

1.8. ДРУГИЕ ВИДЫ ЛИТОГРАФИИ

1.8.1. ФОТОЛИТОГРАФИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТА

Есть ряд факторов, сдерживающих использование *DUV*-литографии:

- SiO_2 сильно поглощает излучение, когда длина волны ультрафиолета меньше 180 нм;
- поглощение ультрафиолета не позволяет использовать стеклянную оптику и шаблоны;
- 157 нанометровая фотолитография лазера F_2 плавит оксид кремния.

Дальнейшее снижение длины волны требует принципиально иного литографического оборудования. Один из таких методов – литография экстремального ультрафиолета (*EUV*). Для нее используется актиничное излучение в диапазоне 12...14 нм, что более чем в 10 раз меньше минимальной волны для *DUV*-литографии. В результате можно без дополнительных ухищрений получать достаточно мелкие элементы на пластине. Для *EUV*-литографии используется не стеклянная, а отражательная оптика, обладающая низким значением числовой апертуры ($NA=0,24$) и, следовательно, хорошее значение глубины резкости, что дает высокое технологическое разрешение.

Типовая схема пошаговой сканирующей отражающей *EUV*-литографии приведена на рис. 1.8.1.

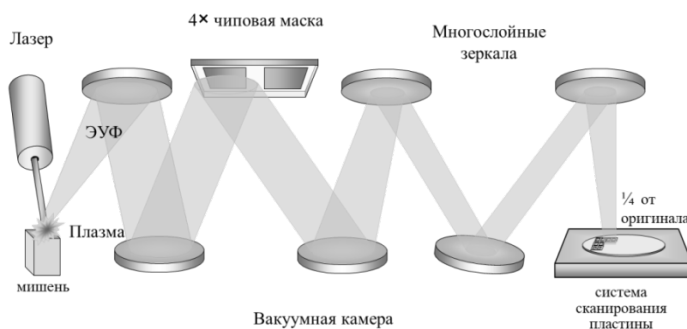


Рис. 1.8.1. Пошаговая сканирующая отражательная литография (EUVL)

Источником актиничного излучения для установок *EUV*-литографии является неодимовый лазер (длина волны 1063 нм, импульсы 5 нс, частота 100 Гц.). Фокусируя излучение на импульсной газовой струе *He* кластероформируется лазерная плазма, излучающая актиничное

излучение с длиной волны 10...25 нм.

Шаблоны для *EUV*-литографии — стеклянные, а отражательные (рис. 1.8.2). Они представляют собой подложку из кремния, на которой выращено 40...80 пар слоев *Mo/Si* атомарной толщины (рис. 1.8.3). Для поглотителя используется пленка из хрома. По подобной технологии делаются и зеркала (рис. 1.8.4), покрытие которых составляет 40 пар слоев *Mo/Si*. Их отражающая способность для актиночного излучения с длиной волны 13,5 нм составляет 70%.

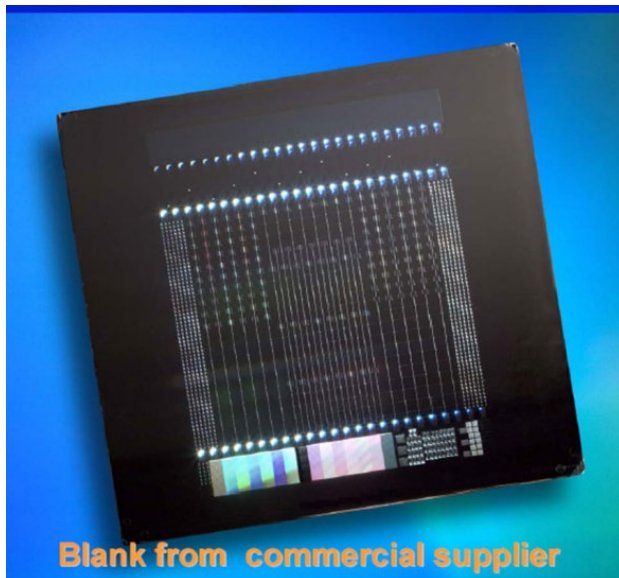


Рис. 1.8.2. Пример шаблона для *EUV*-литографии фирмы *INTEL*

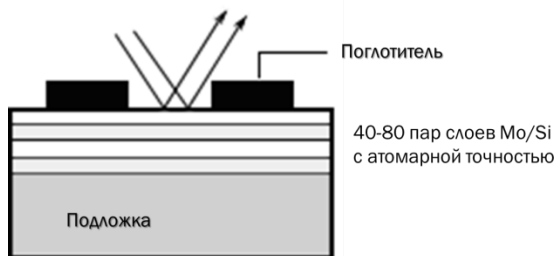


Рис. 1.8.3. Структура шаблона для *EUV*-литографии

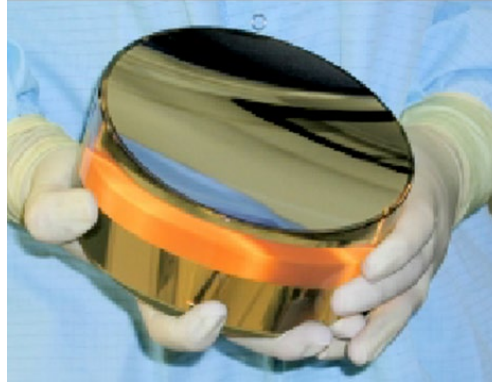


Рис. 1.8.4. Зеркало для EUV-литографии

Главный недостаток, который ограничивает использование EUV-литографии – дороговизна оборудования, которое в настоящее время могут позволить себе иметь только 2 фирмы в мире – *INTEL* и *TCMG*.

1.8.2. ЭЛЕКТРОНО-ЛУЧЕВАЯ ЛИТОГРАФИЯ

Для формирования рисунка в электронно-лучевой литографии (*EPL*) используется поток электронов с энергией 10...100 кэВ. Длина волны излучения электронов $\lambda=0,05$ нм.

Пучок электронов, разогнанных до больших значений энергии, обладает волновыми свойствами. При этом длина волны электронного излучения очень мала по сравнению со светом. Благодаря этому искажения, связанные с дифракцией, практически отсутствуют. Кроме того, электроны являются заряженными частицами, благодаря чему их можно разгонять в электростатическом поле, а также фокусировать с помощью электромагнитных линз.

Электронно-лучевая литография использовалась с 1957 года для создания первых интегральных схем. Но в настоящее время ее используют в основном для изготовления всех фотошаблонов и для изготовления малых пилотных партий и исследований.

Существует 2 разновидности электронно-лучевой литографии:

- проекционная (рис. 1.8.1);
- сканирующая (рис. 1.8.2).

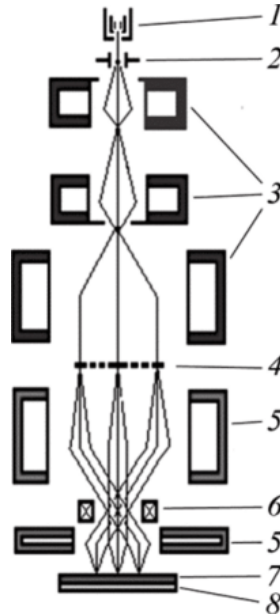


Рис. 1.8.1. Схема проекционной электронно-лучевой литографии: 1 – электронная пушка; 2 – управляющий электрод; 3 – конденсорные линзы; 4 – шаблон; 5 – проекционные линзы; 6 – регистрирующая апертура; 7 – пластина со слоем резиста; 8 – подложкодержатель

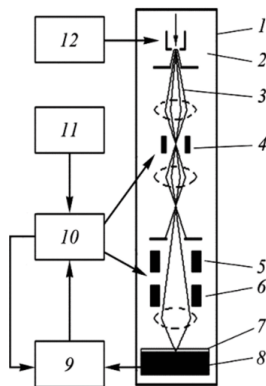


Рис. 1.8.2. Схема сканирующей электронно-лучевой литографии: 1 – вакуумная камера; 2 – электронная пушка; 3 – ускоряющий электрод-модулятор (коммутатор) луча; 4 – система отклонения луча; 5, 6 – система отклонения луча; 7 – слой резиста на подложке; 8 – подложка на подложкодержателе; 9 – блок механического перемещения подложкодержателя с регистратором положения; 10 – компьютерный блок управления; 11 – блок управления X-Y координатами топологии рисунка шаблона; 12 – источник высокого напряжения

Особенностью сканирующей литографии является отсутствие шаблона: проводится последовательное экспонирование сфокусированным пучком. Главным недостатком этого метода является очень низкая скорость экспонирования. При этом размер пятна не ограничен дифракцией и обеспечивается большая глубина фокуса.

Для электронно-лучевой литографии обычно используют позитивные резисты, полученные на основе полиметилметакрилата (ПММА).

Электронно-лучевая литография имеет ряд недостатков:

- возникает эффект близости, из-за чего отдельные линии и линии в массиве проявляются по-разному; в результате возникает неоднородность рисунка при проявке, которую трудно компенсировать;
- из-за рассеивания электронов в резисте и подложке (рис. 1.8.3) возникает размытость рисунка;
- из-за разной поглощающей способности высокоэнергетичных электронов в рисунке и подложке происходит нагрев маски, что может привести к ее короблению;
- электроны взаимодействуют между собой, в результате чего из-за больших плотностей электронного тока происходит расширение пространственного заряда в резисте, что приводит к снижению контрастности.

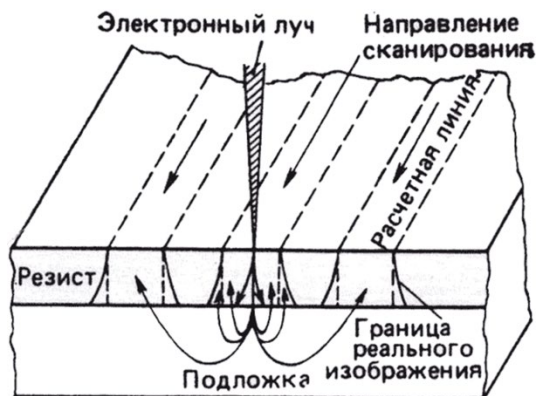


Рис. 1.8.3. Область реального засвечивания электронного резиста при экспонировании

При использовании сканирующей электронно-лучевой литографии к указанным выше недостаткам добавляется малая производительность. Однако ее можно увеличить, формируя большое количество маленьких независимо управляемых пучков. В 2008 году нидерландская компания *Mapper Lithography* выпустила установку сканирующей электронно-лучевой литографии для 300 мм пластин с разрешением 22 нм и лучше. В ней

использовалось более 10 тысячи пучков, данные к которым передавались посредством волоконно-оптической линии.

Чтобы увеличить контрастность изображения и снизить нагрев маски, в современной электронно-литографии заменяют традиционные (поглощающие излучение) шаблоны на маску *SCALPEL* (*Scattering with Angular Limitation Projection Electron-beam Lithography*), все элементы которой представляют собой мембраны, хорошо пропускающие электроны, но по разному их рассеивающие (рис. 1.8.4).

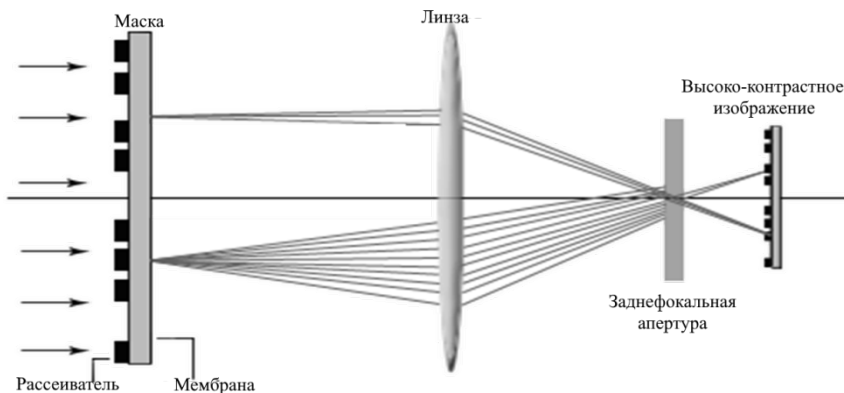


Рис. 1.8.4. Принцип работы с маской *SCALPEL*

Электроны, проходящие через мембраны, рассеиваются на малые углы, тогда как электроны, проходящие через область рисунка, рассеиваются на большие углы. Апертура, расположенная в обратной фокальной плоскости полевой оптической системы, пропускает электроны, рассеянные на малые углы и не пропускает электроны, рассеянные на большие углы, что приводит к формированию на подложке высококонтрастного изображения. При этом в маске не происходит значительного поглощения электронного потока, что минимизирует тепловую нестабильность маски.

1.8.3. РЕНТГЕНОЛИТОГРАФИЯ

Для рентгенолитографии используется коротковолновое, но слабоэнергетичное излучение (рис. 1.8.5). Разрешающая способность метода составляет 10 нм. Рентгенолитография контактная с зазором, который составляет около 10 мкм.

Из-за малой длины волны (0,5...0,2 нм) в рентгенолитографии, как и в электронно-лучевой литографии, дифракции на элементах шаблона. Но в отличие от электронно-лучевой литографии отсутствует влияние различных интерференционных эффектов в тонких слоях.

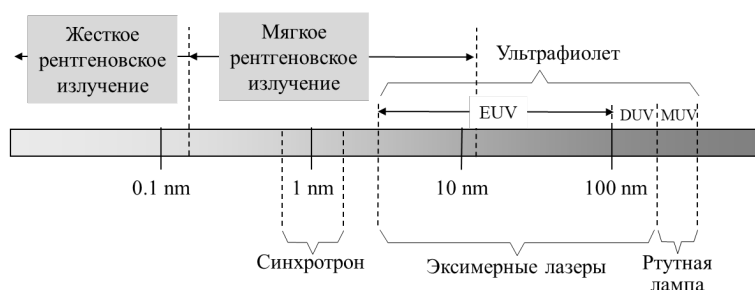


Рис. 1.8.5. Рентгеновское излучение

Общая схема установки для рентгенолитографии показана на рис. 1.8.6. Электронная пушка генерирует электронный пучок, фокусируемый на охлаждаемой водой мишени (часто используется палладиевая мишень). Напряжение на аноде составляет 25 кВ, потребляемая мощность 4-6 кВт. В результате анод испускает рентгеновские лучи с длиной волны 0.437 нм, которые через бериллиевое окно попадают в камеру экспонирования. Между шаблоном и подложкой устанавливается зазор около 10 мкм.

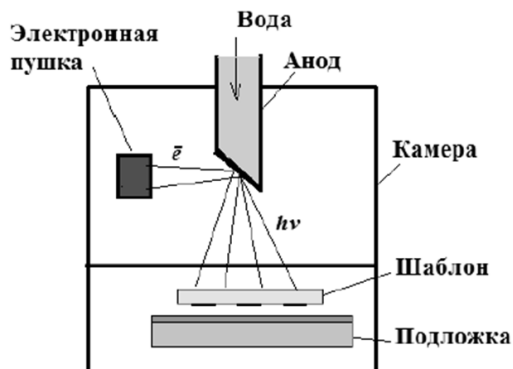


Рис. 1.8.6. Схема рентгенолитографии

Рентгенолитография подобна фотолитографии с зазором, однако есть 2 серьезные проблемы:

- трудно найти мощный источник излучения;
- сложное изготовление шаблонов.

Основным препятствием к внедрению рентгенолитографии является тот факт, что изображена подложке формируется с масштабом 1:1. Соответственно необходимы альтернативные высокоразрешающие метода для создания изображения на шаблоне.

Существует несколько разновидностей шаблона для рентгенолитографии. В качестве поглотителя используется золото. Основу шаблона можно изготовить из бериллия (рис. 1.8.7), кремния (рис. 1.8.8), оксида и нитрида кремния (рис. 1.8.9).

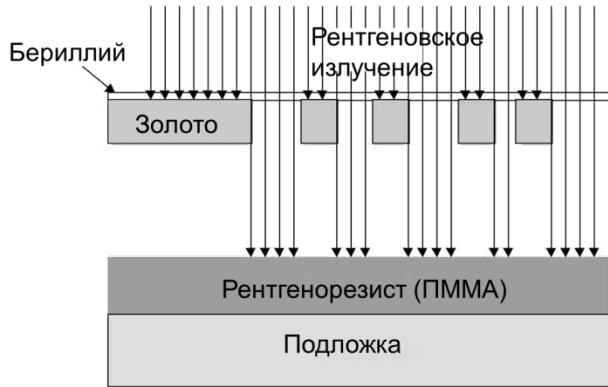


Рис. 1.8.7. Рентгенолитография через бериллиевый шаблон

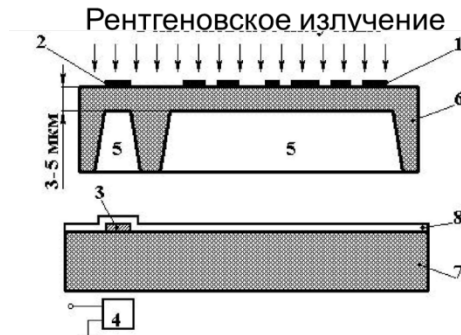


Рис. 1.8.8. Кремниевый шаблон для рентгенолитографии:

1 - слой золота; 2, 3 - маркерные знаки; 4 - детектор РИ; 5 - окна в кремнии; 6 - кремниевый шаблон; 7 - кремниевая пластина; 8 - резист

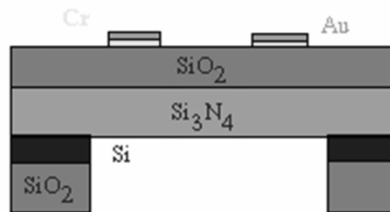


Рис. 1.8.9. Рентгеновский шаблон $Si-SiO_2-Si_3N_4-Au$

В качестве резиста наиболее часто используют положительные резисты на

основе полиметилметакрилата (ПММА).

Одной из проблем рентгенолитографии является реализация источника актиночного излучения. Могут использоваться следующие источники:

- синхротрон;
- лазерно-плазменные источники;
- источники на сфокусированной плотной плазме (*DPF*).

Чаще всего используют синхротрон. Но при этом нужно учитывать его особенности:

- он способен обеспечить работу 15 и более рентгеновских степперов, поэтому экономически выгоден только при массовом производстве;
- он имеет большие размеры;
- рентгеновское излучение из синхротрона выходит горизонтально, что требует вертикального расположения пластины и шаблона в степпере.

Недостатки рентгенолитографии:

- большое время экспонирования (до 20 минут);
- дисторсия изображения на шаблоне из-за механических напряжений в пленках золота;
- высокая стоимость шаблонов.

1.8.4. ИОННО-ЛУЧЕВАЯ ЛИТОГРАФИЯ

При ионно-лучевой литографии (*IPL*) облучение резиста происходит потоком ионов. Длина волны излучения ионов составляет 0,05...0,1 нм. Ионно-лучевая литография имеет ряд достоинств:

- меньшая подверженность ионных пучков влиянию паразитных электрических и магнитных полей;
- вторичные ионы характеризуются малой энергией и длиной пробега менее 10 нм, что с отсутствием эффекта близости обеспечивают высокое разрешение;
- отсутствие дифракции;
- электростатическая фокусировка позволяет получать сильно сфокусированные пучки;
- высокая производительность благодаря большому току пучка и высокой чувствительности резистов к ионам;
- возможность безрезистной литографии.

Существуют 3 разновидности ионно-лучевой литографии:

- проекционная;
- зондовая (сканирующая);
- безрезистная.

Установка для проекционной ионно-лучевой литографии показана на рис. 1.8.10, для зондовой – на рис. 1.8.1



Рис. 1.8.10. Проекционная ионно-лучевая литография

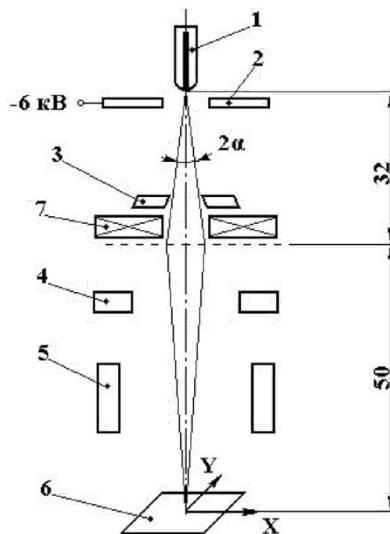


Рис. 1.8.11. Схема установки для зондовой ионно-лучевой литографии

В безрезистной литографии резист отсутствует. Как и в зондовом методе,

происходит непосредственное формирование рисунка, совмещение, экспозиция и проявление, но кроме это на той же установке происходит прямое легирование и травление. Скорость травления зависит от концентрации примеси. Однако производительность подобных установок очень низкая.

Ионы обладают большим разбросом по энергиям, чем электроны, что требует специальных мер по уменьшению aberrаций. Кроме того, из-за большой массы ионов для их фокусировки используют электростатические линзы, электромагнитные используют только для юстировки и масс-сепарации ионов.

Для экспонирования обычно используют легкие ионы – протоны, ионы гелия. Использование более тяжелых ионов позволяет легировать подложку или создавать на ней тонкие слои новых химических соединений.

Источники ионов:

- дуоплазмотронный;
- жидкометаллический;
- газозфазный с полевой ионизацией.

Шаблон для ионно-лучевой литографии приведен на рис. 1.8.12.

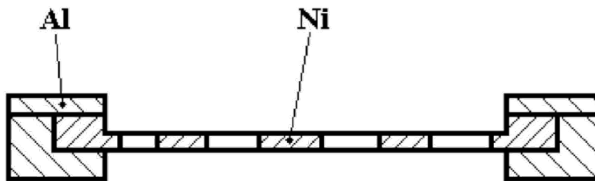


Рис. 1.8.12. Шаблон для ионно-лучевой литографии

Недостатки ионно-лучевой литографии:

- необходимостью устранения дисторсий;
- сложность обеспечения однородности экспонирования по полю кадра;
- низкая производительность.

1.8.5. НАНОИМПРИТИНГЛИТОГРАФИЯ

Современная литография по мере совершенствования и развития становится все более и более дорогой. Оптическая литография при современных технологических нормах сталкивается с техническими ограничениями. Экстремальная фотолитография сложна технически и дорога. Растущая стоимость фотолитографического оборудования может сделать производство кристаллов убыточным. Поэтому разрабатываются

альтернативные литографические методы, которые удешевят производство интегральных схем. Одним из таких методов является наноимпринт (нанопечатная) литография (НИЛ, *NIL*).

Этот метод был разработан в 1990-е годы. В 2003 году Массачусетский технологический институт включил его в список десяти недавно появившихся технологий, которые в будущем способны изменить мир. В настоящее время он широко используется как академическими учёными, так и в исследовательских центрах компаний, а целый ряд компаний использует НИЛ в промышленном производстве.

Ключевые преимущества НИЛ-технологии:

- минимальный размер получаемых структур;
- высокие точность и воспроизводимость при переходе от пластины к пластине;
- повторяемость по всей площади пластины.

Особенность НИЛ в том, что технология не предполагает использования света для передачи изображения в резист. При этом идея НИЛ основана на самом старом методе литографии.

Существует 3 разновидности НИЛ:

- термоконтактная НИЛ (*T-NIL*);
- фотонаноимпринт литография (*P-NIL*);
- мягкая НИЛ (микроконтактная печать, *soft-NIL*).

Технология термической НИЛ во многом напоминает классическую технику горячего тиснения полимеров. При термоконтактной литографии резист из термопластичного полимера наносится на плоскую поверхность подложки центрифугированием и нагревается выше его температуры стеклования T_c (рис. 1.8.13). Затем сверху под давлением опускается жёсткий штамп (шаблон) с микро- или наноразмерным рельефным рисунком. Образец охлаждается ниже T_c полимера, после чего давление снимается. Подвергшаяся такому воздействию полимерная плёнка запечатлевает полную реплику печати.



Рис. 1.8.13. Термоконтактная НИЛ

При мягкой НИЛ изготавливается форма из эластичного материала по шаблону. В качестве такого материала может использоваться полидиметилсилоксан (*PDMS*). Далее происходит самосборка монослоя «чернил» на форме, например, октадекантиола (*ODT*) из раствора в этаноле. Затем форма придавливается к подложке с напыленным тонким слоем золота. Рисунок переносится на подложку травлением.

Схема фотонаноимпринт литографии (ее запатентованное название технологии – *S-FIL*) приведена на рис. 1.8.14. Ее особенность заключается в том, что жидкий резист после опускания жесткого штампа полимеризуется под действием УФ излучения.

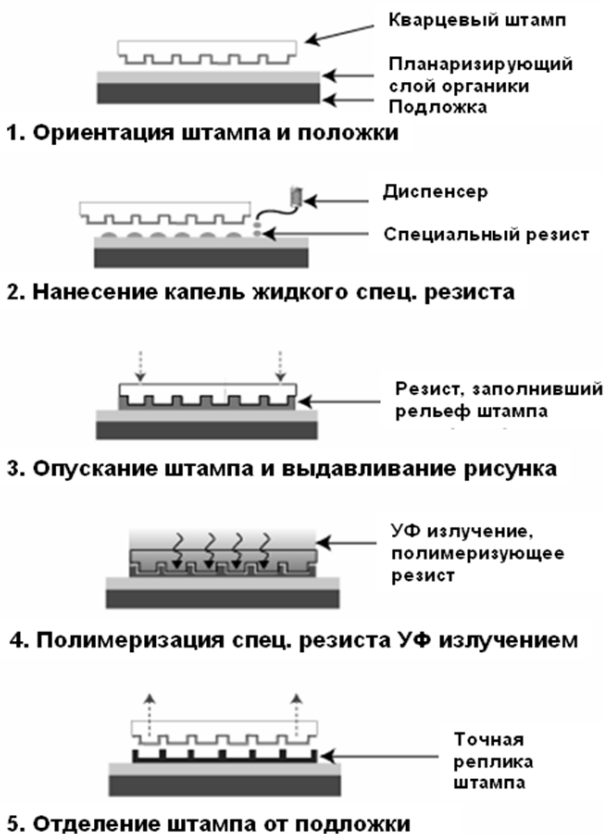


Рис. 1.8.14. S-FIL технология

Существует также обращенный импринтинг (*S-FIL/R*), которые позволяет получить негативное изображение (рис. 1.8.15). Его суть в том, что после формирования отпечатка с помощью НИЛ поверхность покрывается планаризирующим слоем, который травится до вскрытия слоя, по которому

делался импринтинг, и затем, используя селективную маску планаризирующего материала, делается реактивное ионное травление, формирующее обращённую маску с большим аспектным отношением.

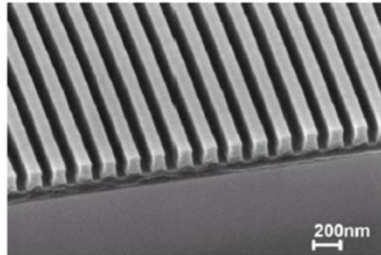


Рис. 1.8.15. Фотография рисунка, полученного с помощью НИЛ

Достоинства НИЛ:

- низкая стоимость оборудования и технологии, так как не используется дорогая оптика, источники излучения и фотошаблоны;
- широкий спектр размеров, которые можно реализовать данным методом;
- не чувствительность к изменению плотности рисунка;
- нет сложностей характерных для оптической литографии, например, не нужна коррекция эффекта близости;
- гладкие края формируемых линий, высокий рельеф маски;
- возможность реализации позитивного и негативного процессов.

ТЕСТЫ К ЛЕКЦИИ 8

Вопрос 1	Какой из перечисленных видов литографии не использует актиничное излучение для получения рисунка?
Ответы:	
1	Наноимпринт литография
2	Фотолитография
3	Электронолитография
Вопрос 2	В каком из перечисленных видов литографии отсутствует эффект близости?
Ответы:	
1	Рентгенолитография
2	Фотолитография
3	Электронолитография