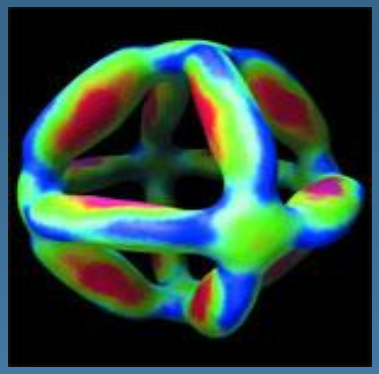
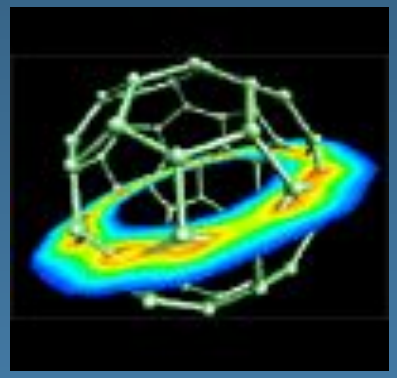
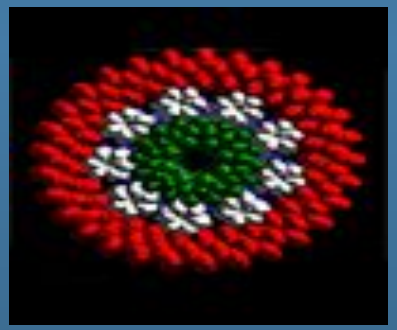
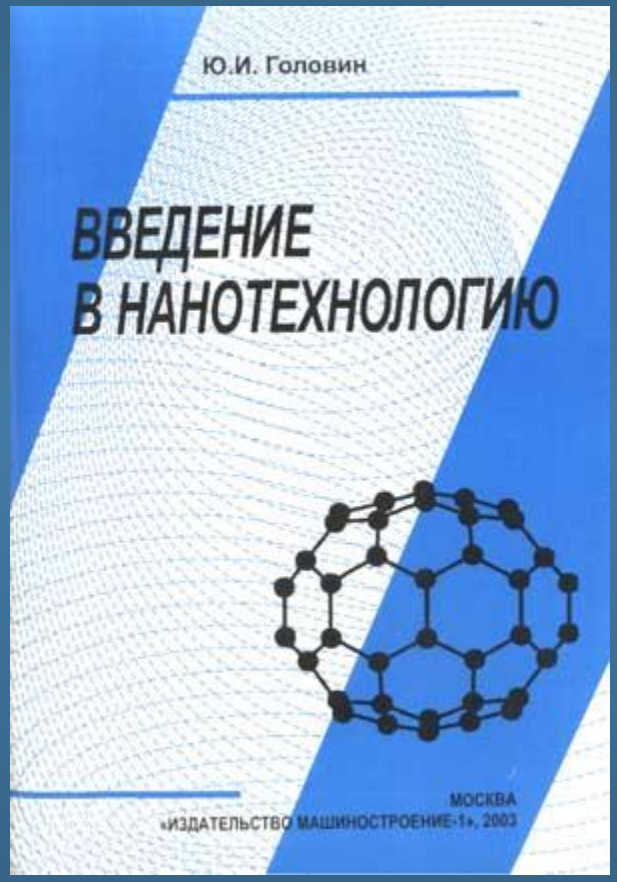
Наноэлектроника и миниатюризация









Выполнили: Гущин Е.П.
Курников Е. А.
Нечаев В.С.

1. Предмет, цели и основные направления в нанотехнологии.

Технологией называется совокупность методов обработки, изготовления, изменения состояния, свойств, формы сырья, материала или полуфабриката, осуществляемых в процессе производства продукции. Особенность нанотехнологий заключается в том, что рассматриваемые процессы и совершаемые действия происходят в нанометровом диапазоне пространственных масштабов. Характерный размер атома составляет несколько десятых нанометра. В этом диапазоне размеров сырьем являются отдельные атомы, молекулы, молекулярные системы, а не привычные в традиционной технологии микронные или макроскопические объемы материала, содержащие, по крайней мере, миллиарды атомов и молекул. В отличие от традиционной технологии, для нанотехнологии характерен индивидуальный подход, при котором внешнее управление достигает отдельных атомов и молекул, что позволяет создавать из них как бездефектные материалы с принципиально новыми физико-химическими и биологическими свойствами, так и новые классы устройств с характерными наномеровыми размерами. Развитие электроники отмечено изобретением и практическим освоением вакуумного триода (1906 год, Л. Де Форест и Р. Либен) и полупроводникового транзистора (1947 год, У. Браттейн, Дж. Бардин, У. Шокли), а затем интегральных микросхем на кремнии (1958-1959 годы), положившим начало новому направлению в электронике - микроэлектронике. Главной тенденцией этого развития является уменьшение размеров приборных структур. В современных интегральных микросхемах они составляют единицы и десятые доли микрона (1мкм = 10-6м). По мере приближения размеров твердотельных структур к нанометровой области (1нм = 0,001мкм = 10-9м), а это образования из единиц и десятков атомов, все больше проявляются квантовые свойства электрона. В его поведении преобладающими становятся волновые закономерности, характерные для квантовых частиц. С одной стороны, это приводит к нарушению работоспособности классических транзисторов, использующих закономерности поведения электрона как классической частицы, а с другой - открывает перспективы создания новых уникальных переключающих, запоминающих и усиливающих элементов для информационных систем. Последние и являются основным объектом исследований и разработок новой области электроники - наноэлектроники, зародившейся в 80-х годах нашего века.

Итак, нанотехнологией называется междисциплинарная область науки, в которой изучаются закономерности физико-химических процессов в пространственных областях нанометровых размеров с целью управления отдельными атомами, молекулами, молекулярными системами при создании новых молекул, наноструктур, наноустройств и материалов со специальными физическими, химическими и биологическими свойствами. Нанотехнологию довольно трудно определить точно, поскольку она возникла постепенно, в течение десятков лет, в результате развития и слияния целого ряда научных направлений в физике и химии 20-го века. Несмотря на проблемы с определением, нанотехнология уже реально существует, и в этой области ученые многих стран сейчас упорно соревнуются друг с другом, постоянно получая новые важные и интересные результаты. Можно сказать, что нанотехнология возникла в результате «освоения» и практического применения многих фундаментальных достижений науки, полученных за долгое время и только сейчас ставших основой новых технологий. Благодаря достижениям нанотехнологии, многие упоминавшиеся выше фантазии и мечты человечества (победа над болезнями, космические путешествия, продление жизни) могут стать реальностью в близком будущем.

1.2. Семь стратегических вопросов.

- Глобализация рынков систем электроники, их разработок и производств, развитие кооперативных научных и промышленных связей - выдвинули на передний план актуальные вопросы стратегии развития нано- и микроэлектроники. Сформулируем некоторые из них.
- Новый стиль дизайна электронных систем . Такой дизайн должен исходить из замены проводов в аппаратуре на беспроводные соединения. Максимальное число системных функций интегрируется внутри чипа. Проектирование идёт по схеме «изощрённый дизайн - дорогие фотошаблоны - дешёвая массовая продукция».
- Новый облик систем «разработка-производство». Интеграция дисплеев, источников питания и чипов в одной конструкции. Появление топливных элементов, размещённых в пористой структуре пассивной части кремниевого чипа, размещение СБИС на общей с дисплеем сапфировой поверхности, устранение монтажных операций и регулировок. Усложнение чипов при этом особого значения не имеет, но при этом требуется освоить…
- Новые системы проектирования, новые библиотеки таких систем. Эти системы и эти библиотеки находятся в прямой связи с технологией, уже существующей на передовых заводах-изготовителях.
- Новые правила аутсорсинга .СБИС- заводы готовы кооперироваться с разработчиками - дизайнерами электронных систем, используя свои производства как «кремниевые мастерские», обеспечивающие быстрое и недорогое экспериментальное и штатное изготовление продукции.
- Обеспечение национальной безопасности и экономической независимости. Очевидно, что комплектация таких систем, как, например, диспетчерские авиационные службы, кардиостимуляторы, оборонные комплексы – не может импортироваться из других стран. Отсюда…
- Важность опережающего развития отечественной нано- и микроэлектроники как локомотива инновационной индустрии, как ключа к созданию «экономики знаний» - основы создаваемой пост - индустриальной структуры гражданского общества России.

Анализ текущего состояния позволяет выделить в нанотехнологии ряд важнейших направлений.

I. **Молекулярный дизайн**. Препарирование молекул и синтез новых молекул в сильно неоднородных электромагнитных полях.

II. **Наноматериаловедение.** Создание .бездефектных. Высокопрочных материалов, материалов с высокой проводимостью.

III. **Наноприборостроение**. Создание сканирующих туннельных микроскопов, атомно-силовых микроскопов, магнитных силовых микроскопов, многоострийных систем для молекулярного дизайна, миниатюрных сверхчувствительных датчиков, нанороботов.

IV. **Наноэлектроника**. Конструирование нанометровой элементной базы для ЭВМ следующего поколения, нанопроводов, полевых транзисторов, выпрямителей, дисплеев, акустических систем.

V. **Нанооптика.** Создание нанолазеров, синтез многоострийных систем с нанолазерами.

VI. **Нанокатализ.** Разработка катализаторов с наноструктурами для классов

реакций селективного катализа.

VII. **Наномедицина.** Проектирование наноинструментария для уничтожения вирусов, локального .ремонта. органов, высокоточной доставки доз лекарств в определенные места живого организма.

VIII. **Нанотрибология. Определение** связи наноструктуры материалов и сил трения и использование этих знаний для изготовления перспективных пар трения.

IX. **Управляемые ядерные реакции**. Наноускорители частиц, не статистические ядерные реакции.

I. **Молекулярный дизайн**. Препарирование молекул и синтез новых молекул в сильно неоднородных электромагнитных полях.

II. **Наноматериаловедение.** Создание .бездефектных. Высокопрочных материалов, материалов с высокой проводимостью.

III. **Наноприборостроение**. Создание сканирующих туннельных микроскопов, атомно-силовых микроскопов, магнитных силовых микроскопов, многоострийных систем для молекулярного дизайна, миниатюрных

сверхчувствительных датчиков, нанороботов.

IV. **Наноэлектроника**. Конструирование нанометровой элементной базы для ЭВМ следующего поколения, нанопроводов, полевых транзисторов, выпрямителей, дисплеев, акустических систем.

V. **Нанооптика.** Создание нанолазеров, синтез многоострийных систем с нанолазерами.

VI. **Нанокатализ.** Разработка катализаторов с наноструктурами для классов реакций селективного катализа.

VII. **Наномедицина.** Проектирование наноинструментария для уничтожения вирусов, локального .ремонта. органов, высокоточной доставки доз лекарств в определенные места живого организма.

VIII. **Нанотрибология. Определение** связи наноструктуры материалов и сил трения и использование этих знаний для изготовления перспективных пар трения.

IX. **Управляемые ядерные реакции**. Наноускорители частиц, не статистические ядерные реакции.

2. Результаты лабораторного эксперимента и модели перспективных наноустройств.

Значительную роль в развитии нанотехнологии сыграли два события:

создание сканирующего туннельного микроскопа в 1982 г. (*G. Bennig,G. Rohrer*) и сканирующего атомно-силового микроскопа в 1986 г. (*G. Bennig, K. Kuatt, K. Gerber*) и их лавинообразное использование для визуализации атомной структуры вещества в нанометром диапазоне размеров (Нобелевская премия за 1992 г.);

открытие в 1985 г. новой формы существования углерода в природе - фуллеренов (*H.Kroto, J. Health, S. O.Brien, R. Curl, R. Smalley*)

2.1. Сканирующая туннельная микроскопия. Наблюдения наноструктуры вещества.

Новые микроскопы позволили визуализировать атомно-молекулярные структуры на поверхности монокристаллов в нанометровом диапазоне размеров. Наилучшее пространственное разрешение приборов составляет сотую долю нанометра по нормали к поверхности. Действие сканирующего туннельного микроскопа основано на туннелировании электронов через вакуумный барьер. Туннельный ток экспоненциально зависит от ширины барьера. При изменении ширины барьера на размеры атома ток изменяется на три порядка. Теория квантового эффекта туннелирования электронов заложена Г. А. Гамовым в 1928 г. в работе по α- распаду. С помощью различных сканирующих микроскопов в настоящее время можно наблюдать за поверхностью монокристаллов металлов, полупроводников, высокотемпературных сверхпроводников, органических молекул, биологических объектов

2.2. Сканирующая туннельная микроскопия. Создание наноструктур.

Сканирующий микроскоп оказался не только прибором, визуализирующим атомно-молекулярную структуру вещества. Он является инструментом для конструирования заданных форм наноструктур. С помощью определенных движений острием микроскопа удается создавать атомные структуры.

2.3. Углеродные нанотрубки.

Например, сотрудники IBM развивают кластерную технологию, работая с углеродными нанотрубками, открытыми сотрудником NEC. Такие трубки могут состоять лишь из нескольких атомных слоев и при этом быть в тысячу раз прочнее стали. В зависимости от размера и формы, углеродные нанотрубки могут обладать полупроводниковыми или металлическими свойствами. В настоящее время отработан метод получения углеродных кластеров путем создания электрического разряда между графитовыми электродами в специальных условиях. Таким путем создают не только нанотрубки, но и различные фуллерены — пустотелые шары и эллипсоиды нанометровых размеров (Фуллерены C60 открыли в 1985 г. H. W. Kroto из Университета Сассекса (University of Sussex) и James Heath, Sean O'Brien, R. E. Smalley и R. F. Curl из Университета Райса (Rice University). За это открытие Kroto, Curl и Smalley получили Нобелевскую премию в 1996 г).

Ученые IBM работают над технологией системной интеграции полупроводниковых и металлических углеродных трубок на одной подложке с целью создания в будущем полнофункциональных электронных наносхем. Технология еще далека от завершения, однако ряд технологических приемов уже опробован. На подложку — пластину из оксидированного полированного кремния — наносится композиция, состоящая из пучков слипшихся полупроводниковых и металлических нанотрубок углерода, которые трудно отделить друг от друга при массовом производстве. Поверх полученной пленки литографическим методами наносятся узкие полоски обычного металла. С помощью электрического сигнала можно переводить углеродные нанотрубки из полупроводникового состояния в состояние изолятора. Это дает возможность путем управляемого электрического пробоя разрушать нанотрубки металлического типа проводимости и получать большие регулярные массивы, состоящие из отрезков полупроводниковых углеродных нанотрубок. Каждый такой отрезок — основа будущего нанотранзистора.

В той же корпорации разработана методика «обточки» углеродных нанотрубок путем электрически управляемого снятия с них лишних атомных слоев. Уже в 2001 году таким способом в IBM научились получать полевые транзисторы с требуемой шириной запрещенной зоны. Их назвали NT-FET (nanotube field-effect transistors). Все это позволяет надеяться, что закон Мура о росте числа логических вентилей на чипе будет действовать даже тогда, когда обычная кремниевая электроника дойдет до своего естественного предела, обусловленного атомной структурой кристалла. Что касается углеродных кластеров, то здесь работы ведутся в нескольких направлениях — с однослойными нанотрубками SWNT (single-walled nanotube), многослойными нанотрубками MWNT (multi-walled nanotube) и различными фуллеренами (C60, C70 и др.) Кластеры такого типа являются средами с пониженной размерностью. Например, нанотрубка преимущественно одномерна, что роднит ее с одной из новых моделей квантовой механики, квантовой нитью. А вот фуллерены, своего рода пузыри нанометровых масштабов, — двумерны. В силу особых квантовых условий движения электронов в средах с пониженной размерностью они зачастую обладают уникальными свойствами. Например, металлические нанотрубки могут выдерживать очень большую плотность тока (в 100–1000 раз больше, чем обычные металлы). Полупроводниковые нанотрубки обладают способностью переключаться под действием внешнего электрического поля в состояние изолятора. При этом ширина запрещенной зоны обратно пропорциональна диаметру трубки: $E_g \sim 1/d$. Фуллерены, допированные некоторыми металлами, являются к тому же высокотемпературными сверхпроводниками. Длина углеродных нанотрубок может в тысячу и более раз превышать их диаметр. В принципе, это дает возможность использовать трубки как проводники для трехмерного монтажа наносхем.

2.4. Нанокластеры.

К множеству нанообъектов относятся сверхмалые частицы, состоящие из десятков, сотен или тысяч атомов. Свойства кластеров кардинально отличаются от свойств макроскопических объемов материалов того же состава. Из нанокластеров, как из крупных строительных блоков, можно целенаправленно конструировать новые материалы с заранее заданными свойствами и использовать их в каталитических реакциях, для разделения газовых смесей и хранения газов. Одним из примеров является $Zn_4O(BDC)_3(DMF)_8(C_6H_5Cl)$. Большой интерес представляют магнитные кластеры, состоящие из атомов переходных металлов, лантиноидов, актиноидов. Эти кластеры обладают собственным магнитным моментом, что позволяет управлять их свойствами с помощью внешнего магнитного поля. Примером является высокоспиновая металлорганическая молекула $Mn_{12}O_{12}(CH_3COO)_{16}(H_2O)_4$. Эта изящная конструкция состоит из четырех ионов Mn^{4+} со спином 3/2, расположенных в вершинах тетраэдра, восьми ионов Mn^{3+} со спином 2, окружающих этот тетраэдр. Взаимодействие между ионами марганца осуществляется ионами кислорода. Антиферромагнитные взаимодействия спинов ионов Mn^{4+} и Mn^{3+} приводят к полному достаточно большому спину, равному 10. Ацетатные группы и молекулы воды отделяют кластеры Mn_{12} друг от друга в молекулярном кристалле. Взаимодействие кластеров в кристалле чрезвычайно мало. Наномагниты представляют интерес при проектировании процессоров для квантовых компьютеров. Кроме того, при исследовании этой квантовой системы обнаружены явления бистабильности и гистерезиса. Если учесть, что расстояние между молекулами составляет около 10 nm, то плотность памяти в такой системе может быть порядка 10 GB/cm2. Однако эта система требует слишком низких температур.

2.5. Модели наноустройств.

Из наноматериалов могут быть созданы определенные наноустройства, например, нанодвигатели, наноманипуляторы, молекулярные насосы, высокоплотная память, элементы механизмов нанороботов. Кратко остановимся на моделях некоторых наноустройств.

2.6. Молекулярные шестерни и насосы.

Модели наноустройств предложены *K. E. Drexler* и *R. Merkle* из IMM (Institute for Molecular Manufactoring, Palo Alto).Валами шестеренок в нанокоробке передач являются углеродные нанотрубки, а зубцами служат молекулы бензола. Характерные частоты вращения шестеренок составляют несколько десятков гигагерц. Устройства работают либо в глубоком вакууме, либо в инертной среде при комнатной температуре. Инертные газы используются для охлаждения устройства.

3.Новые разделы вычислительной физики и вычислительной химии.

Нанометрология.
1. Создание компьютерных моделей систем .прибор-нанообект. и их калибровка.
2. Автоматизация нанометровых измерений и создание банков данных.
Наномеханика.
1. Исследование механических напряжений и деформаций в наноматериалах и нанообъектах.
2. Моделирование движений острия (зонда) при целевом манипулировании нанообъектом.
3. Моделирование движений в наномеханизмах для наноустройств (молекулярные шестерни, молекулярные двигатели, молекулярные насосы), расчет наноманипуляторов.
4. Разработка систем управления нанороботами.
Наноэлектродинамика.
1. Моделирование динамики молекул в предельно неоднородных электромагнитных полях, создаваемых зондами и многоострийными системами.
2. Расчет электрических и магнитных свойств наноматериалов.
Нанооптика.
1. Моделирование механизмов излучения, распространения и поглощения света в нанообъектах.
2. Расчет нанолазеров и гибридных систем .зонды + нанолазер..
Теория самоорганизации наноконструкций.
1. Формулировка фундаментальных принципов самосборки наноконструкций.
2. Создание компьютерных алгоритмов самосборки.
3. Разработка вычислительных алгоритмов для качественного анализа моделей самосборки.

4. Моделирование процессов при создании наноматериалов и явлений пространственно-временной самоорганизации.

Не меньший интерес представляет развитие математического моделирования в наномеровой шкале размеров в молекулярно-лучевой эпитаксии и нанолитографии. Эти методы позволяют создавать:

а) тонкие металлические пленки, служащие основой высококачественных магнитных материалов,

б) базовые элементы наноэлектроники,

в) элементы компьютеров для квантовых вычислений,

г) модифицированные катализаторы для селективного катализа.

В области гетерогенного катализа перспективными представляется моделирование в нанометровой шкале размеров

д) реакций с учетом массопереноса атомов твердого тела и окисления-восстановления катализатора,

е) процессов химического превращения на модифицированных каталитических поверхностях,

ж) реакций, стимулированных электрическим полем и светом.

Под модификацией поверхности понимается создание на ней наноструктур.

4. Миниатюризация.

В последнее время в связи с приближением к пределам миниатюризации классических микроэлектронных приборов усилился интерес к приборам, могущим обеспечить дальнейший прогресс электроники. Одним из возможных путей такого прогресса является создание приборов, в которых контролируется перемещение определенного количества электронов, в частности, одного электрона**,** а также миниатюризация привела к переходу полупроводниковой промышленности к производству на наноуровне. Лидирующее место в этой области принадлежит производству микросхем, где разрабатывается 32 нм процесс изготовления процессоров (ожидается к 2009 году). У создателей микросхем впереди ещё много серьёзных проблем, которые связаны в основном с тем, что им придётся все глубже «погружаться» в наномир, где по некоторым параметрам в ближайшем будущем они достигнут физических пределов для традиционных логических MOSFET (полевой МОП-транзистор).

Цитата Джина Хьюстона: «Миниатюризация оказывает важное воздействие на личность и культуру, ведь если машины малы и не портят окружающий пейзаж, то можно вновь прислушаться к словам ветра и читать великий замысел Единосущего, запечатленный в коре деревьев, ощутить ритмы, пробуждающиеся в кончиках собственных пальцев...". Остается слабая надежда, что миниатюризация даст возможность человеку перейти от потребительских ценностей к творческим.»

5. Фундаментальные проблемы и опасности.

К сожалению, быстро развивающиеся нанобиотехнологии имеют ярко выраженный привкус коммерции. Достаточно назвать плохо контролируемое распространение генетически модифицированных продуктов питания, навязываемых всему миру чересчур поспешно, без тщательной проверки на безопасность.

Поскольку размножающиеся «ячеистые» биороботы в принципе уже спроектированы, но еще не действуют, дальнейшие эксперименты в нанобиотехнологии опасны и нуждаются в жестком правительственном и международном контроле.

Один из главных энтузиастов нанотехнологии – президент Форсайтовского Института Эрик Дрекслер вынужден был заявить, что прогресс в указанной области может столкнуться с самыми серьезными проблемами и даже привести к фатальным последствиям для Человечества. Если роботы-ассемблеры, как это предполагается, смогут самовоспроизводиться и к тому же самообучаться, то никто не может гарантировать их невыхода из-под контроля.

И тогда вместо лечения больных клеток и синтеза пищи они набросятся на живые и здоровые организмы, а возможно, и на всё неживое, разбирая материю на атомы для самовоспроизводства. При этом всё окружающее - во всяком случае, на Земле - превратится в то, что Дрекслер мрачно - поэтически назвал *«большой серой бездной»*.

Пока никто не сможет дать гарантии того, что самовоспроизводящиеся искусственные наноорганизмы не будут использованы в военных целях - например, для создания супервируса, способного вывести из строя любую армию, или что не сбудутся мрачные пророчества фантастов, уже описавших «войну с репликаторами» , «восстание машин» и т.д. Поэтому не снят вопрос, скажет ли в будущем человечество создателям нанотехнологий слова благодарности за обретенный «золотой век» или повторит высказывание одного американского конгрессмена по поводу клонирования: *«Всё это - наука, которая сошла с ума»*.

Проблемы разной степени значимости:

1. Создание математических моделей систем .нанообъект-измерительный прибор..
2. Разработка теории и моделей самосборки наноматериалов и наноустройств.
3. Исследование пространственно-временной самоорганизации на основе первых принципов.

6. Заключение.

В заключение хочется подчеркнуть, что успех работы в новой перспективной области существенным образом зависит от взаимодополняющего использования:

- прецизионных методов лабораторного эксперимента,
- теории систем объект-прибор.,
- теории атомов и молекул в сильно неоднородных электромагнитных полях,
- многоуровневых иерархических систем математических моделей,
- конструктивных методов математического анализа,
- проблемно-ориентированного программного обеспечения, автоматизирующего формальные исследовательские операции, снабженного гибким интерфейсом и развитыми средствами визуализации результатов для эффективного выполнения плохо формализуемых операций,
- мощных компьютерных комплексов
- систем подготовки специалистов, учитывающей междисциплинарный характер

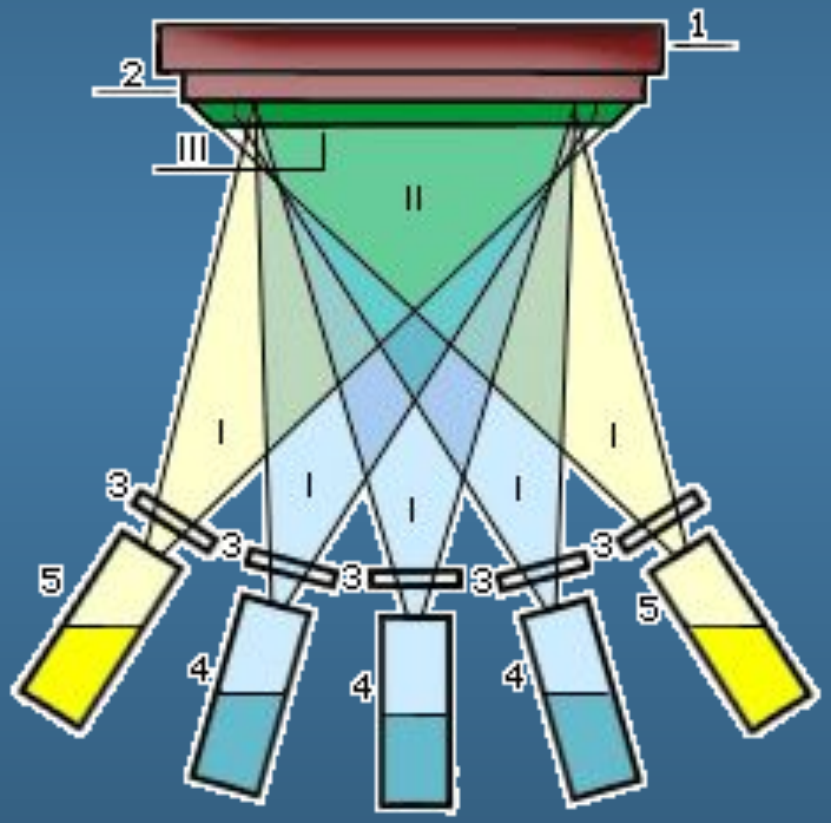
проблематики.

Объединяющим звеном в этом междисциплинарном синтезе является конструктивная математика.

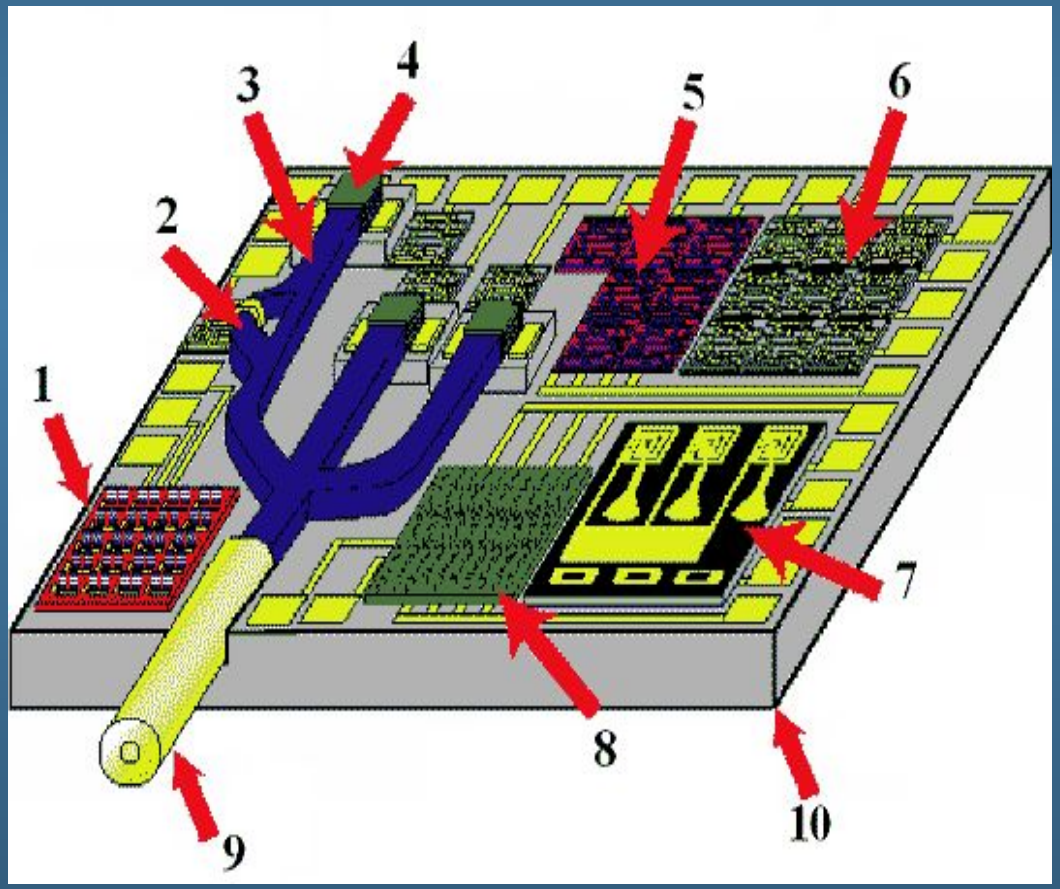
Рис. 1 Схема установки МБЕ для получения легированных тройных соединений.

Вся установка размещается в камере сверхвысокого вакуума:

1.Блок нагрева, 2. Подложка, 3. Заслонка отдельной ячейки, 4. Эффузионные ячейки основных компонентов, 5. Эффузионные ячейки легирующих примесей.

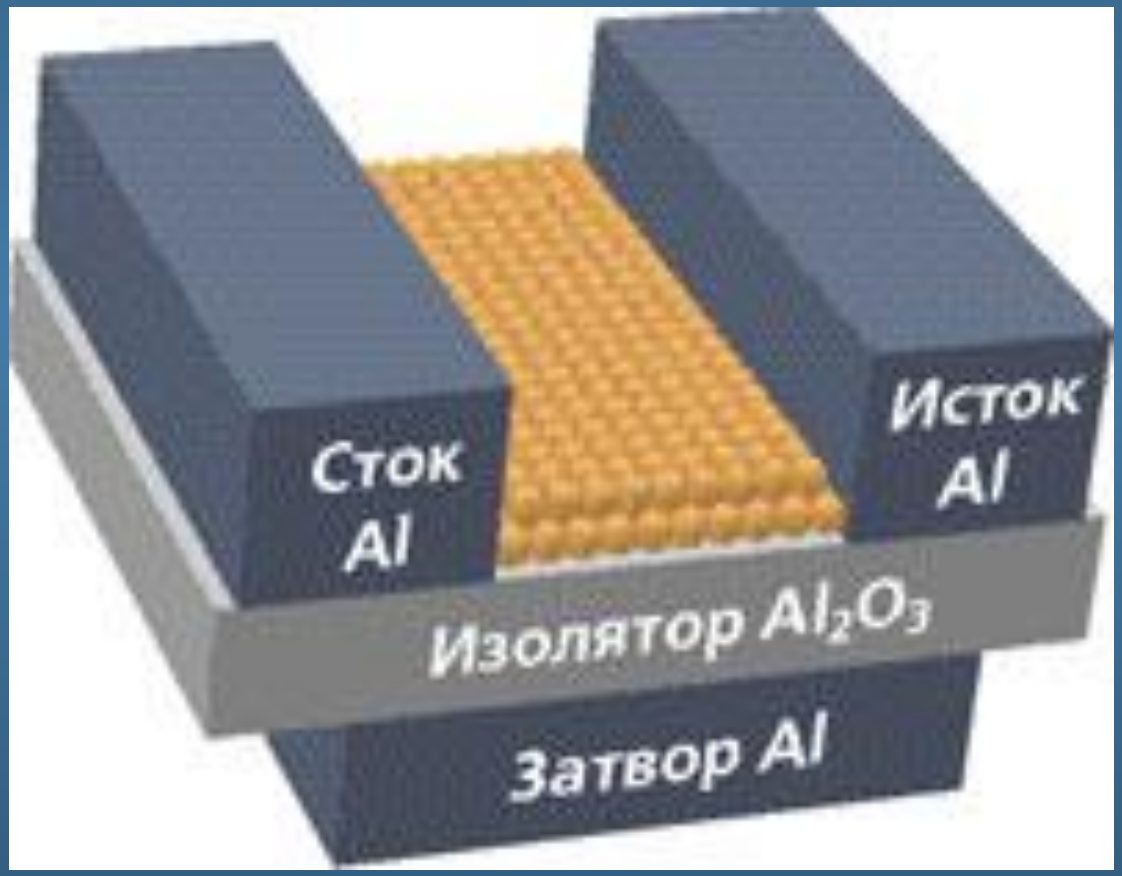
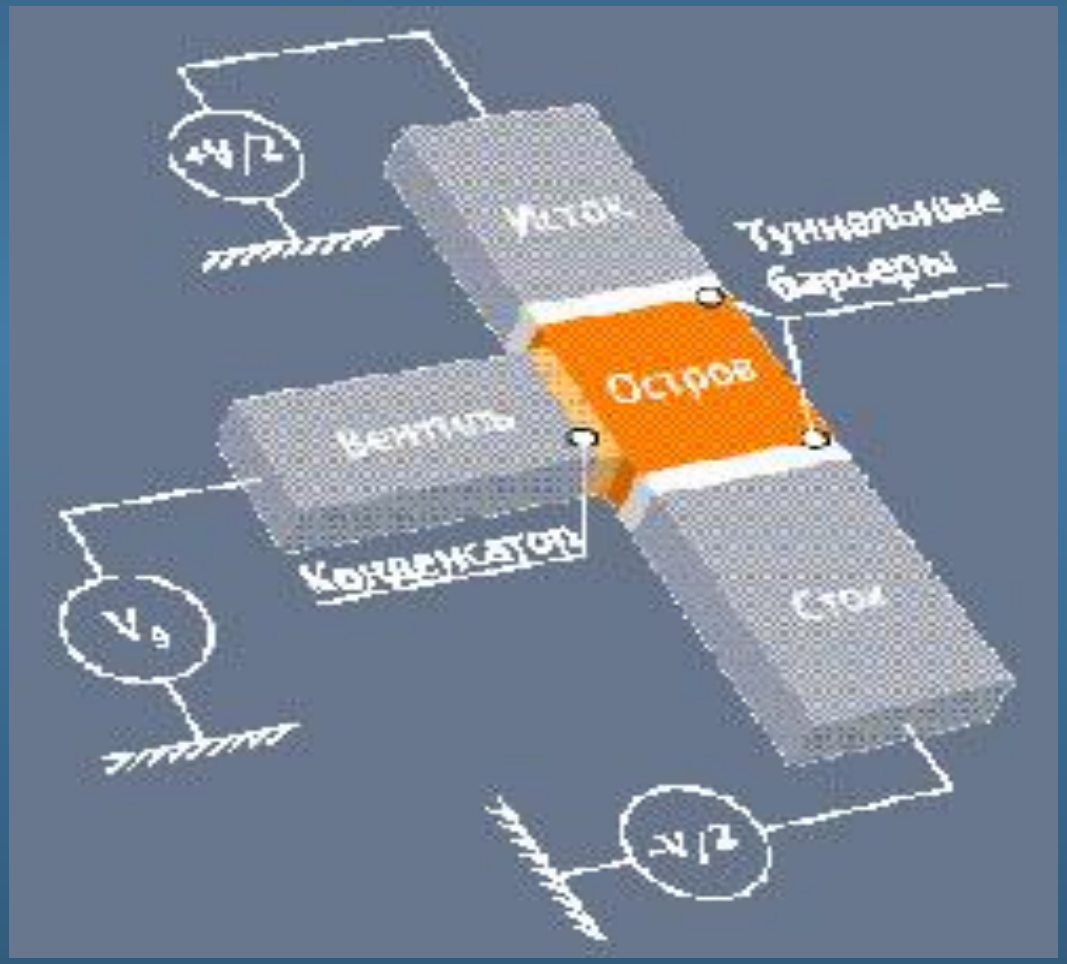


Однокристальная наносистема
(чип)



1 - преобразователи;
2 - оптические модуляторы;
3 - диэлектрические волноводы;
4 - оптические детекторы;
5 - спин-преобразователи;
6 – КМОП - устройства;
7-радиопередающие модули;
8 - наноэлектронные элементы;
9 - оптоволоконный кабель;
10 - кремниевая подложка, включающая высокоэффективный топливный элемент.

Транзистор нанометровых размеров на основе атомов металла с использованием окисла в качестве изолятора.



Одноэлектронный нанотранзистор, функционирующий при комнатной температуре.