

Лекция 11. Электронно – лучевая литография.

Размеры элементов в фотолитографическом процессе принципиально ограничены длиной волны используемого излучения. Для дальнейшего уменьшения элементов ИС необходимо применение электронно-лучевой и рентгеновской литографии.

Применение электронно-лучевой литографии позволяет:

- а) получать элементы рисунка с размерами менее или равными 0,01 мкм (для фотолитографии не менее 0,5 мкм);
- б) с высокой точностью контролировать дозу электронного пучка, падающего на резист и подложку;
- в) легко отклонять и модулировать электронный пучок с высокой точностью электрическими и магнитными полями;
- г) формировать в ряде случаев топологию схемы непосредственно на пластине;
- д) автоматизировать технологию создания топологического рисунка;
- е) профилировать электронный пучок.

Существенным недостатком электронно-лучевой литографии является ее малая производительность по сравнению с оптической.

Создание субмикронной топологии требует фокусировки электронного луча в пятно диаметром около 0,01 мкм. При таких линейных размерах элементов топологии сканирование и прерывание электронного луча можно проводить только при использовании ЭВМ. Система управления при этом работает на частотах в несколько мегагерц.

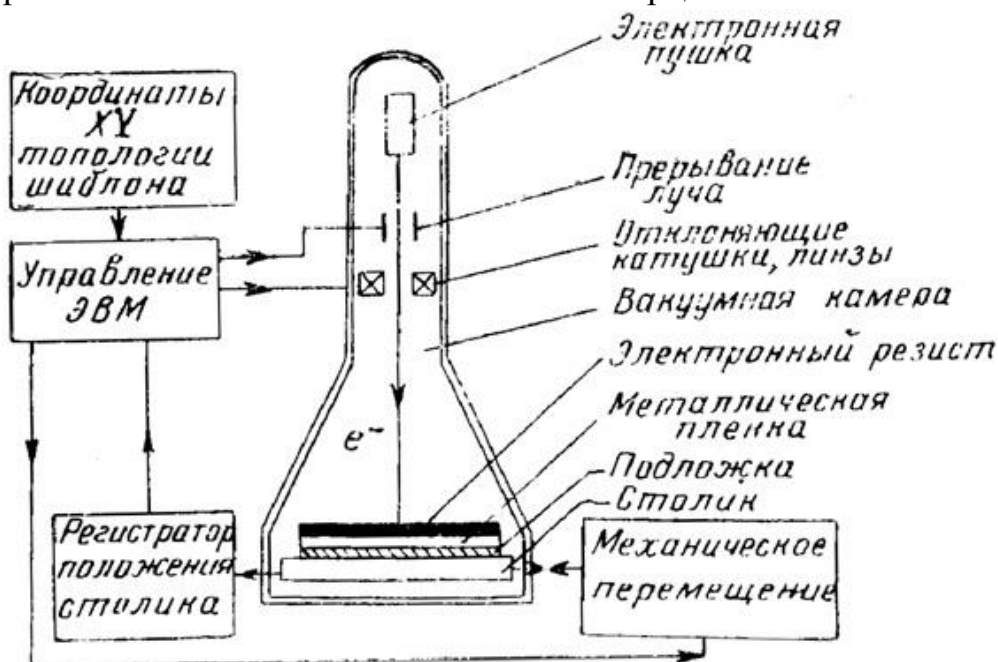


Рис. 1. Принципиальная схема электронно-лучевой литографической установки

Уменьшение диаметра электронного пучка до указанных размеров требует использования термоэлектронных пушек с плотностью тока более 10^4 А/м² и электронно-оптических немагнитных линз. Угловое сканирование электронного луча при этом ограничивается, т. е. ограничивается площадь, которую можно обработать, не меняя позицию пластины до величины порядка 10 мм. Пластина при электронно-лучевой литографии помещается обычно под электронным лучом на координатном столике (рис. 1). Для совмещения с топологическим рисунком предыдущего уровня обычно используются знаки совмещения, вытравленные предварительно в подложке. Положение этих знаков определяется по вторичным и обратно рассеянными электронами.

Электронные резисты, взаимодействие электронов с резистом и материалом подложки. К резистам, применяемым в электронно-лучевой литографии, предъявляются такие же требования, как к фоторезистам в фотолитографии. В электронных резистах обычно происходят процессы расщепления цепочки в молекулах полимера под действием ионизирующего излучения (электронного пучка). При этом происходит уменьшение молекулярного веса полимера и он становится растворимым в специальном растворителе, не действующем на высокомолекулярный материал. Такие полимеры называются позитивными электронными резистами. В негативных электронных резистах под действием облучения электронами происходят процессы образования поперечных связей в молекулах полимера и формирования сложной трехмерной структуры. Необлученные участки полимера при этом имеют значительно меньший молекулярный вес по сравнению с облученными и удаляются путем растворения. При проникновении электронного луча в резист и подложку происходит взаимодействие электронов с веществом, их упругое и неупругое рассеяние (рис. 2).

Таким образом, доза экспонирования одного участка пластины воздействует на процесс экспонирования соседних областей, что приводит к размытию профиля распределения энергии экспонирования. Это явление в электронно-лучевой литографии получило название эффекта близости.

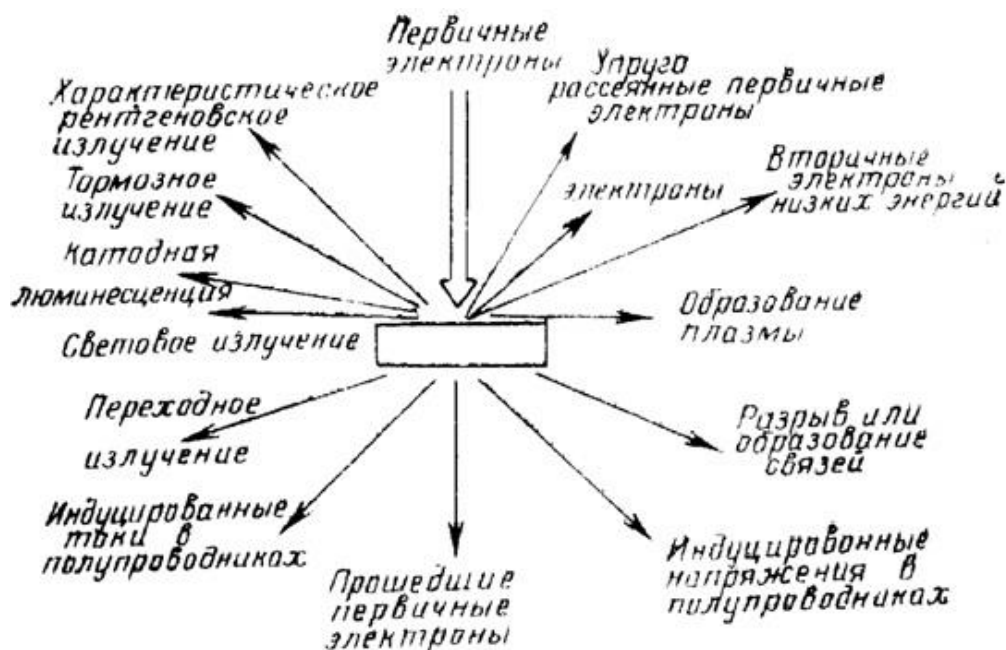


Рис. 2. Основные виды взаимодействия электронов с веществом

Технологические операции процесса электронно-лучевой литографии.

Формирование элементов топологии заданных размеров, как правило, требует нескольких перемещений электронного луча, при этом промежутки между двумя соседними положениями луча равны половине ширины луча. Луч в электроннолучевой литографии имеет обычно гауссово распределение интенсивности. Различают два основных метода формирования электронным лучом топологии ИС — векторное и растровое сканирование.

При векторном сканировании луч направляется в заданное по программе место на схеме, он включается и выключается. После окончания сканирования одного участка пластины происходит перемещение координатного столика в плоскости ХУ так, чтобы в поле действия электронного луча попал следующий участок. В системе векторного сканирования необходимо использование сложной электронной оптики, позволяющей с субмикронной точностью осуществлять перемещение электронного пучка.

Растровое сканирование, наоборот, требует прецизионного перемещения координатного столика, поскольку в этом методе электронный луч непрерывно сканирует по полю малого размера (обычно несколько десятков микрон).

Векторная сканирующая система позволяет формировать топологию ИС при помощи электронного луча изменяемой формы. Электронному лучу, проходящему через апертуру, придается определенная форма. Вторая апертура, встречающаяся на пути луча, формирует электронный пучок определенной геометрической формы в плоскости его сечения. Этот способ позволяет значительно увеличить производительность метода электронно-

лучевой литографии и довести время формирования изображения на пластине диаметром 125 мкм до нескольких минут, т. е. увеличить его на порядок. Повышение производительности может быть достигнуто с помощью одновременной обработки пластин несколькими электронными лучами.

Рентгеновская литография

Рентгеновская литография является по существу частным случаем оптической бесконтактной печати с длиной волны экспонирующего облучения в пределах 0,4—5 мкм и величиной зазора между шаблоном и пластиной порядка 40 мкм. Проявление дифракционных эффектов в этом методе за счет малой величины длины волны рентгеновского излучения сведено до минимума.

Применение метода рентгеновской литографии позволяет:

- а) одновременно получать высокое разрешение элементов топологии и высокую производительность процесса переноса изображения;
- б) уменьшить проявление эффектов рассеяния в резистах и подложке за счет малой величины энергии мягкого рентгеновского излучения.

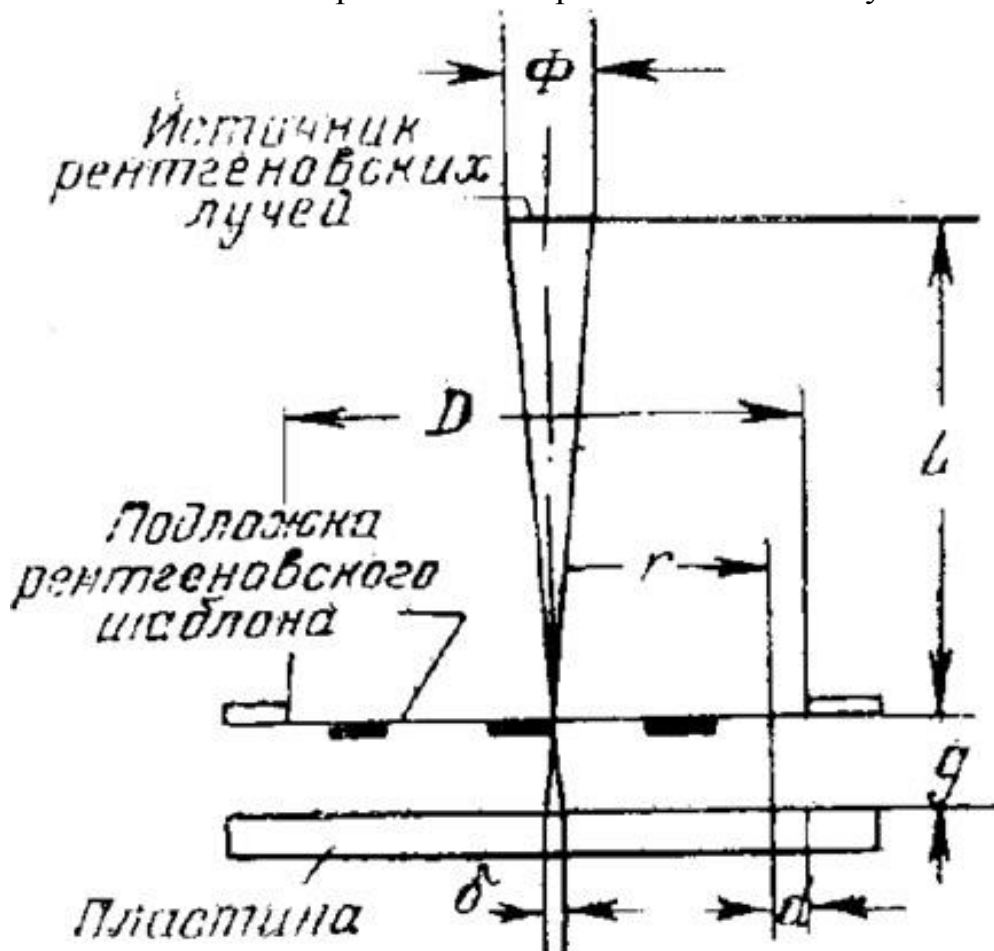


Рис. 3. Геометрические искажения в рентгенографии

К недостатку метода следует отнести так называемый геометрический эффект (рис. 3). Конечная протяженность источника рентгеновского излучения d

приводит к размытию изображения на резисте $\delta = d(g/L)$. Размытие изображения элементов топологии обычных установок рентгеновской литографии достигает величины порядка 0,2 мкм.

Рентгенолитография

Основными преимуществами применения рентгеновского излучения для литографии являются: отсутствие дифракции; отсутствие отражения и рассеяния рентгеновских лучей в резисте и подложке; малая чувствительность к загрязнениям шаблона и подложки.

При рентгенолитографии используют два вида источников излучения: мощные рентгеновские трубки и синхротроны - ускорители заряженных частиц.

Рентгеновская трубка состоит из источника электронов (электронной пушки) и металлического анода, находящихся в откачанном объеме. На анод подается ускоряющее электроны положительное напряжение от нескольких до десятков киловольт. Ударившись об анод, электрон потеряет энергию $E_1 - E_2$, где E_1 и E_2 — энергия электрона до и после столкновения. Если торможение произошло достаточно быстро, то эта энергия превратится в излучение и в соответствии с законом

$$h\nu = E_1 - E_2,$$

где h — постоянная Планка; ν — частота испускаемого рентгеновского излучения.

Если электрон теряет всю свою энергию при одном столкновении, то максимальная частота возникшего излучения определяется уравнением

$$h\nu_{\text{макс}} = eU.$$

Поскольку $\nu = c/\lambda$, где c — скорость света, а λ — длина волны излучения, то отсюда вытекает, что минимальное значение длины волны будет

$$\lambda_{\text{мин}} = \frac{hc}{eU}.$$

При $U = 50000$ В длина $\lambda_{\text{мин}}$ примерно равна 0,25 Å.

Однако лишь в редких случаях электрон теряет всю свою энергию сразу (при одном ударе); более часто на своем пути он сталкивается поочередно с несколькими атомами, теряя при каждом соударении часть энергии и таким образом порождая несколько фотонов, причем каждому из них соответствует волна, длина которой превышает $\lambda_{\text{мин}}$. Возникает так называемое *белое излучение* — сплошной (непрерывный) спектр, который имеет резкую границу в коротковолновой части и интенсивность его постепенно уменьшается в сторону более длинных волн.

Если увеличить напряжение на электродах, то это вызовет не только повышение энергии eU каждого отдельного электрона, но приведет также к увеличению числа столкновений электронов с зеркалом анода за единицу времени. В результате произойдет, с одной стороны, снижение минимального значения длины волны излучения, а с другой – общее увеличение количества образующихся фотонов, т.е. растет интенсивность излучения, притом для всех значений длин волн. На рис. 4 показано несколько кривых, иллюстрирующих зависимость интенсивности излучения от длины волны при разных значениях напряжения на электродах.

Весьма велика вероятность того, что торможение электронов не будет достаточно резким для возбуждения рентгеновского излучения – в этом случае энергия электронов пойдет на увеличение внутренней энергии анода и выделится в форме тепла. Фактически в рентгеновское излучение преобразуется менее 1% кинетической энергии электронов. Эффективность этого превращения зависит от вещества зеркала анода, причем она возрастает с увеличением атомного номера Z составляющих его атомов.

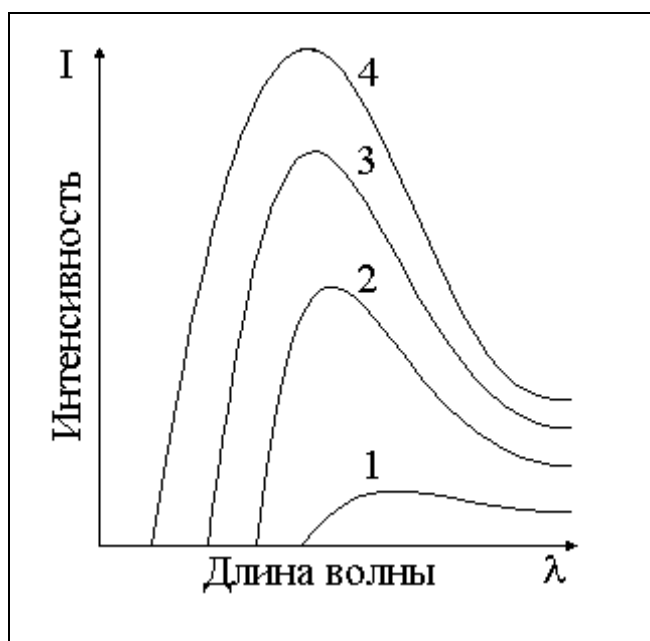


Рис.4. Непрерывный спектр рентгеновского излучения (белое излучение), полученный от вольфрамовой мишени при разных значениях напряжения на электродах: 1 – 20; 2 – 30; 3 – 40; 4 – 50 кВ

Кроме непрерывного спектра, который непосредственно зависит от потери энергии электронов, ударяющихся о зеркало анода, можно получить и тонколинейчатые спектры, определяющиеся материалом зеркала анода и представляющие так называемое характеристическое излучение (рис.5). Интенсивность этих линий может в сотни раз превышать интенсивность всякой другой линии непрерывного спектра в том же интервале длин волн.

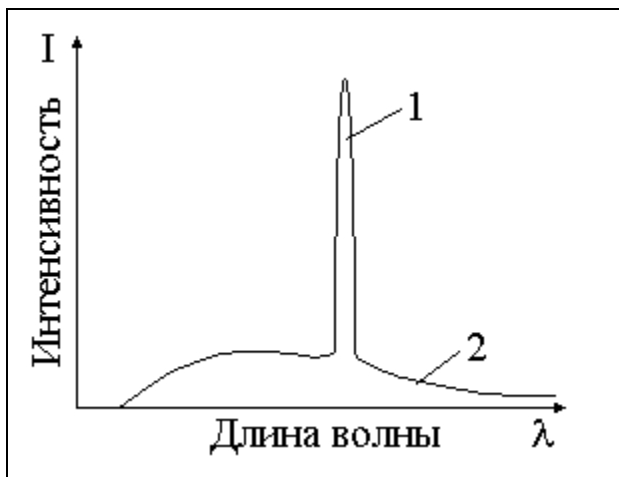


Рис.5. Спектр рентгеновского излучения: 1 – характеристическое излучение; 2 – белое излучение

Характеристическое излучение возникает, когда падающий электрон обладает достаточно большой энергией для того, чтобы выбить электрон с одной из внутренних электронных оболочек атома зеркала анода, образовавшееся вакантное место занимает электрон с более высокого энергетического уровня, а избыток энергии реализуется в виде излучения. Длина испускаемой волны определяется разностью энергий этих двух уровней, и таким образом, повышение напряжения хотя и способствует увеличению интенсивности, но не изменяет длину волны характеристического излучения анода.

Спектры характеристических волн весьма просты и классифицируются в порядке возрастания длин волн как K -, L -, M -,... - серии в соответствии с уровнем, с которого был выбит электрон. Так, линии K -серии образуются, если электрон выбит с (наиболее глубокого) K -уровня, и образовавшаяся таким образом вакансия заполняется электроном с более высокого уровня, например L или M . Если электрон выбит со следующего по глубине уровня L и замещен электроном с уровня M или N , возникают линии L -серии.

Чтобы падающий электрон смог выбить электрон с внутренней электронной оболочки атома, например K -уровня, он должен обладать энергией, превышающей некоторое минимальное значение. Минимальная разность потенциалов, которую необходимо приложить к электродам, чтобы электроны получили эту энергию, называется порогом возбуждения; он изменяется от элемента и зависит от того, насколько прочно связаны K -электроны. Так, для меди порог возбуждения равен 9 кВ, тогда как для молибдена он составляет 20 кВ.

Длины волн (в нм) характеристического излучения K -серии некоторых материалов равны: медь – 0,1541; алюминий – 0,8339; кремний – 0,7125; молибден – 0,0709; родий – 0,0613; палладий – 0,0585.

Другой вид используемого в рентгенолитографии излучения – синхротронное, создаваемое ускорителем электронов в магнитном поле при движении их по криволинейным траекториям. Синхротронное излучение имеет непрерывный спектр, максимум которого при достаточно большой энергии (до 1 ГэВ) приходится на область мягкого рентгеновского излучения.

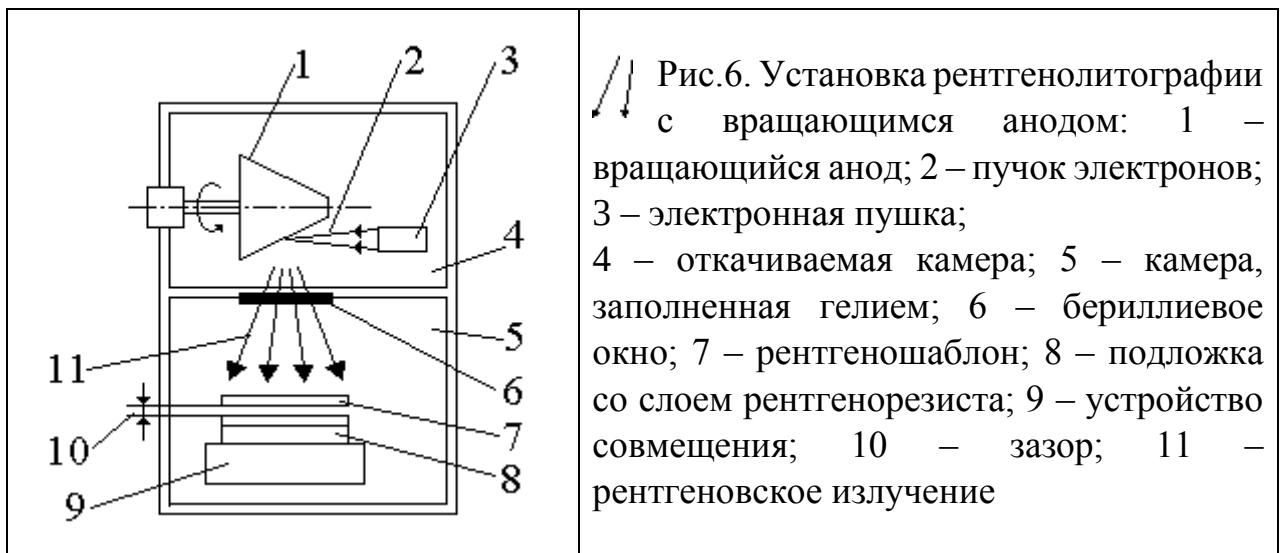
Использование синхротронного излучения в рентгенолитографии обусловлено его сильной природной коллимацией, т.е. малой расходимостью потока. В каждой точке криволинейного участка орбиты поток синхротронного излучения сосредоточен в пределах очень узкого конуса с углом вертикальной расходимости порядка нескольких угловых секунд. В результате этого при экспонировании геометрические искажения переносимого изображения оказываются незначительными.

Синхротронное излучение обладает высокой интенсивностью и превосходит по этому параметру в тысячи раз рентгеновское излучение, создаваемое мишенями (анодами). Благодаря этому экспонирование синхротронным излучением составляет единицы секунд, что обеспечивает высокую производительность рентгенолитографии. Стоимость синхротронов очень велика, поэтому необходимо использовать их на множество каналов экспонирования.

Возможности рентгенолитографии в большой степени определяются согласованием спектра излучения источника и спектров поглощения материалов, используемых для изготовления окон вывода излучения и шаблонов. Слабым поглощением обладают бериллий, карбид бора, полиимид, фоторезисты; сильным – золото, платина. Кремний, карбид и нитрид кремния имеют скачок поглощения при длине волны 0,67 нм.

Для получения рентгеновского излучения высокой интенсивности применяют рентгеновские установки с вращающимся анодом (рис. 6). Рентгеновское излучение образуется при облучении вращающегося анода 1 пучком электронов 2, поступающим с электронной пушки 3. Все эти устройства помещены в откачиваемую камеру 4. Через бериллиевое окно 6 толщиной 50 мкм излучение выводится в камеру 5, заполненную гелием, обладающим в отличие от воздуха крайне малым поглощением рентгеновских лучей. Заполнение камеры 5 гелием необходимо для отвода тепла от нагреваемых рентгеновским излучением шаблона и подложки. Подложку 8 помещают на устройство совмещения 9. Рентгеношаблон 7 отделен от подложки 8 небольшим зазором (от 5 до 40 мкм в зависимости от угла расхождения рентгеновского излучения и расстояния от анода до подложки), исключаящим их взаимное истирание.

Рентгеношаблон должен быть жестким, сохранять размеры в процессе эксплуатации, а также достаточно контрастным и хорошо пропускать рентгеновское излучение на «прозрачных» участках. В качестве основы шаблона используют тонкие (0,5 – 5 мкм) мембраны из органических материалов, кремния, бериллия, нитрида кремния, нитрида бора, а непрозрачный рисунок наносят в виде слоя золота или платины.



В рентгенолитографии используют электронорезисты (ПММА и полибутенсульфон), имеющие соответственно чувствительность 1000 и 100 мДж/см² и разрешающую способность 0,1 и 0,5 мкм.

Ионно-лучевая литография

Развитие микроэлектроники требует разработки методов формирования элементов интегральных схем с размерами меньше одного микрометра. Такие методы являются основой нового направления «субмикронной технологии», т.е. технологии создания устройств с высокой плотностью элементов, имеющих размеры до 0,1 мкм. Электронная литография практически не может удовлетворять этим требованиям из-за сильного отражения электронов от границы резист-подложка, приводящего к размытию экспонируемой линии, а также из-за низкой чувствительности и плохого контраста электронных резистов, что связано с увеличением времени экспозиции.

Указанные недостатки могут быть устранены при использовании для экспонирования ионных пучков. Процесс формирования рисунка в слое резиста с помощью ионных пучков получил название ионная литография. Процесс экспонирования ионорезиста острофокусированным ионным пучком является наиболее важным этапом при ионной литографии. Это объясняется тем, что именно процесс экспонирования является основным, определяющим необходимое разрешение и производительность. Задачи же, связанные с последующей обработкой экспонированных резистов, увеличением рабочего поля экспонируемого участка, травлением микроструктур, аналогичны тем, что встречаются в любом другом виде микролитографии.

Экспонирование резиста основано на физико-химических процессах деструкции или полимеризации материала резиста под воздействием столкновений ионов с молекулярными цепочками.

В ионной литографии для чувствительного резиста желательно выбирать такую энергию ионов, чтобы толщина пленки резиста была близка к проецированному пробегу ионов в материале резиста.

Как и в электронной литографии, ширина экспонируемой области в резисте будет больше диаметра ионного пучка по следующим причинам:

- происходит боковое рассеяние ионов при торможении в материале резиста;
- при движении ионы пучка выбивают атомы материала резиста, которые, обладая значительной энергией, сталкиваются с молекулами резиста;
- на резист воздействуют вторичные частицы, электроны и рентгеновские кванты, возникающие при торможении ионов в материале резиста.

Среди промышленных установок для ионной литографии можно выделить три типа: ионно-лучевые зондовые, проекционные и проекционные с модульным переносом изображения.

В ионно-лучевых зондовых установках поток ионов должен быть сфокусирован в пятно субмикронного размера, например диаметром 30 нм, с малыми абберациями. Электростатическое сканирование по поверхности мишени и периодическое запираение пучка позволяют обрабатывать резист, формируя требуемое изображение элементов. Литографический рисунок можно получать с шириной линии 40-70 нм. Размеры поля сканирования не превышают 1 мм², так как при больших углах отклонения значительно изменяются размеры сечения пучка. Для лучшей фокусировки поток обычно диафрагмируют, в результате чего ток в пучке снижается в 10⁶ раз, поэтому основной проблемой ионно-лучевой литографии являются высокояркостные источники.

Широкое распространение получили источники, основанные на эмиссии ионов металла с острия иглы, покрытой жидким расплавом этого металла, в сильном электрическом поле, а также источники с ионизацией молекул газа в сильном электрическом поле вблизи острия.

На рис. 7 схематически изображено устройство, снабженное источником ионов с жидкой металлической пленкой и зондовой системой. Для создания ионного пучка могут применяться расплавы различных металлов (Ga, In, Au, Al, Cs, Bi, Si, Ge, Hg) или их сплавов из Ge (12%) и Au (88%), имеющих рабочую температуру 356 0С.

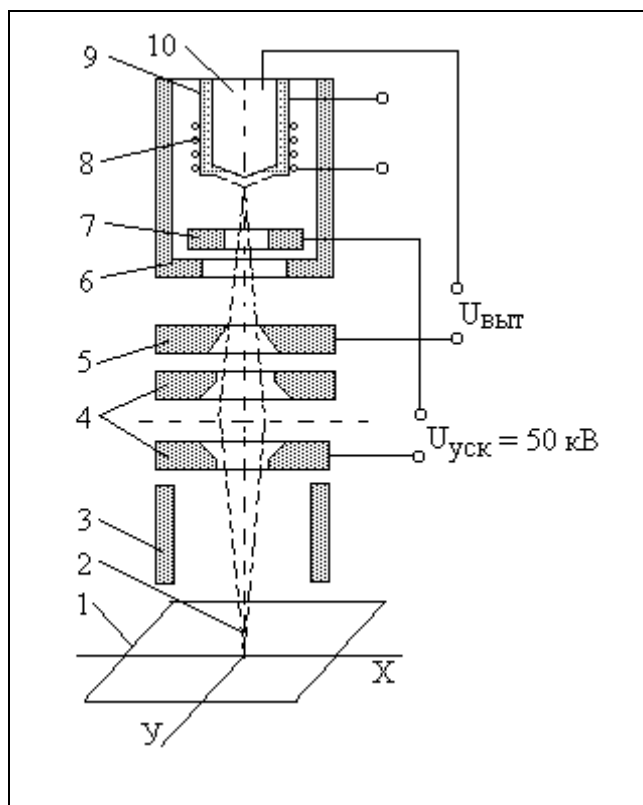


Рис.7. Схема галлиевого сканирующего зонда с жидкопленочным источником ионов: 1 – объект обработки; 2 – ионный зонд; 3 – система электростатического сканирования; 4 – ускоряющая линза; 5 – вырезающая диафрагма; 6 – экран; 7 – вытягивающий электрод; 8 – нагреватель; 9 – резервуар с расплавом галлия; 10 – вольфрамовая игла

По поверхности разогретой до рабочей температуры иглы, материал которой химически не взаимодействует с расплавом, последний поступает на эмиссионное острие. Игла имеет радиус закругления 5-10 мкм. Между иглой и экстрактором (молибденовой диафрагмой с отверстием диаметром 1,5-2 мкм) прикладывается высокий потенциал $U_{\text{выт}} = 5 - 7$ кВ.

Сила электрического поля превосходит силу поверхностного натяжения расплава, в результате чего на конце иглы формируется все время возобновляемый конус. Угол при вершине конуса составляет 0,2 рад, а радиус закругления уменьшается до 10-30 нм. Напряженность поля на острие конуса достигает $10^8 - 10^9$ В/см, что способствует испарению атомов, которые ионизируются в зоне, примыкающей к острию конуса.

При использовании расплава галлия разброс ионов по энергиям составляет 4,5 - 14 эВ. Такой разброс ограничивает минимально достижимые размеры сфокусированного пучка несколькими десятками нанометров, а сила тока в пучке диаметром 0,25 мкм составляет 10^{-9} А.

Обработку всей площади пластины проводят, периодически перемещая стол с закрепленным на нем объектом. Положение прецизионного стола в повторно-шаговом режиме фиксируется с помощью лазерного интерферометра.

Для экспонирования позитивных и негативных резистов на всю их толщину ионам необходимо сообщать энергию в установке более 100 кэВ. Повышение тока в пучке в зондовых устройствах сопровождается возрастанием влияния эффекта расталкивания заряда. Поэтому при создании установок с высоким разрешением надо решать задачи компенсации зарядов

пучков, их эффективной транспортировки и фокусировки. Серьезным ограничением производительности может быть инерционность электростатической отклоняющей системы.

В проекционных ионно-литографических установках применяют потоки ионов с площадью поперечного сечения около 1 см^2 , для генерации которых не требуются точечные источники. Плазменный источник – дуоплазматрон с двойным контрагированием плазмы – обеспечивает требуемый ток и необходимую яркость. Так как в качестве рабочих газов обычно используют гелий, водород, неон или аргон, то целесообразно применять дуоплазматрон с накаливаемым катодом. Извлекаемый из него ионный пучок проходит конденсорную электростатическую линзу, а затем – коллимирующую линзу и попадает на маску-шаблон. Прошедшие через шаблон ионы формируют его изображение на обрабатываемой мишени. При этом между шаблоном и мишенью или оставляют минимальный (порядка нескольких микрон) зазор, или устанавливают линзы ускоряющей системы. С их помощью изображение шаблона можно уменьшить в несколько раз.

В проекционных установках используют шаблоны трех типов: 1) трафареты со сквозными отверстиями, 2) маски из поглощающих ионы материалов на аморфной поддерживающей мембране и 3) пленочные маски на тонкой монокристаллической основе.