

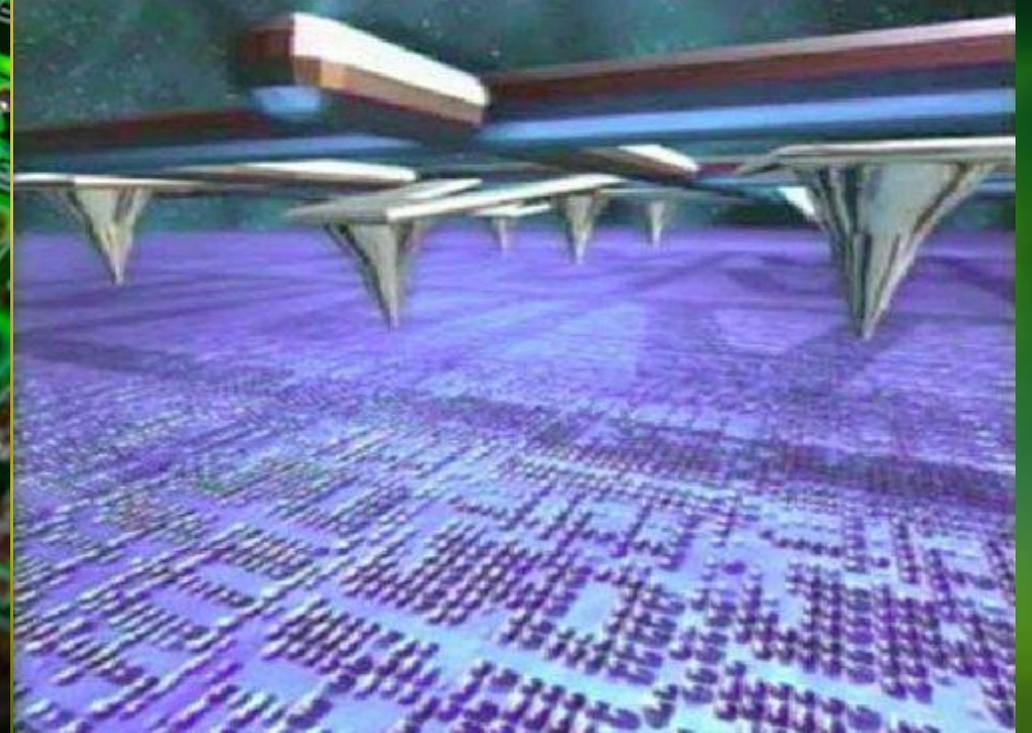
**На тему:**  
**«Развитие микро- и наноэлектронных  
технологий»**

**Фаюстов Анатолий Афанасьевич**  
**к.э.н., доцент кафедры**  
**управления инновациями**  
**Москва 2015**

# План:

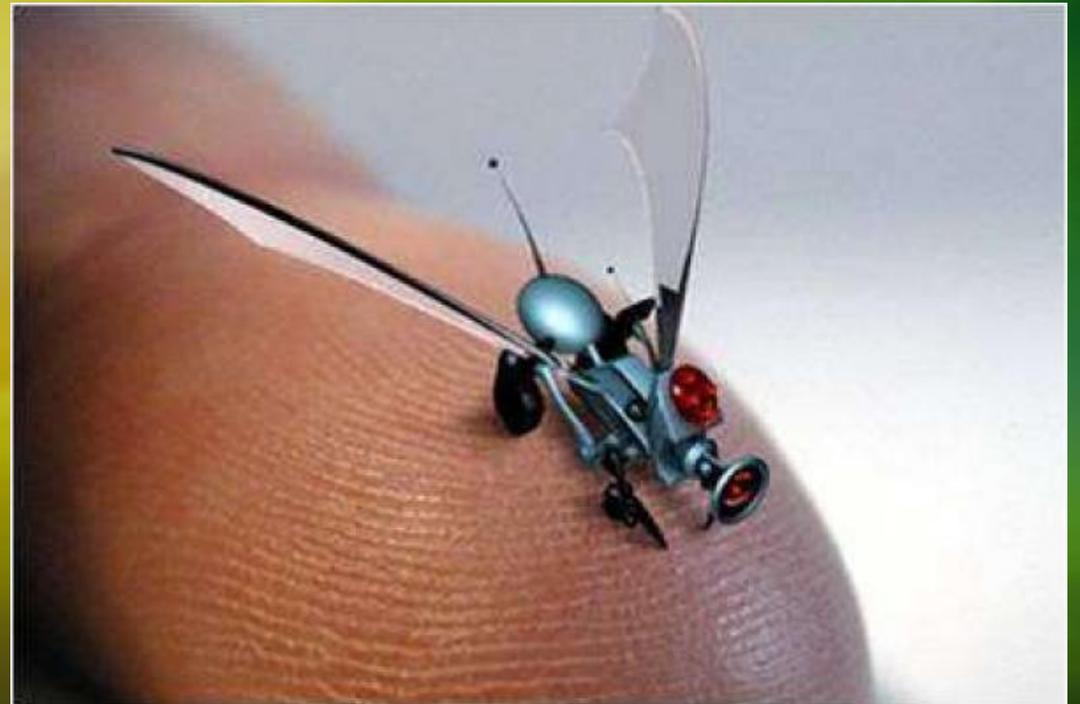
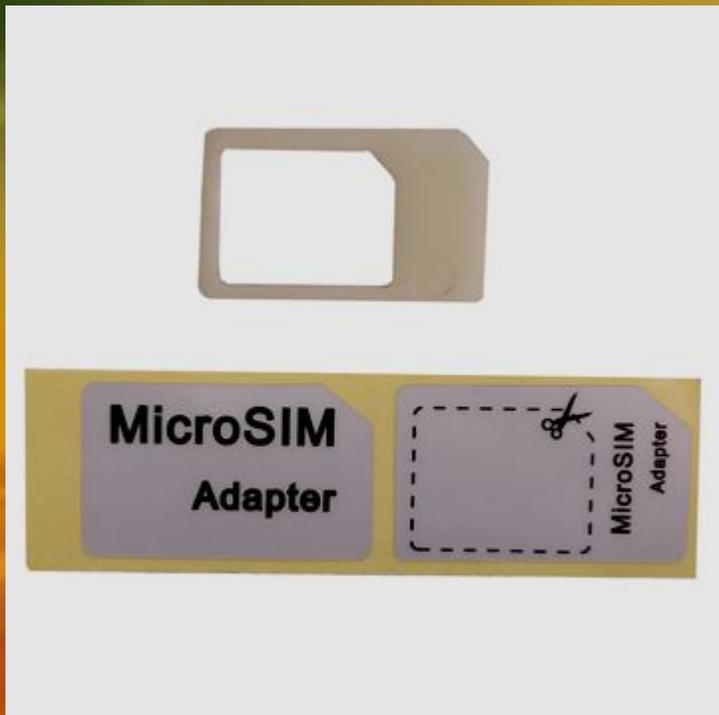
1. Общие сведения.
2. Развитие твердотельной электроники.
3. Истоки современной микроэлектронной технологии.
4. Повышение степени интеграции и новые технологии.

Характерная особенность современного естествознания – рождение новых, быстро развивающихся наук на базе фундаментальных знаний. К одной из таких наук относится сформировавшаяся в недрах физики микроэлектроника, перерастающая в последнее время в наноэлектронику.

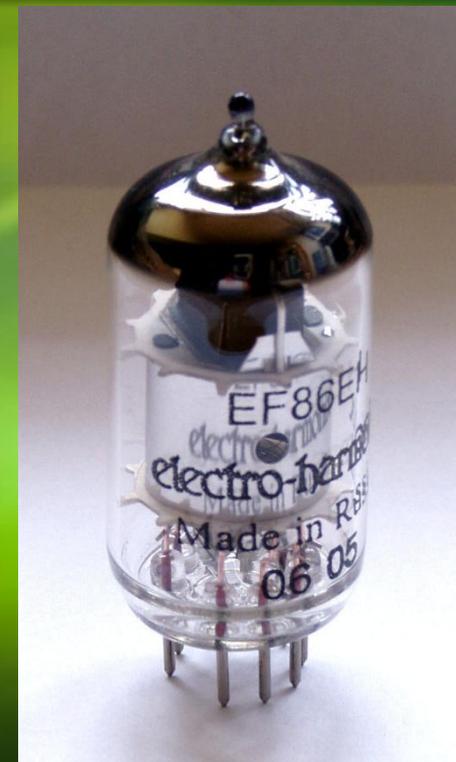


**Микро** происходит от греческого слова  $\mu\kappa\rho\acute{o}\varsigma$  (*микрос*) — *малый*.

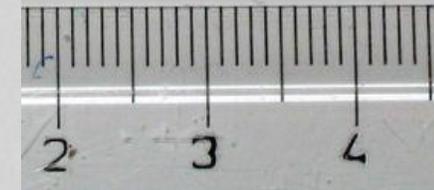
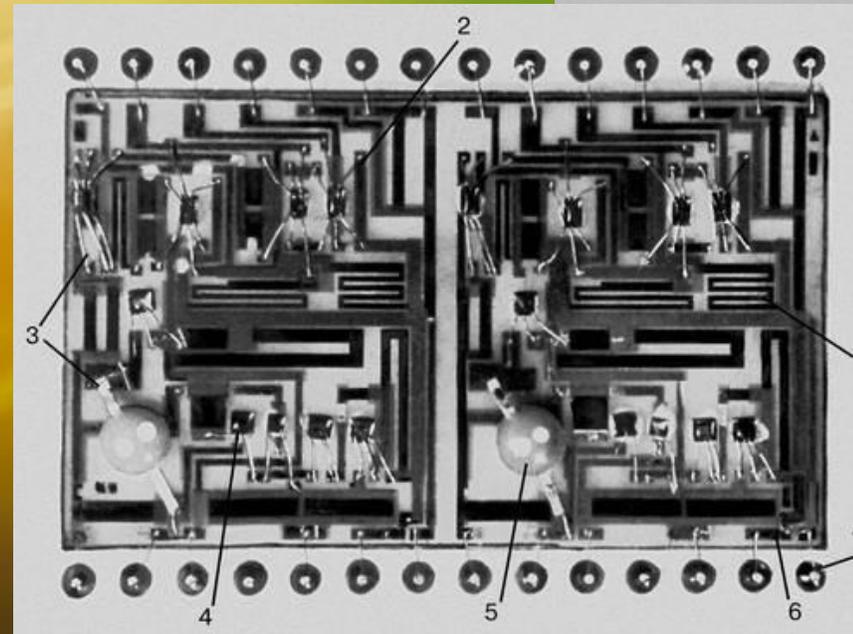
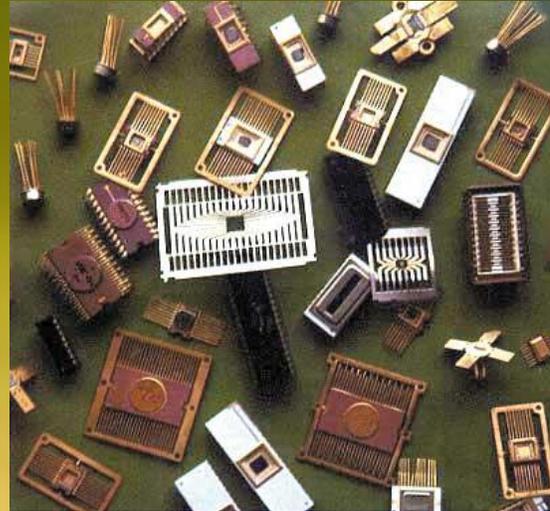
**Нанотехнология** — междисциплинарная область фундаментальной и прикладной науки и техники, имеющая дело с совокупностью теоретического обоснования, практических методов исследования, анализа и синтеза, а также методов производства и применения продуктов с заданной атомной структурой путём контролируемого манипулирования отдельными атомами и молекулами.



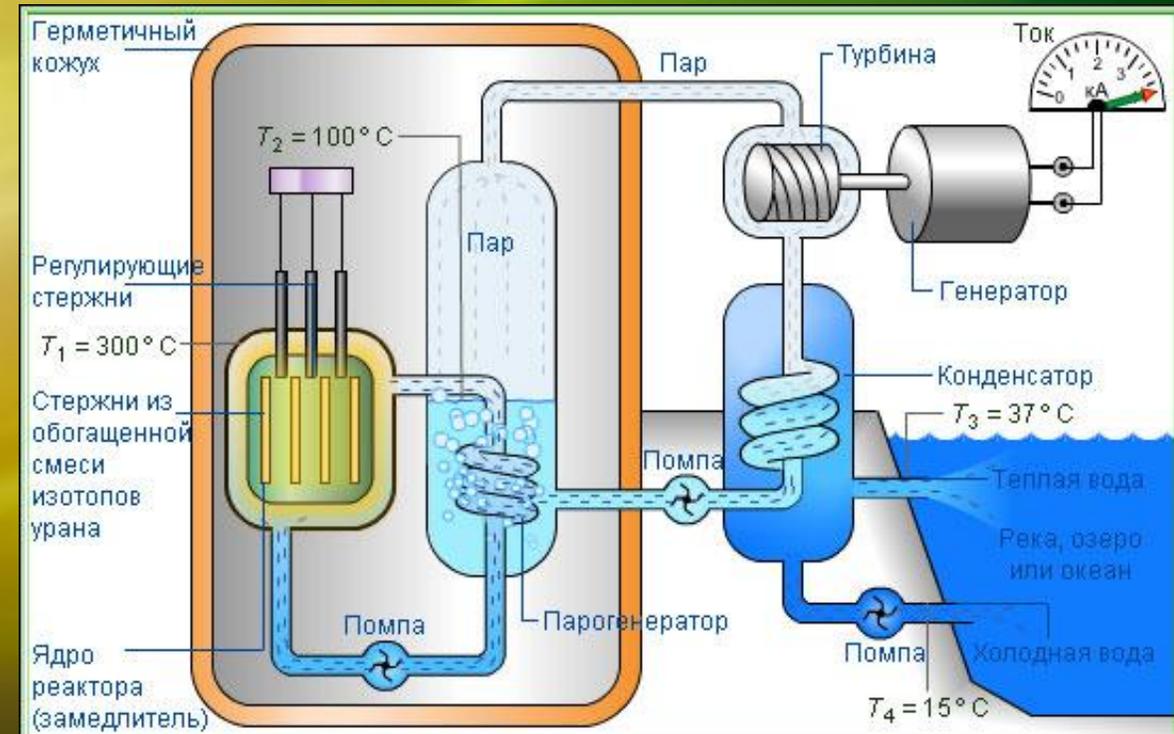
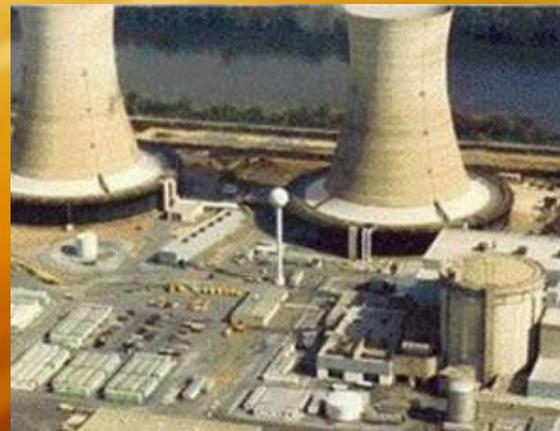
У микроэлектроники и наноэлектроники один общий корень – электроника. В соответствии со строгим определением электроника – наука о взаимодействии электронов с электромагнитными полями и о методах создания электронных приборов и устройств (вакуумных, газоразрядных, полупроводниковых), используемых для передачи, обработки и хранения информации. Возникла она в начале XX в. На ее основе были созданы электровакуумные приборы, в том числе и электронные лампы (диод, триод, тетрод, пентод и т. д.).



Основу электронной базы микроэлектроники составляют интегральные схемы, выполняющие заданные функции блоков и узлов электронной аппаратуры, в которых объединено большое число микроминиатюрных элементов и электрических соединений, изготовляемых в едином технологическом процессе. Микроэлектроника развивается в направлении уменьшения размеров содержащихся в интегральной схеме элементов (до  $0,1-1,0$  мкм), повышения степени интеграции (до  $10^6-10^7$  элементов на кристалл), плотности упаковки (до  $10^5$  элементов в  $1$  мм $^3$ ), а также использования различных по принципу действия приборов (опто-, акусто-, криоэлектронных, магниторезистивных и др.). В последнее время ведутся интенсивные работы по созданию интегральных схем, размеры элементов которых определяются нанометрами ( $10^{-9}$  м), т. е. постепенно набирает силу наноэлектроника – наиболее важное направление микроэлектроники, характеризующее современный этап развития естествознания.

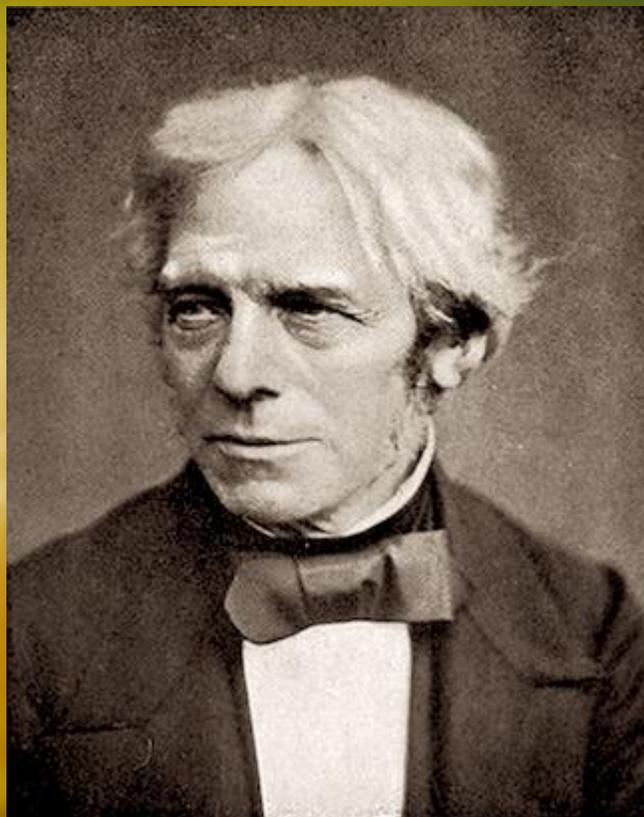


Разнообразные микроэлектронные приборы и устройства в различных формах исполнения нашли широкое применение практически во всех технических средствах, связанных с многими сферами деятельности человека. Достижения в микроэлектронике способствовали созданию космических кораблей и управляемых ядерных реакторов. Современная аудио- и видеоаппаратура с достаточно высоким качеством звучания и изображения – это тоже продукт микроэлектроники. На промышленной микроэлектронике базируется автоматизированное производство изделий, узлов, механизмов и машин для различных отраслей экономики. Элементная база многочисленных и разнообразных ЭВМ, включающих и персональные компьютеры, – это тоже микроэлектроника.



# Развитие твердотельной электроники

Эпоха развития твердотельной электроники имеет более чем столетнюю историю; она началась с возникших и долго необъяснимых физических загадок, так называемых «плохих» проводников. Еще в XIX в. выдающийся физик М. Фарадей столкнулся с первой загадкой – с повышением температуры электропроводность исследуемого образца возрастала по экспоненциальному закону. К тому времени было известно, что электрическое сопротивление многих проводников линейно увеличивается с ростом температуры. Спустя некоторое время французский физик А.С. Беккерель (1788–1878) обнаружил, что при освещении «плохого» проводника светом возникает электродвижущая сила – фото ЭДС – вторая загадка.



*М. Фарадей*



*А.С. Беккерель*

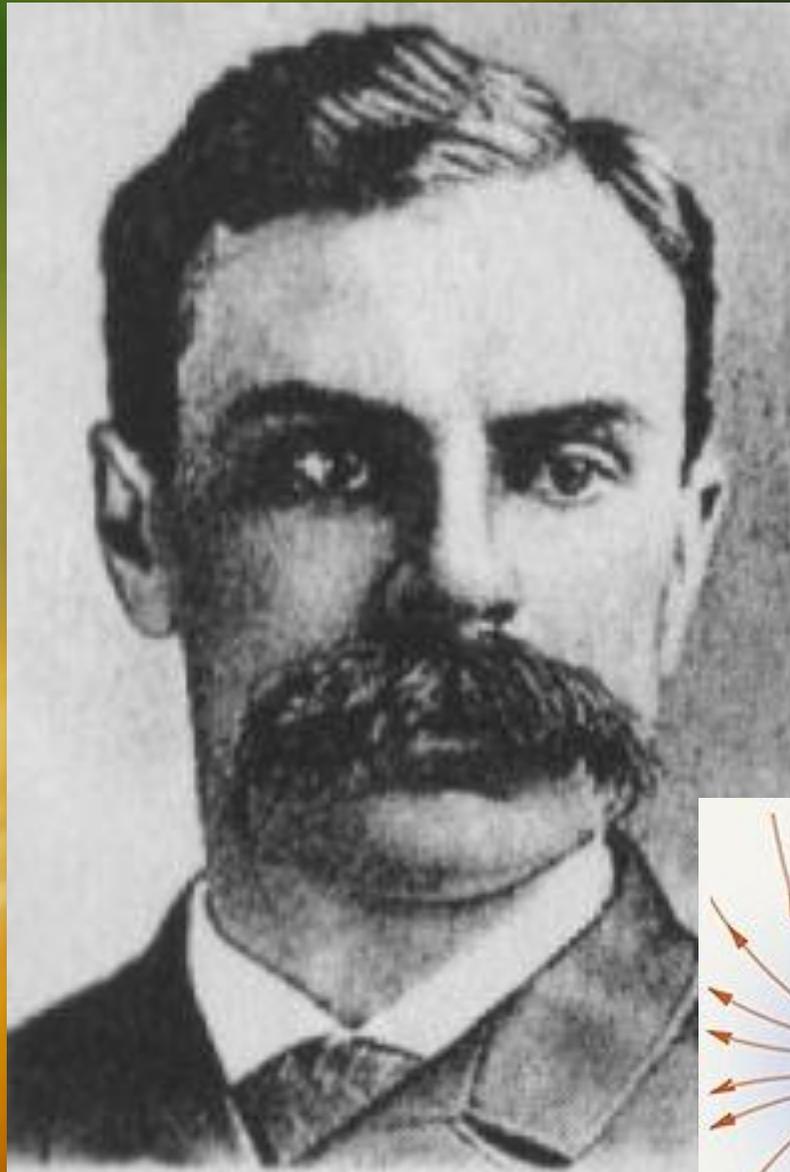


Было обнаружено, кроме того, изменение сопротивления селеновых стержней под действием света, что в определенной степени подтвердило сущность второй загадки, связанной с фотоэлектрическими свойствами «плохих» проводников. В 1906 г. немецкий физик К.Ф. Браун (1850–1918) сделал важное открытие: переменный ток, проходя через контакт свинца и пирита, не подчиняется закону Ома; более того, свойства контакта определяются величиной и знаком приложенного напряжения. Это была третья физическая загадка.

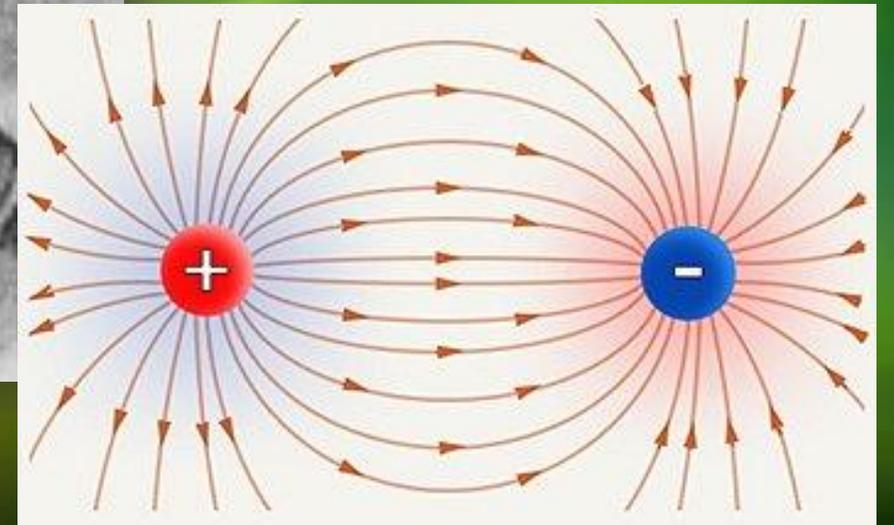
*К.Ф. Браун*

В 1879 г. американский физик Э. Холл (1855–1938) открыл явление возникновения электрического поля в проводнике (тонкой пластине золота) с током, помещенном в магнитное поле, направленное перпендикулярно току. Электрическое поле возникало и в полупроводниках: в одних полупроводниках электрическое поле направлено в одну сторону, а в других – в противоположную.

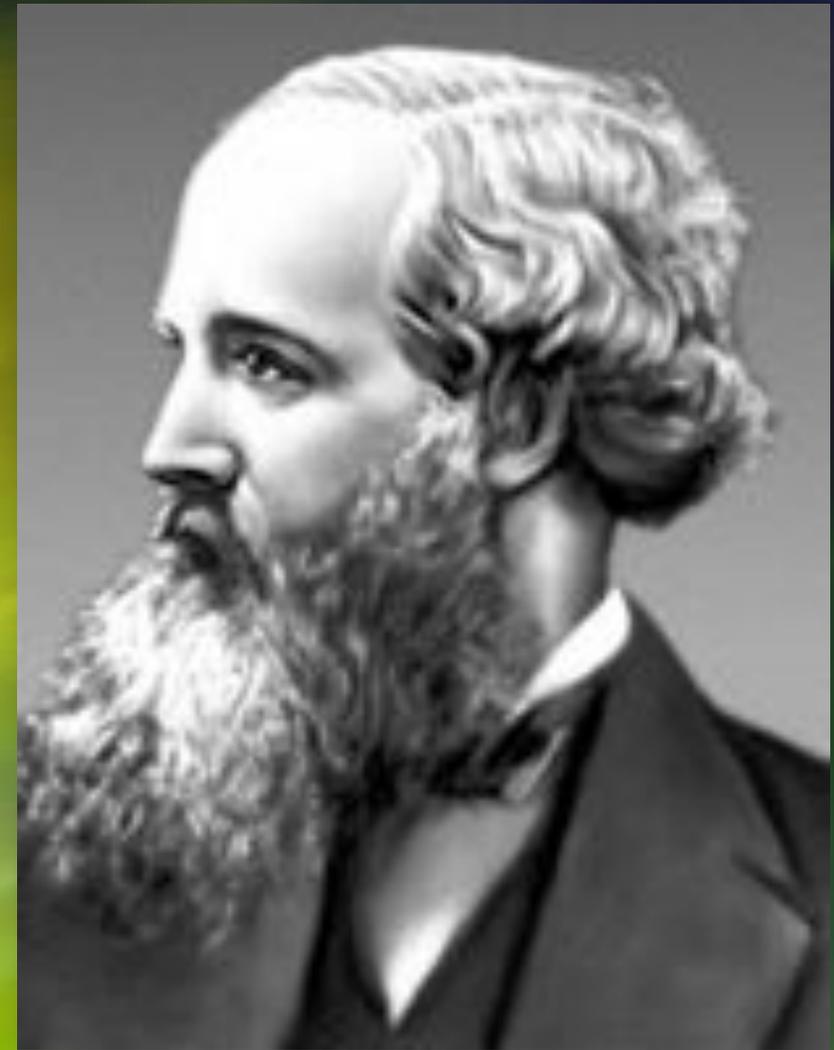
Предполагалось, что направление данного поля определяют электроны и какие-то, в то время неизвестные, положительно заряженные частицы. Открытие Э. Холла – четвертая загадка «плохих» проводников.



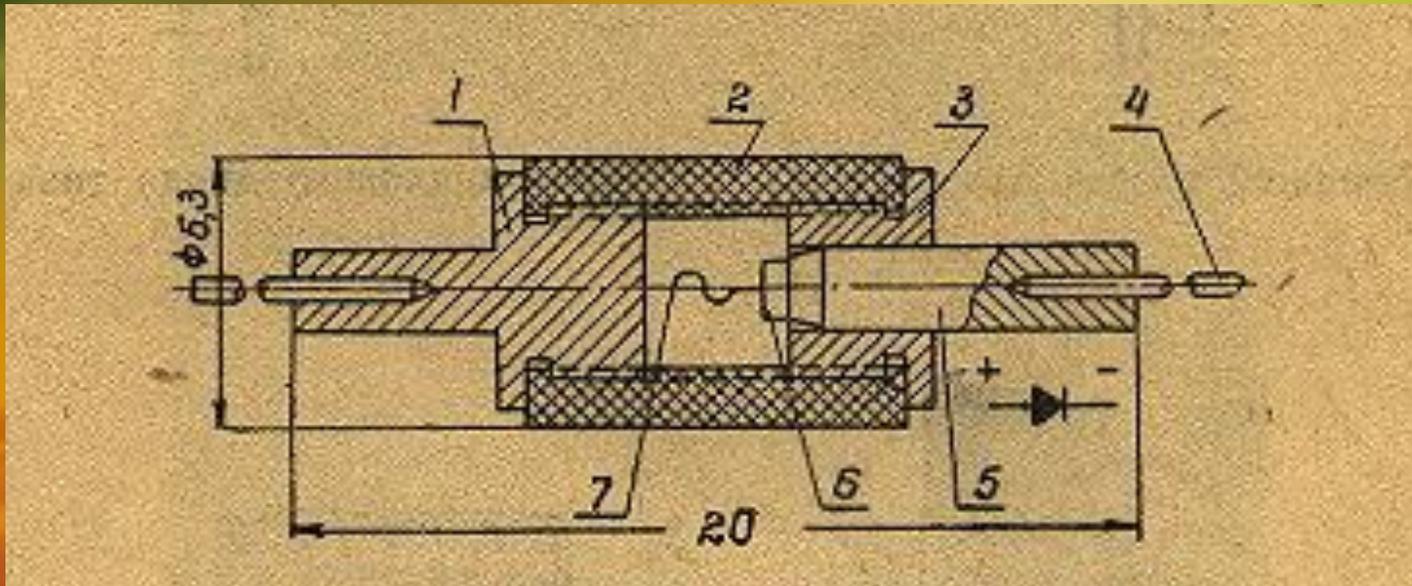
*Э. Холл*



Созданная Дж. Максвеллом теория электромагнитного поля не объясняла ни одну из четырех загадок. Пока физики-теоретики искали отгадки, инженеры все шире применяли полупроводники. В начале нынешнего столетия ученые увлеклись исследованием беспроводной связи. Были созданы первые приемники радиоволн, способные детектировать сигналы. В них использовались контакты из полупроводниковых материалов и металла. Кристаллические полупроводниковые детекторы позволяли выпрямлять радиочастотные сигналы, но усиливать их не могли.

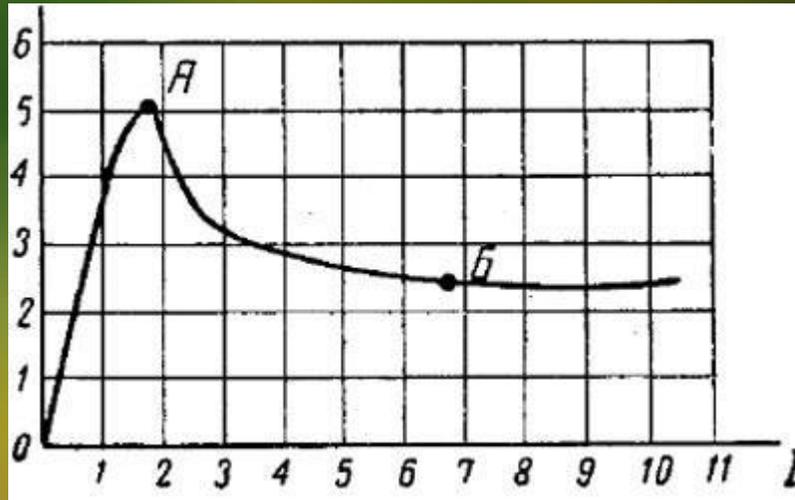


*Дж. Максвелл*

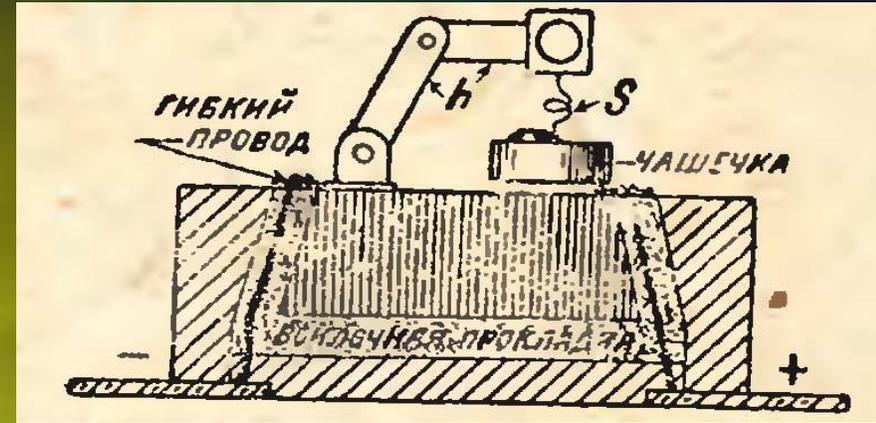




*О. Лосев*



Вольт - амперная характеристика генерирующего детектора.



Генерирующий детектор

Изучая свойства кристаллического детектора, наш соотечественник, выдающийся радиоинженер О. Лосев (1903–1942) обнаружил на вольт-амперной характеристике кристалла участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением, на основе чего создал в 1922 г. генерирующий детектор. Это был первый детектор, способный усиливать и генерировать электромагнитные колебания. Основой его служила контактная пара: металлическое острие – полупроводник (кристалл цинкита). Однако хотя открытие О. Лосева и вызвало большой интерес в те годы, оно не нашло промышленного внедрения. 30–40-е годы – пора расцвета электровакуумных ламп, которые широко применялись в различных устройствах радиосвязи. Ненадежные в те годы полупроводниковые приборы не могли конкурировать с электронными лампами. В полупроводниковой электронике четыре загадки оставались неразгаданными почти 100 лет.

Тем не менее исследование свойств полупроводников продолжалось. Предпринимались поиски природных и синтезированных полупроводников – интерметаллических соединений с полупроводниковыми свойствами. Исследовательские работы существенно активизировались после создания зонной теории полупроводников, в соответствии с которой в твердом теле энергетическое состояние электронов образуют так называемые зоны, разделенные промежутками запрещенных значений энергий.

Если же ширина запрещенной зоны невелика, то электроны могут возбуждаться различными способами и переходить из валентной зоны в более высокоэнергетическую.

В верхней зоне находятся свободные заряды; она названа **зоной проводимости**.

Между ними расположена **запрещенная зона**.

Нижняя зона, в которой заряды связаны, получила название **валентной зоны**.

Если ее ширина велика, то в твердом теле электропроводность отсутствует и оно относится к диэлектрикам.

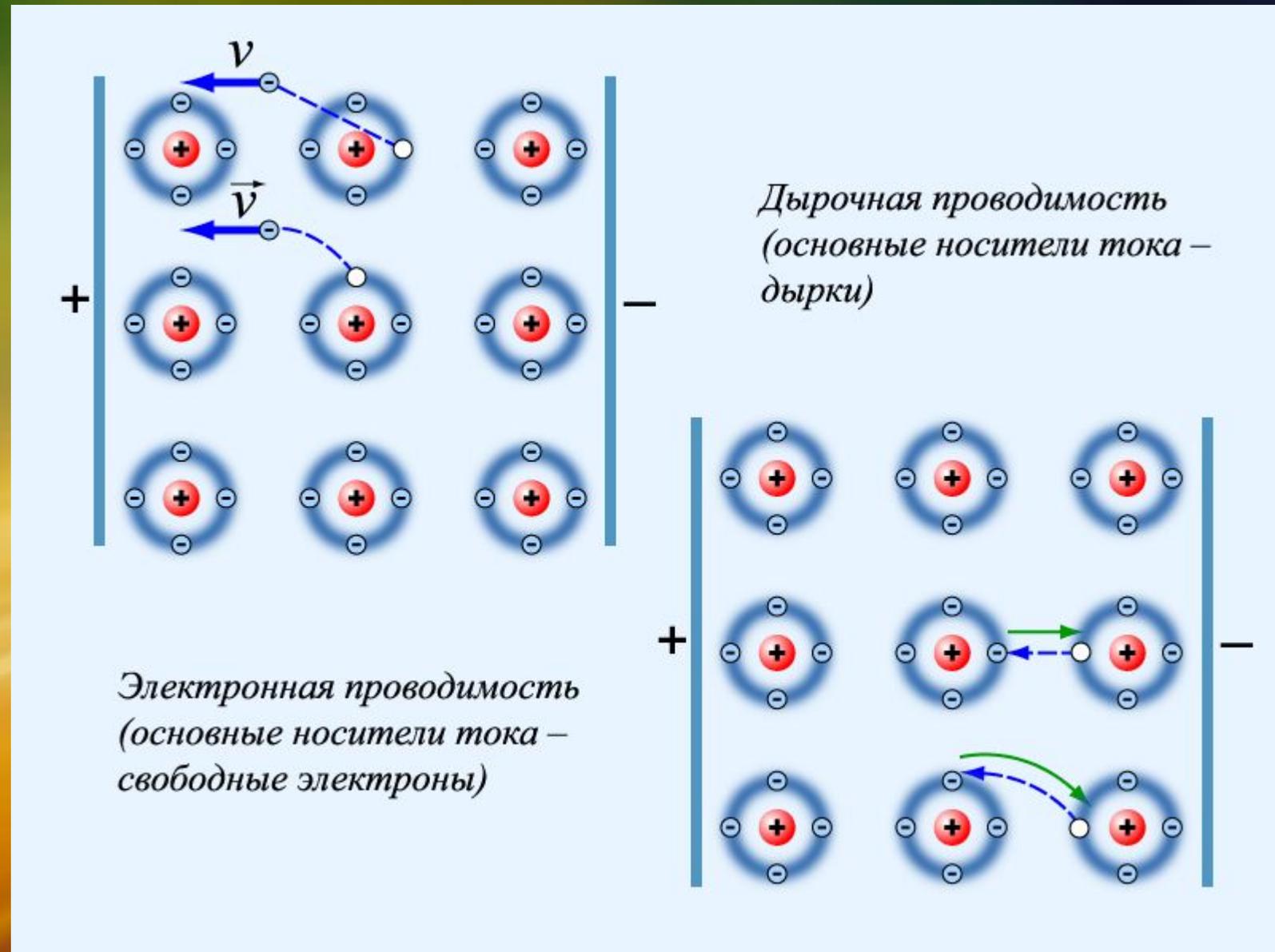
*Например, при разогреве твердого тела происходит тепловое возбуждение электронов, повышается их энергия и они переходят в зону проводимости; при этом повышается электропроводность твердого тела, а значит, уменьшается его сопротивление.*

С ростом температуры число возбужденных электронов увеличивается, стало быть сопротивление полупроводника падает. Возможен и другой механизм возбуждения электронов и перевод их из валентной зоны в зону проводимости, при котором они становятся свободными под действием света.

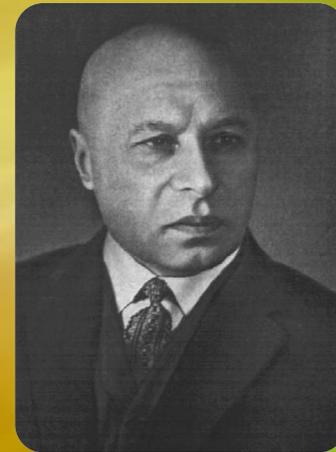
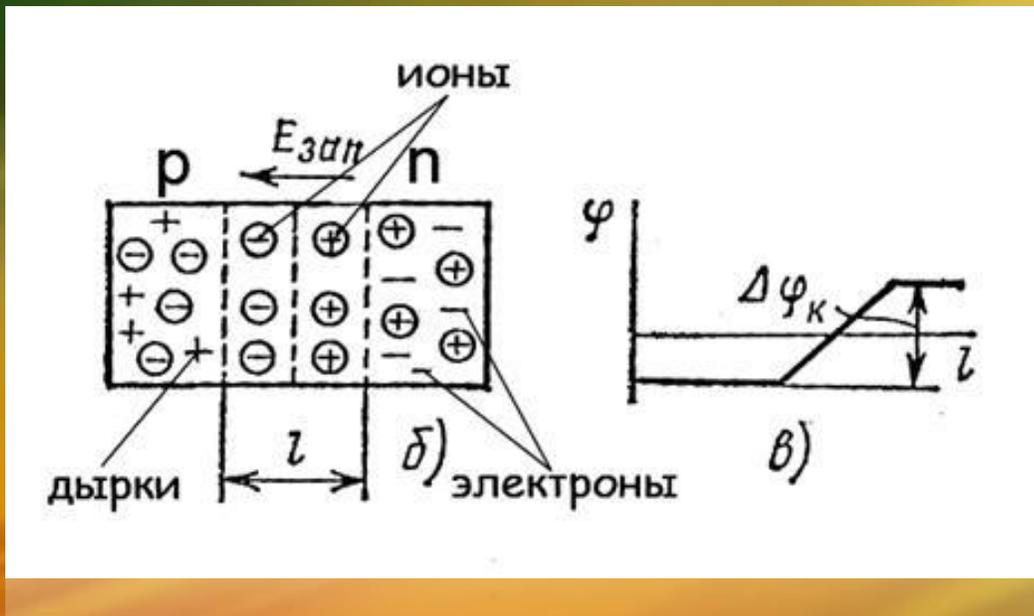
Таким образом, зонная теория объяснила две первые загадки: почему сопротивление полупроводников падает при нагревании и освещении.

В результате анализа электропроводности полупроводников был сделан вывод: на освободившихся от электронов местах в процессе их перехода в зону проводимости образуются вакансии или дырки, которые эквивалентны носителям положительного заряда, обладающим подвижностью, эффективной массой и способностью давать вклад в электрический ток с направлением, противоположным току электронов.

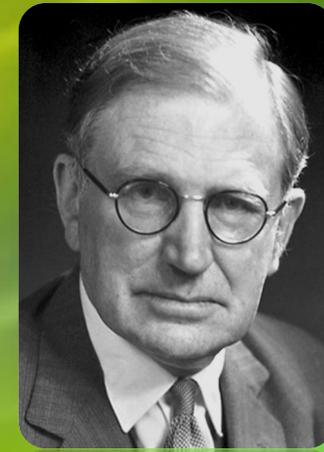
Выяснилось, что существуют полупроводники с электронным типом проводимости (п-тип), для которых эффект Холла отрицателен, и полупроводники с положительным эффектом Холла, имеющие дырочный тип проводимости (р-тип). Первые названы донорными, вторые – акцепторными.



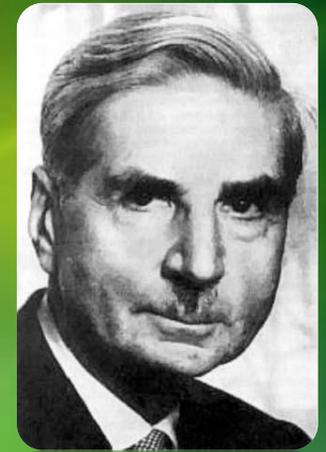
В конце 30-х годов трое ученых-физиков – советский А. Давыдов, английский Н. Мотт и немецкий В. Шоттки – независимо друг от друга предложили теорию контактных явлений, в соответствии с которой в полупроводниках на границе дырочного и электронного типов полупроводников происходит обеднение носителями зарядов и возникает эффективный электронно-дырочный барьер, препятствующий свободному передвижению электронов и дырок. Через такую границу ток проходит только в одном направлении, а ее электрическое сопротивление зависит от величины и направления приложенного напряжения. Если электрическое поле приложено в прямом направлении, высота барьера уменьшается, и наоборот; при этом неосновные носители тока (дырки в электронном полупроводнике и электроны в дырочном) играют определяющую роль.



*А. Давыдов*



*Н. Мотт*



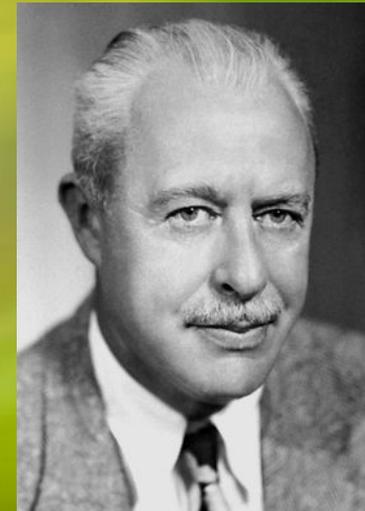
*В. Шоттки*

В результате многочисленных экспериментов удалось изготовить образец, включающий границу перехода между двумя типами проводимости. Так впервые был создан p-n-переход, ставший важнейшим элементом современной полупроводниковой электроники, и к сороковым годам удалось разгадать все четыре загадки «плохих» проводников.

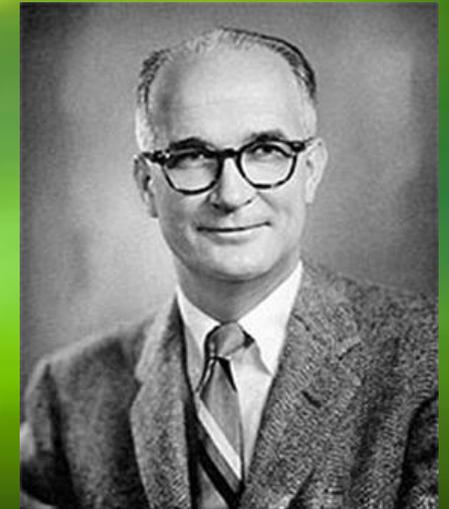
Первым твердотельным прибором для усиления электрического тока, способным работать в устройствах вместо незаменимой в те времена лампы, стал точечный транзистор, в котором два точечных контакта расположены в непосредственной близости друг от друга на верхней поверхности небольшой пластинки кремния n-типа. Демонстрация первого транзистора состоялась в 1948 г. Он позволял усиливать сигнал вплоть до верхней границы звуковых частот более чем в сто раз. В 1956 г. за разработку транзисторов американские физики Д. Бардин (1908–1991), У. Браттейн (1902–1987) и У. Шокли (1910–1989) получили Нобелевскую премию.



*Д. Бардин*



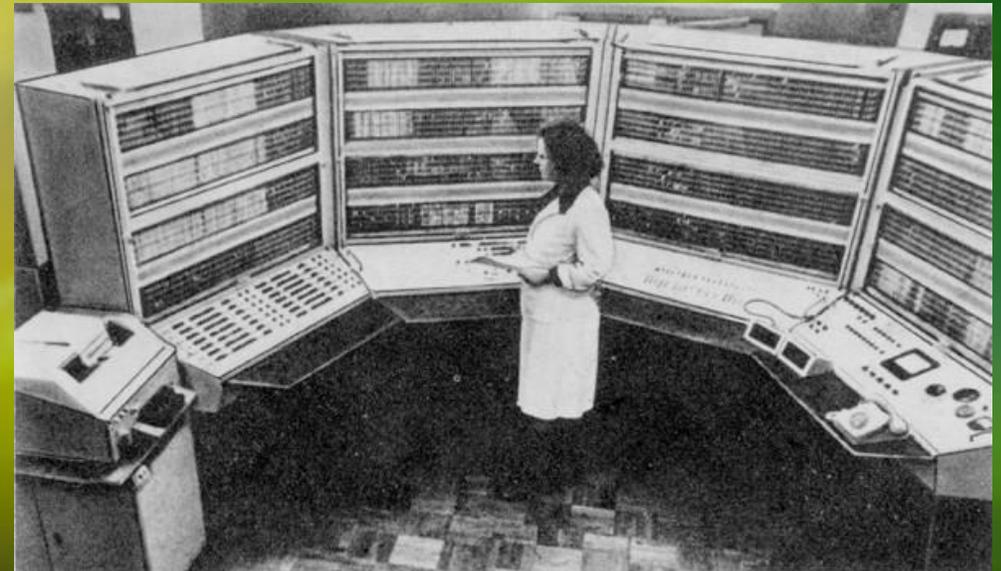
*У. Браттейн*



*У. Шокли*

# *Истоки современной микроэлектронной технологии*

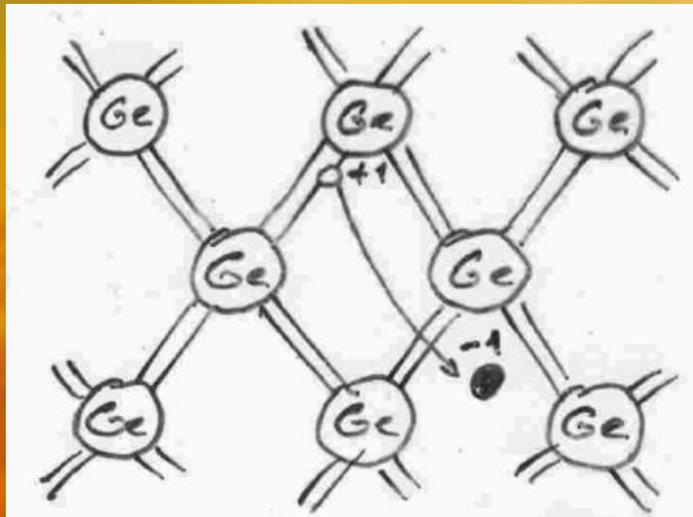
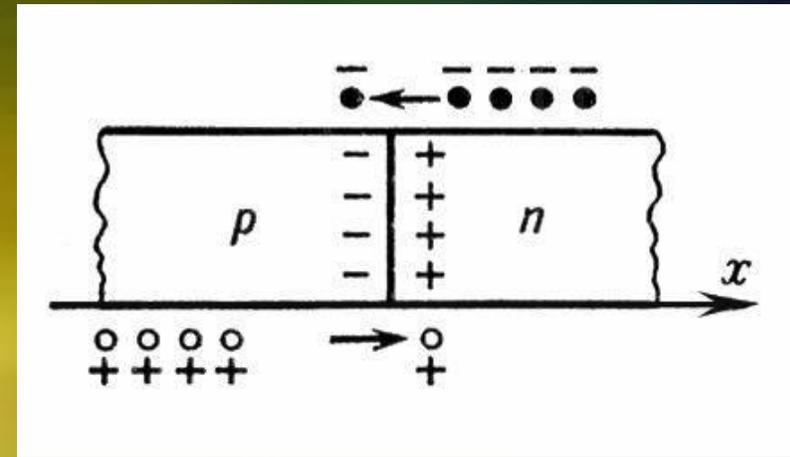
На примере совершенствования различных полупроводниковых приборов можно проследить развитие микроэлектронной технологии, позволившее создать не только превосходные по качеству и надежности транзисторы, но и интегральные схемы, а затем и большие интегральные схемы, на базе которых производится разнообразная электронная техника, включая современную аудио- и видеоаппаратуру, быстродействующие ЭВМ и т. п.



Технологические разработки всегда важны, но на этапе промышленного освоения роль их существенно возрастает. Началом промышленного производства полупроводниковых приборов можно считать середину 50-х годов, когда был предложен технологический прием зонной очистки, позволивший получить равномерное распределение примесей в кристалле. К 1955 г. была налажена технология изготовления транзисторов со сплавными и p-n-переходами. Потом появились разновидности сплавных транзисторов: дрейфовые и сплавные с диффузией. Разработанный электрохимический метод получения базовых слоев позволил создавать новые виды дискретных транзисторов: микросплавные, поверхностно-барьерные, сплавно-диффузионные, микрослойные. Частотный диапазон их работы достиг нескольких мегагерц. Началось производство автоматизированного оборудования для производства транзисторов.

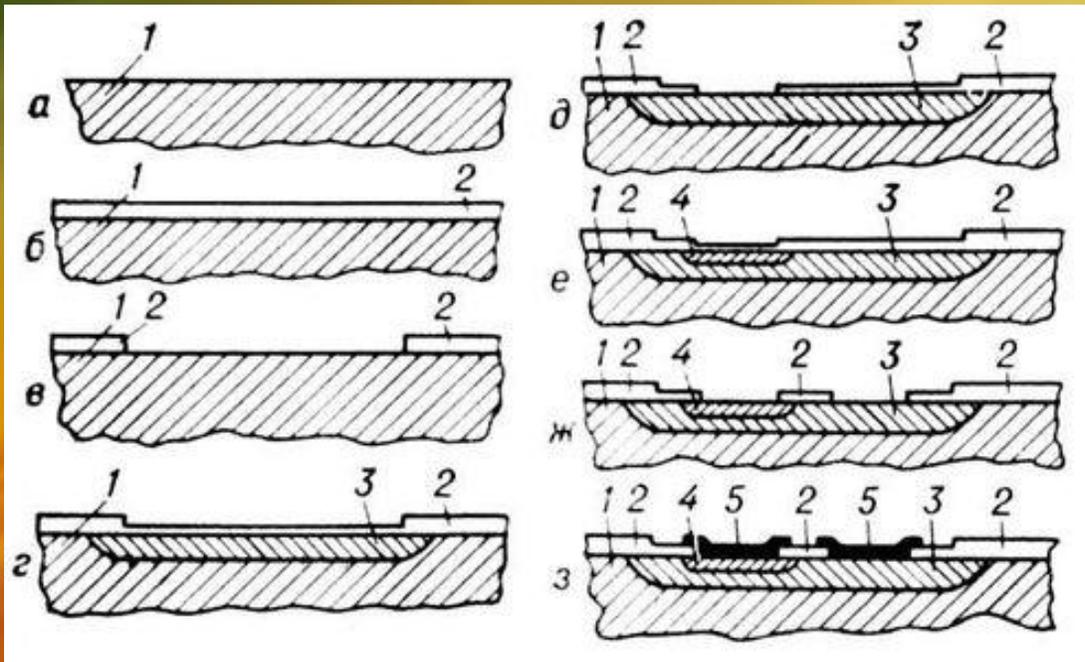


Для получения p-n-переходов стали использовать диффузионный метод, который обеспечивал равномерное распределение примесных атомов в кристалле при нагревании его в атмосфере, содержащей необходимые примеси. Этот метод положил начало групповой технологии производства приборов.



В конце 50-х годов была разработана технология создания планарных транзисторов, конструкция которых имеет плоскую структуру. Особенность этой технологии – возможность создания множества приборов на одной подложке. Такая технология открыла путь к групповой технологии производства транзисторов и его автоматизации.

В истории разработки транзисторов известны примеры новых технических решений, которые открывали новые направления в полупроводниковой электронике. Одним из таких примеров может служить разработка полевых транзисторов, которые могли выполнять функции резисторов, управляемых напряжением. Типичный полевой транзистор реализован на базе структуры металл–окисел–полупроводник и носит название МОП - транзистор.

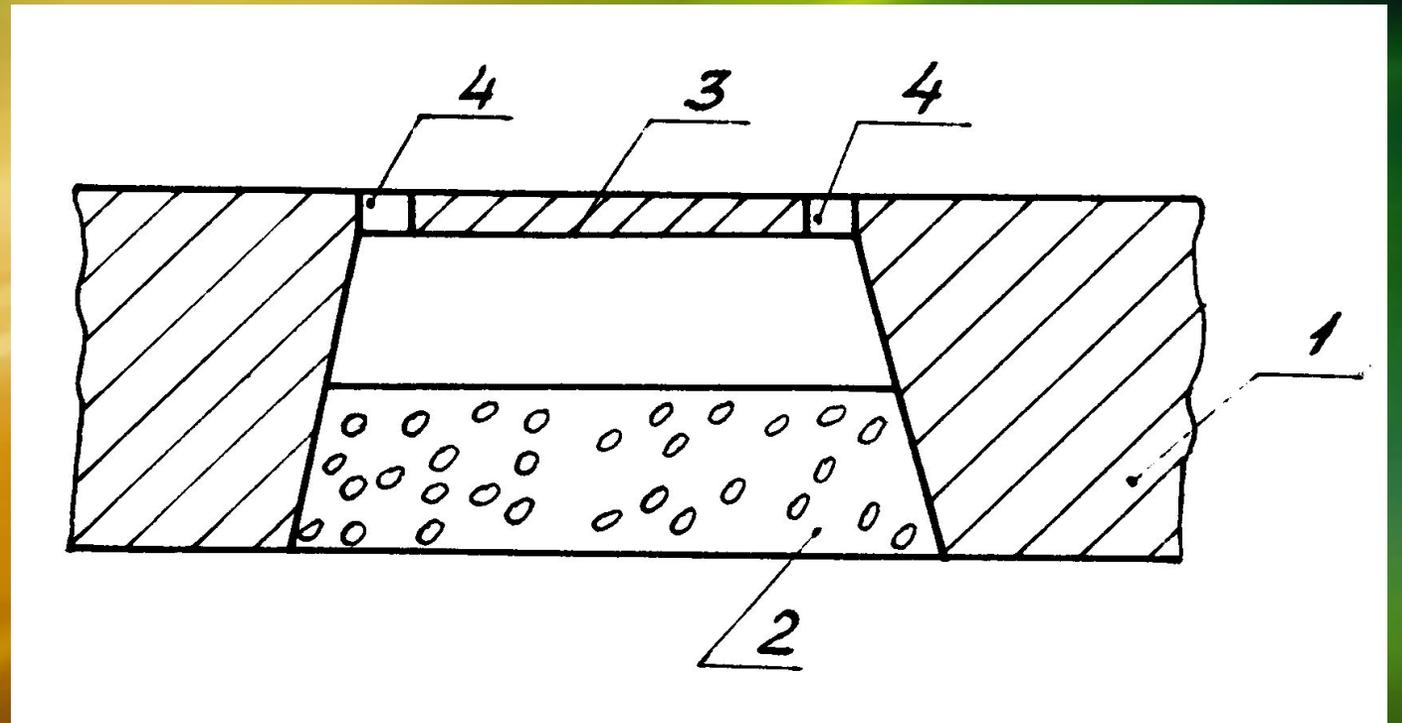
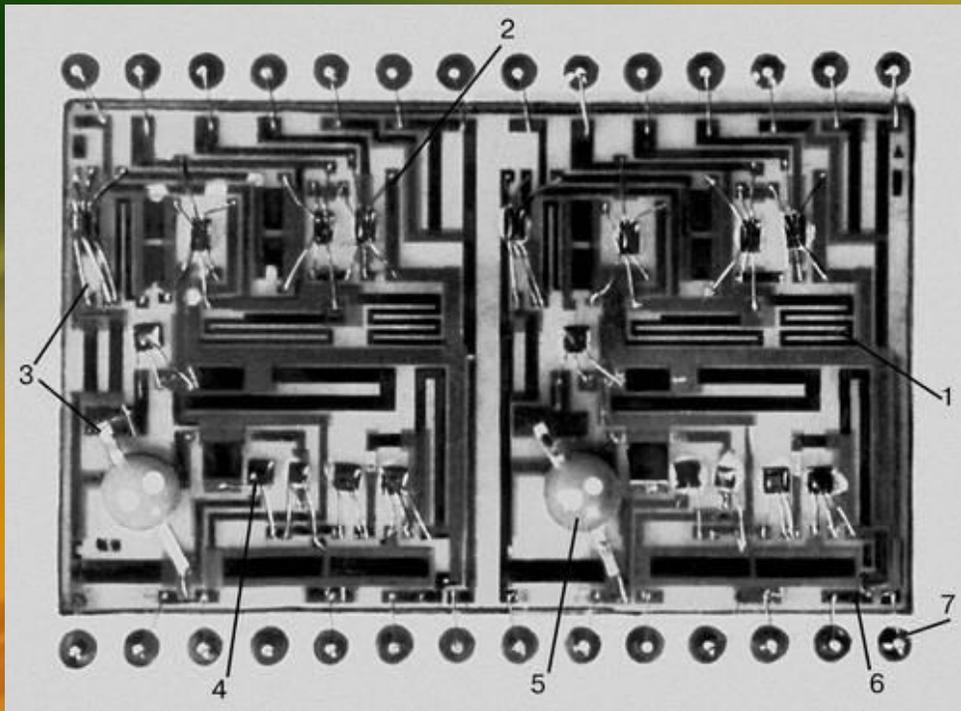


Планарные транзисторы



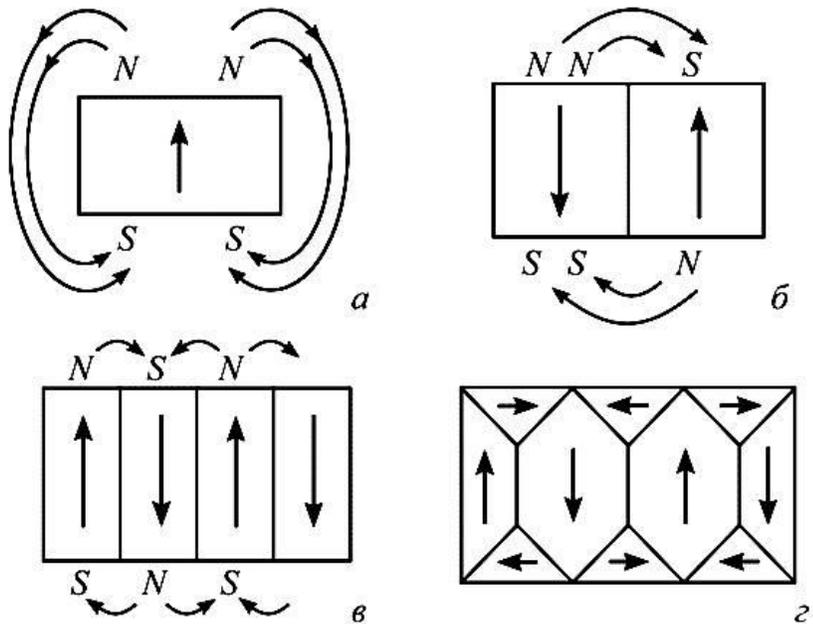
Силовые МОП-транзисторы

Идея интеграции в полупроводниковом производстве пришла со стороны технологии в электронном материаловедении. В 1960 г. был предложен метод изготовления транзисторов в тонком эпитаксиальном слое, выращенном на монокристаллической подложке. Таким способом удавалось на прочной толстой подложке создать транзисторы стойкой базой. Открылась возможность разработки высокочастотных транзисторов большой мощности. Было предложено использовать транзисторы с тонкопленочными проводниками в пределах одной пластины. Такие транзисторы получили название интегральных, а кристаллы стали называть интегральными схемами.



Способ формирования мембран в монокристаллической кремниевой подложке.

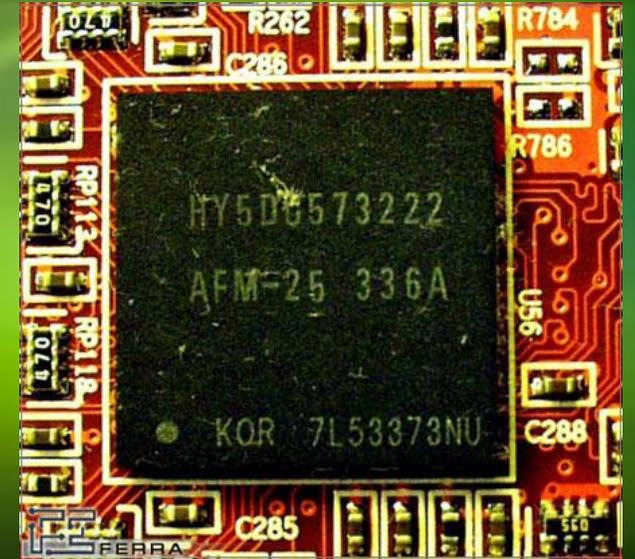
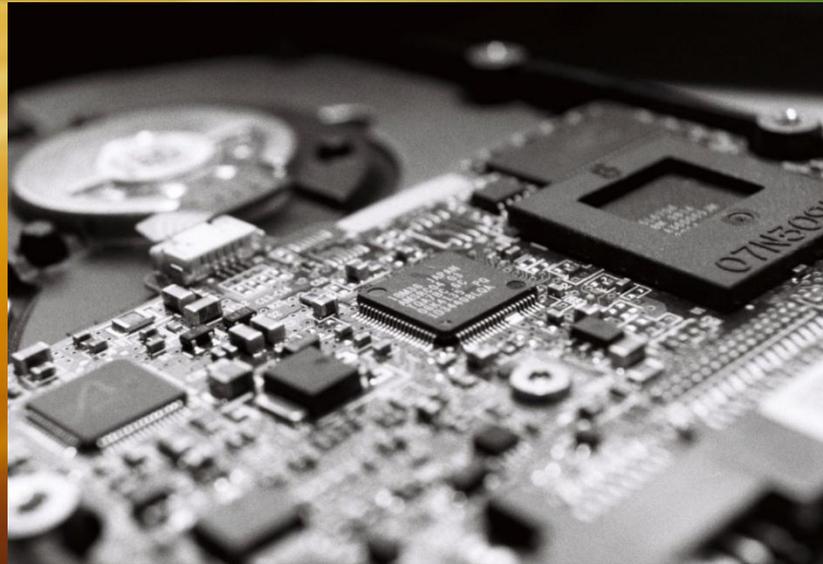
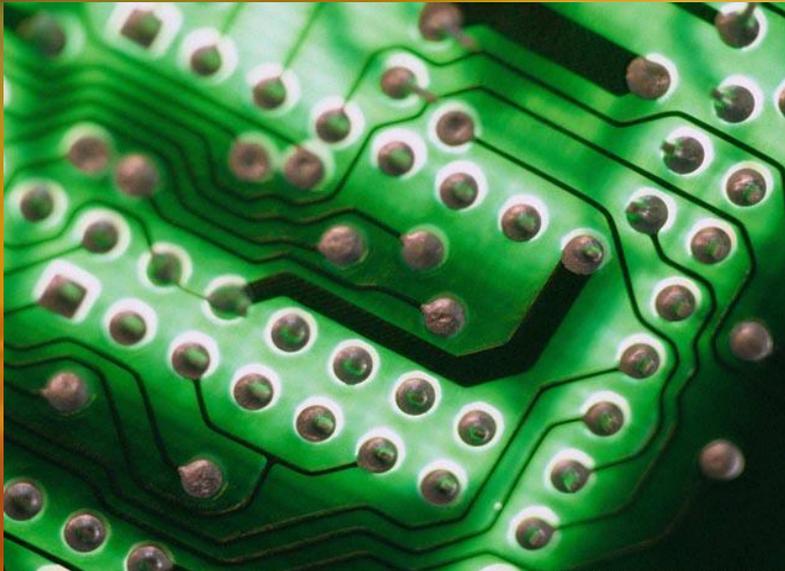
# Ферромагнетики



Таким образом, наряду с дискретной твердотельной электроникой появилась интегральная электроника, основанная на тонкопленочной групповой технологии. По мере освоения тонкопленочной технологии стали осаждаться тонкие пленки не только полупроводниковых, но и других материалов: диэлектриков, магнетиков и т. д. Особенно широко развернулась тонкопленочная индустрия тонких ферромагнитных пленок, на базе которых созданы многие высокочувствительные преобразователи и устройства. В нашей стране изготовление тонких магнитных пленок и их экспериментальное исследование впервые начаты в начале 60-х годов на физическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова в лаборатории известного магнитолога Р.В. Телеснина (1905–1985). Эти первые работы послужили активным началом для многих перспективных направлений исследования физических свойств тонкопленочных ферромагнитных материалов.

# Повышение степени интеграции и новые технологии

Основная продукция микроэлектроники за последние десятилетия – разнообразные интегральные схемы. На протяжении достаточно длительного времени наблюдается устойчивая тенденция экспоненциального увеличения степени их интеграции, для которой, как показывает анализ, возможны три пути роста. Первый связан с уменьшением топологического размера и соответственно повышением плотности упаковки элементов на кристалле. Совершенствование технологических процессов, особенно литографии, а также процессов травления позволяло ежегодно уменьшать характерный размер на 11%. В настоящее время достигнут топологический размер 0,3–0,5 мкм, а в ряде экспериментальных работ используется топографический рисунок с еще меньшими размерами элементов. Дальнейшее уменьшение топологических размеров требует новых технологических приемов.

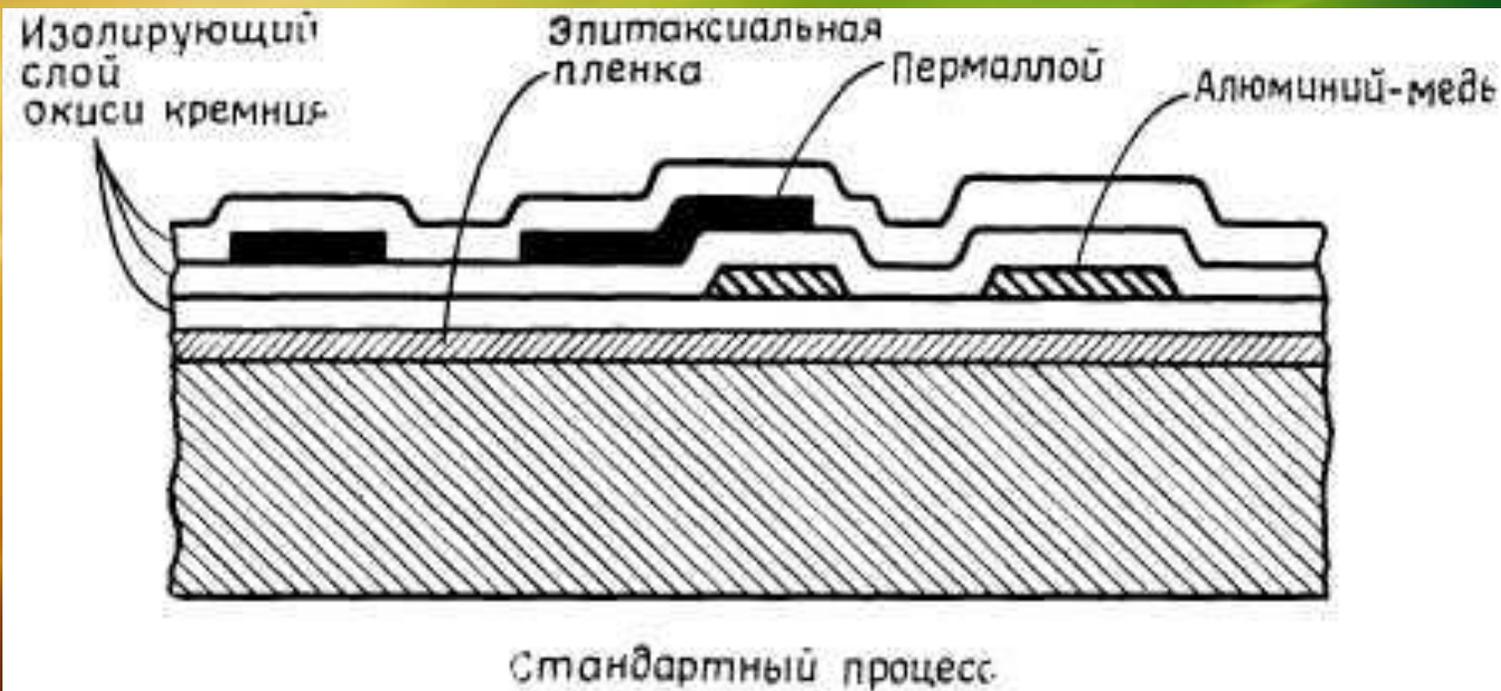


До последнего времени технология основывалась на удалении лишнего материала из заготовки подобно тому, как скульптор удаляет куски мрамора, создавая задуманный образ. На смену такому процессу пришла молекулярно-инженерная технология, которая позволит строить приборы атом за атомом по аналогии с тем, как дом складывают по кирпичику. Уже сейчас молекулярно-инженерная технология находит применение, например, в производстве приборов на основе молекулярных пленок, молекулярно-лучевой эпитаксии, ионно-зондовой и электронно-стимулированной управляемой имплантации. Для того чтобы молекулярно-инженерная микротехнология стала реальностью, следует развивать соответствующие методы.

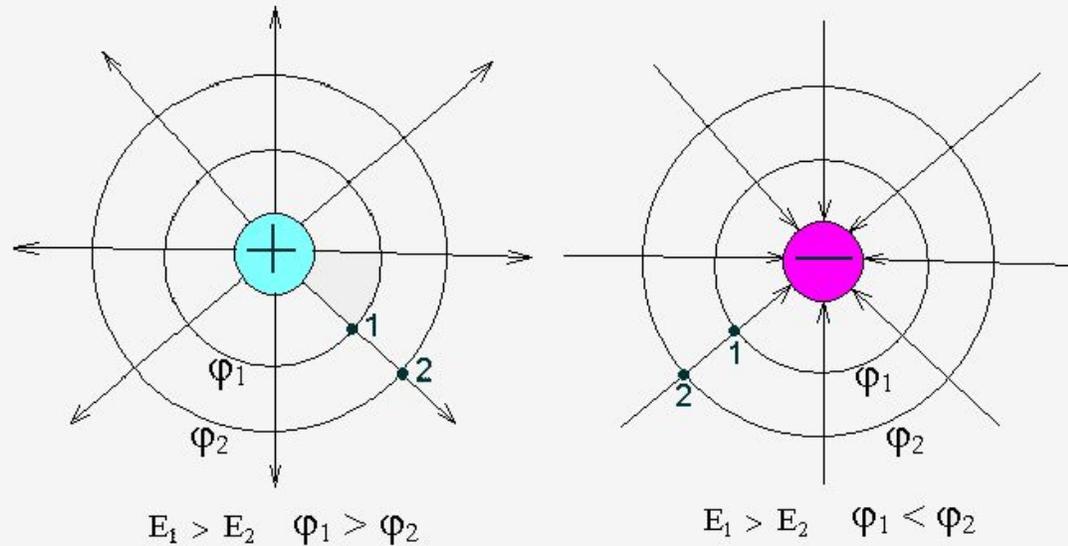


Оборудование для молекулярно-лучевой эпитаксии.

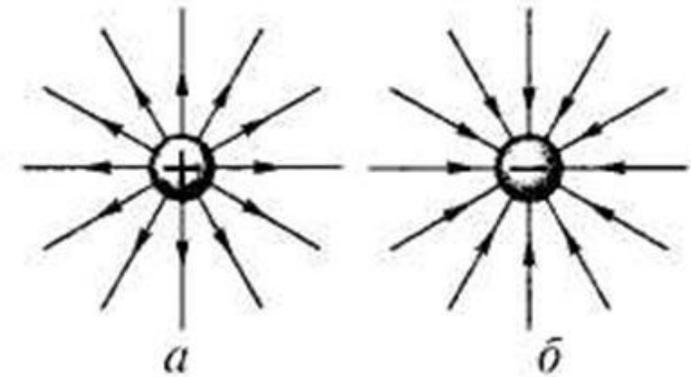
Использование в технологическом производстве лучевых методов (электронно-лучевых, ионно-лучевых, рентгеновских) совместно с вакуумной технологией позволяет получать приборы с размерами элементов до 10–25 нм. Переход в этот диапазон требует решения фундаментальных вопросов, связанных с новыми физическими принципами работы приборов и ограничениями, свойственными планарным процессам.

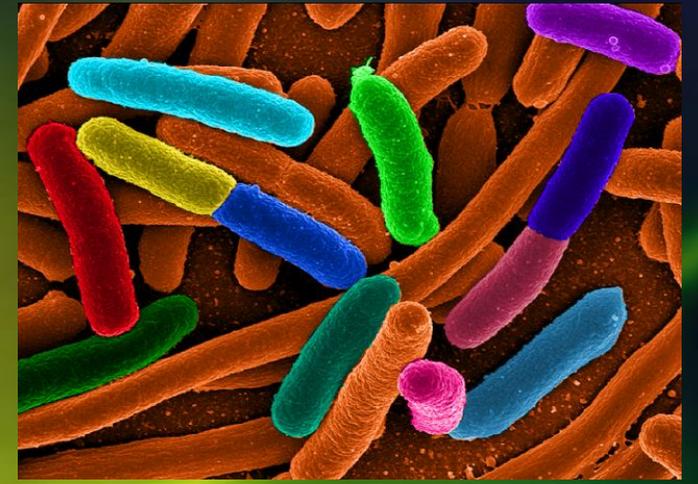
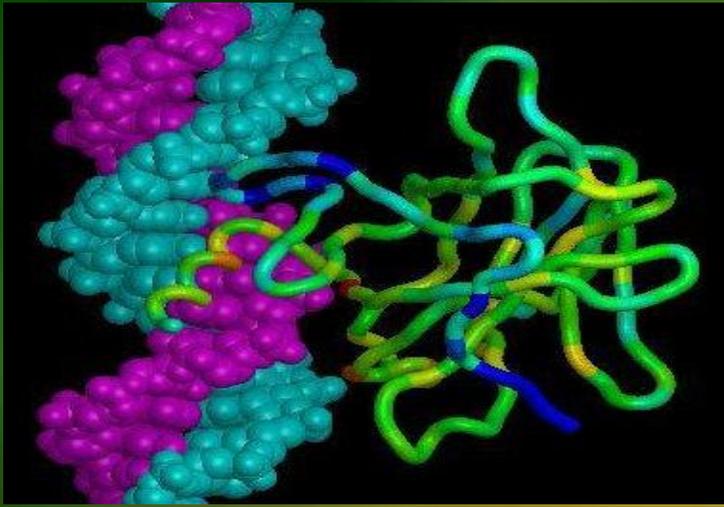


Вследствие большой напряженности электрического поля, возникающего в приборах с такими малыми размерами, механизмы переноса дырок и электронов принципиально изменяются. Скорость электронов становится очень большой. Время между двумя столкновениями сильно уменьшается. Появляется возможность открытия новых физических явлений и построения приборов на их основе. Естественно, что эволюция технологических методов будет способствовать широкому проникновению научных принципов в разработку интегральных схем и поиску физических эффектов для их построения.



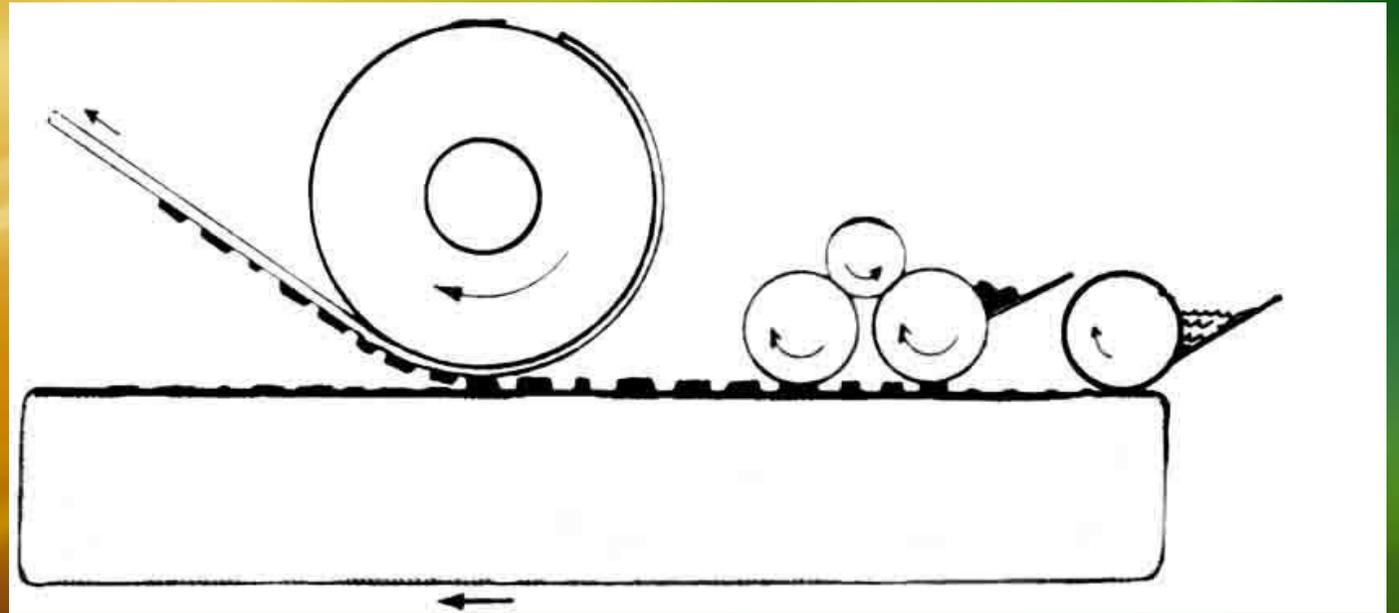
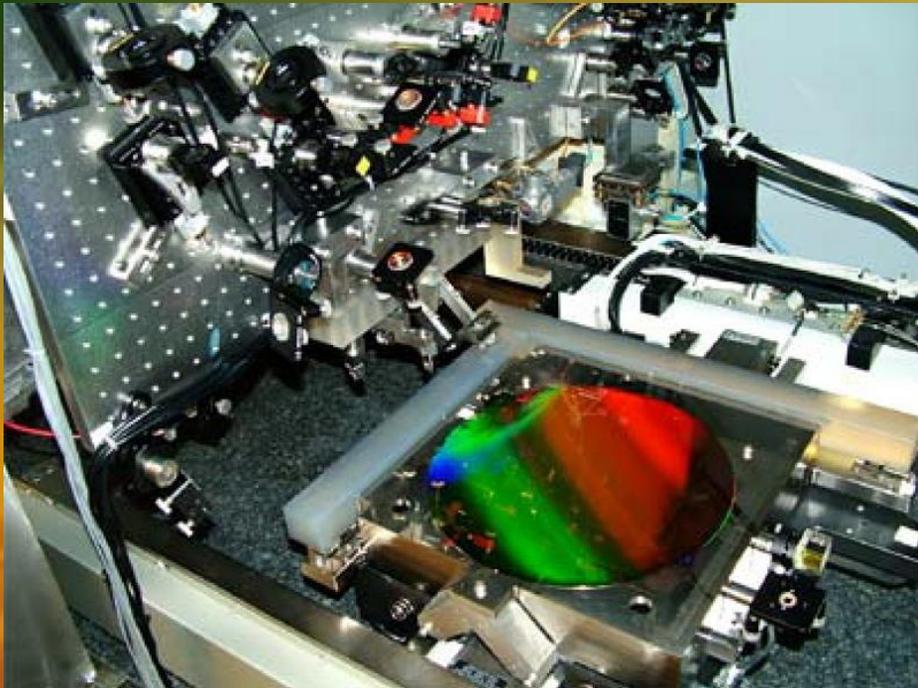
- Линии напряженности электростатического поля начинаются на положительных электрических зарядах и заканчиваются на отрицательных либо уходят в бесконечность.





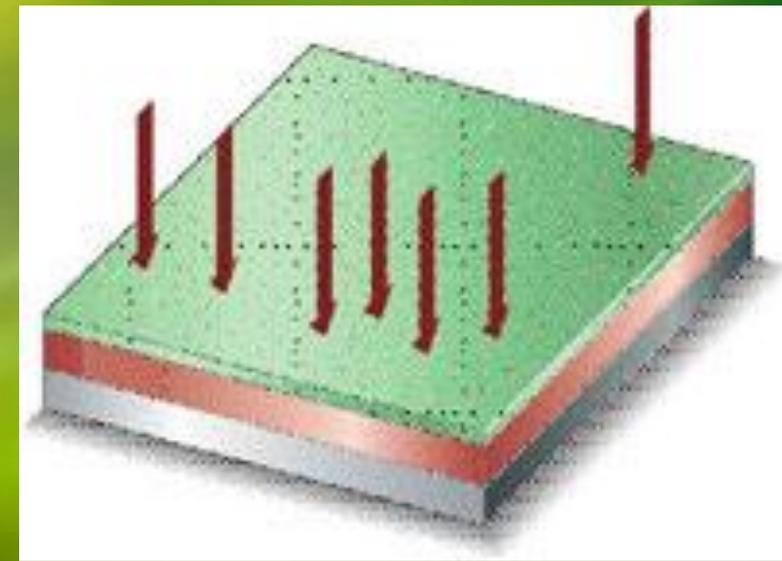
С развитием новых технологических процессов размеры рукотворных структур становятся соизмеримыми с бактериями, вирусами, макромолекулами. В результате взаимодействия ускоренных пучков ионов с веществом можно направленно изменять их физико-химические и электронно-физические свойства, что позволяет получать приборы с заданными характеристиками.

Сфокусированные ионные потоки – это уникальный инструмент для прецизионной обработки всех известных материалов. Такой метод позволяет создавать принципиально новые конструкции приборов. Разрабатываются различные ионно-лучевые установки. Рентгеновские установки позволяют реализовать тиражирование изображений с субмикронными размерами элементов, недоступных световой оптике. Современная технология осаждения тонких пленок позволяет с точностью до 10 нм (это только на два порядка больше диаметра атома) выдерживать размер микроэлектронного прибора в измерении, перпендикулярном плоскости подложки. Формирование с такой же точностью рисунка на плоскости значительно сложнее. Оно обычно осуществляется с помощью процесса литографии на основе технологии печати.



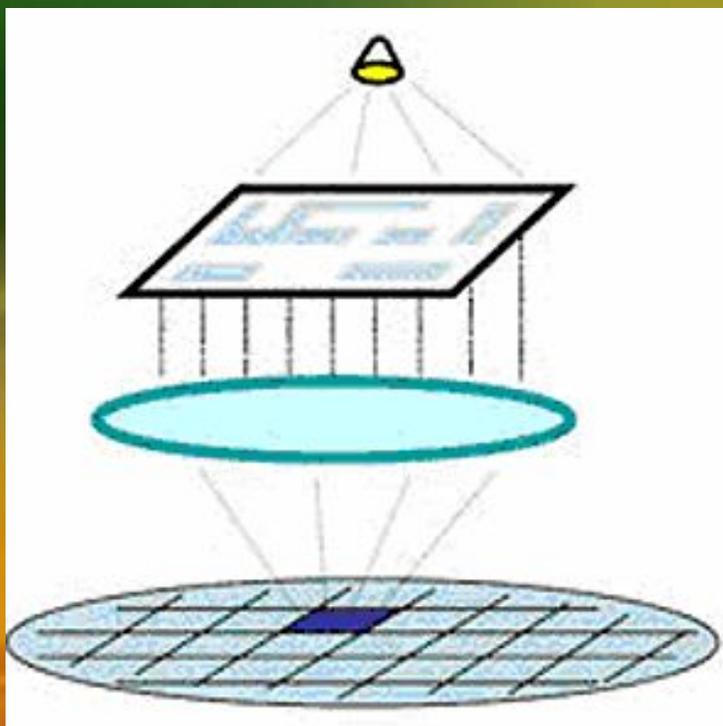
Принцип литографии

С развитием микроэлектроники происходит усложнение схем и уменьшение размеров рисунка. Реализуется возможность получения линий шириной 0,5 мкм с допусками 0,1 мкм. Для выполнения этих требований необходима разработка систем формирования (синтезирования) рисунка с очень высокой разрешающей способностью. Рисунок синтезируется экспонированием (светом, рентгеновским излучением, электронным или ионным пучком с последующим проявлением скрытого изображения) соответствующих участков тонкого слоя резистивного материала, нанесенного на пластину, например, кремния.

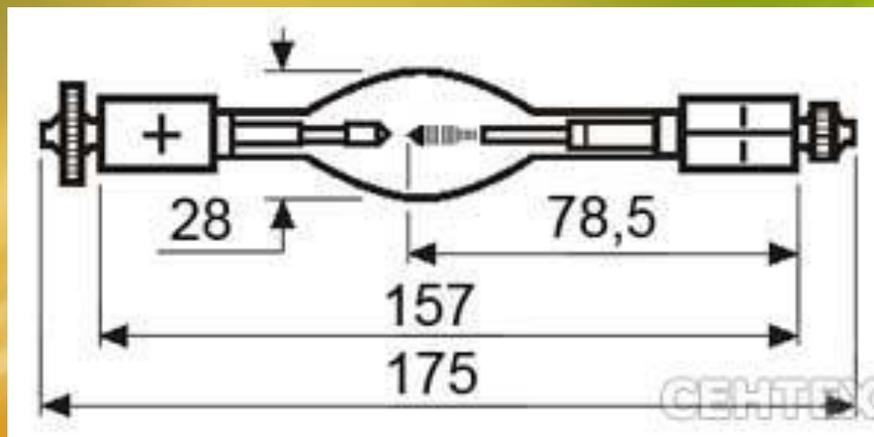


Экспонирование

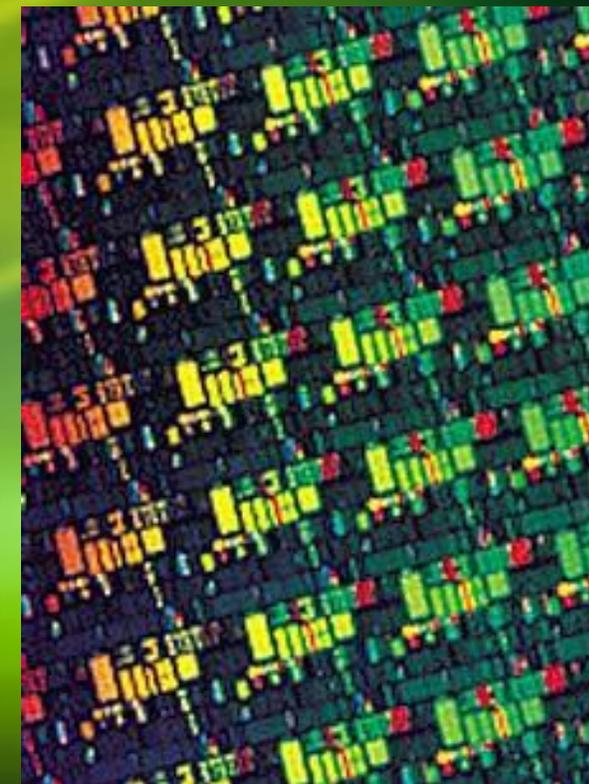
Одновременно идет поиск новых применений субмикронной литографии. Обнаружено, что можно регистрировать световой поток не с помощью фотодиода или другого подобного прибора, а с помощью проводников, чередование которых идет с шагом, кратным длине волны света, а свет падает вдоль этой решетки. Прибор работает как антенна, в элементах которой наводится электрический ток. Размеры элементов такого приемника таковы, что они не могут быть изготовлены традиционным способом фотолитографии. На помощь приходит микролитография – электронная, ионная и рентгеновская.



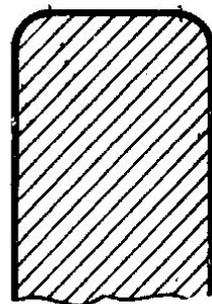
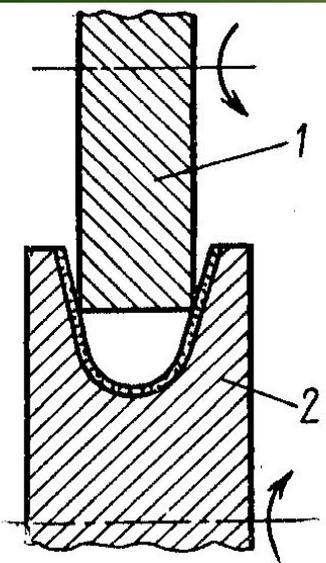
Принцип работы фотолитографии



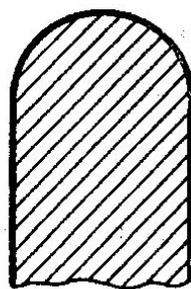
Ртутные лампы для микролитографии



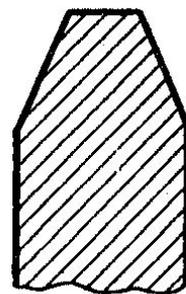
Ожидается, что в ближайшее время промышленность освоит интегральные схемы с миниатюрными размерами отдельных деталей 0,2–0,3 мкм (200–300 нм). Число таких элементов в схеме – полупроводниковой пластине площадью несколько квадратных миллиметров – достигнет десятков миллионов, т. е. увеличится по крайней мере в 1000 раз. Возможности интегральных схем при этом возрастут не в 1000 раз, а гораздо больше. Предполагается, что в ближайшие годы число элементов на кристалле достигнет 7 млрд, правда, такой прогноз называют осторожным.



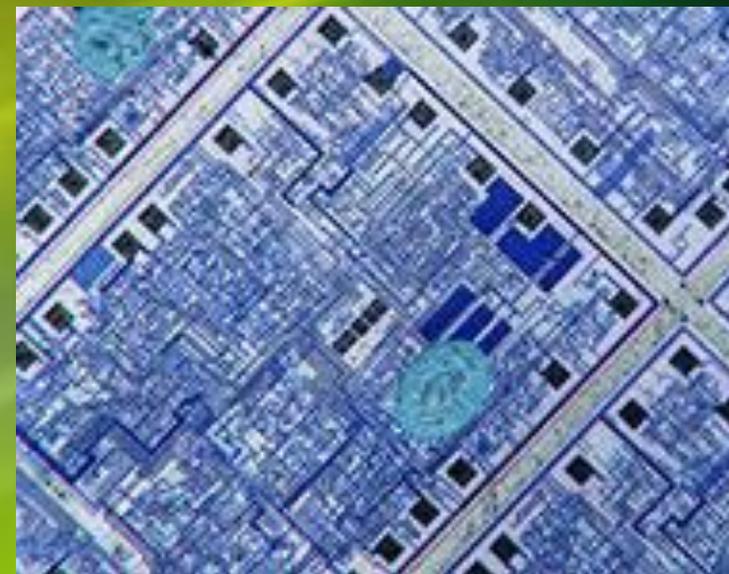
a)



б)

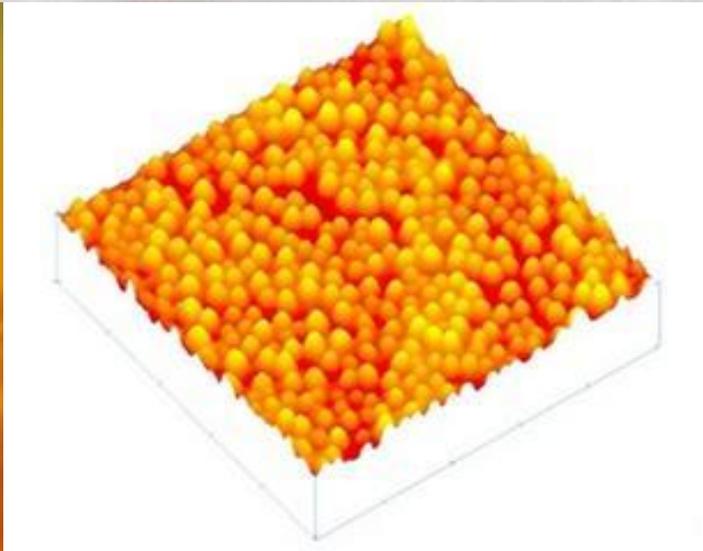


в)



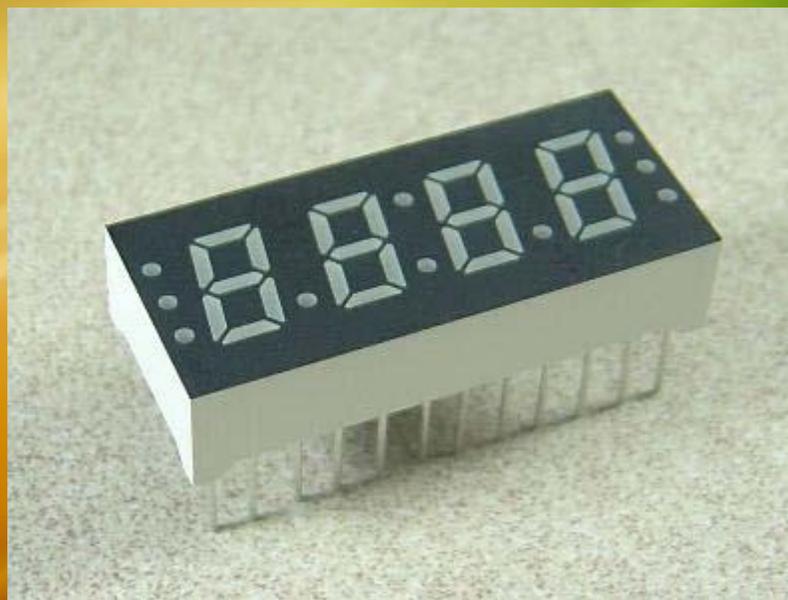
Полупроводниковая пластина

Сейчас основной материал полупроводниковых приборов – кремний. Переход к нанoeлектронике заставляет обратиться и к другим материалам: арсениду галлия, фосфиду индия, кадмий – ртуть – теллуру и др.

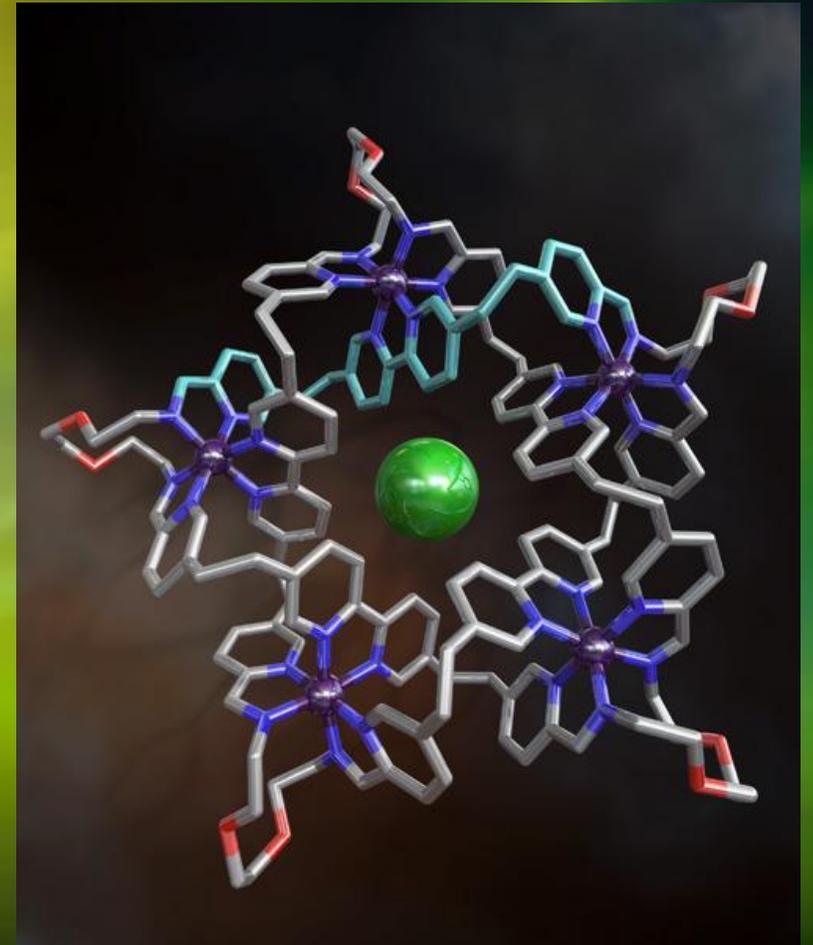
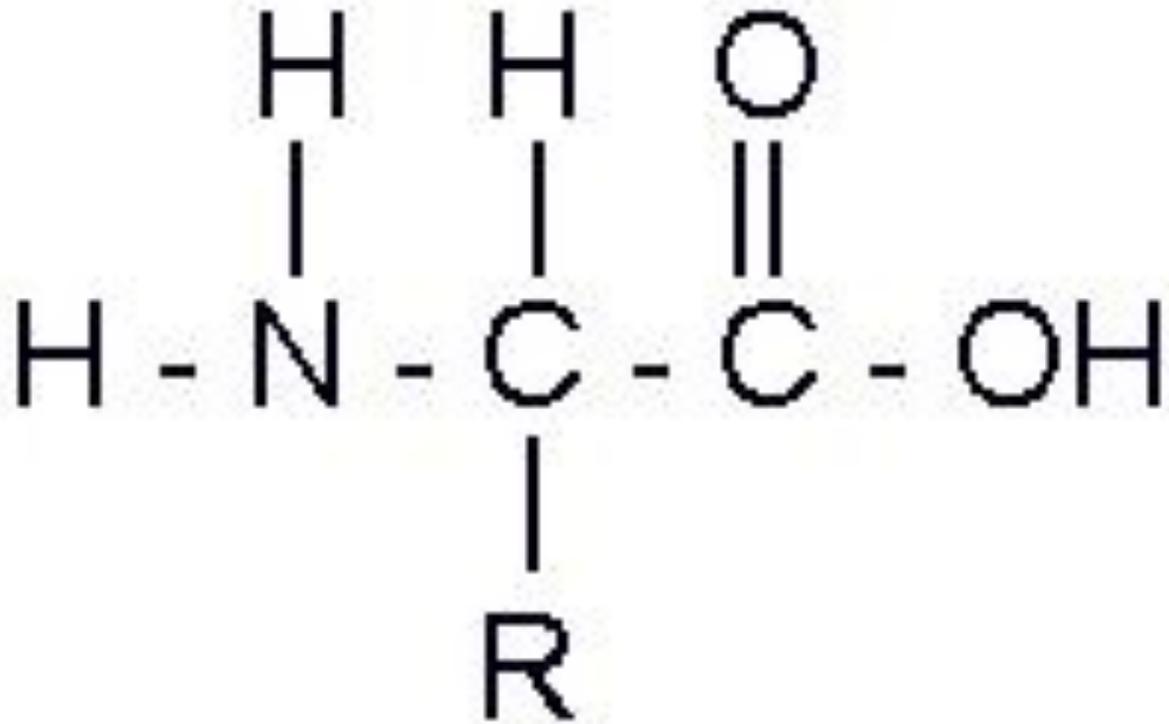


С развитием нанoeлектроники изменяется и архитектура полупроводниковых приборов. Все процессы, определяющие работу интегральной схемы и вообще полупроводниковых приборов, как правило, происходят в тонких приповерхностных слоях толщиной до одного атомного слоя. Это одномерная архитектура.

Нанoeлектроника позволяет создавать трехмерные – многослойные структуры. Технология получения многослойных структур разрабатывается. На этой основе развивается новое направление электроники, называемое функциональной электроникой. В первую очередь это оптоэлектроника. Размеры оптоэлектронных структур могут достигать 100 нм (доли длин световых волн), размеры отдельных деталей – 20 нм.



Широким фронтом ведутся работы по использованию длинных органических молекул в качестве элементов микросхем. Оперировать такими молекулами можно только с помощью электронных и ионных пучков. Все более реальным становится создание машины по аналогии с человеческим мозгом с развитием новых технологических приемов.



В настоящее время интенсивно развивается молекулярно-инженерная технология, результатами твердотельной технологии человечество уже пользуется, и ее совершенствование и переход к наноэлектронике и многомолекулярным структурам приближаются к решению поставленных задач.

