

**Лабораторные работы по теме
«Электронно-лучевая литография»**

Теоретические основы электронно-лучевой литографии

Введение

Литография — это метод получения заданной структуры на поверхности с использованием облучения пленки резиста заряженными частицами или коротковолновым электромагнитным излучением. По способу воздействия литография разделяется на *фотолитографию* (облучение ультрафиолетовым излучением), *рентгеновскую литографию* (облучение рентгеновским излучением), *электронно-лучевую* (облучение электронами) и *ионно-лучевую* (облучение ионами).

Резист — материал, изменяющий свои свойства под действием коротковолнового электромагнитного излучения и ускоренных заряженных частиц. В процессе электронной литографии используется изменение растворимости резиста в специфических растворителях под действием электронов. Принято разделять резисты на *позитивные* и *негативные*. В случае позитивных резистов растворимость увеличивается под действием облучения, а в случае негативных — уменьшается.

Процесс литографии можно разделить на несколько этапов:

- 1) Нанесение резиста на подложку (рис.1 а)
- 2) Воздействие заряженными частицами или электромагнитным излучением - экспонирование резиста (рис.1 б)
- 3) Растворение проэкспонированного резиста (в случае позитивного резиста) - проявка (рис.1 в)
- 4) Напыление материала на подложку (рис.1 г1) либо травление подложки, непокрытой резистом (рис.1 г2)
- 5) Удаление не проэкспонированного резиста (рис.1 д)

При необходимости получения многослойной структуры этапы литографии могут повторяться неоднократно.

Рассмотрим последовательно все перечисленные этапы.

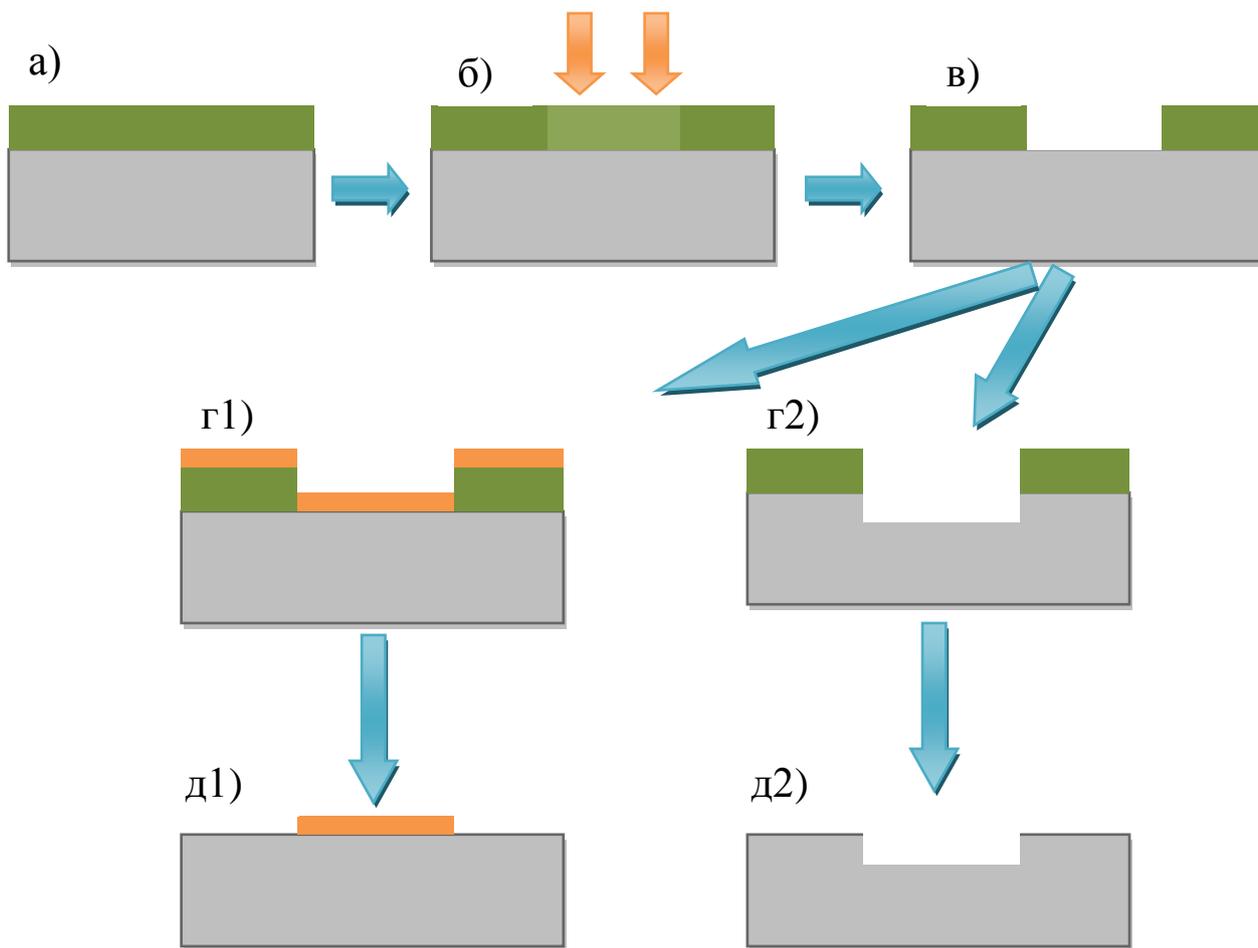


Рис. 1. Основные этапы процесса литографии на примере позитивного резиста

Нанесение резиста на подложку

В современной технологии литографии для получения тонкой пленки резиста используется метод нанесения жидкого слоя на вращающуюся подложку (spin-coating). Раствор резиста помещается на поверхность подложки, вращающейся с большой скоростью, как правило, частота вращения составляет порядка 10^3 - 10^4 об/мин. Под действием центробежных сил раствор растекается по всей площади и каплями отрывается с краев подложки, при этом происходит испарение растворителя со всей площади слоя раствора. При уменьшении толщины слоя относительное изменение концентрации раствора в результате

испарения растворителя становится все более заметным. Испарение растворителя, как правило, приводит к увеличению вязкости раствора, что в свою очередь, приводит к уменьшению скорости растекания под действием центробежных сил. Таким образом, при определенной толщине слоя процесс растекания прекращается и в дальнейшем происходит лишь испарение растворителя из нанесенного слоя. На конечную толщину пленки влияют два конкурирующих процесса: растекание под действием центробежных сил и увеличение концентрации раствора в результате испарения растворителя. Таким образом, толщина полученного слоя резиста определяется вязкостью исходного раствора, скоростью испарения растворителя и частотой вращения подложки. Для раствора резиста в заданном растворителе необходимая толщина пленки достигается подбором концентрации раствора и частоты вращения. Увеличение концентрации раствора приводит к увеличению толщины пленки при той же скорости вращения. Увеличение частоты вращения приводит к уменьшению толщины пленки при заданной концентрации раствора. Требуемая конечная толщина пленки резиста зависит от его марки и способа экспонирования и может составлять от нескольких нанометров до нескольких микрон.

Экспонирование резиста

Экспонирование резиста, как упоминалось ранее, может производиться заряженными частицами или электромагнитным излучением. В случае органических резистов в основе изменения свойств лежит полимеризация, либо разрыв полимерных цепочек. Позитивный резист представляет собой полимер (например полиметилметакрилат) в котором при экспонировании происходит разрыв молекул. Негативный резист, как правило, полимеризуется при экспонировании.

Экспонирование структуры может производиться последовательно, путем сканирования от точки к точке (рис. 2а) или одновременно всей структуры (рис. 2б).



Рис. 2. Способы экспонирования резиста.

Первый способ экспонирования может быть реализован, как путем перемещения подложки с резистом, так и путем сканирования сфокусированным пучком частиц или электромагнитного излучения. Данный способ позволяет получить структуры произвольной формы, однако отличается большой длительностью процесса экспонирования, в особенности при сканировании механическим перемещением образца. Для одновременного воздействия на все точки экспонируемой структуры используется шаблон – *маска*, повторяющий форму экспонируемой структуры (рис. 2б), который устанавливается непосредственно над подложкой с резистом. При экспонировании вся площадь облучается параллельным пучком, и участки резиста не закрытые маской экспонируются. Данный способ экспонирования отличается большой производительностью, однако набор экспонируемых структур ограничен имеющимися масками. Как правило, данный способ применяется при серийном производстве однотипных структур.

В электронно-лучевой литографии используется последовательное воздействие сфокусированным электронным пучком на точки экспонируемой структуры. При этом переход от точки к точке может осуществляться путем отклонения пучка электронов, что позволяет производить сканирование с высокой скоростью. Для осуществления процесса экспонирования необходим источник электронов, система фокусировки электронного пучка, отклоняющая система для сканирования пучком по поверхности резиста и система

отключения электронного пучка, которая необходима, чтобы избежать экспонирования участков резиста между элементами структуры в процессе перемещения пучка. Большинство перечисленных элементов присутствуют в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ). В штатном режиме СЭМ выполняет построчное сканирование электронным пучком, необходимое для получения изображения, поэтому экспонирование резиста в СЭМ требует установки дополнительного устройства, выполняющего сканирование произвольного набора точек.

Основным параметром процесса экспонирования является *доза экспонирования* – энергия воздействия на единицу площади резиста. В электронной литографии часто используется величина заряда электронов, воздействующих на единицу площади резиста (мкКл/см^2). Существует пороговая доза экспонирования, необходимая для изменения скорости растворения резиста.

Необходимо помнить, что всегда существует размытие электронного пучка вследствие рассеяния электронов в пленке резиста, что приводит к частичному облучению областей резиста, граничащих с точками облучаемой структуры. При увеличении дозы экспонирования выше пороговой размер получаемой структуры может увеличиваться за счет полного экспонирования этих областей. Размытие пучка ограничивает минимально возможный размер элементов, который могут быть получены с помощью литографии.

Проявка

В процессе экспонирования позитивного резиста происходит разрыв цепочек полимера в экспонируемой области. Образующиеся обрывки молекулы и мономеры легко растворяются в специфическом растворителе, в то время как исходный полимер в этом же растворителе практически нерастворим. Данный растворитель называется *проявителем*. В случае негативного резиста в проэкспонированной области образуется полимер, который не растворяется в

проявителе. Для простоты будем рассматривать в дальнейшем позитивный резист.

В процессе проявки важным фактором является время воздействия проявителя на резист. Очевидно, что это время должно быть достаточным для полного растворения проэкспонированного резиста. Однако неограниченное увеличение времени воздействия проявителем приводит к искажению формы полученной структуры. Как упоминалось ранее, размытие электронного пучка приводит к частичному облучению участков резиста вблизи с экспонируемой структурой. Скорость растворения резиста на этих частично проэкспонированных участках хотя и значительно меньше, чем у резиста проэкспонированного полностью, но больше чем у исходного резиста. Как следствие, увеличение времени проявки приводит к растворению резиста в этих областях и увеличению размеров элементов структуры. Для ограничения времени воздействия проявителя необходимо его своевременное удаление с поверхности резиста. Для этого используется растворитель (stopper), который не растворяет ни исходный, ни проэкспонированный резист.

Напыление материала

Напыление используется, как правило, для получения контактов и токопроводящих дорожек. С этой целью используется вакуумное распыление металла. Кроме того используется напыление диэлектриков для формирования изоляции. Необходимо помнить, что толщина напыленного материала должна быть меньше толщины пленки резиста (рис.3 а). В противном случае пленка напыленного материала на проэкспонированных и непроэкспонированных областях будет соединяться (рис.3 б), что затруднит удаление лишнего материала при растворении оставшегося резиста.



Рис. 3. Выбор толщины напыляемого материала

Травление участков подложки не покрытых резистом

Под травлением обычно подразумевается химическое растворение материала с целью его удаления. В результате химической реакции материала с реагентом (травителем) образуются соединения, которые легко удаляются из области реакции путем растворения или испарения. Травление подложки сквозь окна в резисте может осуществляться как в жидком травителе, так и в газовой фазе или плазме. При этом важную роль играет выбор резиста, устойчивого к выбранному методу травления.

Удаление оставшегося резиста

Удаление пленки резиста после напыления материала называется «взрыв» (lift-off). Для этого используется растворитель, в котором растворяется исходный и проэкспонированный резист. Для ускорения процесса растворения часто используется возбуждение волн в растворителе на ультразвуковой частоте.

Контрольные вопросы.

1. Что такое электронная литография?
2. Какие виды литографии Вы знаете?
3. Каковы основные этапы литографии?
4. Чем отличается позитивный и негативный резисты?
5. Что такое доза экспонирования?
6. Каким образом можно варьировать толщину пленки резиста?
7. Для чего используется проявитель?
8. Какое свойство резиста используется в процессе литографии?
9. Чем определяется минимально возможный размер элементов, который могут быть получены с помощью литографии?
10. Каковы критерии выбора резиста?

Лабораторная работа № 1.

Определение дозовой чувствительности позитивного резиста РММА

Цель работы:

Определение пороговой дозы, необходимой для экспонирования резиста РММА 950К электронным пучком

Задачи:

- 1) Изучение конструкции и принципов работы системы электронной литографии. Знакомство с программным обеспечением.
- 2) Экспонирование и проявка тестовых структур на образце резиста
- 3) Определение пороговой дозы экспонирования для различных параметров электронного пучка

Перед началом работы необходимо ознакомиться с теоретическими основами электронной литографии и сканирующей электронной микроскопии, а также с руководством по эксплуатации сканирующего электронного микроскопа и системы электронной литографии.

Все операции с образцом, а также операции в вакуумной камере электронного микроскопа проводятся в перчатках.

Практические рекомендации по определению дозовой чувствительности резиста

Дозовой чувствительностью резиста называют минимальную пороговую дозу, необходимую для полного экспонирования пленки резиста. Для определения пороговой дозы экспонирования необходимо провести экспонирование образца резиста с различными дозами, затем проявить проэкспонированную структуру и определить толщину резиста.

Экспонирование «дозового клина»

Для определения чувствительности резиста в электронной литографии, как правило, используют экспонирование тестовой структуры типа «дозовый клин». Данная структура представляет собой набор прямоугольников с различной дозой экспонирования (рис. 1а), расположенных вплотную друг к другу таким образом, что доза экспонирования увеличивается слева направо с постоянным приращением (рис. 1б).

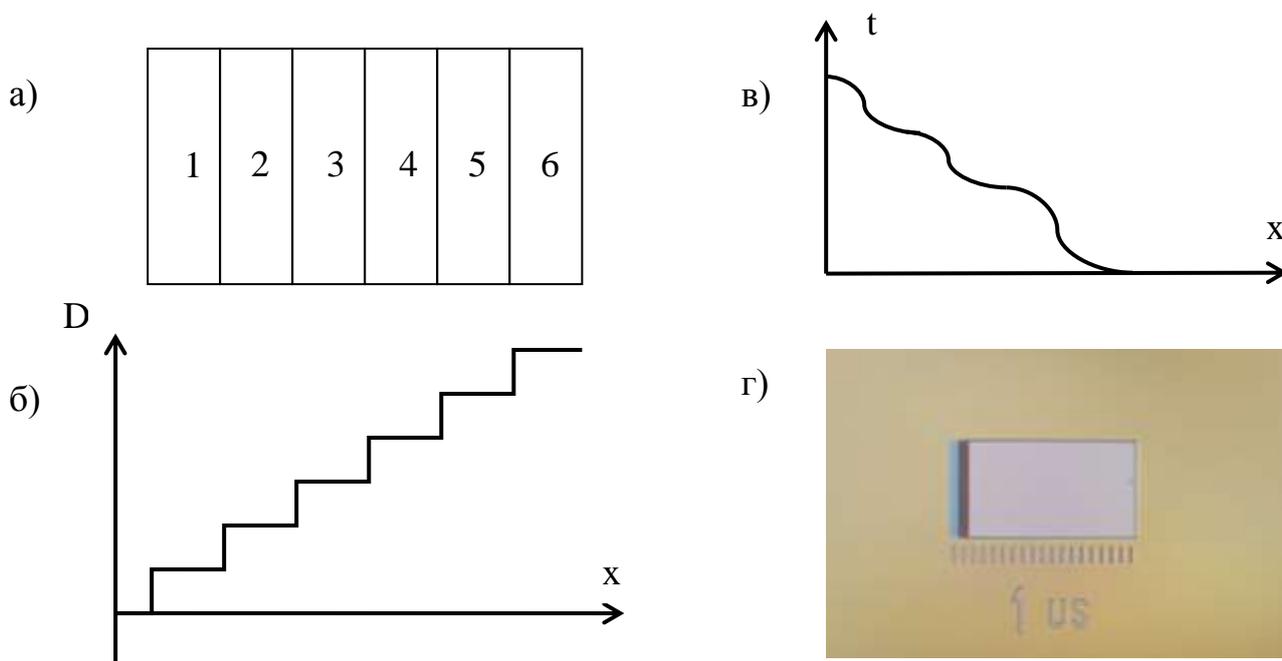


Рис. 1. «Дозовый клин»: а) форма экспонируемой структуры, б) зависимость дозы экспонирования от координаты, в) зависимость толщины проявленного резиста от координаты, г) снимок «дозового клина» в оптический микроскоп

После экспонирования и проявки такой структуры формируется клин, состоящий из набора прямоугольников резиста различной толщины (рис. 1в). Для дозы выше порогового значения толщина резиста равна нулю. Таким образом, экстраполируя к нулю зависимость толщины от дозы можно определить точную величину пороговой дозы экспонирования.

Доза экспонирования в процессе электронной литографии определяется током электронного пучка, временем воздействия в одной точке и расстоянием между точками экспонирования и может быть легко вычислена из этих параметров.

Проявка резиста РММА

РММА – полиметилметакрилат (ПММА), позитивный резист. Данный тип резиста растворяется в таких органических растворителях как: ацетон, хлорбензол, анизол и т.п. и весьма устойчив к действию этилового и изопропилового спиртов. В качестве проявителя для ПММА используются смеси на основе изопропилового спирта с растворителями, способными вымывать молекулы, образующиеся при облучении ПММА: метилизобутилкетон, толуол, водой. Чистый изопропиловый спирт используется для смывки проявителя и остановки процесса проявки.

Определение дозовой чувствительности

Для определения пороговой дозы экспонирования, как упоминалось выше, необходимо экстраполировать к нулю зависимость толщины от дозы, определенную из «дозового клина». На практике прямое измерение толщины резиста, которая составляет порядка десятков или сотен нанометров, представляет собой довольно сложную задачу. Для упрощения определения пороговой дозы используется определение толщины по интерференционной окраске пленки резиста. ПММА прозрачен практически во всем видимом диапазоне. При нанесении тонкой пленки на материал, отражающий свет в

видимом диапазоне, возникает многолучевая интерференция света, отраженного от подложки, в пленке резиста. Это явление приводит к усилению отражения света с определенными длинами волн – интерференционной окраске. При этом длина волны, соответствующая максимуму отражения, определяется показателем преломления и толщиной пленки резиста. Таким образом, изменение толщины резиста в результате экспонирования можно определить по изменению цвета интерференционной окраски проэкспонированных участков при наблюдении в оптический микроскоп (рис. 1г). Точное количественное определение толщины резиста в данном случае невозможно, однако можно определить границу области без резиста. Эта граница соответствует пороговой дозе экспонирования. Для удобства определения рядом с «дозовым» клином размещают шкалу и указывают параметры экспонирования. Экспонирование данных элементов производится с заведомо завышенной дозой, поскольку точность их размеров не играет принципиальной роли.

Задание

1. Получите у преподавателя образец кремния с нанесенным слоем резиста.
2. Установите образец в камере микроскопа. Включите ускоряющее напряжение. Отъюстируйте электронно-оптическую систему микроскопа. Добейтесь наиболее резкого и сфокусированного изображения поверхности при максимально возможном увеличении на краю образца с резистом. Помните, что в процессе сканирования резиста происходит его экспонирование.
3. В программном обеспечении системы литографии выберите структуру типа «дозовый клин» и задайте параметры экспонирования: размеры области сканирования, время экспонирования одной точки и шаг между точками.

4. Не включая электронный пучок, переместите образец таким образом, чтобы края, облученные в процессе фокусировки, оказались за пределами экспонируемой области.
5. Проведите экспонирование с выбранными параметрами. Повторите экспонирование для нескольких ускоряющих напряжений, смещая образец при каждом экспонировании так, чтобы структуры с различными параметрами не перекрывались.
6. Достаньте образец из электронного микроскопа.
7. Подготовьте проявитель (смесь изопропилового спирта с водой 8:1) и изопропиловый спирт для остановки проявки.
8. Опустите образец пинцетом в проявитель на несколько секунд, затем смойте проявитель в изопропиловом спирте и высушите образец струей сухого воздуха или азота.
9. Используя оптический микроскоп, определите пороговую дозу экспонирования для всех структур.
10. Повторите процедуру проявки несколько раз, каждый раз определяя пороговую дозу экспонирования, используя оптический микроскоп.

Отчет должен содержать:

- 1) Таблицу параметров экспонирования
- 2) Снимки полученных структур в оптический микроскоп
- 3) Зависимость пороговой дозы экспонирования от ускоряющего напряжения
- 4) Зависимость пороговой дозы экспонирования от времени проявки
- 5) Выводы

Лабораторная работа № 2.

Определение предельного разрешения литографии для резиста РММА

Цель работы:

Определение предельного разрешения, достижимого в процессе электронной литографии на резисте РММА 950К.

Задачи:

- 1) Изучение конструкции и принципов работы системы электронной литографии. Знакомство с программным обеспечением.
- 2) Экспонирование и проявка тестовых структур на образцах резиста.
- 3) Напыление металла и удаление оставшегося резиста.
- 4) Определение предельного разрешения для различных толщин резиста и параметров электронного пучка.

Перед началом работы необходимо ознакомиться с теоретическими основами электронной литографии и сканирующей электронной микроскопии, а также с руководством по эксплуатации сканирующего электронного микроскопа и системы электронной литографии.

Все операции с образцом, а также операции в вакуумной камере электронного микроскопа проводятся в перчатках.

Практические рекомендации по определению предельного разрешения резиста.

Предельным разрешением литографии обычно называют минимальный размер элемента, который может быть получен с использованием данного резиста.

Существует несколько способов определения предельного разрешения литографии на резисте:

- 1) Получение точки минимального диаметра
- 2) Получение линий минимальной ширины
- 3) Получение минимального расстояния между линиями

На минимальный размер структуры, получаемой в процессе электронной литографии, влияет ряд параметров, таких как диаметр электронного пучка, которым проводится облучение, размеры области рассеяния электронов в резисте и подложке и величина выхода отраженных электронов.

При описании радиального распределения интенсивности облучения в резисте обычно используется модель, состоящая из двух гауссианов:

$$I(\rho) = \frac{1}{\pi(1+\eta)} \left\{ \frac{1}{\alpha^2} \exp\left(-\frac{\rho^2}{\alpha^2}\right) + \frac{\eta}{\beta^2} \exp\left(-\frac{\rho^2}{\beta^2}\right) \right\}$$

где η – вклад отраженных электронов из подложки в экспонирование, α – размер области рассеяния первичного пучка в резисте, β – размер рассеяния пучка в подложке. Как известно из теории взаимодействия электронов с веществом размеры области рассеяния определяются энергией электронов, а выход отраженных электронов – составом материала. Помимо процессов рассеяния электронов на разрешение также влияет качество фокусировки электронного пучка оператором.

Тестовая структура, используемая в данной работе для определения разрешения, представляет собой набор дорожек различной ширины, повторяющихся с разным периодом, а также точек, экспонируемых различной дозой.

В случае электронной литографии предельное разрешение, как правило, составляет величину менее 100 нм, что делает невозможным контроль получившихся структур в оптический микроскоп. Для определения разрешения производится напыление металла и последующее удаление резиста. Размеры металлических дорожек и точек определяется методом сканирующей электронной микроскопии.

Задание

1. Получите у преподавателя образцы кремния с нанесенным слоем резиста.
2. Установите образцы в камере микроскопа. Включите ускоряющее напряжение. Отъюстируйте электронно-оптическую систему микроскопа. Добейтесь наиболее резкого и сфокусированного изображения поверхности при максимально возможном увеличении на краю образца с резистом. Помните, что в процессе сканирования резиста происходит его экспонирование.
3. В программном обеспечении системы литографии выберите структуру типа «дозовый клин» и задайте параметры экспонирования: размеры области сканирования, время экспонирования одной точки и шаг между точками.
4. Не включая электронный пучок, переместите образец таким образом, чтобы края, облученные в процессе фокусировки, оказались за пределами экспонируемой области.
5. Проведите экспонирование с выбранными параметрами. Повторите экспонирование для нескольких ускоряющих напряжений, смещая образец при каждом экспонировании так, чтобы структуры с различными параметрами не перекрывались.
6. Достаньте образцы из электронного микроскопа.

7. Подготовьте проявитель (смесь изопропилового спирта с водой 8:1) и изопропиловый спирт для остановки проявки.
8. Опустите образец пинцетом в проявитель на несколько секунд, затем смойте проявитель в изопропиловом спирте и высушите образец струей сухого воздуха или азота.
9. Используя оптический микроскоп, убедитесь в том, что экспонирование и проявка прошли успешно.
10. Под контролем преподавателя нанесите слой металла на поверхность всех образцов.
11. Проведите процедуру удаления оставшегося резиста в соответствующем растворителе.
12. Установите образцы в камере микроскопа. Включите ускоряющее напряжение. Отъюстируйте электронно-оптическую систему микроскопа. Добейтесь наиболее резкого и сфокусированного изображения.
13. Определите минимальную ширину и период неперекрывающихся металлических дорожек, а также минимальный диаметр полученных точек.

Отчет должен содержать:

- 1) Таблицу параметров образцов и экспонирования
- 2) Электронномикроскопические снимки полученных структур
- 3) Зависимости разрешения литографии от ускоряющего напряжения
- 4) Зависимости разрешения литографии от толщины резиста
- 5) Выводы