МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ

В. А. Валетов

Основы производства радиоэлектронной аппаратуры

Учебное пособие

Санкт- Петербург

2007

Валетов В. А. Основы производства радиоэлектронной аппаратуры./
Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007-112с.

В данном учебном пособии излагаются традиционные технологии производства радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), где главное внимание уделено современным технологиям изготовления печатных плат. Отражены современные вопросы сборки элементов РЭА, а так же обоснованны направления и перспективы развития этих технологий.

Учебное пособие «Основы производства радиоэлектронной аппаратуры» предназначено для студентов и аспирантов, обучающихся по направлению «Приборостроение», оно так же полезно для преподавателей ведущих данную и аналогичные ей дисциплины.

Пособие, рекомендовано к печати советом факультета ТМиТ от 13.05.2007, протокол №10.

В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

© Санкт – Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2007

©В. А. Валетов, 2007

Оглавление

Глава 1 Традиционные технологии изготовления элементов приборов и систем
1.1 Введение 4
1.2 Типы полупроводниковых структур 5
1.3 Фотолитография 8
1.3.1 Подготовка поверхности 9
1.3.2 Нанесение фотослоя 10
1.3.3 Совмещение и экспонирование 13
1.3.4 Проявление 15
1.3.5 Травление 15
1.4.1 Напыление частицами 20
1.4.2 Физикохимия получения пленочных покрытий 22
1.5 Осаждение тонких плёнок в вакууме 25
1.5.1 Термическое вакуумное напыление 26
1.5.2 Распыление ионной бомбардировкой 30
1.6 Современное оборудование для изготовления РЭА 35
1.7 Электрический монтаж кристаллов ИМС на коммутационных платах. 41
1.7.1 Проволочный монтаж 42
1.7.2 Ленточный монтаж 43
1.7.3 Монтаж с помощью жестких объемных выводов 44
1.7.4 Микросварка 45
1.7.5 Изготовление системы объемных выводов 47
1.8 Типы печатных плат 48
1.8.1 Односторонние печатные платы 48
1.8.2 Двухсторонние печатные платы 50
1.8.3 Многослойные печатные платы 51
1.8.4 Гибкие печатные платы 56
1.8.5 Рельефные печатные платы (РПП) 57
1.9 Методы контроля печатных плат 60
1.9.1 Демонстрация основных особенностей 61
1.9.2 Электрический контроль 65
1.9.3 Тестовая система А2 67
1.10 Технологии настоящего и будущего 71
1.11 Струйная печать как способ изготовления электронных плат 73
Глава 2 . Нанотехнологии: сегодняшний день и перспективы развития
2.1 Введение 76
2. 2 Оборудование нанотехнологии 85
2.3 Наноэффекты в природе: удивительные лапки 94
2.4 Фуллерены и углеродные нанотрубки 96
2.5 Ультрадисперсные наноматериалы 102
2.6 Дальнейшее развитие нанотехнологий: проблемы и перспективы 105
2.7 Опасности, которыми не следует пренебрегать 107

Глава 1 . Основы производства радиоэлектронной аппаратуры

1.1 Введение

Современный научно-технический прогресс невозможен без радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), которая широко используется как при планировании и управлении производством, так и в автоматизации производственных процессов и в научных исследованиях. Технологии изготовления РЭА постоянно совершенствуются. В развитии радиоэлектронной аппаратуры можно выделить несколько этапов, характеризующих технологии и принципы изготовления РЭА.

Этапы развития РЭА (радио электронной аппаратуры).

1. Навесной монтаж (основные элементы: резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, электровакуумные (полупроводниковые) приборы).
2. Печатный монтаж (особенности: уменьшение габаритов РЭА и повышение ее надежности).
3. Интегральные микросхемы (особенности: непрерывное возрастание сложности, числа элементов, степени интеграции).

Каждый новый этап развития технологии изготовления РЭА не отрицал и не исключал ранее разработанную технологию и ранее применявшиеся элементы РЭА, а дополнял и обогащал ее, обеспечивал качественно новый уровень разработки, изготовления и эксплуатации аппаратуры. Поэтому при решении каждой конкретной задачи при выборе элементной базы и соответствующей ей технологии изготовления радиоэлектронного устройства необходимо учитывать достоинства и недостатки каждого поколения РЭА.

На первом этапе основными элементами РЭА были резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, электровакуумные и позже полупроводниковые приборы. Все эти элементы изготовляли в виде конструктивно законченных деталей, укрепляемых на шасси с помощью опорных поверхностей, а их выводы соединяли соответствующим образом проводниками с помощью пайки. В дальнейшем этот вид монтажа получил название навесного монтажа.

На втором этапе удалось уменьшить габариты РЭА и повысить ее надежность. В ходе развития печатного монтажа: в печатных платах сначала заменили резисторы токоведущими дорожками из материала с большим удельным электрическим сопротивлением, затем конденсаторы - разрывами в токоведущих дорожках, заполненными соответствующим диэлектриком. Такие платы получили название интегральных микросхем.

Появление интегральных микросхем открыло перед радиоэлектроникой практически неограниченные возможности. На рисунке 2.1 показаны отрасли применения печатных плат.

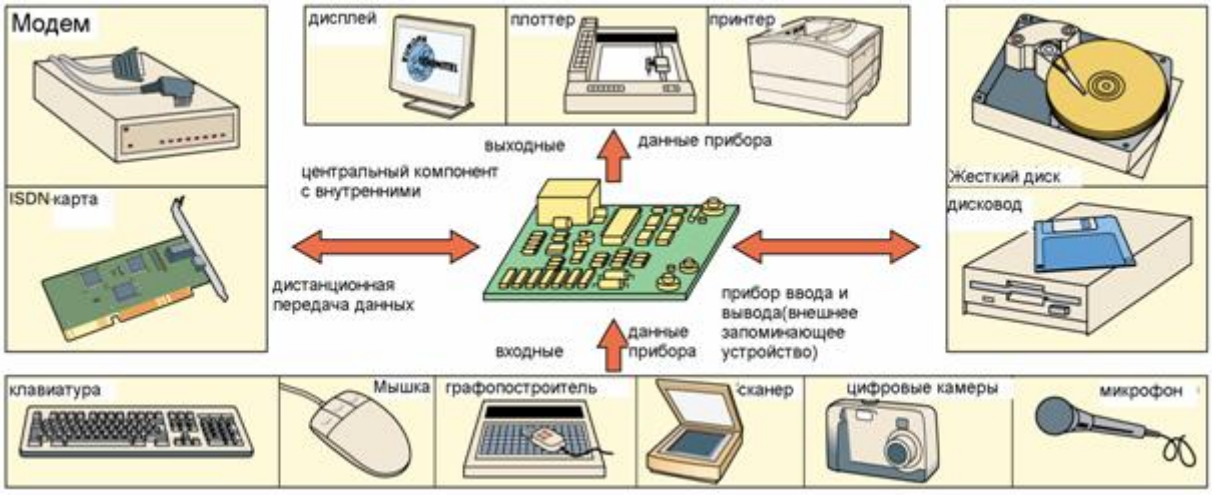


Рис. 1.1 Области применения печатных плат.

1.2 Типы полупроводниковых структур

Полупроводниковые структуры представляют собой весьма многочисленный класс материалов. В него входят сотни самых разнообразных веществ – как элементов, так и химических соединений. Полупроводниковыми свойствами могут обладать как неорганические, так и органические вещества, кристаллические и аморфные, твердые и жидкие, немагнитные и магнитные. Несмотря на существенные различия в строении и химическом составе, материалы этого класса роднит одно замечательное качество- способность сильно изменять свои электрические свойства под влиянием небольших внешних энергетических воздействий. Одна из возможных схем классификации полупроводниковых структур приведена на рис.1.2.

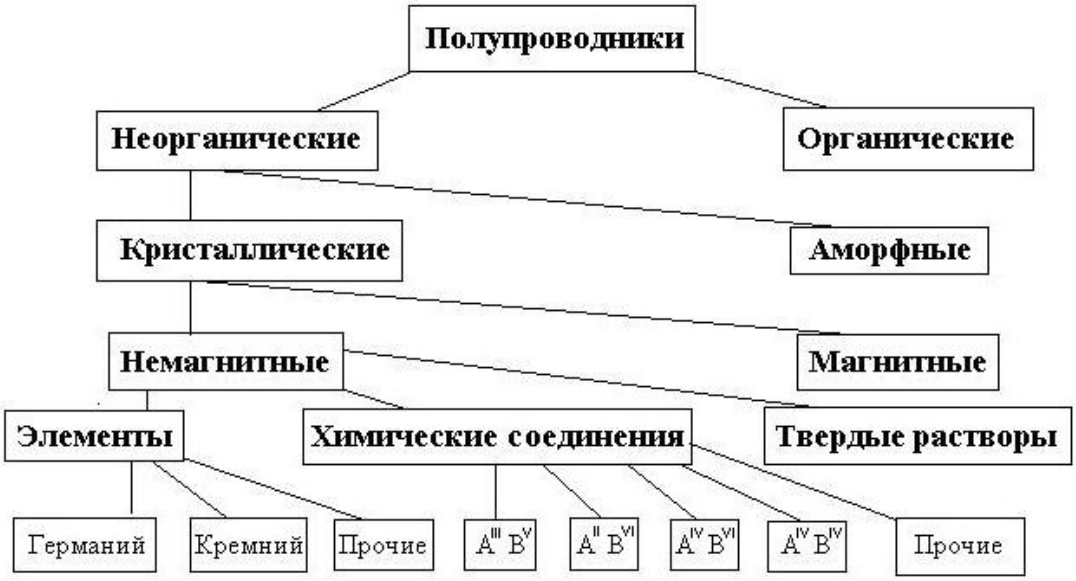


Рис.1.2 Схема классификации полупроводниковых структур.

Интерес к органическим полупроводникам вызван тем, что в некоторых из них полупроводниковые свойства сочетаются с эластичностью,

которая позволяет изготавливать рабочие элементы в виде гибких лент и волокон. В механизме электропроводности аморфных неорганических и кристаллических органических полупроводниковых структур выявлен ряд особенностей. Неорганические полупроводники подразделяются на аморфные и кристаллические. В свою очередь кристаллические полупроводники делятся на магнитные и немагнитные.

Магнитные полупроводниковые структуры

Магнитными полупроводниками называются соединения, которые обладают одновременно магнитным атомным порядком и полупроводниковыми свойствами.
Можно выделить следующие типы магнитных полупроводников:

1. Соединения редкоземельных элементов Eu, Gd с элементами 5-й и 6-й групп таблицы Менделеева: пниктиды (соединения с N, P, As) и халькогениды (соединения с O, S, Se, Te). Большинство этих материалов обладает широкой зоной проводимости (» 1,5 эВ, относительно высокой подвижностью (до 100 см 2 /В× с) в области низких температур) и малым числом свободных носителей заряда.
2. Хромо-халькогенидные шпинели с высокой подвижностью носителей, малой их концентрацией и несколько более узкой зоной проводимости. Типичными представителями этого класса являются: CdCr2, CdCr2Se4, CuCrSe3Br.
3. Ферриты-шпинели и ферриты-гранаты с избытком двухвалентных ионов железа, обладающие узкой зоной проводимости и низкими значениями подвижности носителей, например: R3Fe5O12, где R - Y3+, Sm3+.

Немагнитные полупроводниковые структуры в свою очередь делятся на элементы, химические соединения, твердые растворы.

Элементы

Германий. Этот элемент не так прочен, как титан или вольфрам. Он не может служить почти неисчерпаемым источником энергии, как уран или плутоний. Не свойственна ему и высокая электропроводность, сделавшая медь главным металлом электротехники. И не германий, а железо – главный элемент нынешней техники в целом. Тем не менее, этот элемент – один из самых важных для технического прогресса, потому что наряду с кремнием и даже раньше кремния германий стал важнейшим полупроводниковым материалом. Формально, полупроводник – это вещество с удельным сопротивлением от тысячных долей до миллионов Омов на 1 см. Рамки «от» и «до» очень широкие, но место германия в этом диапазоне совершенно

определенное. Сопротивление сантиметрового кубика из чистого германия при 18° С равно 72 Ом. При 19° С сопротивление того же кубика уменьшается до 68 Ом. Это вообще характерно для полупроводников – значительное изменение электрического сопротивления при незначительном изменении температуры. С ростом температуры сопротивление обычно падает. Оно существенно изменяется и под влиянием облучения, и при механических деформациях. На свойства германия сильно влияют даже ничтожные количества примесей. Добавка элемента V группы позволяет получить полупроводник с электронным типом проводимости. Так готовят ГЭС (германий электронный, легированный сурьмой). Добавив же элемент III группы, мы создадим в нем дырочный тип проводимости (чаще всего это ГДГ – германий дырочный, легированный галлием).

Химические соединения

Весьма обширна группа полупроводниковых неорганических соединений, которые могут состоять из двух, трех и большего числа элементов. Кристаллическая структура многих соединений характеризуется тетраэдрической координацией атомов, как это имеет место в решетки алмаза. Такие полупроводниковые соединения получили название *алмазоподобных полупроводников*. Среди них наибольший научный и практический интерес представляют бинарные соединения типа AIII BV , которые в настоящее время являются важнейшими материалами полупроводниковой оптоэлектроники. Эти соединения являются ближайшими электронными аналогами кремния и германия. Они образуют в результате взаимодействия элементов III-б подгруппы Периодической таблицы (бора, алюминия, галлия, индия) с элементами V-б подгруппы (азотом, фосфором, мышьяком и сурьмой). Многообразие свойств полупроводников типа А, В обуславливает их широкое применение в приборах и устройствах различного технического назначения. Особый интерес к этой группе материалов был вызван потребностями оптоэлектроники в быстродействующих источниках и приемниках излучения. Существенными преимуществами таких приборов являются малые габаритные размеры, простота конструкции, возможность внутренней модуляции излучения путем изменения управляющего напряжения, совместимость с элементами интегральных микросхем по рабочим параметрам и технологическим операциям.

Твердые растворы

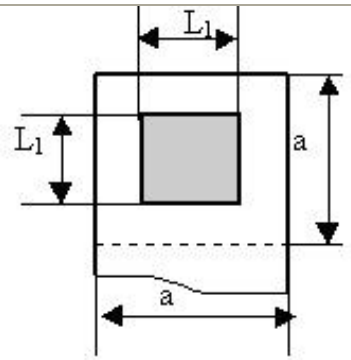
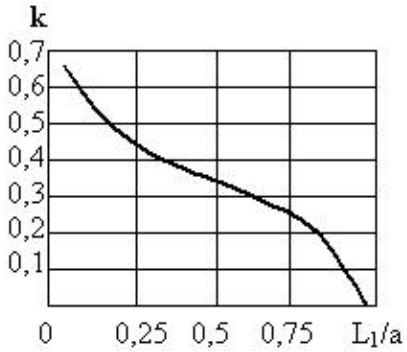
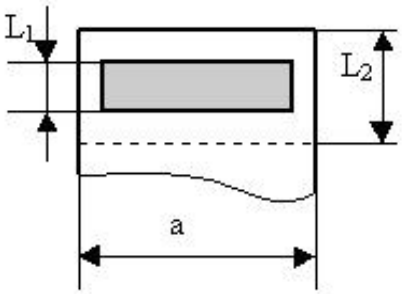
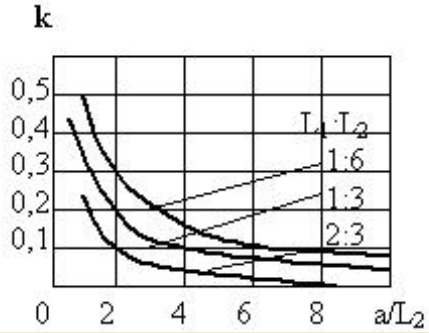
Большинство алмазоподобных полупроводников с родственными свойствами образуют между собой изовалентные твердые растворы. В твердых растворах путем изменения состава можно плавно и в

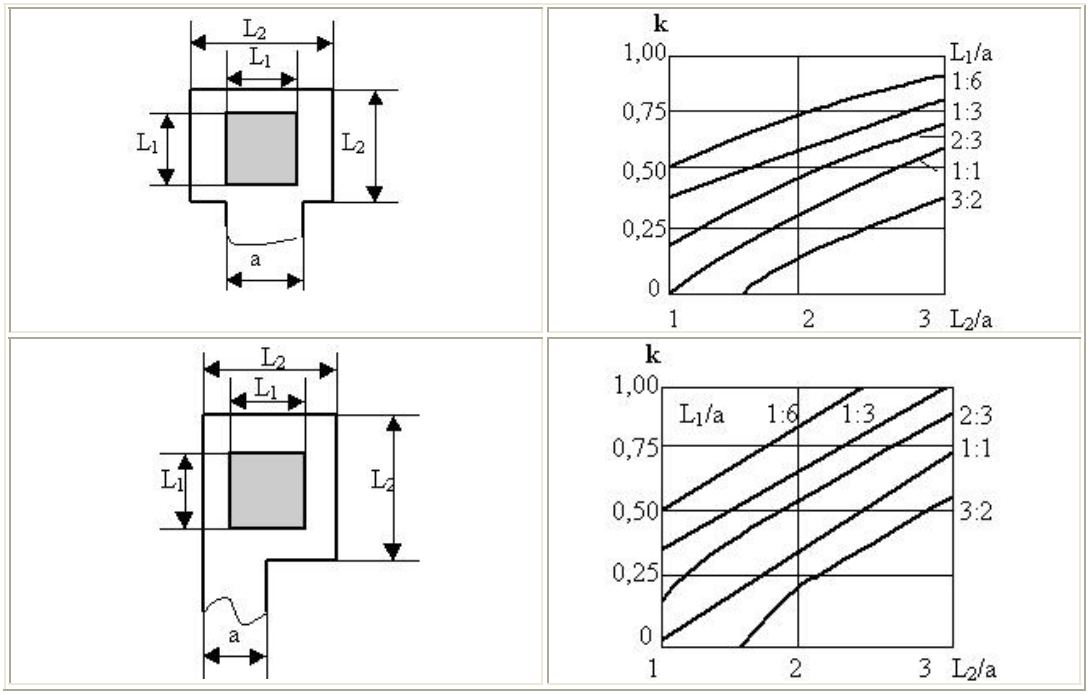
достаточно широких пределах управлять важнейшими свойствами полупроводников, в частности, шириной запрещенной зоны и подвижностью носителей заряда. Это открывает дополнительные возможности для оптимизации параметров полупроводниковых приборов, позволяет добиться лучшего согласования физических характеристик различных компонентов электронной аппаратуры.

1.3 Фотолитография

Процессы легирования, а также наращивания слоёв различных материалов призваны сформировать вертикальную физическую структуру ИМС. Необходимые форма и размеры элементов и областей в каждом слое структуры обеспечиваются процессом фотолитографии.
Фотолитография - процесс избирательного травления поверхностного слоя с использованием защитной фотомаски.
На рис. 1.3 приведена укрупнённая структурная схема процесса фотолитографии. Отдельные этапы на схеме включают в себя несколько операций. Ниже в качестве примера приведено описание основных операций при избирательном травлении оксида кремния (SiO_2), которое используется многократно и имеет целью создание окон под избирательное легирование, а также контактных окон.

Таблица 1. Формы приконтактных областей полупроводниковых резисторов и номограммы для определения коэффициента k.

Топология приконтактных областей полупроводниковых резисторов	Номограммы для определения коэффициента k.
	
	



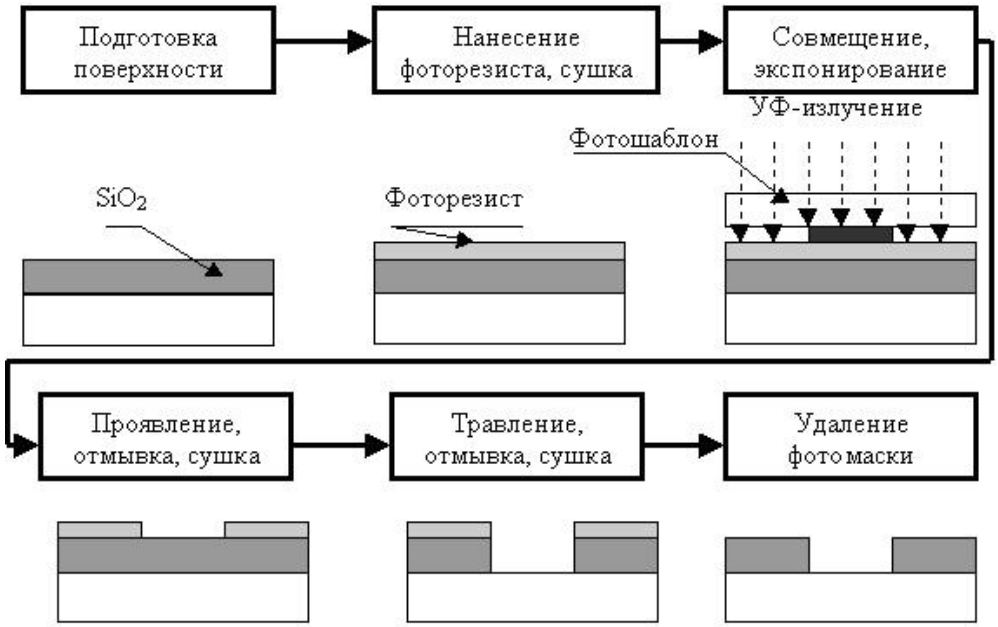


Рис. 1.3 Укрупненная схема процесса фотолитографии.

1.3.1 Подготовка поверхности

Сырьем для изготовления полупроводниковых пластин служит химически чистый кремний. Его получают из кварца, т.е. двуокиси кремния, путем восстановления с использованием углерода. Подготовка поверхности к нанесению фотослоя заключается в её обработке парами органического растворителя для растворения жировых плёнок, которые препятствуют последующему сцеплению фоторезиста с поверхностью. Отмывка сверхчистой (деионизованой) водой удаляет следы растворителя; а также микрочастицы, способные

впоследствии образовать "проколы" в тонком (≈1 мкм) слое фоторезиста.

Рис.1.4 Получение и подготовка кремниевой пластины.

1.3.2 Нанесение фотослоя

При нанесении фотослоя используется раствор светочувствительного полимера в органическом растворителе (фоторезист). Для получения тонких слоёв фоторезиста на поверхности пластины его вязкость должна быть очень мала, что достигается высоким содержанием растворителя (80-95 % по массе). В свою очередь, с уменьшением толщины фотослоя повышается разрешающая способность фотолитографического процесса. Однако, при толщинах менее 0,5 мкм плотность дефектов ("проколов") в фотослое резко возрастает, и защитные свойства фотомаски снижаются.
Нанесение фотослоя может быть выполнено одним из двух способов: центрифугированием или распылением аэрозоля. В случае использования центрифуги дозированное количество фоторезиста подаётся в центр пластины, прижатой вакуумом к вращающейся платформе (центрифуге). Жидкий фоторезист растекается от центра к периферии, а центробежные силы равномерно распределяют его по поверхности пластины, сбрасывая излишки в специальный кожух. Толщина h нанесённой плёнки зависит от скорости вращения платформы *w* , от вязкости фоторезиста *v* и определяется соотношением:

$$h = k\sqrt{\nu/\omega} \qquad (1)$$

где k - коэффициент, устанавливаемый экспериментально.

Скорость вращения центрифуги около 6000 об/мин, толщина фотослоя регулируются подбором соответствующей вязкости, т.е. содержанием растворителя.
Для центрифугирования характерны следующие недостатки:

1. Трудность получения относительно толстых (в несколько микрометров) и равномерных плёнок из-за плохой растекаемости вязкого фоторезиста;
2. Напряжённое состояние нанесённой плёнки, что приводит на этапе проявления к релаксации участков фотомаски и изменению их размеров;
3. Наличие краевого утолщения как следствие повышения вязкости в процессе выравнивания, что ухудшает контакт фотошаблона с

фотослоем;

4. Трудность организации одновременной обработки нескольких пластин.

При распылении аэрозоли фоторезист подаётся из форсунки на пластины, лежащие на столе, совершающем возвратно-поступательное движение. Необходимая толщина формируется постепенно. Отдельные мельчайшие частицы растекаются и, сливаясь, образуют сплошной слой. При следующем проходе частицы приходят на частично просохший слой, несколько растворяя его. Поэтому время обработки, которое зависит от вязкости, расхода и "факела" фоторезиста, от скорости движения стола и расстояния от форсунки до подложки, устанавливается экспериментально. При реверсировании стола крайние пластины получат большую дозу фоторезиста, чем центральные. Во избежание утолщения слоя на крайних пластинах форсунке также сообщается возвратно-поступательное вертикальное движение (синхронно с движением стола). При торможении стола в конце хода форсунка поднимается вверх и плотность потока частиц в плоскости пластин снижается.

Технические характеристики установки нанесения фоторезиста центрифугированием типа АФФ-2 следующие:

Диаметр обрабатываемых пластин, мм	60 и 75
Шаг расположения пластин на патроне, мм	9,5
Производительность, пластин/ч	500
Частота вращения центрифуги, об/мин:	
в режиме растекания фоторезиста	60—600
в режиме формирования пленки	600—6000
Время центрифугирования, с:	
в режиме растекания фоторезиста	1—10
в режиме формирования пленки	10—60
Температура в термокамере, °С	(80—180)±5
Время нагрева, мин	2—30
Давление рабочего газа в термокамере, Па	$(4\div6)\cdot10^5$
Давление в форвакуумной магистрали, Па	$\leq10^4$
Расход сжатого воздуха, $м^3$/ч	≤1
Расход воды, л/ч	≤100
Максимальная потребляемая мощность, кВт	5
Размеры, мм	2800X1000X2500
Масса, кг	900

Технические характеристики полуавтомата нанесения фоторезиста распылением следующие:

Производительность, пластин/ч	до 500
Число одновременно обрабатываемых пластин Скорость перемещения, мм/с:	до 15
Форсунки	100—150
Стола	10—25
Напряжение питания, В	380 (50 Гц)
Потребляемая мощность, кВт	2
Размеры, мм	1000X1800X1200
Масса, кг	430

Распыление аэрозоли лишено недостатков центрифугирования, допускает групповую обработку пластин, но предъявляет более жёсткие требования к чистоте (отсутствие пыли) окружающей атмосферы.
Нанесение фоторезиста и последующая сушка фотослоя являются весьма ответственными операциями, в значительной степени определяющими процент выхода годных микросхем.
Пылевидные частицы из окружающего воздуха могут проникать в наносимый слой и создавать микродефекты. Нанесение фотослоя должно выполняться в условиях высокой обеспыленности в рабочих объёмах (боксах, скафандрах) 1 класса с соблюдением следующей нормы: в 1 литре воздуха должно содержаться не более четырёх частиц размером не более 0,5 мкм.
При сушке нанесённого слоя в слое могут сохраниться пузырьки растворителя, а при выходе на поверхность слоя они могут образовать микротрещины. Поэтому сушка выполняется с помощью источников инфракрасного излучения, для которого фоторезист является прозрачным, а, следовательно, поглощение излучения с выделением тепла происходит на границе " пластина - фоторезист ". Следовательно, сушка протекает от нижних слоёв фоторезиста к верхним, обеспечивая свободное испарение растворителя. Во избежание преждевременной полимеризации (задубления) фоторезиста и потери им чувствительности температура сушки должна быть умеренной (≈100÷120°С).
Перечисленные виды дефектов фотослоя (пылевидные частицы, микропузырьки и микротрещины) сохраняются в фотомаске и наследуются оксидной маской, создавая в ней микроотверстия. При использовании оксидной маски для избирательного легирования примесь будет проникать через них, образуя легированные микрообласти и, как следствие, токи утечки и пробои в p-n-переходах. Если оксидная маска представляет собой слой контактных окон, то металл, проникая в микроотверстия, может привести к паразитным связям между областями и коротким замыканиям. Характеристики некоторых марок фоторезистов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры некоторых типов фоторезистов.

Марка фото-резиста	Тип	Разрешающая способность, лин/мм, при толщине слоя 1 мкм	Цвет
ФП-383	Позитивный	400	Оранжевый
ФП-617П	Позитивный	500	Темно-коричневый
ФН-106	Негативный	200	Желтый
ФН-108	Негативный	400	Оранжевый

1.3.3 Совмещение и экспонирование

Под совмещением перед экспонированием понимается точная ориентация фотошаблона относительно пластины, при которой элементы очередного топологического слоя (на фотошаблоне) занимают положение относительно элементов предыдущего слоя (в пластине), предписанное разработчиком топологии. Например, фотошаблон, несущий рисунок эмиттерных областей должен быть точно ориентирован относительно пластины, в которой уже сформированы базовые области.

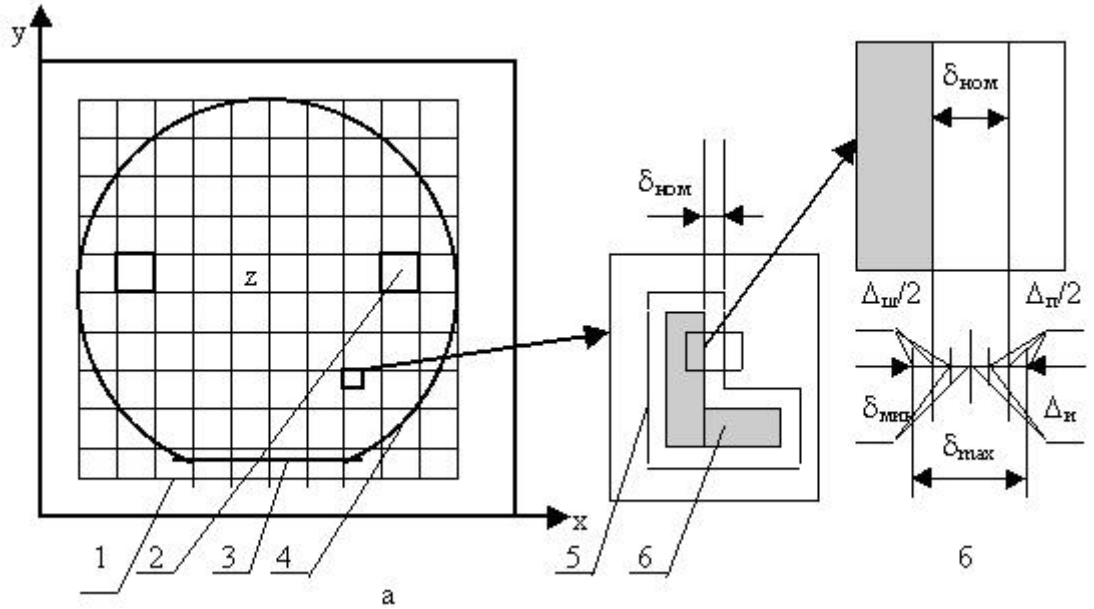


Рис.1.5 Совмещение фотошаблона с пластиной: а - общая схема совмещения: 1 - групповой фотошаблон; 2 - модули для грубого совмещения; 3 - базовый срез на пластине для предварительной ориентации; 4 - групповая пластина; 5 - знак совмещения в модуле пластины; 6 - знак совмещения в модуле шаблона; б - схема для расчета номинального зазора между знаками совмещения.

Процесс совмещения включает три этапа (рис. 2.5,а):

1. Предварительная ориентация по базовому срезу, обеспечивающую на границах модулей групповой пластины наивыгоднейшую кристаллографическую плоскость с точки зрения качества разделения пластины на отдельные кристаллы;
2. Предварительное грубое совмещение по границам крайних модулей, имеющее целью исключить разворот пластины и

фотошаблона относительно вертикальной оси Z;

3. Точное совмещение, исключающее смещение рисунков фотошаблона и пластины по осям X и Y.

Для точного совмещения используют специальные знаки совмещения с контролируемым зазором, которые входят в состав топологических рисунков соответствующих слоёв. Совмещение считается выполненным, если при введении одного знака внутрь другого по всему контуру просматривается зазор.

Номинальным зазором называется равномерный по всему контуру зазор, который образуется при номинальных (проектируемых) размерах знаков и их точном совмещения (центрировании). Из рис. 2.5,б следует, что

$$\delta_{ном} - \delta_{\min} + \Delta_и + \left(\Delta_ш + \Delta_п\right)/2 \qquad (2)$$

где d min =200/Г - предельное разрешение системы "глаз - микроскоп" (200 мкм - линейное разрешение нормального глаза; Г - кратность увеличения микроскопа); D и - абсолютная предельная погрешность фиксации изображения на установке совмещения и экспонирования; D ш и D п - абсолютная предельная погрешность размера знака соответственно на шаблоне и пластине (D ш < D п);

Таким образом, в зависимости от фактических значений случайных погрешностей, реальный зазор может колебаться в пределах от d max до d min , а абсолютная предельная погрешность совмещения D с для контролируемого модуля групповой пластины:

$$\Delta_c = \delta_{\max} - \delta_{\min} = \Delta_п + \Delta_ш + \Delta_и \qquad (3)$$

Для совокупности модулей в партии групповых пластин:

$$\Delta_c = \Delta_п + \Delta_ш + \Delta_и + \Delta_t + \Delta_{доб} \qquad (4)$$

где D t - абсолютная предельная погрешность шага расположения модулей на групповом фотошаблоне; D доб - дополнительное расширение зазора, которое может предусматриваться для снижения зрительного напряжения оператора.

Погрешность совмещения учитывается при расчёте размеров областей каждого слоя. Обычно фотошаблон очередного слоя совмещается с предыдущим (по ходу технологического процесса) слоем, уже сформированном на пластине. В частности, слой контактных окон совмещается с эмиттерным слоем, а слой металлизации - со слоем контактных окон. Поскольку контактные окна и металлические контакты формируются одновременно для всех областей структуры, погрешность совмещения накапливается и для эмиттерных областей входит в размер величиной 4 D с , для базовых областей - 6 D с , для коллекторных - 8 D с . Поэтому совершенствование процессов литографии (уменьшение D ш и D п) и применяемого оборудования (D и и D t)является важной и

постоянной задачей конструкторов и технологов. Влияние погрешности совмещения на размеры областей рассмотрено ниже на примере расчёта размеров эмиттерной области транзистора.
После выполнения совмещения микроскоп отводится, а на его место подводится осветитель, жёстко связанный с микроскопом на каретке (или поворотной турели). Оператор включает осветитель одновременно с реле времени, которое контролирует время экспонирования.

1.3.4 Проявление

Проявление скрытого изображения для негативных фоторезистов заключается в обработке фотослоя органическим растворителем. При этом участки, не подвергшиеся облучению, растворяются, а облучённые участки, где при поглощении ультрафиолетового излучения происходит разрыв межатомных связей и перестройка структуры (фотополимеризация), сохраняются.
В позитивных фоторезистах на участках, подвергшихся облучению, происходит разрушение структуры (деструкция) с образованием кислоты. Для перевода её в растворимые слои применяют раствор неорганического соединения со щелочными свойствами (KOH, NaOH и др.).
После отмывки от следов проявителя и сушки полученную фотомаску подвергают тепловому задубливанию (120÷180°С в зависимости от марки фоторезиста), в результате чего окончательно формируются её защитные свойства.

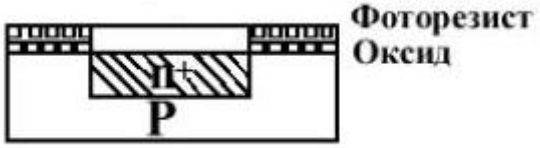


Рис.1.6 Удаление засвеченного фоторезиста и находящегося под ним оксидного слоя.

1.3.5 Травление

При травлении в жидких травителях используются водные растворы неорганических соединений (обычно кислот). Химический состав и концентрация травителя в растворе подбирается так, чтобы поверхностный слой растворялся активно, а нижележащий не растворялся. С травлением в жидких травителях связано не только явление подтравливания под фотомаску, но и разброс величины подтравливания в совокупности элементов одного слоя. К моменту окончания растворения слоя в "окне" фотомаски боковое травление оказывается примерно равным толщине слоя (рис. 1.7), однако

момент окончания травления зависит от размеров вытравливаемого элемента (окна в маске).

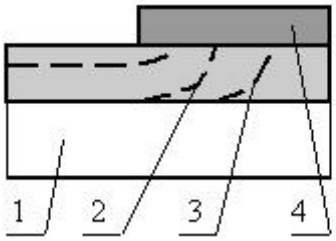


Рис. 1.7 Боковое подтравливание под фотомаску: 1 - пластина; 2 - фронт травления при нормальном режиме; 3 - фронт травления при «перетравливании»; 4 – фотомаска.

В процессе травления имеют место отвод продуктов химической реакции от поверхности в раствор и подвод из раствора свежего травителя. Оба процесса протекают благодаря взаимодиффузии, скорость, которой и определяет скорость травления. В мелких элементах массообмен затруднён и скорость травления ниже, чем в крупных элементах. Поскольку технологическое время травления устанавливают по самому мелкому элементу, более крупные элементы получают "перетрав", т.е. большие погрешности размера.

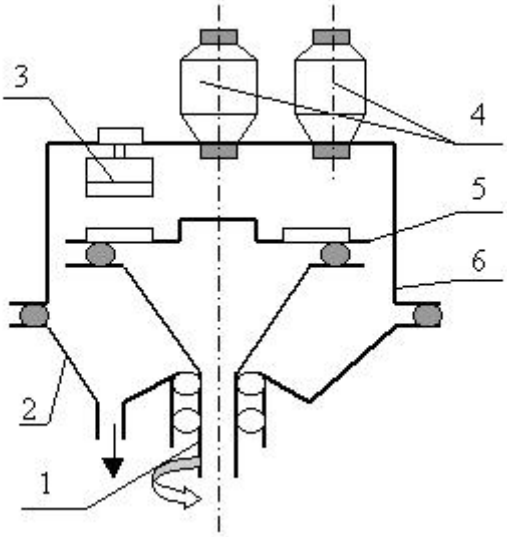


Рис. 1.8 Схема установки травления, отмывки и сушки: 1 – полный ротор; 2 – днище камеры с отверстием; 3 – форсунка сушки; 4 – форсунки травления и отмывки; 5 – платформа с пластинами; 6 – съемная крышка.

Для повышения точности травления, т.е. уменьшения разброса размеров элементов из-за растрава, необходимо динамическое воздействие травителя на обрабатываемую поверхность. На рис. 1.8 приведена схема установки на основе центрифуги, снабжённой тремя форсунками для последовательного травления, отмывки (деионизированной водой) и сушки (подогретым воздухом). Форсунка для травителя обеспечивает ускоренную подачу свежего травителя к поверхности, вытесняя продукты реакции, а центробежные силы

ускоряют отвод отработанного травителя. В таблице 3 приведены применяемых при производстве интегральных микросхем типы травителей.

Таблица 3. Травители для некоторых материалов.

Ag— г.к. H_2SO_4, HNO_3	Pt— "царская водка"
Al— рз. щелочи, г. H_3PO_4	Si— HNO_3+HF
Au— "царская водка" (к HCl:HNO_3=3:1)	SiO_2— рз. HF
Cr—HCl, H_2SO_4, г. HNO_3	Si_3N_4— г. H_3PO_4, к. HF
Cu— г.к. H_2SO_4, HNO_3	Ta— HF
Mo— г.к. H_2SO_4, г. HNO_3, "царская водка"	Ti— щелочи, HF, рз. кислоты
Ni— рз. Кислоты	V— HF, HNO_3, "царская водка", г.к H_2SO_4
Pd— HNO_3, г.к. H_2SO_4, "царская водка"	W—"царская водка", HNO_3+HF

Примечание: к- концентрированная; рз- разбавленная; г- горячая.

Существенное повышение точности травления достигается при использовании вакуум-плазменных ("сухих") методов травления, при которых разрушение слоя происходит механически за счёт бомбардировки потоком заряженных частиц (ионов инертного газа). С этой целью в вакуумной камере при давлении газа 1÷10 Па зажигается разряд, и обрабатываемая пластина в качестве катода подвергается обработке ионами с энергией до 1 кэВ. Структура полимерной фотомаски и её толщина сохраняют её защитные свойства до окончания обработки слоя. Поскольку движение ионов инертного газа (обычно аргона) происходит по нормали к поверхности пластины, вытравленные участки точно соответствуют размерам окон фотомаски, т.е. эффект подтравливания отсутствует.

1.4 Материалы для изготовления тонкопленочных и толстопленочных схем

В зависимости от способа формирования пленочных элементов гибридные ИС подразделяются на тонкопленочные и толстопленочные. Различные типовые технологические процессы тонкопленочной технологии (масочный, фотолитографический, комбинированный и другие) обеспечивают формирование пленочных элементов в широком диапазоне значений их параметров с достаточно высокой точностью и воспроизводимостью. Технология (тонкопленочная или толстопленочная) предопределяет не только возможность реализации пленочных элементов с требуемыми номинальными значениями их параметров, но и воспроизводимость этих параметров. Степень интеграции гибридных ИС, изготавливаемых по тонкопленочной технологии, выше по сравнению с толстопленочными. В то же время стоимость гибридных ИС, изготовляемых по толстопленочной технологии, низкая. Толстопленочную технологию целесообразно применять при

разработке ИС, работа которых сопровождается большим выделением теплоты. Для организации их производства требуются меньшие капитальные затраты (проще оборудование, менее жесткие требования к производственным помещениям). Толстопленочная технология также позволяет формировать элементы с различным значением параметров. Однако точность и воспроизводимость значений параметров низкие. Вид технологии определяет материал и размер платы. Кроме того, толстопленочные ИС обладают большей механической прочностью, имеют лучшую коррозионную и теплоустойчивость, повышенную перегрузочную способность элементов. Тонкопленочные ИС отличаются тем, что без подгонки можно получать более узкие допуски на номиналы элементов (резисторов и конденсаторов), достигается более высокая плотность размещения элементов на подложке. Они обладают меньшими высокочастотными потерями и имеют более высокую радиационную стойкость (за счет использования меньшей номенклатуры химических элементов с большей атомной массой).

В аналоговых системах повышенной сложности, где требуется высокая стабильность резисторов, предпочтительнее использовать тонкопленочные гибридные ИС, которое требует значительного производства, также определяют выбор типа пленок. Если требуется небольшое количество изделий, то нецелесообразно создавать производство тонкопленочных ИС, которое требует значительно больших затрат, и предпочтение следует отдать толстопленочной технологии.

Пленочные материалы для электронной техники можно классифицировать с различных точек зрения. Например, могут быть, исходя из их толщины: тонкие (до 1 мкм), толстые пленки или покрытия (10 мкм и более), а также образования промежуточные или средней толщины. Тонкие пленки в пределе приближаются к двухмерным объектам и их свойства во многом определяются свойствами поверхности и явлениями, на ней происходящими. Толстопленочные покрытия в значительной мете характеризуются объёмными процессами и сходны, поэтому с керамическими или монокристаллическими материалами. С точки зрения пространственной кристаллографической ориентации в технике используются как неориентированные пленки (Рисунок 1.9, а.), в частности, на керамических или стеклообразных подложках, так и покрытия, обладающие ориентацией (Рисунок 1.9, б.), практически соответствующей кристаллографической оси носителя, т.е. близкие по свойствам к монокристаллам. Промежуточное положение занимают текстурированные пленки, имеющие преимущественную ориентацию кристаллитов (Рисунок 1.9, в.), что сходно со строением текстурированных керамических материалов.

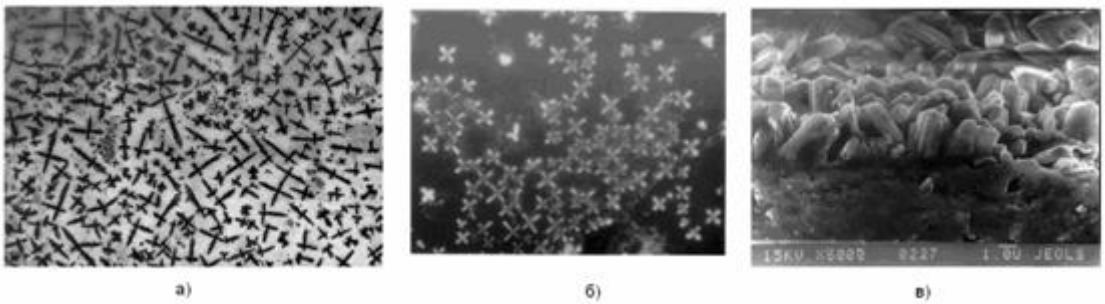


Рисунок 1.9 Примеры ориентации кристаллитов в пленках: а) - неориентированные кристаллиты; б) - ориентированные кристаллиты в пленке на монокристаллической подложке; в) - текстурированная пленка сложного оксида на монокристаллической подложке.

Пленки могут быть, кроме того, компактными высокоплотными (Рисунок 1.10, а.), что имеет значение для таких изделий, как пленочные волноводные устройства для СВЧ техники, катодные материалы газовых лазеров и пр. Другой вариант пленочных материалов – это пленки с высокоразвитой поверхностью (Рисунок 1.10, б.), мелкодисперсными кристаллитами или аморфизированные, их применение связано с хорошими каталитическими, сорбционными характеристиками, например для регенерации газовых сред разрядных приборов типа газовых лазеров, поддержания определенных допустимых концентраций летучих веществ во внутренних объёмах и полостях различных приборов и устройств электронной техники.

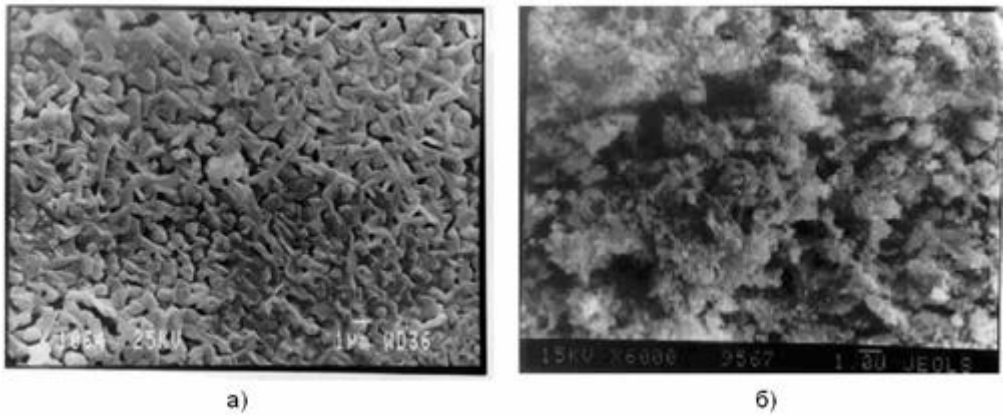


Рис. 1.10 Примеры: а) - компактная пленка сложного оксида; б) - пленка сложного оксида с развитой поверхностью.

В зависимости от назначения пленок их заданные функциональные параметры могут быть различными, однако, есть ряд общих характеристик и требований, присущих всем пленочным материалам. К таковым относятся:

1. Равнотолщинность;
2. Адгезионная и когезионная прочность (хорошее сцепление с подложкой и устойчивость к разрушению по границам кристаллических блоков);

3. Заданный химический и фазовый состав (вспомним, что это разные вещи);
4. Размер зерен или блоков, состояние их границ;
5. Ориентация кристаллитов.

Методы получения пленок подразделяются на т.н. физические (PVD – Physical Vapour Deposition), химические (CVD), где реализация процесса напыления связана с переводом вещества и его выделением на подложке в ходе химической реакции. Среди химических методов получения пленок последнее время довольно широко развивается т.н. метод спрей-пиролиза аэрозолей, включающих термически разлагающиеся соли соответствующих компонентов сложных или простых оксидов.

1.4.1 Напыление частицами

Напыление нейтральными частицами

(Выбиваемыми из распыляемой мишени ускоренным потоком заряженных ионов, например, Ar+; диодные и триодные (с дополнительным ускоряющим и управляющим электродом) системы; магнетроны (устройства, где на скрещенные электрическое и магнитное поле накладываются сверхвысокочастотные (СВЧ) колебания, что приводит к образованию сложных спиралевидных траекторий заряженных частиц, которые имеют возможность разогнаться до высоких энергий); ионно-лучевое распыление.

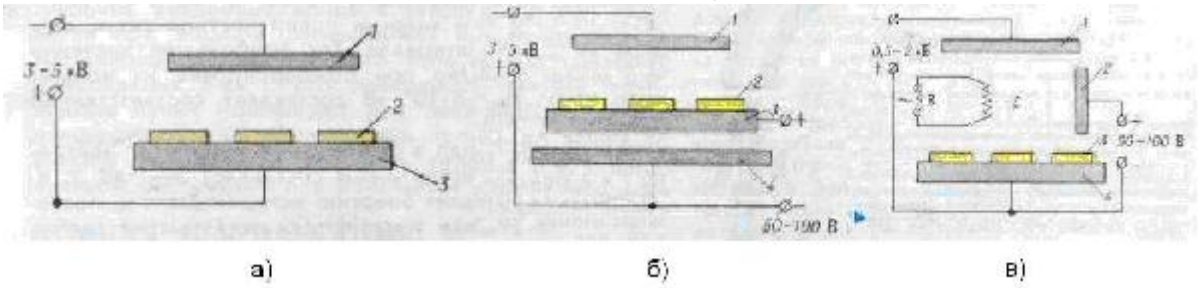


Рис.1.11 Схемы "катодного" и "триодного" напыления пленок нейтральными частицами. а) - "диодное" распыление.1 - катод-мишень, 2 - подложка, 3 - подложкодержатель, 4 – анод; в) - "триодное" распыление, 1 - катод-мишень, 2 - вспомогательный анод, 3 - подложка, 4 - анод-подложкодержатель, 5 - вспомогательный катод (термоэмитер электронов).

Напыление заряженными частицами

Которые разряжаются на подложках в процессе нанесения:
1. Тлеющий разряд;
2. Магнетронный разряд;

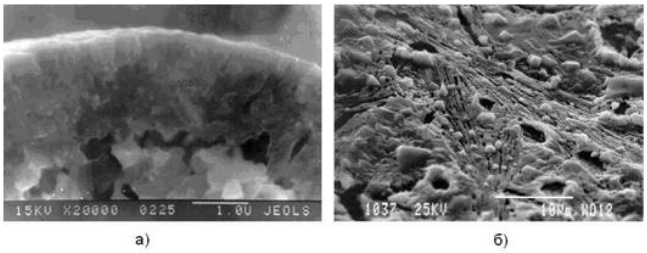
3. Дуговой разряд.

Термическое напыление

1. Собственно термическое распыление материалов;
2. Пламенное;
3. Взрывное;
4. Световая дуга;
5. Плазменное.

К подложкам для получения пленок предъявляются требования, которые можно классифицировать как требования по механической шероховатости; (различные виды механической прочности; твердость; коэффициент термического расширения и др.), по процессам их чистки перед нанесением пленок; индифферентность по отношению к материалу пленки в ходе её нанесения и эксплуатации или наоборот способность к необходимому для получения заданных свойств композиции химическому взаимодействию с пленкой, т.е. образованию твердых растворов, поверхностных фаз и пр.), по свойствам (температура плавления, рекристаллизации, которые не должны как правило происходить в ходе термообработки пленок), получения качественных ориентированных покрытий чаще всего необходимо достаточно близкое совпадение параметров кристаллической решетки подложки и пленки).

Подложки при нанесении пленок оказывают не только кристаллографическое ориентирующее действие, но и топологическое, связанное с кривизной поверхностных неровностей подложек. Т.к. над выпуклой поверхностью микровыступов давление паров выше, а кристаллиты новой фазы могут иметь ось быстрого роста, то при конденсации вещества кристаллиты могут быть ориентированы одной из своих кристаллографических осей по нормали к этим локальным выступам рельефа (Рисунок 1.12, а.) кристаллитов при наличии жидкой фазы. Данное явление используют практически для синтеза текстурированных или даже близких к эпитаксиальным пленок. Получение кристаллографической ориентации на искусственно созданных микрошероховатостях заданного профиля на подложках получило название графоэпитаксии (Рисунок 1.12, б.)



а) б)

Рис.1.12 Примеры ориентации кристаллитов и графоэпитаксии сложнооксидной пленки: а) - кристаллиты ориентированы; б) - пример графоэпитаксии.

1.4.2 Физикохимия получения пленочных покрытий

Получение пленочных покрытий сопровождается рядом специфических явлений, из них следует выделить последовательность процессов формирования пленок.

- Процесс получения пленок начинается с осаждения (адсорбции) т.н. адатомов. В условиях равновесия с газовой средой количество сорбируемых в единицу времени атомов, молекул или ионов равно количеству десорбируемых. Местами на поверхности подложки, где в первую очередь происходит сорбция, являются участки локальных энергетических максимумов, например, узлы кристаллической решетки, что приводит к наиболее существенному выигрышу уменьшения свободной энергии поверхности. Силами, удерживающими частицы, могут быть в зависимости от их природы и характера поверхности дисперсионные взаимодействия Ван-дер-Ваальса, химические – ковалентные или ионные. Адатомы могут быть как фиксированными (при высоких энергиях связи с подложкой), так и подвижными, т.е. перемещаться от одного локального энергетического максимума к другому за счет градиента, например, химического потенциала. Последнее явление облегчает протекание последующих стадий образования пленки.
- Далее возникают за счет ассоциации нескольких адатомов двухмерные островковые неструктурные образования, которые также в принципе могут обладать подвижностью. В условиях равновесия могут иметься докритические и сверхкритические островки, первые из которых растворяются и переходят в отдельные адатомы или десорбируются, вторые способны к дальнейшему росту.
- Происходит коалесценция островков с образованием структурных зародышей, например, 4x4, 5x5 и т.д. узлов кристаллической решетки новой фазы. По различным теоретическим представлением размер структурных зародышей довольно значительно различается.
- Образуются каналы свободной поверхности подложки за счет смыкания между собой структурных зародышей с дальнейшим формированием кристаллической структуры покрытия (Рисунок 2.13).
- Возникают отдельные поверхностные поры без покрытия, которые перекрываются в последнюю очередь с образованием сплошной пленки.
- Происходит конденсация последующих слоев пленки, которая в конечном итоге при продолжении процесса переходит в трехмерное образование. На этом этапе последующие слои

осаждаются, в принципе подчиняясь тем же закономерностям, что и первичные.

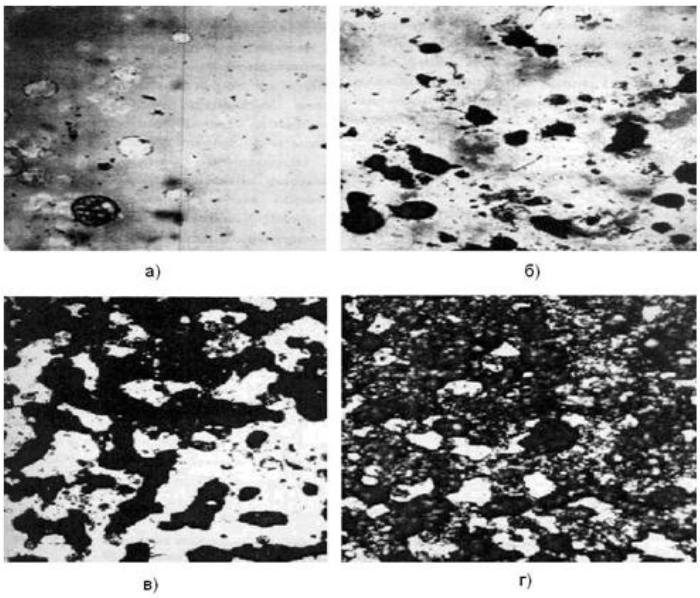
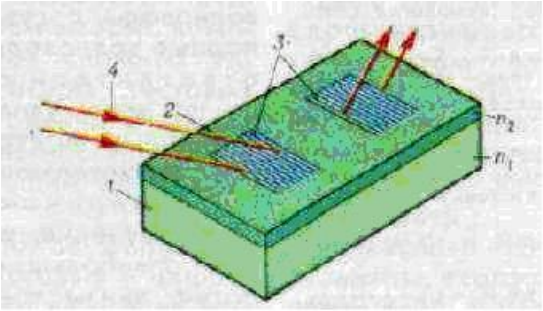


Рис.1.13 Стадии заполнения поверхности подложки оксидом меди при пиролизе раствора нитрат меди - поливиниловый спирт.

Пленочные технологии лежат в основе создания элементов интегральной оптики, устройств в которых в оптических средах создаются зоны и участки, выполняющие различные функции, что позволяет существенно миниатюризировать изготовляемые приборы (Рисунок 2.14). Интегральные схемы, широко используемые в электронной технике, также базируются на пленочной технологии (Рисунок 2.15) с использованием для нанесения на подложки схем заданной конфигурации фоторезистов. Например, на кремниевую монокристаллическую подложку с р-типом проводимости наносят состав на основе полимеров с добавками светочувствительных веществ. Под действием локального облучения с использованием масок или тонкого лазерного пучка фоторезист теряет растворимость, необлученная его часть удаляется. Затем за счет специальной обработки, например, ионной бомбардировки, открытые участки поверхности приобретают n-тип проводимости и на их границе с основным объёмом подложки создается p-n переход, служащий основой функциональной единицы, например микродиода. Элементы микросхемы соединяются между собой напыляемыми металлическими проводниками. Микрорезисторы, конденсаторы могут быть сформированы, например, путем напыления слоев соответствующих материалов заданной конфигурации. Возможно получение функциональных элементов в нескольких уровнях по глубине. Таким образом создаются микросхемы, (ГБИС - гигабольшие интегральные микросхемы), содержащие миллиарды единичных функциональных элементов на 1 см2 поверхности носителя, тогда как первые из созданных малые микросхемы (МИС) содержали лишь

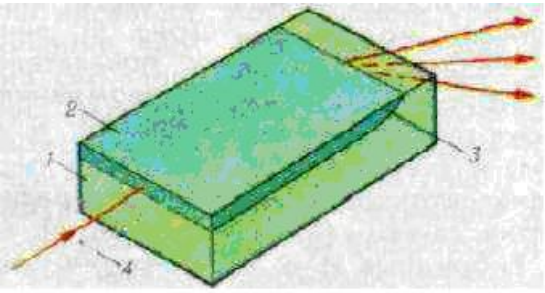
порядка 102/см2 элементов. Кроме того, применялись и гибридные микросхемы (ГИС) и сборки, включающие навесные радиоэлементы.

Рис.1.14 Примеры интегрально-оптических элементов:



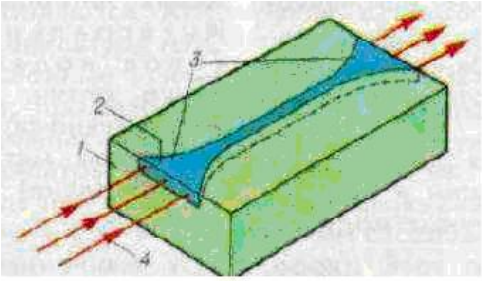
а)

а) - Схема интегрально-оптического элемента связи на основе дифракционных решеток: 1 - диэлектрическая или полупроводниковая подложка (из LiNbO3, GaAlAs и др.), 2 - планарный интегрально-оптический волновод, 3 - фазовые дифракционные решетки созданные на поверхности волновода методами фото- и электронно-лучевой литографии, 4 - световые потоки, n1 и n2 - показатели преломления подложки и световедущего слоя, соответственно.



б)

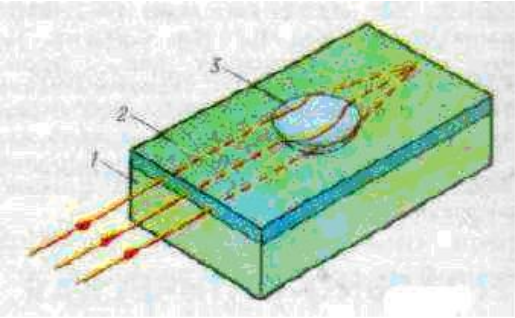
б) - Схема интегрально-оптического волновода с суживающимся краем: 1 - диэлектрическая или полупроводниковая подложка (из LiNbO3), 2 - интегрально-оптический волновод, 3 - суживающийся край световедущего слоя, 4 - световые потоки.



в)

в) - Схема интегрально-оптического элемента связи с использованием рупорных переходов: 1 - подложка, 2 - интегрально-оптический волновод с плавно меняющейся шириной поперечного сечения (рупорный волновод), 3 - рупорные переходы, 4 - световые

потоки.



г)

г) - Схематическое изображение геодезической линзы: 1 - подложка, 2 - планарный интегрально-оптический волновод, 3 - углубление на поверхности волновода, 4 - световые потоки.

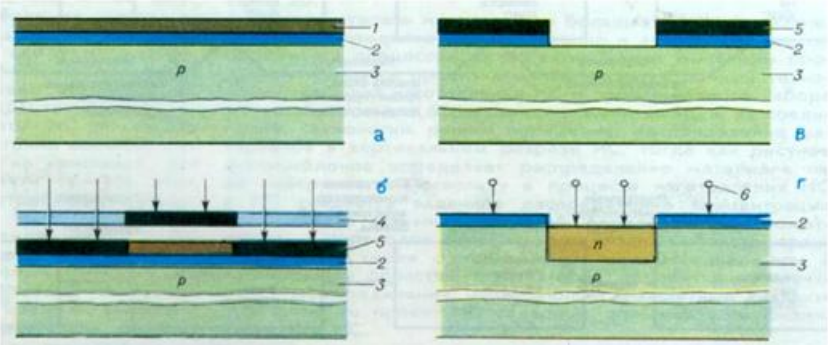


Рис.1.15 Последовательные стадии изготовления монолитной интегральной схемы: а) - исходная полупроводниковая пластина с проводимостью p-типа, покрытая слоями SiO2, и фоторезиста; б) - облучение фоторезиста через фотошаблон; в) - полупроводниковая пластина с "окном" в слое SiO2 , образовавшемся в результате облучения и последующего травления; г) - диффузия донорных примесей и создание области с проводимостью n-типа. (1 - слой фоторезиста, 2 - слой SiO2 3 - полупроводниковая пластина, 4 - фотошаблон, 5 - засвеченный участок фоторезиста, 6 - донорные атомы.)

1.5 Осаждение тонких плёнок в вакууме

Проводники на поверхности кристалла полупроводниковой ИМС, а также пассивные элементы гибридно-пленочных микросхем создаются на основе тонких плёнок толщиной 0,1÷2 мкм. Высокая точность по толщине и химическая чистота для тонких плёнок могут быть достигнуты только при выращивании слоя из атомарного (молекулярного) потока. Такие условия можно создать в вакууме либо при нагреве, испарении и конденсации материала, либо при бомбардировке твёрдого образца материала (мишени) ионами инертного газа, распыления его в атомарный (молекулярный) поток и конденсации на поверхности изделия.

Процессы первого рода получили название "термическое вакуумное напыление" (ТВН), второго рода - "распыление ионной бомбардировкой" (РИБ).

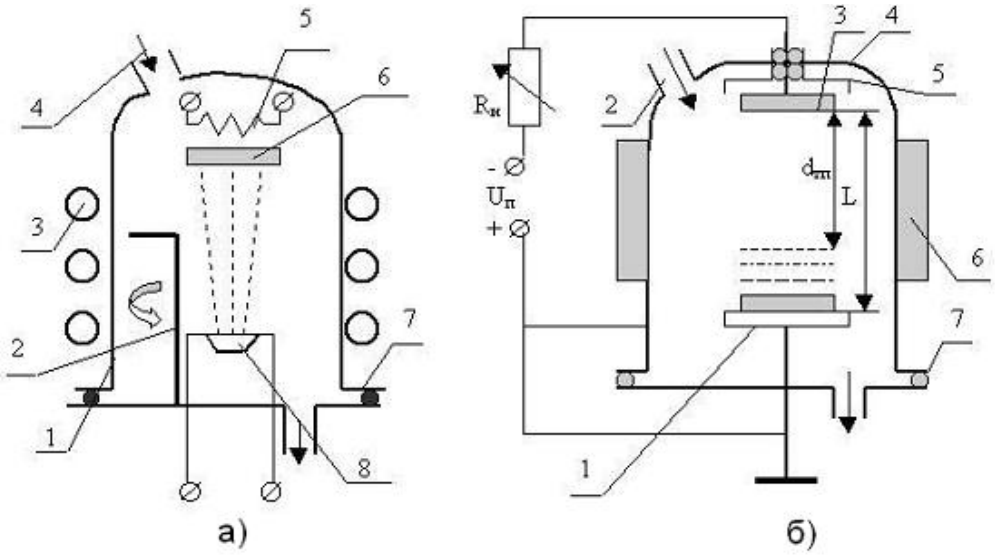


Рис.1.16 Упрощенные схемы рабочих камер установок: а) - термического вакуумного напыления, б) - катодного распыления.

1.5.1 Термическое вакуумное напыление

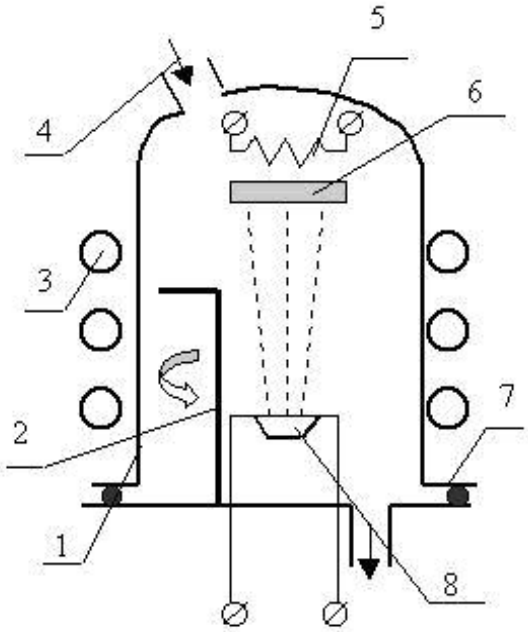


Рис.1.17 Упрощенная схема рабочей камеры установки термического вакуумного напыления.

Основными элементами установки вакуумного напыления, упрощенная схема которой представлена на рис. 2.17, являются: 1 - вакуумный колпак из нержавеющей стали; 2 - заслонка; 3 - трубопровод для водяного нагрева или охлаждения колпака; 4 - игольчатый натекатель для подачи атмосферного воздуха в камеру; 5 - нагреватель подложки; 6 - подложкодержатель с подложкой, на которой может быть размещен трафарет; 7 - герметизирующая

прокладка из вакуумной резины; 8 - испаритель с размещённым в нём веществом и нагревателем (резистивным или электронно-лучевым). Процесс проведения операции вакуумного напыления включает в себя выполнение следующих действий. В верхнем положении колпака с подложкодержателя снимают обработанные подложки и устанавливают новые. Колпак опускают и включают систему вакуумных насосов (вначале для предварительного разрежения, затем высоковакуумный). Для ускорения десорбции воздуха с внутренних поверхностей и сокращения времени откачки в трубопровод подают горячую проточную воду. По достижении давления внутри камеры порядка 10 -4 Па (контроль по манометру) включают нагреватели испарителя и подложек. По достижении рабочих температур (контроль с помощью термопар) заслонку отводят в сторону и пары вещества достигают подложки, где происходит их конденсация и рост плёнки. Система автоматического контроля за ростом плёнки фиксирует либо толщину плёнки (для диэлектрика плёночных конденсаторов), либо поверхностное сопротивление (для резисторов), либо время напыления (проводники и контакты, защитные покрытия). Вырабатываемый при этом сигнал об окончании напыления после усиления воздействует на соленоид заслонки, перекрывая ею поток пара. Далее отключают нагреватели испарителя и подложек, выключают систему откачки, а в трубопровод подают холодную проточную воду. После остывания подколпачных устройств через натекатель плавно впускают атмосферный воздух. Выравнивание давлений внутри и вне колпака даёт возможность поднять его и начать следующий цикл обработки.

Процесс термического вакуумного напыления характеризуется температурой на испарителе t° ис, давлением воздуха в рабочей камере P 0 , температурой нагрева подложек t° п. Температура нагрева вещества в испарителе (t° ис) должна обеспечивать достаточно высокую интенсивность испарения, чтобы время напыления пленки не превышало 1-2 минут. В то же время чрезмерно высокая интенсивность приводит к образованию мелкозернистой неустойчивой структуры в плёнке, о чём будет сказано ниже. Интенсивность испарения удобно характеризовать упругостью пара (давлением пара в состоянии насыщения) P S . Упругость пара для данного вещества зависит только от температуры:

$$\lg P_S = A \quad \frac{B}{T} \qquad (5)$$

где A и B - коэффициенты, характеризующие род материала (табл. 4); T - абсолютная температура вещества, К.

Таблица 4. Температуры плавления и испарения некоторых элементов.

Элемент	$t_{пл}$°C	$t_{усл}$°C	Коэффициенты		Рекомендуемые материалы испарителя	
			A	B	Проволоки, ленты	Тигля
Ag	961	1047	(11,40)	(14850)	Mo, Ta	Mo, C
			10,78	14090		
Al	660	1150	11,11	15630	W	C, BN, TiB_2—BN
Au	1063	1465	10,77	18250	W, Mo	Mo, C
Cr	1800	1205	(12,00)	(17560)	W, Ta	—
Cu	1083	1273	10,84	16580	W, Mo, Ta	Mo, C, Al_2O_3
Mo**	2622	2533	(10,92)	(30310)	—	—
Ni	1455	1510	(12,40)	(21840)	W	Окислы
			11,67	20600		
Pd	1555	1566	10,58	19230	W	Al_2O_3
Pt	1774	2090	11,75	27500	W	ThO_2, ZrO_2
Ta**	2996	3070	12,12	40210	—	—
Ti	1725	1546	(10,37)	(18640)	W, Ta	C, ThO_2
			11,10	20110		
W**	3382	3309	(11,36)	(40260)		

* Значения в скобках для твердого состояния.
** Рекомендуется испарение электронно-лучевым нагревом или распыление ионной бомбардировкой.

Оптимальной интенсивностью испарения принято считать интенсивность, при которой упругость пара составляет ~1,3 Па. Соответствующая этой упругости температура испарения называется условной и может быть вычислена из формулы (5). Так, для алюминия она равна 1150°С, для хрома - 1205°С, для меди - 1273°С, для золота - 1465°С и т.д.

Низкое давление воздуха Р 0 в рабочей камере необходимо для:

1. Обеспечения свободной диффузии атомов вещества испарителя в объём рабочей камеры;
2. Прямолинейного движения атомов вещества без столкновения с молекулами остаточного воздуха и бесполезного рассеивания материала в объёме камеры;
3. Исключения химического взаимодействия напыляемого вещества с молекулами воздуха.

10 -4 Па.≤Перечисленные условия обеспечиваются при остаточном давлении Р 0 такой вакуум сравнительно легко достигается с помощью форвакуумного механического и высоковакуумного диффузионного насосов, включённых последовательно.

Температура подложки в процессе осаждения оказывает существенное влияние на структуру плёнки, а, следовательно, и на стабильность её электрофизических свойств в процессе эксплуатации. Атомы вещества поступают на подложку с энергией кТ (к =8,63×10 -5 эВ/К - постоянная Больцмана; Т - абсолютная температура) и скоростями порядка 1000 м/с. Часть энергии при этом передаётся поверхностным атомам подложки, а остаточная энергия позволяет им некоторое время мигрировать в поверхностном потенциальном поле. Доля остаточной энергии тем выше, чем выше температура подложки.

В процессе миграции атом может либо покинуть подложку (на потенциальном бугре поля), либо частично погасить энергию, вступив во взаимодействие с другим мигрирующим атомом. Полностью потерять способность мигрировать и закрепиться на нагретой подложке (конденсироваться) может лишь многоатомная группа, которая становится одним из центров кристаллизации. При невысокой плотности потока атомов, т.е. умеренной температуре на испарителе, число центров кристаллизации на единицу площади невелико и к моменту образования сплошной плёнки вокруг них успевают вырасти крупные кристаллы.

Снижение температуры подложки и повышение плотности потока приводит к более раннему образованию центров кристаллизации, увеличению их числа на единицу площади и формированию мелкокристаллической структуры. В процессе эксплуатации электронной аппаратуры, когда она подвергается периодическим циклам нагрева и медленного охлаждения мелкокристаллическая структура постепенно рекристаллизуется в крупнокристаллическую. Электрофизические свойства при этом необратимо изменяются, происходит "старение" плёнки. В резистивных плёнках, например, наблюдается со временем уменьшение удельного сопротивления. Итак, для формирования тонких плёнок, стабильных в процессе эксплуатации, необходимо подложку нагревать и не форсировать процесс напыления за счёт повышения температуры на испарителе.

В производстве тонкоплёночных структур, как и в случае полупроводниковых, используются групповые подложки. Групповые подложки имеют прямоугольную форму с размерами 60x48 мм или 120x96 мм, изготовлены из изолирующего материала (ситалл, поликор, стекло) и рассчитаны на одновременное изготовление до нескольких десятков идентичных модулей. Таким образом, свойства напыленной плёнки должны быть одинаковы на всей площади групповой подложки.

В первом приближении поток атомов от испарителя к подложке представляет собой расходящийся пучок и поэтому плотность потока в плоскости подложки не равномерна: в центре подложки она максимальна и убывает от центра к периферии. Это означает, что при напылении плёнки на неподвижную подложку в центральной области подложки образуется более толстая плёнка, нежели на краях подложки. Например, резисторы, сформированные в центральных модулях, будут иметь заниженные сопротивления по сравнению с аналогичными резисторами периферийных модулей.

С учётом изложенного производственные установки термовакуумного напыления снабжены вращающимися устройствами (дисками, барабанами), несущими несколько подложек (6, 8 или 12). Подложки последовательно и многократно проходят над неподвижным испарителем (рис. 1.18), постепенно набирая необходимую толщину

плёнки.

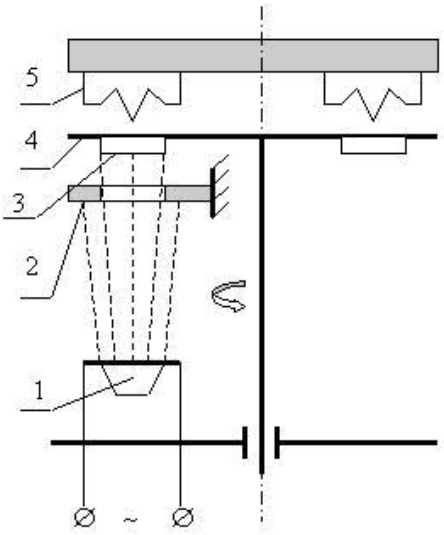


Рис.1.18 Схема установки термовакуумного напыления карусельного типа: 1 – испаритель; 2 – корректирующая диафрагма; 3 – подложкодержатели с подложкой; 4 – диск карусели; 5 – нагреватель подложки.

В результате центральный "холм", который мог бы образоваться, на неподвижной подложке, размывается в "хребет", вытянутый в направлении движения подложки. Для выравнивания толщины плёнки в поперечном направлении применяют корректирующую диафрагму, устанавливаемую между испарителем и подложкой в непосредственной близости от нее. Профиль диафрагмы рассчитывается на основании исследования рельефов плёнки, получаемых при напылении на неподвижную и движущуюся подложки. В результате различия времени облучения центральной и периферийной зон подложки равномерность толщины плёнки на всей площади групповой подложки повышается и находится в пределах ±2% (для подложек 60х48 мм).

Технические характеристики установки типа УВН-71П-3 следующие:

Предельный вакуум в рабочей камере, Па	$6{,}5\cdot10^{-4}$
Размеры рабочей камеры, мм: Диаметр	500
Высота	640
Максимальная температура нагрева рабочей камеры,°С	90
Количество резистивных испарителей, шт	3
Питание испарителей: мощность, кВт	2
максимальный ток, А	500
Скорость автоматического вращения карусели, об/мин	50…100
Количество подложек, обрабатываемых за один цикл, шт	11
Температура нагрева подложек, °С	до 400±1,5
Расход воды, л/ч: Холодной	600
Горячей	200
Расход сжатого воздуха, л/ч,	30
Максимальная потребляемая мощность, кВт	12
Габаритные размеры установки, мм	1300Х850Х1870
Общая масса, кг	1200

1.5.2 Распыление ионной бомбардировкой

Термическое вакуумное напыление имеет ряд недостатков и ограничений, главные из которых следующие:

1. Напыление плёнок из тугоплавких материалов (W, Mo, SiO_2, Al_2O_3 и др.) требует высоких температур на испарителе, при которых неизбежно "загрязнение" потока материалом испарителя;
2. При напылении сплавов различие в скорости испарения отдельных компонентов приводит к изменению состава плёнки по сравнению с исходным составом материала, помещённого в испаритель;
3. Инерционность процесса, требующая введения в рабочую камеру заслонки с электромагнитным приводом;
4. Неравномерность толщины плёнки, вынуждающая применять устройства перемещения подложек и корректирующие диафрагмы.

Первые три недостатка обусловлены необходимостью высокотемпературного нагрева вещества, а последний - высоким вакуумом в рабочей камере.

Процесс распыления ионной бомбардировкой является "холодным" процессом, т.к. атомарный поток вещества на подложку создаётся путём бомбардировки поверхности твёрдого образца (мишени) ионами инертного газа и возбуждения поверхности атомов до энергии, превышающей энергию связи с соседними атомами. Необходимый для этого поток ионов создаётся в электрическом газовом разряде, для чего давление газа в рабочей камере должно быть в пределах 0,1×10 Па, т.е. на несколько порядков более высокое, чем в камере установки термовакуумного напыления.

Последнее обстоятельство приводит к рассеиванию потока атомов с мишени и повышению равномерности толщины осаждаемых плёнки до ±1% , причём без применения дополнительных устройств.

Катодное распыление

Катодное распыление - одна из разновидностей распыления ионной бомбардировкой постепенно вытесняется более совершенными процессами высокочастотного и магнетронного распыления. Однако, будучи относительно простым и в то же время содержащим все основные черты этой группы процессов, оно представляет собой наиболее удобную форму для изучения процессов этого вида распыления вообще. На рис. 2.18 представлена схема рабочей камеры установки катодного распыления. Основными элементами камеры являются: 1 - анод с размещенными на нём подложка- ми; 2 - игольчатый натекатель, обеспечивающий непрерывную подачу аргона; 3 - катод - мишень из материала, подлежащего распылению и осаждению; 4 - вакуумный колпак из нержавеющей стали; 5 - экран,

охватывающий катод с небольшим зазором и предотвращающий паразитные разряды на стенки камеры; 6 - постоянный электромагнит, удерживающий электроны в пределах разрядного столба; 7 - герметизирующая прокладка. Из рис. 2.18 также видно, что питание осуществляется постоянным напряжением, и что нижний электрод с подложками заземлён и находится под более высоким потенциалом, чем катодмишень. Переменная нагрузка служит для регулирования тока разряда.

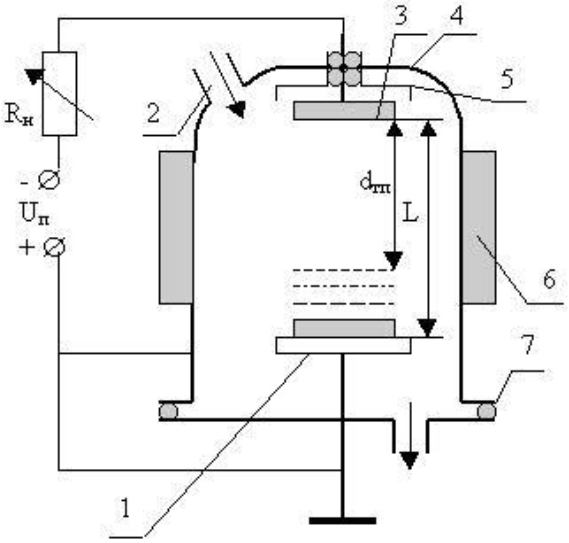


Рис.1.19 Схема рабочей камеры установки катодного распыления.

На рис. 1.20 представлена упрощённая структура разряда и распределение потенциала вдоль разряда, а также типы частиц, участвующих в процессе.

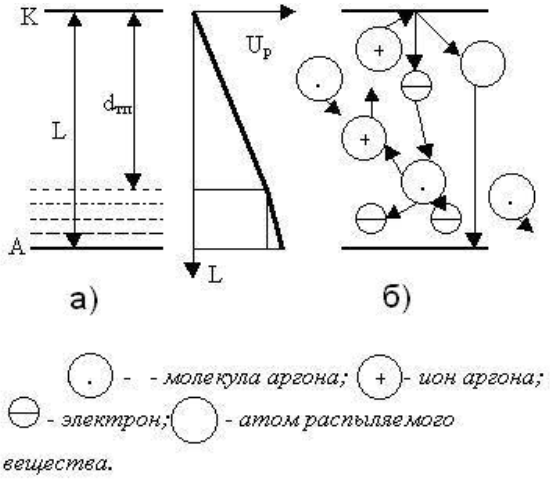


Рис.1.20 Распределение потенциала а) и заряженные частицы б) в межэлектродном пространстве.

Разряд разделён на две зоны: тёмное катодное пространство и светящаяся область. На тёмное катодное пространство приходится основное падения напряжения. Здесь заряженные частицы разгоняются до энергии, достаточной, чтобы ионы, бомбардируя катод-мишень, освобождали поверхностные атомы и электроны (если мишень из проводящего материала), а электроны - на границе

тёмного катодного пространства ионизировали молекулы аргона. При ионизации образуется ион аргона, который, ускоряясь, стремится к мишени, и электрон, который, как и "отработанный" ионизирующий электрон, дрейфует к аноду в слабом поле светящейся области. Освобожденный с поверхности мишени атом вещества, преодолевая столкновения с молекулами и ионами аргона, достигает поверхности подложки. При этом непрерывный поток ионов бомбардирует мишень, и непрерывный поток атомов вещества движется к подложке.

Режимы катодного распыления

На рис. 2.21, а приведена вольт-амперная характеристика разряда. При подаче постоянного напряжения в несколько киловольт происходит пробой межэлектродного промежутка, быстрое нарастание тока и падение напряжения в разряде (область зажигания разряда I). При увеличении тока разряда за счёт уменьшения сопротивления Rн площадь катода-мишени, покрытая разрядом, возрастает, плотность разрядного тока и напряжение на разряде остаются постоянными и невысокими, а скорость распыления мала (область нормально тлеющего разряда II). В области III вся площадь мишени покрыта разрядом, и увеличение разрядного тока приводит к повышению плотности разрядного тока, напряжения на разряде и скорости распыления. Область Ш, называемая областью аномально тлеющего разряда, используется в качестве рабочей области в процессах катодного распыления.

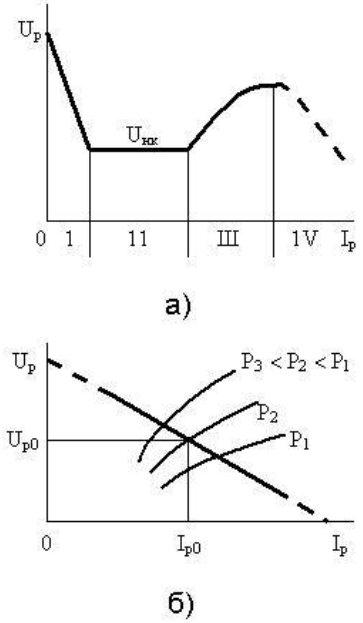


Рис.1.21 Вольт-амперные характеристики самостоятельного тлеющего заряда: а) – области ВАХ при различных режимах; б) – рабочая область (область III) при различных давлениях аргона.

Для предотвращения перехода в область дугового разряда (область IV) предусмотрены интенсивное водяное охлаждение мишени и

ограничение источника питания по мощности.
На рис. 2.21, б выделена рабочая область III ВАХ. Крутизна характеристики в этой области зависит от давления рабочего газа, в нашем случае аргона. Рабочая точка, характеризующая режимы обработки - давление газа P , ток J p и напряжение U p разряда, лежит на нагрузочной характеристике источника питания:

$$U_p = U_п - J_p \cdot R_н \qquad (6)$$

где U п - напряжение питания.
С другой стороны, скорость распыления мишени W[г/см 2 ×с]

$$W - C \cdot \frac{(U_p - U_{нк})j_p}{p \cdot d_{ТП}} \qquad (7)$$

где C - коэффициент, характеризующий род распыляемого материала и род рабочего газа; U нк - нормальное катодное падение напряжения (область II ВАХ); j p - плотность разрядного тока; d ТП - ширина тёмного катодного пространства.

Из (7) следует, что максимальная скорость распыления достигается при максимальной мощности, выделяемой в разряде. Согласно нагрузочной характеристике (6):

$$P = U_p J_p = U_п J_p - J^2{}_p R_н \qquad (8)$$

Максимум этой функции определяет оптимальные значения тока J p0 и напряжения:

$$J_p0 = \frac{U_п}{2R_н} \quad и \quad U_p0 = \frac{U_п}{2}$$

При этом однозначно определяется оптимальное значение давления рабочего газа. Выбор значений U n и R н должен, как было сказано, предотвращать переход в область дугового разряда, при котором наблюдается выброс с мишени крупных частиц и осаждение тонкой, однородной по толщине плёнки становится невозможным.

Другие виды распыления

К ограничениям и недостаткам процесса катодного распыления относятся:

1. Возможность распыления только проводящих материалов, способных эмиттировать в разряд электроны, ионизирующие молекулы аргона и поддерживающие горение разряда;
2. Малая скорость роста плёнки (единицы нм/с) из-за значительного рассеивания распыляемых атомов материала в объёме рабочей камеры.

Первый недостаток, имеющий характер ограничения, преодолевается

в процессах *высокочастотного распыления.* При замене постоянного напряжения на переменное диэлектрическая мишень становится конденсатором и подвергается бомбардировке ионами в отрицательный полупериод питающего напряжения. Иначе говоря, распыление мишени происходит не непрерывно, как при катодном распылении, а дискретно с частотой питающего напряжения (обычно 13,56 Мгц).
При высокой частоте и согласованным с ним расстоянием от мишени до подложек электроны, находящиеся в срединной части высокочастотного разряда, не успевают достигать электродов за время полупериода, они остаются в разряде, совершая колебательные движения и интенсивно ионизируя рабочий газ. Это обстоятельство позволяет снизить давление рабочего газа без снижения разрядного тока, т.к. степень ионизации заметно повышается (второй недостаток катодного распыления). Характерные режимы высокочастотного распыления: P =0,5…5 Па; J p =1…2 А; U p =1…2 кВ.
В установках *магнетронного распыления* (в частности ВЧ-магнетронного) приняты меры для дальнейшего, существенного снижения давления рабочего газа и повышения за счёт этого скорости осаждения плёнки. С этой целью на разрядный столб накладывается постоянное магнитное поле, вектор которого перпендикулярен вектору электрического поля. В результате движение электронов происходит по сложным (близким к циклоидам) траекториям, степень ионизации рабочего газа существенно повышается и это даёт возможность снизить давление газа, не снижая (и даже повышая) разрядный ток. Главный итог этих мер - повышение скорости роста плёнки до нескольких нм/с, что сравнимо со скоростями в процессах термического вакуумного напыления. Характерные режимы ВЧ-магнетронного распыления: P =0,1…0,5 Па; J p =2…4 А; U p =0,7…1 кВ.

1.6 Современное оборудование для изготовления РЭА

В качестве примера рассмотрим Вакуумный Универсальный Пост (ВУП-4). Будут рассмотрены основные его узлы, назначение и принцип действия.
Вакуумный универсальный пост ВУП-4 предназначен для осуществления операций электронно-микроскопического препарирования, связанных с распылением в вакууме. Прибор может быть использован для металлизации материалов в вакууме, нагрева и охлаждения исследуемых образцов, очистки образцов и распыления материалов с помощью ионной бомбардировки. Установка за один прием позволяет напылять несколько слоев различных металлов (до пяти) различной толщины каждый.

Внешний вид установки

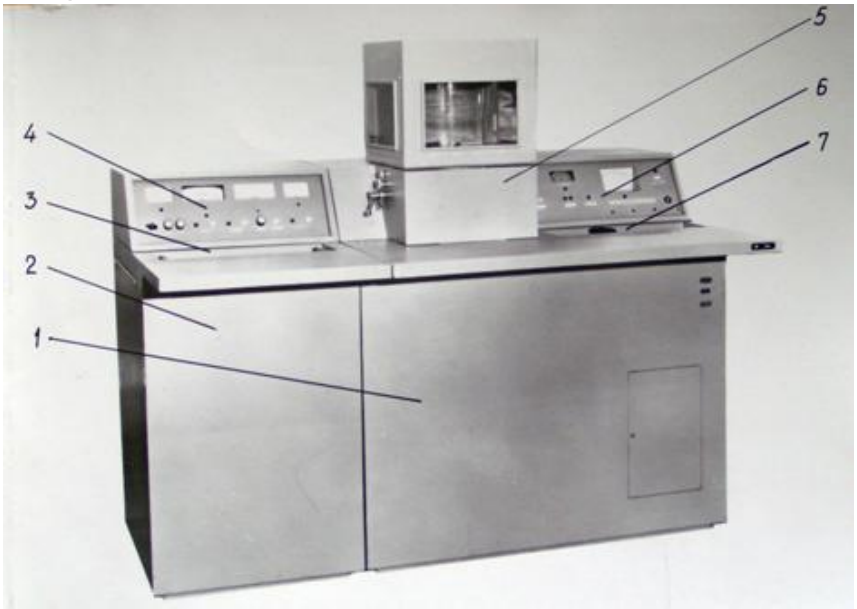


Рис.1.22 Внешний вид установки.

ВУП-4 состоит из правой вакуумной (1) и левой электрической (2) стоек. В вакуумной стойке в верхней части установлен столик 5 для вакуумного препарирования. Справа и слева от столика расположены наклонные 6,4 и горизонтальные 7,3 пульты управления.

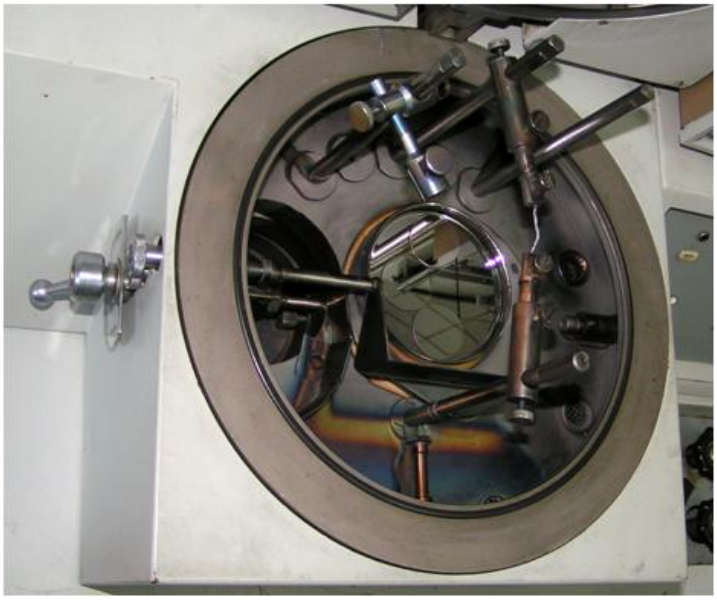


Рис.1.23 Основание.

Все операции по приготовлению образцов производятся в рабочем объеме, образуемом основанием и колпаком.

На рисунке 1.23 показано основание с установленными на нее образцами, на которые необходимо напылить никель. Два кронштейна (анод и катод) удерживают вольфрамовую проволоку, на которую наматывают необходимое количество металла. При пропускании тока вольфрам нагревается, и никель под действием внутреннего давления равномерно распыляется.

Маятниковое устройство

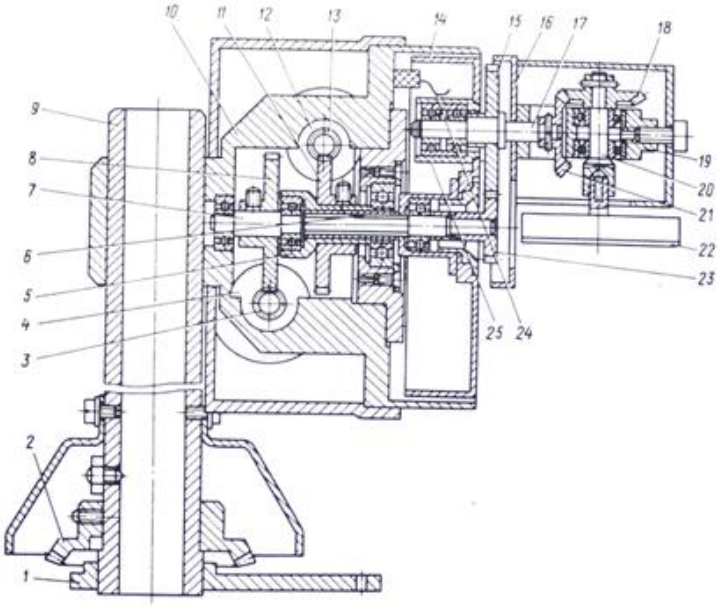


Рис.1.24 Маятниковое устройство.

Маятниковое устройство (рис. 1.24) предназначено для получения во время напыления равномерного по толщине слоя по всей площади объекта. С этой целью столик с объектами совершает одновременно равномерное вращательное и поступательное движение.

Устройство для ионного травления

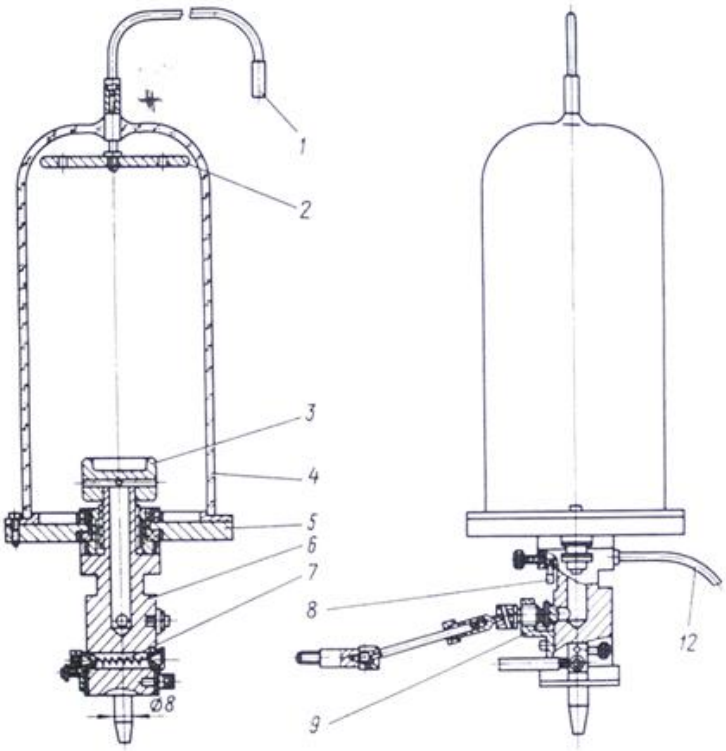


Рис.1.25 Устройство для ионного травления.

Устройство для ионного травления (рис.1.25) устанавливается в гнездо. Устройство представляет собой разрядную камеру, состоящую

из основания 5, стеклянного цилиндра 4, с анодом 2 и штуцера 6. Столик 3, являющийся катодом, охлаждается с помощью жидкого азота. Температура охлаждения может регулироваться путем нагрева спирали 7 и измеряется термопарой 8. Термопара выполнена из пары медь - константан.
Напуск газа в разрядную камеру производится через систему напуска по трубке 12.
Сопрягаемые детали разрядной камеры притерты между собой и при работе давление в ней будет поддерживаться более высокое, чем в рабочем объеме. Поэтому газовый разряд происходит только в разрядной камере.
Для откачки газа из разрядной камеры перед ионным травлением предусмотрен клапан 9, с помощью которого производится тонкая регулировка давления в разрядной камере.
Анод соединен с высоковольтным вводом проводом 1.

Датчик толщины

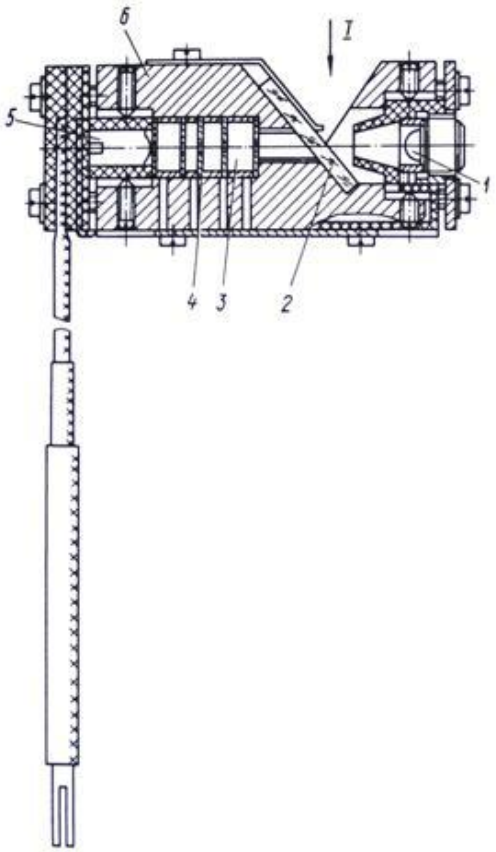


Рис.1.26 Датчик толщины

Датчик (рис.1.26) устанавливается в рабочем объеме и является индикатором толщины напыляемого слоя.
Датчик состоит из корпуса 6, в котором расположены источник света 1, светопроницаемая пластина и фоторезистор 5.
Диафрагмы 4 и полости 3 образуют световую ловушку, которая улавливает отраженные лучи от испарителя и таким образом

уничтожает влияние засветки.

Вакуумная блокировка

Вакуумная блокировка (рис. 1.27) предназначена для автоматического отключения напряжения высоковольтного выпрямителя при напуске газа в рабочий объем до давления, равного атмосферному.
Штуцер 1 блокировки вставляется в грибковое соединение столика. При атмосферном давлении в рабочем объеме сильфон 3 находится в нормальном (разжатом) состоянии и размыкает контакты микропереключателя 6. При откачке рабочего объема сильфон 3 сжимается и контакты микропереключателя 6 замыкаются.

Вакуумная система

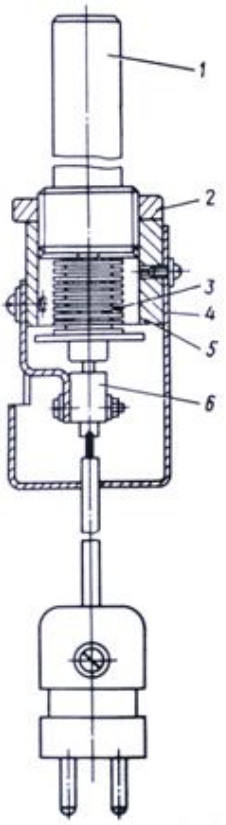


Рис. 1.27 Вакуумная блокировка.

Вакуумная система (рис.1.28) предназначена для создания необходимого вакуума в рабочем объеме. Создание вакуума происходит в два этапа. Вначале создается предварительный вакуум при открытом вентиле 3 и закрытом вентиле 6. После создания предварительного вакуума закрывается вентиль 3 и открывается вентиль 6. В результате работы высоковакуумного паромасляного насоса достигается необходимое давление под колпаком.
1-рабочий объем; 2-манометрически термопарный преобразователь; 3-вентиль откачки рабочего объема на предварительный вакуум МВ2;

4-отсекающий вентиль МВ1;

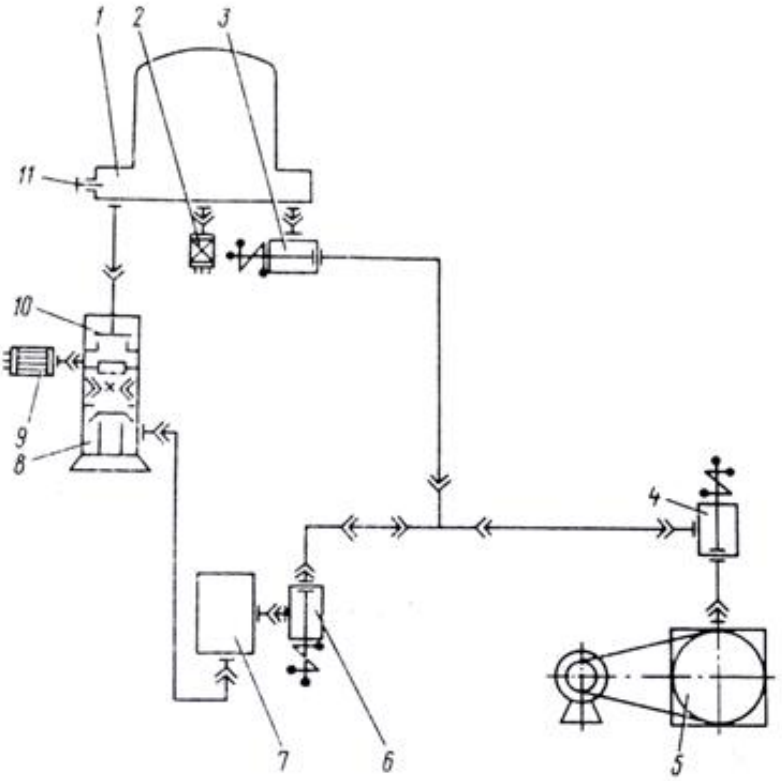


Рис.1.28 Вакуумная система.

5-вакуумный механический насос; 6-вентиль откачки баллона МВ3; 7-баллон; 8-высоковакуумный паромасляный насос; 9-манометрический ионизационный преобразователь; 10-высоковакуумный клапан; 11-винт напуска воздуха в рабочий объем.

Пульты управления

а)

б)

Рис.1.29 Пульты управления.

Управление и контроль за работой прибора производится с пультов управления 3, 4, 6 и 7 (рис.1.22).
В правом пульте размещена схема блока измерения вакуума и схема блока управления вакуумной системой.
Блок измерения вакуума предназначен для измерения остаточного давления в рабочем объеме прибора.
При измерении остаточного давления выше 0,133 Па (1*10-3 мм рт. ст.) используется манометрический термопарный преобразователь ПМТ-4М, на основе которого строится термопарный манометр.
Давление ниже 0,133 Па измеряется с помощью ионизационного манометра, построенного на основе преобразователя ПМИ-2.
В левом пульте управления размещена схема блока управления устройства для поворота и наклона объектов. Скорость и период вращения устройства устанавливаются с помощью резисторов.
Данная установка обладает достаточно обширными возможностями, однако не лишена и минусов, например, таких как:

1. Невозможность напыления металлов на не термоустойчивые материалы;
2. Невозможность напыления металлов на пористые материалы (из-за высокого вакуума).

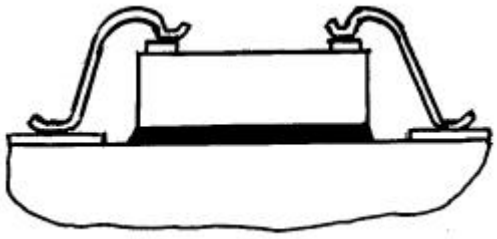
1.7 Электрический монтаж кристаллов ИМС на коммутационных платах.

Электромонтаж бескорпусных кристаллов ИМС заключается в электрическом соединении контактных монтажных площадок на поверхности кристалла с контактными монтажными площадками на поверхности коммутационной платы. Обычно кристалл предварительно фиксируется на плате с помощью клея или припоя.

Во втором случае групповая пластина до разделения ее на отдельные кристаллы должна быть металлизирована со стороны, противоположной структурам, металлом, который хорошо смачивается припоем. Облуженными должны быть также площадки на плате, на которые устанавливаются кристаллы.
В производстве нашли применение три способа электромонтажа: с помощью гибких проволочных перемычек круглого сечения (проволочный монтаж), с помощью гибких ленточных перемычек прямоугольного сечения (ленточный монтаж) и с помощью жестких объемных выводов, предварительно выращенных на кристалле.

1.7.1 Проволочный монтаж

При проволочном монтаже перемычка формируется в процессе монтажа (рис. 1.30): после совмещения свободного конца проволоки с площадкой на кристалле производится сварка, далее изделие (коммутационная плата) перемещается так, чтобы под сварочный инструмент пришла соответствующая площадка коммутационной платы; после совмещения инструмента с площадкой производится сварка и обрезка проволоки. Далее формируется перемычка для следующей пары контактов.

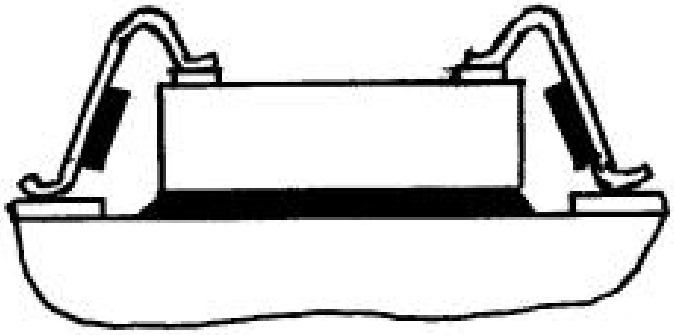


1.30 Проволочный монтаж кристалла на коммутационную плату.

При перемещении платы с приваренным концом проволоки последняя сматывается с катушки неподвижной сварочной головки так, чтобы образовался небольшой избыток по длине. В результате упругости проволоки перемычка получает плавный изгиб вверх, который при температурных изменениях длины перемычки предотвращает замыкание ее на кристалл.
В современных установках для микросварки рабочий цикл сварки (контролируемые давление инструмента, нагрев, время выдержки) автоматизирован. Что касается вспомогательных приемов (перемещения, совмещения), то существуют установки с ручным перемещением изделия и визуальным совмещением с помощью микроскопа, а также установки с автоматическими программируемыми перемещениями в сочетании с системой "машинного зрения", освобождающей оператора от зрительного напряжения.
Достоинством проволочного монтажа является возможность размещения перемычек при произвольном расположении любого

количества монтажных площадок на коммутационной плате, т.е. гибкость в процессе ее конструирования. Недостаток заключается в высокой трудоемкости монтажа, т.к. сварные соединения можно получать только последовательно, индивидуально.

1.7.2 Ленточный монтаж

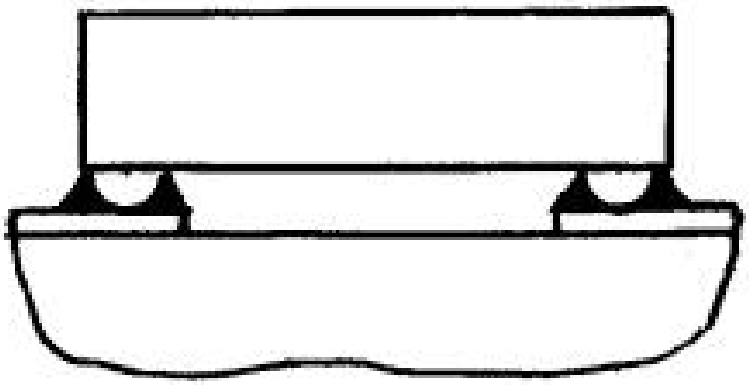


1.31 Ленточный монтаж кристалла на коммутационную плату.

Отказ от проволоки и переход к плоским ленточным перемычкам позволяет изготовить их заранее и одновременно вне кристалла методом избирательного травления (фотолитографии) ленты, однако взаимное расположение перемычек должно быть жестко предопределено расположением монтажных площадок на кристалле и плате. Ленточные перемычки толщиной 70мкм остаются гибкими, поэтому для сохранения их взаимной ориентации они удерживаются в заданном положении изолирующими перемычками из полиимида (рис. 1.31). Таким образом, исходная лента для изготовления системы перемычек должна быть двухслойной: алюминий (70мкм) и полиимид (40мкм). Для исключения замыкания перемычек на кристалл их специально формуют перед монтажом.

Использование ориентированных ленточных перемычек позволяет существенно снизить трудоемкость монтажа. Во-первых, для совмещения всей системы перемычек с кристаллом достаточно совместить две пары "перемычка-площадка", расположенных по диагонали. После приварки всех перемычек на кристалле последний с системой перемычек переносится на плату и аналогично производится совмещение свободных концов с площадками платы и их приварка. Во-вторых, появляется возможность одновременной (групповой) приварки всех перемычек, расположенных в одном ряду. Из рассмотренных ниже способов сварки для групповой сварки могут быть использованы термокомпрессионный и ультразвуковой способы. К недостатку следует отнести ограничения, накладываемые на конструкцию коммутационной платы и самого кристалла по числу и характеру расположения монтажных площадок. Для смягчения этого недостатка приходится разрабатывать и изготавливать стандартный ряд систем перемычек, отличающихся числом и шагом расположения.

1.7.3 Монтаж с помощью жестких объемных выводов



1.32 Монтаж кристалла на коммутационной плате с помощью объемных выводов.

Жесткие объемные выводы формируются на кристаллах заранее и одновременно до разделения групповой пластины. В первом приближении они представляют собой выступы полусферической формы высотой порядка 60мкм и покрыты припоем. Облуженными должны быть и ответные монтажные площадки на коммутационной плате. В отличие от проволочного и ленточного монтажа объемные выводы соединяют с площадками платы пайкой, а кристалл при этом оказывается в перевернутом положении, т.е. структурами вниз (рис. 1.32).

Последовательность монтажа следующая. Кристалл, находящийся в кассете в ориентированном положении, забирается вакуумным присосом ("пинцетом") и переносится в позицию монтажа с определенным зазором. В зазор вводится полупрозрачное зеркало, позволяющее оператору через микроскоп наблюдать одновременно площадки на плате и выводы на кристалле. После совмещения зеркало выводится из зазора, а присос опускает кристалл на плату и прижимает его. Далее из миниатюрного сопла подается горячий инертный газ, выполняющий одновременно функции нагревательной и защитной среды, затем холодный инертный газ, чем и заканчивается цикл монтажа.

К достоинствам монтажа с помощью жестких объемных выводов относится: сокращение числа соединений вдвое, что повышает надежность изделия при эксплуатации; сокращение трудоемкости за счет одновременного присоединения всех выводов; уменьшение монтажной площади до площади, занимаемой кристаллом; отсутствие необходимости предварительного механического крепления кристалла.

Ограничением для использования данного метода является необходимость применения коммутационных плат на основе тонких пленок с использованием фотолитографии, т.е. высокого разрешения, т.к. размеры площадок и шаг их расположения на плате и кристалле должны совпадать.

1.7.4 Микросварка

К *микросварке* прибегают при проволочном и ленточном монтаже. Ввиду малых толщин соединяемых элементов (порядка 1,5мкм для площадки и несколько десятков мкм для перемычки) сварка должна выполняться без расплавления соединяемых элементов. Таким образом, все разновидности микросварки представляют собой сварку давлением. В этом случае прочность соединения обеспечивается электронным взаимодействием соединяемых поверхностей и взаимодиффузией материалов в твердой фазе, что, в свою очередь, требует применения пластичных материалов и обеспечения плотного контакта на достаточно большой площади. Так как необходимую площадь контакта можно получить лишь за счет пластической деформации перемычки, к материалу последней предъявляются требования пластичности. Для облегчения пластического течения материала, а также для ускорения взаимодиффузии, во всех видах микросварки предусматривается нагрев зоны соединения до температуры ниже эвтектической (во избежание расплавления). Таким образом, все виды микросварки характеризуются температурой в зоне соединения 300¸800°С и удельным давлением инструмента 100¸200 Н/мм2. Конкретные значения режимов определяются материалом перемычки и видом микросварки.

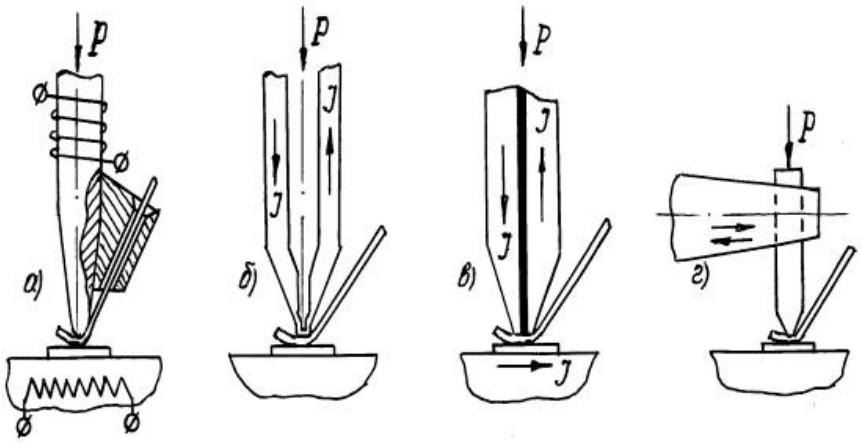
В производстве нашли применение следующие разновидности микросварки: термокомпрессионная сварка (ТКС); сварка косвенным импульсным нагревом (СКИН); электроконтактная односторонняя сварка (ЭКОС); ультразвуковая сварка (УЗС) (рис. 1.33).

Основная тенденция развития методов микросварки - локализация тепла в зоне соединения и уменьшение теплового воздействия на изделие в целом, что позволяет повысить температуру сварки и применять для перемычек менее пластичные материалы (например, медь). Способ нагрева зоны соединения находит свое отражение в конструкции сварочного инструмента, схематически представленного на рис. 1.33. Независимо от вида микросварки в случае проволочного монтажа инструмент должен быть снабжен "капилляром" для направления проволоки под рабочую часть инструмента (на рис. 1.33 показан только для ТКС).

К достоинствам монтажа с помощью жестких объемных выводов относится: сокращение числа соединений вдвое, что повышает надежность изделия при эксплуатации; сокращение трудоемкости за счет одновременного присоединения всех выводов; уменьшение монтажной площади до площади, занимаемой кристаллом; отсутствие необходимости предварительного механического крепления кристалла.

Ограничением для использования данного метода является необходимость применения коммутационных плат на основе тонких

пленок с использованием фотолитографии, т.е. высокого разрешения, т.к. размеры площадок и шаг их расположения на плате и кристалле должны совпадать.



1.33 Виды микросварки. Разновидности сварочного инструмента а) – ТКС; б) – СКИН; в) – ЭКОС; г) – УЗС.

При ТКС (рис. 1.33,а) нагреву подвергают все изделие или инструмент (или то и другое), обеспечивая температуру порядка 400°С .

В случае СКИН (рис. 1.33,б) разогрев зоны соединения осуществляется только в момент сварки. Это достигается V-образной конструкцией инструмента, через который пропускается амплитудно-модулированный импульс тока с несущей частотой 0,5¸1,5кГц. В результате температуру в зоне сварки можно повысить до 650°С . Инструмент является частью электрической цепи и благодаря малому сечению рабочего конца инструмента выделяемое тепло концентрируется именно в этой части.

Инструмент для ЭКОС (рис. 1.33,в) часто называют расщепленным: он состоит из двух частей, разделенных изолирующей термостойкой прокладкой, которые являются составной частью электрической цепи. Последняя замыкается лишь при контакте с перемычкой. Таким образом, импульс тока проходит через свариваемый участок перемычки, причем тепло выделяется в зоне контакта. В установках для ЭКОС предусмотрено автоматическое измерение контактного сопротивления, регулирование по сопротивлению усилия и формирование параметров импульса тока, что повышает воспроизводимость характеристик соединения. Температура в зоне сварки может быть повышена до 800°С , что дает возможность применять медные перемычки.

Ультразвуковая сварка может выполняться без специально организованного нагрева, т.к. тепло, необходимое для повышения пластичности, выделяется в результате трения перемычки о площадку. Сварочный инструмент жестко закрепляется в концентраторе магнитострикционной головки (рис. 2.30,г) и вместе с ним совершает продольные колебательные движения, "втирая" перемычку в площадку. Частота ультразвуковых колебаний

выбирается в пределах 20¸60кГц, а амплитуда - 0,5¸2мкм.
В табл. 5 приведены сведения по свариваемости материалов при различных методах микросварки.

Таблица 5. Свариваемость материалов при различных методах микросварки.

Материал монтажной площадки	Метод микросварки, материал перемычек											
	ТКС			СКИН			ЭКОС			УЗС		
	Au	Al	Cu	Au	Al	Cu	Au	Al	Cu	Au	Al	Cu
Au	++	+	-	++	++	+	++	-	++	++	++	+
Cu или Ni	++	+	-	++	+	+	++	-	+	++	+	+
Al	++	+	-	+	+	-	+	-	+	+	++	-

Примечание: ++ - свариваются хорошо; + - свариваются удовлетворительно; - не свариваются.

1.7.5 Изготовление системы объемных выводов

Для формирования объемных выводов стандартный процесс, который заканчивается осаждением защитной пленки SiO2 и образованием в ней окон над монтажными площадками, дополняется рядом операций, выполняемых в групповой пластине, т.е. до разделения ее на отдельные кристаллы.
Для будущих круглых выводов окна в защитном окисле выполняют также круглыми диаметром 70мкм. Методом осаждения в вакууме на всю поверхность пластины наносят слой ванадия (для восстановления алюминия из поверхностного окисла и уменьшения контактного сопротивления) и меди (для замыкания всех выводов и возможности последующего гальванического наращивания). Толщина каждого из слоев - несколько десятых долей мкм (рис. 1.34,а). После формирования фотомаски, открывающей лишь участки будущих выводов, гальваническим методом выращивают слой меди толщиной порядка 50-60мкм. Используя ту же фотомаску, гальванически наносят слой серебра толщиной в несколько мкм. Серебро служит для защиты меди от окисления, а впоследствии - в качестве маски для стравливания тонкой меди и ванадия.

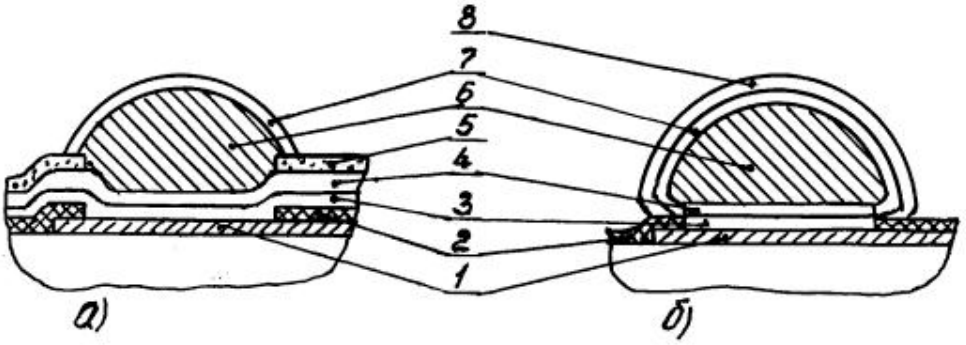


Рис.1.34 Структура жестких объемных выводов на кристалле ИМС: 1 - алюминий; 2 – двуокись кремния; 3 – ванадий; 4 – тонкая медь; 5 – фотомаска; 6 – гальваническая медь; 7 – серебро; 8 – припой.

Далее (рис. 1.34,б) фотомаска удаляется, и последовательно стравливаются слои меди и ванадия (выводы электрически разобщаются). Наконец, горячим лужением (контакт пластины с расплавленным припоем) получают на выводах слой припоя. Во избежание растворения серебра оловом припоя в состав припоя ПОС-61 вводится за счет олова 3% серебра (припой ПСрОС-3-58).

1.8 Типы печатных плат

Появление печатных плат (ПП) в их современном виде совпадает с началом использования полупроводниковых приборов в качестве элементной базы электроники. Переход на печатный монтаж даже на уровне одно- и двухсторонние плат стал в свое время важнейшим этапом в развитии конструирования и технологии электронной аппаратуры.
Разработка очередных поколений элементной базы (интегральная, затем функциональная микроэлектроника), ужесточение требований к электронным устройствам, потребовали развития техники печатного монтажа и привели к созданию многослойных печатных плат (МПП), появлению гибких, рельефных печатных плат.
Многообразие сфер применения электроники обусловило совместное существование различных типов печатных плат:

1. ОПП - односторонняя печатная плата. Элементы располагаются с одной стороны платы. Характеризуется высокой точностью выполняемого рисунка;
2. ДПП - двухсторонняя печатная плата. Рисунок располагается с двух сторон, элементы с одной стороны. ДПП на металлическом основании используются в мощных устройствах;
3. МПП - многослойная печатная плата. Плата состоит из чередующихся изоляционных слоев с проводящим рисунком. Между слоями могут быть или отсутствовать межслойные соединения;
4. ГПП - гибкая печатная плата. Имеет гибкое основание;
5. РПП - рельефная печатная плата.

1.8.1 Односторонние печатные платы

Односторонние платы по-прежнему составляют значительную долю выпускаемых в мире печатных плат. В предыдущем десятилетии в США они составляли около 70% объема выпуска плат в количественном исчислении, однако, лишь около 10 % в стоимостном. В Великобритании такие платы составляют около четверти от объема всего производства.
Маршрут изготовления односторонних плат традиционно включает

сверление, фотолитографию, травление медной фольги, защиту поверхности и подготовку к пайке, разделение заготовок. Стоимость односторонних плат составляет 0,1 - 0,2 от стоимости двухсторонних плат, это делает их вполне конкурентными, особенно в сфере бытовой электроники.

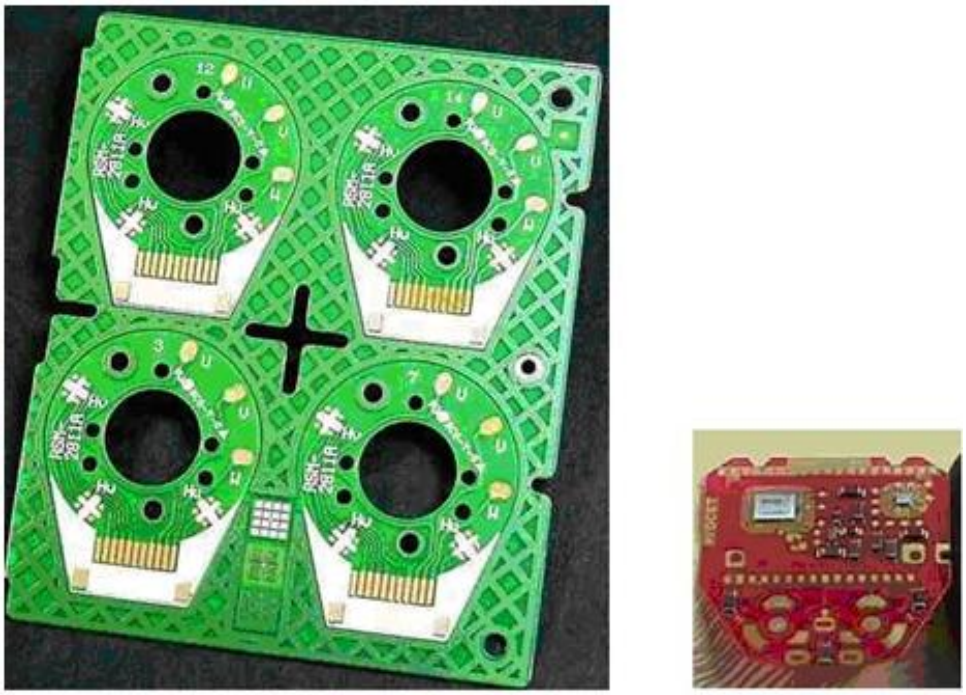
Отметим, однако, что для современных электронных устройств, даже бытового назначения, односторонние платы часто требуют контурного фрезерования, нанесения защитных маскирующих покрытий, их сборка ведется с посадкой кристаллов непосредственно на плату или поверхностным монтажом.

Пример такой платы в сборе, используемой в цифровом спидометре - альтиметре горного велосипеда, показан на рис.1.35,б.

Типовые параметры плат:

- Макс. размеры заготовки - 400 мм х 330 мм ;
- Минимальный диаметр отверстия - 0,6 мм;
- Минимальная ширина проводника - 0,15 мм;
- Минимальный зазор - 0,15 мм;
- Толщина фольги - 36 мкм;
- Толщина платы - 0,4 - 1,6 мм.

Альтернативой фотохимическому способу изготовления односторонних плат является фрезерование проводящего слоя в медной фольге на двухкоординатных фрезерных станках с ЧПУ. Этот метод наиболее эффективен при изготовлении прототипов плат, он позволяет разработчику получить опытный образец за 1,5 - 2 часа в условиях конструкторского бюро.

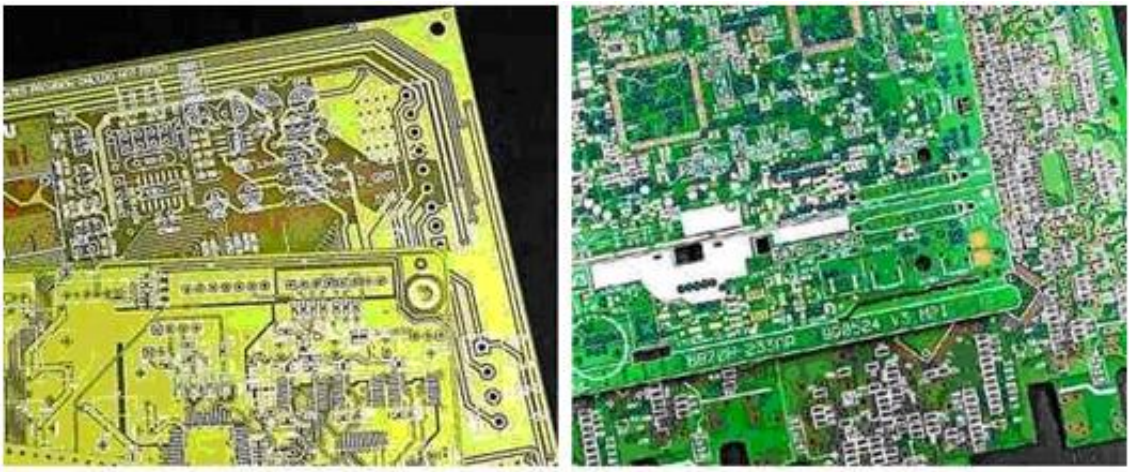


а) б)

Рис. 1.35 Примеры односторонних плат.

1.8.2 Двухсторонние печатные платы

Двухсторонние платы составляют в настоящее время значительную долю объема выпуска плат, например, в Великобритании до 47 %. Не претендуя на однозначность оценок, а, опираясь лишь на собственную статистику последних трех лет, можно оценить долю двухсторонних плат в российском производстве в 65 - 75%.
Столь значительное внимание разработчиков к этому виду плат объясняется своеобразным компромиссом между их относительно малой стоимостью и достаточно высокими возможностями.
Технологический процесс изготовления двухсторонних плат, также как односторонних, является частью более общего процесса изготовления многослойных ПП. Однако для двухсторонних плат не требуется применять прессования слоев, значительно проще выполняется очистка отверстий после сверления.
Вместе с тем, для большинства двухсторонних плат за рубежом проектные нормы "проводник / зазор" составляют 0,25 / 0,25 мм (40% от объема выпуска), 0,2 / 0,2 мм (18%) и 0,15 / 0,15 мм (18%). Это позволяет использовать такие платы для изготовления широкого круга современных изделий, они вполне пригодны как для монтажа в отверстия, так и для поверхностного монтажа. Нередко на проводники двухсторонних плат наносится золотое покрытие рис.1.36,а, а для металлизации отверстий используется серебро рис.1.36,б.



а) б)

Рис.1.36 Пример ДПП.

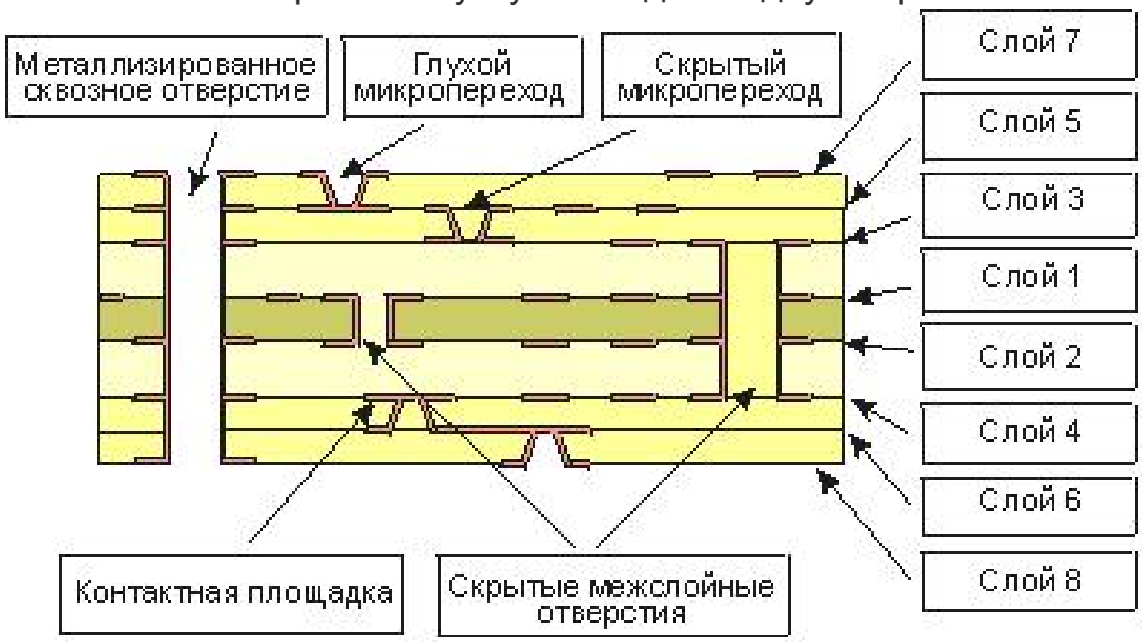
Типовые параметры двухсторонних плат:

- Максимальные размеры заготовки - 300x250...500x500 мм;
- Минимальный диаметр отверстия - 0.4...0,6 мм;
- Минимальная ширина проводника - 0,15 мм;
- Минимальный зазор - 0,15 мм;
- Толщина фольги - 18..36 мкм;
- Толщина платы - 0,4 - 2,0 мм.

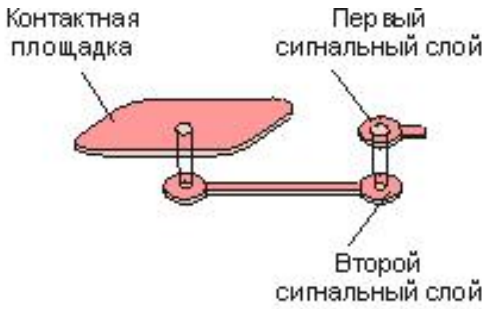
Опираясь на собственный опыт изготовления прототипов отечественных двухсторонних плат, можно констатировать, что запросы отечественных разработчиков удовлетворяются пока диапазоном проектных норм 0,2 / 0,2 - 0,3 / 0,3 мм, норма 0,15 / 0,15 мм встречается не более чем в 10% случаев. Отметим, что отечественные разработчики, точно также как их зарубежные коллеги, закладывают в технические задания на изготовление двухсторонних плат нанесение паяльной маски, маркировку, весьма часто - фрезерование плат по сложному контуру. Как правило, сборка таких плат предусматривает поверхностный монтаж компонентов.

1.8.3 Многослойные печатные платы

Многослойные печатные платы (МПП) составляют две трети мирового производства печатных плат в ценовом исчислении, хотя в количественном выражении уступают одно- и двухсторонним платам.



По своей структуре МПП значительно сложнее двухсторонних плат. Они включают дополнительные экранные слои (земля и питание), а также несколько сигнальных слоев.
Для обеспечения коммутации между слоями МПП применяются межслойные переходы (vias) и микропереходы (microvias).
Межслойные переходы могут выполняться в виде сквозных отверстий, соединяющих внешние слои между собой и с внутренними слоями, применяются также глухие и скрытые переходы.
Глухой переход - это соединительный металлизированный канал, видимый только с верхней или нижней стороны платы. Скрытые же переходы используются для соединения между собой внутренних слоев платы. Их применение позволяет значительно упростить разводку плат, например, 12-слойную конструкцию МПП можно свести к эквивалентной 8-слойной. коммутации.



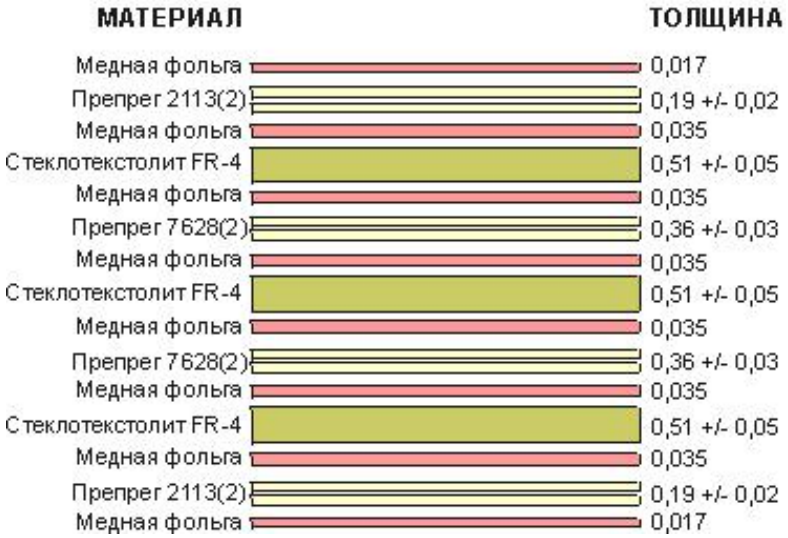
Микропереходы в контактных площадках

Специально для поверхностного монтажа разработаны микропереходы, соединяющие между собой контактные площадки и сигнальные слои.

Для изготовления МПП производится соединение нескольких ламинированных фольгой диэлектриков между собой, для чего используются склеивающие прокладки - препреги. Поэтому толщина МПП растет непропорционально быстро с ростом числа сигнальных слоев.

В связи с этим необходимо учитывать большое соотношение толщины платы к диаметру сквозных отверстий. Например, для МПП с диаметром отверстий 0,4 мм и толщиной 4 мм это соотношение равно 10:1, что является весьма жестким параметром для процесса сквозной металлизации отверстий.

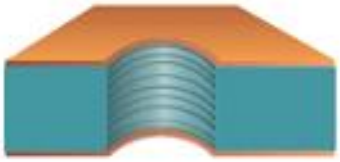
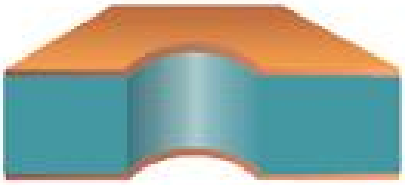
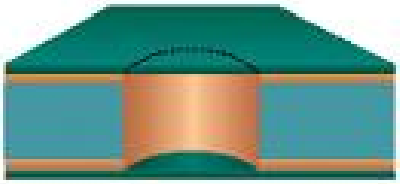
8-слойная печатная плата 3,25 +/- 0,03

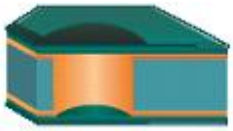
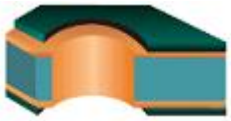
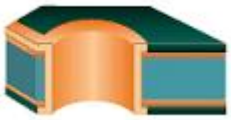
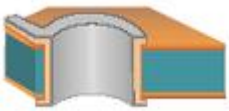
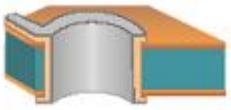
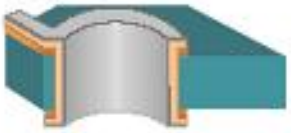


Тем не менее, даже учитывая трудности с металлизацией узких сквозных отверстий, изготовители МПП предпочитают достигать высокой плотности монтажа за счет большего числа относительно дешевых слоев, нежели меньшим числом высокоплотных но, соответственно, более дорогих слоев.

В современных МПП широко применяется поверхностный монтаж всех видов современных интегральных схем, включая, как это показано на рисунке, безкорпусных схем, заливаемых компаундом после разварки выводов.

Технология изготовления МПП

ИСХОДНЫЙ МАТЕРИАЛ	
	Это заготовка двусторонней печатной платы, вырезанной из стекла фольгированного диэлектрика. Диэлектрическое основание стеклоэпоксидная композиция: стеклоткань, пропитанная эпоксидной смолой. Медная фольга может иметь толщину от 5ти до 100мкм.
СВЕРЛЕНИЕ СКВОЗНЫХ ОТВЕРСТИЙ	
	В плате высверливаются отверстия на специализированных станках с чпу.
ОЧИСТКА ОТВЕРСТИЙ ОТ НАНОСА СМОЛЫ (DESMEAR) (для дпп этап необязательный, нежелательный)	
	Отверстия платы очищаются от наноса смолы на медные торцы слоев. Варианты способов очистки: травление в серной кислоте, в растворе перманганата, плазмохимическая очистка, гидрообразивная обработка.
ХИМИЧЕСКОЕ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ГАЛЬВАНИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ ТОНКОГО СЛОЯ МЕДИ (альтернатива - прямая металлизация)	
	Этот этап нужен для придания проводимости стенкам отверстий, необходимой для последующей гальванической металлизации. Рыхлый слой химически осажденной меди быстро разрушается, поэтому его усиливают тонким слоем гальванической меди. Для химической металлизации появилась альтернатива прямая металлизация, при которой стенки отверстий покрываются очень тонким слоем палладия. Тогда химическая и предварительная гальваническая металлизация не требуются.
НАНЕСЕНИЕ ФОТОРЕЗИСТА	
	Нанесение фоточувствительного материала (фоторезиста) на заготовку. Как правило, это пленочный фоторезист, наслаиваемый на заготовку специальным валковым устройством ламинатором. Поверхность заготовки очищается для обеспечения адгезии фоторезиста. Этот этап проходит в чистой комнате с неактиничным (желтым) освещением, фоторезист светочувствителен к ультрафиолетовому спектру.

СОВМЕЩЕНИЕ ФОТОШАБЛОНА ПОЗИТИВА	
	С заготовкой совмещается фотошаблон. Круг, часть которого изображена, контактная площадка. Изображение на фотошаблоне позитивное по отношению к будущей схеме.
ЭКСПОНИРОВАНИЕ ФОТОРЕЗИСТА	
	Участки поверхности, прозрачные на фотошаблоне, засвечиваются. Засвеченные участки фотополимеризуются и теряют способность к растворению, фотошаблон снимается.
ПРОЯВЛЕНИЕ ФОТОРЕЗИСТА	
	Изображение на фоторезисте проявляется: незасвеченные участки растворяются, засвеченные фотополимеризуются и остаются на плате, потеряв способность к растворению. В результате фоторезист остается в тех областях, где проводников на плате не будет. Таким образом, на плате остается негативное изображение топологии схемы. Назначение фоторезиста обеспечить избирательное гальваническое осаждение меди.
ГАЛЬВАНИЧЕСКОЕ (ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ) ОСАЖДЕНИЕ МЕДИ	
	Медь наносится на поверхность стенок отверстий до толщины 25 мкм. При такой толщине металлизация обеспечивает необходимую прочность при термодинамических нагрузках, свойственных последующим пайкам. При металлизации отверстий неизбежно металлизируются поверхности проводников.
УДАЛЕНИЕ ФОТОРЕЗИСТА	
	Фоторезист удаляется, оставляя металлорезист на проводниках и в отверстиях, и обнажает медь в пробельных местах (зазорах). Медь, покрытая металлорезистом, останется не вытравленной и формирует топологию слоев платы.
ТРАВЛЕНИЕ МЕДИ	
	На этом этапе металлорезист защищает медь от травления. Незащищенная медь растворяется в травящем растворе, оставляя на плате рисунок будущей схемы.
УДАЛЕНИЕ МЕТАЛЛОРЕЗИСТА ОЛОВО-СВИНЕЦ	
	Металлорезист удаляется с поверхности меди в специальном растворе. Это начало процесса, называемого SMOBC (solder mask over bare copper - маска поверх необработанной меди). В других процессах, например, если нанесение защитной маски не осуществляется, оловянно-свинцовая

	смесь оплавляется для дальнейшего использования (лужение).
НАНЕСЕНИЕ ПАЯЛЬНОЙ МАСКИ	
	Для защиты поверхности платы наносится паяльная маска - электроизоляционное нагревостойкое покрытие. Существует несколько типов масок и методов ее нанесения, фоточувствительные композиции могут быть жидкими и пленочными. Тогда маска наносится и обрабатывается методами фотолитографии, т.е. теми же способами, что и фоторезист. Этот процесс обеспечивает высокую точность совмещения. Способ трафаретной печати не обладает такой точностью, но этот процесс более производителен в массовом производстве.
ОБЛУЖИВАНИЕ МОНТАЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ HAL-ПРОЦЕСС (hot air leveling - выравнивание горячим воздухом)	
	Открытые маской участки меди (монтажные отверстия, контактные площадки) обпуживаются горячим припоем методом погружения. Чтобы не оставлять на плате натеков припоя и освободить отверстия от припоя, плата при изъятии из ванны облуживания обдувается горячими воздушными ножами. Кроме сдувания излишков воздушные ножи выравнивают припой на поверхностях контактных площадок и монтажных отверстий. Теперь плата готова для заключительных этапов: нанесения надписей (трафаретная печать или фотолитография), обрезки по контуру, тестированию и упаковки.

Примеры МПП с поверхностным монтажом

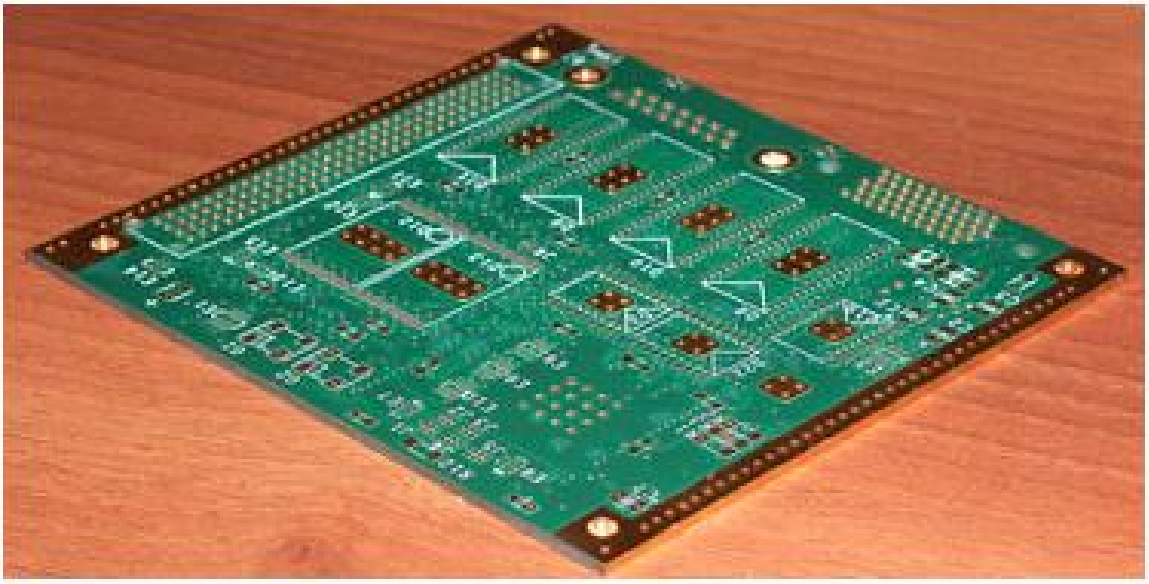


Рис. 1.37 МПП со слоями теплоотводов (термослои меди 200 мкм).

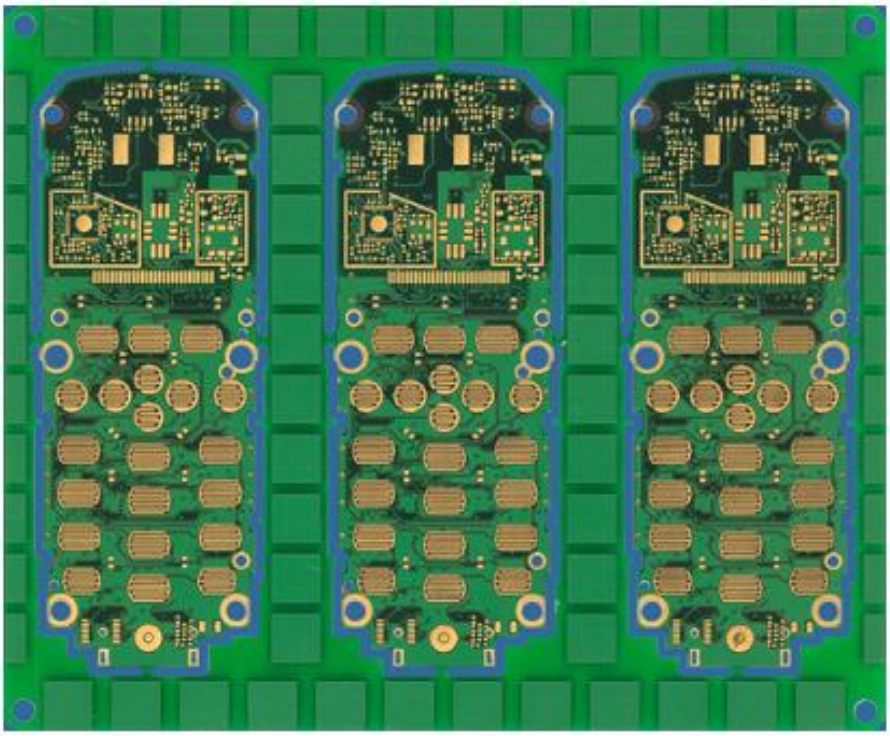


Рис. 1.38 Шестислойная печатная плата – мультиплата (три платы на одной заготовке) со сложными внутренними вырезами, покрытая Ni/Au.

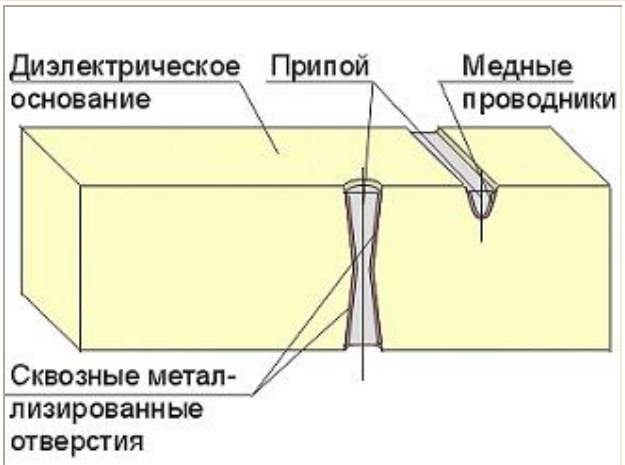
1.8.4 Гибкие печатные платы

Использование гибких диэлектрических материалов для изготовления печатных плат дает как разработчику, так и пользователю электронных устройств ряд уникальных возможностей. Это, прежде всего - уменьшение размеров и веса конструкции, повышение эффективности сборки, повышение электрических характеристик, теплоотдачи и в целом надежности.
Если учесть основное свойство таких плат - динамическую гибкость - становится понятным все возрастающий объем применения таких плат в автомобилях, бытовой технике, медицине, в оборонной и аэрокосмической технике, компьютерах, в системах промышленного контроля и бортовых системах.
Гибкие печатные платы (ГПП) изготавливаются на полиимидной или лавсановой пленке и поэтому могут легко деформироваться даже после формирования проводящего рисунка. Большая часть конструкций гибких ПП аналогична конструкциям печатных плат на жесткой основе.

	Односторонние ГПП наиболее распространены в этом классе плат, поскольку проявляют наилучшую динамическую гибкость. Контактные площадки таких плат расположены с одной стороны, в качестве материала проводящей фольги чаще всего используется медь.

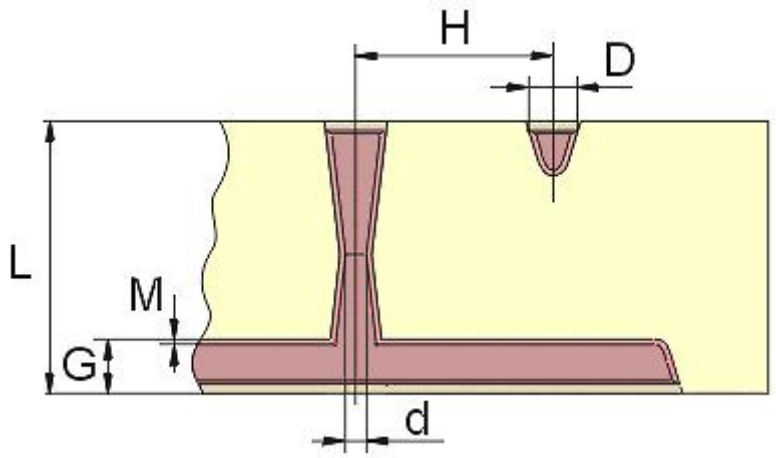
	Односторонние ГПП *с двухсторонним доступом* имеют один проводящий слой, контактные площадки к которому выполнены с обеих сторон платы.
	Двухсторонние ГПП имеют два проводящих слоя, которые могут быть соединены сквозными металлизированными переходами (на рисунке проводники нижнего слоя идут перпендикулярно проводникам верхнего слоя). Платы этого типа обеспечивают высокую плотность монтажа, часто применяются в электронных устройствах с контролируемым полным сопротивлением (импедансом) плат.
	Многослойные ГПП содержат не менее трех проводящих слоев, соединеных металлизированными отверстиями, которые обеспечивают межслойное соединение. В таких платах проще реализовывать высокую плотность монтажа, поскольку не требуется обеспечивать большие значения соотношений "высота/диаметр отверстия". Прогнозируется применение таких ГПП для сборки на них многокристальных интегральных схем.
	Жестко-гибкие ПП являются гибридными конструкциями и содержат как жесткие, так и гибкие основания, скрепленные между собой в единую сборку и электрически соединенные металлизированными отверстиями. Наиболее распространены в изделиях оборонной техники, однако расширяется их применение и в промышленной электронике.
	ГПП с местным ужесточением (укреплением). В таких платах возможно размещение внутри гибкой основы жестких металлических деталей. Получаются многоэтапным процессом фотолитографии и травления.

1.8.5 Рельефные печатные платы (РПП)

	Конструкция и технология изготовления РПП существенно отличаются от традиционных двухсторонних (ДПП) и многослойных (МПП) плат. Заметим, что авторами большинства конструкций и технологий РПП в нашей стране являются А.В. Богданов и Ю.А. Богданов. РПП представляет собой диэлектрическое основание, в которое углублены медные проводники, выполненные в виде металлизированных канавок, и

	сквозные металлизированные отверстия, имеющие форму двух сходящихся конусов. Такие канавки и отверстия заполняются припоем. Обычно РПП имеют два проводящих и один изоляционный слой.
Переходные отверстия в шаге трассировки; Монтажное отверстие; Ламели; Глухие монтажные отверстия; - первый проводящий слой; - второй проводящий слой; - переходные металлизированные отверстия	Как видно на рис. элементы проводящего рисунка могут быть следующих видов: • перпрямолинейные проводники на первом и втором слоях; • переходные металлизированные отверстия (для электрического соединения элементов рисунка на проводящих слоях); • сквозные монтажные металлизированные отверстия (для монтажа штыревых выводов электронных компонентов; • металлизированные ламели (для монтажа планарных выводов электронных компонентов; • глухие монтажные металлизированные отверстия (для монтажа планарных выводов электронных компонентов, формованных для пайки встык). Проводники прямолинейны и параллельны осям X и У, что связано с особенностью технологического оборудования изготовления канавок.

Характеристики рельефных плат



Диаметр переходных металлизированных отверстий на поверхности диэлектрического основания не превышает ширины проводника. При

этом контактные площадки вокруг переходных отверстий отсутствуют. Это обеспечивает возможность установки переходов в шаге трассировки (в соседних дискретах трассировки) без всяких ограничений. Обычно трассировка РПП проводится в строго ортогональной системе, что означает проведение горизонтальных проводников на одном проводящем слое, а вертикальных проводников - на другом. Это обеспечивает большие трассировочные возможности, чем при других системах, но при этом появляется большое число переходов. Однако для РПП, в отличие от любых других, переходы повышают, а не понижают надежность платы.

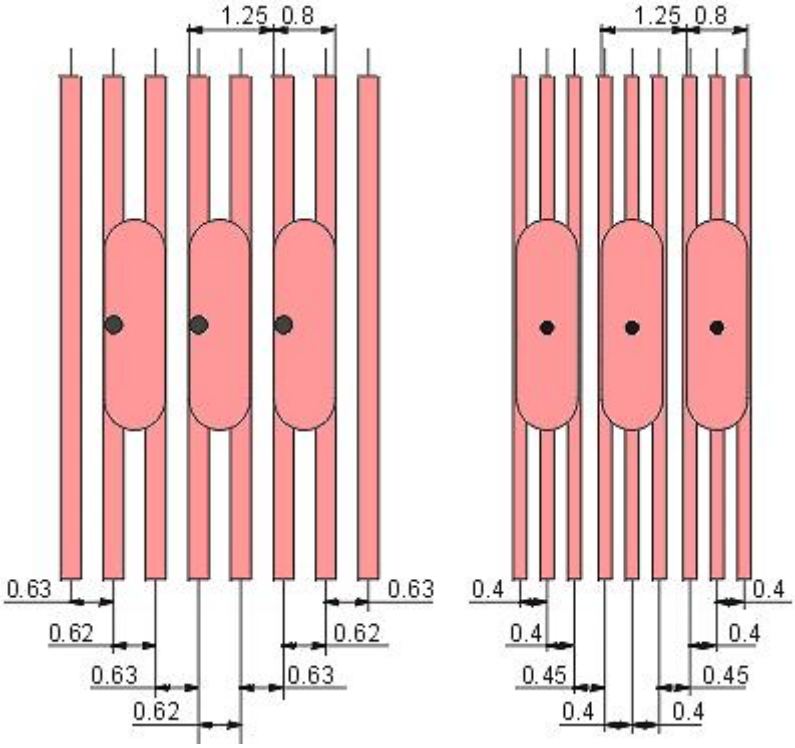


Рис.1.39 Варианты используемых постоянных и переменных шагов трассировки для РПП с микросхемами.

Основным параметром конструкции РПП, определяющим другие ее параметры, является минимальный шаг трассировки minH. Здесь существенно использование переменного шага трассировки. Первоначально это диктовалось применяемым технологическим оборудованием, обеспечивавшим перемещение с дискретностью 10 мкм. В дальнейшем обнаружилось, что это повышает трассировочные возможности за счет симметричного прохождения трасс через большинство монтажных точек. Кроме того, переменный шаг позволяет повысить технологичность путем смещения центров переходных отверстий от краев монтажных точек.

На рис.1.39 приведены варианты используемых постоянных и переменных шагов трассировки для РПП с микросхемами, имеющими следующие типы и шаги внешних выводов: штырьевые - 2,5 мм, планарные - 1,25 мм и планарные - 1,0 мм.

В таблице 6 приведены типовые значения конструктивных параметров

РПП для minH. И таблицы видно, что особенностью РПП является их малая толщина по сравнению с ПП. Это в сочетании с насыщенностью металлом диэлектрического основания обеспечивает хорошую теплопроводность. Сечение меди в канавках обеспечивает погонное сопротивление 3-3,5 Ом/м и предельный ток по проводнику 300-400 мА. Эти параметры следует принимать во внимание при проектировании цепей питания, а так же сильноточных сигнальных цепей.

Таблица 6. Типовые значения конструктивных параметров.

min H, мм	L, мм	G, мм	D, мм	d, мм	M, мм
0,62	1,5	0,3	0,3	0,15	0,04
0,5	1,0	0,25	0,25	0,15	0,04
0,4	0,8	0,25	0,2	0,12	0,035
0,32	0,6	0,15	0,16	0,1	0,03

Малый шаг трассировки в сочетании с переходными отверстиями в шаге трассировки обеспечивает высокие трассировочные возможности РПП.

1.9 Методы контроля печатных плат

Aplite 3 – это автоматизированная система визуального контроля качества печатных плат на любой стадии изготовления.
Важнейшей особенностью системы является то, что она использует стандартный планшетный сканер для ввода изображений контролируемых образцов. Никакого специального оборудования не требуется.
Контролируемые изделия:

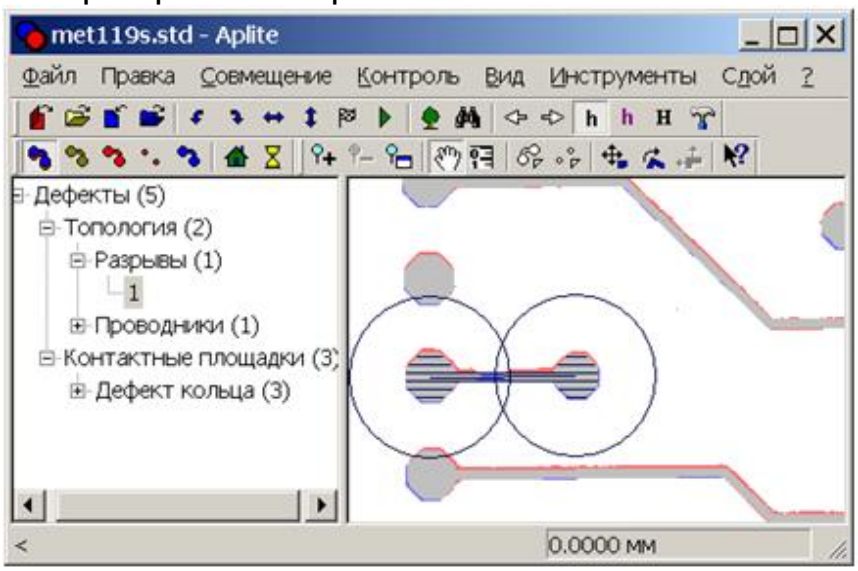
- Позитивные и негативные черно-белые и цветные фотошаблоны, изготовленные на стекле или пленке;
- Заготовки печатных плат после сверления металлизируемых отверстий;
- Заготовки печатных плат с нанесенным топологическим рисунком на любой стадии изготовления;
- Готовые печатные платы без элементов.

Обнаруживаемые дефекты:

- Искажения масштаба (растяжение пленки фотошаблона);
- Разрывы проводников;
- Перемычки между проводниками;
- Нарушение допусков на минимальную ширину печатного проводника и минимальное расстояние между проводниками;

- Отсутствующие и смещенные отверстия;
- Отверстия, имеющие неверный диаметр;
- Отсутствующие и смещенные контактные площадки;
- Контактные площадки, имеющие неверный размер или искаженную форму;
- Нарушения кольца контактной площадки;
- Все расхождения образца и эталона, размеры которых превышают пороговое значение.

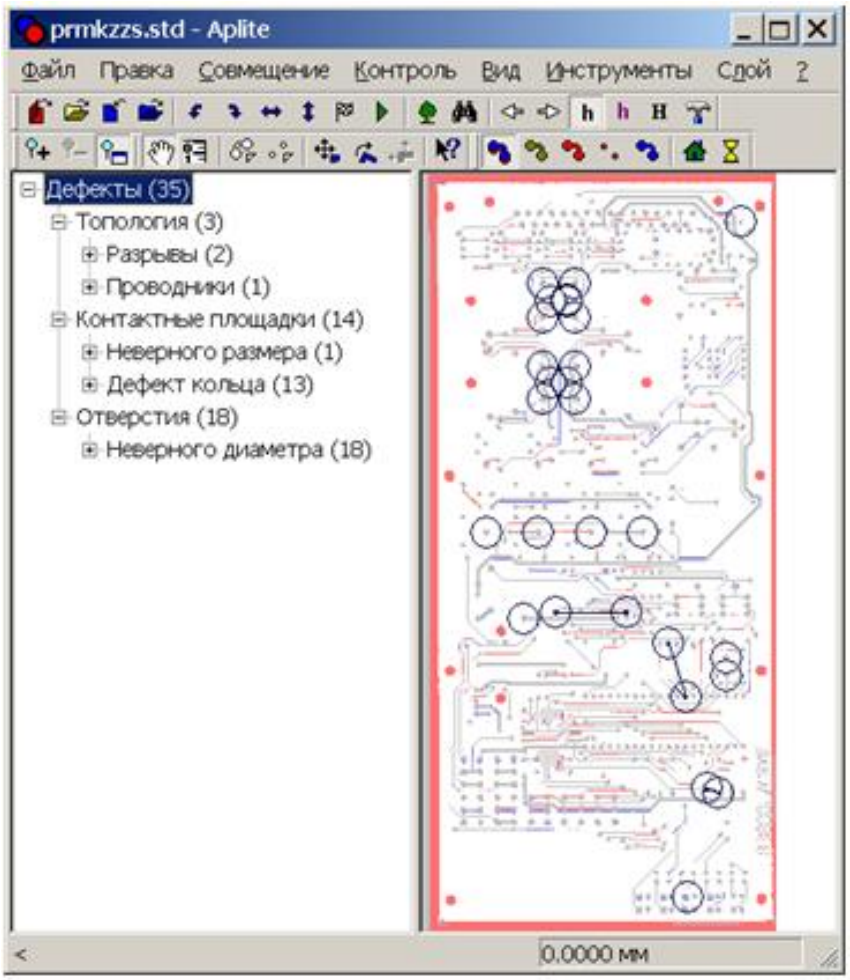
Основной метод контроля – сравнение с эталоном. В качестве эталона используется информация из САПР разработчиков печатной платы.
Система осуществляет автоматическое совмещение шаблона и эталона. Результаты работы системы выдаются в наглядной форме. Удобные средства навигации по изображениям и дефектам позволяют оператору быстро принимать решения.



Точность контроля определяется максимальным разрешением сканера, объемом оперативной памяти и быстродействием вычислительной системы. Имеется возможность контроля заготовок по частям.

1.9.1 Демонстрация основных особенностей

Данный пункт содержит краткую демонстрацию основных особенностей Aplite на реальном примере.
После сканирования очередного образца Aplite автоматически преобразует его в бинарную форму, затем осуществляется автоматическое совмещение шаблона и эталона и автоматическая процедура обнаружения дефектов, включающая контроль топологии и контактных площадок. После завершения процесса пользователю выдается отчет.



Активным является слой совмещения, который формируется из двух изображений: синий цвет соответствует эталону, красный – шаблону. Нажимая клавишу Пробел, пользователь поочередно просматривает все дефекты, обнаруженные системой.

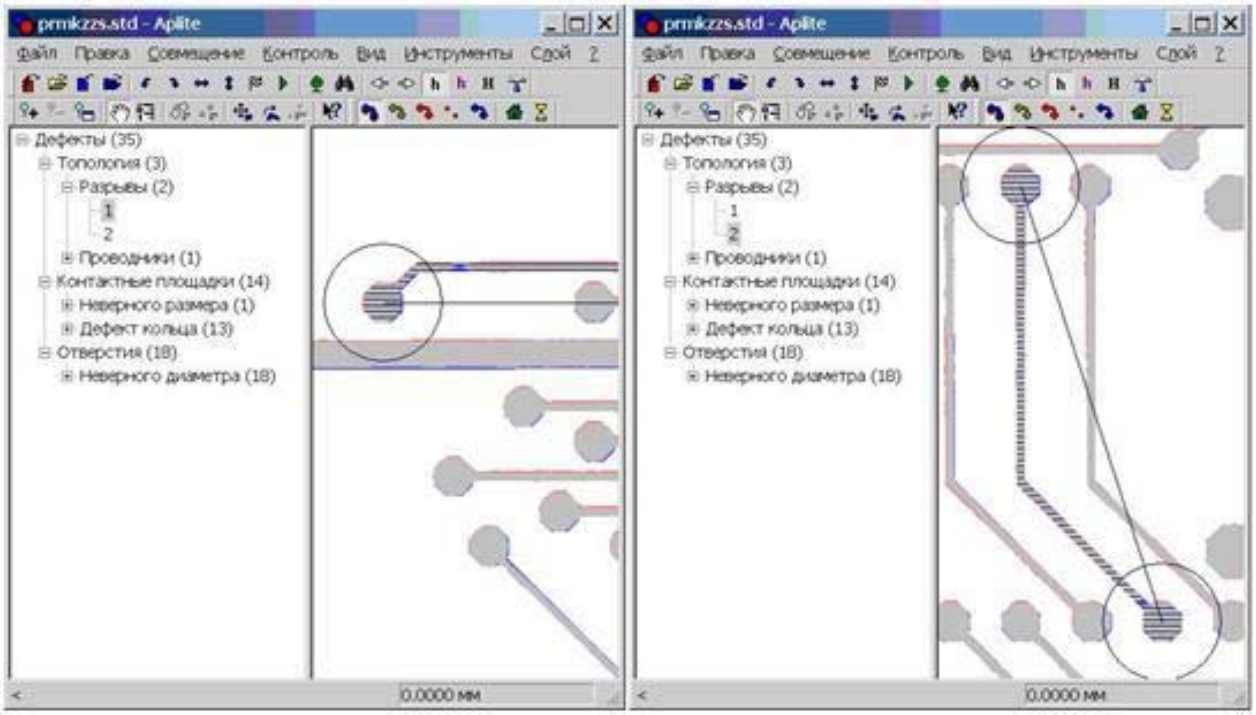
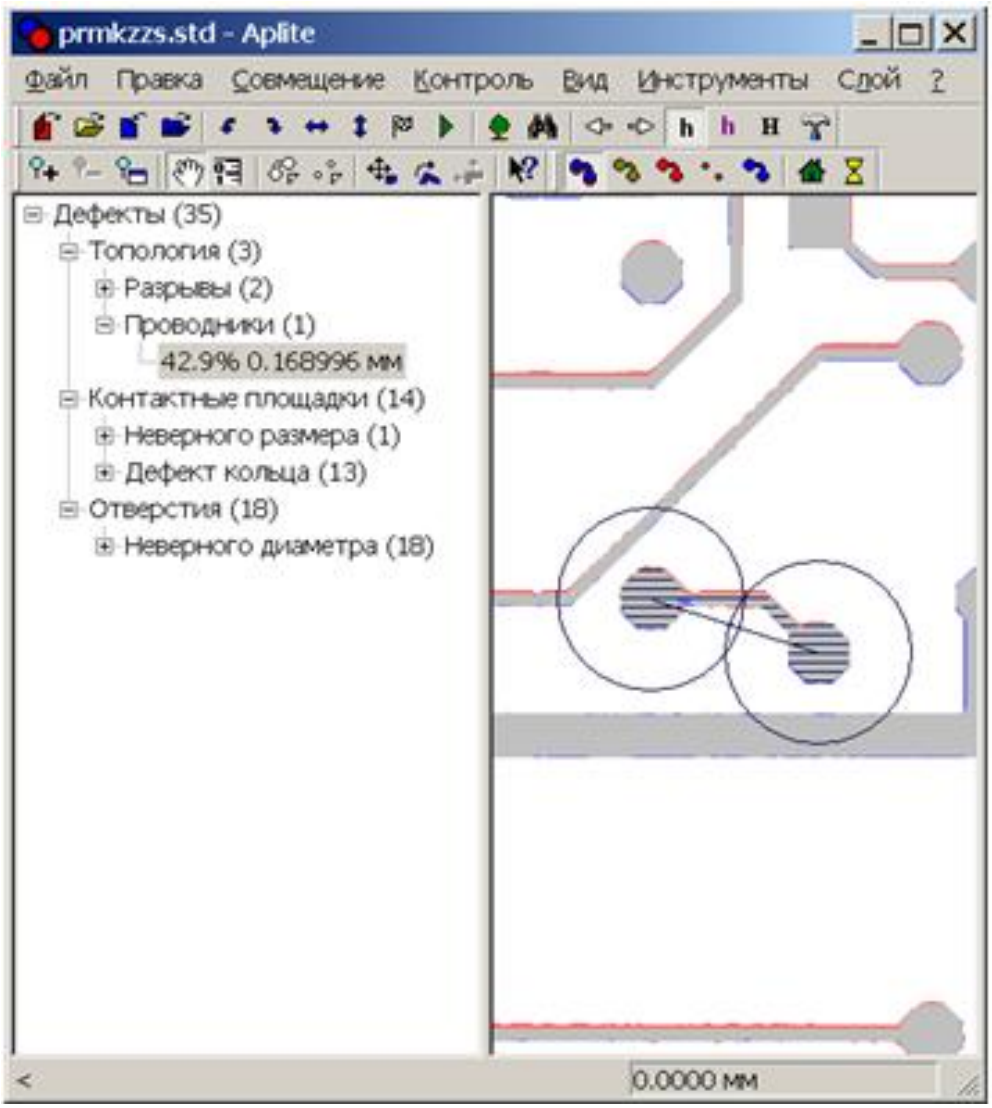
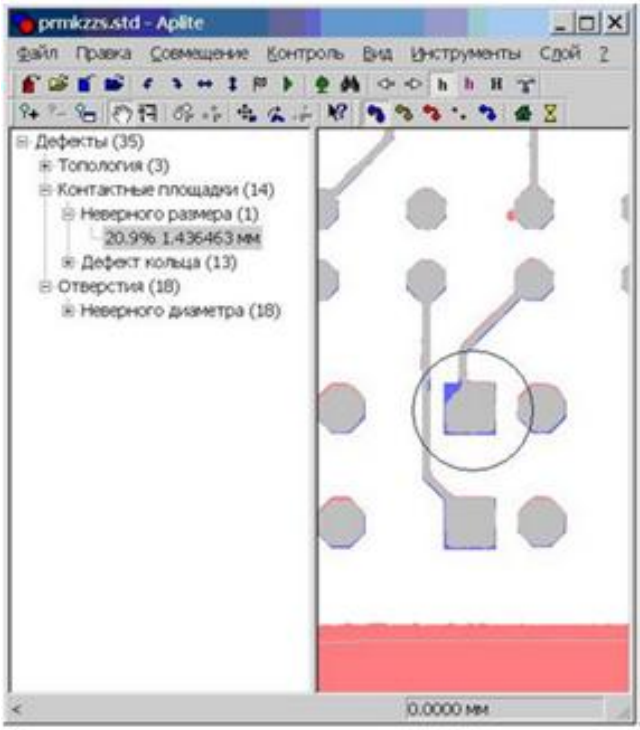


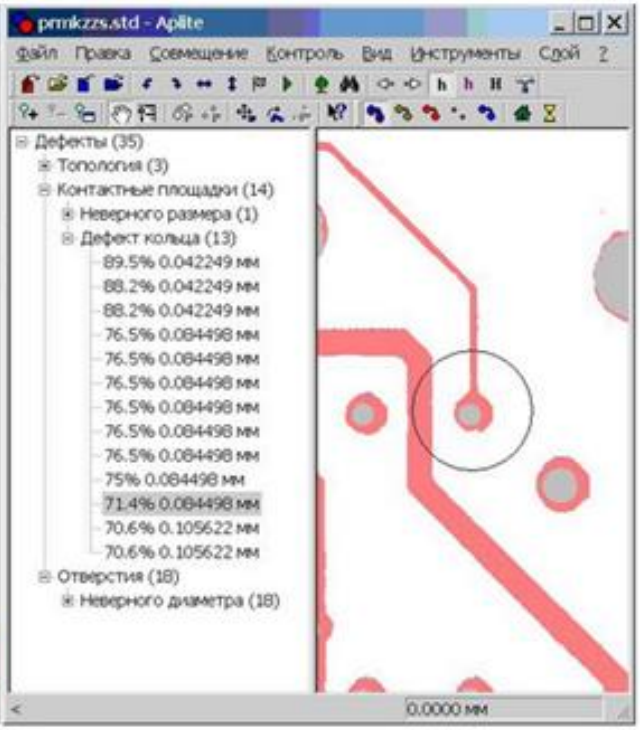
Рис.1.40 Два разрыва.

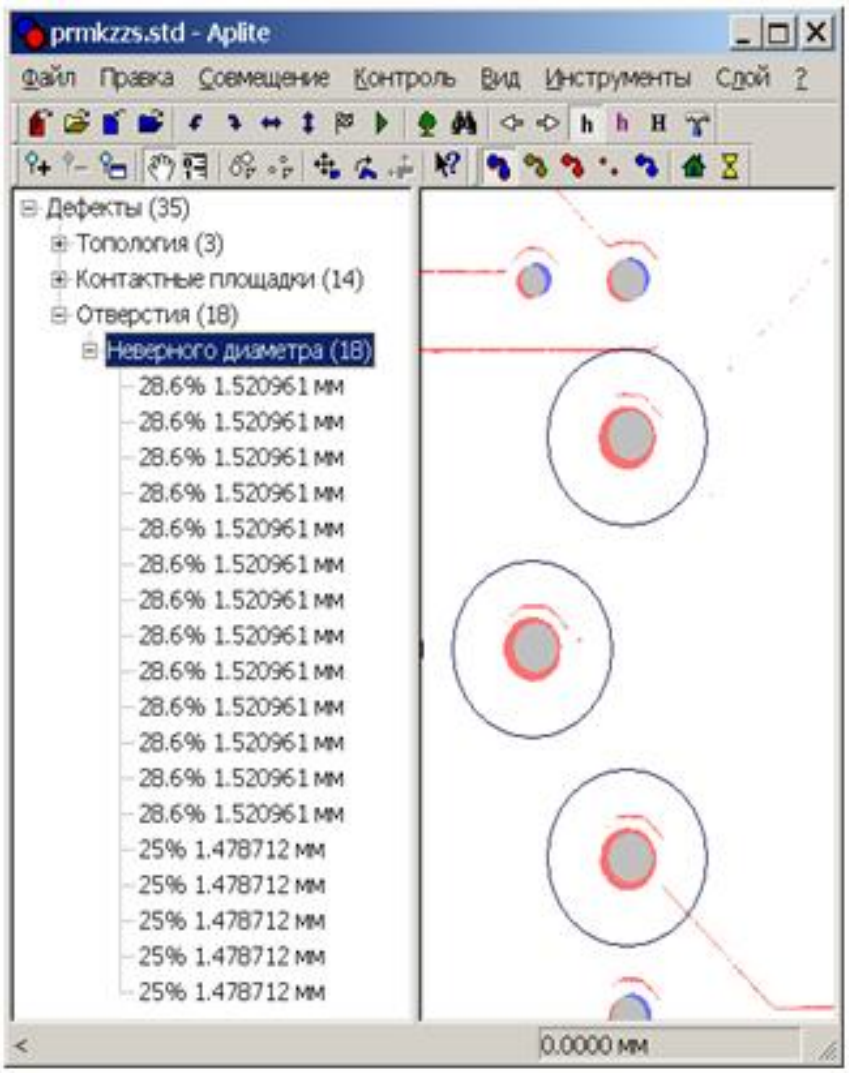
Далее идет нарушение ширины проводника.



Контактные площадки и отверстия этой платы также содержат дефекты:

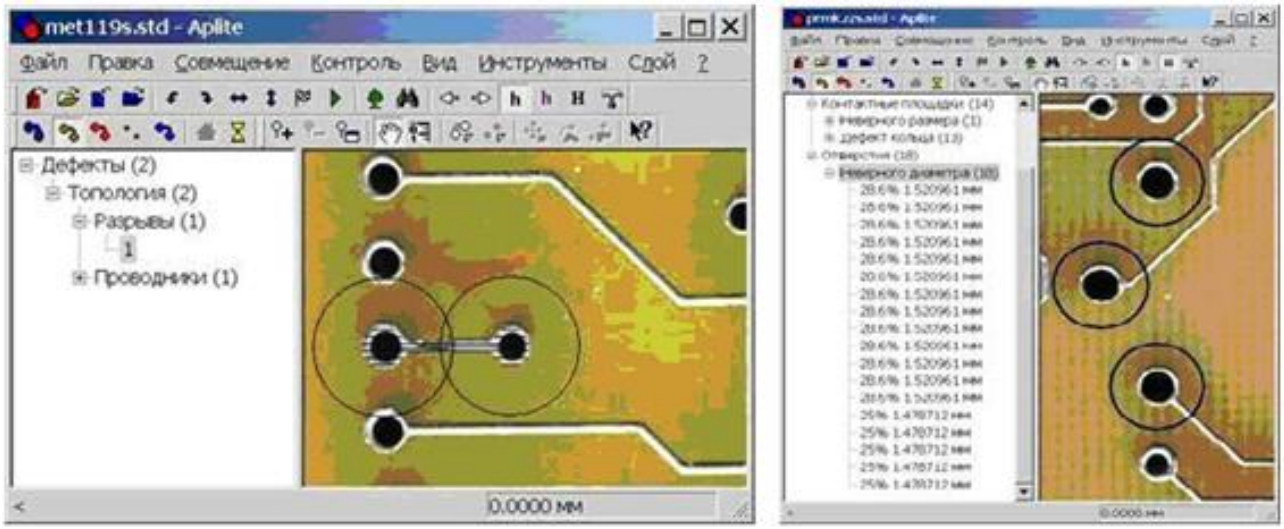




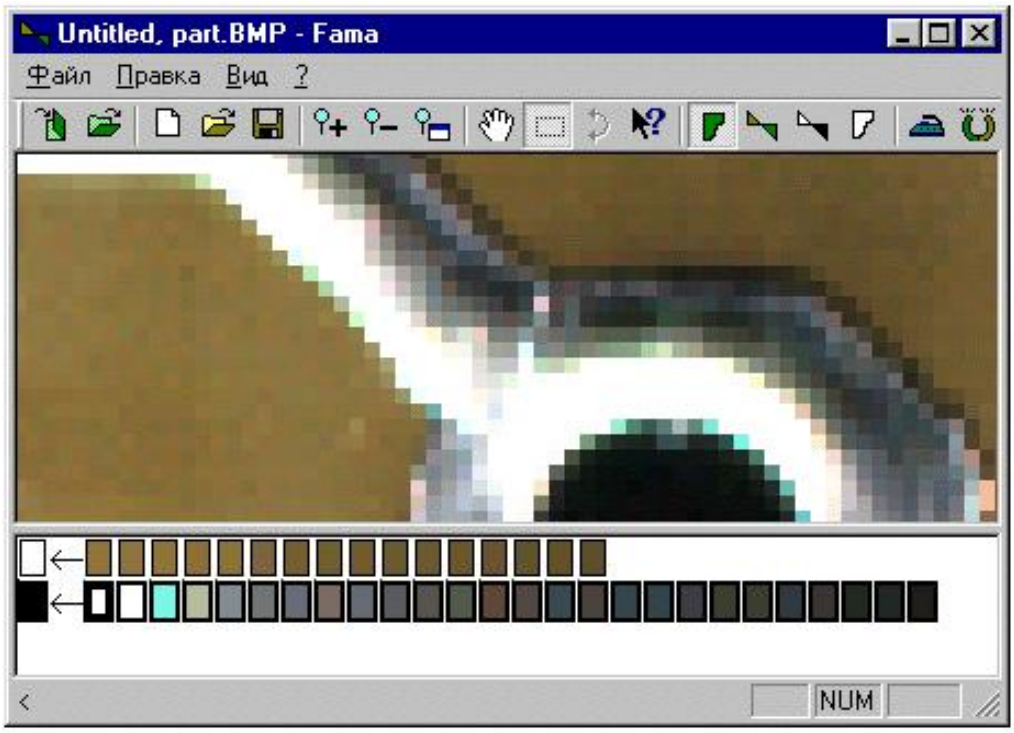


Большинство дефектов имеют численную характеристику, выраженную в процентах. Благодаря этому наиболее грубые из них выдаются первыми.

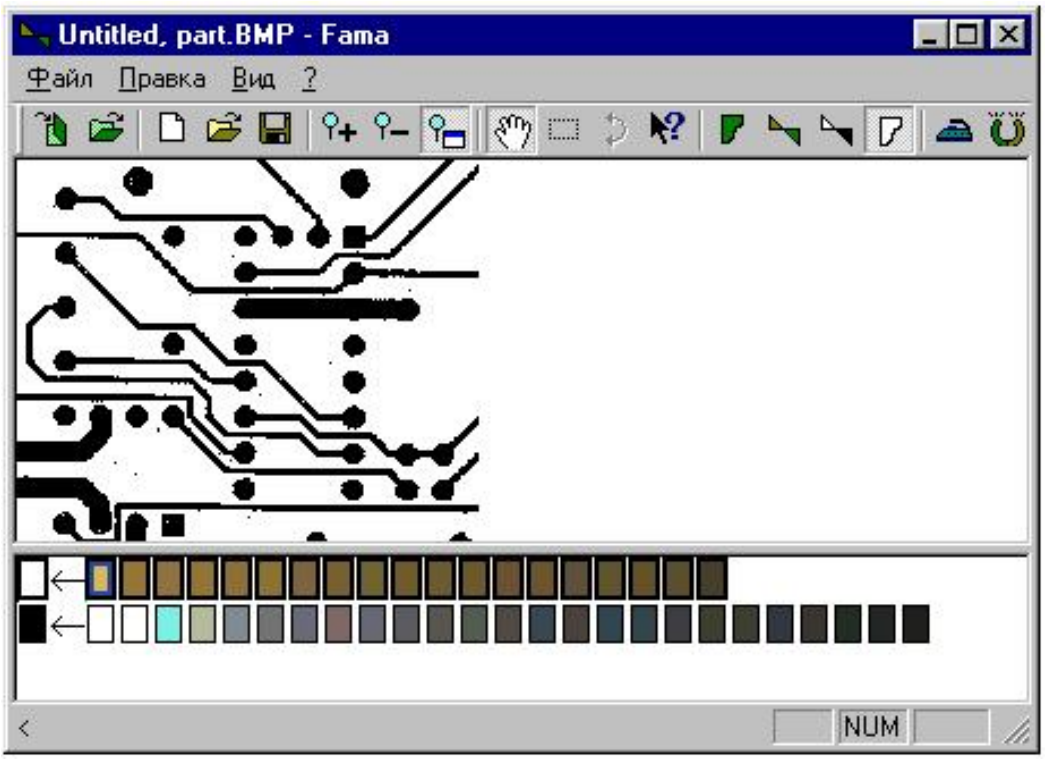
Система способна показывать дефекты непосредственно на цветном изображении образца:



Система может настраиваться на любые цвета контролируемых изделий.

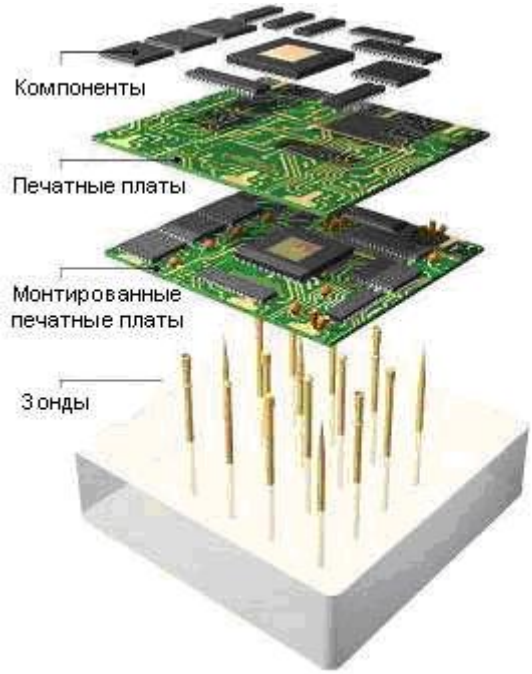


Пара цветовых наборов внизу окна - типичные представители цветов положки и металлизации. Руководствуясь этой информацией, система формирует черно-белое изображение для контроля.



1.9.2 Электрический контроль

Электрический контроль - важная часть производства печатных плат. Он предназначен для проверки целостности - разобщения печатных плат, что включает в себя проверку на обрыв цепи, короткое замыкание, правильность топологии.



В основе электрического контроля лежит наличие в системе "зонд-проводник платы-зонд" или "зонд-проводник платы-компонент-проводник платы-зонд" контакта. Наличие проводимости в платах обусловлено взаимным расположением цепей и их целостностью в топологии плат.
Электрическим контролем занимается целый ряд фирм: Everett Charles Technologies(ECT), ATG , Mania и так далее. Необходимым объектом для контроля является печатная плата вместе со своей топологией: контактными площадками, зазорами между ними, цепями. Для контроля этих параметров на правильность и точность служат специальные тестовые системы (или системы контроля), в которых для непосредственной проверки используются специальные зонды. Чаще всего они размещаются на адаптере. С помощью программного обеспечения подготовки данных обеспечивается непрерывный и малозатратный по времени контроль.

Технологии электрического контроля

Существуют две основные технологии электрического контроля:
1. Ложе гвоздей;
2. Подвижные зонды.

Считается, что технология «ложе гвоздей» предусматривает контроль печатных плат с адаптером, а технология «подвижные зонды» - безадаптерный контроль. Такое положение дел обусловлено только тем, что в технологии «ложе гвоздей» подпружиненные зонды размещаются неподвижно, а в технологии «подвижные зонды» они находятся в движении как сверху платы, так и снизу.
Контроль с адаптером более производительный, чем контроль подвижными зондами, однако недостатком "адаптерного" контроля

является то, что для каждой платы требуется свой адаптер. Этот отрицательный аспект ликвидируется путём создания универсальных адаптеров, на котором регулярно просверлены отверстия с определённым шагом.

Ложе гвоздей

Также для контроля печатных плат применяются универсальные сетчатые тестеры. Они способны производить электрический контроль одиночной или двойной плотности контрольной точки. Сетчатые тестеры обладают высокими скоростью и производительностью вплоть до 1000 плат в час. Они подходят для контроля плат больших серий. Характерной отличительной чертой большинства сетчатых тестеров является их эксплуатационная гибкость и универсальность, достигаемые посредством варьирования зон контроля и свободой выбора адаптера. Наиболее интересной деталью, улучшающей их работу с высокой точностью,- это свободный доступ к верхней и нижней сторонам зоны контроля с вариантом поворота рабочей (верхней) стороны зоны контроля и автоматический самоконтроль.

Подвижные зонды

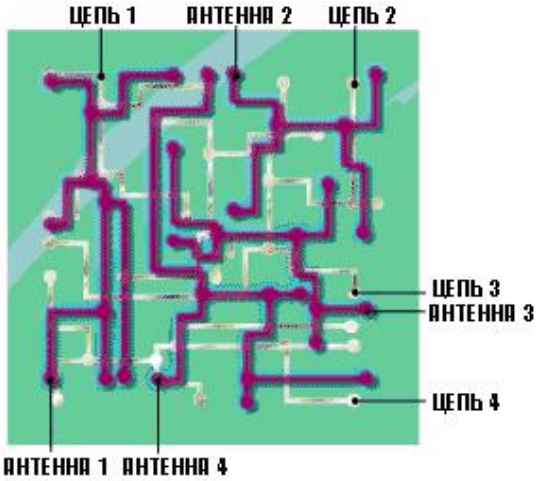
Технология контроля печатных плат подвижными зондами облегчает проведение контроля и ликвидирует необходимость в контроле с адаптером. Помимо сохранения времени и стоимости в контроле печатных плат, она предусматривает единственный метод проведения контроля точности геометрической схемы платы с контактными площадками в 2 мил и шагом в 3 мил.
Фирмы, занимающиеся проведением электрического контроля, достигли заметных успехов в совершенствовании этой технологии. Фирма ECT, которая занимается разработкой оборудования для подвижного контроля с 1981 года, выпускает в настоящее время целый ряд установок зондового контроля. В настоящее время широко распространено производство систем контроля линейными зондами, которые способны работать с промышленной производительностью. Фирмой ECT разработана полностью автоматическая установка проверки печатных плат на короткое замыкание Oz™ . Эта система специально предназначена для поиска трудно находимых ошибок и опасных участков.

1.9.3 Тестовая система A2

Плотности контрольных точек на печатных платах и других взаимосвязанных подложках увеличиваются постоянно и неумолимо, что приводит к уменьшению в размерах контактных площадок и

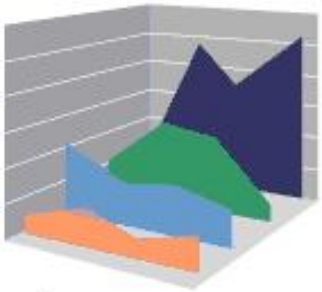
зазоров между ними. Такое положение вещей приобретает всё большее распространение в техническом и экономическом вопросах контроля печатных плат. В системе А2, по замыслу ECT, реализуется тестовая методология, содержащая в себе производительность, высокотехнологическую тестоспособность, надёжность и хорошая экономическая модель.

Контроль



Схематичное расположение антенн и подлежащих контролю цепей

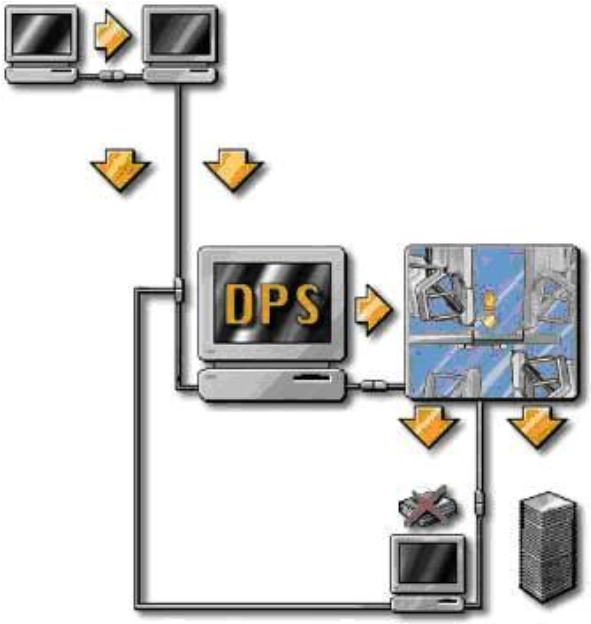
Величина и сложность процесса контроля (поиск короткого замыкания) долго сказывались на скорости подвижных зондов. Фирма ECT, для увеличения скорости стала использовать запатентованную процедуру: метод Зонного Контроля.
Используя данные CAD и цепей, находящихся на плате, число проверок на короткое замыкание может резко уменьшиться при использовании этого метода. Целостность контроля остаётся незыблемой. Цепи на плате используются как антенны для контроля других цепей. Результат - индивидуальный "отпечаток пальцев" для каждой цепи.
Один зонд подводит сигнал в цепь, которая выполняет функцию антенны (передатчика). Другой зонд контактирует с цепью, которую надо проверить (приёмник). Одновременно другие зонды подходят к цепям, которые ещё не были проверены.



Многомерная оценка измерений проверенных цепей

Каждая из этих цепей показывает характерные значения, которые, если наносятся на диаграмму, образуют индивидуальную кривую - как уникальный "отпечаток пальцев". Четыре цепи (обозначенные как антенны 1-4 на рисунке) используются в роли передатчиков. Программное обеспечение подготовки данных автоматически определяет оптимальный выбор антенн, согласно топологии платы. Другие цепи, показанные как цепи 1-4 на рисунке, проверяются. За один ход каждая цепь образует характерную кривую с четырьмя значениями, по одному для каждой антенны. Эти значения создают индивидуальный "отпечаток пальцев", дающие возможность контроля. Каждая цепь может быть измерена только один раз. Это значит, что во время контроля изоляции наконечник зонда размещён на только одной контактной площадке на одной цепи или только однажды в конечной точке (по выбору). Вся эта операция происходит одновременно на обеих сторонах платы. Все зонды работают независимо друг от друга, но параллельно. Производительность - это очень важный аспект всех систем подвижных зондов. В противоположность универсальным сетчатым системам (которые одновременно проверяют все контрольные точки), системы подвижных зондов проверяют серийно, двигаясь между каждыми контрольными точками. Время механического движения составляет большую часть времени контроля.
Оптимальная скорость зонда недостаточна для большей производительности. Механические движение имеет строгие физические ограничения, такие как увеличение и уменьшение габаритов по осям X, Y и Z, что может разрушить контактную площадку, если габариты выровнять. Наряду с оптимальной скоростью зонда, эта серия систем подвижных зондов предусматривает полностью новую технологию: многозондовые системы. При использовании более активного измерительного наконечника зонда большая скорость может достигаться при уменьшении механического движения.
Оптимально, когда как можно большее число зондов занимается контролем каждой платы. Вдобавок, зона контроля делится на зоны с 4-мя зондами, предназначенные для каждой зоны. Программное обеспечение устанавливает оптимальное расположение платы и назначение, и движение отдельных зондов с целью достижения максимальной производительности. Время контроля многократно уменьшается при независимой работе 8, 12 или 16 зондов в малых зонах с маленьким механическим движением и с большой полной скоростью. Этот метод контроля и использование многозондовых систем контроля уменьшают необходимость в разметке контактных площадок и повреждение контактных площадок, благодаря контролю движения по оси Z. Он поддерживается ультра-световой конструкцией наконечника зонда, контролем скорости по оси Z и давления.

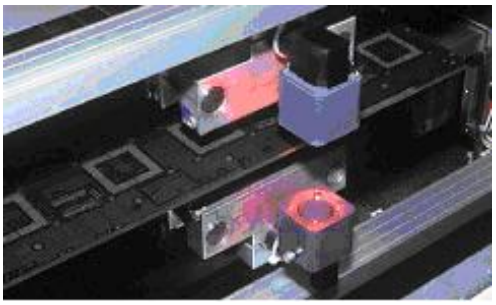
Программное обеспечение подготовки данных



Подготовка данных, используя данные топологии платы, - важный первый шаг. За этот шаг создаются все данные для системы контроля. Параметры системы контроля и данные контроля в формате фирмы ECT ATF+EPC или IPC-D-356A являются входными данными для программного обеспечения подготовки данных. Программное обеспечение подготовки данных может запускаться на системе контроля или вне неё.
Тестовые данные в программном обеспечении подготовки данных могут визуализироваться и редактироваться. Из этих данных определяется следующее:

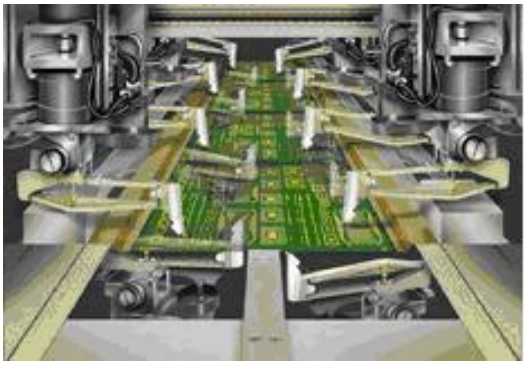
- Автоматическое и оптимальное размещение плат на системе контроля, обеспечение эффективного размещения зондов в проверяемых точках;
- Автоматический выбор антенн для обеспечения оптимальных результатов зонного контроля;
- Оптимальное движение зондов, что экономит время;
- Соседние данные объединяются для последующего увеличения скорости;
- Регистрация точек или изучение "мишеней";
- Шаг для загрузки кратного числа плат за одно время.

Техническое оснащение



- Системная регистрация универсальных результатов обеспечивает быструю однократную или многократную загрузку плат;
- Двухкамерная система автоматически обеспечивает точную регистрацию. Фактический результат сжатия, растяжения и дисторсии определяется, и данным контроля автоматически даётся компенсация;
- Каждое движение зондов контролируется высокоразрешающей замкнутой измерительной системой, обнаруживающей ошибки позиционирования.
- Система мгновенно указывает на возможный повреждённый контакт между проверяющим зондом и контактной площадкой на плате и на ошибки позиционирования;
- Легко используемый диагностический шаблон проверяет аппаратные средства и программное обеспечение. Ошибки регистрируются и документируются;
- Предусмотрена возможность сетевого обмена данных.

A2 - 12 или 16 зондов:



Двухсторонние системы контроля A2 - это безадаптерные системы контроля. В состав системы A2 входят кодирующее устройство, двигатели с линейной обмоткой, также обеспечивается точное движение по осям X и Y. Контроль обеспечивается независимым измерением движения по оси Z.

1.10 Технологии настоящего и будущего

Над созданием разнообразных "пластиковых" электронных устройств в настоящее время работает немало компаний и исследовательских лабораторий. Правда, предлагаемые на сегодняшний день решения в большинстве своем, предполагают некий сплав новых и традиционных технологий. Например, одним из самых распространенных подходов является нанесение полупроводниковых материалов на пластиковую подложку. Однако на самом деле существует и другой вариант - использование пластичных материалов с проводящими свойствами, а точнее, - проводящих полимеров.

Первые, самые важные результаты в данной области, по сути

ставшие отправной точкой для всех дальнейших исследований, были получены Хидеки Ширакавой (Hideki Shirakawa) из Университета г. Цукуба (Япония), Аланом Хигером (Alan J. Heeger) из Калифорнийского университета и Аланом Макдармидом (Alan G. MacDiarmid) из Университета Пенсильвании. Первое сообщение о них появилось в 1977 г. в "Journal of Chemical Society"

Сущность

Основой для токопроводящих полимеров служат высокомолекулярные вещества с молекулами, в которых имеются чередующиеся двойные связи. В чистом виде они не являются проводниками заряда, поскольку электроны в них локализованы вследствие участия в образовании сильных химических связей. Для освобождения электронов применяются различные примеси. После их ввода появляется возможность перемещения зарядов (электронов и дырок) вдоль молекулярной цепи.

Электролюминесцентные полимеры

Одним из важных шагов в развитии полупроводниковых полимеров стало получение в самом начале 90-х годов электролюминесцентных полимеров. Они также являются проводящими, а излучение в них происходит за счет рекомбинации зарядов и дырок. К настоящему времени такие полимеры уже находят широкое применение в электронной индустрии: именно на их основе строятся дисплеи на органических светодиодах (OLED - Organic Light-Emitting Display), рассматриваемые многими специалистами как очень серьезный конкурент ЖК-дисплеям на рынке карманных устройств.

Практическое применение

Полимерные проводники и полупроводники считаются сейчас основой органо-электроники 21-го века. Конечно, вещества на основе органических углеродных молекул хуже проводят электричество чем, скажем, медь, и несколько хуже кремния в качестве основы микрочипов. Но они легко принимают любую необходимую форму, более легки и дешевы. К тому же, изменяя химический состав, можно варьировать свойства этих веществ в гораздо более широких пределах, чем неорганических. Растворенные полимеры можно заправлять в обычные струйные принтеры и напылять различные электронные устройства прямо на бумагу или другую гибкую основу. Например, напыляя полимерные светодиоды, можно делать видеодисплеи мобильных телефонов и других карманных устройств. Существует еще масса идей и разработок в области практического

применения проводящих полимеров. В ближайшие годы, по прогнозам специалистов, эти технологии прочно войдут в нашу жизнь.

1.11 Струйная печать как способ изготовления электронных плат

Одним из передовых подходов к изготовлению электронных устройств является разработка компании Seiko Epson.
В ноябре 2004 года во время специально организованной пресс-конференции в Токио специалисты Seiko Epson представили первую в мире, согласно их утверждению, сверхтонкую многослойную микроэлектронную плату (рис. 1.42), которая изготовлена с применением метода струйной печати.

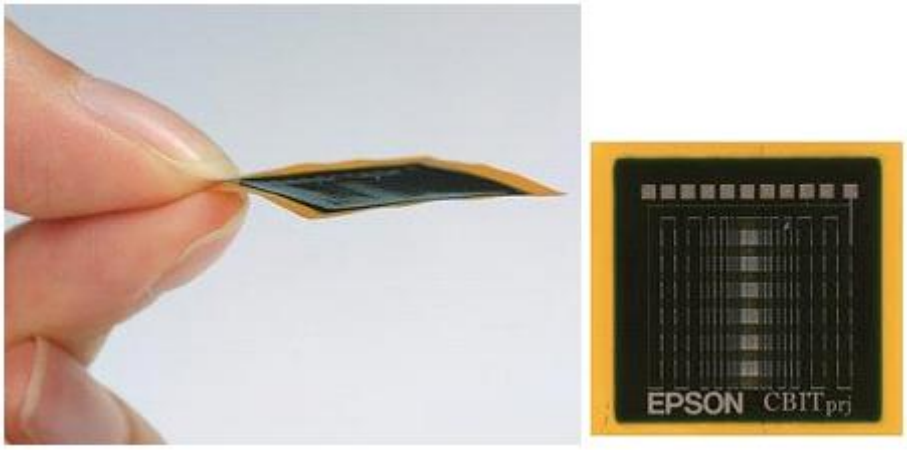


Рис.1.42. Пример сверхтонкой многослойной платы.

Продемонстрированная Seiko Epson печатная (во всех смыслах этого слова) плата обладает размерами всего 20x20 мм, а толщина ее равняется лишь 200 мкм. Данная разработка является частью исследовательского проекта, рассчитанного на три года (реализация его началась в июне 2003 г .). Участники проекта ставят перед собой две основные цели: во-первых, добиться существенного снижения энергоемкости процесса изготовления печатных плат, во-вторых, создать миниатюрные, легкие, высокопроизводительные платы, пригодные для использования в конечных устройствах, в частности в вычислительном и коммуникационном оборудовании.
На протяжении уже многих лет для размещения медных соединений на многослойных платах применяется метод фотолитографии. Однако становится все труднее изготовлять подобным образом миниатюрные и быстрые, но в то же время дешевые платы, поскольку упомянутый метод требует постоянного уменьшения толщины медных слоев, создания отдельной фотомаски для каждого из них, формирования электрических соединений между слоями (что само по себе является весьма сложным процессом) и, наконец, большого количества различных химических компонентов и реактивов - фоторезиста, проявителя, вытравливателей, обесцвечивающих средств и т. п. В то же время технология струйной печати имеет множество преимуществ

в сравнении с фотолитографией. Так, она предусматривает использование гораздо меньшего объема материалов, а сам процесс является "сухим", т. е. не происходит загрязнение воздуха вредными жидкостями. Помимо этого, процедура изготовления плат с помощью струйной печати состоит из меньшего числа шагов и легко адаптируется к различным типам устройств (поскольку не применяются фотомаски), что особенно важно, когда необходимо выпускать малые партии плат разной конструкции. Наконец, данная технология оптимально подходит для работы с многослойными структурами, так как межслойные соединения могут быть напрямую нанесены на плату. Одним словом, струйная печать позволяет производить многослойные платы высокой плотности, имеющие малую стоимость, причем - без какого-либо ущерба для окружающей среды.

Если говорить непосредственно о разработке, продемонстрированной Seiko Epson, то это 20 слойная плата размером 20x20 мм и толщиной 200 мкм (без учета твердой подложки). При формировании топологии соединений на ней применялось два типа чернил - изолирующие и проводящие. В последних содержатся микрочастицы серебра, диаметр которых составляет от нескольких до десятков нанометров. Следует отметить, что в будущем планируется использовать и другие проводящие материалы, в том числе алюминий, никель и магний - это должно способствовать еще большему снижению стоимости "отпечатанных" плат. Размеры поперечного сечения соединений в показанной плате равны 50x4 мкм (соответственно ширина и высота), а минимальное расстояние между ними - 110 мкм. В будущем инженеры компании рассчитывают довести толщину соединений до 15 мкм. Общая протяженность линий связи в представленной плате около 5 м.

К поставкам опытных образцов плат, выпускаемых методом струйной печати, Seiko Epson планирует приступить в 2006 г., а начать коммерциализацию данной технологии в 2007 г.

В процессе изготовления плат методом струйной печати используется два вида чернил - проводящие и изолирующие, при этом в случае многослойных плат (рис. 1.43) формирование электрических соединений между слоями не представляет особой проблемы в отличие от применяемой в настоящее время технологии фотолитографии. Плюс ко всему, новый метод позволяет легко переключиться с одной конструкции выпускаемых плат на другую.

Аналогичные разработки ведутся фирмой E Ink, которая была основана в 1997 г. группой сотрудников лаборатории Media Lab Массачусетского технологического института во главе с Джозефом Джекобсоном (Joseph Jacobson).

Работы в данном направлении продвигаются весьма успешно. Около года назад E Ink удалось привлечь к разработкам компанию Lucent

Technology, и вот ими представлен первый прототип гибкого дисплея.

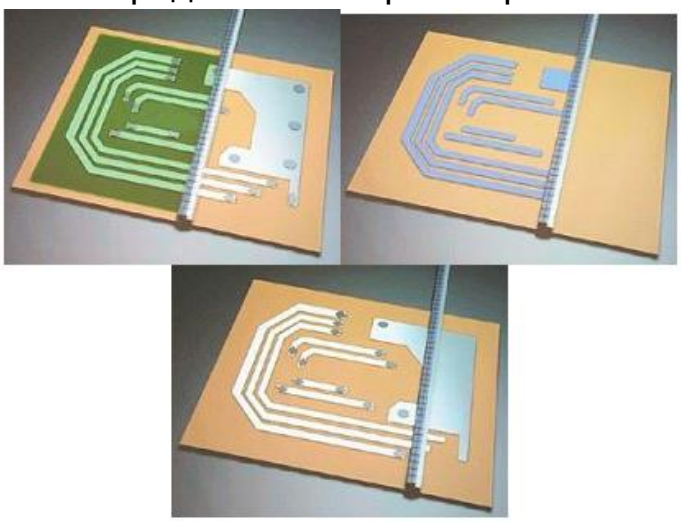


Рис. 1.43 Послойное нанесение слоев на плату.

Данное устройство имеет видимую область площадью 25 кв. дюймов и содержит несколько сотен пикселов. Основой его служат две новейшие технологии - собственно электронные чернила от E Ink, а также "пластиковые транзисторы" от Bell Labs (последняя технология предполагает создание интегрированных схем на основе пластичных материалов). Технология E Ink предполагает использование двухцветных сферических микрочастиц, за счет изменения, ориентации которых и формируется изображение (основой ее служат результаты исследований, проводившихся в центре Xerox PARC еще в 70-х годах).

Сфера потенциального применения подобных дисплеев очень широка - ноутбуки,

электронные книги, карманные устройства и т. п. Ниже представлен термочувствительный элемент, напечатанный с помощью обычного струйного принтера, (см. рис 1.44).

На этом ученые останавливаться не собираются. Их новая цель - создать технологию, которая позволила бы изготовлять микросхемы методом обычной печати.

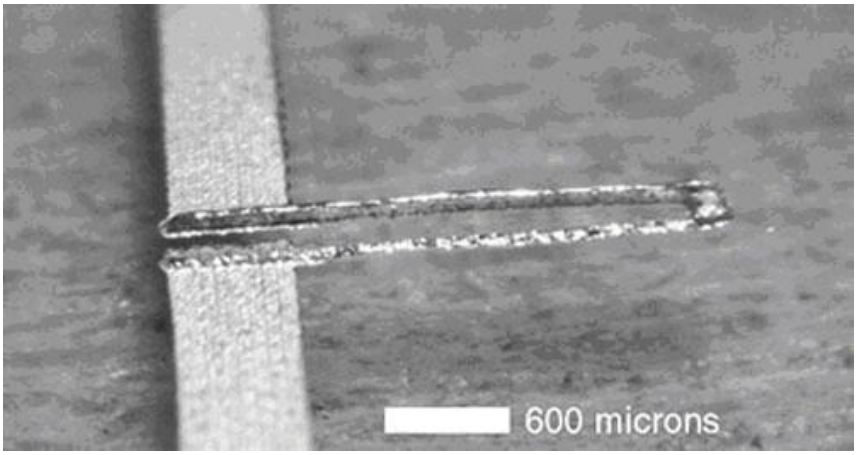


Рис. 1.44 Термочувствительный элемент, напечатанный с помощью обычного струйного принтера.

Идея заключается в том, чтобы производить чипы путем напыления на подложку специальных "полупроводниковых" чернил. К настоящему времени в MIT Media Lab уже смогли найти способ получения жидкости с необходимыми свойствами, состоящей из агрегатов размером приблизительно 100 атомов каждый. Как считают исследователи, этого вполне достаточно, чтобы "печатать" структуры с характерными размерами порядка 200 нм, что уже сравнимо с уровнем интеграции современных микросхем.
Более того, специалисты Media Lab полагают, что задуманная ими технология позволит в конечном итоге получать не только отдельные микросхемы, но и устройства, если можно так выразиться, больших масштабов, вплоть до законченных вычислительных систем. Над проблемой исследования в области "печатных" микросхем работает и ряд других исследовательских лабораторий, но их разработки основаны на применении органических полимеров. Одним из главных преимуществ таких материалов является их дешевизна, но дело в том, что они изначально имеют ограничения в плане наращивания скорости чипа. В то же время группа Джекобсона предлагает использовать жидкие суспензии ("чернила") на основе неорганических полупроводников, подобных тем, из которых изготовляются микропроцессоры, и позволяющих достичь значительной производительности.
Кроме таких очевидных преимуществ как дешевизна, простота и быстрота изготовления описанный подход имеет еще и целый ряд других достоинств. В частности, напыление производится при температуре не выше 300 градусов Цельсия, что позволит использовать в качестве подложки легкоплавкие материалы, в первую очередь все тот же пластик.

Заключение

Благодаря простоте и дешевизне проводящих полимеров их использование в электронике способно повлечь за собой серьезные изменения в самой идеологии полупроводниковой отрасли, сделав возможным перенос в нее, ни больше, ни меньше, модели открытого кода: практически каждый желающий сможет брать ту или иную микросхему, вносить в нее коррективы и печатать!

Глава 2 . Нанотехнологии: сегодняшний день и перспективы развития.

2.1 Введение

Энциклопедический словарь определяет технологию (от греч. "techne"

– "искусство", "мастерство", "умение" + "logos" – "наука") как совокупность методов обработки, изготовления, изменения состояния (свойств, формы) первоначального сырья в процессе производства конечной продукции.
Приставка *нано* (от греч. "nannos" – "карлик") означает одну миллиардную (10 -9) долю какой-либо единицы (в нашем случае - метра). Атомы и мельчайшие молекулы имеют размер порядка 1 нанометра.
Современные микросхемы, с размерами компонентов в одну десятую толщины тончайшего волоса могут считаться маленькими в стандартах тесальщиков кремня, но каждый транзистор все еще содержит триллионы атомов, и микрочипы все еще видимы невооружённым глазом.
Древние приемы технологии, которые можно проследить от ручной обработки камня до кремниевых чипов, таковы, что обращаются с сырьем, представляющим из себя большие совокупности атомов и молекул. Этот стиль можно назвать балк-технологией (англ. "bulk" – "груда", "кипа").
Нанотехнология призвана прецизионно (сверхточно) манипулировать индивидуальными атомами и молекулами. Она изменит наш мир больше, чем мы можем себе представить.
Атом – (от греч. "atomos" – "неделимый") – это мельчайшая частица химического элемента, носитель его свойств, способный образовывать с другими атомами более сложные конструкции – молекулы.
Нанотехнология - это совокупность методов производства продуктов с заданной атомарной структурой путем манипулирования атомами и молекулами.
В связи с данным определением нанотехнологий, возникает естественный вопрос: каким же образом мы можем манипулировать веществом на уровне атомов и молекул? Ведь наши руки слишком громадны для наномасштаба. Этот вопрос является камнем преткновения современной нанонауки.
Самое изящное решение этой проблемы, способное совершить новую технологическую революцию, предложил Эрик Дрекслер, в книге "Машины созидания". Для манипулирования атомами он изобрел специальные наномашины или ассемблеры.
Чтобы их представить, нужно сначала наглядно представить, как выглядит молекула. Для этого мы изобразим атомы как бусинки, а молекулы как группы бусинок, соединённые между собой кусочками проволоки (Несмотря на чрезвычайную простоту такого представления, химики часто используют его, строя модели из пластмассовых шаров, связанных спицами в нескольких направлениях). Атомы имеют круглую форму подобно шарам, и хотя молекулярные связи - не кусочки проволоки, наша визуальная модель,

как минимум, даёт важное представление о том, что связи могут быть порваны и восстановлены.

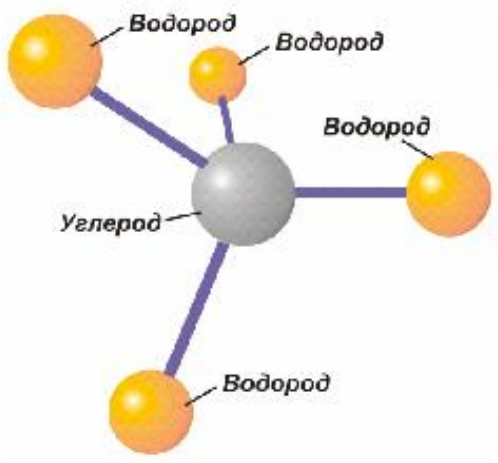


Рис.2.1 Модель молекулы метана (CH4).

Наномашины должны уметь захватывать атомы или молекулы и соединять их между собой, причем не хаотично, а в соответствии с заданным алгоритмом. Важно отметить, что такие машины уже тысячи лет превосходно функционируют в природе, и примером их работы может служить механизм синтеза белка рибосомами.

Из курса биологии вы, должно быть, помните, как молекула рибосомы конструирует белок, "считывая" из молекул РНК "инструкции" для его построения. Напомним вкратце читателям основные моменты этого процесса.

Итак, белки – обязательная составная часть всех клеток, обеспечивающая их жизнедеятельность. Роль белков в организме чрезвычайно разнообразна. Различают белки-гормоны, участвующие в управлении всеми жизненными процессами организма, его ростом и размножением. На сетчатке нашего глаза возникает изображение благодаря особому светочувствительному белку – родопсину. Мы способны двигаться, потому что наши мышцы сокращаются и расслабляются благодаря белкам актину и миозину. Все химические процессы в организме протекают при участии специальных белков–ферментов. Без них невозможны пищеварение, дыхание, обмен веществ, свертывание крови и пр. Белки выполняют и защитные функции – при попадании в организм болезнетворных бактерий или ядов вырабатываются белки-иммуноглобулины, нейтрализующие их вредное воздействие.

При знакомстве с таким разнообразием белков и их функций, весьма неожиданным оказывается тот факт, что все белки растительного и животного мира – от совершенно инертных до биологически активных - состоят из одних и тех же стандартных звеньев - аминокислот, соединенных прочной химической связью, называемой пептидной. Внешне молекула белка подобна последовательности бусинок на нити, где роль бусинок выполняют молекулы аминокислот. В составе

большинства белков находится в среднем 300-500 таких "бусинок".

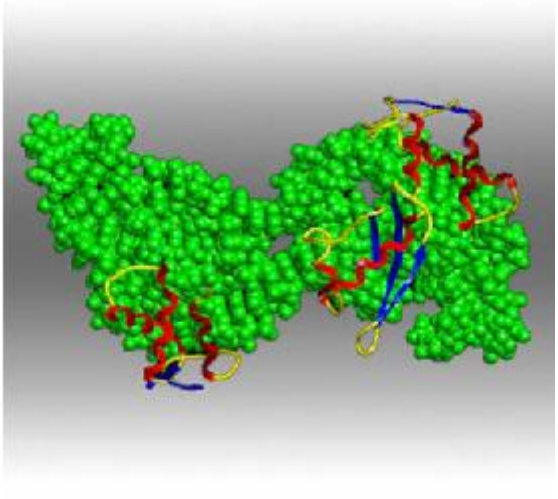


Рис.3.2 Структура молекулы белка.

Количество существующих в природе аминокислот ограничено – всего 20 видов, потому их можно уподобить 20 "буквам" особого "химического алфавита", из которых составлены белки – "слова" длиной в 300-500 букв.

С помощью 20 букв можно написать огромное количество таких длинных слов. Если учесть, что замена или перестановка хотя бы одной буквы в слове придаст ему новый смысл, то число возможных комбинаций букв в слове длиной в 500 символов составит 20500!

Цепь каждого белка построена из свойственной *только этому белку* комбинации аминокислот – только определенное число и только в определенной последовательности. Уникальность характерной для того или иного белка комбинации аминокислот и определяет его химические и биологические свойства. Перестановка всего лишь одного аминокислотного звена на другое место, его замена или потеря приведет к очень значительному изменению свойств белковой молекулы. Значит, при синтезе (построении) отдельного белка необходимо владеть точной информацией о чередовании аминокислотных звеньев в его структуре. В природе такая информация хранится на специальном носителе - молекуле ДНК, в которой содержится информация о структуре всех существующих в организме белков.

Отрезок молекулы ДНК, в котором содержится информация о последовательности аминокислот в одном белке, называется *ген,* потому информацию в ДНК, называют генетической, а ген является единицей наследственного материала. В ДНК содержится до нескольких сот генов.

Молекула ДНК (дезоксирибонуклеиновой кислоты) представляет собой две спирально закрученные одна вокруг другой нити. Ширина такой двойной спирали около 2 нм. Длина же – в десятки тысяч раз больше – несколько сотен тысяч нанометров. За открытие двойной

спирали ДНК, несущей наследственную информацию, в 1962 году ученые Уотсон и Крик получили Нобелевскую премию.

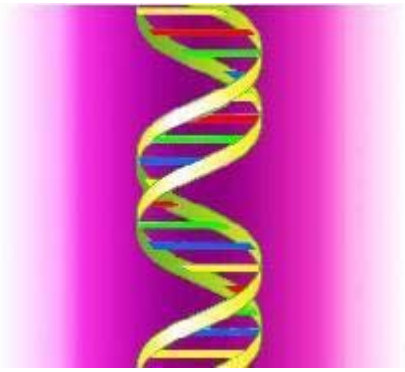


Рис.2.3 Структура молекулы ДНК.

Нити ДНК представляют собой цепи из нуклеотидов, а ***нуклеотиды –*** это органические вещества, состоящие из трех соединенных друг с другом молекул: азотистого основания, пятиуглеродного сахара (пентозы) и остатка фосфорной кислоты. Нуклеотиды назвали по именам 4-х типов азотистых оснований, входящих в их состав – *аденин* (А), *гуанин* (Г), *цитозин* (Ц) и *тимин* (Т). Порядок расположения четырех типов нуклеотидов в цепях ДНК очень важен - он определяет порядок аминокислот в белках, то есть их структуру. Чтобы понять, как в ДНК запрограммирована структура белка, стоит вспомнить азбуку Морзе, по которой все буквы алфавита, знаки препинания и цифры обозначаются комбинацией коротких (точка) и длинных (тире) сигналов. Оказывается, подобный шифр существует и в ДНК! Как в азбуке Морзе каждой букве соответствует определенное сочетание точек и тире, так в коде ДНК определенное последовательное сочетание нуклеотидов соответствует определенной аминокислоте в молекуле белка. Знать код ДНК – значит знать, сочетание нуклеотидов соответствующее каждой аминокислоте.

Чтобы закодировать все возможные цифры, буквы и знаки препинания нам хватает всего двух символов (точка и тире). Чтобы закодировать одну аминокислоту, сочетания из трех нуклеотидов вполне достаточно. (Из 4 нуклеотидов можно создать 64 комбинации, по три нуклеотида в каждой: 43=64). Такое сочетание называется ***триплетом*** или ***кодоном.***

Код ДНК обладает *однозначностью* (один триплет шифрует не более одной аминокислоты) и *универсальностью* (т.е. для всего живущего и растущего на Земле – бактерий, грибов, злаков, муравья, лягушки, лошади, человека – одни и те же триплеты кодируют одни и те же аминокислоты). В настоящее время код ДНК расшифрован полностью, т.е. для каждой аминокислоты точно установлены кодирующие ее триплеты.

Еще раз напоминаем читателям, что замена или удаление хотя бы одного нуклеотида в последовательности ДНК, приведет к нарушению

структуры синтезируемых белков. Поскольку генетический код подобен языку, то наглядным примером этому может послужить следующая фраза, составленная из буквенных триплетов: *жил был кот тих, был сер мил мне тот кот.*
Несмотря на отсутствие знаков препинания нам понятен и смысл и логика этого "предложения". Если же мы уберем первую букву в этой фразе, но читать будем также триплетами, то получится бессмыслица: *илб ылк отт ихб ылс ерм илм нет отк от __*
Похожая генетическая бессмыслица возникает и при выпадении одного нуклеотида из гена. Белок, считываемый с такого испорченного гена, может привести к серьезным *генетическим заболеваниям* организма (болезнь Дауна, серповидноклеточная анемия, сахарный диабет, мышечная дистрофия и т.д.). Такая ошибка в информационной матрице ДНК будет повторяться всякий раз при синтезе конкретного белка, подобно тому, как ошибка на типографской матрице с которой печатается книга или газета, будет повторяться во всех экземплярах данного тиража.
Являясь матрицей для синтеза всех белков, сама молекула ДНК, однако, в процессе синтеза не участвует. Она является лишь носителем генетической информации. При синтезе белка, информация о его структуре сначала доставляется из ДНК к молекуле *рибосомы* – своеобразной фабрике по производству белков. Этот перенос информации осуществляется с помощью молекулы *информационной РНК* (рибонуклеиновая кислота), которая является точной копией – зеркальным отражением структуры одного участка ДНК. ИРНК – это одноцепочная спираль, комплементарная одной нити молекулы ДНК.
Процесс копирования генетической информации из ДНК в РНК называют ***транскрипцией*** (лат. "transcriptio" - переписывание). В процессе переписывания специальный фермент – полимераза, двигаясь вдоль ДНК, последовательно считывает ее нуклеотиды и по принципу комплементарности образует цепочку иРНК, как бы снимая с ДНК "чертеж" того или иного гена. С каждого гена можно снять любое число копий РНК.
Таким образом, можно сказать, что в процессе синтеза белка иРНК выполняет роль перфокарты, на которую записана "программа" для построения конкретного белка.
Итак, молекула иРНК с записанной на нее программой направляется к рибосоме, где происходит синтез белка. Туда же направляется поток материала, из которого строится белок - аминокислот. Аминокислоты попадают в рибосому не самостоятельно, а с помощью подвижных *транспортных РНК* (т-РНК). Эти молекулы способны различать среди всего многообразия аминокислот только "свою" аминокислоту, присоединять её к себе и подтаскивать к рибосоме.
Синтез белка на рибосомах называется ***трансляцией*** (от лат.

"translatio" – "передача").
По мере сборки белковой молекулы рибосома "ползет" по иРНК и синтезирует белок, запрограммированный на данной иРНК. Чем дальше продвинулась рибосома по иРНК, тем больший отрезок белковой молекулы "собран". На ленте иРНК, как на конвейере, одновременно идет сборка одного и того же белка несколькими рибосомами (см. рис.3.4). Когда рибосома достигает конца иРНК, синтез окончен.

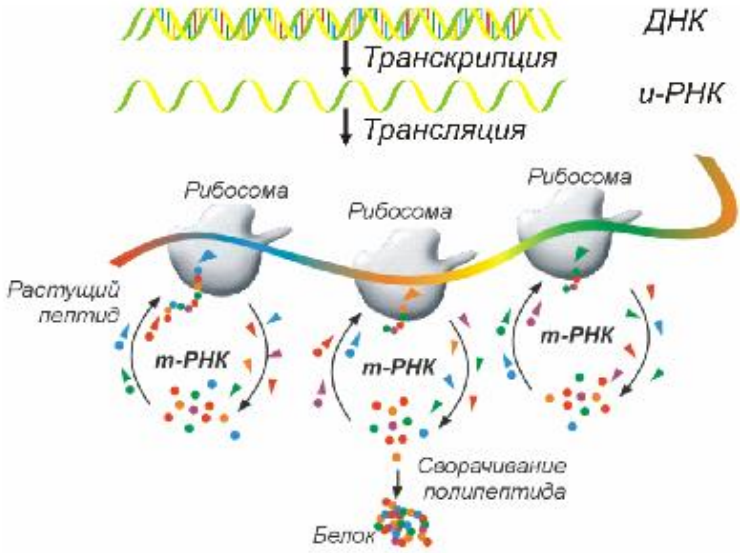


Рис.2.4 Процесс синтеза белка рибосомами.

Теперь остановимся подробнее на механизме работы рибосомы. Обратимся к рисунку. Рибосома движется по иРНК не плавно, а прерывисто, "шажками", триплет за триплетом. На каждом шаге к месту контакта рибосомы с иРНК "подплывает" какая-нибудь молекула т-РНК с прицепленной к ней аминокислотой.
Как уже было сказано, каждая т-РНК способна различать только "свою" аминокислоту и присоединять её для транспортировки к месту построения белка. Это происходит благодаря содержащемуся в ней триплету, комплементарному (подходящему) конкретной аминокислоте.
Если кодовый триплет т-РНК окажется комплементарным к триплету иРНК, находящемуся в данный момент в рибосоме, то аминокислота, отделится от т-РНК и присоединится к строящейся цепочке белка (к белковой молекуле добавится еще одна "бусинка").
Свободная т-РНК затем выбрасывается из рибосомы в окружающую среду. Здесь она захватывает новую молекулу аминокислоты и несет ее в любую из работающих рибосом. А наша рибосома делает следующий "шаг" вперед по иРНК на один триплет, Так постепенно, триплет за триплетом, движется по иРНК рибосома и растет звено за звеном цепь белка.
Пройдя по всей длине иРНК, рибосома с готовым белком "сходит" с неё. Затем белковая молекула направляется к тому участок клетки,

где требуется данный вид белка, а рибосома направляется к любой другой иРНК (рибосома способна синтезировать любой белок; характер белка зависит исключительно от матрицы иРНК).

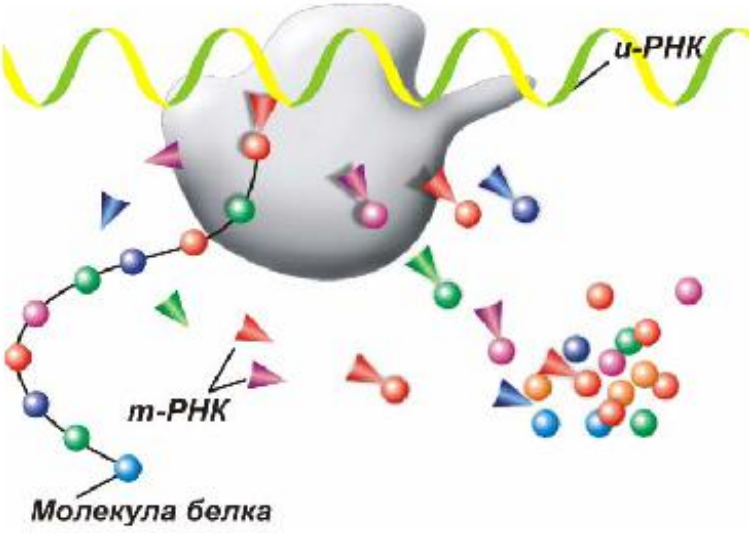


Рис.2.5 Рибосома синтезирует белок.

Итак, рибосомы доказали, что наномашины, построенные из белка и РНК, могут быть запрограммированы на построение сложных молекул, то есть по сути являются природными ассемблерами (сборщиками атомов) для производства заданных молекулярных структур.
Генные инженеры сегодня пытаются построить первые экспериментальные искусственные наномашины, используя биологический природный материал: аминокислоты, белки, молекулы ДНК и др. Однако биоподобные наномашины (и все, что они могут создать) - это органика, а значит, их возможности ограничены. Они теряют стабильность или разрушаются при повышенных температурах и давлениях (происходит сворачивание белка), подвержены радиации, не могут обрабатывать твердый материал, действовать в химически агрессивных средах и т.п. Поэтому было бы неразумно отказаться от грандиозных наработок человечества в сфере балк-технологии. Это все то, до чего "не додумалась" природа, от колеса до компьютера.
В то же время без биоподобных структур очень трудно манипулировать отдельными атомами и молекулами. Поэтому наномашины-ассемблеры должны представлять собой синтез живых и технических систем. Дрекслер дает ассемблеру следующее определение:
Ассемблер *– это молекулярная машина, способная к саморепликации, которая может быть запрограммирована строить практически любую молекулярную структуру или устройство из более простых химических строительных блоков*.
Главная задача ассемблера - соединение атомов и молекул в заданном порядке. Он должен уметь строить наносистемы любого

назначения - двигатели, станки, вычислительные устройства, средства связи и т.д. Это будет универсальный молекулярный робот со сменными программами на "перфолентах" типа цепочек РНК или ДНК. Внешний вид сборщика можно представить себе как "ящик" нанометрового размера с "рукой" - манипулятором длиной в сотню атомов. Исходным материалом для манипулятора могут служить атомы, молекулы, и химически активные молекулярные конструкции. Внутри сборщика размещены устройства, управляющие работой манипулятора и содержащие программу всех его действий. Поскольку составление больших молекул со сложной структурой потребует особой точности в позиционировании, ассемблер должен иметь несколько таких манипуляторов.
Возможно, что ассемблер будет чем-то похож на паука, при этом одними "лапами" он будет держаться за поверхность, а другими складывать сложные молекулярные структуры атом за атомом. Наиболее популярная схема наноассемблера представлена на рисунке.

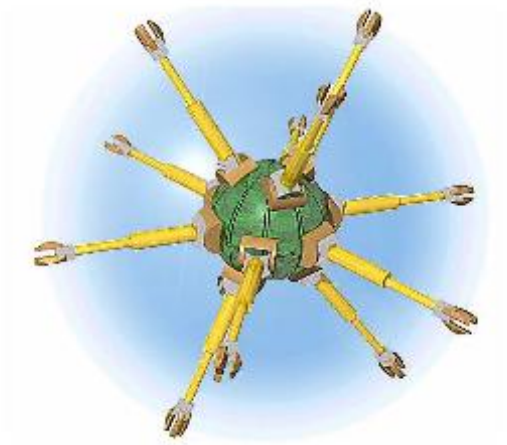


Рис.2.6 Внешний вид наноассемблера.

Управлять сборщиками должны будут нанокомпьютеры, программируемые на каком-нибудь обычном языке управления промышленными роботами, и имеющие связь с обычным компьютером, управляемым человеком. Представим, что человек - оператор моделирует на компьютере некоторую конструкцию, особым образом задавая её молекулярную структуру. "Нарисовав" нужный объект, человек передает команду ассемблерам, которые, начинают создавать его атом за атомом. И через некоторое время у конструктора появляется готовая вещь с заданными характеристиками при минимальном вмешательстве человека.
Ассемблеры могут работать в паре с *дизассемблерами* – наномашинами, способными разбирать объект на атомы с записью его структуры на молекулярном уровне. Например, для того, чтобы создать копию какого-то объекта, необходимо, чтобы дизассемблер разобрал его атом за атомом, и передал всю информацию о типе

атомов, их положении и т.д. ассемблеру, который потом может создавать копии объекта сколько угодно раз. Теоретически такая копия ничем не будет уступать оригиналу - она будет повторять его вплоть до отдельного атома! Дизассемблеры также помогут ученым лучше узнать вещи и их атомную структуру.
Как уже было сказано, ассемблеры будут обладать способностью к *репликации* (размножению). Когда речь идет об эволюции, то репликатор – это объект, который способен сам себя скопировать, включая любые изменения, которым он мог подвергнуться (подобно гену, миму или компьютерному вирусу). Реплицируется (размножается путём создания своей копии) ассемблер по команде от макрокомпьютера или в зависимости от окружения.
Таким образом, создав один единственный универсальный ассемблер, способный создавать копию себя, мы через несколько часов получим целую армию этих крошек, которые в буквальном смысле слова изменят нашу жизнь.
Самой большой проблемой ассемблеров является сложность их первоначального конструирования. Тем не менее, лаборатории всех мировых держав борются за право быть первыми в этом революционном прорыве.
Возможности использования нанотехнологий неисчерпаемы - начиная от "проживающих" в организме нанокомпьютеров, убивающих раковые клетки и ремонтирующих поврежденные ткани и органы и заканчивая автомобильными двигателями, не загрязняющими окружающую среду.
Сегодня Foresight Institute – базис всей мировой нанотехнологии – обещает $250.000 тому, кто построит нано-манипулятор - "руку", которая сможет оперировать на молекулярном уровне и тому, кто создаст 8-битный сумматор, умещающийся в кубике со стороной в 50 нанометров (так что у вас еще есть все шансы неплохо подзаработать!).
Ждать осталось не так уж долго. Оптимисты считают периодом расцвета практических нанотехнологий первую четверть наступившего века. Пессимисты отодвигают срок до середины века. Значит, тем, кто сегодня определяет свою будущую профессию, стоит задуматься – быть может, программист нанороботов и конструктор молекулярных компьютеров станут наиболее популярными специальностями уже через несколько лет.

2. 2 Оборудование нанотехнологии

Всякая технология, будь то обработка материала на макро, микро или наноуровне, не может обходиться без средств измерения соответствующих величин. Среди многообразия измерительных приборов, существуют специальные приборы для измерения как больших, так и малых расстояний.

Так, малые расстояния вплоть до миллиметрового (10- 3 м) порядка легко измеряются с помощью обычной линейки. Ею можно измерить, например, толщину куска плотного картона. Не так уж трудно измерить толщину тонкого листа бумаги, если таких листов много. Сложите в стопку сто листов, возьмите линейку и разделите получившуюся величину на 100. В результате такого измерения мы получаем толщину одного листа, исходя из того, что все листы совершенно одинаковые.
Однако для меньших размеров линейка уже не годится. Если попытаться измерить с ее помощью толщину волоса, то единственное, что можно будет сказать - это то, что волос очень тонкий, что очевидно и без измерений. Поэтому, чтобы идти дальше в сторону еще меньших расстояний, необходимы увеличительные приборы, из которых всем наиболее знаком обычный оптический микроскоп.
Оптический микроскоп, позволяет видеть мелкие детали, величиной до 0,25 мкм. Дальнейшие способы улучшения микроскопа, работающего на принципах оптики, привели к созданию его электронного варианта, с помощью которого удается наблюдать предметы с размерами порядка нанометра. Электронный микроскоп позволяет различать даже атомные решетки, но вот обнаружить в них дефекты он уже не может. А ведь для целей нанотехнологии нужно хорошо визуализировать отдельные атомы!
Поэтому когда все возможности данного устройства были исчерпаны, ученые принялись искать новые пути решения поставленной задачи. И вот в начале XX века появилась оригинальная идея изучать вещество, не увеличивая визуально исследуемую площадь его поверхности, а как бы трогая её. Здесь пригодился открытый к тому времени туннельный эффект, на основе которого в 1981 году был создан первый сканирующий туннельный микроскоп (СТМ).
Подробным изучением СТМ и туннельного эффекта мы займемся позже, а пока лишь в общих чертах раскроем их суть.
Туннельный эффект является принципиально квантово-механическим эффектом, не имеющим аналога в классической физике и потому представляет огромный интерес для исследователей. Он основан на корпускулярно-волновом дуализме – двойственной природе элементарных частиц.
С точки зрения классической механики, очевидно, что никакое материальное тело, имеющее энергию E , не может преодолеть потенциальный барьер высотой $V0$, если $V0>E$. Например, если принять за материальное тело мяч, а за потенциальный барьер – очень высокий бетонный забор, то понятно, что если кинуть мяч в сторону забора недостаточно высоко – так, что его энергии не хватит на перелет стоящего перед ним барьера, то он, ударившись о преграду, отскочит назад.

Однако если в качестве материального тела рассмотреть электрон, то оказывается, что даже если высота потенциального барьера выше, чем собственная энергия электрона, то он с определенной вероятностью может оказаться с другой стороны барьера, лишь незначительно изменив свою энергию, как если бы в "заборе" оказалась некая "дырка" или туннель.

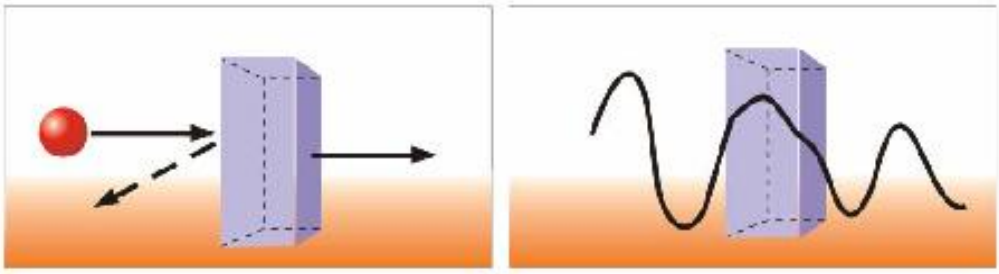


Рис.2.7 Туннельный эффект.

Это, необъяснимое, на первый взгляд, туннелирование является следствием того, что электрону присущи как корпускулярные, так и волновые свойства. Будь электрон классической частицей, обладающей энергией E , он, встретив на своем пути преграду, требующую для преодоления большей энергии, должен был бы отразиться от этой преграды. Однако, будучи одновременно и волной, он проходит сквозь эту преграду, подобно тому, как рентгеновские волны свободно проходят сквозь материальные объекты.

Таким образом, над поверхностью любого проводника или полупроводника всегда наблюдается некоторое количество свободных электронов, "вышедших" за его пределы не в результате термоэлектронной эмиссии, а благодаря туннельному эффекту.

Если взять два проводящих вещества, расположить их на расстоянии 0,5 нм друг от друга и приложить к ним сравнительно малую разность потенциалов (0,1 - 1 В), то между ними возникнет электрический ток, обусловленный туннельным эффектом, который называется *туннельным током.*

Если повторить тот же опыт, но к поверхности интересующего тела поднести острый предмет, например, очень тонкую иглу с кончиком в атом толщиной, то, проводя ею над изучаемым объектом (сканируя его поверхность) можно получать информацию о строении объекта на атомном уровне.

В 1981 году сотрудники компании IBM Г. Бининг и Г. Рорер на основе этого явления построили первый ***сканирующий туннельный микроскоп*** (СТМ) и в 1982 г., с его помощью впервые в истории получили изображение поверхности золота, а затем и кремния с атомарным разрешением.

За это открытие в 1985 году ученые были удостоены Нобелевской премии, а дальнейшее развитие сканирующей микроскопии привело к бурному развитию нанотехнологий. По иронии судьбы, огромные возможности СТМ были осознаны далеко не сразу: некоторые научно-

популярные издания даже не хотели брать в печать статью Бининга и Рорера, содержащую описание изобретения на основании того, что это якобы "недостаточно интересно"! (впрочем, то же наблюдалось и десять лет спустя в ряде российских СМИ.)

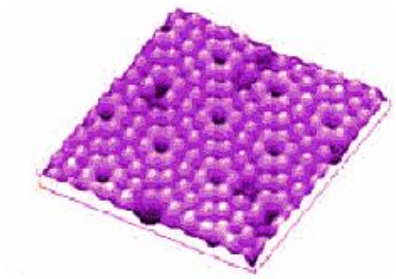


Рис.2.8 STM изображение поверхности монокристаллического кремния.

Рабочим органом СТМ – ***зондом*** – служит токопроводящая металлическая игла. Зонд подводится к изучаемой поверхности на очень близкое расстояние (≈ 0,5 нм) и, при подаче на зонд постоянного напряжения, между ними возникает *туннельный ток,* который экспоненциально зависит от расстояния между зондом и образцом. Это значит, что при увеличении расстояния лишь на 0,1 нм туннельный ток уменьшается почти в 10 раз! Именно это и обеспечивает высокую разрешающую способность микроскопа, поскольку незначительные изменения по высоте рельефа поверхности вызывают существенное изменение туннельного тока. Поддерживая ток и расстояние постоянным при помощи следящей системы, зонд сканирует поверхность, перемещаясь над нею по осям X и Y, то, опускаясь, то, поднимаясь в зависимости от ее рельефа. Информация об этом перемещении отслеживается компьютером, и программно визуализируется, чтобы исследователь мог увидеть на экране объект с нужным разрешением.

Существуют два варианта конструкции СТМ в зависимости от режима сканирования образцов.

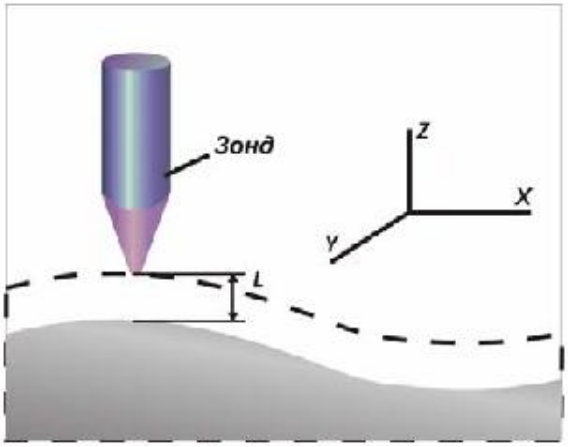


Рис.2.9 Схема работы СТМ.

В *режиме постоянной высоты* острие иглы перемещается в горизонтальной плоскости над образцом, а ток туннелирования

изменяется (*рис.2.10 а)*. Исходя из данных о величине тока туннелирования, измеренной в каждой точке поверхности, строится образ ее рельефа.
В *режиме постоянного тока* СТМ задействуется система обратной связи для поддержания постоянного тока туннелирования путем подстройки высоты сканирующего устройства над поверхностью в каждой ее точке (*рис.2.10 б)*.

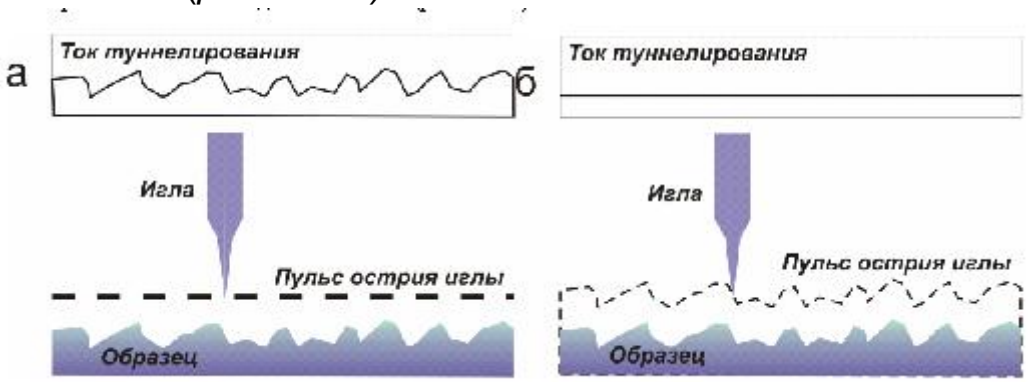


Рис.2.10 Ток туннелирования.

У каждого режима есть преимущества и недостатки. Режим постоянной высоты быстрее, так как системе не приходится передвигать сканирующее устройство вверх-вниз, но при этом можно получить полезную информацию только с относительно гладких образцов. В режиме постоянного тока можно с высокой точностью изучать сложные поверхности, но он занимает и больше времени.
Важной деталью сканирующего туннельного микроскопа является механический манипулятор, который должен обеспечивать перемещение зонда над поверхностью с точностью до тысячных долей нанометра. Обычно механический манипулятор изготавливают из *пьезокерамического материала.*
Удивительным свойством такого материала является ***пьезоэффект.*** Суть его заключается в следующем: если из пьезоматериала вырезать прямоугольную балку, нанести на противоположные стороны металлические электроды и приложить к ним разность потенциалов, то под действием тока произойдет изменение геометрических размеров балки. И, наоборот: при малейшей деформации (сжатии) балки, на ее противоположных концах возникнет разность потенциалов. Таким образом, управляя малыми изменениями тока, можно добиться перемещения зонда на очень малые расстояния, необходимые для работы сканирующего микроскопа.
В практических конструкциях обычно используют пьезокерамические манипуляторы, выполненные в виде тонкостенной трубки с несколькими раздельными электродами. Управляющее напряжение вызывает удлинение или изгиб таких манипуляторов и, соответственно, перемещение зонда по всем трем пространственным координатам *X, Y* и *Z* .

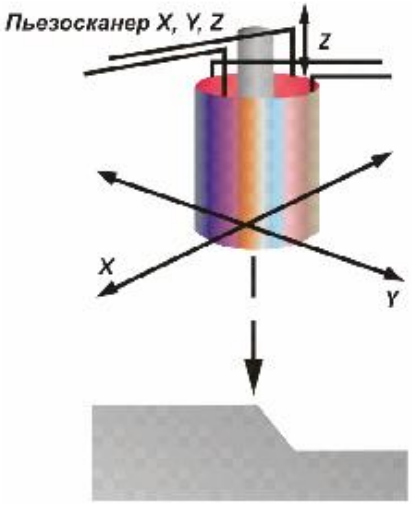


Рис.2.11 Схема типичного пьезоманипулятора.

Конструкции современных манипуляторов обеспечивают диапазон перемещения зонда до 100–200 мкм в плоскости и до 5–12 мкм — по высоте.

Туннельный микроскоп позволил ученым исследовать поверхности на атомном уровне. Однако этот прибор имеет и ряд ограничений. Основанный на туннельном эффекте, он может применяться только для изучения материалов, хорошо проводящих электрический ток.

Но прогресс не стоит на месте, и в 1986 г в лаборатории цюрихского отделения IBM были созданы микроскопы следующего поколения – ***атомно-силовые*** (АСМ). АСМ тоже позволяет исследовать поверхности с атомной точностью, но уже вовсе не обязательно электропроводящие. Сегодня именно он представляет наибольший интерес для исследователей.

Принцип действия атомно-силового и туннельного микроскопов практически одинаковы, только в отличие от туннельного, атомно-силовой микроскоп основан на использовании сил межатомных связей. На малых расстояниях (около 0,1 нм) между атомами двух тел действуют силы отталкивания (*рис.2.12 а)*, а на больших – силы притяжения (*рис.2.12 б)*.

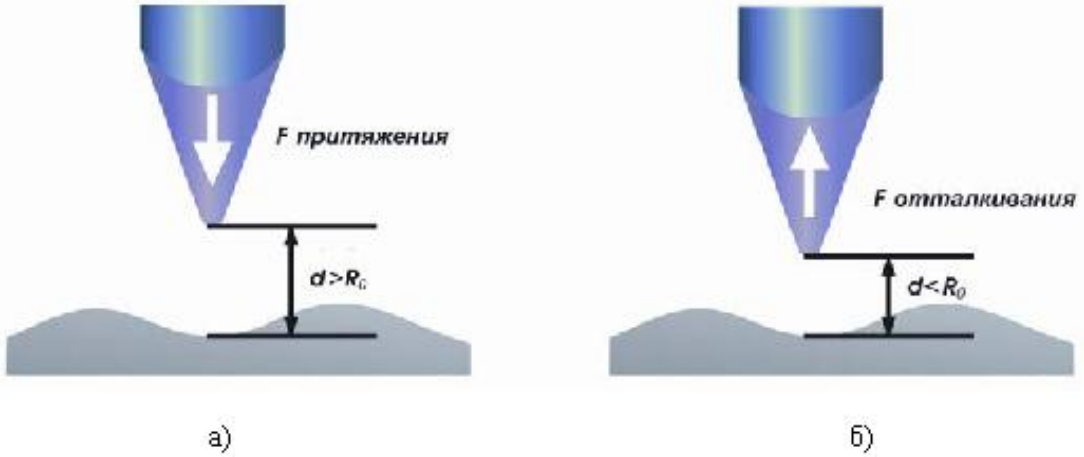


Рис.2.12 Принцип действия АСМ.

В сканирующем атомно-силовом микроскопе такими телами служат исследуемая поверхность и скользящее над нею острие. В качестве зонда в АСМ обычно используется алмазная игла. При изменении силы F, действующей между поверхностью и острием, пружинка, на которой оно закреплено, отклоняется, и это регистрируется датчиком. Величина отклонения упругого элемента (пружинки) несет информацию о рельефе поверхности.
На *рис.2.13* схематически представлена кривая зависимости межатомной силы от расстояния между острием иглы и образцом.

Рис.2.13 Зависимость силы межатомного взаимодействия от расстояния между острием и образцом.

По мере приближения иглы к поверхности, ее атомы все сильней притягиваются к атомам образца. Сила притяжения будет возрастать пока игла и поверхность не сблизятся настолько, что их электронные облака начнут отталкиваться электростатически. При дальнейшем сближении электростатическое отталкивание экспоненциально ослабляет силу притяжения. Эти силы уравновешиваются на расстоянии между атомами около 0,2 нм.
Подобно СТМ в АСМ сканирование поверхности может происходить двумя способами: *сканирование кантилевером* и *сканирование подложкой.* В первом случае вдоль исследуемой поверхности движется кантилевер, во втором относительно неподвижного кантилевера движется сама подложка.
Для регистрации сил взаимодействия зонда с поверхностью обычно используют метод, основанный на регистрации отклонения лазерного луча, отраженного от кончика зонда. Луч направляется на самый кончик кантилевера, покрытый специальным алюминиевым зеркальным слоем, после чего попадает в специальный четырёхсекционный фотодиод.

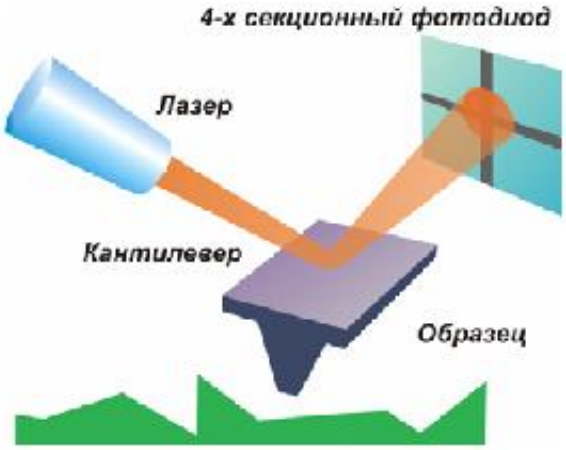


Рис.2.14. Схема регистрации отклонения лазерного луча от начального откалиброванного положения.

Таким образом, малейшие отклонения кантилевера приводят к смещению луча лазера относительно секций фотодиода, что, в свою очередь, меняет сигнал с фотодиода, показывающего смещения кантилевера в ту или иную сторону. Такая система позволяет измерять отклонения луча на угол 0.1", что соответствует отклонению кантилевера всего на сотые доли нанометра!

Поскольку АСМ не требует, чтобы образцы были проводящими, он позволяет исследовать свойства проводников и изоляторов, молекул ДНК и других мягких материалов.

Дальнейшее развитие зондовой микроскопии показало, что изложенный принцип может быть реализован практически для любого вида взаимодействия острия зонда с поверхностью. Это привело к созданию целого ряда различных подвидов микроскопов, носящих общее название – сканирующие зондовые микроскопы (СЗМ). Сегодня наиболее известны следующие их разновидности:

- Туннельные зонды
- Атомно-силовые зонды
- Оптические зонды ближнего поля
- Магнитные силовые зонды
- Электростатические силовые зонды и др.

К более подробному изучению некоторых типов СЗМ мы обратимся в одной из следующих глав, а пока представляем общую схему СЗМ.

В конструкции каждого сканирующего зондового микроскопа есть свои особенности. Однако общая схема остается более или менее одинаковой. В состав СЗМ обычно входит компьютер, который управляет работой электромеханической части микроскопа, принимает и записывает регистрируемые зондом данные и производит на их основе построение СЗМ - изображения. Кроме того, специальное программное обеспечение позволяет исследователю, как угодно манипулировать полученным изображением (масштабировать, поворачивать, строить сечения и т.п.) чтобы проанализировать

наблюдаемую картину поверхности.

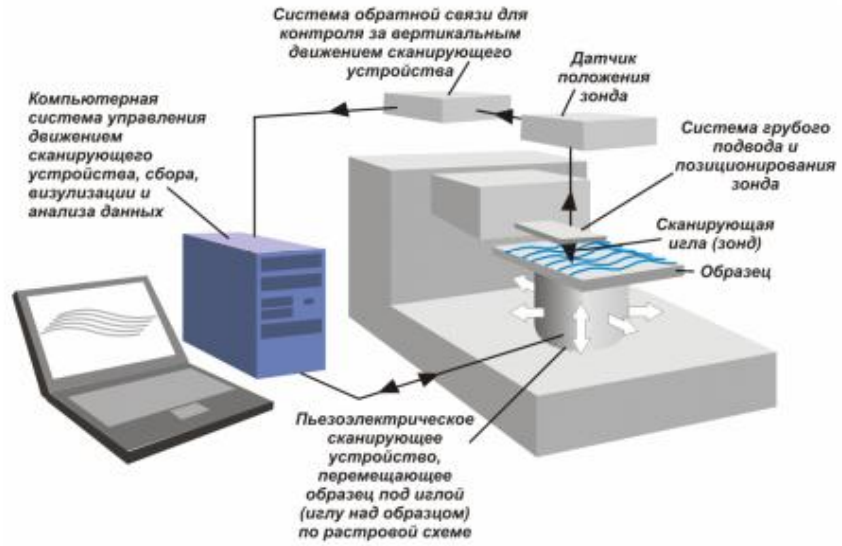


Рис.2.15 Общая схема работы СЗМ.

Терминология, сложившаяся в сканирующей зондовой микроскопии, несет на себе отпечаток своего англоязычного происхождения. Так, часто острие сканирующей иглы называется **" *типом* "** (tip), а консоль – **" *кантилевером* "** (cantilever).

Сегодня СЗМ являются основными инструментами нанотехнологии. Благодаря значительным усовершенствованиям, они позволяют изучать не только топологию (геометрические свойства) исследуемых объектов, но и массу других характеристик: магнитные и электрические свойства, твердость, однородность состава и др. и все это с нанометровым разрешением!

Кроме определения различных параметров, современные СЗМ позволяют *манипулировать* нанообъектами, обеспечивать захват отдельных атомов и перенос их в новую позицию, производить атомарную сборку проводников шириной в один атом, придавая тем самым поверхностям различных предметов новые нужные качества. Существуют два основных способа манипуляции атомами с помощью иглы СТМ – *горизонтальный* и *вертикальный.* При вертикальной манипуляции после захвата нужный атом отрывают от поверхности, поднимая зонд на несколько ангстрем. Отрыв атома от поверхности контролируют по скачку тока. Разумеется, отрыв и перетаскивание атома требует больших усилий, чем просто его "перекатывание" по поверхности, как при горизонтальной манипуляции, но зато потом процесс переноса не зависит от встречающихся на поверхности препятствий (ступеней, ям, адсорбированных атомов). После перемещения в необходимое место атом "сбрасывают", приближая острие к поверхности и переключая напряжение на игле.

В настоящее время в мире в широком ассортименте выпускаются СЗМ и принадлежности к ним. Среди наиболее известных фирм можно назвать Digital Instruments , Park Scientific Instruments , Omicron ,

Topometrix , Burleigh и др. Цены на них колеблются в широких пределах — от 40 тыс. долл. за простейший АСМ до 100–200 тыс. долл. и выше в зависимости от комплектации и спектра решаемых задач. В России СЗМ изготавливают фирмы Нанотехнология-МДТ, Концерн Наноиндустрия и др.
Между прочим, нельзя не отметить один интересный факт: в сказке Н. Лескова "Левша", первый русский нанотехнолог, сумевший подковать блоху, утверждает, что увидеть надписи на гвоздиках, которыми подкована блоха можно только u1074 в мелкоскоп с увеличением в 5 миллионов раз, что в точности соответствует увеличению современного СТМ!

2.3 Наноэффекты в природе: удивительные лапки

"Длина его составляет от 8 до 30 см. Голова довольно широка и сильно сплющена, глаза без век со щелевидным зрачком, шея коротка, тело толстое и сплющенное, хвост умеренной длины, по большей части весьма ломкий. Тело покрыто мелкими бугорчатыми и зернистыми чешуйками. Водятся в теплых странах Старого и Нового света"…
Речь идет о гекконе – безобидной красивой ящерке, давно привлекающей внимание ученых своей уникальной способностью лазать как угодно и где угодно. Гекконы не только взбираются по отвесным стенам - они с такой же легкостью ходят по потолку или оконному стеклу.
Долгое время ученые не могли понять, каким образом геккон бегает по совершенно гладкому вертикальному стеклу, не падая и не соскальзывая. Было предпринято много попыток объяснить этот природный феномен.
Сначала полагали, что весь секрет в уникальных присосках, которыми снабжены лапки животного. Но выяснилось, что на лапах геккона нет ничего, похожего на присоски, которые, обеспечивали бы ящерице хорошее сцепление.
Не оправдалось и предположение, что геккон бегает по стеклу, приклеиваясь к его поверхности клейкой жидкостью, подобно тому, как держится на разных предметах улитка. В случае клейкой жидкости на стекле оставались бы следы от его лап; тем более что никаких желез, способных выделять такую жидкость, на лапах геккона не обнаружено.
Разгадка этого явления буквально поразила общественность: ведь при движении геккончик использует законы молекулярной физики!
Ученые внимательно изучили лапку геккона под микроскопом. Выяснилось, что она покрыта мельчайшими волосками, диаметр которых в десять раз меньше, чем диаметр человеческого волоса. На кончике каждого волоска находятся тысячи мельчайших подушечек размером всего двести миллионных долей сантиметра. Снизу

подушечки прикрыты листочками ткани, и при большом увеличении видно, что каждый листочек покрыт сотнями тысяч тонких волосообразных щетинок. А щетинки, в свою очередь, делятся на сотни лопатообразных кончиков, диаметр каждого из которых всего 200 нм!

Рис.2.16 Увеличенное изображение лапки геккона.

Сотни миллионов этих волосков позволяют цепляться за малейшие неровности поверхности. Даже совершенно гладкое, на наш взгляд, стекло дает гекконам достаточно возможностей зацепиться. Как, оказалось, здесь работают силы Ван-дер-Ваальса, или, говоря иначе, силы межмолекулярного взаимодействия. Теория Ван-дер-Ваальса основывается на квантовой механике. Молекулы веществ на малых расстояниях отталкиваются, а на больших притягиваются (тот же принцип положен в основу работы АСМ).

Когда геккон опускает лапку на поверхность, лопаточки на концах нанощетинок столь плотно прилегают к ней, что лапка как бы прилипает к вертикальной стене или потолку. Но чуть геккон напряжет мышцы и потянет лапку - силы Ван дер. Ваальса исчезают, и она легко отделяется от поверхности!

Силы Ван-дер-Ваальса очень малы, однако расположение волосков на пальчиках гекконов позволяет обеспечить достаточно большую поверхность взаимодействия, чтобы ящерица могла удержаться, например, на потолке при помощи всего одного пальца своей пятипалой лапы или кончика хвоста.

Все это побудило исследователей к попыткам использовать сделанное открытие. Сотрудники американской компании iRobot сконструировали робота, который может передвигаться вертикально по стенкам аквариума. В дальнейшем планируется снабдить его искусственными волосками и увеличить прижимающую силу. А если удастся прикрепить к роботу хвост геккона, он сможет бегать по острым граням.

Если эксперименты по созданию ящерицеподобных роботов будут успешными, эти механизмы можно будет использовать в самых

разных областях – от мытья окон в высотных зданиях до путешествий по пыльным тропинкам далеких планет.
Можно положить данный принцип в основу изготовления липкой ленты, подобной скотчу, которую можно использовать повторно и даже в вакууме (обычный скотч в космосе не работает).
Ведутся разработки нового поколения так называемых "сухих клеев" с широким диапазоном характеристик, которые будут обеспечивать высокую адгезию (липучесть) на основе электростатики.
Можно изготовить обувь и перчатки, прочно удерживающие человека на вертикальной стене. Они облегчили бы жизнь не только альпинистам, монтажникам-скалолазам, но и всем остальным людям.

2.4 Фуллерены и углеродные нанотрубки

Еще Демокрит в своей атомистической концепции Вселенной обратил внимание на то, что мир состоит из множества "кирпичиков" – химических элементов и их соединений, различающихся между собой особыми свойствами. Как неодинаковы свойства каждого из "кирпичей мироздания", так неодинаковы и их истории. Одни элементы, такие, как медь, железо, сера, углерод, известны с доисторических времен. Возраст других измеряется только веками, несмотря на то, что ими, даже не открытыми, человечество пользовалось всегда (тот же кислород, к примеру, был открыт лишь в XVIII веке). Третьи были открыты 100-200 лет тому назад, но приобрели первостепенную важность лишь в наше время. К ним относятся уран, алюминий, бор, литий, бериллий и др.
У четвертых рабочая биография только начинается…
В 1985 году *Роберт Керл, Гарольд Крото* и *Ричард Смолли* совершенно неожиданно открыли принципиально новое углеродное соединение – ***фуллерен***, уникальные свойства которого вызвали целый шквал исследований. В 1996 году первооткрывателям фуллеренов присуждена Нобелевская премия.
Основой молекулы фуллерена является *углерод* - этот уникальнейший химический элемент, отличающийся способностью соединяться с большинством элементов и образовывать молекулы самого различного состава и строения. Из школьного курса химии вам, конечно же, известно, что углерод имеет два основных *аллотропных состояния* - графит и алмаз. Так вот, с открытием фуллерена, можно сказать, углерод приобрел еще одно аллотропное состояние.
Для начала рассмотрим структуры молекул графита, алмаза и фуллерена.
Графит обладает *слоистой структурой.* Каждый его слой состоит из атомов углерода, ковалентно связанных друг с другом в правильные шестиугольники.

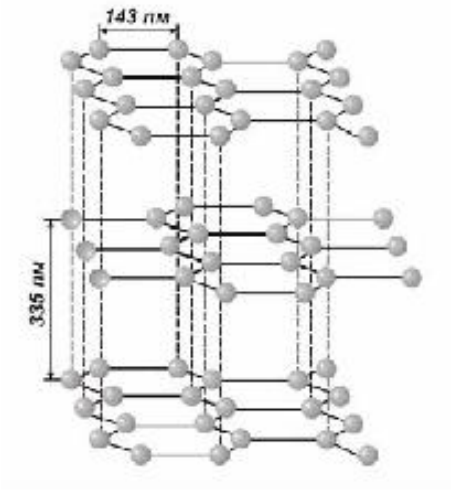


Рис.2.17 Структура графита.

Соседние слои удерживаются вместе слабыми Ван-дер-Ваальсовыми силами. Поэтому они легко скользят друг по другу. Примером этого может служить простой карандаш - когда вы проводите графитовым стержнем по бумаге, слои постепенно "отслаиваются" друг от друга, оставляя на ней след.

Алмаз имеет трехмерную *тетраэдрическую структуру.* Каждый атом углерода ковалентно связан с четырьмя другими. Все атомы в кристаллической решетке расположены на одинаковом расстоянии (154 нм) друг от друга. Каждый из них связан с другими прямой ковалентной связью и образует в кристалле, каких бы размеров он ни был, одну гигантскую макромолекулу.

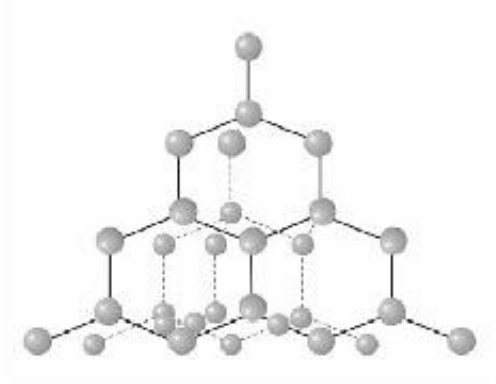


Рис.2.18 Структура алмаза.

Благодаря высокой энергии ковалентных связей С-С, алмаз обладает высочайшей прочностью и используется не только как драгоценный камень, но и в качестве сырья для изготовления металлорежущего и шлифовального инструмента (возможно, читателям доводилось слышать об алмазной обработке различных металлов)

Фуллерены получили свое название в честь архитектора Бакминстера Фуллера, который придумал подобные структуры для использования их в архитектурном строительстве (поэтому их также называют *бакиболами)*. Фуллерен имеет каркасную структуру, очень

напоминающую футбольный мяч, состоящий из “заплаток” 5-ти и 6-тиугольной формы. Если представить, что в вершинах этого многогранника находятся атомы углерода, то мы получим самый стабильный фуллерен С60.

Рис.2.19 Структура фуллерена.

В молекуле С60, которая является наиболее известным, а также наиболее симметричным представителем семейства фуллеренов, число шестиугольников равно 20. При этом каждый пятиугольник граничит только с шестиугольниками, а каждый шестиугольник имеет три общие стороны с шестиугольниками и три - с пятиугольниками. Структура молекулы фуллерена интересна тем, что внутри такого углеродного "мячика" образуется полость, в которую благодаря *капиллярным свойствам* можно ввести атомы и молекулы других веществ, что дает, например, возможность их безопасной транспортировки.

По мере исследования фуллеренов были синтезированы и изучены их молекулы, содержащие различное число атомов углерода - от 36 до 540.

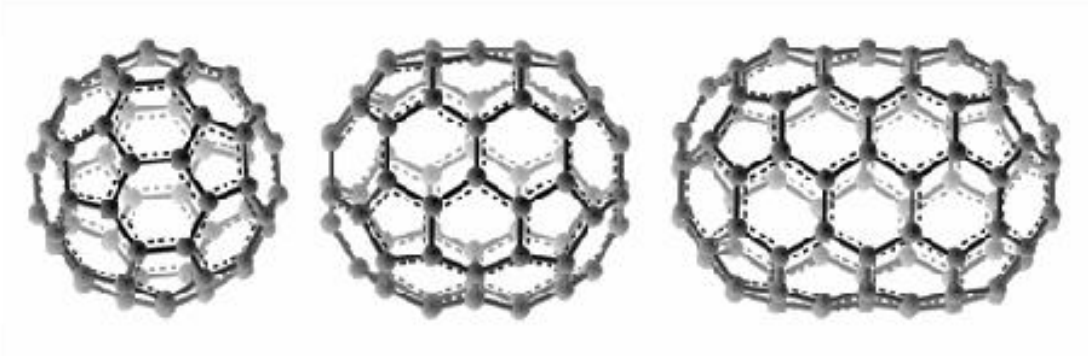


Рис.2.20 Представители фуллеренов a) C60 b) C70 c) C90.

Однако разнообразие углеродных каркасных структур на этом не заканчивается. В 1991 году японский профессор Сумио Иидзима обнаружил длинные углеродные цилиндры, получившие названия ***нанотрубок.***

Нанотрубка – это молекула из более миллиона атомов углерода, представляющая собой трубку с диаметром около нанометра и длиной несколько десятков микрон. В стенках трубки атомы углерода расположены в вершинах правильных шестиугольников.

Рис.2.21. Структура нанотрубки.

Структуру нанотрубок можно представить себе так: берем графитовую плоскость, вырезаем из нее полоску и "склеиваем" ее в цилиндр (на самом деле, конечно, нанотрубки растут совсем по-другому). Казалось бы, что может быть проще – берешь графитовую плоскость и сворачиваешь в цилиндр! – однако до экспериментального открытия нанотрубок никто из теоретиков их не предсказывал. Так что ученым оставалось только изучать их и удивляться.

А удивляться было чему – ведь эти удивительные нанотрубки в 100 тыс. раз тоньше человеческого волоса оказались на редкость прочным материалом. Нанотрубки в 50-100 раз прочнее стали и имеют в шесть раз меньшую плотность! Модуль Юнга – уровень сопротивления материала деформации – у нанотрубок вдвое выше, чем у обычных углеродных волокон. То есть трубки не только прочные, но и гибкие, и напоминают по своему поведению не ломкие соломинки, а жесткие резиновые трубки. Под действием механических напряжений, превышающих критические, нанотрубки ведут себя довольно экстравагантно: они не "рвутся", не "ломаются", а просто-напросто перестраиваются!

Эти необычные свойства нанотрубок можно использовать для создания искусственных мускулов, которые при одинаковом объеме могут быть вдесятеро сильнее биологических, не боятся высоких температур, вакуума и многих химических реагентов.

Из нанотрубок можно создать сверхлегкие и сверхпрочные композиционные материалы, чтобы шить из них одежду, не стесняющую движений, для пожарных и космонавтов. Нанокабель от Земли до Луны из одиночной трубки можно было бы намотать на катушку размером с маковое зернышко. Небольшая нить диаметром 1 мм, состоящая из нанотрубок, могла бы выдержать груз в 20 т, что в несколько сотен миллиардов раз больше ее собственной массы!

Правда, в настоящее время максимальная длина нанотрубок составляет десятки и сотни микрон – что, конечно, очень велико по атомным масштабам, но слишком мало для повседневного использования. Однако длина получаемых нанотрубок постепенно увеличивается - сейчас ученые уже вплотную подошли к сантиметровому рубежу. Получены многослойные нанотрубки длиной 4 мм. Поэтому есть все основания надеяться, что в скором будущем ученые научатся выращивать нанотрубки длиной в метры и даже

сотни метров.
Безусловно, это сильно повлияет на будущие технологии: ведь невидимый невооруженным взглядом "трос" в тысячи раз тоньше человеческого волоса и способный удерживать груз в сотни килограмм, найдет бесчисленное множество применений.
Нанотрубки бывают самой разной формы: однослойные и многослойные, прямые и спиральные. Кроме того, они демонстрируют целый спектр самых неожиданных электрических, магнитных, оптических свойств.
Например, в зависимости от конкретной схемы сворачивания графитовой плоскости (хиральности), нанотрубки могут быть как проводниками, так и полупроводниками электричества. Электронные свойства нанотрубок можно целенаправленно менять путем введения внутрь трубок атомов других веществ.
Пустоты внутри фуллеренов и нанотрубок давно привлекали внимание ученых. Эксперименты показали, что если внутрь фуллерена внедрить атом какого-нибудь вещества (этот процесс носит название "интеркаляция", т.е. "внедрение"), то это может изменить его электрические свойства и даже превратить изолятор в сверхпроводник!
А можно ли таким же образом изменить свойства нанотрубок? Оказывается, да. Ученые смогли поместить внутрь нанотрубки целую цепочку из фуллеренов с уже внедренными в них атомами гадолиния. Электрические свойства такой необычной структуры сильно отличались как от свойств простой, полой нанотрубки, так и от свойств нанотрубки с пустыми фуллеренами внутри. Интересно отметить, что для таких соединений разработаны специальные химические обозначения. Описанная выше структура записывается как Gd@C60@SWNT, что означает "Gd внутри C60 внутри однослойной нанотрубки (Single Wall NanoTube)".
Может ли какой-либо иной материал с таким простым химическим составом похвастаться хотя бы частью тех свойств, которыми обладают нанотрубки? Спектр их возможного применения очень широк: Из нанотрубок можно делать, например, уникальные провода для микроприборов. Уникальность их заключается в том, что ток протекает по ним практически без выделения тепла и достигает громадного значения – 107 А/см2 . Классический проводник при таких значениях мгновенно бы испарился.
Разработано также несколько применений нанотрубок в компьютерной индустрии. Уже в 2006 году появятся эмиссионные мониторы с плоским экраном, работающие на матрице из нанотрубок. Под действием напряжения, прикладываемого к одному из концов нанотрубки, другой конец начинает испускаться электроны, которые попадают на фосфоресцирующий экран и вызывают свечение пикселя. Получающееся при этом зерно изображения будет

фантастически малым: порядка микрона!
Другой пример – использование нанотрубки в качестве иглы сканирующего микроскопа. Обычно такое острие представляет собой остро заточенную вольфрамовую иглу, но по атомным меркам такая заточка все равно достаточно грубая. Нанотрубка же представляет собой идеальную иглу диаметром порядка нескольких атомов. Прикладывая определенное напряжение, можно подхватывать атомы и целые молекулы, находящиеся на подложке непосредственно под иглой, и переносить их с места на место.
Необычные электрические свойства нанотрубок сделают их одним из основных материалов наноэлектроники. На их основе изготовлены новые элементы для компьютеров. Эти элементы обеспечивают уменьшение устройств по сравнению с кремниевыми на несколько порядков. Сейчас активно обсуждается вопрос о том, в какую сторону пойдет развитие электроники послетого, как возможности дальнейшей миниатюризации электронных схем на основе традиционных полупроводников будут полностью исчерпаны (это может произойти в ближайшие 5-6 лет). И нанотрубкам отводится, бесспорно, лидирующее положение среди перспективных претендентов на место кремния.
Еще одно применение нанотрубок в наноэлектронике – создание полупроводниковых гетероструктур, т.е. структур типа "металл/полупроводник" или стык двух разных полупроводников (нанотранзисторы).
Теперь для изготовления такой структуры не надо будет выращивать отдельно два материала и затем "сваривать" их друг с другом. Все, что требуется, это в процессе роста нанотрубки создать в ней структурный дефект (а именно, заменить один из углеродных шестиугольников пятиугольником) просто надломив его посередине особым образом. Тогда одна часть нанотрубки будет обладать металлическими свойствами, а другая – свойствами полупроводников!
Нанотрубки – идеальный материал для безопасного хранения газов во внутренних полостях. В первую очередь это относится к водороду, который давно стали бы использовать как топливо для автомобилей, если бы громоздкие, толстостенные, тяжелые и небезопасные баллоны для хранения водорода не лишали водород его главного преимущества – большого количества энергии, выделяемой на единицу массы (на 500 км пробега автомобиля требуется всего около 3 кг H_2).
Ввиду того, что запасы нефти на нашей планете не бесконечны, то автомобиль на водородном топливе был бы эффектным решением многих экологических проблем. Поэтому, возможно, скоро вместо традиционного бензина новые водородные "бензобаки" с нанотрубками будут заполнять водородным топливом стационарно под давлением, а извлекать – небольшим подогреванием такого

"водородобака". Чтобы превзойти обычные газовые баллоны по плотности запасенной энергии, нужны нанотрубки с полостями относительно большого диаметра – более 2–3 нм.
В нанотрубки можно не только "загонять" атомы и молекулы поодиночке, но и буквально "вливать" вещество. Как показали эксперименты, открытая нанотрубка обладает капиллярными свойствами, то есть она как бы втягивает в себя вещество. Таким образом, нанотрубки можно использовать как микроскопические контейнеры для перевозки и хранения химически или биологически активных веществ: белков, ядовитых газов, компонентов топлива и даже расплавленных металлов.
Попав внутрь нанотрубки, атомы или молекулы уже не могут выйти наружу: концы нанотрубок надежно "запаяны", а углеродное кольцо слишком узко для большинства атомов чтобы "пролезть" через него. В таком виде активные атомы или молекулы можно безопасно транспортировать. Попав в место назначения, нанотрубки раскрываются с одного конца и выпускают свое содержимое в строго определенных дозах. Это не фантастика, эксперименты такого рода уже сейчас проводятся во многих лабораториях, а операции "запаивания" и "распаивания" концов нанотрубок вполне под силу современной технологии. Уже создана нанотрубка с одним закрытым концом.
Также не исключено, что через 10-15 лет на базе этой технологии будет проводиться лечение заболеваний: скажем, больному вводят в кровь заранее приготовленные нанотрубки с очень активными ферментами, эти нанотрубки собираются в определенном месте организма некими микроскопическими механизмами и "вскрываются" в определенный момент. Современная технология уже практически готова к реализации такой схемы через 3 - 5 лет. Основной проблемой является отсутствие эффективных методов "открывания" таких механизмов и их интеграции в белковые маркеры для поиска клеток-мишеней.
Возможно, создадут и более эффективные методы доставки лекарств на основе вирусов и нанокапсул. На основе нанотрубок также создан конвейер, способный точно транспортировать отдельные атомы с большими скоростями вдоль нанотрубки.

2.5 Ультрадисперсные наноматериалы

Рассмотренные выше фуллерены и нанотрубки из-за своих сверхмалых размеров относятся к ультрадисперсным.
Дисперсность – это степень раздробленности вещества на частицы. Чем меньше размер отдельной частицы, тем выше дисперсность. Большинство веществ окружающего нас мира существуют в виде дисперсных систем, например, грунты и почвы, многие технические

материалы (песок, различные порошки и т.д.), некоторые продукты (соль, сахар, крупа). По степени дисперсности частицы можно разделить на грубодисперсные, высокодисперсные (или коллоидные), размер которых колеблется в пределах от 10 -5 – 10 -7 м) и ультрадисперсные (соответственно, нанометрового порядка).
Повышенный интерес ученых к наноматериалам объясняется тем, что уменьшение дисперсности частиц какого-либо вещества может приводить к заметным изменениям их свойств. Так, еще в XIX веке Майкл Фарадей, впервые создав коллоидную суспензию золота, состоящую из крошечных частиц этого металла, обнаружил, что ее цвет менялся на фиолетовый, что свидетельствует об изменении отражающих свойств суспензии при уменьшении размеров частиц.
В последнее время стало известно, что наночастицы серебра имеют антибактериальный эффект, что делает их полезными для лечения многих болезней. Это свойство серебра еще в древности заметили служители церкви, используя серебро для приготовления "святой воды". Но в виде наночастиц антибактериальная активность серебра повышается в тысячи раз!
Такие углеродные наночастицы, как фуллерены и нанотрубки, своими удивительными свойствами тоже подтверждают тот факт, что многие вещества в наноформе не ведут себя так же, как в обыкновенном виде. Это объясняется тем, что с уменьшением размеров частиц увеличивается интенсивность их взаимодействия с окружающей средой, что и приводит к изменению их газонасыщенности, окисленности, токсичности, взрывоопасности, плотности и т.д. по сравнению со свойствами тех же материалов в обычной форме.
Отличие свойств малых частиц от свойств массивного материала известно уже достаточно давно и используется в разных областях техники. Примерами могут служить широко применяемые аэрозоли, красящие пигменты, получение цветных стекол благодаря окрашиванию их коллоидными частицами металлов. Малые частицы и наноразмерные элементы используются для производства различных авиационных материалов. Например, в авиации применяются радиопоглощающие керамические материалы, в матрице которых беспорядочно распределены ультрадисперсные металлические частицы.
Суспензии металлических наночастиц (обычно железа или меди) размером от 30 нм используют как присадки к моторным маслам для восстановления изношенных деталей автомобильных и других двигателей непосредственно в процессе работы.
Ультрадисперсные материалы обычно не встречаются в природе в свободном состоянии, а представляют собой искусственный продукт. В настоящее время существует большое количество способов измельчения веществ, например: механическое дробление (для получения различных порошков), резание (получение стружки),

измельчение в шаровых, вибрационных и вихревых мельницах, измельчение ультразвуком и др.
Наночастицы производятся и при помощи нанотехнологии, в частности, туннельно-зондовыми методами, использующими возможности современных сканирующих микроскопов манипулировать отдельными атомами. И, конечно же, большие успехи в этом направлении будут достигнуты после создания ассемблеров - сборщиков атомных структур. Подробному обсуждению свойств и эффектов, присущих наночастицам, посвящена отдельная глава "Нанохимия и наноматериалы".
Сотни миллионов этих волосков позволяют цепляться за малейшие неровности поверхности. Даже совершенно гладкое, на наш взгляд, стекло дает гекконам достаточно возможностей зацепиться. Как, оказалось, здесь работают силы Ван-дер-Ваальса, или, говоря иначе, силы межмолекулярного взаимодействия. Теория Ван-дер-Ваальса основывается на квантовой механике. Молекулы веществ на малых расстояниях отталкиваются, а на больших притягиваются (тот же принцип положен в основу работы АСМ).
Когда геккон опускает лапку на поверхность, лопаточки на концах нанощетинок столь плотно прилегают к ней, что лапка как бы прилипает к вертикальной стене или потолку. Но чуть геккон напряжет мышцы и потянет лапку - силы Ван дер. Ваальса исчезают, и она легко отделяется от поверхности!
Силы Ван-дер-Ваальса очень малы, однако расположение волосков на пальчиках гекконов позволяет обеспечить достаточно большую поверхность взаимодействия, чтобы ящерица могла удержаться, например, на потолке при помощи всего одного пальца своей пятипалой лапы или кончика хвоста.
Все это побудило исследователей к попыткам использовать сделанное открытие. Сотрудники американской компании iRobot сконструировали робота, который может передвигаться вертикально по стенкам аквариума. В дальнейшем планируется снабдить его искусственными волосками и увеличить прижимающую силу. А если удастся прикрепить к роботу хвост геккона, он сможет бегать по острым граням.
Если эксперименты по созданию ящерицеподобных роботов будут успешными, эти механизмы можно будет использовать в самых разных областях – от мытья окон в высотных зданиях до путешествий по пыльным тропинкам далеких планет.
Можно положить данный принцип в основу изготовления липкой ленты, подобной скотчу, которую можно использовать повторно и даже в вакууме (обычный скотч в космосе не работает).
Ведутся разработки нового поколения так называемых "сухих клеев" с широким диапазоном характеристик, которые будут обеспечивать высокую адгезию (липучесть) на основе электростатики.

Можно изготовить обувь и перчатки, прочно удерживающие человека на вертикальной стене. Они облегчили бы жизнь не только альпинистам, монтажникам-скалолазам, но и всем остальным людям.

2.6 Дальнейшее развитие нанотехнологий: проблемы и перспективы

Благодаря прорыву в области производства микроскопов, современные ученые могут манипулировать атомами и располагать их так, как им заблагорассудится. Такого еще не было за всю историю развития человечества!

Идеальная техническая система – это система, масса, габариты и энергоемкость которой стремятся к нулю, а ее способность выполнять работу при этом не уменьшается. Предельный случай идеализации техники заключается в уменьшении её размеров, (вплоть до полного "исчезновении") при одновременном увеличении количества выполняемых ею функций. В идеале – технического устройства не должно быть видно, а функции, нужные человеку и обществу должны выполняться. Закон увеличения степени идеальности гласит: развитие всех систем идет в направлении увеличения степени идеальности.

На практике хорошей иллюстрацией этого закона может служить постоянное стремление производителей микроэлектроники и бытовой техники к миниатюризации, созданию устройств всё меньших размеров, со все большими функциональными возможностями. Взять, например, те же сотовые телефоны или ноутбуки: размер все уменьшается, в то время как функциональность только растет.

Таким образом, нанотехнологии и наноустройства являются закономерным шагом на пути совершенствования технических систем. И, возможно, не последним: за областью нановеличин лежат области пико (10-12), фемто (10-15), атто (10-18) и т.д. величин, с еще неизвестными и непредсказуемыми свойствами…

В настоящее время на рынке продаются только скромные достижения нанотехнологии – такие как самоочищающиеся ткани и упаковки, позволяющие дольше сохранять свежими продукты питания. Однако ученые предсказывают триумфальное шествие нанотехнологии в недалеком будущем, опираясь на факт её постепенного проникновении во все отрасли производства.

Нанотехнология станет основой новой промышленной революции, которая приведет к созданию устройств в 100 раз более прочных, чем сталь и не уступающих по сложности человеческим клеткам. Уже создаются, и будут создаваться устройства, основанные на новейших материалах с необычными свойствами. Благодаря обработке на атомарном уровне, привычные материалы будут обладать улучшенными свойствами, постепенно становясь все легче, прочнее и

меньше по объему. Согласно прогнозу большинства ученых, это произойдет уже через 10-15 лет.
Возможности использования нанотехнологий неисчерпаемы - начиная от микроскопических компьютеров, убивающих раковые клетки, и заканчивая автомобильными двигателями, не загрязняющими окружающую среду.
Однако большие перспективы чаще всего несут с собой и большиеопасности. Взять хотя бы достижения в области атомной энергии и печальные последствия Чернобыльской аварии или трагедию Хиросимы и Нагасаки.
Ученые всего мира сегодня должно четко представлять себе, что подобные "неудачные" опыты или халатность в будущем могут обернуться такой.
Сотни миллионов этих волосков позволяют цепляться за малейшие неровности поверхности. Даже совершенно гладкое, на наш взгляд, стекло дает гекконам достаточно возможностей зацепиться. Как, оказалось, здесь работают силы Ван-дер-Ваальса, или, говоря иначе, силы межмолекулярного взаимодействия. Теория Ван-дер-Ваальса основывается на квантовой механике. Молекулы веществ на малых расстояниях отталкиваются, а на больших притягиваются (тот же принцип положен в основу работы АСМ).
Когда геккон опускает лапку на поверхность, лопаточки на концах нанощетинок столь плотно прилегают к ней, что лапка как бы прилипает к вертикальной стене или потолку. Но чуть геккон напряжет мышцы и потянет лапку - силы Ван дер Ваальса исчезают, и она легко отделяется от поверхности!
Силы Ван-дер-Ваальса очень малы, однако расположение волосков на пальчиках гекконов позволяет обеспечить достаточно большую поверхность взаимодействия, чтобы ящерица могла удержаться, например, на потолке при помощи всего одного пальца своей пятипалой лапы или кончика хвоста.
Все это побудило исследователей к попыткам использовать сделанное открытие. Сотрудники американской компании iRobot сконструировали робота, который может передвигаться вертикально по стенкам аквариума. В дальнейшем планируется снабдить его искусственными волосками и увеличить прижимающую силу. А если удастся прикрепить к роботу хвост геккона, он сможет бегать по острым граням.
Если эксперименты по созданию ящерицеподобных роботов будут успешными, эти механизмы можно будет использовать в самых разных областях – от мытья окон в высотных зданиях до путешествий по пыльным тропинкам далеких планет.
Можно положить данный принцип в основу изготовления липкой ленты, подобной скотчу, которую можно использовать повторно и даже в вакууме (обычный скотч в космосе не работает).

Ведутся разработки нового поколения так называемых "сухих клеев" с широким диапазоном характеристик, которые будут обеспечивать высокую адгезию (липучесть) на основе электростатики.
Можно изготовить обувь и перчатки, прочно удерживающие человека на вертикальной стене. Они облегчили бы жизнь не только альпинистам, монтажникам-скалолазам, но и всем остальным людям.

2.7 Опасности, которыми не следует пренебрегать

Восторженно предвкушая те положительные изменения, которые принесет с собой промышленная революция в нашу жизнь, не будем столь наивны, чтобы не задуматься о возможных опасностях и проблемах. Многие крупные ученые современности не зря пытаются привлечь внимание не только к позитивным перспективам будущего, но и к возможным негативным последствиям.
Билл Джой , со-основатель и ведущий ученый Sun Microsystems в Пало Альто, штат Калифорния, утверждает, что исследования в области нанотехнологий и других областях должны быть остановлены перед тем, как это навредит человечеству. Его опасения поддержала еще одна группа нанотехнологов, выпустив так называемый "Foresight Guidelines" – "руководящие линии Института предвидения". Как и Джой, они считают, что стремительный рост нанотехнологий выходит из-под контроля. Но, вместо простого запрета исследований в этой области, они предложили установить правительственный контроль над опасными исследованиями. Такой надзор, утверждают они, сможет предотвратить случайную катастрофу в этой области.
Страхи перед нанотехнологиями начали появляться с 1986 года, после выхода в свет "Машин созидания" Дрекслера, где он не только нарисовал утопическую картину нанотехнологического будущего, но и затронул "обратную сторону" этой медали. Одну из проблем, которая представляется ему наиболее серьезной, он назвал " проблемой серой слизи" ("grey goo problem").
Опасность серой слизи в том, что нанометровые ассемблеры, вышедшие из-под контроля в результате случайной или намеренной порчи их систем управления, могут начать реплицировать сами себя до бесконечности, потребляя в качестве строительного материала все на своем пути, включая леса, заводы, домашних животных и людей. Расчёт показывает, что теоретически такой ассемблер со своим потомством окажется в состоянии переработать всю биомассу Земли за считанные часы (правда, без учёта времени на перемещение по поверхности планеты).
Предварительный анализ показывает, что ассемблер может быть сделан достаточно надёжным, чтобы вероятность появления самовоспроизводящейся ошибки оказалась пренебрежимо малым. Однако неразумно полностью исключить опасность преднамеренного

программирования ассемблера террористом или хулиганом, подобным современным создателям компьютерных вирусов.
В своих опасениях Джой опирается на то, что гипотетические части футуристических микромашин уже выпущены и встают на свои места. "Один из компонентов ассемблера – электронное устройство молекулярных размеров – говорит Джой – сейчас уже реализовано". Далее он узнал, что саморепликация уже давно работает вне биологических систем: исследователи показали, что простые пептидные молекулы могут провоцировать свою собственную репродукцию. "Вот почему самореплицирующиеся машины становятся все более реальными, - заключил Джой - И от их реальности веет угрозой".
Другие ученые опровергают страхи перед "серой слизью", говоря о принципиальной невозможности преодолеть все практические трудности в создании подобных механизмов. "Все это высосано из пальца", - утверждает Блок. Будет ошибкой отталкиваться от того, что раз простые молекулы имеют способность к репродукции, то инженеры смогут построить сложные наномашины, умеющие делать то же самое. Что касается биологических систем, то они, конечно, способны к репликации, но, во-первых, они намного больше нанометрических масштабов, а во-вторых, фантастически сложны по своей структуре, поскольку включают в себя отдельные системы для хранения и копирования генной информации, системы энергопроизводства, синтеза белков и др.
"Даже природа не сделала нанометрической структуры, способной к репликации", замечает Виола Вогель, наноученый Университета Вашингтона, штат Сиэтл.
Тем не менее, возможны другие сферы злоупотребления использованием нанотехнологий. На одной из встреч, посвященных обсуждению их развития, представители научного общества, исследовательских центров и государственных агентств были собраны для обсуждения проблем в этой области, вызывающих беспокойство. Среди возможных проблем, особенно остро вставали вопросы следующего типа:

- Способна ли образовательная система обучить достаточно нанотехнологических специалистов?
- Может ли прогресс нанотехнологий подорвать традиционный бизнес и оставить тысячи людей без работы?
- Может ли снижение стоимости продукции благодаря нанотехнологиям и молекулярной биологии сделать их легкодоступными для террористов для того, чтобы разработать опасные микроорганизмы?
- Каким будет эффект от вдыхания некоторых веществ, которые в настоящее время формируются в молекулярном масштабе?

Исследования показали, что та же нанотрубка, представляющая собой соединение сверхтонких игл, имеет структуру, похожую на асбест, а этот материал при вдыхании вызывает повреждение легких.

- Что случится, если в окружающую среду будет выпущено большое количества наноматериала, начиная от компьютерных чипов и заканчивая краской для самолетов? Не будут ли наноматериалы вызывать аллергию?
- Когда Майкл Фарадей создавал коллоидную суспензию золота, состоящую из крошечных частиц металла, он увидел, что ее цвет менялся на фиолетовый. Значение этого открытия очень важно для нанотехнологии. Не окажутся ли материалы, считавшиеся безопасными в обычной форме, опасными для здоровья, когда их используют в форме наночастиц? Теоретически, они могут оказаться более химически активными.
- Не приведет ли вторжение наночастиц в наши тела к непредсказуемым последствиям? Они могут быть меньше белков. Что случиться, если наночастицы вызовут пересворачивание белка? Проблемы со сворачиванием белка могут вызвать, например, болезнь Альцгеймера.

Эти и другие вопросы, стоящие сегодня перед исследователями, действительно очень актуальны и важны. В бешеной гонке нанотехнологий, исследователи и ученые должны взять на себя всю полноту ответственности за жизнь и здоровье других людей, чтобы не оказаться беззаботными фанатиками, совершившими "революцию" только лишь "во имя революции", не утруждая себя размышлениями о возможных трагических последствиях и катастрофах. По всем этим причинам исследование наноэффектов новых технологий будет требовать принципиально новых методов и междисциплинарного подхода.

Список литературы

1. А. В. Егунов, Б. Л. Жоржолиани, В. Г. Журавский, В. В. Жуков «Автоматизация и механизация сборки и монтажа узлов на печатных платах» под ред. В. Г. Журавского. - М.: Радио и связь, 1988.
2. Ю. В. Зерний «Сборка ПТМ». Учебное пособие, издание ВЗМИ, 1982.
3. К. И. Билибин, А. И. Власов, Л. В. Журавлева и др. «Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры». Учебник для вузов, под ред. В. А. Шахнова. - М.:Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002.
4. А. Медведев «Печатные платы. Конструкции и материалы». - М.: Техносфера, 2005.
5. А. Медведев «Технология производства печатных плат». – М.: Техносфера, 2005.
6. Е. В. Пирогова «Проектирование и технология печатных плат». Учебник. – М.: ФОРУМ: ИНФА – М, 2005.
7. И. П. Бушминский, О. Ш. Даутов, А. П. Достанко и др. «Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры». Учебник для вузов, под ред. А. П. Достанко, Ш. М. Чабдарова. – М.: Радио и связь, 1989.
8. Х. Ханке, Х. Фабиан «Технология производства радиоэлектронной аппаратуры». – М.: Энергия, 1980.

В 2007 году СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы. Реализация инновационной образовательной программы «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий» позволит выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях экономики.

КАФЕДРА ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Кафедра технологии приборостроения относится к числу ведущих кафедр института со дня его основания в 1913 году. Тогда она называлась кафедрой механической технологии и возглавлялась известным ученым в области разработки инструмента профессором А. П. Знаменским. Позже она была переименована в кафедру технологии приборостроения.

За время своего существования кафедра выпустила из стен института более тысячи квалифицированных инженеров, более сотни кандидатов и докторов наук. В разные ее возглавляли известные ученые и педагоги профессора Николай Павлович Соболев и Сергей Петрович Митрофанов.

Кафедра имеет выдающиеся научные достижения. Заслуженными деятелями науки и техники РСФСР, профессором С. П. Митрофановым были разработаны научные основы группового производства, за что он был удостоен Ленинской премии СССР. Методы группового производства с успехом применяются в промышленности и постоянно развиваются его учениками. Заслуженным деятелем науки и техники РСФСР, заслуженным изобретателем СССР Юрием Григорьевичем Шнейдером разработаны метод и инструментарий нанесения регулярного микрорельефа на функциональной поверхности.

В настоящее время кафедра осуществляет выпуск специалистов по специальностям «Технология приборостроения» (инженер – технолог, инженер – технолог – менеджер, инженер – технолог по искусственному интеллекту в приборостроении) и «Системы автоматизированного проектирования» (инженер - системотехник). На кафедре ведется подготовка бакалавров, магистров, инженеров и аспирантов по названным специализациям силами четырех профессоров и десяти доцентов.

Основными научными направлениями кафедры являются: научные основы организации группового производства (руководители: Д. Д. Куликов, Б. С.

Падун); автоматизация технологической подготовки производства (руководители: Д. Д. Куликов, Б. С. Падун, Е. И. Яблочников); регуляризация микрорельефа поверхностей деталей машин и приборов (руководитель Ю. П. Кузьмин); управление функциональными свойствами поверхностного слоя деталей (руководитель В. А. Валетов). Последнее направление организованно в 1988 году и в настоящее время детально разработаны не только теоретические основы управления характеристиками поверхностного слоя деталей, но и методики проведения экспериментальных исследований по определению влияния различных факторов на характеристики поверхностного слоя.

Разработаны современные установки – измерительно-вычислительные комплексы для анализа микрогеометрии поверхностей и технологических остаточных напряжений в поверхностном слое. По этому направлению за последние годы защищено три кандидатских диссертации и подготовлена одна докторская. В настоящее время на кафедре в рамках этого направления работают не только преподаватели, но и молодые аспиранты.

Кафедра имеет тесные научные учебные связи с университетами Германии, Франции, Китая. Наиболее способные студенты и аспиранты проходят стажировку по интересующим их проблемам в Техническом университете г. Ильменау (Германия).

Вячеслав Алексеевич Валетов

ОСНОВЫ ПРОИЗВОДСТВА
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Учебное пособие

В авторской редакции
Компьютерный набор и верстка В. А. Валетов
Дизайн обложки В. А. Валетов

Редакционно-издательский отдел Санкт – Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99

Заведующая РИО Н. Ф. Гусарова
Подписано к печати

Заказ №1055 Тираж 100 экз.
Отпечатано на ризографе.