

Литографии в микроэлектронике

**Методическое пособие для студентов ФОПФ МФТИ
и описания лабораторных работ в ИФТТ РАН**

А.Н.Россоленко, Т.Е.Голикова, В.Н.Зверев

Содержание

1. Основы литографии	
1.1 Вводные замечания.....	3
1.2 Типичные технологические шаги процесса литографии.....	3
1.3 Подложки. Способы очистки.....	3
1.4 Чистые помещения.....	6
1.5 Резисты - определение и свойства. Приготовление резистивной маски.....	6
2. Фотолитография	
2.1 Введение.....	10
2.2 Основы фотолитографии.....	10
2.3 Контактная и проекционная печать.....	12
2.4 Фотошаблоны.....	14
2.5 Свойства резистов. Фоторезисты.....	16
2.6 Предельные возможности фотолитографии.....	20
3. Электронная литография	
3.1 Введение.....	21
3.2 Оборудование для электронно- лучевого экспонирования. Принцип работы и основные характеристики электронного микроскопа	23
3.3 Формирование электронного луча.....	24
3.4 Вакуумная система.....	29
3.5 Электронные резисты.....	30
3.6 Рассеяние электронов в резисте. Эффекты близости в резистах и их коррекция.....	32
3.7 Работа в программе Nanomaker.....	34
4. Лабораторные работы	
4.1. Лабораторная работа №1	
Изготовление дифракционной решетки с помощью фотолитографии. Измерение длины волны лазера.....	39
4.2 Лабораторная работа №2	
Технология получения микроструктур и контактов к ним с помощью электронной литографии. Многоуровневая литография: совмещение слоев.....	41
4.3 Лабораторная работа №3	
Определение чувствительности и контрастности электронного резиста с помощью дозового клина.....	46
5. Список литературы.....	54

1. Основы литографии.

1.1. Вводные замечания.

Задача уменьшения линейных размеров элементов интегральных микросхем (ИМС) - одна из основных в микроэлектронике. В настоящее время уровень развития технологий в этой области позволяет достигать субмикронных размеров элементов, и происходит переход уже на нанометровый уровень. Изменяются и физические основы работы элементов – теперь они преимущественно связаны с квантомеханическими явлениями. Создание интегральных нанoeлектронных квантовых схем, по существу, является конечной целью литографических нанотехнологий.

Литография (от греческих «lithos» - камень и «grapho» - пишу, рисую) - одна из наиболее широко распространенных технологий для получения наноструктур. Первоначально литографией называли способ печати, при котором оттки получают переносом краски под давлением с плоской (нерельефной) печатной формы непосредственно на гладкую поверхность. Литография в микро- и нанoeлектронике - это формирование в специальном чувствительном слое (резисте), нанесенном на поверхность подложки, рельефного рисунка, повторяющего топологию микросхемы, с последующим переносом этого рисунка на подложку.

1.2. Этапы литографии.

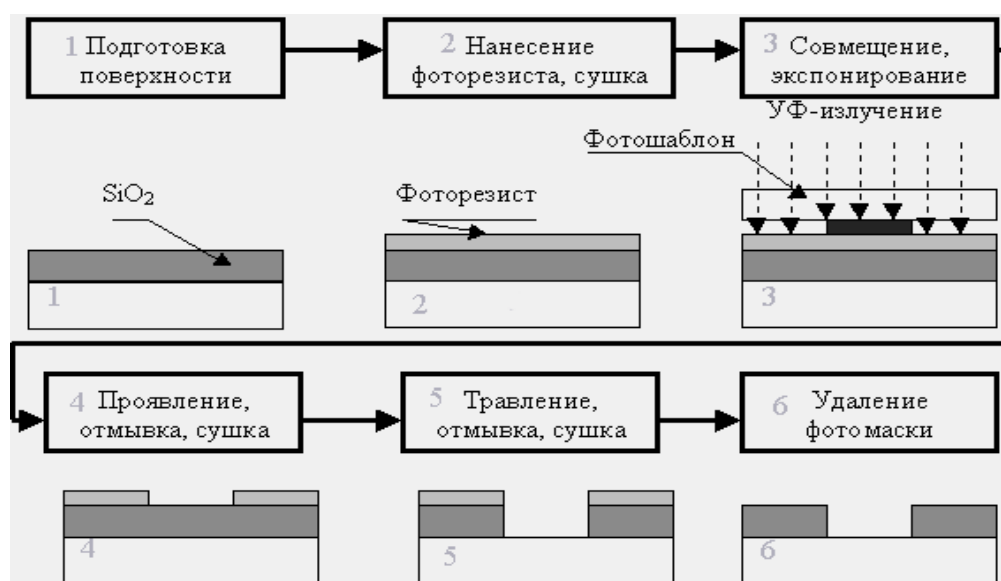


Рис. 1.1. Типичные технологические этапы фотолитографии.

Типичные технологические шаги процесса литографии на примере фотолитографии таковы (рис.1.1):

- 1- очистка подложки;
- 2- формирование маски из резиста: нанесение на подложку, сушка;
- 3- совмещение с фотошаблоном, экспонирование;
- 4- проявление;
- 5- травление;
- 6- снятие фотомаски (резиста).

Эти процессы в сложных литографических технологиях могут повторяться многократно.

1.3. Подложки.

Исходным материалом для получения подложек является обычно поликристаллический кремний, который получают из кварцевого песка (SiO_2). Заготовки из поликристаллического Si представляют собой стержни диаметром 40 - 120 мм и длиной 450 - 950 мм. Степень чистоты 98%. Поликристаллический Si не может быть использован для изготовления приборов, т.к. имеет внутреннюю зернистую структуру (кристаллы разделены межкристаллитными границами), что равносильно наличию дефектов. Для изготовления полупроводниковых приборов используют монокристаллы Si, которые получают из поликристаллического Si. Самым распространенным методом получения монокристалла Si является метод Чохральского (=70% монокристаллов изготавливают этим методом). Поликристаллический Si раскалывается на куски, загружается в тигель и расплавляется ($t=1412^0 \text{ C}$). Монокристалл-затравку опускают в расплав и, не допуская его плавления, поднимают вверх при постоянном вращении вокруг оси. При этом расплав частично поднимается вместе с затравкой и при охлаждении в зоне над расплавом кристаллизуется, повторяя кристаллическую решетку и ориентацию монокристалла. Скорость выращивания - 10 - 60 мм/час.

Легирующие примеси вводятся в расплав путем добавки сильнолегированных гранул Si. При этом концентрации примеси в расплаве и кристалле различны, но в расплаве концентрация примесей выше (и полезных, и случайных), то этот метод можно рассматривать как метод очистки кристалла или метод получения чистого кристалла.

Другим распространенным методом очистки является метод зонной плавки, который также основан на принципе перераспределения примесей между кристаллом и расплавом. Исходные стержни поликристаллического Si предварительно шлифуют и укрепляют (без затравки). Часть стержня нагревают до температуры плавления. При непрерывном передвижении нагревателя (индуктора) вдоль стержня передвигается и зона расплава. При этом атомы примеси оттесняются на границе фаз в расплав. Когда зона плавления достигает противоположного конца стержня, то в нем концентрируется большая часть примесей. Многократным повторением этого процесса или путем создания нескольких зон плавления, следующих друг за другом, получают Si такой чистоты, которая позволяет осуществлять изменение свойств кристалла с помощью направленного легирования примесями. Зона примесей, оставшаяся после кристаллизации на конце стержня, удаляется, а оставшийся стержень представляет собой чистый поликремний. Скорость - несколько мм/мин.

Последующий технологический процесс заключается в превращении поликристаллического Si в монокристаллический. Этот процесс может выполняться методом Чохральского или заканчиваться одновременно с зонной плавкой, если в конец стержня вплавляется монокристаллическая затравка. Затвердевающий расплав кристаллизуется в монокристалл, начиная с затравки.

Легирование примесью достигается благодаря тому, что применяют предварительно легированную затравку. При перемещении расплавленной зоны примесные атомы затравки распространяются равномерно по всему стержню. Другой подход заключается в подаче легирующего газа, атомы которого диффундируют в расплав и при кристаллизации внедряются в решетку. Диаметр кристалла ~ 125 мм. Кристаллы более чистые (т.к. нет случайных примесей из тигля).

В дальнейшем монокристалл подвергают распиловке на пластины толщиной 200 - 300 мкм, на основе которых затем изготавливают различные приборы. Но перед распиловкой кристалл шлифуют по диаметру, вследствие чего получается цилиндр, на нем параллельно оси кристалла снимается часть материала, а по полученной поверхности измеряют распределение сопротивления по длине стержня (чтобы узнать равномерно ли легирован стержень). Полученная кромка служит также для юстировки.

Резка слитков может производиться с помощью стальных полотен (служат средством переноса абразивного порошка к месту резки) или "алмазных дисков" (металлических дисков с вкрапленными алмазными крошками, чаще по внутренней кромке). При резке почти половина слитка теряется. Резка оставляет на поверхности пластин неравномерности глубиной около 10 мкм, тогда как для дальнейшего использования необходима шероховатость поверхности не более 0,01 мкм. Поэтому пластины вначале шлифуют при помощи микропорошков, размер зерна которых выбирается с каждым циклом все меньшим, вплоть до 3 - 5 мкм. Стороны пластин шлифуют отдельно.

После шлифовки остаются неровности в несколько микрон, а также нарушенный после распиловки слой вблизи поверхности. Для устранения этих дефектов применяется полировка, чаще всего химическая (травление), т.е. растворение поверхностного слоя с помощью азотной и плавиковой кислот. В результате неровности снижаются до уровня тысячных долей мкм. Иногда химическую полировку сочетают с предварительной механической, с размером зерна абразива 0,1 - 0,3 мкм. Кроме того, пластины перед использованием неоднократно обезжириваются - с помощью ацетона, этилового спирта и аналогичных органических растворителей.

Полупроводниковые пластины, вырезанные из монокристалла, в объеме и на поверхности которых в дальнейшем формируются элементы устройств, называются подложками. При использовании подложек на их поверхности часто приходится получать диэлектрические покрытия, наиболее распространенным является окисное покрытие (SiO_2).

Способы очистки подложек.

Обычно используются подложки из кремния, легированного бором (кремний p-типа) или фосфором (кремний n-типа), с сопротивлением 15-20 Ом·см, толщиной ~500 мкм. Поверхность подложек предварительно очищают, чтобы обеспечить ее высокую смачиваемость раствором полимера и, соответственно, адгезию резиста, а также чтобы удалить загрязнения и исключить включения примесей.

Технологически чистой считается поверхность, на которой концентрация примесей не препятствуют воспроизводимому получению заданных значений параметров микросхем. Основные способы очистки подложек – обезжиривание (ацетон, спирты), травление (кислоты, плазма), отмывка (деионизованная вода). Имеются разные типы загрязнений и, соответственно, способы очистки от них.

1. «Физические включения» (не связаны химически с поверхностью пластин) - это небольшие частицы металлов, пыль от тары, пух. Эти загрязнения легко удаляются обработкой в ультразвуковой ванне с ацетоном.
2. Оксиды, а также загрязнения ионными примесями (анионы кислот, катионы металлов). Для очистки применяют промывку в кислотах, в деионизованной воде (с контролем ее чистоты по сопротивлению $\rho=1-20$ МОм·см), обработку в ионной плазме. Отмывка сверхчистой (деионизованной) водой удаляет следы растворителя, а также микрочастицы, которые могут впоследствии образовать "проколы" в тонком слое резиста.
3. Органические загрязнения - масла (жиры). Для растворения жировых плёнок, которые ухудшают адгезию резиста с поверхностью, подложки кипятят в органических растворителях или помещают в ультразвуковую ванну с этими растворителями.
4. Газы, адсорбированные на поверхности, удаляются при нагреве на воздухе.

1.4. Чистые помещения.

При получении структур микронных и субмикронных размеров результаты литографии в значительной степени определяет культура производства и вакуумная гигиена. Наиболее опасно присутствие в воздухе частиц размером *менее 0.5 мкм*, поскольку они могут долго находиться во взвешенном состоянии и оседать на подложки. Стандартом России установлено следующее разделение производственных помещений в зависимости от концентрации частиц размером менее 0.5 мкм в 1 л воздуха: 0.5, 35, 350, 1000, 3500, 10000 и 35000.

В США приняты иные способы классификации "запыленности" рабочих помещений:

- комната класса 10 содержит в воздухе не более 300 частиц указанного размера в 1 м³
- комната класса 100 – не более 3600 таких частиц в 1 м³ и т.д. В общем случае номер класса в американской классификации – это число частиц размером 0.5 мкм в 1 кубическом футе (1 фут = 0.3048 м) (Федеральный стандарт 209В).

Литографические операции проводят в "чистых комнатах", расположенных внутри рабочих помещений. Воздух, подаваемый в "чистые комнаты", тщательно фильтруют, пропуская через волокнистые фильтры с высокой производительностью. Работать в чистых комнатах можно только в специальной одежде, изготовленной из мало пылящих материалов, в перчатках. Комплект одежды (см. рис 1.2) закрепляется за каждым работающим персонально. Альтернативой использования чрезвычайно дорогих "чистых комнат" является разработка методов литографии, все стадии которой проводятся в специальных боксах в вакууме (иногда с добавкой инертных газов). В литературе такую литографию называют *вакуумной*.



Рис 1.2. Комплект одежды для работы в чистой зоне.

1.5. Резисты.

Основными материалами для осуществления литографических процессов служат резисты. **Резисты** (англ. resist – сопротивляться, препятствовать) – это органические многокомпонентные полимерные композиции, чувствительные к воздействию какого-либо высокоэнергетического излучения (оптического, рентгеновского, потока ионов или электронов). Резисты применяются для формирования заданного рельефа на поверхности пленки и ее защиты от воздействия травителей. Их наносят на поверхность подложки в растворенной форме, а затем высушивают.

В состав резистов входят следующие компоненты:

1. Свето- (электроно-, ионо-, рентгено-) чувствительный компонент (например, полиметилметакрилат (ПММА), азид, каучук, полибутен), из которого после воздействия

соответствующего излучения образуется продукт с существенно отличающейся растворимостью и/или химической реакционной способностью.

2. Пленкообразующие полимеры (эпоксидные и другие смолы), для обеспечения вязкости раствора и, соответственно, обеспечения нужной и равномерной вдоль поверхности подложки толщины слоя резиста.

3. Специальные добавки, в частности, в фоторезистах- для изменения спектральной характеристики светочувствительности (ароматические соединения), для улучшения сцепления фоторезистивного слоя с подложкой, а также добавки, повышающие кислотостойкость маски резиста, и иные.

4. Растворители (метанол, бензол, толуол, ацетон), для однородного распределения всех компонентов.

Функции каждого из компонентов резиста взаимосвязаны, и только в комплексе все компоненты обеспечивают необходимые параметры чувствительного к излучению слоя. Важно отметить, что чувствительность резистов зависит не только от природы компонентов, но и от дозы облучения, состава проявителя, времени и температуры проявления.

Этапы приготовления резистивной маски.

Нанесение резиста.

Первой стадией формирования маски резиста является создание равномерной пленки определенной толщины. Наибольшее распространение для этой операции получило центрифугирование, позволяющее использовать несложные устройства. Подложка закрепляется вакуумным присосом на центрифуге, и после нанесения нескольких капель резиста раскручивается с определенной скоростью. Если литография проводится на подложках с развитой топологией (т.е. с уже полученными ранее структурами), их предварительно планаризируют (выравнивают), например, путем нанесения слоя легкоплавкого покрытия. Плёнка фоторезиста должна быть равномерна (отклонения от средней толщины вдоль поверхности не более $\pm 10\%$) и иметь хорошую адгезию к подложке. Планаризирующее действие центробежных сил приводит к образованию сверхгладких пленок с однородностью по толщине $\sim 1\%$, которую нельзя получить каким либо другим способом.

Толщина плёнки фоторезиста зависит от вязкости раствора, скорости и времени вращения центрифуги (рис.1.3), температуры и влажности среды. Толщина пленки резиста σ обуславливается вязкостью раствора ν и скоростью (частотой) вращения центрифуги ω :

$$\sigma = k(\nu/\omega)^{1/2}, \quad (1.1)$$

где k - коэффициент, определяемый экспериментально для каждого полимера, растворителя и данной центрифуги.

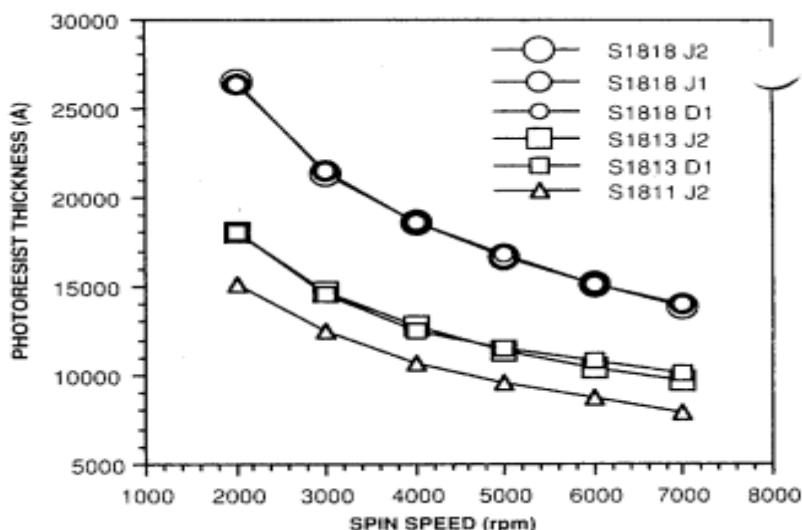


Рис. 1.3. Зависимость толщин резистов (треугольники – резист S1811) от скорости вращения центрифуги (об/мин).

Толщина резиста влияет на дефектность, время сушки, время экспонирования и проявления, селективность травления пленки. Тонкие пленки резиста позволяют обеспечить более высокое разрешение.

Иногда используют нанесение фоторезиста и из его *аэрозоля*. Применение пульверизации для нанесения фоторезиста позволяет автоматизировать процесс, однако связано с большим расходом материала и более сложным контролем толщины покрытия. Метод «окунания» применяют редко, так как, несмотря на простоту и возможность ручного исполнения он не даёт воспроизводимых результатов.

Сушка резиста.

В процессе сушки происходит испарение растворителя, смыкание полостей, в которых находился растворитель. Пленка уплотняется, улучшается ее адгезия (сцепление) к подложке, устраняются внутренние напряжения. Температуру сушки выбирают так, чтобы произошло полное, но постепенное удаление растворителя. При этом температура должна быть выше точки кипения растворителя, но ниже температур стеклования и термического разложения полимера. Сушка должна также обеспечивать максимальное отношение скоростей растворения экспонированного (R) и неэкспонированного (R_0) резистов (R/R_0). При очень высоких температурах сушки происходит разрыв полимерных цепей и окисление, что уменьшает соотношение R/R_0 . Для фоторезистов оптимальны температуры сушки $\sim 70-90^\circ\text{C}$, а для электронных резистов $\sim 130-180^\circ\text{C}$. Испарение растворителя происходит и при использовании резистов, поэтому, срок хранения у них небольшой (~ 1 год).

Экспонирование.

Экспонирование - процесс облучения светочувствительного материала активным электромагнитным излучением. Продуктами превращений полимеров могут быть полимерные молекулы иной полярности или (при деструкции полимерной цепи под действием излучения) мономеры. Продуктами превращений низкомолекулярных веществ могут быть, напротив, полимеры. В любом случае протекают процессы разрыва или образования химической связи, имеющие высокие активационные барьеры – или отрыв групп-заместителей от мономеров, или разрыв/образование связей между мономерами. Все эти реакции не протекают с заметными скоростями без воздействия высокоэнергетического

излучения. В результате под действием энергетического воздействия (излучения) ультрафиолета или потока электронов и ионов изменяются свойства резиста (растворимость в слабощелочных растворах, химическая стойкость).

В зависимости от вида излучения, использованного для избирательного облучения резистной пленки, различают следующие **виды литографии**:

- **фотолитография** (длина волны ультрафиолетового излучения $\sim 250 - 440$ нм);
- **рентгенолитография** (длина волны рентгеновского излучения $\sim 0,01 - 1$ нм);
- **электронная литография** (поток электронов, имеющих энергию $10 - 100$ КэВ или длину волны $\sim 1 - 0,001$ нм);
- **ионолитография** (длина волны излучения $\sim 0,05 - 0,1$ нм).

Разрешение литографии определяется длиной волны падающего излучения, а также кинетикой и механизмами процессов в резисте и на подложке.

Проявление и удаление резиста.

В зависимости от характера протекающих в резистах реакций, их подразделяют на две группы: позитивные и негативные. В **негативных резистах** под воздействием света (для фоторезистов) происходит полимеризация мономерных молекул с образованием полимерных, в результате чего растворимость резиста на облученных участках уменьшается, и после проявления они остаются на поверхности подложки. В **позитивных резистах** в результате реакции распада происходит разрыв связей в молекулах полимеров, и на облученных участках растворимость резиста увеличивается. При проявлении позитивных резистов облученные участки удаляются, а не облученные остаются на подложке (рис.1.4). Проявление скрытого изображения для негативных фоторезистов заключается в обработке резиста органическим растворителем. В позитивных резистах продукты деструкции полимера обладают кислотными свойствами, и для перевода их в растворимую форму применяют растворы неорганических соединений с щелочными свойствами (например, КОН, NaOH для фоторезиста).

После отмывки от следов проявителя и сушки полученную маску подвергают тепловому «задубливанию» ($120 \div 180^\circ \text{C}$ в зависимости от марки резиста), в результате чего окончательно формируются её защитные свойства. Термическая обработка облученного резистного слоя улучшает функциональные характеристики резистных масок, прежде всего их контрастность при проявлении. Кроме того, правильно выбранный режим обработки позволяет "залечивать" дефекты масок за счет релаксации механических напряжений, возникающих вследствие структурных перестроек резистных слоев во время их экспонирования.

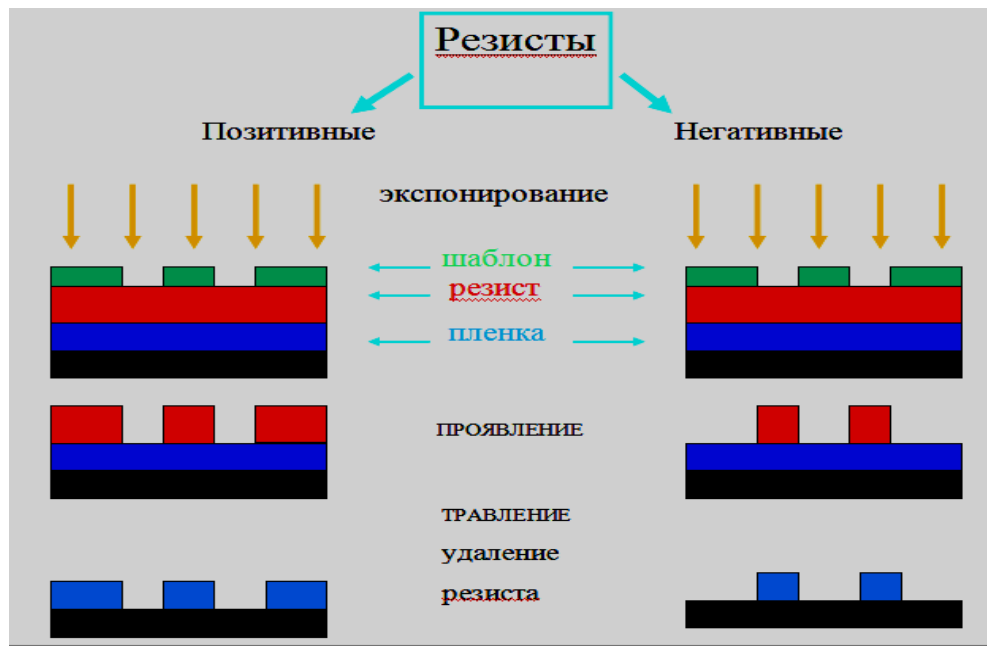


Рис. 1.4. Позитивные и негативные резисты.

Следующая операция – обработка участков поверхности подложки, не закрытых резистивным слоем, через сформированные на ее поверхности резистные маски, и перенос рисунка топологического слоя на подложку. Обычно обработка связана с травлением поверхности металла, осажденного ранее на подложку. Используют как жидкостные, так и «сухие» методы травления (например, в плазме CF_4).

Завершающей операцией является удаление резиста с поверхности подложки. Для этого используют различные способы, в частности, обработку в органических растворителях с последующим механическим удалением слоя, кипячение в кислотах, ионно-плазменную и плазмохимическую обработку поверхности в атмосфере O_2 .

2. Фотолитография.

2.1. Введение.

Центральное место в современной технологии изготовления изделий микроэлектроники занимает фотолитография.

Фотолитография (оптическая литография) - процесс избирательного травления поверхностного слоя с использованием защитной *фотомаски*.

2.2. Основы фотолитографии.

Основными составляющими процесса фотолитографии, определяющими её уровень, являются фоторезист, фотошаблон и конкретная схема реализации технологического процесса, связанная с техническими характеристиками используемого оборудования.

Схема установки фотолитографии.

Упрощенная оптическая схема установки для фотолитографии показана на рис.2.1. Ртутная лампа (ДРШ-350, например) помещается внутри металлического водоохлаждаемого

корпуса с эллиптическим отражателем (1). Свет от лампы проходит сквозь блок растров (5), отражается зеркалами (3) и фокусируется конденсорной линзой (6) на шаблоне с подложкой (7). Затвор (4) служит для регулирования времени экспонирования.

В качестве источника излучения используют ртутные лампы, характеризующиеся высокой интенсивностью излучения, параллельностью светового пучка и его равномерностью.

Спектр излучения этих источников лежит в трех основных спектральных диапазонах:

- дальний УФ от 100 до 200-300 нм;
- средний УФ 300-360 нм;
- ближний УФ от 360-450.

Длины волн используемые для экспонирования резистов:

- 365нм.(J линия) Hg;
- 405нм(Н линия) Hg;
- 435нм(G линия) Hg;
- 248нм-KrF, 13нм-Xe (разрешение 10нм);
- 198нм-ArF, 157нм-F2.

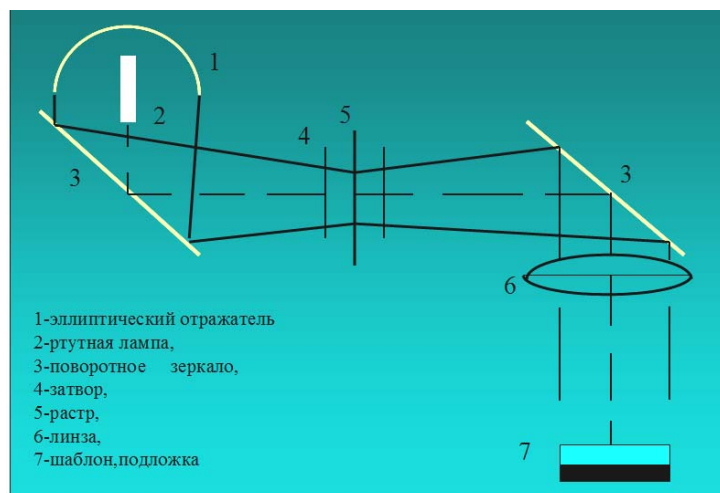


Рис. 2.1. Оптическая схема установки совмещения и экспонирования.

Очень важно обеспечить параллельность светового пучка, для чего используют конденсорные линзы.

Размер изображения и свойства резистивной маски определяются и ограничиваются следующими основными физическими свойствами света и всей проекционной системы:

- когерентность;
- дифракция;
- интерференция;
- астигматизм;

- хроматические аберрации.

2.3. Контактный, бесконтактный и проекционный способы фотолитографии.

Различают контактный, бесконтактный и проекционный способы фотолитографии (см. рис. 2.2).

1. **При контактном способе** фотошаблон и пластина с нанесенным фоторезистом соприкасаются. Пластина устанавливается на вакуумном держателе, который поднимает ее до тех пор, пока пластина и шаблон не придут в соприкосновение друг с другом. Чтобы провести совмещение топологического рисунка фотошаблона с предыдущим, топологическим рисунком, шаблон и пластину разводят на 25 мкм, а пару объективов с сильным увеличением помещают сзади от шаблона для одновременного наблюдения рисунков шаблона и пластины из двух точек. Объективы принадлежат микроскопу с разведенным полем зрения, так что правый глаз видит точку на правой стороне шаблона и пластины, а левый - точку слева. Шаблон и пластину совмещают механическим перемещением и вращением вакуумного держателя (столика) до совпадения топологических рисунков шаблона и пластины. В этом положении пластина приводится в соприкосновение с шаблоном и проводится еще одна проверка на точность совмещения. При экспонировании микроскоп автоматически отводится, и луч ультрафиолетового (УФ) облучения освещает весь шаблон в течение определенного времени экспонирования. Время экспонирования подбирают экспериментально, обычно в пределах 15-20 с.

Интенсивность экспонирования на поверхность пластины, умноженная на время экспонирования, дает энергию экспонирования или дозу облучения, получаемого резистом.

Вследствие тесного контакта между резистом и шаблоном при контактной печати значения разрешения (~ 0.1 мкм) выше, чем при использовании других методов литографии.

Некоторые недостатки этого метода заключаются в следующем. Реальная поверхность пластины не является абсолютно ровной, поэтому между ней и фотошаблоном существуют микро - зазоры, толщина которых по поверхности изменяется случайным образом. Наличие зазора приводит к тому, что размеры и форма элементов искажаются из-за расходимости светового пучка. Поскольку плотный контакт между пластиной и фотошаблоном невозможен, воздушные зазоры приводят к появлению дифракционных эффектов и увеличению размеров изображения.

Этому же способствуют дифракция света на краях элементов, рассеяние света в толще фоторезиста и многократное отражение от контактирующих поверхностей, приводящее к тому, что свет заходит в область геометрической тени. К искажению рисунка слоя приводят механические и температурные деформации пластины, вызывающие смещение рисунков различных топологических слоев.

Проблемы, возникающие при контактной печати, связаны также с изнашиванием фотошаблона при его многократном использовании. Соприкосновение фотошаблона с резистом приводит к возникновению дефектов на нем, и к накоплению дефектов и частиц фоторезиста, прилипающих к фотошаблону при многократном экспонировании. Кремниевая пылинки на пластине может привести к повреждению поверхности шаблона в момент его соприкосновения с пластиной. Поврежденный участок шаблона затем воспроизводится как дефектный топологический рисунок на всех других пластинах, при экспонировании которых использован этот шаблон. Каждая пластина добавляет свои собственные повреждения поверхности шаблона.

Если при изготовлении ИМС не обеспечивается необходимая чистота процесса и окружающей среды, то лишь некоторые элементы схем не будут иметь дефектов. Для

обеспечения высокого выхода годных изделий плотность дефектов (число дефектов на 1 см^2) должна быть минимальна для каждого процесса литографического переноса.

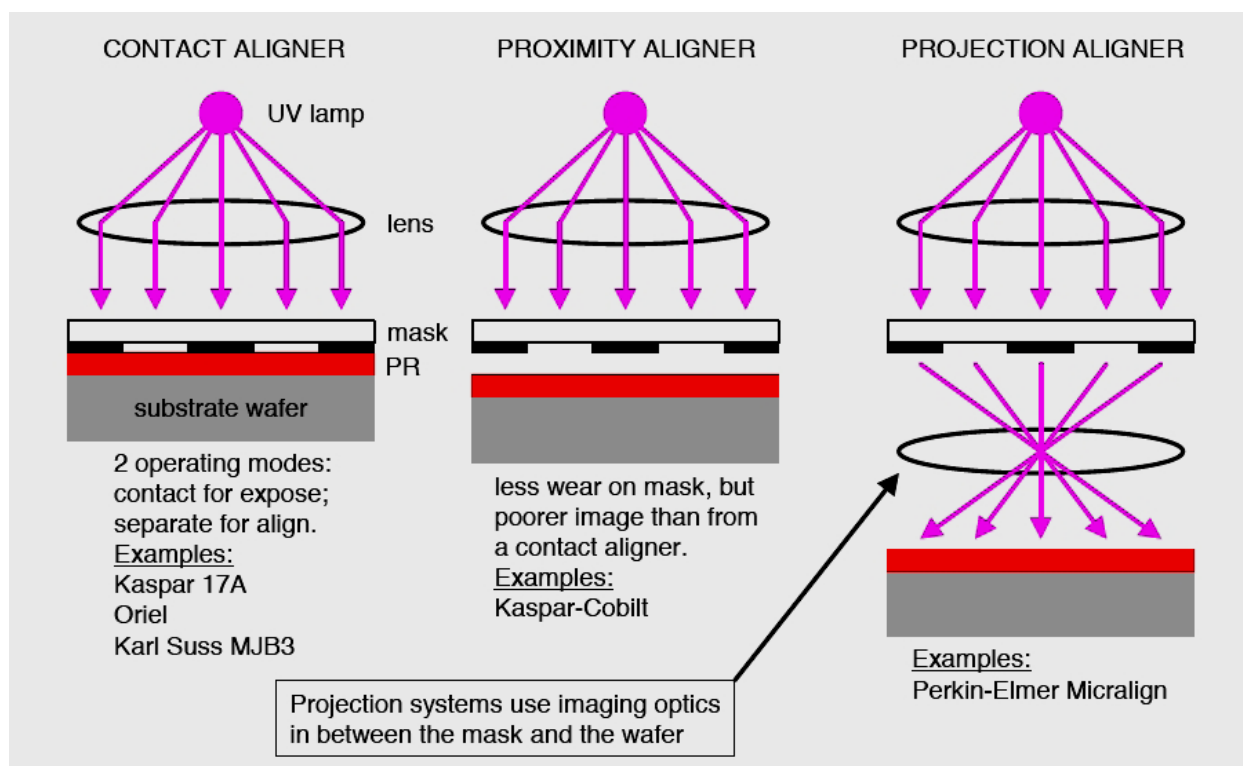


Рис 2.2. Типы проекций.

Слева - контактная печать. При контактной печати пластина кремния, покрытая резистом, находится в непосредственном физическом контакте со стеклянным фотошаблоном.

В центре - бесконтактная печать. Во время экспонирования между кремниевой пластиной и шаблоном поддерживается небольшой зазор шириной 10-25 мкм.

Справа - проекционная печать. Изображение топологического рисунка шаблона проецируется на кремниевую пластинку, на расстоянии нескольких сантиметров от шаблона.

Интерференция проходящего через слой фоторезиста светового потока и его отражения от границы с подложкой, а также рассеяние света, создают нерезкую зону по краю изображения, которая после проявления даёт "ореол", что ухудшает контрастность и изменяет геометрические размеры рисунка. Для ослабления этого эффекта применяют антиотражающие покрытия, например, плёнки оксида хрома, которые осаждают на поверхность пластины перед нанесением фоторезиста.

2. Метод бесконтактного экспонирования схож с методом контактной печати, за исключением того, что во время экспонирования между пластиной и шаблоном поддерживается небольшой зазор шириной 10-25 мкм. Этот зазор уменьшает возможность повреждения поверхности шаблона. Однако дифракция света уменьшает разрешающую способность и ухудшает четкость изображения. При бесконтактной печати величина разрешения составляет 2-4 мкм.

3. При проекционном способе фотолитографии контакта фотошаблона с подложкой нет, что исключает возможные его повреждения. Кроме этого, проекционный метод упрощает

процесс совмещения фотошаблона и позволяет осуществить совмещение точнее, чем при использовании контактного метода.

Проекционную фотолитографию можно осуществить одновременной передачей всех элементов топологического слоя на пластину, поэлементным (шаговым) проецированием отдельных фрагментов или модулей на пластину, вычерчиванием рисунка в слое фоторезиста подложки при помощи сфокусированного до определенных размеров светового луча, управляемого от компьютера.

Для достижения высокого разрешения отображается только небольшая часть рисунка шаблона. Это небольшая отображаемая область сканируется или перемещается по поверхности пластины. В сканирующих проекционных устройствах печати шаблон и пластина синхронно перемещаются. С помощью этого метода достигается разрешение около 1,5 мкм для ширины линий и расстояния между ними.

Проекционные устройства печати, в которых изображение на шаблоне перемещается над поверхностью пластины, называют системами с непосредственным перемещением по пластине или фотостампами. При использовании этих устройств печати шаблон содержит топологию одного кристалла большого размера или нескольких кристаллов малых размеров, которые увеличены в несколько раз (до десяти). Изображение этой топологии или структуры уменьшается и проецируется на поверхность пластины. После экспонирования одного элемента кристалла пластина сдвигается или перемещается на столике с интерферометрическим управлением по осям ХУ к следующему элементу одного кристалла, и процесс повторяется. С помощью уменьшающих проекционных фотостампов можно получить разрешение ~1 мкм.

В большинстве современных проекционных систем печати оптические элементы являются достаточно совершенными, и их характеристики точности отображения ограничены дифракционными эффектами, а не аберрацией линз. Эти устройства печати называют системами с дифракционным ограничением.

2.4. Фотошаблоны. Реперные знаки.

Фотошаблон – стеклянная пластина (подложка) с нанесенным на ее поверхность маскирующим слоем – покрытием, образующим трафарет с прозрачными и непрозрачными для оптического излучения участками. В процессе *фотолитографии* слой *фоторезиста* экспонируется в соответствии с рисунком покрытия, имеющегося на фотошаблоне. Подложку фотошаблона выполняют из стекла. В качестве материала маскирующего (непрозрачного) слоя фотошаблона обычно используются вещества, образующие твердые износостойкие покрытия. Это - серебряная эмульсия, обработанный ионами резист, оксид железа, германий, хром или его оксид, оксид европия и другие.

К фотошаблонам предъявляется комплекс требований, в первую очередь, следующие:

- высокая оптическая плотность маскирующего материала;
- толщина маскирующего материала – не более 100 нм; его отражательная способность - не выше 15%;
- высокая разрешающая способность;
- точность воспроизведения всех размеров рисунка;
- неплоскостность (допускается от нескольких мкм до десятков мкм для разных классов фотошаблонов);
- малая микродефектность, стойкость к истиранию.

При плохом контакте пластины и фотошаблона, т.е. при наличии зазора, возникает дифракция, которая и искажает размеры экспонируемой области. К искажению геометрических размеров рисунка могут привести также неправильно подобранные режимы экспонирования и проявления. К дефектам шаблона относятся - неровный край, разрыв рисунка, царапины, проколы, внедрения. Шаблоны необходимо промывать через каждые 15-20 совмещений в деионизованной воде с последующей сушкой.

В настоящее время оригиналы фотошаблонов изготавливаются методом электронной литографии.

Совмещение и экспонирование. Реперные знаки.

В процессе изготовления кристалла ИМС фотолитография повторяется многократно, и необходимо каждый раз осуществлять совмещение рисунков топологии ИМС. 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. Для совмещения используют сложные оптико-механические комплексы, позволяющие осуществлять совмещение визуально, вручную и автоматически. В первом случае сначала проводят совмещение визуально (так называемое грубое совмещение), а затем точное совмещение по реперным знакам с точностью в пределах 1 мкм. Автоматизированный способ совмещения обеспечивает точность совмещения до 0,1 мкм. Оптическая система обеспечивает общий обзор при увеличении $\times 40 - 80$ и точное совмещение при $\times 100 - 400$.

После каждой операции фотолитографии реперные знаки переносятся на пластину. При каждой последующей операции реперные знаки, имеющиеся на используемом в данный момент фотошаблоне, совмещаются с реперными знаками на пластине. Например, на рис. 2.3 показано, как совмещены 1-й знак совмещения на подложке (черный квадрат на светлом (зеленом) поле) и 2-й знак на фотошаблоне (желтый квадрат).

Для точного совмещения используют специальные знаки совмещения с контролируемым зазором, которые входят в состав топологических рисунков соответствующих слоёв.

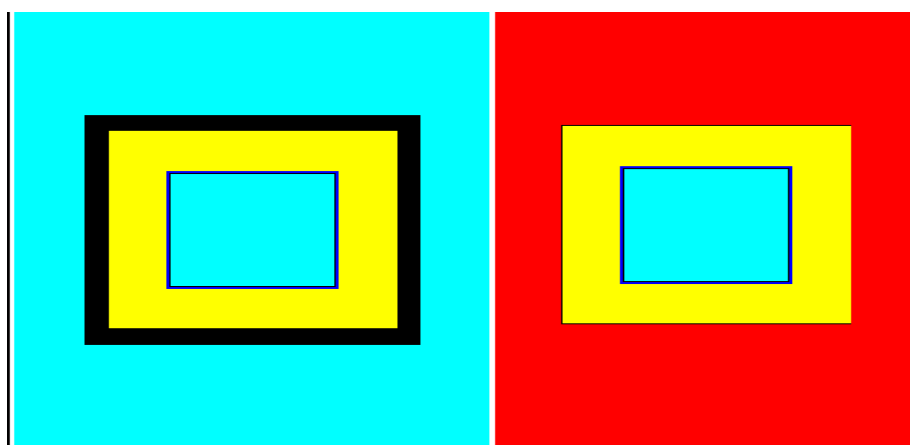


Рис. 2.3. Общий вид реперных знаков при совмещении.

Совмещение считается выполненным, если при введении одного знака внутри другого по всему контуру просматривается зазор (см. рис. 2.3). После выполнения совмещения микроскоп отводится, а на его место подводится осветитель (ртутная лампа), жёстко

связанный с микроскопом на каретке (или поворотной турели). Оператор включает осветитель одновременно с реле времени, которое контролирует время экспонирования.

2.5. Свойства резистов. Фоторезисты.

Условно структуру фоторезиста можно представить как R1-O-R2, где R1 и R2 – светочувствительная и полимерная составляющие части фоторезиста соответственно (фрагменты органических молекул), а О - соединяющий их атом кислорода (такие органические соединения называются простыми эфирами).

Основными критериями, которые необходимо принимать во внимание при выборе и использовании любых резистов в технологии ИМС, являются (свето-) чувствительность, разрешающая способность, кислотостойкость и плазмостойкость, адгезия, дефектность, высокая контрастность.

1. Важной характеристикой резистов является **чувствительность**. Чувствительностью резиста называют заряд, который необходимо передать участку этого резиста для его полного проявления за приемлемое время (обычно за 1 - 2 минуты).

Фоторезист содержит светочувствительное вещество, поглощающее УФ свет с длинами волн из определенного интервала. Определить этот интервал можно, по спектрам поглощения фоторезиста. Областью поглощения резиста является область длин волн, в которой оптическая плотность резистной пленки не менее 0.2. Указанная область называется *областью спектральной чувствительности фоторезиста*.

Кроме того, иногда говорят также об интегральной светочувствительности фоторезиста. Она определяется как светочувствительность фоторезиста при воздействии света всех длин волн, поглощаемых фоторезистом.

Зная светочувствительность фоторезиста (~ 100 мДж/см²) и освещенность, можно определить примерное время экспонирования для данного типа фоторезиста. Интенсивность ртутных ламп $\sim 300-500$ мВт/см². Точное время экспонирования устанавливается экспериментально и составляет от 10-20 сек. до нескольких минут.

Фирмы – изготовители резистов обычно с большим разбросом сообщают чувствительность резистов для определенных составов проявителей, условий проявления и энергий. Каждый пользователь экспериментально подбирает дозу более точно для своих конкретных условий.

2. Следующим важным свойством резистов является их **разрешающая способность**. Разрешающая способность фоторезиста определяется числом линий равной толщины, которые могут быть получены без слияния на 1 мм поверхности подложки в результате проведения процесса фотолитографии. Предельное значение разрешающей способности определяется размерами полимерных молекул фоторезиста. Разрешающая способность фоторезиста также зависит от минимальной толщины плёнки фоторезиста, способной выдержать воздействие агрессивной среды. Отношение толщины плёнки к минимальной ширине линий для лучших негативных фоторезистов составляет 1:2-1:3, а для позитивных – 1:1. Для получения линий минимальной ширины толщину резиста тоже надо учитывать. Лучшая разрешающая способность позитивных фоторезистов позволяет использовать их при изготовлении сверх больших ИМС. На разрешающую способность оказывают существенное влияние как процессы экспонирования и связанные с ними оптические явления в системе «фотошаблон - фоторезист - подложка», так и процессы проявления и сушки. К оптическим явлениям, оказывающим влияние на разрешающую способность фоторезистов, следует отнести дифракцию света на границе фото-шаблон – фоторезист, отражение света от поверхности подложки и рассеяние света в слое фоторезиста.

Стабильность геометрических размеров элементов рельефа рисунка в слое фоторезиста в сильной степени зависит от условий проведения процессов проявления и сушки. Перепроявление приводит к увеличению размеров элементов (особенно для позитивных фоторезистов), а неоптимальные режимы сушки могут приводить к короблению слоя фоторезиста и его отслаиванию.

Следует различать разрешающую способность фоторезиста и разрешающую способность процесса литографии с использованием этого резиста. На практике необходимо ориентироваться на разрешающую способность фотолитографического процесса.

3. Под **кислотостойкостью** фоторезистов понимают способность фоторезистивного слоя после экспонирования, проявления и сушки селективно защищать поверхность подложки от воздействия кислотных и щелочных травителей (на основе азотной, плавиковой, соляной и других кислот). Критерием кислотостойкости служит величина краевого и локального растравливания. Её обычно оценивают по величине клина, образующегося на краю плёнки после травления. Критерием кислотостойкости являются также время, в течение которого травитель воздействует на фоторезистивный слой до начала его разрушения или отслаивания, и качество полученных структур в подложке после травления. Кислотостойкость фоторезистов часто характеризуют плотностью дефектов (количеством дефектов на единице поверхности), передающихся на подложку при травлении ее поверхности, покрытой маской из фоторезиста.

Стойкость фоторезиста к химическим воздействиям зависит не только от состава, но и толщины и состояния резистной маски. Стойкость фоторезиста к травлению оценивают при помощи фактора травления **K**:

$$K = h / x , \quad (2.1)$$

где **h** – глубина травления; **x** – боковое расстравливание. Чем меньше боковое расстравливание при заданной глубине травления, тем выше кислотостойкость фоторезиста. Боковое подтравливание часто характеризуют клином травления.

4. В связи с использованием методов сухого газофазного травления материала подложки важной характеристикой фоторезиста является **плазмостойкость** или стойкость к воздействию газовой плазмы. Поскольку имеется несколько альтернативных составов плазмообразующих газов для травления для того или иного материала микроэлектроники, необходимо конкретизировать, стойкость по отношению к какой плазме рассматривается. Если речь идет о травлении во фторсодержащих плазмах, то для характеристики плазмостойкости обычно используют относительную скорость травления материала фоторезиста по отношению к скорости травления диоксида кремния, SiO₂. Если речь идет о травлении полимерных слоев, то в качестве меры плазмостойкости чаще всего используют отношение скорости травления материала к скорости травления полистирола в кислород содержащих плазмах.

5. Следующим важным свойством резиста является его **адгезия**. В приложении к фотолитографии **адгезия** – это способность слоя фоторезиста препятствовать проникновению травителя к подложке по периметру создаваемой резистной маски.

Адгезию фоторезистного слоя определяют как время отрыва слоя фоторезиста заданных размеров от подложки в ламинарном потоке растворителя. Адгезия считается удовлетворительной, если слой резиста 20 x 20 мкм² отрывается за 20 мин.

6. Чрезвычайно важным свойством фоторезиста служит **дефектность** сформированной из него маски. Под дефектностью понимается количество микроскопических дефектов пленки,

проявляющих себя на последующих технологических стадиях обработки подложек через резистивную маску. Обычно дефектность выражают в $[1/\text{см}^2]$.

Появление проколов в плёнке фоторезиста связано с некачественным или изношенным фотошаблоном, различного рода загрязнениями, плохой смачиваемостью поверхности пластины. Как правило, при травлении проколы переходят в окисный защитный слой и являются "паразитными" областями локальной диффузии примесей, что может привести к закорачиванию слоев.

Методы снижения дефектов в резисте:

- использование более толстого или двухслойного резиста;
- чистка поверхности пластины перед нанесением;
- покрытие шаблонов противoadгезивным слоем;
- фильтровка резиста;
- сушка при более высокой температуре;
- предотвращение утоньшения резиста при проявлении.

7. Величиной, тесно связанной с разрешающей способностью, является **контраст** фоторезиста. Контраст можно назвать мерой разрешающей способности фоторезиста. Для того, чтобы обеспечить высокую разрешающую способность, фоторезист должен иметь большую величину контраста, такую, чтобы отраженный от подложки или появившийся благодаря дифракционным эффектам свет не влиял на формирование фоторезистной маски. От контраста зависит прежде всего профиль формируемой фоторезистной маски; в меньшей степени от него зависят размеры критических элементов сформированных фоторезистных масок.

Для улучшения контрастности после операции экспонирования до проявления фоторезист сушат, чем достигается его однородная плотность. Кроме этого, возможно применение антиотражающих покрытий на подложке для исключения внутреннего отражения в плёнке фоторезиста. Это явление возникает из-за того, что отражённый поток интерферирует с проходящим светом, вызывая дополнительную засветку в местах, защищённых непрозрачными участками фотошаблона. В результате образуется так называемый "ореол", вызывающий нерезкость и неровность края изображения.

Использование фоторезистов в конкретных технологических процессах налагает на них дополнительные требования. Представляется чрезвычайно важным подчеркнуть, что подбор фоторезиста должен производиться непосредственно под конкретную технологию. Для этого необходимо выбрать определенные физико-химические характеристики фоторезистов, так называемые критические характеристики, знание которых позволит с большой вероятностью определить возможность и эффективность использования фоторезиста и/или фотолитографического процесса в разрабатываемой технологии.

Для успешной работы с тем или иным фоторезистом и эффективного применения какого-либо литографического процесса в технологии изготовления изделий микроэлектроники необходимо, прежде всего, иметь представление о физико-химических механизмах процессов, протекающих на каждой из стадий фотолитографического процесса. Именно эти знания должны служить научной основой разработки и поддержания в рабочем состоянии фотолитографических процессов и фоторезистов.

Позитивные фоторезисты.

Фоторезисты на основе системы *орто*-нафтохинондиазид-новолачные смолы (НХД/НС) являются "рабочей лошадкой" в микроэлектронной промышленности. Их можно использовать для экспонирования УФ светом с различными длинами волн, например,

соответствующих I- (365 нм) и G- (436 нм) линиям ртутно-кварцевых ламп и даже светом с длиной волны 248 нм. Несмотря на то, что из соображений повышения эффективности производства при экспонировании излучением 248 нм чаще всего используют фоторезисты с химическим усилением, фоторезистная система НХД/НС продолжает использоваться. Кроме того, фоторезисты этого класса используются в технологии толстых пленок для получения магнитных головок, имеющих малые размеры, микропереключателей, планарных микромоторов, микроиндуктивных элементов, планарных СВЧ-устройств и т.п. Фоторезисты на основе системы НХД/НС обычно содержат в своем составе *орто*-нафтохинондиазидное (2-диазо-1(2Н)-нафталенон-5-сульфонатное) производное иноволачный полимер, растворенные в подходящем растворителе (диглиме, реже – диоксане). Полимерная основа фоторезиста – новолачная смола придает ему такие важные свойства, как хорошее пленкообразование, отличную адгезию, удовлетворительную стойкость к действию кислородной плазмы.

Особенности проявления фоторезистов.

Характер и условия проявления фоторезиста зависят от его вида и условий предварительной сушки и экспонирования. Проявление позитивных фоторезистов связано с удалением облучённых участков при обработке в сильно разбавленных растворах щелочей КОН и NaOH (0,1-10 массовых % в H₂O) или 1-2 массовых % в растворе тринатрийфосфата (Na₃PO₄). Проявление негативных фоторезистов – простое растворение необлучённых участков в органических растворителях (толуол, диоксан, хлорбензол, трихлорэтилен и другие). Особенностью проявления позитивных фоторезистов по сравнению с проявлением негативных является отсутствие набухания необлучённых участков. Поэтому они имеют большую разрешающую способность и меньшую зависимость её от толщины плёнки фоторезиста.

Кроме химических методов, используют также плазмохимическую обработку поверхности кислородной плазмой.

Негативные фоторезисты.

Механизмом получения резистного изображения в негативных фоторезистах на основе системы полимеров является фотосшивание макромолекул.

Негативные фоторезисты обладают по сравнению с позитивными фоторезистами рядом преимуществ. Среди них следует отметить следующие:

1. Большая технологическая широта, т.е. возможность широкого выбора технологических параметров, при которых получают резистные маски хорошего качества.
2. Нечувствительность к перепроявлению.
3. Хорошая адгезия и стойкость к жидкостному травлению.
4. Способность к "самокоррекции"- размеры неэкспонированных участков можно подкорректировать в требуемом направлении за счет подтравливания при последующем изотропном жидкостном травлении.
5. Широкий выбор компонентов фоторезистных композиций и составов проявителей.

Наиболее серьезными недостатками негативных резистов являются следующие:

1. Разрешающая способность ограничена толщиной фоторезистной пленки. Существует эмпирическое правило, согласно которому типичные критические размеры получаемых фотолитографическим методом элементов будут не менее утроенной толщины фоторезистного слоя.

2. Кислород очень сильно ингибирует процесс образования резистных масок из негативных резистов.
3. Негативные резисты очень трудно использовать для "взрывной фотолитографии".

Наиболее часто в настоящее время используются фоторезисты серии MICROPOSIT S1800. Получаемые из них пленки характеризуются:

- отсутствием механических напряжений;
- отличной адгезией;
- высокой однородностью.

Эти фоторезисты оптимизированы для экспонирования излучением G-линии ртутной лампы (436 нм). Они хорошо зарекомендовали себя при экспонировании излучением с широким спектром. Для проявления резистной маски рекомендуется пользоваться проявителем MICROPOSIT MF-319, не содержащим ионов металла.

Резистная маска удаляется без остатка при использовании стандартных растворов для удаления (MICROPOSIT REMOVER).

2.6. Предельные возможности фотолитографии.

Известно, что ограничением получения минимальных размеров с помощью фотолитографии служит дифракция света. Минимальный размер определяется длиной волны используемого света. Длина волны видимого света $\lambda=0,35 - 0,7$ мкм; ультрафиолетового излучения (УФ) – $0,1 - 0,3$ мкм. В случае контактной печати (фотошаблон накладывается непосредственно на слой фоторезиста) разрешающая способность $\Delta x \approx 2\lambda$. Таким образом, использование УФ позволяет получить с помощью фотолитографии минимальный размер $\sim 0,1-0,2$ мкм.

Одна из новых технологий, названная **EUV** (Extreme Ultra Violet) и объединившая вокруг себя несколько известных компаний, нацелена на улучшение процесса фотолитографии при производстве микросхем.

Установки для шагового мультиплицирования на пластину с применением глубокого ультрафиолетового излучения (Deep Ultra Violet, **DUV**) - машины, которые печатают схемы на кремниевых подложках, используют источники света с длиной волны 248 нм. Длина волны EUV-излучения около 13 нм, т. е. примерно в 20 раз меньше. Переход с DUV- на EUV-литографию обеспечивает более чем 10 - кратное уменьшение длины волны и переход в диапазон, где она сопоставима с размерами всего нескольких десятков атомов. Применяемая сейчас литографическая технология позволяет наносить шаблон с минимальной шириной проводников 0,1 мкм, в то время как EUV-литография делает возможной печать линий гораздо меньшей ширины - до 0,03 мкм. Управлять ультракоротким излучением не так просто. Поскольку EUV-излучение хорошо поглощается стеклом, новая технология предполагает использование серии из четырех специальных выпуклых зеркал, которые уменьшают и фокусируют изображение, полученное после применения маски. Чтобы сделать EUV-технологии доступной для широкого использования, предстоит еще многое в ней усовершенствовать.

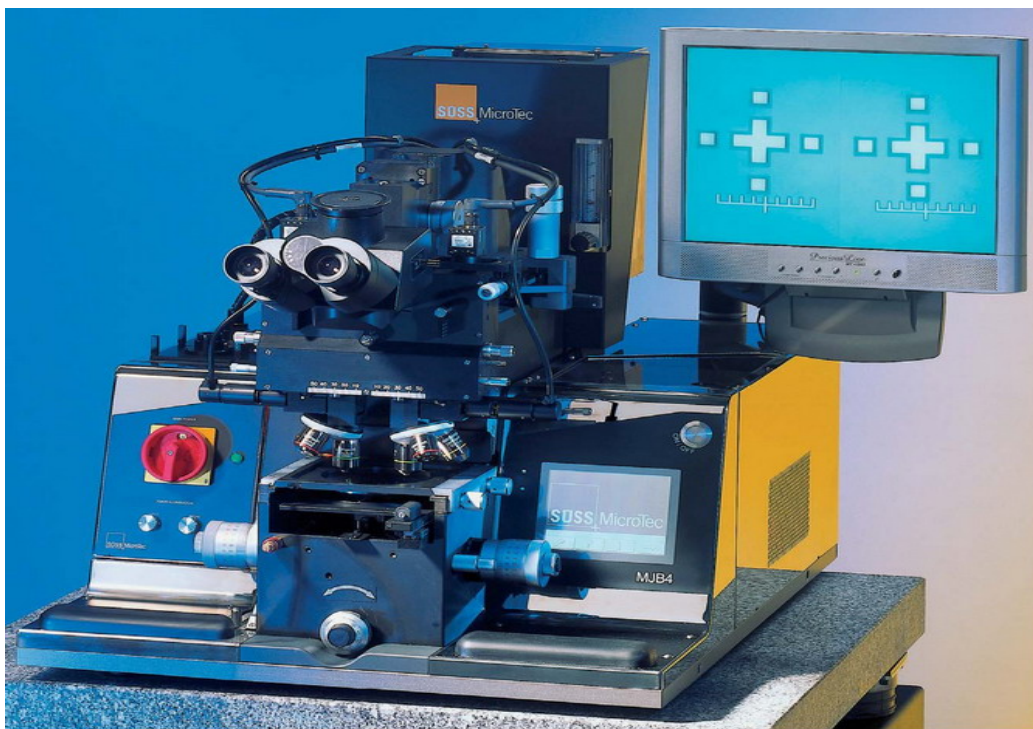


Рис.2.4. Современная установка фотолитографии MJV 4.

Современная установка экспонирования и совмещения MJV 4, имеющаяся в ИФТТ, состоит из основных узлов: оптической системы (микроскопа), механизма совмещения и источника ультрафиолетового излучения.

Никакие другие системы экспонирования не могут соперничать с оптическими системами в производительности и высокой стабильности шаблонов. Существует ряд приборов, которые могут быть изготовлены только с помощью УФ литографии, поскольку применение высокоэнергетичных электронных пучков или рентгеновских лучей может нанести этим приборам необратимые повреждения. Фотолитография, как таковая, останется основным инструментом при массовом производстве ИМС.

Внутренние и взаимные эффекты близости являются главными проблемами систем фотолитографии. Дифракционные и интерференционные эффекты искажают структуры, воспроизводимые поверх уже сформированного рельефа. Проблема поверхностного переноса изображения заключается в том, что нужно сделать толщину резистного слоя всего несколько нанометров. Резисты, обладающие высокой чувствительностью (порядка 1 мДж/см²), позволяют применять метод экспонирования типа “вспышка на лету”.

3. Электронная литография.

3.1. Введение.

Электронно-лучевая литография (ЭЛ) - метод изготовления субмикронных и наноразмерных топологических элементов посредством экспонирования электронным лучом электрически чувствительных поверхностей. Метод схож с фотолитографией, но использует электроны вместо фотонов. В настоящее время электронная литография осваивает размеры из интервала 0.04 - 0.08 мкм.

Основные элементы сканирующих систем экспонирования – электронные пучки появились в 60-х годах прошлого века и стали использоваться для записи телевизионного изображения в электроннолучевых трубках.

Первые действующие приборы были созданы в 1939 (Арденне) и в 1942 (Зворыкин) годах. Однако широкое использование растровых электронных микроскопов (РЭМ) в науке и технике стало возможно лишь в 70-е годы, когда появились высоконадежные приборы, созданные на основе достижений микроэлектроники и вычислительной техники.

В 1942 году русский физик и инженер Владимир Зворыкин, работавший в то время в лаборатории Radio Corporation of America в Принстоне (США), опубликовал сообщение о первом сканирующем электронном микроскопе, позволяющем проанализировать не только тонкий образец на просвет, но и поверхность массивного образца. Электронная пушка с вольфрамовым катодом эмитировала электроны, которые затем ускорялись напряжением 10 киловольт. В 1948 году Дэннис МакМиллан и Чарльзом Отли построили первый РЭМ (SEM или Scanning Electron Microscope), и в 1952 году этот инструмент достиг разрешения 50 нанометров и, что наиболее важно, обеспечил трехмерный эффект воспроизведения рельефа образца — характерную особенность всех современных РЭМ. В 1960 году Томас Эверхарт и Ричард Торнли, изобретя новый детектор («детектор Эверхарта-Торнли»), ускорили развитие растрового электронного микроскопа. Этот детектор, крайне эффективный для сбора как вторичных, так и отражённых электронов, очень популярен и встречается сейчас на многих РЭМ. Работы, которые велись в Кембриджском университете группой Чарльза Отли в 60-е годы, весьма способствовали развитию РЭМ, и в 1965 году фирмой «Cambridge Instrument Co.» был выпущен первый коммерческий сканирующий электронный микроскоп - Stereoscan.

Вскоре электронно-лучевое экспонирование стали использовать для получения фотошаблонов и экспонирования резистов.

Главные элементы экспонирующей ЭЛ системы - источник электронов, системы фокусировки и бланкирования луча, устройство контроля совмещения и отклонения, электромеханический стол и компьютерный интерфейс.

1. Блок бланкирования электростатического либо электронно-магнитного типа, который “выключает” электронный луч, отклоняя его за пределы отверстия коллимирующей диафрагмы.
2. Блок отклонения - либо совмещенный с оконечной линзой, либо помещенный после нее. Блоки отклонения делятся на электронно - статические и электронно- магнитные, но предпочтение обычно отдается последним (по причинам меньших aberrаций и лучшей защищенности от влияния поверхностного заряда).
3. Блок динамической фокусировки, корректирующий aberrации, вносимые отклонением луча от оптической оси системы.
4. Система детектирования электронов, сигнализирующая об обнаружении меток совмещения и других деталей рельефа мишени.
5. Прецизионный рабочий стол с механическим приводом, обеспечивающим обработку всей пластины.
6. Вакуумная система.

3.2. Оборудование для электроннолучевого экспонирования.

Принцип работы и основные характеристики электронного микроскопа.

Растровый электронный микроскоп (РЭМ, или англ. *Scanning Electron Microscope, SEM*) - прибор предназначенный для получения изображения поверхности объекта с высоким (несколько нанометров) пространственным разрешением (благодаря использованию вместо светового потока - пучка электронов с энергиями 30÷200 кЭв и

более), а также для информации о составе, строении и некоторых других свойствах приповерхностных слоёв. Разрешающая способность электронного микроскопа в $1000 \div 10000$ раз превосходит разрешение светового микроскопа и для лучших современных приборов может составлять несколько ангстрем. Для научных исследований в микроэлектронике обычно используют электронный микроскоп, переделанный в систему электронной литографии с использованием относительно дешевых аксессуаров. Системы электронной литографии для коммерческого применения очень дорогостоящие.

Электронная литография используется для создания масок для фотолитографии, в производстве штучных компонентов, если требуется нанометровое разрешение, в промышленности и научной деятельности. Здесь рассмотрен сканирующий электронный микроскоп JSM 840, Япония (Рис. 3.1), переделанный в установку для электронной литографии (т.е. дополненный системой компьютерного управления лучом).

Электронный пучок сканирует поверхность электронного резиста, повторяя шаблон, заложенный в управляющий компьютер, и позволяя достигать разрешения 1 нм благодаря более короткой длине волны электронов по сравнению с длиной волны света. Изготовлена специальная электронная плата, совместимая с персональным компьютером, для автоматизации управления лучом электронного микроскопа «JEOL 840» в режиме электронного литографа. Разработано специальное программное обеспечение, контролирующее процесс переноса заданного изображения на тонкопленочные поверхности.

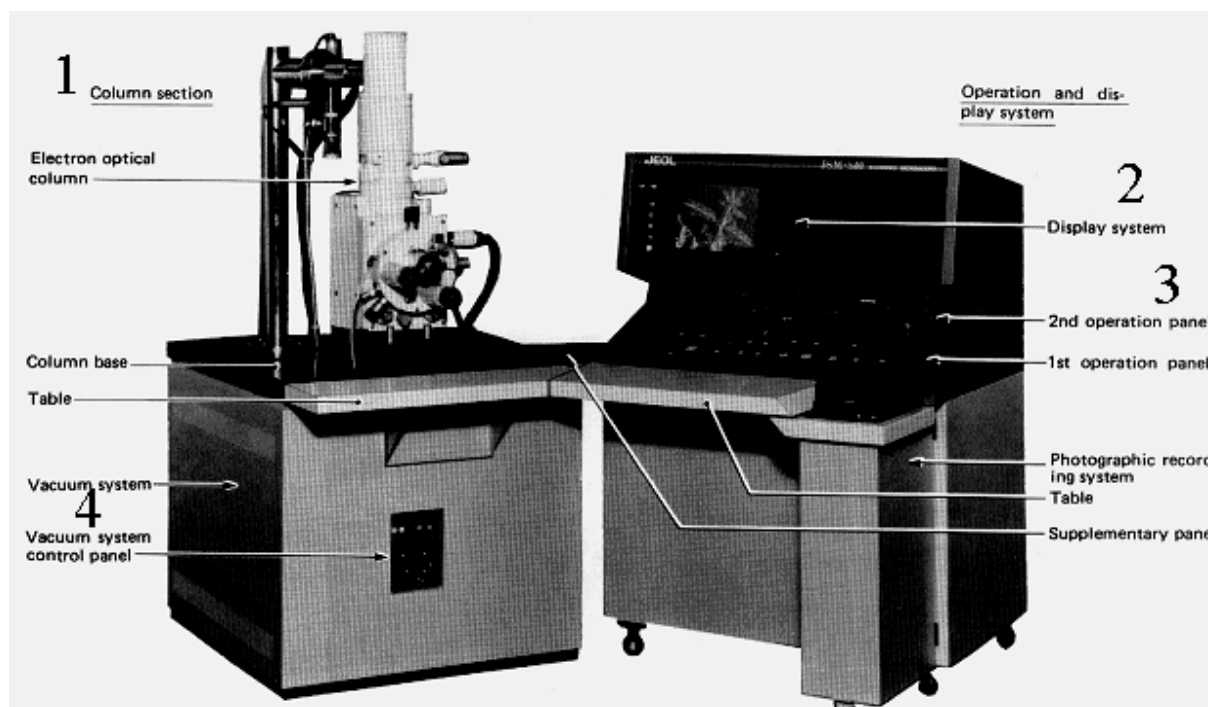


Рис. 3.1. Сканирующий электронный микроскоп JSM-840. Компьютерный интерфейс не показан:

- 1 - колонна;
- 2 - дисплей;
- 3 - панели управления;
- 4 - вакуумная система и панель контроля вакуума.

Данный микроскоп позволяет работать в диапазоне ускоряющих напряжений от 0.2 до 40 кВ при токах электронного пучка от 10^{-6} до 10^{-12} А, увеличение – $\times 10 - 300\,000$. Наблюдение – во вторично - отраженных электронах.

Разрешающая способность микроскопа согласно паспортным данным – десятки нанометров при ускоряющем напряжении 35 кВ.

Разрешающая способность микроскопа – способность давать раздельное изображение точек, расположенных в непосредственной близости друг к другу.

Пространственное разрешение сканирующего электронного микроскопа зависит от поперечного размера электронного пучка, который, в свою очередь, зависит от электронно-оптической системы, фокусирующей пучок. Разрешение также ограничено размером области взаимодействия электронного зонда с образцом. Размер электронного зонда и размер области взаимодействия зонда с образцом намного больше расстояния между атомами мишени. Таким образом, разрешение сканирующего электронного микроскопа недостаточно для отображения атомных плоскостей и даже отдельных атомов, в отличие от разрешения современных просвечивающих микроскопов. В световой оптике предел разрешения равен половине длины волны (500 нм) используемого в оптическом микроскопе излучения, т.е. около 250 нм. Разрешение электронного микроскопа достигает 0,1 нм. Длина волны электронов при энергии электронов 100 кэВ равна 0,001 нм, но столь высокое разрешение не удастся получить из-за наличия некорректируемых aberrаций электронной оптики и рассеяния электронов в подложке и резисте (растекания заряда), уширяющего область экспонирования (см. эффекты близости в резисте).

3.3. Формирование электронного луча.

Колонна.

Важным элементом электронного микроскопа является колонна, в которой формируется электронный луч (см. рис.3.2 и 3.3). Колонна состоит из электронной пушки и системы магнитных линз. Линзы служат для создания освещающего пучка с небольшой расходимостью и увеличения изображения. Система, образованная катодом, анодом и нитью накала, называется электронной пушкой.

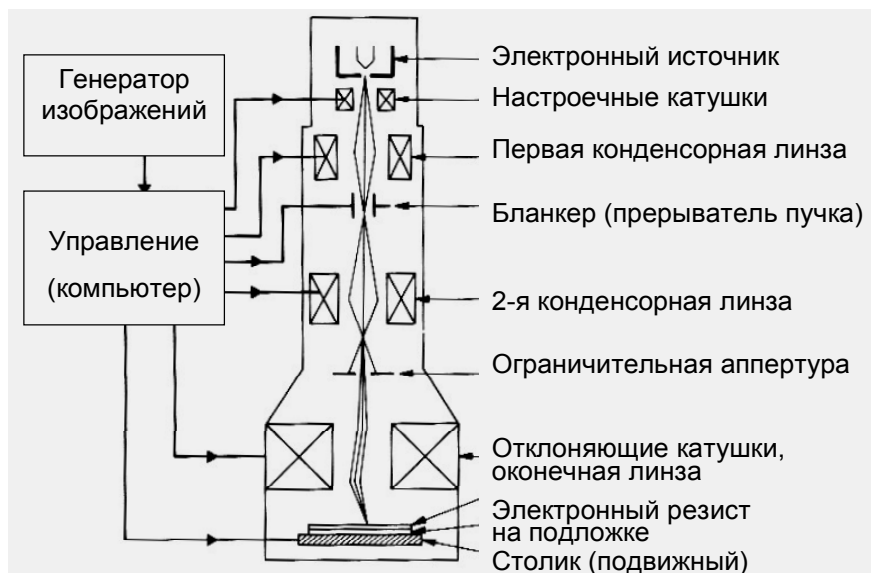


Рис.3.2. Схема колонны электронного микроскопа, в которой формируется электронный пучок.

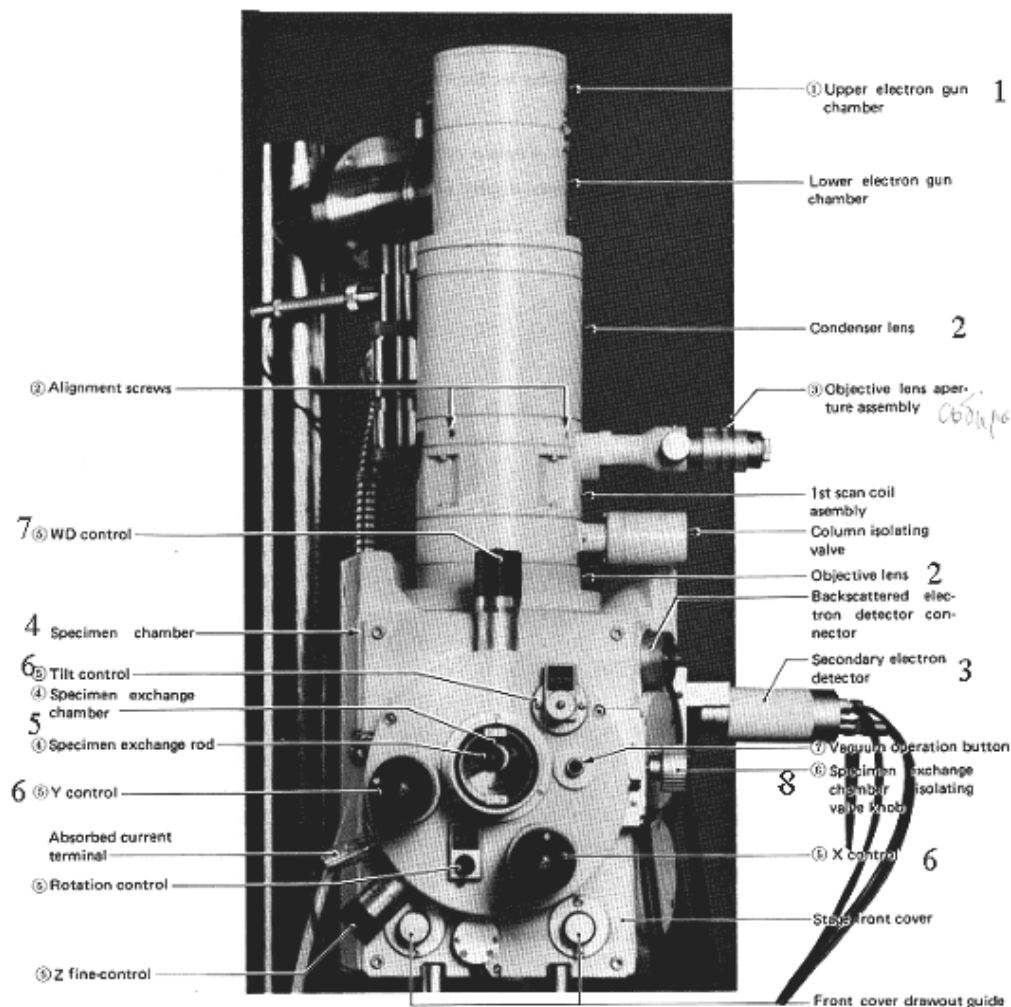


Рис.3.3. Общий вид колонны. В нижней части колонны находится камера для образцов.

- 1 - источник электронов - электронная пушка (эмиссионный катод);
- 2 - система фокусировки и бланкирования луча (электромагнитные линзы);
- 3 - детектор вторичных электронов (притягивает вторичные электроны, излученные с поверхности образца, усиливает сигнал и преобразует в видео - сигнал);
- 4 - камера для образцов;
- 5 - отверстие шлюзовой камеры для загрузки столика с образцом;
- 6 - ручки смещения (по координатам x и y) и поворота столика с образцом;
- 7 - ручка перемещения держателя столика с образцом по вертикальной оси (установка фокуса);
- 8 - ручка заслонки между камерой и шлюзом для смены образцов.

Катод.

Для получения электронного пучка используют явление термоэлектронной эмиссии. Источником электронов является катод (рис 3.4) - тонкая нить (W или LaB_6) диаметром 0.1 мм V-образного изгиба. Нить нагревается переменным током до температуры порядка 2700°C и становится источником электронов. Ток электронного пучка зависит от температуры нити.

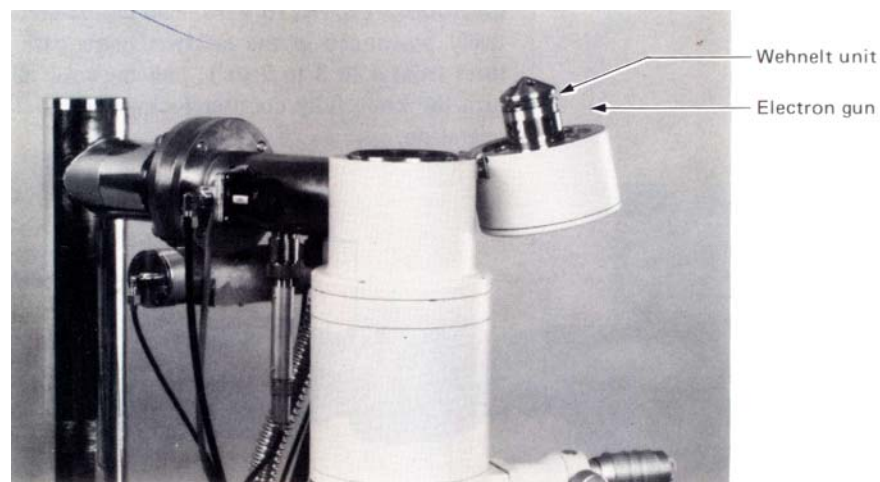
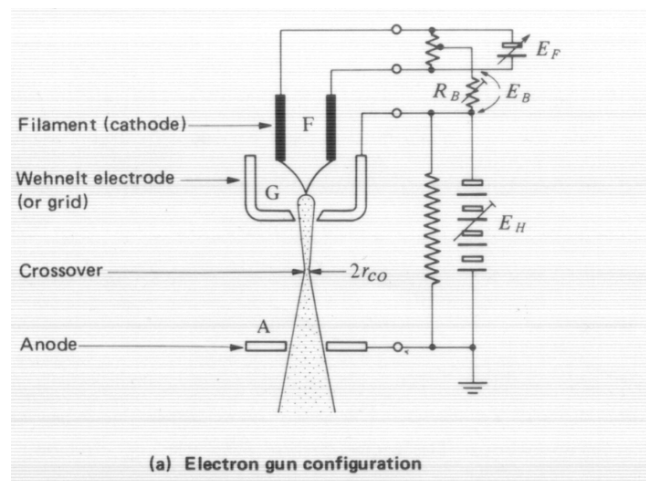


Рис.3.4. Положение катода в держателе в верхней части электронной пушки. Электрическая схема катода (сверху).

Электромагнитные линзы.

В растровом электронном микроскопе хорошо сфокусированный электронный пучок (зонд) развертывают с помощью магнитной или электростатической отклоняющей системы по заданной площади на объекте исследования. Магнитные линзы, фокусирующие электронный луч, являются важными элементами, определяющими размер, форму и плотность тока пучка. Выходя из электронной пушки, пучок попадает в поле конденсорной линзы, которая его фокусирует и направляет на образец. Объективная линза служит для первоначального увеличения изображения. Это очень важная часть микроскопа, так как любые дефекты изображения, появившиеся в объективной линзе, дают большие искажения всего изображения в целом. Для получения большого увеличения фокусное расстояние объективной линзы должно быть как можно короче. Для этого поле должно быть как можно сильнее и ограничено в пространстве. Усиление поля достигается путем увеличения числа витков. Для уменьшения протяженности поля в пространстве используют оболочку – магнитопровод для катушки из ферромагнитного материала. Внутри располагают полюсные наконечники, с малым зазором между полюсами и с отверстием диаметром 4–6 мм для прохода электронов и размещения образца. Этим достигается интенсивное поле в малом объеме. Так как в обмотке большое число витков и сильный ток, то система подвергается нагреву, следовательно, ток через катушку может изменяться со временем. Это может вызвать изменение фокусного расстояния и расфокусировку изображения. Для устранения

влияния хроматической aberrации линз применяют водяное охлаждение и электронную стабилизацию тока в линзах.

Объект располагается в непосредственной близости от фокальной плоскости линзы (рис.3.5).

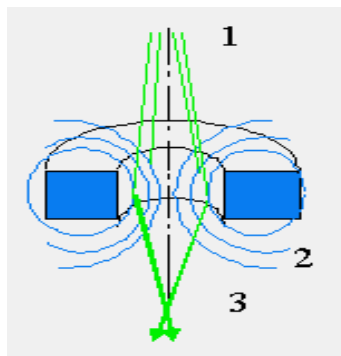


Рис.3.5. Формирование электронного пучка магнитной линзой:

1- пучок электронов;

2- линии магнитного поля катушки;

3- точка фокуса пучка (расположение образца).

Фокусное расстояние линзы f зависит от ускоряющего напряжения V и магнитного потока катушки B в соответствии с соотношением:

$$1/f = (e/m_e 8V) \int B^2(x) dx, \quad (3.1)$$

где e и m_e заряд и масса электрона.

Детектирование электронов.

При взаимодействии электронов пучка с объектом возникает несколько видов излучений: вторичные и отраженные электроны; электроны, прошедшие через объект (если он тонкий); рентгеновское излучение (рис.3.6). Любое из этих излучений может регистрироваться соответствующим детектором, преобразующим излучение в электрические сигналы, которые после усиления модулируют пучок электронно-лучевой трубки (ЭЛТ).

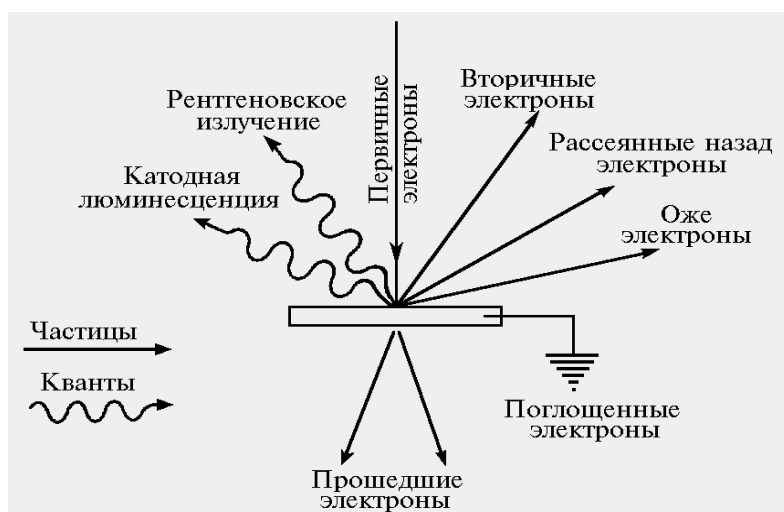


Рис 3.6. Взаимодействие электронного луча с поверхностью образца.

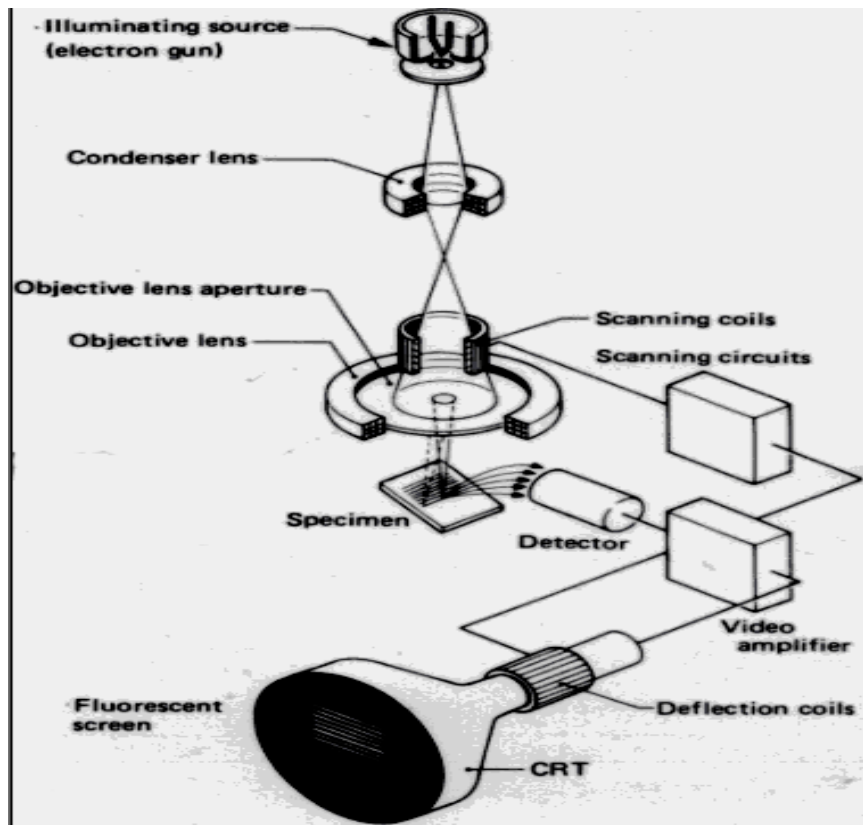


Рис.3.7. Упрощенная схема РЭМ.

Развертка пучка ЭЛТ производится синхронно с разверткой электронного зонда в РЭМ. Изображение объекта в соответствующем излучении наблюдается на экране ЭЛТ (Рис.3.7). Увеличение микроскопа определяется отношением размеров областей сканирования в РЭМ и ЭЛТ.

Для определения вторичных электронов используется детектор Эверхарта -Торнли, позволяющий селективно идентифицировать электроны с энергией менее 50 эВ (рис 3.8).

В качестве детекторов могут также использоваться микроканальные умножители, сцинтилляторы или диффузионные диоды, удовлетворяющие следующим требованиям: ---

- высокая чувствительность и точное позиционирование;
- рассеяние луча должны быть меньше, чем размеры метки совмещения;
- согласование размера и формы меток с толщиной резиста;
- применение корректора данных с высоким отношением сигнал/ шум и петлей обратной связи, позволяющего менять поле сканирования для точного совмещения с кристаллом.

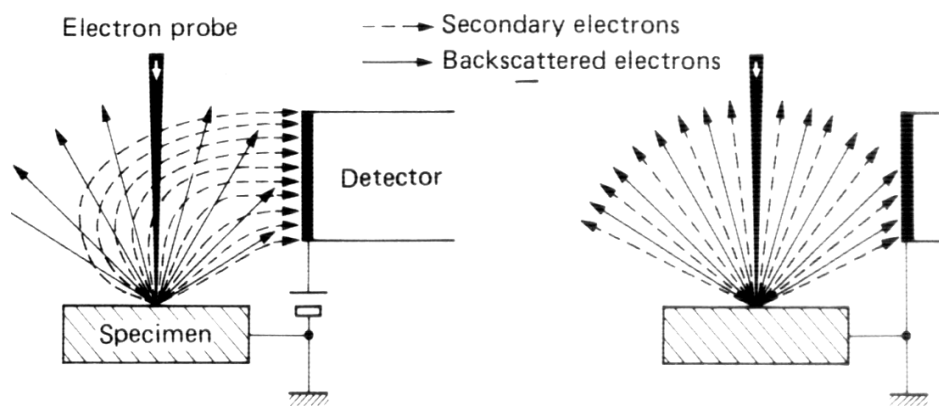


Рис.3.8. Детектор вторичных электронов.

Совмещение.

Метки для электронно-лучевого совмещения обычно изготавливаются в виде канавок или выступов в кремнии, а для повышения уровня сигнала обратно рассеянных электронов - из металлов большой атомной массы. В момент прохождения электронного луча над меткой регистрируется изменение количества обратно рассеянных электронов, и размеры поля сканирования корректируются до полного совпадения с размерами кристалла. Сигнал совмещения сильно зависит от характеристик подложки, энергии электронного луча, композиции резиста и рельефа резистного покрытия над меткой.

3.4. Вакуумная система.

Необходимым условием перемещения электронов в виде пучка на большое расстояние является создание на их пути вакуума, поскольку в этом случае средняя длина свободного пробега электронов между столкновениями с молекулами газов будет значительно превышать расстояние, на которое они должны перемещаться. Высокий вакуум в колонне и камере необходим, поскольку наличие газа приводит к рассеянию и ослаблению электронного пучка. Для этих целей достаточно поддерживать в рабочей камере вакуум на уровне 10^{-6} мм. рт. ст.

Система откачки микроскопа позволяет получать вакуум порядка 10^{-6} мм. рт. ст. в колонне и содержит:

- механический форвакуумный насос предварительного разрежения (до 1 мм. рт. ст.) (см. рис. 3.9);
- два паромасляных диффузионных насоса (до 10^{-7} мм. рт. ст.);
- клапанный механизм управления вакуумной системой.

Использование дополнительно откачиваемой шлюзовой камеры позволяет помещать образец в камеру микроскопа без потери вакуума.

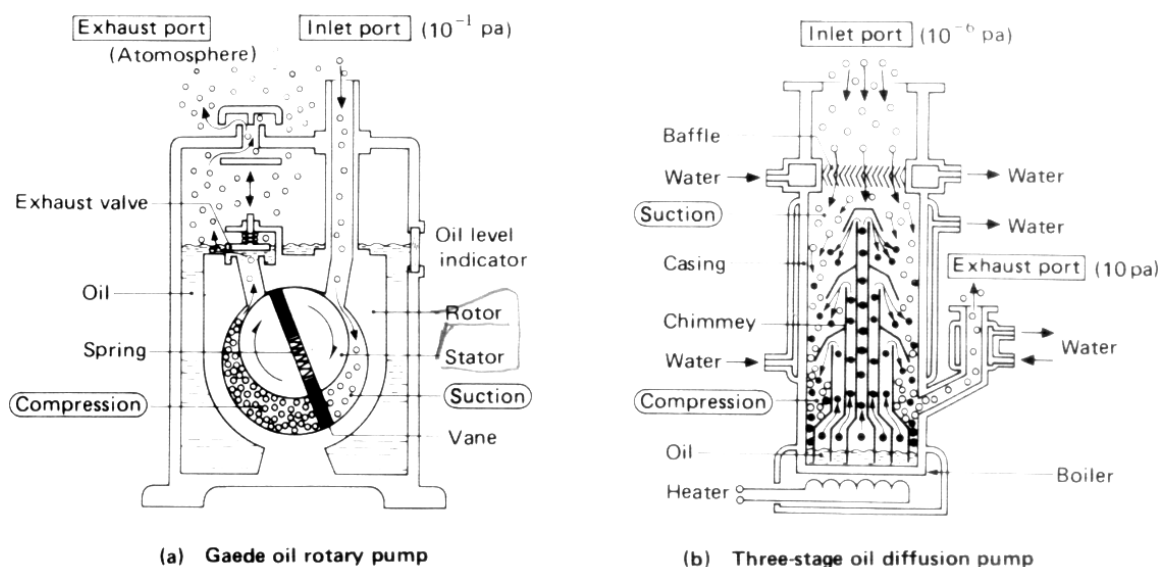


Рис.3.9. Схематическое изображение вакуумных насосов:

а - механический форвакуумный насос;

б - диффузионный насос.

3.5. Электронные резисты.

Для успешного применения резистов на практике необходимо знание нескольких параметров, называемых еще дозовыми характеристиками. Дозовыми характеристиками электронных резистов являются чувствительность и контрастность.

Определение чувствительности и контрастности электронных резистов.

В нашей работе используется позитивный резист ПММА (полиметилметакрилат, брутто-формула мономера $C_5H_8O_2$). Он обладает чувствительностью в 50 - 500 мкКл/см². Фирмы – изготовители резистов обычно сообщают чувствительность резистов для определенных составов проявителей, условий проявления и энергий электронов с большим разбросом. Каждый пользователь экспериментально подбирает дозу более точно для своих конкретных условий.

Перед началом работы проводится **дозовый тест**, чтобы определить конкретное значение дозы, необходимое для работы в определенных условиях. Для этого создается и экспонируется массив элементов (например, 100 квадратов). В специальной программе задается минимальная чувствительность резиста (для ПММА - 50 мкКл/см²), доза для первого квадрата выбирается равной 100% этого значения, а для остальных изменяется с определенным шагом, например, 10%. Таким образом, в данном массиве из 100 квадратов доза меняется в пределах 100-1000%, а чувствительность, соответственно, в интервале 50-500 мкКл/см². После экспонирования и проявления дозовый тест необходимо рассмотреть в оптический микроскоп и определить, какой из квадратов с наименьшей дозой проявился до дна. Это и будут рабочая доза и чувствительность (соответственно). При сильно избыточной дозе экспонирования на порядок выше рабочей, ПММА сшивается и превращается в негативный резист.

Контрастность является характеристикой крутизны рельефа резиста после проявления. Скорость проявления линейно растворяющегося резиста может быть описана степенной зависимостью:

$$v = aM^{-p}, \quad (3.2)$$

где a - число молей растворенного вещества, а γ - некий параметр, характеризующий скорость растворения данного полимера, M – молекулярная масса резиста. Формула (3.2) верна для позитивных резистов, а в случае негативных резистов она применима для неэкспонированных областей.

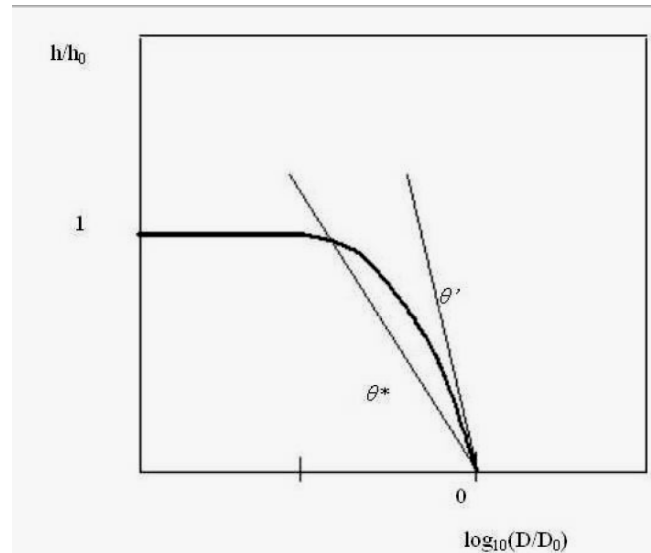


Рис.3.10. Дозовая кривая, построенная для позитивного резиста, а также два определения контрастности.

В литературе контрастность для позитивного резиста определяют несколькими способами. Сначала строится зависимость приведенной остаточной толщины резиста от приведенной дозы экспонирования, причем приведенная доза экспонирования строится в логарифмическом масштабе. Приведенная толщина равна отношению остаточной толщины резиста к начальной толщине (h/h_0). Приведенная доза равна отношению дозы экспонирования к чувствительности. Зависимость остаточной толщины резиста от дозы экспонирования часто называют дозовой кривой. На рис.3.10 схематически представлена дозовая кривая позитивных резистов. Если D_1 - наибольшая доза экспонирования, при которой резиста практически не проявляется, и D_0 - минимальная доза, при которой резист проявляется полностью за приемлемое время, то контрастность γ^* равна:

$$\gamma^* = \frac{1}{\log_{10}(\frac{D_1}{D_0})} = \tan(\theta^*) \quad (3.3)$$

Встречается также определение контрастности как модуля тангенса угла касательной к дозовой кривой в точке D_0 (рис.3.10):

$$\gamma' = \left| \frac{d(\frac{h}{h_0})}{d(\log_{10}(\frac{D}{D_0}))} \right| = \tan(\theta') \quad (3.4)$$

Эти два определения можно обобщить. Действительно, приведенный в (3.3) угол есть секущая к дозовой кривой, проходящей через точки D_0 и D_1 , а значит, существует такая касательная к дозовой кривой, которая параллельна этой секущей. Следовательно, контрастность резиста, задаваемую в (3.3) можно определить как касательную в некоторой точке D^* .

Проявление и удаление резиста.

Электронный пучок разрушает связи в полимерной молекуле и делит ее на фрагменты, которые растворяются с большей скоростью, чем исходный полимер. Проявителем для ПММА может служить метил-изобутил-кетон (МИБК или МІВК), однако это очень сильный проявитель, который хорошо проявляет и неэкспонированный резист. Поэтому обычно как проявитель используют раствор МИБК с менее сильным проявителем, таким как изопропанол ИПС (ІРА), в соотношении три части ИПС на одну часть МИБК. Удаляют резист обычно в ацетоне или в кислородной плазме, если он сильно затвердел. При взаимодействии полимерных резистов с электронным пучком может происходить структурирование или деструкция полимерной цепи, либо, как это происходит для большинства полимеров, оба процесса идут одновременно.

Заряд **D**, созданный при воздействии электронного луча на резист (при экспонировании), равен произведению плотности тока **I** на время экспонирования **t** :

$$D = t I \quad (\text{Кл/см}^2) \quad (3.5)$$

Каждый резист имеет также пороговое значение чувствительности, при котором начинается распад молекул при облучении (для позитивных резистов). При этом происходят деструкция полимерных цепей и разрыв межмолекулярных и боковых связей, образуются низкомолекулярные фрагменты (рис.3.11).

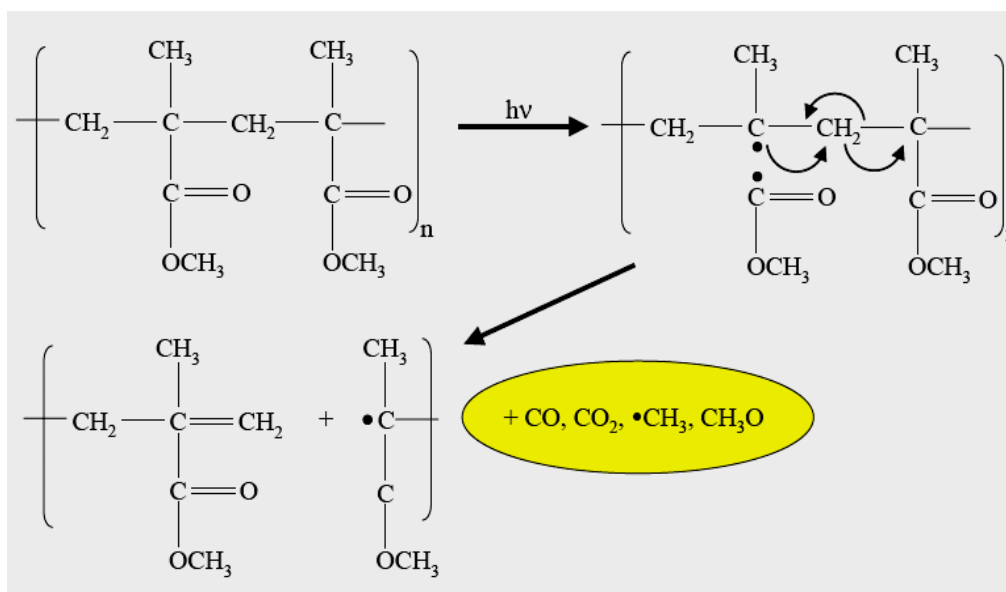


Рис.3.11. Деструкция полимерных цепей ПММА под действием электронного луча.

3.6. Рассеяние электронов в резисте. Эффекты близости.

Эффекты близости - основная проблема электронной литографии. Эффекты близости приводят к нежелательному экспонированию областей, в которые луч непосредственно не направлялся. Эффекты близости проявляются как искажение получаемого на подложке изображения вследствие упругого и неупругого рассеяния электронов на подложке. Электроны, рассеянные на атомах подложки, проникают в прилежащие к лучу области резиста, производя его дополнительное экспонирование и вызывая тем самым размытие изображения. Различают внутренние и внешние эффекты близости. Внутренние эффекты обусловлены рассеянием электронов, формирующих

изображение непосредственно в данной области, а внешние - рассеянием электронов, формирующих изображение в соседних областях. При энергии луча 25 кэВ и диаметре 1 мкм полуширина области обратного рассеяния электронов составляет 5 мкм, а при энергии 50 кэВ достигает 15 мкм. В зависимости от отсутствия или наличия ближайших "соседей" наблюдаются соответственно внутренний или взаимный эффекты близости.

Внутренний эффект близости обусловлен обратным рассеянием электронов за пределы непосредственно экспонируемой области и приводит к тому, что уединенные мелкие элементы топологии приходится экспонировать с дозой, заметно большей, чем необходима для больших фигур. Если подложка изготовлена не из кремния, как обычно, или на кремний нанесены пленки тяжелых металлов (например, золота или вольфрама), то экспозиция окрестности пятна увеличивается. Это объясняется большим коэффициентом обратного рассеяния электронов, присущим подложкам с большей атомной массой. Соответственно, увеличивается доза, полученная резистом (кажущееся увеличение чувствительности), и частично компенсируется внутренний эффект близости. В резисте при дозе, вдвое большей нормальной, используя эффекты обратного рассеяния, можно получить профили с отрицательным наклоном, пригодные для определенных задач. Для компенсации внутреннего эффекта близости должна быть задана избыточная доза и, следовательно, большее время экспонирования. Чем толще резист, тем больше доза, необходимая для уменьшения «ухода» размеров (возникающего при попытке скомпенсировать недозаэкспонирование перепроявлением). Чем тоньше резист, тем слабее внутренний эффект близости, что наблюдается, например, в многослойных резистах.

Другой вид эффекта близости - взаимный - заключается в экспонировании ближайшими соседями друг друга и пространства между ними. Неэкспонированные области между линиями засвечиваются обратно рассеянными электронами. Взаимный эффект близости вызывает утоньшение непосредственно неэкспонированных областей позитивных резистов. Особенности экспонирования электронами высокой энергии (50-100 кэВ) обусловлены главным образом боковым размытием распределения обратно рассеянных электронов на границе раздела резиста и кремниевой подложки. В частности, это приводит к тому, что не подлежащий экспонированию малый островок внутри большой экспонируемой области все равно подвергается сильному фоновому экспонированию обратно рассеянными электронами из окружающей области. Фоновое экспонирование приводит к утоньшению резистивной пленки в этих островках и, в конечном итоге, к их исчезновению (вымыванию).

Существенное ослабление влияния эффектов обратного рассеяния, особенно в нанометровой литографии, в случае применения как позитивных, так и негативных резистов может быть достигнуто при использовании в качестве подложки мембраны в 5-10 раз более тонкой, чем наименьший размер элементов формируемого изображения. Коррекция эффектов близости, которая сводится к разбиению фигур рисунка на части, со своей дозой в каждой, либо к изменению размеров элементов рисунка, для некоторых топологий может быть формализована.

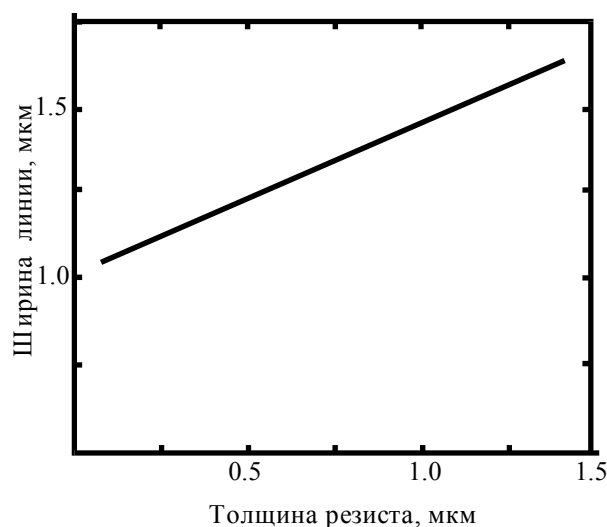


Рис.3.12. Влияние толщины резиста на величину взаимного эффекта близости в периодической структуре из линий и промежутков шириной 1.0 мкм (кремниевая подложка, позитивный резист, энергия пучка 25 кэВ).

Поскольку проявление эффекта близости возрастает почти прямо пропорционально толщине резиста (как однослойного, так и многослойного) (рис.3.12), то уменьшение толщины ослабляет эффект близости. Многослойные резисты - практическое решение проблемы эффекта близости.

Таким образом, методами ослабления эффектов рассеивания электронов являются:

- использование в качестве подложки тонкой мембраны;
- разбиение фигур рисунка на части со своей дозой в каждой области;
- уменьшение толщины резиста до четверти величины разрешения;
- применение многослойных резистов (антиотражающее покрытие, сополимеры, барьерный слой).

3.7. Работа в программе Nanomaker.

Электронный пучок сканирует поверхность электронного резиста, повторяя шаблон, заложенный в управляющий компьютер. Разработано специальное программное обеспечение, контролирующее процесс переноса заданного рисунка на поверхность подложки с резистом (Рис. 3.13).

На рис. 3.14 показаны возможные типы структур для зарисовки.

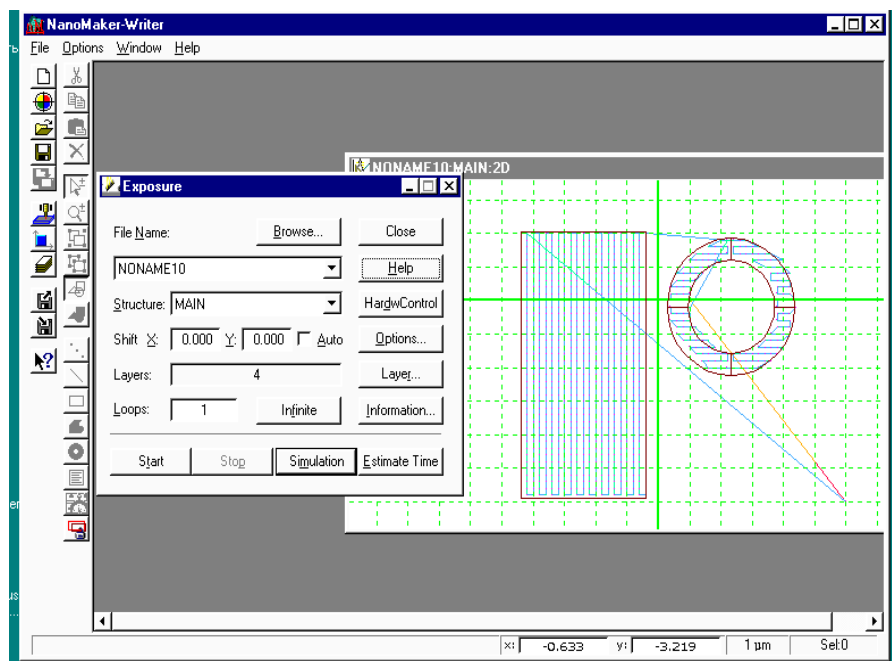


Рис.3.13. Электронный луч сканирует поверхность согласно заданным структурам.

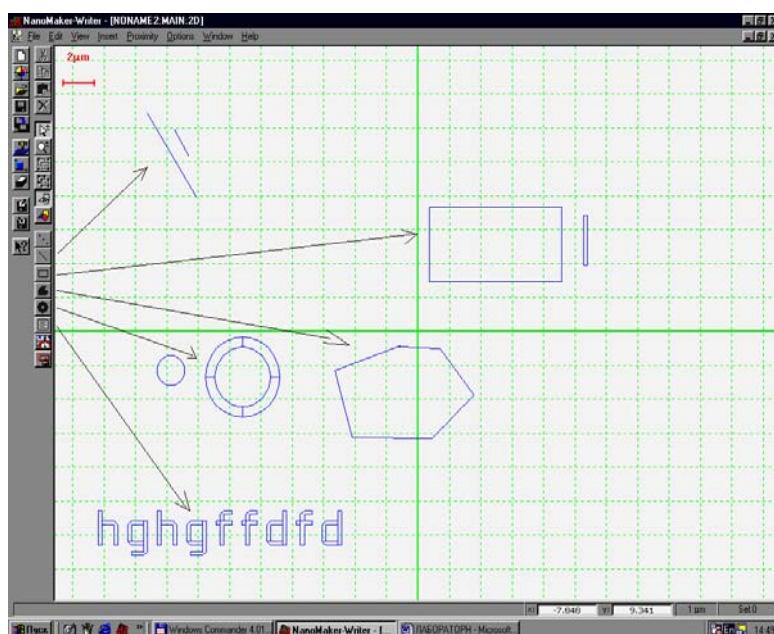


Рис. 3.14. Возможные типы структур для зарисовки.

При создании дизайна структуры в редакторе Nanomaker нужно учитывать ее размеры и характерный размер наименьшего элемента. В соответствие с этим подбирается нужное увеличение и, таким образом, устанавливается границы поля рисования. Центр поля рисования совпадает с координатами (0,0) в поле редактора.

Для увеличения $\times 800$, например, поле сканирования составляет $\sim 100 \times 100$ микрон, а для увеличения $\times 200$ размер поля 410×360 микрон. Все структуры следует рисовать в соответствующем поле, иначе они не будут проэкспонированы.

Подготовка файла “дозовый тест” в редакторе Nanomaker.

Для начала дизайна структуры откройте редактор Nanomaker и создайте новый файл: File- New Data Base. Сохраните созданный файл на диске, выберите расширение GDB. Нарисуйте прямоугольник (кнопка Rectangle на панели слева) размером, например, 5×7 мкм. Нажмите кнопку Select Mode на панели слева и выделите созданный прямоугольник. Далее необходимо задать слой в котором будет находиться этот прямоугольник, и дозу экспонирования в процентах. Для этого идем в меню Edit-Change Attributes.... В появившемся окне выбираем операцию SET и для дозы ставим 100 в строке Dose[%], в строке Layer number ставим, например, 1. Нажимаем ОК, теперь наш прямоугольник находится в слое 1 и имеет дозу, равную 100%.

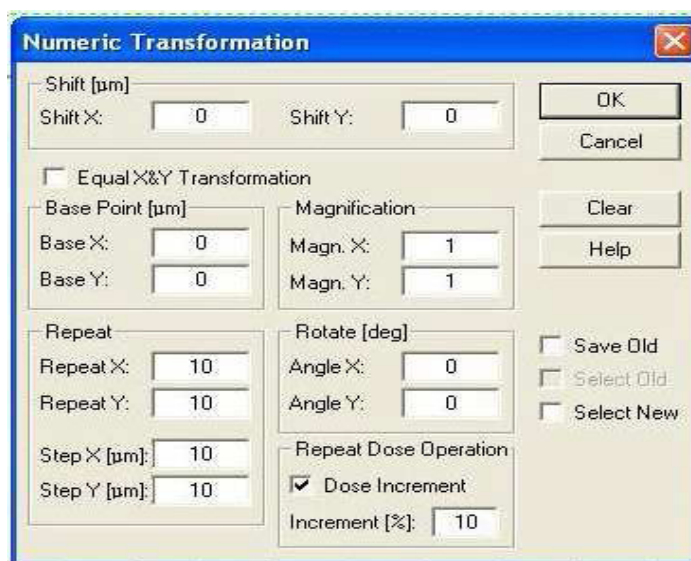


Рис.3.15. Создание матрицы из элементов 10×10 с шагом 10 мкм по обеим осям и линейным возрастанием дозы на 10%.

Далее необходимо создать массив из таких прямоугольников с линейно увеличивающейся дозой от 100% до 1000%, например матрицу из прямоугольников, размером 10×10. Для этого снова выделяем исходный прямоугольник и идем в меню Edit - Transform – Numeric.

Появляется окно Numeric Transformation (рис.3.15), в котором нужно задать операцию повторения структуры 10 раз по оси X (Repeat X: 10) и 10 раз по оси Y (Repeat Y: 10) с шагом 10 µm по оси X (Step X [µm]) и аналогично по оси Y, задаем также линейное увеличение дозы от элемента к элементу, равное 10% (Dose Increment). Нажмите ОК. На экране появится матрица из прямоугольников. При помощи сочетания клавиш Alt+G можно посмотреть дозу и номер слоя каждого элемента.

Проверьте, что доза возрастает линейно от элемента к элементу. При помощи той же команды Edit- Transform - Numeric... переместите весь массив в центр начала координат, предварительно его выделив. Можно так же добавить какую-нибудь надпись, чтобы обозначить верх структуры, например, Dose Test, это делается при помощи кнопки Text на панели слева, в появившемся окне вводится желаемая надпись. Пример дозового теста показан на рис.3.16.

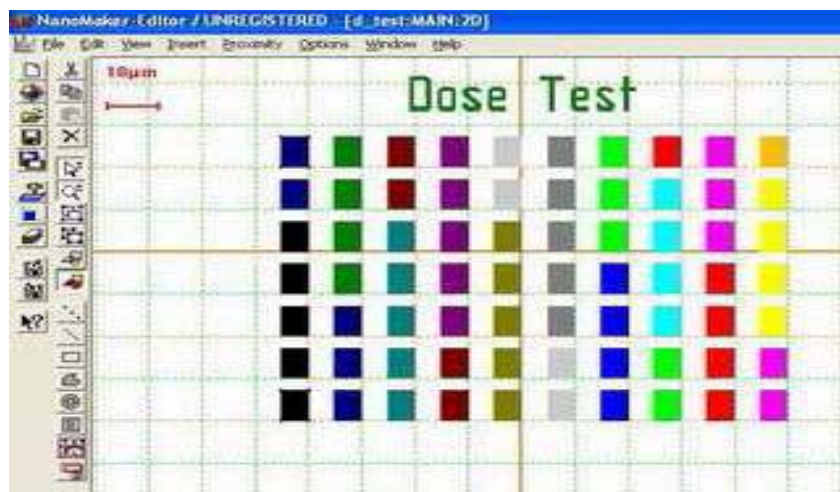


Рис.3.16. Пример дозового теста - матрицы 10×7 с шагом 10 мкм по обеим осям и линейным возрастанием дозы.

Составление файла маркерных знаков.

Совмещение и экспонирование.

Файл маркерных знаков создается для совмещения слоев при многоуровневой структуре. Чтобы открыть окно файла маркерных знаков (рис.3.17), надо пройти по ссылке File-NewVideoControl-Mark-Define Mark.

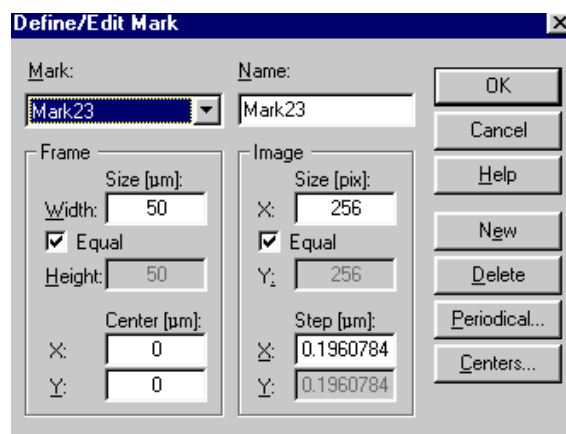


Рис. 3.17. Окно файла маркерных знаков.

В этом окне задается имя файла Mark Name, координаты точек маркерных знаков Center (x,y) согласно шаблону, а также ширина поля сканирования (обычно 5-50 мкм). Предварительно сделаны заготовки образцов для получения меток совмещения, см. рис. 3.18 а, б. Образцы сделаны с помощью фотолитографии и последующего магнетронного напыления ниобия. Координаты точек маркерных знаков определяются по шаблону данной структуры, который нужно открыть в программе «Автокад».

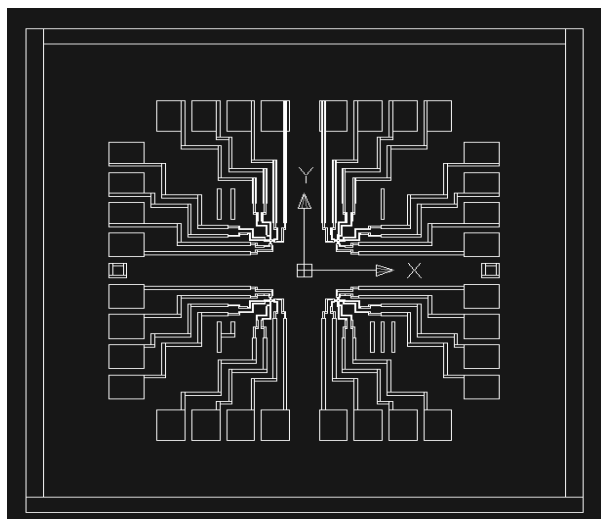


Рис.3.18а. Общий вид шаблона (15x15мм²).

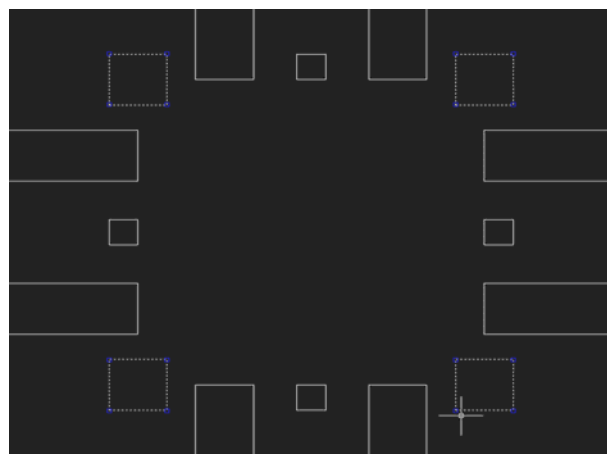


Рис.3.18б. Поле для зарисовки в программе Nanomaker. Пунктиром выделены метки совмещения (10x10мкм²).

Необходимо выбрать 4 точки совмещения и внести их координаты в окне файла маркерных знаков, для каждой точки под своим именем. Потом нажать ОК и сохранить файл, выбрав расширение MRK.

При совмещении структур необходимо:

- взять сохраненный файл маркерных знаков (File-Open);
- открыть файл со структурами для зарисовки;
- открыть окно для сканирования меток совмещения (Video- Scan Field Alignment-Scan Field to Simpl) (см. рис.3.19);

Установив в окне Mark имя точки совмещения, нажмите Get Video – идет сканирование. Кнопкой Select Centr и меткой курсора можно корректировать положение маркерного знака.

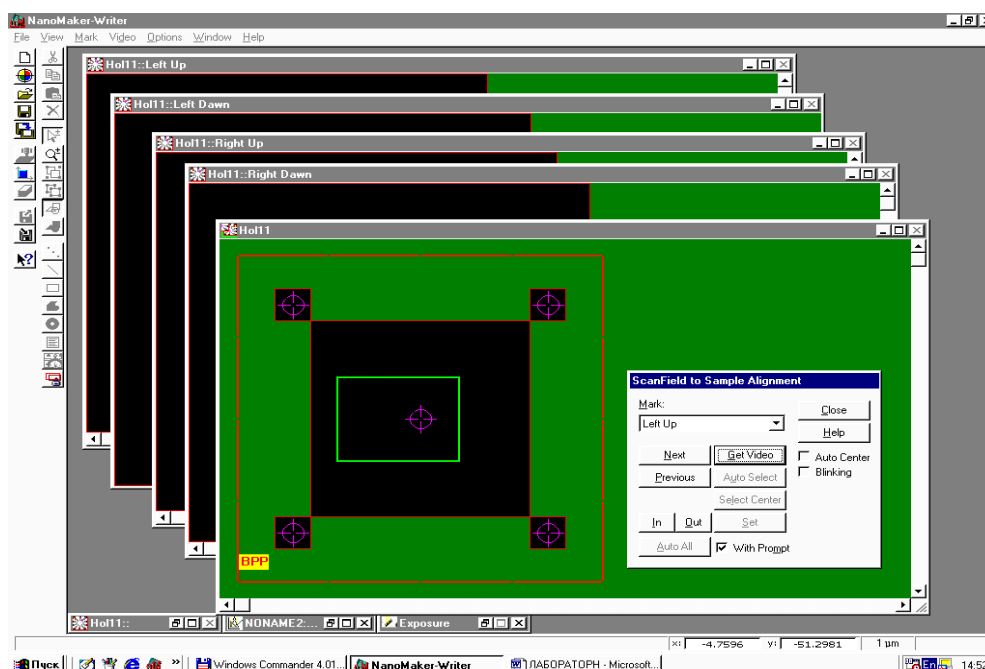


Рис.3.19. Сканирование меток совмещения. Открыт файл маркерных знаков и окно сканирования точек совмещения.

Данную процедуру провести для всех четырех точек, после чего нажать Set и Close для завершения совмещения. Когда совмещение завершено, можно экспонировать структуру. Для этого - открыть окно Exposure (рис.3.13) проверить все установленные ранее параметры Options, проверить соответствие тока луча, заданного в программе и измеренного пикоамперметром, нажать Start.

4. Лабораторные работы.

Лабораторная работа №1

Изготовление дифракционной решетки с помощью фотолитографии. Измерение длины волны лазера.

1. Цель работы, оборудование и материалы.

Основная цель данной работы: изучение основ фотолитографии, технологического процесса изготовления микроструктур, свойств резистов. Приготовление и тестирование микроструктур для дифракционной решетки.

Оборудование и материалы: установка совмещения и экспонирования, фотошаблон, фоторезист S1811, центрифуга для нанесения резиста, термо - печь (HotPlaite) для его сушки, установка термического напыления ВУП-5, лазерная установка.

2. Краткие теоретические сведения.

Определение длины волны лазера из анализа картины распределения пиков интенсивности света, отраженного от дифракционной решетки.

При отражении света длиной волны λ от дифракционной решетки с периодом d , состоящей из одинаковых, расположенных на одном и том же расстоянии друг от друга зеркальных полос шириной b , интенсивность света как функция угла φ , отсчитанного от нормали к плоскости решетки, определяется известной формулой

$$I(\varphi) = \left\{ \frac{\sin(\pi b \sin(\varphi) / \lambda)}{\pi b \sin(\varphi) / \lambda} \right\}^2 \cdot \left\{ \frac{\sin(N \pi d \sin(\varphi) / \lambda)}{\sin(\pi d \sin(\varphi) / \lambda)} \right\}^2$$

(4.1)

На рисунке 4.1 показан пример дифракционной картины для решетки, у которой $b=d/4$. Огибающая, показанная на рисунке пунктирной линией, описывается первым множителем формулы (4.1). Он обращается в ноль при $b \sin \varphi = \pm m \lambda$, $m=1,2,3,\dots$ как от одиночной отражающей полосы. Второй множитель принимает максимальное значение при $d \sin \varphi = \pm n \lambda$, $n=1,2,3,\dots$. Расстояние l между максимумами интенсивности на плоском экране зависит от угла φ и расстояния до экрана L .

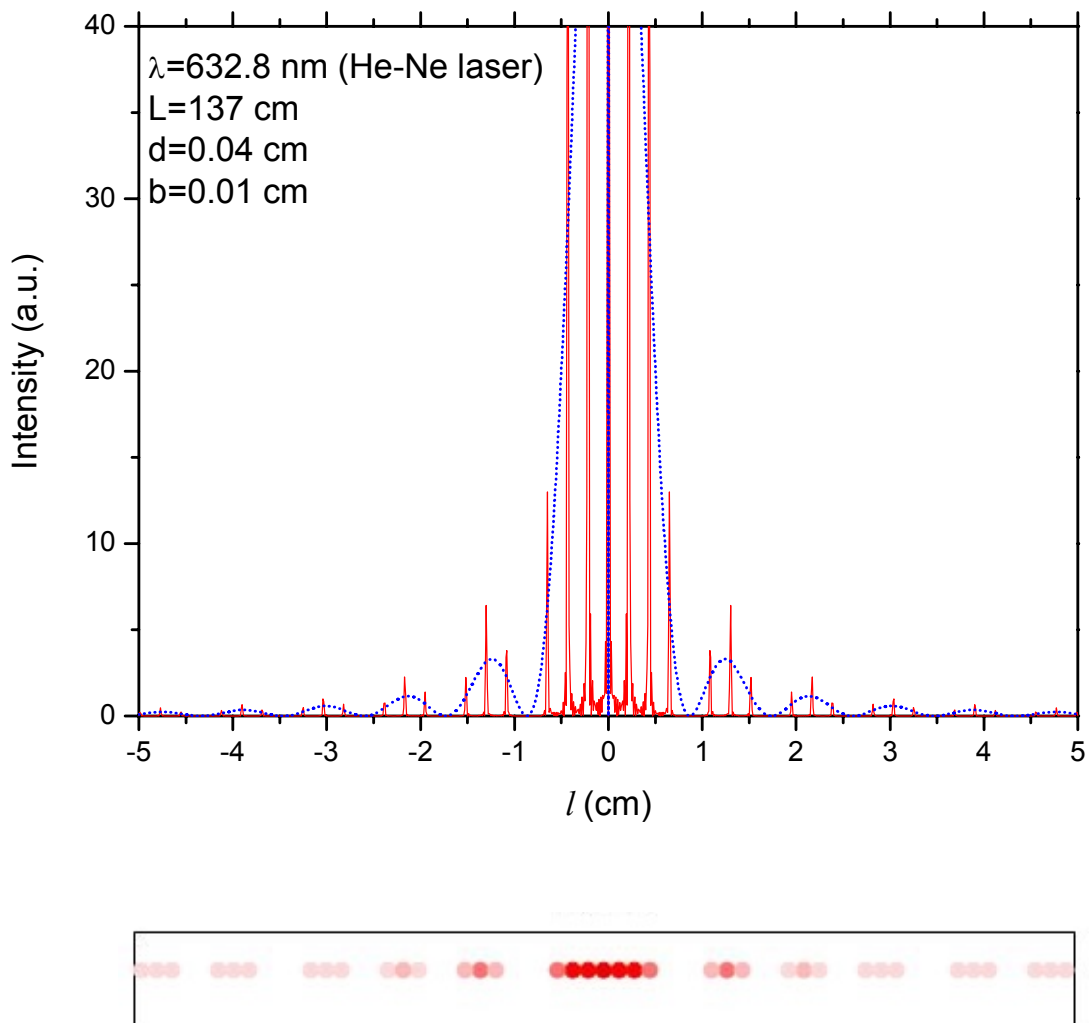


Рис.4.1 Пример рассчитанной дифракционной картины для решетки с $b=d/4$ (вверху) и схематическое изображение ожидаемой дифракционной картины на плоском экране (внизу, темные точки – области с высокой интенсивностью, светлые – с низкой или нулевой интенсивностью). По оси абсцисс даны координаты рефлексов для случая, когда расстояние от структуры до экрана $L=137$ см.

3. Вопросы для подготовки и допуска.

1. Указать недостатки контактного метода экспонирования.

2. Перечислить требования к резистам, шаблонам и подложкам. Какие процессы в резистах происходят при сушке, экспонировании и проявлении.
3. Перечислить характеристики лазера, существенные для наблюдения той или иной дифракционной картины.

4. Порядок выполнения работы.

1. Очистка подложек (кремний и окисленный кремний) в ацетоне, нанесение резиста S1811 на центрифуге (30 с, 6000 об./мин).
2. Сушка резиста на Hotplate (3 мин).
3. Экспонирование фоторезиста (установка фотолитографии) (18 с).
4. Проявление резиста в 1.2 мас. % растворе КОН в воде (10-15 с) .
5. Напыление Al в установке термического напыления ВУП-5.
6. Удаление резистивной маски. «Взрывная» литография (Lift-off).
7. Контроль методом оптический микроскопии. Определение величин b и d . Определение несовершенств решетки.
8. Моделирование (построение графика) зависимости интенсивности от угла и от расстояния (для проекции дифракционной картины на плоский экран) по формуле (4.1) для идеальной геометрии решетки с найденными b и d (в случае использования гелий-неонового лазера с длиной волны 632 нм).
9. Работа с лазером и определение длины волны лазера:
 - зарисовать или сфотографировать картины дифракционных максимумов и минимумов, возникающие на экране при отражении лазерного луча от реальных дифракционных решеток на двух разных подложках;
 - измерить характерные расстояния между максимумами интенсивности.
10. Сравнить результаты моделирования, п. 8, и полученные экспериментально дифракционные картины. Вычислить период интерференционных максимумов и длину волны лазера, проанализировать погрешность этого вычисления.

5. Что нужно для защиты лабораторной работы.

Содержание отчета (реферат).

Составить отчет, включающий: цель работы, описание хода работы, очередность выполняемых процедур, полученные результаты. Отчет должен содержать следующие сведения.

1. Сведения о технологических режимах получения дифракционных решеток: подготовки резистивной маски (нанесение, сушка, проявление) и напыления Al, с указанием всех параметров и (если таковые были) описанием отклонений от методики.
2. Данные оптической микроскопии и результаты их обработки.
3. Результаты моделирования дифракционной картины для решетки данной геометрии.
4. Схема эксперимента дифракции лазерных лучей на дифракционной решетке. Полученные дифракционные картины (фотографии) и методика определения из них расстояний между максимумами интенсивности. Формулы и подробный расчет длины волны и погрешности измерений.
5. Анализ результатов работы. Выводы об отклонениях реальной структуры от идеальной и о причинах этих отклонений.

Лабораторная работа №2

Технология получения микроструктур и контактов к ним с помощью электронной литографии. Многоуровневая литография: совмещение слоев.

1. Вводные замечания. Цель работы, оборудование и материалы.

Основная цель настоящего лабораторного практикума: получить навыки работы в области электронной литографии наноструктур и освоить возможности использования программы Nanomaker при создании и совмещении структур.

Зарисуем некоторые простые тестовые объекты, например, несколько прямоугольников разных размеров (~ 5x10 микрон), к которым на втором этапе подведем контакты для измерений, освоив процесс совмещения структур. В дальнейшем, возможно, нашими объектами будут нанопроволоки из металлов, выращенные специальными методами и помещенные на подложку.

2. Экспериментальная часть.

Подготовка подложек с резистом.

Для начала работы нужно нанести резист на кремниевые подложки и высушить его. Резист заданной толщины наносится при помощи спиннера (центрифуги) с различными скоростями вращения. Температуру, необходимую для сушки резиста (180⁰С) лучше выставить на hot plate заранее, т.к. процесс достижения нужной температуры не быстрый.

Для того, чтобы нанести резист, возьмите кремниевую подложку размером 10×10 мм и поместите ее в центр спиннера, выровняйте подложку и зафиксируйте ее на спиннере при помощи вакуумного контакта, для этого включите форвакуумный насос и поверните рычаг на панели спиннера.

При помощи кнопок на панели управления спиннера выставите нужную скорость раскрутки и время. Возьмите дозатор и наберите в него резист РММА А6-495, аккуратно выдавите небольшое количество резиста на подложку. Включите кнопку начала раскрутки, наблюдайте за тем, как меняется цвет подложки, как только он перестает меняться - значит достигнута нужная толщина. Как только спиннер остановится, проверьте стабильна ли выставленная температура hot plate и выставите необходимое время сушки резиста на таймере hot plate. Поместите подложку с только что нанесенным резистом на поверхность hot plate и одновременно запустите таймер. Как только будет достигнуто нужное время, снимите подложку.

Установка образца в микроскоп через шлюзовую камеру и настройка изображения.

Прикрепите подложку с нанесенным резистом к столику который будет загружаться в электронный микроскоп. Сделайте на самом краю подложки царапину в резисте для того, чтобы на ней настраивать фокусировку электронного микроскопа. Прикрепите столик с образцом к ручке для транспортировки и вставьте в шлюзовую камеру и нажмите красную кнопку откачки шлюзовой камеры. Как только камера откачается, вы услышите характерный звук, после этого, повернув затвор переместите образец в основную камеру микроскопа на держатель внутри камеры. Отсоедините столик с образцом от ручки для перемещения (нужно вращать ручку против часовой стрелки, пока она не отсоединится). Старайтесь держать ручку для перемещения образца все время горизонтально. Переместите ручку в шлюзовую камеру, закройте затвор. Нажмите красную кнопку напуска воздуха в шлюзовую камеру (красная кнопка справа). Ручка для перемещения отсоединится.

Настройка электронного микроскопа.

На главной панели микроскопа нажмите красную кнопку High Voltage On (расположение кнопок - см. рис.4.1). Медленно, в течение нескольких минут, выведите ток катода при помощи ручки FILAMENT до значения 100 по шкале тока катода и дальше так же медленно выводите до появления на экране микроскопа яркости, выводите ток до второго проявления максимума в яркости. При помощи ручки FOCUS COARSE настройте приблизительно фокус. Яркость и контрастность изображения можно регулировать ручками SE IMAGE - BRIGHT и CONT. Найдите изображение образца на экране. При помощи ручки MAGNIFICATION увеличьте изображение. По мере увеличения подстраивайте фокус ручкой FOCUS COARSE или FINE. Найдите царапину в резисте на образце, которую предварительно сделали. Постарайтесь как можно лучше сфокусироваться на ее краях. Если изображение получается не четким, размытым, искаженным, попробуйте убрать астигматизм при помощи ручек STIGMATOR X и Y, параллельно подстраивайте фокус.

Можно посмотреть как меняется фокус при помощи кнопки WOBB и ручки AMPLITUDE. Как только удастся получить приемлемое изображение на экране (должны быть четки видны объекты размером 1 микрон), включите пикоамперметр, выставите на нем шкалу измерения 10^{-9} и измерьте ток пучка. При помощи ручек PROBE CURRENT COARSE и FINE выставите нужный ток (от 0.1 nA до 0.5 nA). Переместитесь на образце в то место, где хотите нарисовать структуру, переключите тумблер слева от панели микроскопа в положение рисования (2 положения тумблера: просмотр - изображение выводится на экран, и рисование).

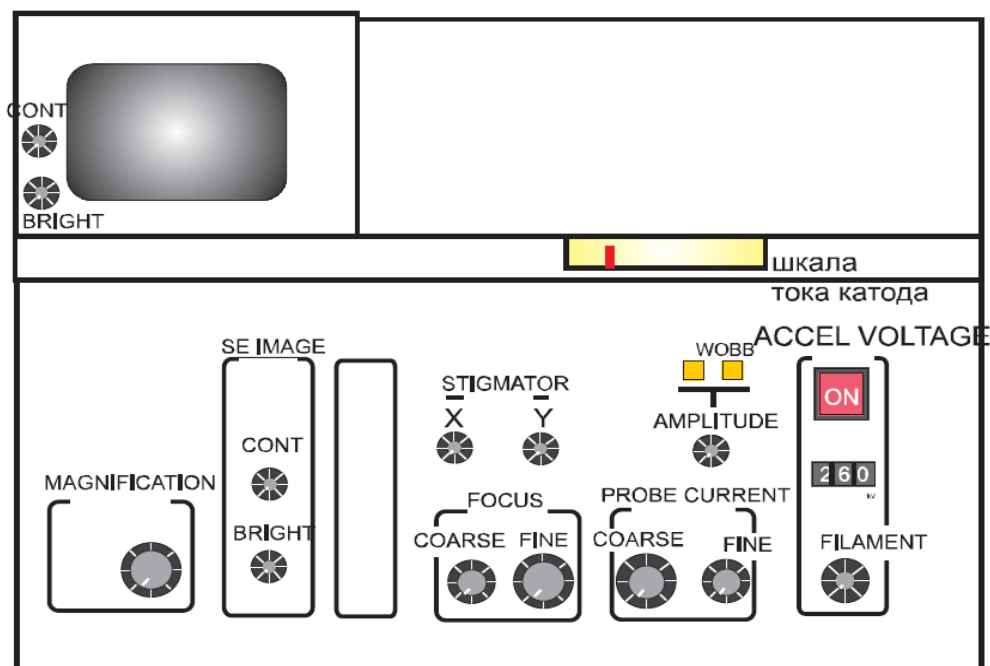


Рис.4.2. Схема передней панели электронного микроскопа.

Ручкой MAGNIFICATION выставите нужное увеличение. Еще раз отрегулируйте ток пучка. Теперь электронный микроскоп готов к экспонированию структуры.

Экспонирование.

Перед тем, как начать экспонирование структуры необходимо загрузить в программе Nanomaker файл с параметрами. Это делается из меню: Options - Load Par. Программа выдаст список файлов с параметрами из которых необходимо выбрать файл, соответствующий выставленному увеличению. После того, как это будет сделано, необходимо ввести параметры резиста и ток засветки в опции экспонирования. Это делается следующим образом: заходим в Options – Exposure-Video. В возникшем окне открываем вкладку Times и нажимаем кнопку Recommended. В появившемся окне выставите: толщину резиста НО в микронах, Beam Current и Sensitivity (чувствительность). Пример ввода этих параметров показан на рис.4.3. Нажимаем ОК.

В предыдущем окне (рис. 3.13) открываем вкладку Steps и выставляем шаги по оси X и Y (StepX и Step Y). Чем меньше шаг, тем точнее получится зарисовать структуру, однако сильно маленькими шаги сделать тоже нельзя, т.к. имеется ограничение по времени, в течение которого микроскоп засвечивает один пиксел. Оно не может быть меньше определенной величины. Для структур размером 5 микрон и выше можно ставить шаг 0.1 микрона. После того, как выставили шаги, идем снова во вкладку Times, нажимаем кнопку Calibrate и выставляем времена, предложенные программой. Теперь все готово для экспонирования. Нажимаем кнопку Exposure на панели слева. Можно оценить время экспонирования всей структуры, нажав кнопку Estimate Time. В случае если все в порядке, программа выдаст время экспонирования. Если же что-то не так, то программа выдаст сообщение об этом и придется поменять либо шаги по X и Y, либо выставить другой ток или параметры резиста. Для начала экспонирования нажмите кнопку Start (рис. 3.13).

Proximity parameters recommended	
Alpha0 [µm]:	0.05
Voltage [kV]:	25
Resist Name:	PMMA (>5 KV)
Substrate Name:	Si (>5 KV)
H0 [µm]:	0.8
Beta [µm]:	3.19
Alpha [µm]:	0.093
Eta:	0.7

Dwell Times recommended	
Beam Current [nA]:	0.1
Dwell Time [µs] for:	
Area:	50
Line:	137
Point:	231
Sensitivity [µA*s/(cm*cm)]:	50
Line Dose [pA*s/cm]:	1.37e+03
Point Dose [pA*s]:	0.0231
Exposure Step [µm]:	
X Area:	0.1
Y Area:	0.1
Line:	0.1

Рис. 4.3. Параметры экспонирования.

Выключение электронного микроскопа и проявление структуры. Определение чувствительности резиста.

После того, как закончилось экспонирование необходимо выключить пикоамперметр; медленно, в течение одной-двух минут, убрать ток накала катода ручкой FILAMENT; выключить ускоряющее напряжение ACCEL VOLTAGE - красную кнопку.

Только после этого можно вытаскивать столик с образцом. Выгрузка образца происходит точно так же, как и загрузка, при помощи шлюза и ручки для перемещения столика с образцом.

После того, как образец вытащили из камеры микроскопа, его необходимо проявить. В качестве проявителя будет использоваться IPA:MIBK=3:1, в качестве стоп раствора - чистый IPA. Проявлять необходимо 20-30 с, и держать в стоп растворе примерно 30 с.

Проявленный дозовый тест необходимо внимательно рассмотреть в оптический микроскоп и определить, какой из прямоугольников с наименьшей дозой проявился до дна. Доза этого прямоугольника как раз и будет чувствительностью резиста.

Порядок выполнения работы.

Первая электронная литография. Зарисовка тестовых объектов.

1. Подготовка подложек с резистом.
2. Установка образца в микроскоп через шлюзовую камеру и получение его изображение.
3. Подготовка параметров экспонирования в программе Nanomaker тестовый файл для зарисовки.
4. Экспонирование.
5. Проявление структур. Контроль при помощи оптического микроскопа.
6. Напыление.

Вторая электронная литография. Зарисовка контактов к структурам.

1. Формирование слоя резиста на кремниевой подложке с полученными ранее структурами (нанесение резиста, сушка).
2. Загрузка образца и настройка параметров микроскопа и программы.
3. Подготовка файла маркерных знаков для совмещения и самих контактов для зарисовки.
4. Совмещение и экспонирование.
5. Проявление резиста.
6. Контроль в оптический микроскоп, оформление результатов.

3. Что нужно для защиты лабораторной работы.

Содержание отчета (реферат).

1. Сведения о технологических режимах подготовки резистивной маски (нанесение, сушка, проявление) с указанием всех параметров и (если таковые были) описанием отклонений от методики.
3. Параметры, задаваемые в программе Nanomaker.
4. Микрофотографии полученных наноструктур и контактов к ним.
5. Анализ результатов работы. Указать на конкретные технологические неточности и ошибки, если они были, к чему они привели и как их исправить. Например, наиболее типичные из них такие.
 - а) Часто структуры получают перепроявлены. Каковы причины этого? Что сильно влияет на чувствительность резиста?
 - б) Что будет, если увеличение или ток, выставленные на микроскопе, не соответствуют тем, что заданы в программе NanoMaker ?

5. Вопросы для подготовки.

1. Что изменится если увеличить ускоряющее напряжение?

2. Будут ли отличаться дозы при экспонировании двух линий шириной 0.1 мкм и 1 мкм?
3. Каким образом осуществляется совмещение структур? Можно ли проводить совмещение по двум точкам?

Лабораторная работа №3

Определение чувствительности и контрастности электронного резиста с помощью дозового клина.

1. Вводные замечания. Цель работы, оборудование и материалы.

Эта лабораторная работа основана на главе кандидатской диссертации М.А.Князева “Исследование процессов 3D-структурирования в электронной литографии.” Целью данной работы является определение чувствительности и контрастности электронного позитивного резиста РММА-А6 495.

1. Сначала при помощи структуры "дозовый тест" необходимо определить чувствительность резиста D_0 изложенном в Гл.3.
2. При помощи структуры "дозовый клин", описанной ниже определить контрастность резиста.

2. Теоретическая часть.

В существующих на сегодняшний день методах определения контрастности по приведенному выше определению (см. гл.3.5) построение экспериментальной дозовой кривой требует довольно больших усилий, использования сложного и довольно дорогого оборудования и занимает много времени. Первый этап - это экспонирование тестовой структуры такого же типа, что и для нахождения чувствительности резиста. В случае позитивного резиста проявление структуры осуществляется так, чтобы до подложки проявились только элементы, проэкспонированные с наибольшей дозой. Остальные элементы проявляются на некоторую глубину, в зависимости от проэкспонированной дозы.

Далее если определить остаточную толщину резиста проявленных структур, то можно построить дозовую кривую. Определение остаточной толщины резиста - довольно сложная процедура. Для выполнения этой процедуры используют либо атомно - силовой микроскоп (АСМ), либо профилометр, либо лазерный эллисометр. Определение остаточной толщины резиста с помощью АСМ занимает довольно много времени, для профилометра и лазерного эллисометра требуются большие по площади структуры.

Для диэлектриков существует экспресс-метод определения толщины пленки. Он основан на окрашивании пленок разных толщин в разные цвета, за счет интерференции в них одной из составляющих белого цвета, длина волны, которой кратна толщине пленки (цветовой метод).

Кроме приведенных выше определений контрастности, предложенных в гл.3.5, в качестве контрастности для позитивного резиста можно предложить использовать параметр растворимости γ , введенный в формуле (3.2); скорость проявления линейно растворяющегося резиста может быть описана степенной зависимостью - $v = aM^{-\gamma}$, где a - число молей растворенного вещества, а γ - некий параметр, характеризующий скорость растворения данного полимера, M – молекулярная масса резиста.

Эта формула верна для позитивных резистов, в случае негативных резистов она применима для неэкспонированных областей.

Действительно, обратная молекулярная масса полимерного резиста линейно зависит от дозы экспонирования. Таким образом, можно записать, что

$$D \approx \frac{1}{M} \quad (4.2)$$

Тогда используя формулы (3.2) и (4.2), можно получить зависимость скорости проявления резиста от дозы экспонирования:

$$v = v_0 \left(\frac{D}{D_0} \right)^{\gamma}, \quad (4.3)$$

где v - скорость проявления области, проэкспонированной с дозой D , а v_0 - скорость проявления области, проэкспонированной с дозой D_0 . Теперь можно выразить контрастности (3.3) и (3.4), через параметр растворимости и в дальнейшем при измерении контрастности обозначать ее как γ . Сначала запишем, используя формулу (4.3), зависимость для остаточной толщины резиста от дозы, предполагая, что область, проэкспонированная с дозой D_0 , проявилась полностью:

$$\frac{h}{h_0} = 1 - \left(\frac{D}{D_0} \right)^{\gamma}, \quad (4.4)$$

где h_0 - начальная толщина резиста. Как уже говорилось, контрастность в (3.3) - это модуль тангенса касательной к дозовой кривой в точке D^* и остаточной толщиной в этой точке равной h^* . А для контрастности (3.4), это, соответственно, модуль тангенса касательной в точке D_0 с остаточной толщиной резиста равной нулю ($h'=0$). Взяв производную от обеих частей выражения (4.4) по $\log_{10}(D/D_0)$ можно убедиться, что определение контрастности γ совпадает с определением γ^* и $2\gamma = \gamma'$ при $h^* = 0$

В этой работе предлагается новый метод определения контрастности электронного резиста, исключающий построение дозовой кривой и определение остаточной толщины резиста. Он опирается на зависимость скорости проявления резиста от дозы экспонирования, задаваемой в формуле (4.3). Величина γ является контрастностью резиста.

Основная идея метода заключается в том, чтобы, основываясь на уравнении (3.2) спроектировать такую тестовую структуру, которая при проявлении получается только тогда, когда заложенная при ее проектировании контрастность совпадает с контрастностью резиста. В итоге тестовая структура представляет собой набор прямоугольников, состыкованных друг с другом (рис. 4.4). Доза экспонирования прямоугольников разная и увеличивается слева направо, причем доза экспонирования внутри прямоугольника остается постоянной. Соответственно, доза экспонирования первого (крайне левого) прямоугольника равна нулю, а последнего (крайне правого), проэкспонированного с максимальной дозой, равна D_{\max} . Такую тестовую структуру называют дозовым клином. Пусть закон, по которому меняется доза экспонирования D_n от прямоугольника к прямоугольнику, задается следующей формулой:

$$D_n = D_{\max} \left(\frac{n}{N} \right)^{\frac{2}{\gamma}}, \quad (4.5)$$

где n - это номер прямоугольника, N - это общее количество прямоугольников, а γ_{fit} - некий параметр. Из формул (3.2)-(4.4) и (4.5) следует, что скорость проявления каждого прямоугольника будет задаваться выражением:

$$v_n = v_{max} \left(\frac{n}{N} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma_{fit}}} \quad (4.6)$$

Таким образом, получается что, при проявлении этой структуры можно получить всего три различных профиля в резисте, что продемонстрировано на рис.4.5. Если γ_{fit} больше контрастности резиста γ , то профиль структуры вогнутый, если наоборот γ_{fit} меньше контрастности резиста γ , то профиль выгнутый, а в случае, когда γ_{fit} равно γ , профиль имеет вид наклонной плоскости. Следовательно, подобрав параметр γ_{fit} так, чтобы дозовый клин получился с плоским профилем, можно определить контрастность резиста.

Используемая в эксперименте тестовая структура состоит из нескольких дозовых клиньев, рассчитанных для разных значений γ_{fit} .

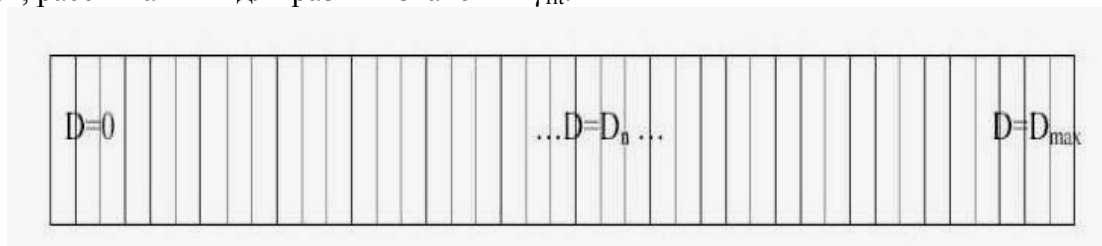


Рис. 4.4. Схематическое изображение дозового клина.

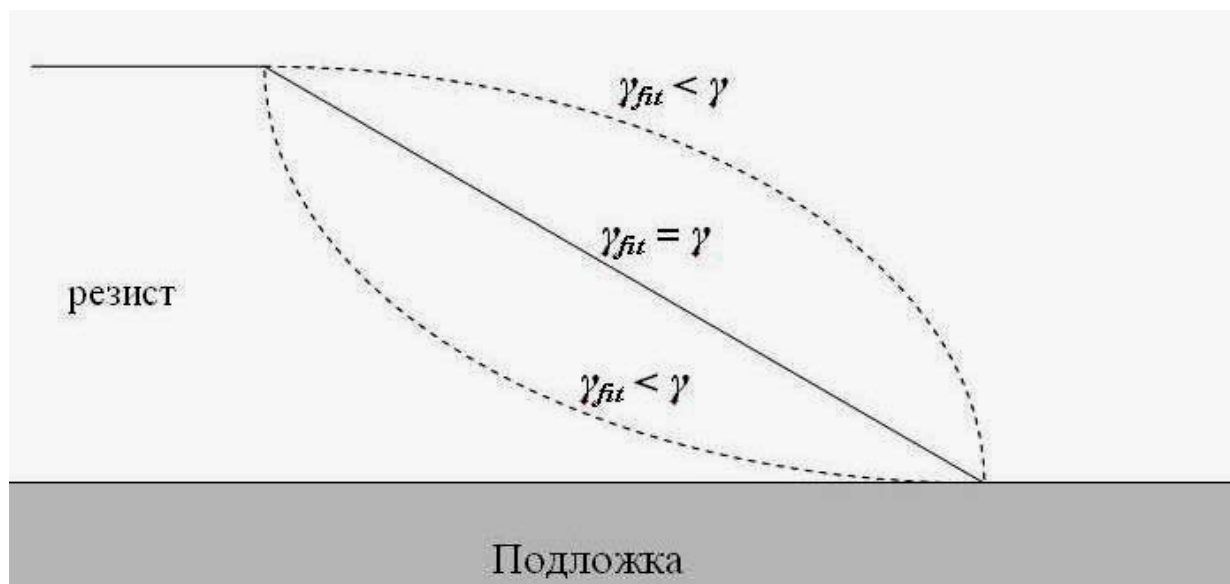


Рис. 4.5. Зависимость формы профиля дозового клина после проявления от соотношения значений параметра γ_{fit} и контрастности γ .

Это позволяет после проявления тестовой структуры сразу получить значение контрастности, определив клин, имеющий плоский профиль.

Таким образом, задача определения контрастности сводится к задаче нахождения плоского профиля тестовой структуры. Для решения этой задачи удобно использовать

оптический микроскоп, оснащенный световым фильтром, и цифровую фотокамеру. Разные профили клиньев дадут разные интерференционные картины - с чередующимися светлыми и темными полосами. Картина с равноудаленными полосами соответствует плоскому клину. На рис. 4.6 показаны интерференционные картины от клиньев из резиста П(ММА-ММА) сополимера, справа цифрами указано значение подгоночного параметра γ_{fit} . Из рисунка определяем контрастность: $\gamma = 2.5$.

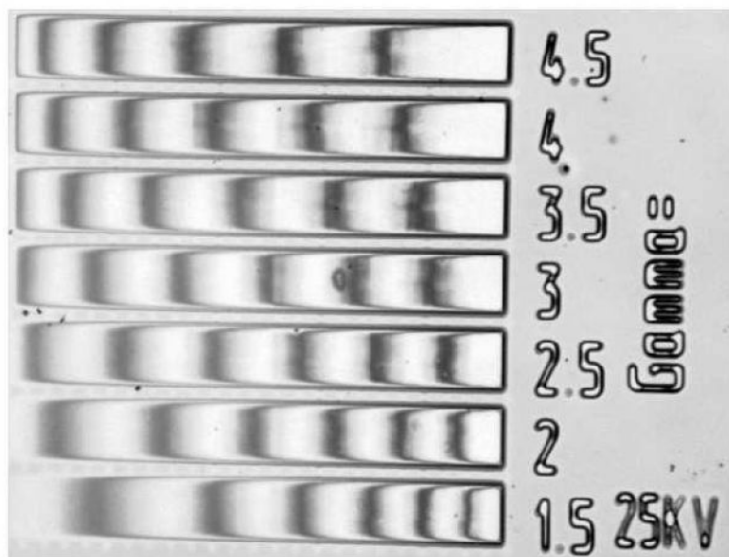


Рис. 4.6. Интерференционные картины от клиньев в резисте с разными профилями. Изображение проявленной тестовой структуры, полученное с помощью цифровой камеры в оптическом микроскопе через красный светофильтр.

3. Экспериментальная часть.

3.1. Подготовка подложек и микроскопа.

Выбор толщины резиста, режимов нанесения и сушки.

Для выполнения работы будет использоваться электронный резист PMMA A6 495. Перед выполнением работы просмотрите на сайте производителей резиста PMMA (MICRO CHEM) приложение к методическому пособию - **PMMA Data Sheet**.

495PMMA A Resists Solids: 2% - 6% in Anisole

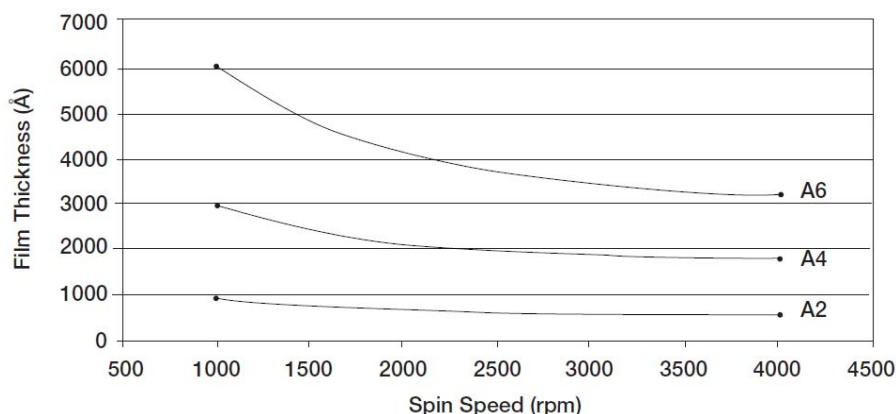


Рис. 4.7. Зависимость толщины резиста от скорости вращения центрифуги (об/мин)

Из приложения PMMA Data Sheet определите необходимые параметры:

- количество оборотов в минуту Spin Speed (об/мин) (рис.4.7), которые нужно выставить на спиннере, чтобы получить толщину 1мкм для резиста PMMA A6 495 и время раскручивания;
- температуру и время сушки резиста на hot plate.

Для получения резиста заданной толщины можно наносить и сушить его несколько раз. После того, как резист будет нанесен, для экспонирования резиста в электронном микроскопе необходимо выбрать приблизительную чувствительность Sensitivity, для задания этого параметра в программу Nanomaker. Найдите значение этого параметра (e - beam: Dose) в PMMA Data Sheet, возьмите наименьшее значение. После экспонирования резиста необходимо будет его проявить. Согласно PMMA Data Sheet, будем использовать проявитель IPA:MIBK=3:1 и время проявления 20-30 с (IPA - изопропанол, MIBK - метил изобутил кетон).

3.2 Подготовка файла “дозовый тест” в редакторе Nanomaker.

При создании дизайна структуры в редакторе Nanomaker нужно учитывать ее размеры и характерный размер наименьшего элемента. В соответствие с этим подбирается нужное увеличение и, таким образом, устанавливаются границы поля рисования. Центр поля рисования совпадает с координатами (0,0) в поле редактора. В нашем случае мы будем рисовать довольно большие структуры. Предлагается выставлять на электронном микроскопе увеличение x200 и соответствующее поле будет иметь размеры 410×360 микрон по осям X и Y, соответственно. Если нарисовать структуру за границами поля, то она не будет проэкспонирована.

Для начала дизайна структуры откройте редактор Nanomaker и создайте новый файл: File- New Data Base. Сохраните созданный файл на диске, выберите расширение GDB. Нарисуйте прямоугольник (кнопка Rectangle на панели слева) размером, например, 5×7 микрон. Нажмите кнопку Select Mode на панели слева и выделите созданный прямоугольник. Далее необходимо задать слой в котором будет находиться этот прямоугольник, и дозу экспонирования в процентах. Для этого идем в меню Edit-Change Attributes. В появившемся окне выбираем операцию SET и для дозы ставим 100 в строке Dose[%], в строке Layer number ставим, например, 1. Нажимаем ОК, теперь наш прямоугольник находится в слое 1 и имеет дозу, равную 100%.

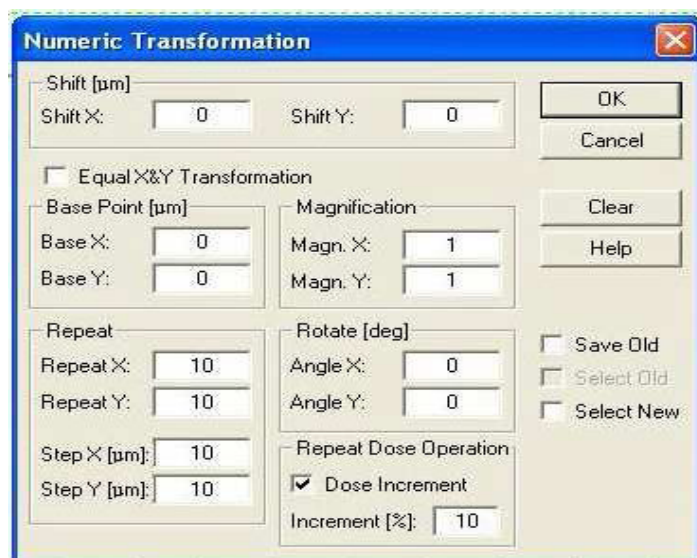


Рис. 4.8. Создание матрицы из элементов 10×10 с шагом 10 мкм по обеим осям и линейным возрастанием дозы на 10%.

Далее необходимо создать массив из таких прямоугольников с линейно увеличивающейся дозой от 100% до 1000%, например матрицу из прямоугольников, размером 10×10 . Для этого снова выделяем исходный прямоугольник и идем в меню Edit - Transform - Numeric.

Появляется окно Numeric Transformation (рис. 4.8), в котором мы задаем операцию повторения структуры 10 раз по оси X (Repeat X: 10) и 10 раз по оси Y (Repeat Y: 10) с шагом 10 мкм по оси X (Step X [мкм]). Аналогично по оси Y, задаем также линейное увеличение дозы от элемента к элементу, равное 10% (Dose Increment). Нажимаем ОК. На экране появится матрица из прямоугольников. При помощи сочетания клавиш Alt+G можно посмотреть дозу и номер слоя каждого элемента. Проверьте, что доза возрастает линейно от элемента к элементу. При помощи той же команды Edit - Transform - Numeric переместите весь массив в центр начала координат, предварительно его выделив. Можно так же добавить какую-нибудь надпись, чтобы обозначить верх структуры, например, Dose Test, это делается при помощи кнопки Text на панели слева, в появившемся окне вводится желаемая надпись. Пример дозового теста показан на рис. 4.9.

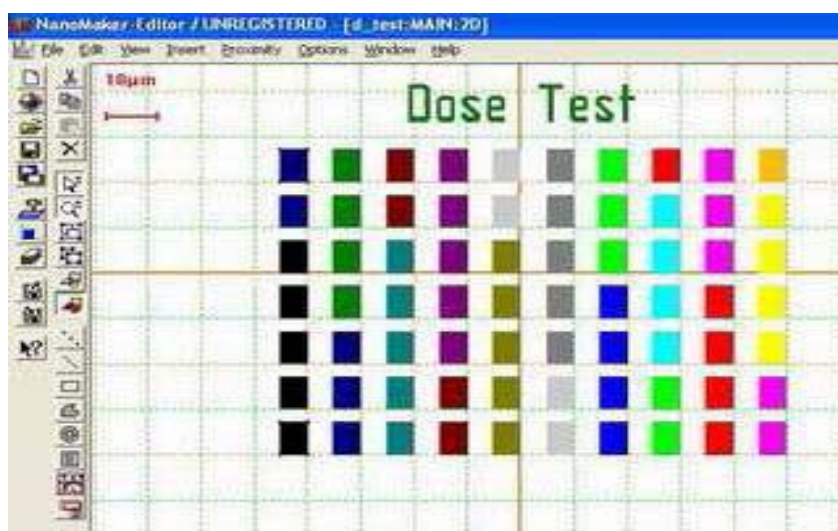


Рис. 4.9. Пример дозового теста - матрица 10×7 с шагом 10 мкм по обеим осям и линейным возрастанием дозы.

3.3 Проектирование и экспонирование файла “дозовый клин” в редакторе Nanomaker.

Создайте новый файл в программе Nanomaker и сохраните его. Создайте в этом файле вытянутый прямоугольник размерами 5×30 микрон. При помощи функции Edit - Change Attributes задайте этому прямоугольнику дозу, равную 1% и слой, в котором собираетесь создавать структуру. Далее при помощи функции Edit - Transform - Numeric создайте массив из прямоугольников размером 1×60 с линейно возрастающей дозой от элемента к элементу - 1%.

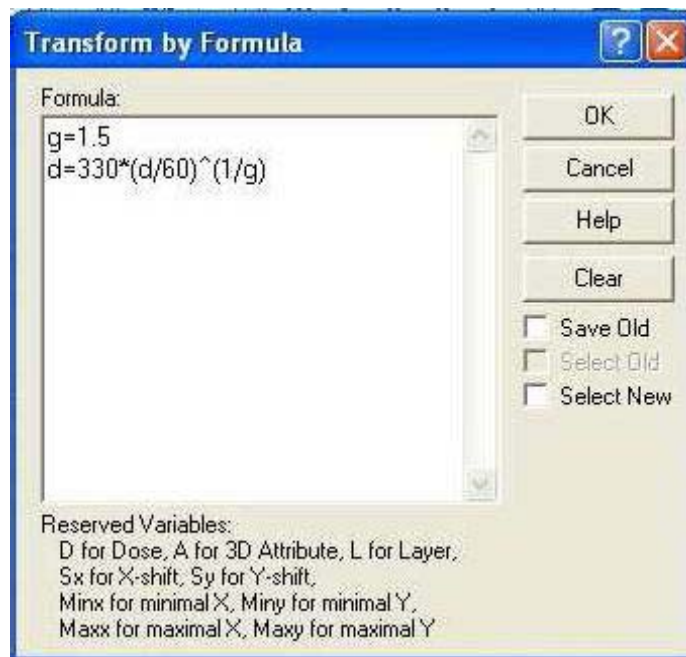


Рис. 4.10. Пример использования преобразования по формуле.

Таким образом, мы при помощи дозы задали нумерацию элементов с 1-го по 60-й. Теперь применим ко всем элементам массива преобразование дозы по формуле (4.5). В нашем случае $N=60$, а $n=d$, т.е. просто доза каждого прямоугольника, а D_{\max} соответствует чувствительности резиста, определенной при помощи дозового теста. Положим $\gamma_{\text{fit}} = 1.5$. Выделяем всю структуру и при помощи функции Edit - Transform – By Formula задаем преобразование дозы каждого элемента. На рис.4.10 показан пример такого преобразования для $N=60$, $\gamma_{\text{fit}} = 1.5$, $D_{\max}=330$. По аналогии с этим примером сделайте несколько дозовых клиньев в диапазоне γ_{fit} от 1.5 до 3.5 с шагом 0.5 по γ_{fit} , от 4.0 до 6.0, и от 6.5 до 8.5.

Постарайтесь разместить несколько структур в поле рисования 410×360 микрон. Пример готового файла такого типа представлен на рис.4.11, для удобства слева проставлены значения γ_{fit} для каждого клина, а также введены равноудаленные метки. Загрузка образца в электронный микроскоп, настройка микроскопа, экспонирование и проявление осуществляются точно также как было описано в Лабораторной работе №2 (стр. 41-44).

После того, как образец будет проявлен, внимательно рассмотрите его в оптический микроскоп. Найдите значение γ_{fit} , при котором интерференционные полосы равноудалены. Определите контрастность резиста.

На рис. 4.12 показано изображение интерференции от клиновой структуры, полученное при помощи оптического микроскопа.

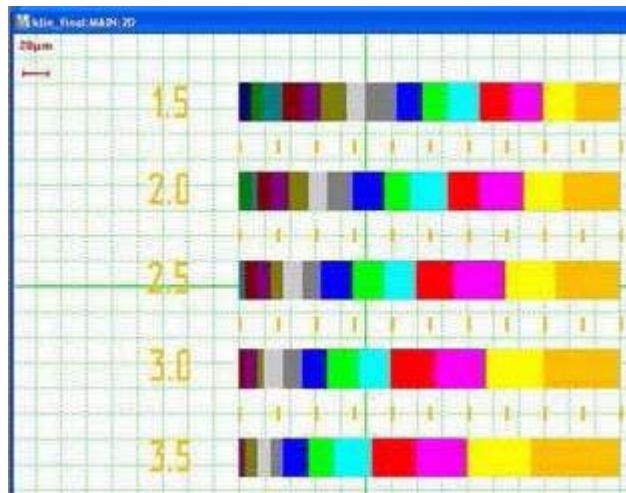


Рис.4.11. Пример дозовых клиньев с различными значениями γ_{fit} .

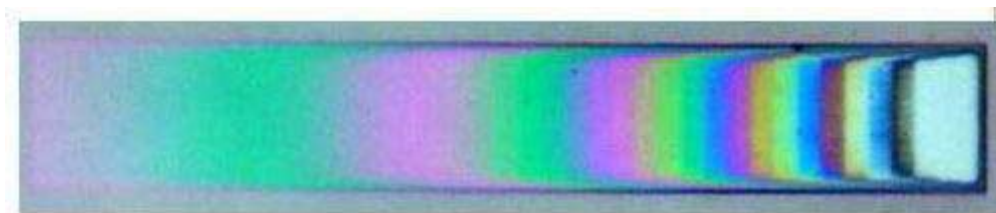


Рис. 4.12. Вид дозового клина в оптический микроскоп.

Порядок выполнения работы.

- подготовка подложек и микроскопа; - выбор толщины резиста, режимов нанесения и сушки;
- подготовка и экспонирование файла “дозовый тест” в редакторе Nanomaker;
- проектирование и экспонирование файла “дозовый клин” в редакторе Nanomaker.

4. Контрольные вопросы:

1. Что такое чувствительность резиста и контрастность? Что такое дозовая кривая? Нарисуйте дозовую кривую для позитивного резиста, отметьте на ней определения контрастности.
2. Опишите метод определения чувствительности и контрастности, предлагаемый в этой работе.
3. Какие параметры нанесения резиста на спиннере и сушки на hot plate? Какую чувствительность резиста будем задавать в программу Nanomaker? (Выпишите все необходимые для работы параметры отдельно.)

5. Что нужно для защиты лабораторной работы.

Содержание отчета (реферат).

1. Сведения о технологических режимах подготовки резистивной маски (нанесение, сушка, проявление) с указанием всех параметров и (если таковые были) описанием отклонений от методики.
2. Параметры, задаваемые в программе NanoMaker.
3. Микрофотографии полученных наноструктур.

6. Список литературы.

1. [Сивухин Д. В.](#) Общий курс физики.— М.— Т.IV. Оптика.
2. <http://physics.spbstu.ru/forstudents/lectures/ivanov/opt2-6.pdf>
3. Процессы и модели нано/микро структурирования:
http://ftn-mipt.itp.ac.ru/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=47&Itemid=69
4. «Микролитография. Принципы, методы, материалы» У.Моро // "Мир", Т 1-2 (1990).
5. « Современная фотолитография. Новые материалы электроники и оптоэлектроники для информационно-телекоммуникационных систем».
С.В. Зеленцов, Н.В. Зеленцова. Нижний Новгород 2006
6. «Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication»
edited by P. Rai-Choudhury, SPIE, Chapter 2, (1997)
7. microchem.com/pdf/PMMA_Data_Sheet.pdf