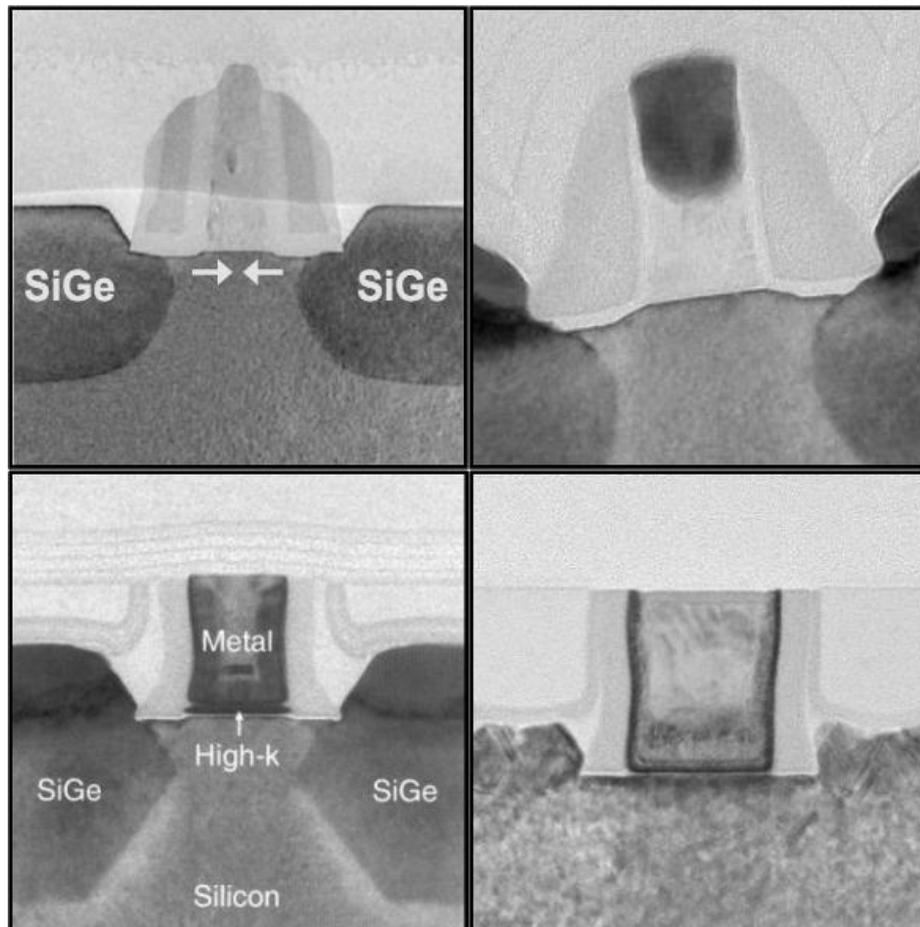


Гафниевый изолятор не совместим с поликремниевым затвором, так что пришлось менять и его - на металлический. Однако новый затвор не алюминиевый, как это было в 60-х, а сплав двух металлов. Его сопротивление ниже, что ускоряет переключение транзистора. Долгое время составы сплавов для р- и n-канальных транзисторов держались Intel в строгом секрете. Однако в 2008 г. инженеры IBM разработали свою версию этой технологии, которая теперь используется на заводах Global Foundries (ранее принадлежали AMD)

Реализация металлического затвора (Intel)

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

90-нм, 65-нм, 45-нм и 32-нм техпроцессы



4 поколения транзисторов Intel
(слева направо, сверху вниз)

90-нм (2003, впервые используется
напряженный кремний),

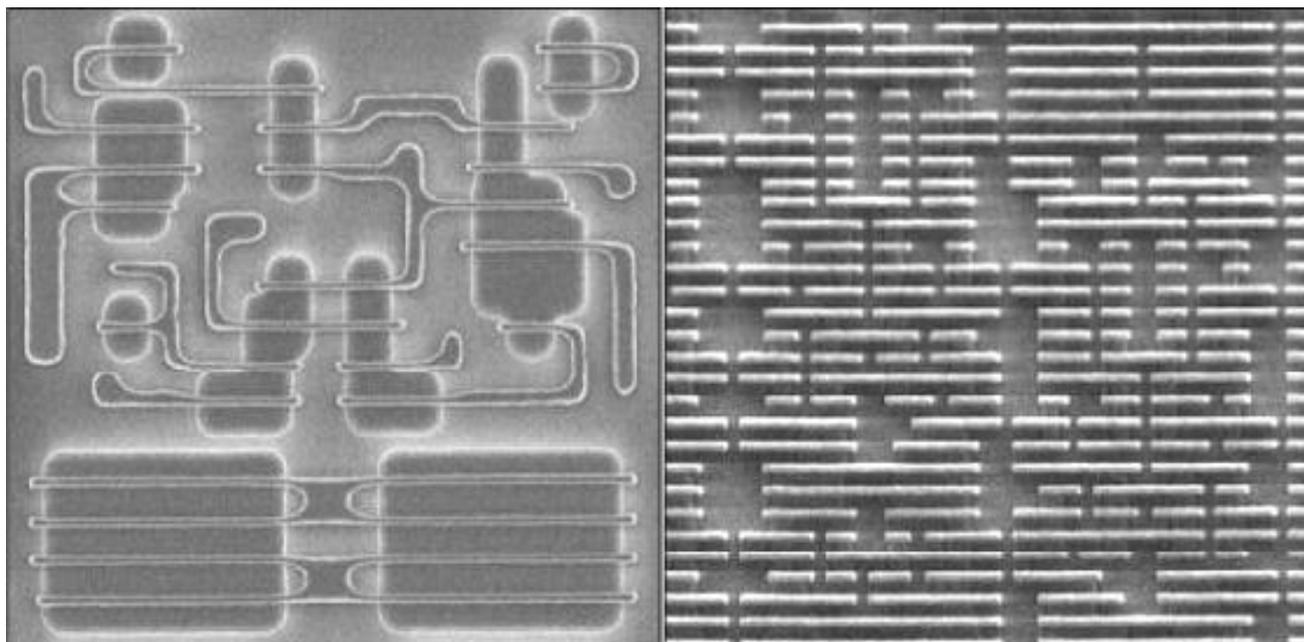
65-нм (2005),

45-нм (2007, впервые используется
HKMG)

32-нм (2009)

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

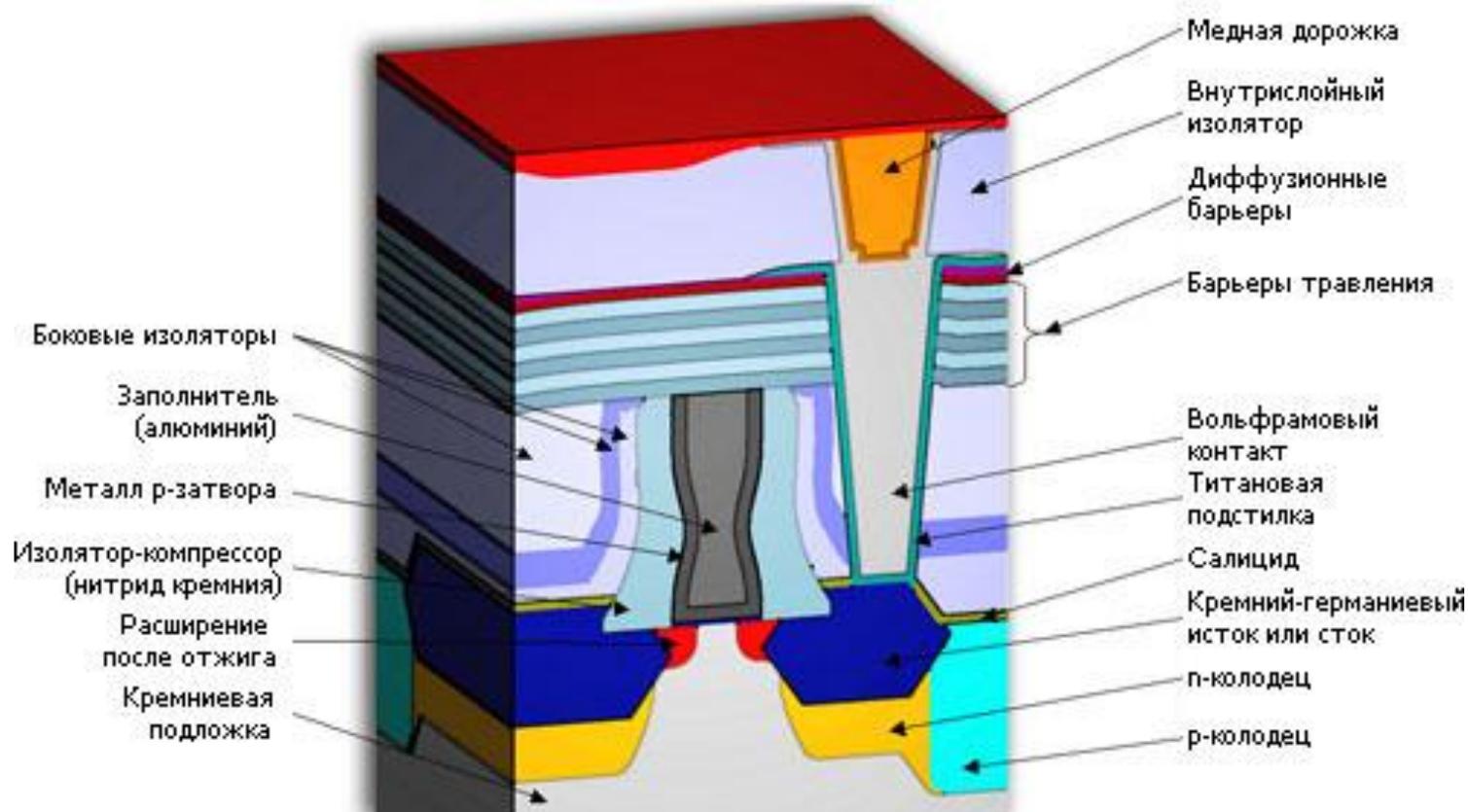
Сравнение 65-нм и 32-нм техпроцессов



В транзисторах 65-нм техпроцесса (слева) используются двунаправленные дорожки (вертикаль и горизонталь) и переменные размеры затворов и их шагов. Для 32-нм техпроцесса (справа) все это уже невозможно

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Результат



Устройство 45-нм р-канального транзистора (Intel)

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

45-нм технологический процесс

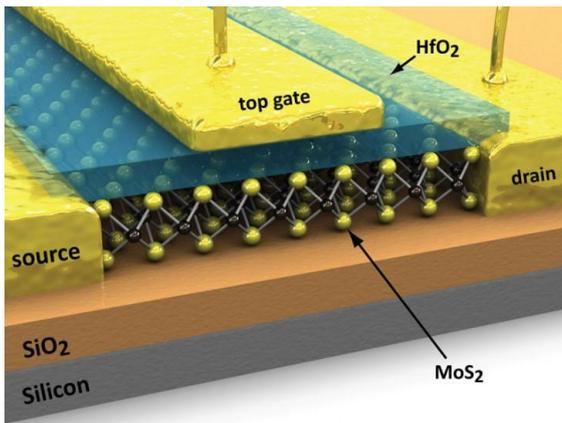
- сухая литография (193 нм, двойное шаблонирование) на цельной пластине Si
- длина затвора - 35 нм (как в 65-нм техпроцессе), шаг затвора - 160 нм без (на 27% меньше) и 200 нм с изоляторами (на 9% меньше, чем в 65-нм техпроцессе)
- металлический затвор осаждается последним
- спрямление углов затвора за счет использования двух видов фоторезиста
- эквивалентная толщина «high-k» изолятора - 1 нм
- 30% легирование Ge стока и истока для p-канальных транзисторов (увеличение подвижности дырок и частоты на 51%)
- использование только сонаправленных по всему чипу каналов
- десятислойные соединения (со 2-го слоя - Cu) с изолятором из $\text{SiO}_2\text{:C}$, включая слой вольфрама (на истоках и стоках), служащего диффузионным барьером
- четные слои металла параллельны каналам, нечетные - перпендикулярны
- последний (самый толстый) слой металла - распределитель тепла по площади всего кристалла
- широкое использование «фиктивных» структур (дорожек, затворов и т.д.) для выравнивания локальной плотности и теплопроводности
- бессвинцовая пайка кристалла в корпус

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Перспективные полупроводники



Арсенид галлия (GaAs) - полупроводник, третий по масштабам использования после Si и Ge. Запрещенная зона 1.424 эВ (300 К). Применяется в сверхвысокочастотных интегральных схемах и транзисторах, туннельных диодах, светодиодах, лазерных диодах, фотоприемниках и т.д.



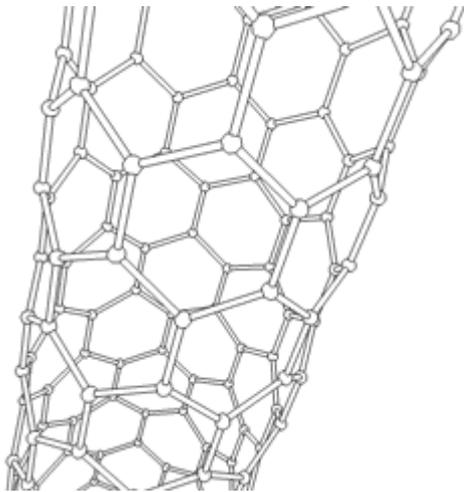
Фосфид индия (InP) - прямозонный полупроводник с шириной запрещенной зоны 1.34 эВ (300 К). Используется для создания сверхвысокочастотных транзисторов и диодов. По высокочастотным свойствам превосходит GaAs

Молибденит (MoS_2) - мягкий свинцово-серый минерал. Полупроводник, применявшийся в радиотехнике для изготовления детекторов. Недавно появились сообщения о создании транзисторов на его основе и первого чипа

Молибденит и транзистор на его основе

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Углеродные наноструктуры

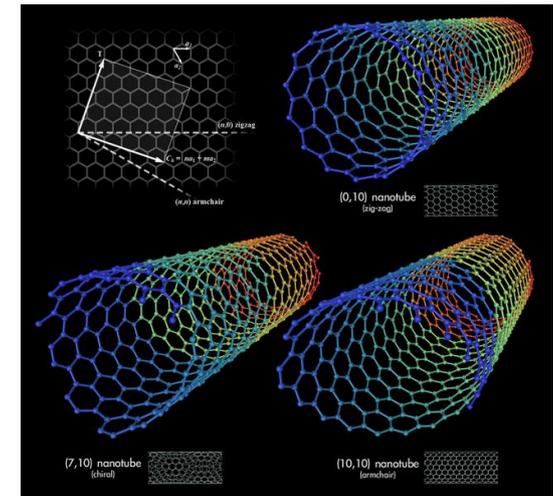


Углеродная нанотрубка

Углеродные нанотрубки - длинные цилиндрические структуры (диаметр от одного до нескольких десятков нанометров, длина до нескольких сантиметров), состоящие из одной или нескольких свернутых в трубку гексагональных графитовых плоскостей и заканчивающиеся обычно полусферой, которая может рассматриваться как половина молекулы фуллерена

В зависимости от диаметра углеродные трубки проявляют металлические или полупроводниковые свойства.

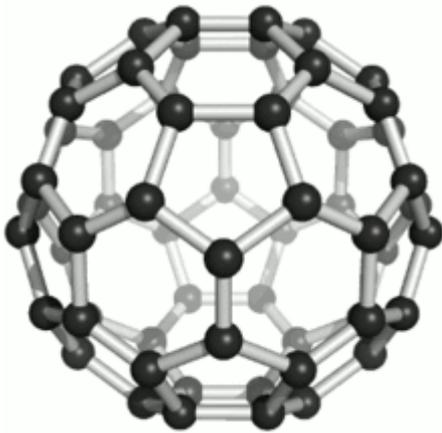
Возможные применения в микроэлектронике: диоды, транзисторы, нанопровода, наноэлектроды (катоды SED), прозрачные проводящие поверхности, оптоэлектроника и т.д.



Типы нанотрубок

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Углеродные наноструктуры



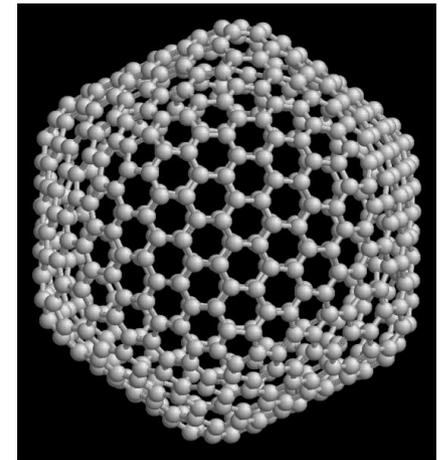
Фуллерен C_{60}

Фуллерены - класс молекулярных соединений, являющихся аллотропными формами углерода и представляющих собой выпуклые замкнутые многогранники, составленные из четного числа трехкоординированных атомов углерода

1996 - Крото, Смолли и Керлу, Нобелевская премия по химии за открытие фуллеренов

Кристаллы фуллерена - полупроводники с шириной запрещенной зоны ~ 1.5 эВ. В микроэлектронике их главное преимущество по сравнению с кремнием - малое время релаксации фотоотклика (единицы нс).

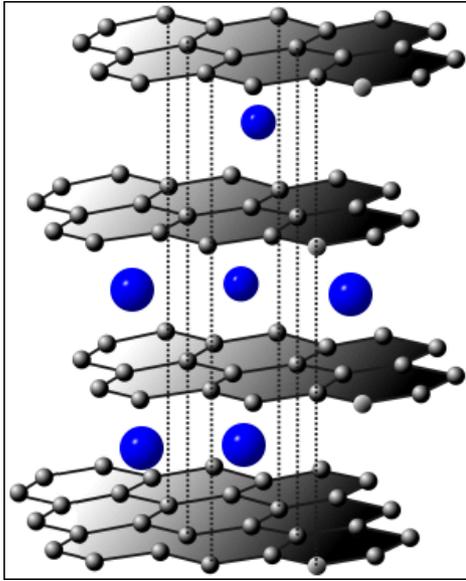
Наиболее перспективно использование молекул фуллерена в качестве самостоятельных наноразмерных устройств



Фуллерен C_{540}

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Углеродные наноструктуры

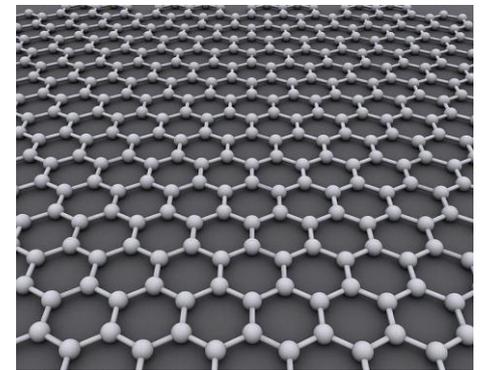


Графит

Максимальная (среди известных материалов) подвижность электронов делает графен одним из самых перспективных материалов для наноэлектроники и потенциальную замену кремния в интегральных микросхемах

Графен - двумерная аллотропная модификация углерода, образованная слоем атомов углерода толщиной в один атом. Атомы слоя упорядочены в гексагональную двумерную кристаллическую решетку, которую представляет собой одну плоскость графита, отделенную от объемного кристалла

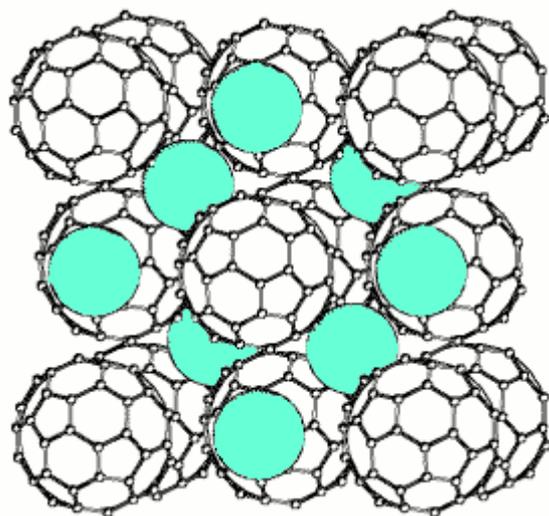
2010 - А.К. Гейм и К.С. Новоселов, Нобелевская премия по физике за «передовые опыты с 2D материалом - графеном»



Графен

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Молекулярные кристаллы

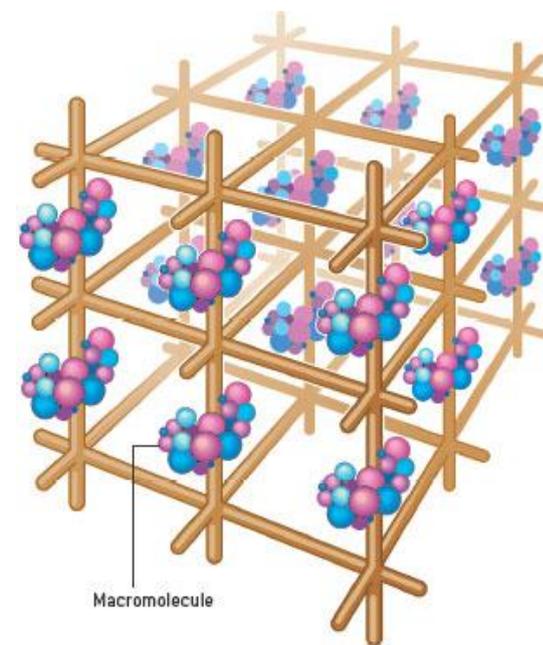


Молекулярный кристалл - кристалл, построенный из молекул. Молекулы связаны между собой слабыми Ван-дер-Ваальсовскими силами, внутри же молекул между атомами действует гораздо более прочная ковалентная связь

Примеры молекулярных кристаллов

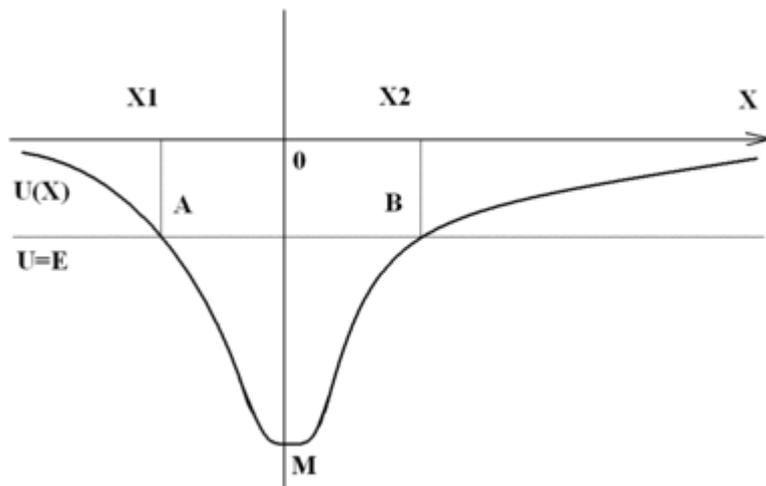
Большинство молекулярных кристаллов - это кристаллы органических соединений. К этому же классу относятся и кристаллы полимеров, белков, нуклеиновых кислот.

Большинство молекулярных кристаллов – диэлектрики, Однако некоторые, например, полимеры - полупроводники



Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Устойчивые одно- и многоэлектронные состояния



Потенциальная яма

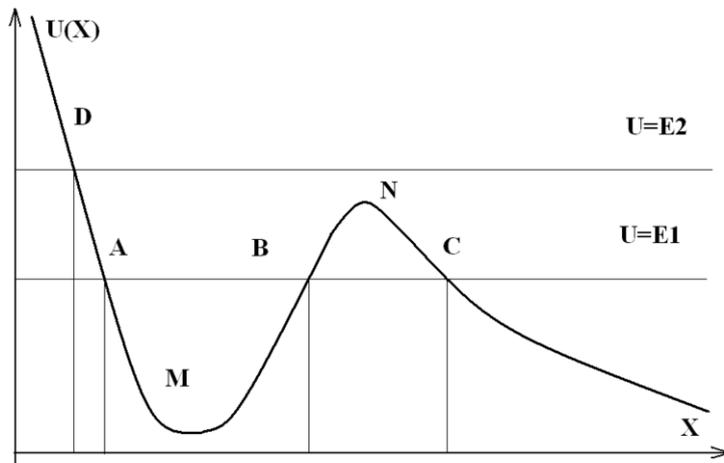
Потенциальная яма - область пространства, где присутствует локальный минимум потенциальной энергии частицы.

При отклонении частицы от точки, соответствующей минимуму потенциальной энергии возникает сила, направленная в противоположную отклонению сторону.

Если частица подчиняется законам квантовой механики, то даже несмотря на недостаток энергии она с определённой вероятностью может покинуть потенциальную яму (явление туннельного эффекта)

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Устойчивые одно- и многоэлектронные состояния



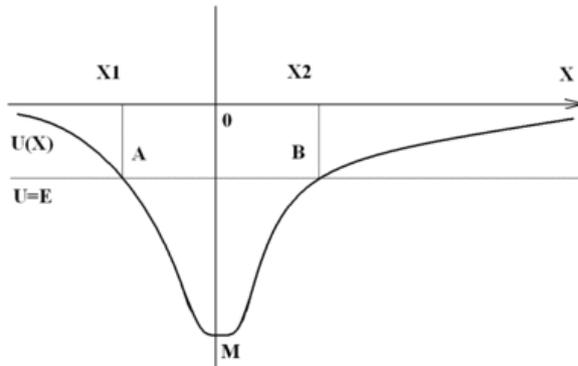
Потенциальный барьер

Потенциальный барьер - область пространства, разделяющая две другие области с различными или одинаковыми потенциальными энергиями. Характеризуется «высотой» - минимальной энергией классической частицы, необходимой для преодоления барьера

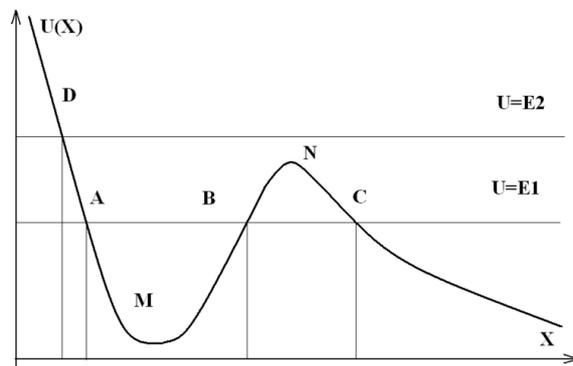
Если частица подчиняется квантовым законам, то даже несмотря на недостаток энергии она с определенной вероятностью может преодолеть потенциальный барьер (явление туннельного эффекта)

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Предельные размеры, энергозатраты и выделение тепла



Потенциальная яма



Потенциальный барьер

Минимальный размер потенциальной ямы определяется предельной локализацией частицы, которую можно оценить по периоду кристаллической решетки. Поскольку в современных системах на бит информации приходится > 100 частиц, предельный размер на бит информации - 4-5 периодов решетки

Минимальная глубина потенциальной ямы (высота потенциального барьера) определяется средней энергией теплового возбуждения частицы ($3/2 kT$), которой должно быть недостаточно для покидания ямы

Это же определяет минимальные затраты энергии ($\sim 10^{-17}-10^{-18}$ Дж) и выделение тепла при перезаписи одного бита информации

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

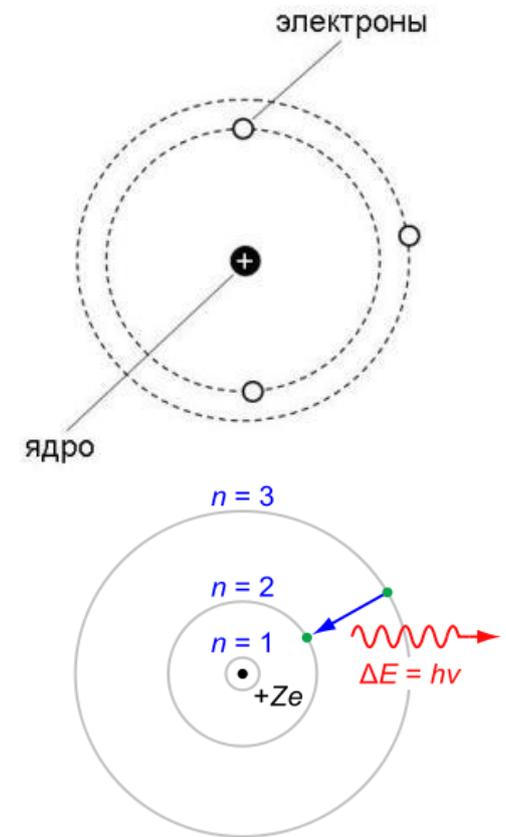
Квантовая механика



Нильс Бор

Основа модели атома Нильса Бора (1913) – классическая планетарная модель атома Резерфорда

Бор постулировал, что электроны в атоме могут двигаться только по определенным (стационарным) орбитам, находясь на которых они вопреки классической физике не излучают. Излучение и поглощение происходят только в момент перехода с одной орбиты на другую



Стационарные состояния и электронные переходы

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Квантовая механика и принцип суперпозиции

Основа квантовой механики – уравнение Шредингера, которое описывает эволюцию волновой функции квантовой системы

$$i\hbar \frac{\partial |\Psi\rangle}{\partial t} = \hat{H}|\Psi\rangle,$$

Из линейности оператора Гамильтона следует, что

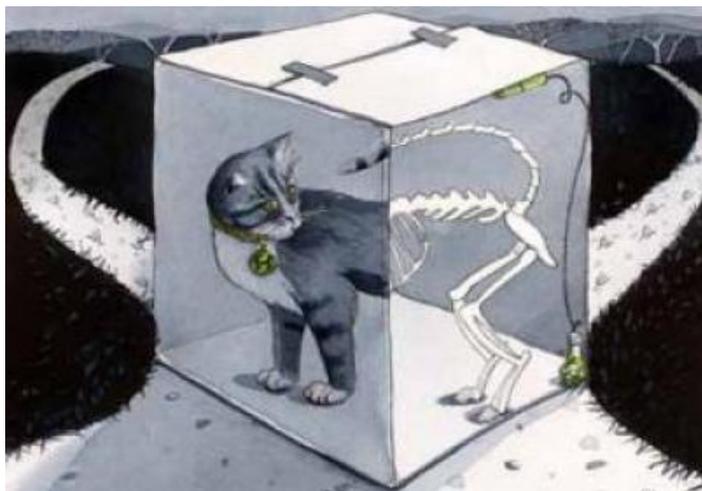
$$\hat{H}(a|\Psi_1\rangle + b|\Psi_2\rangle) = a\hat{H}|\Psi_1\rangle + b\hat{H}|\Psi_2\rangle,$$

Квантовая (когерентная) суперпозиция - суперпозиция состояний, которые не могут быть реализованы одновременно (с классической точки зрения – взаимоисключающих состояний).

Если Ψ_1 и Ψ_2 описывают состояния квантовой системы, то их суперпозиция $\Psi_3 = c_1\Psi_1 + c_2\Psi_2$ также описывает состояние системы. Причем если измерение физической величины \hat{f} в состоянии $|\Psi_1\rangle$ дает результат f_1 , а в состоянии $|\Psi_2\rangle$ - результат f_2 , то измерение в состоянии $|\Psi_3\rangle$ даст результат f_1 или f_2 с вероятностями $|c_1|^2$ и $|c_2|^2$ соответственно

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Кот Шредингера

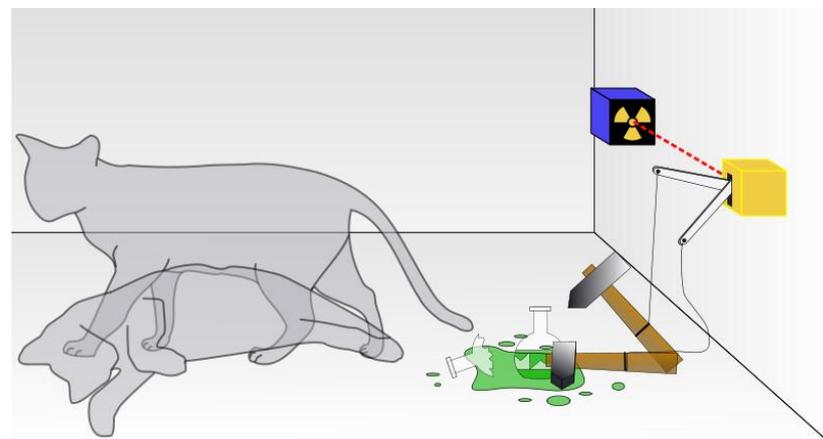


В ящик помещен кот и механизм с радиоактивным ядром и емкостью с ядовитым газом. При распаде ядра открывается емкость и кот умирает.

Пока ящик закрыт состояние ядра - суперпозиция распавшегося и не распавшегося состояний, а кот жив и мертв одновременно. Если ящик открыть, мы увидим какое-то одно состояние - «ядро распалось, кот мёртв» или «ядро не распалось, кот жив»

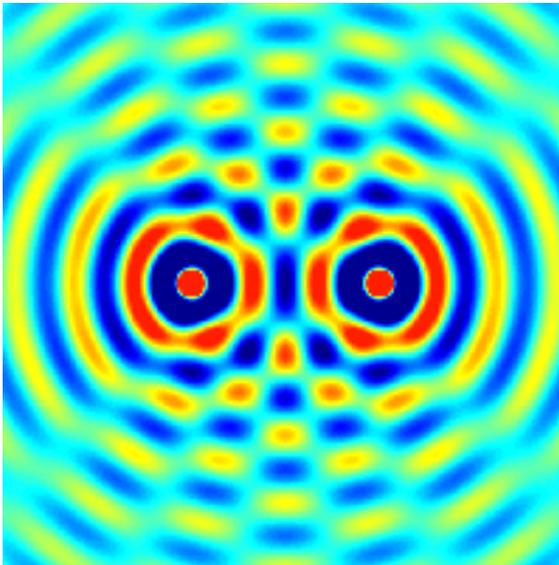
Когда система выбирает это состояние ?

Цель эксперимента - показать, что квантовая механика неполна без дополнительных правил, которые указывают, при каких условиях происходит коллапс волновых функций



Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

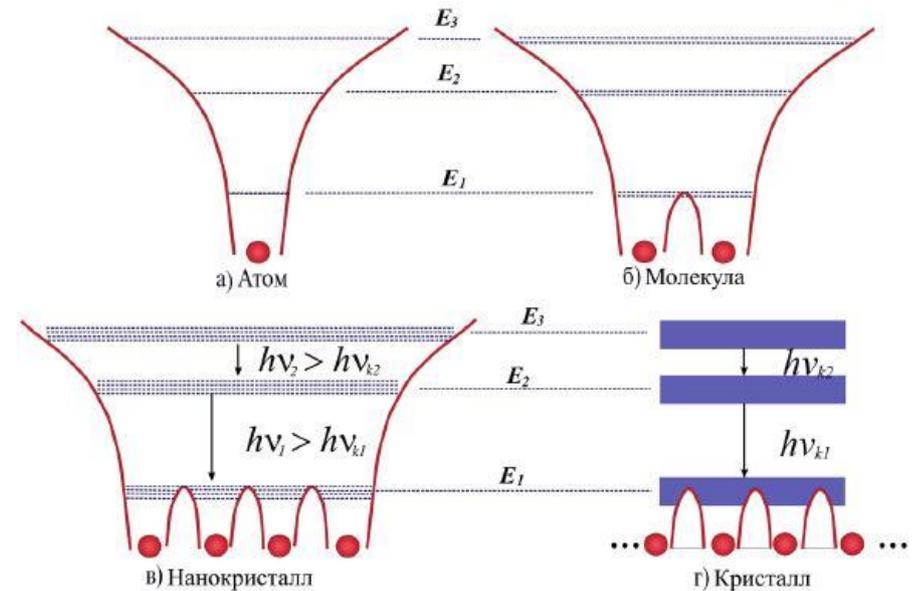
Когерентность состояний



Интерференция двух точечных источников

По отношению к волне это означает, что в разных точках осцилляции происходят синхронно, то есть разность фаз между двумя точками не зависит от времени

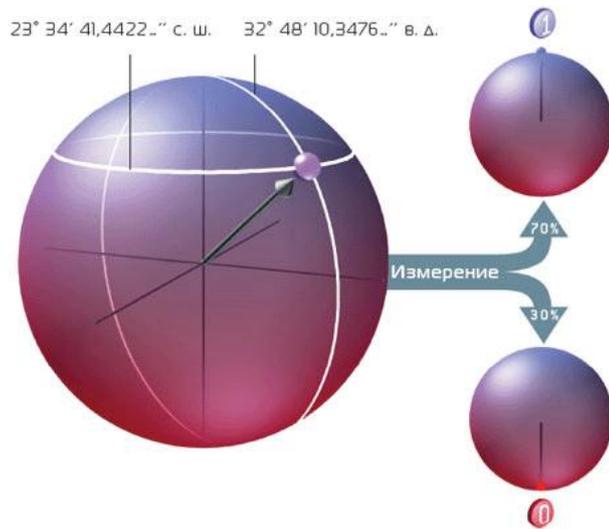
Когерентность – коррелированность (согласованность) нескольких колебательных или волновых процессов во времени, проявляющаяся при их сложении. Колебания когерентны, если разность их фаз постоянна во времени и при сложении колебаний получается колебание той же частоты



Коллективизация состояний

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Биты и кубиты

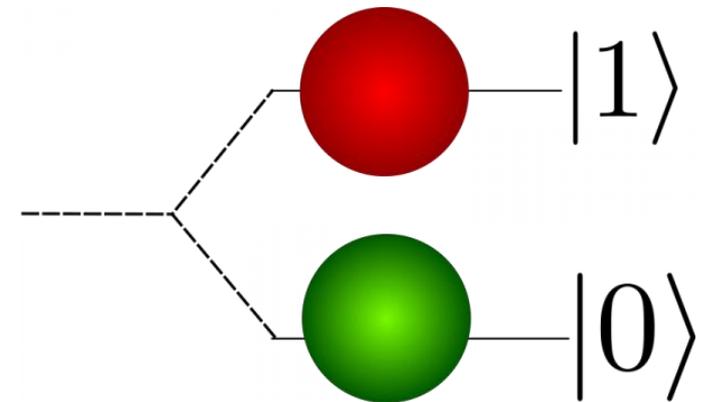


Кубит (quantum bit) - квантовый разряд или наименьший элемент для хранения информации в квантовом компьютере.

Как и бит, кубит допускает два собственных состояния, обозначаемых $|0\rangle$ и $|1\rangle$ (обозначения Дирака), но при этом может находиться и в их суперпозиции, т.е. в состоянии $A * |0\rangle + B * |1\rangle$, где A и B любые комплексные числа, удовлетворяющие условию нормировки $|A|^2 + |B|^2 = 1$

При любом измерении состояния кубита он случайно переходит в одно из своих собственных состояний.

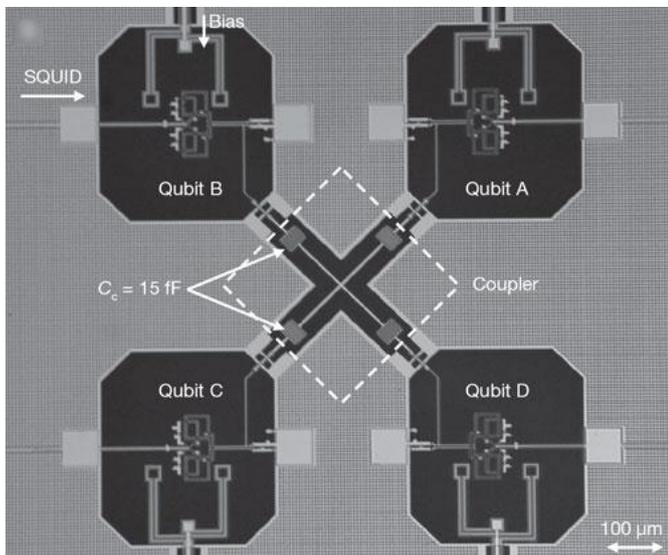
Вероятности перехода в эти состояния равны, соответственно, $|A|^2$ и $|B|^2$, т.е. косвенно, по наблюдениям за множеством кубитов, мы все-таки можем судить об исходном состоянии



Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

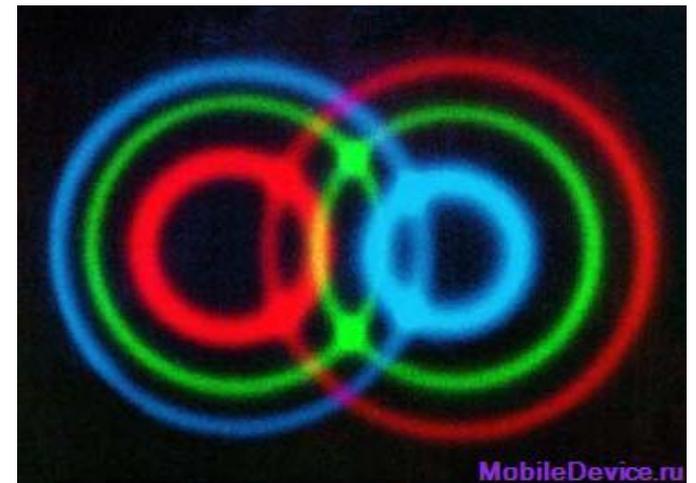
Биты и кубиты

Кубиты могут быть связаны друг с другом, т.е. на них может быть наложена ненаблюдаемая связь, выражающаяся в том, что при всяком измерении над одним из нескольких кубитов, остальные меняются согласованно с ним. Таким образом, совокупность перепутанных между собой кубитов может интерпретироваться как заполненный квантовый регистр



Трехкубитная запутанность

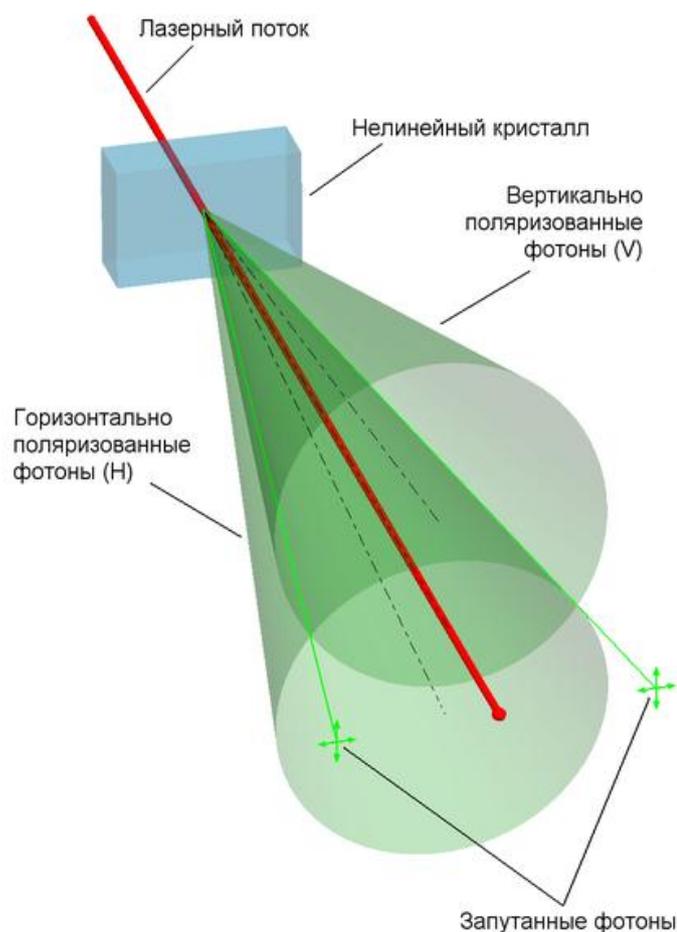
Как и отдельный кубит, квантовый регистр гораздо более информативен. Он может находиться не только во всевозможных комбинациях составляющих его битов, но и реализовывать всевозможные тонкие зависимости между ними.



Трехкубитная запутанность

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Квантовая перепутанность



Квантовая перепутанность (запутанность) – квантовомеханическое явление, при котором квантовые состояния двух или большего числа объектов оказываются взаимозависимыми. Такая взаимозависимость сохраняется, даже если эти объекты разнесены в пространстве за пределы любых известных взаимодействий, что находится в логическом противоречии с принципом причинности

Источник перепутанных фотонов - нелинейный кристалл, в котором за счет спонтанного параметрического рассеяния фотонов определенной частоты рождаются два конуса излучения разной поляризации, несущие пары перепутанных фотонов (бифотонов)

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Запрет на клонирование



*А на квантовом уровне клонов
быть не может*

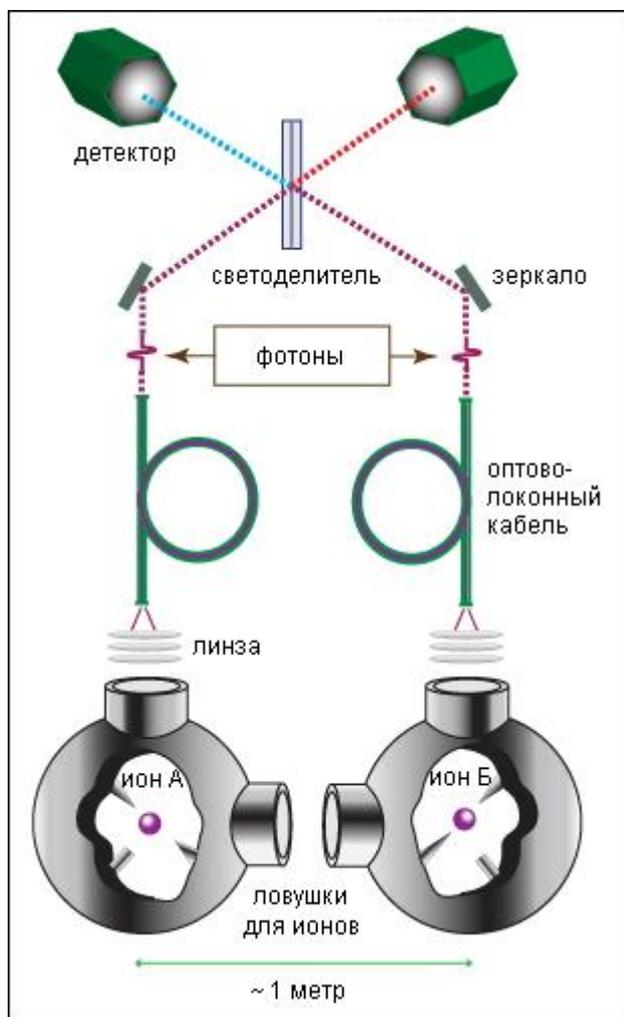
Теорема о запрете клонирования (1982) - утверждение о невозможности создания идеальной копии произвольного неизвестного квантового состояния - имеет огромное значение в квантовой теории информации.

Состояние одной квантовой системы можно перепутать с состоянием другой. Результат этого не является клонированием, поскольку полученное состояние нефакторизуемо (не описывается на языке состояний подсистем)

Клонирование же - это такая операция, в результате которой создается состояние, являющееся тензорным произведением идентичных состояний подсистем

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Квантовая телепортация

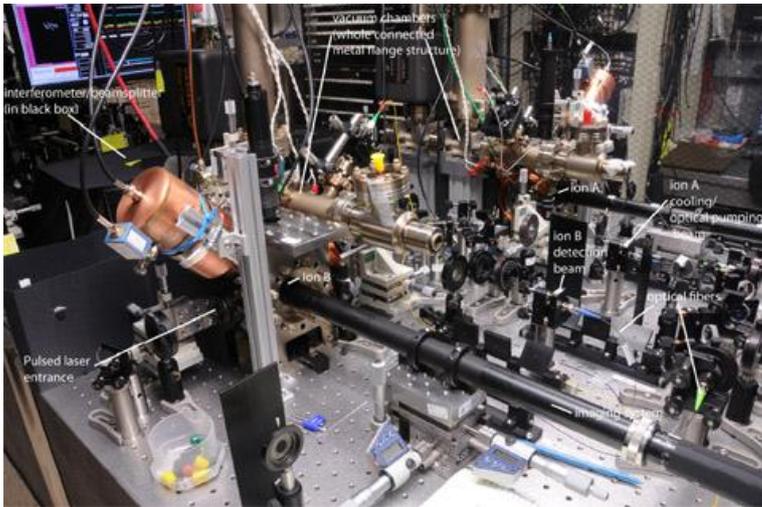


Квантовая телепортация (1993) - передача квантового состояния на расстояние при помощи разъединенной в пространстве перепутанной пары и классического канала связи. При такой передаче состояние разрушается в точке отправления при проведении измерения и воссоздается в точке приема.

При квантовой телепортации энергия или вещество не передаются на расстояние, но обязательным этапом является передача информации между точками отправления и приема по классическому (не квантовому) каналу. Такая передача не может осуществляться быстрее, чем со скоростью света, поэтому принципы современной физики при квантовой телепортации не нарушаются

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Квантовая телепортация



2009 - Телепортация квантового состояния иона на расстояние 1 метр

- 1997 - экспериментальная реализация квантовой телепортации поляризованного состояния фотона
- 2004 - телепортация квантового состояния атома (ионов кальция и бериллия)
- 2006 - телепортация между объектами различной природы - квантами лазерного излучения и атомами цезия
- 2009 - квантовое состояние иона телепортировано на один метр
- 2010 - квантовое состояние фотона передано на расстояние 16 километров

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Квантовая криптография



В. Гейзенберг

Метод квантовой криптографии опирается на принципиальную неопределенность поведения квантовой системы, в которой невозможно измерить один параметр (например, импульс), не исказив другой (координату). Это фундаментальное свойство известно как принцип неопределенности Гейзенберга (1927)

Квантовая криптография - метод защиты коммуникаций, основанный на принципах квантовой физики. Секретность обеспечивается тем, что информация переносится с помощью квантовых объектов (например, электронами или фотонами). При этом подслушивание может рассматриваться, как измерение определенных характеристик этих объектов

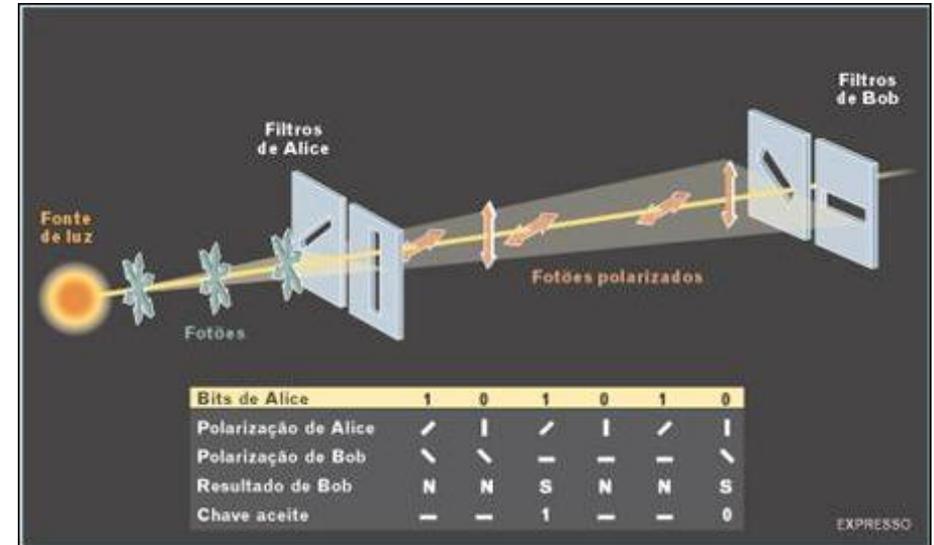


Квантовый канал связи

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Квантовая криптография

Используя квантовые явления, можно спроектировать и создать такую систему связи, которая всегда может обнаруживать подслушивание, поскольку любая попытка измерения взаимосвязанных параметров в квантовой системе вносит в нее нарушения, разрушая исходные сигналы

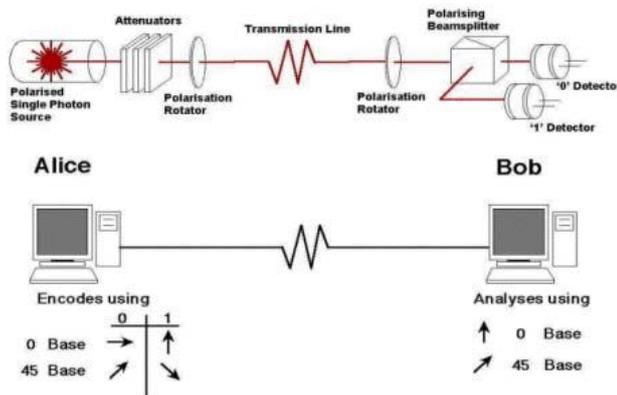
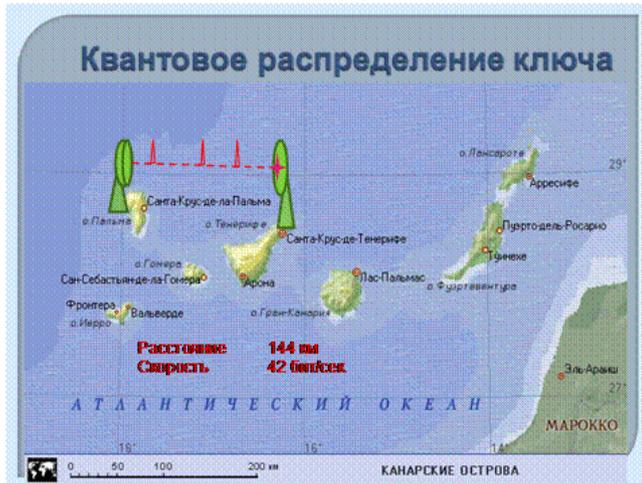


Алиса передает	1	0	1	0	1	0
Алисины фильтры	/	\	/	\	/	\
Фильтры Боба	\	\	—	—	—	\
Результат Боба	N	N	Y	N	N	Y
Ключ	—	—	1	—	—	0

Схема формирования ключа и ее практическая реализация

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Квантовая криптография



Передача квантового ключа

- 1989 - IBM, первая работающая система (квантовый канал - воздушный канал длиной 32 см)
- 90-е - GAP-Optique, квантовый канал на оптоволокне длиной 23 и 67 км (уровень ошибок < 1,4 %)
- 90-е - Mitsubishi Electric, передача квантового ключа на расстояние 87 км (скорость 1 Байт/сек)
- 90-е - В Национальной лаборатории Лос-Аламос на линии связи длиной 48 км достигнута скорость в несколько десятков Кбит/сек
- 2001 - с использованием светодиода на «квантовой точке» достигнута скорость 75 Кбит/сек
- 2003 - США на канале длиной 1 км уровень ошибки снижен до 0,5 % при скорости связи 5 Кбит/с
- 2007 - Швейцария, выборы, результаты голосования передаются по квантовым сетям
- 2011 - Токио, телеконференция на расстоянии 45 км на существующих оптоволоконных линиях

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Квантовый компьютер



Ричард Фейнман

Квантовый компьютер - вычислительное устройство, которое работает на основе квантовой механики и принципиально отличается от классических компьютеров.

Для вычислений квантовый компьютер использует не обычные (классические) алгоритмы, а квантовые алгоритмы, реализуемые в процессах квантовой природы. За счет этого используются квантовый параллелизм и квантовая запутанность



Схема квантового компьютера

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Квантовый компьютер



Ричард Фейнман

Квантовый параллелизм - главное преимущество квантовых вычислений по сравнению с цифровыми классическими. Например, имея систему (регистр) из двух кубитов мы одновременно оперируем со всеми возможными ее состояниями: 00, 01, 11, 10. Это соответствует 2^2 т.е. четырем вычислительным потокам. 16 кубитов позволят реализовать уже 2^{16} т.е. 65 536 таких потоков



Схема квантового компьютера

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Квантовые алгоритмы



Ричард Фейнман



Питер Шор

Квантовый алгоритм - алгоритм, предназначенный для выполнения на квантовом компьютере.

Квантовый алгоритм - классический алгоритм, который задает последовательность унитарных операций с указанием, над какими именно кубитами их надо совершать. Алгоритм задается либо в виде словесного описания команд, либо с помощью их графической записи в виде системы вентилей (quantum gate array).

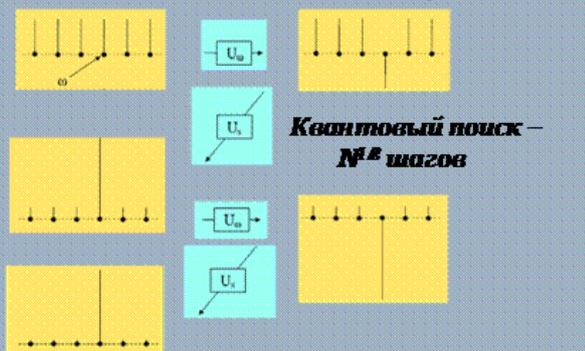
Результат работы алгоритма всегда носит вероятностный характер. Однако за счет сравнительно небольшого увеличения числа операций в алгоритме вероятность получения правильного результата может быть сделана сколь угодно близкой к единице

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Квантовые алгоритмы

Алгоритм Гровера: Поиск квантовой иголки в квантовом стоге сена

Классический поиск в базе из N элементов – в среднем $N/2$ шагов



Квантовый поиск – $N^{\frac{1}{2}}$ шагов

Тип задач, решение которых ускоряется при использовании квантовых алгоритмов - задачи перебора, которые делят на 2 группы:

1. Задачи моделирования динамики сложных систем (Фейнман) схема Шора и алгоритм Залки-Визнера
2. Задачи, сводящиеся к перебору вариантов:
 - 2.1. Общий случай – схема и алгоритм Гровера
 - 2.2. Задачи поиска скрытых периодов - схема и алгоритм Шора

Алгоритм Шора

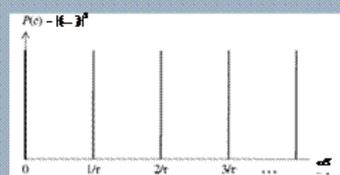
Задача факторизации $S = p \cdot q$ $p = ?$, $q = ?$

Классический алгоритм $\exp[2n^{2/3}(\log n)^{2/3}]$ шагов, $n \approx \log_2 S$

Квантовый алгоритм $\sim 300n^2$

$$\sum_{c=0}^{S-1} \left\{ \sum_{a=0}^{S-1} \exp\left(i \frac{2\pi ac}{S}\right) |c; f(a)\rangle \right\}$$

Функция $f(a)$ имеет период τ



Алгоритмы перебора вариантов

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

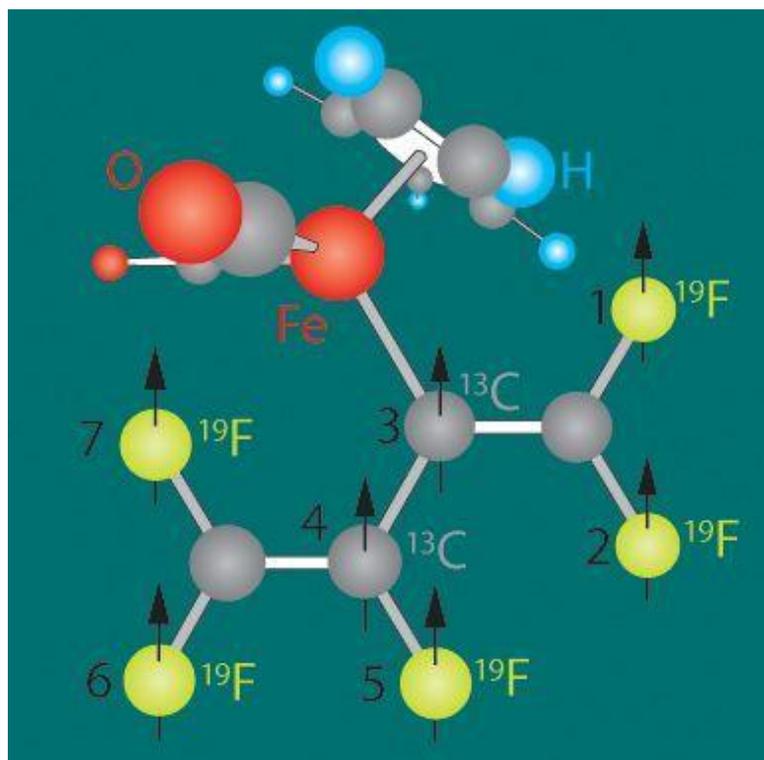
Реализация: ионные ловушки и ...

Предложено множество разных путей реализации квантовых компьютеров:

- метод импульсного ядерного магнитного резонанса в молекулярных жидкостях (ансамблевый квантовый компьютер)
- ионы в ловушках в вакууме
- ядерные спины примесных атомов P в монокристаллическом кремнии
- спины одиночных электронов в квантовых точках в 2D газе полупроводниковых гетероструктур
- атомы в резонаторах электромагнитного поля
- состояния связанных сверхпроводников (переход Джозефсона), отличающихся числом зарядов или фазой
- системы на линейных оптических элементах (делители пучка, поляризаторы, фазовращатели, интерферометры)

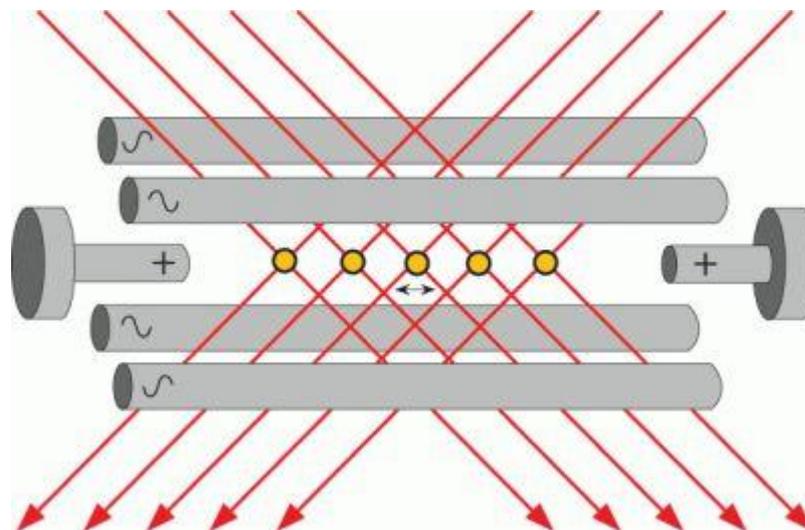
Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Реализация: ионные ловушки и ...



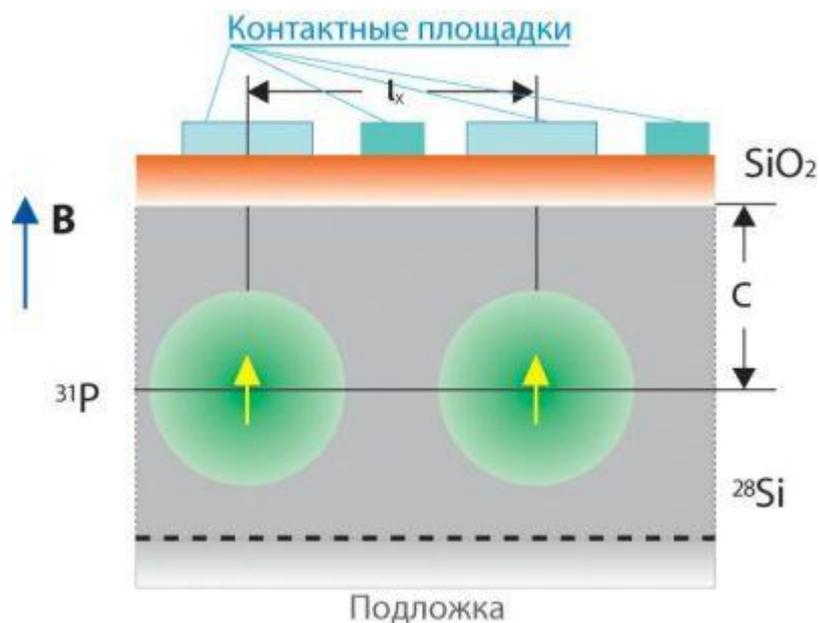
7-кубитовая молекула,
созданная в фирме IBM

Ионная ловушка как квантовый процессор. В линейной структуре благодаря взаимному отталкиванию ионы находятся на расстоянии ~20 мкм. Каждый ион адресуется парой лазерных лучей и представляет собой кубит



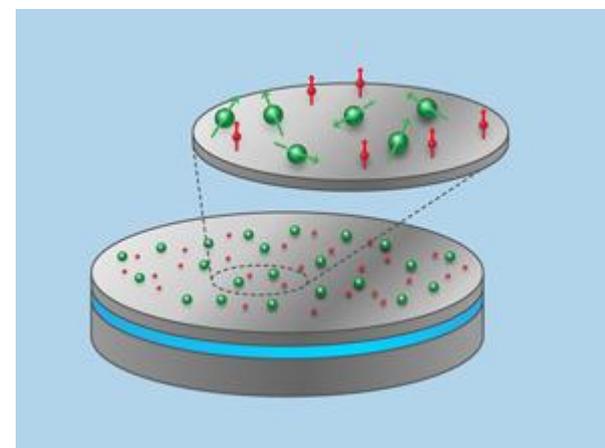
Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Реализация: ионные ловушки и ...



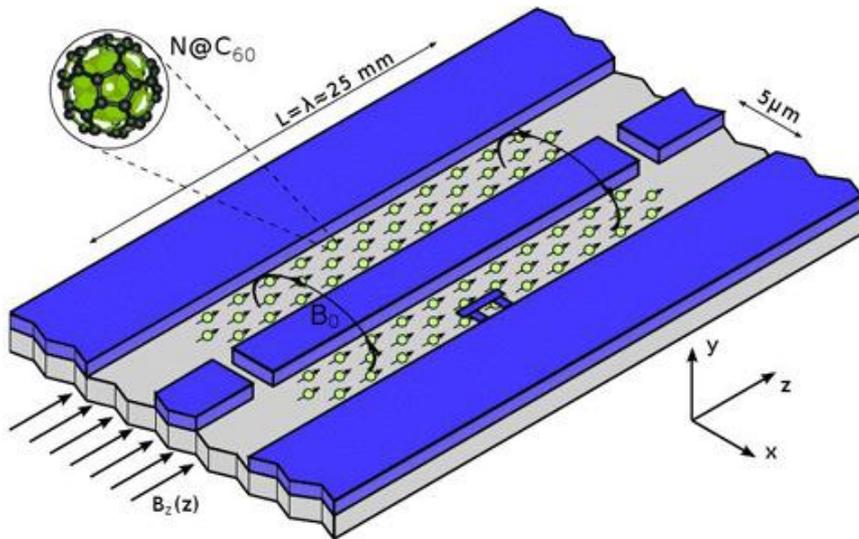
Две ячейки Кейна в матрице Si с ядерными спинами - кубитами атомов доноров (фосфор). При температурах < 1 К время сохранения исходных состояний квантового регистра очень велико (часы и дни)

Оптически контролируемые кубиты. Тонкая пленка Si наносится на кварцевую или алмазную подложку, после чего заполняется донорами: кубитами (красные частицы) и управляющими элементами (зеленые частицы)



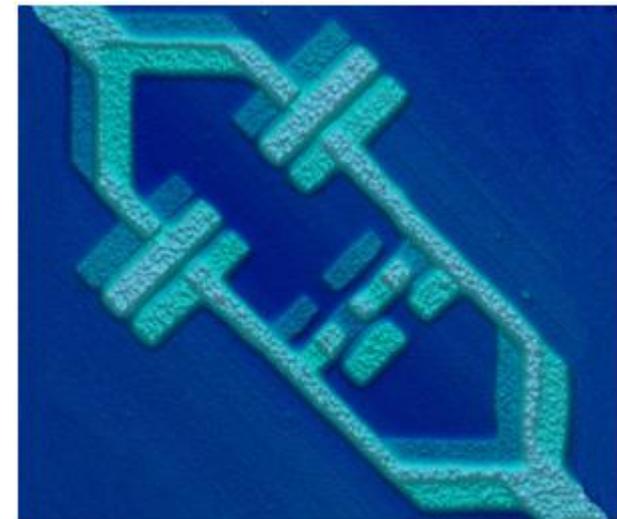
Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Реализация: ионные ловушки и ...



Сверхпроводниковый фазовый (поточковый) кубит, впервые реализованный в Делфтском университете

Схема еще одного устройства, в основе которого - дорожки, создающие микроволновый резонатор, внешние поля и множество частиц, несущих «согласованные» спины электронов



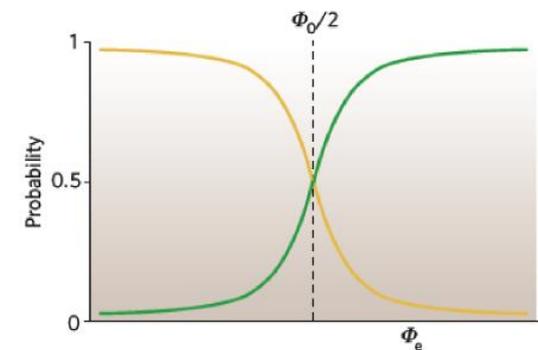
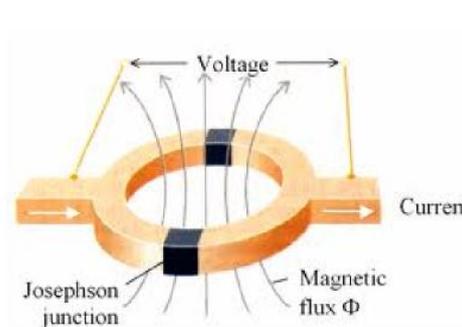
Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Реализация



D-Wave One

Джозефсоновский контакт с двумя диэлектрическими зазорами (слева) и вероятность изменения направления тока в зависимости от величины внешнего магнитного потока (справа)

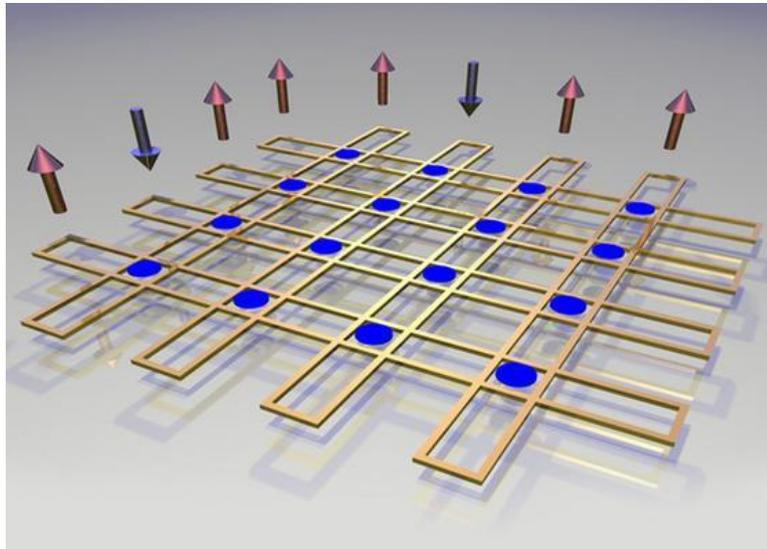


2011 - информация о создании канадской фирмой D-Wave первого в истории коммерческого квантового компьютера «D-Wave One».

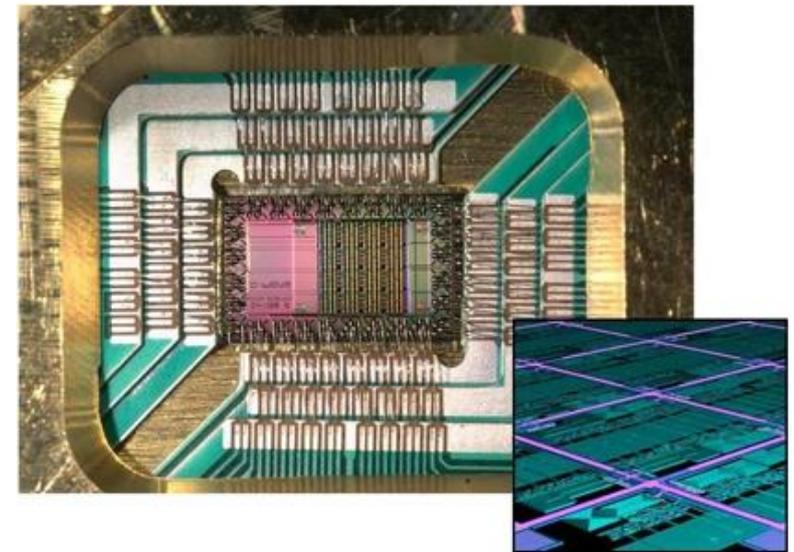
Этот компьютер со 128 кубитной архитектурой был продан американской военной компании Lockheed Martin за 10 миллионов долларов

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Реализация



128-ми кубитный чип от D-Wave Systems. Каждый кубит – крошечная петля из металла ниобия, находящегося в сверхпроводящем состоянии. По этой петле может курсировать незатухающий ток по или против часовой стрелки. Эти токи и соответствует базовым состояниям «0» и «1»



В процессоре 16 блоков по 8 кубитов в каждом. Система охлаждается до температуры в 10 мК для того, чтобы перевести все кубиты в сверхпроводящее состояние

Лекция 14. Перспективы развития ЭВМ

Желаю успешно сдать сессию