**Литографический процесс с использованием ЭУФ излучения.**

**Выполнил: Учитель Физики**

**МОУ Софьинская СОШ**

**Исаев Иван Валерьевич**

**С. Софьино**

**СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ЗАДАНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ**

1. Содержание задания по теоретической части

Рассмотреть литографический процесс с использованием ЭУФ излучения (длина волны 13,5 нм), изучить перспективы применения технологии, основные существующие проблемы.

1. Содержание задания по практической части

Рассмотреть возможность изменение угла падение ЭУФ-излучения на многослойные зеркала, с целью добиться увеличение интенсивности результирующего излучения.

**РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Королёв М.А. Технология, конструирование и методы моделирования кремниевых интегральных схем . БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. Часть 1-397с.

2. Королёв М.А. Технология, конструирование и методы моделирования кремниевых интегральных схем . БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. Часть 2-422с.

3. Красников Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов, 2-е изд, М.: Техносфера, 2011

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**Примечание: задание брошюруется вместе с выпускной работой и с отзывами на нее руководителя и рецензента.**

**АНОТАЦИЯ**

Работа содержит 40 стр., 13 рисунков, 1 таблицу, и 11 использованных источников.

Создание и обновление элементов нано и микроэлектроники связано с

исследованием и разработкой методов литографии с нанометровым разрешением. Самым перспективным является литография в экстремальном ультрафиолете (ЭУФ) с длиной волны 13,5 нм. Основным достоинством ЭУФ-литографии является возможность создания микросхем с топологическими характеристиками в несколько нанометров.

Представлены современные литографические методы формирования интегральных микросхем. Рассмотрены принципы действия, преимущества и недостатки альтернативных методов нанолитографии.

Проанализированы полученные за последние несколько десятилетий по литографии в ЭУФ. Показано, что, несмотря на большое количество исследований, выход этой технологии в массовое производство не готов. В работе произведён расчёт, в котором был рассчитан оптимальный угол падения излучения на многослойную структуру.

В заключении представлены результаты по состоянию на 2016-2017 г.г. членами международного консорциума и описаны основные исследования, которые продолжаются по этой теме.

**Summary**

The work contains 39 pages, 13 figures, 1 tables, and 11 sources used.

The creation and updating of elements of nano and microelectronics is associated with

Research and development of lithography methods with nanometer resolution. The most promising is lithography in extreme ultraviolet (UVF) with a wavelength of 13.5 nm. The main advantage of the EUF is the ability to create microcircuits with topological characteristics of several nanometers.

In the diploma perspective methods of production of structures of elements of nanoelectronics and technology are considered. The first chapter of the diploma presents modern lithographic methods for the formation of integrated microcircuits. The principles of action, advantages and disadvantages of alternative methods of nano lithography are considered.

The second chapter presents the results obtained over the last several decades on lithography in the EUF.

It is shown that at the moment, despite a large number of studies, the output of this technology in mass production is not ready. A calculation was also made, in which the main problems of this method of lithography were shown and methods for their solution were proposed.

In conclusion, the results obtained for 2016-2017, members of the international consortium are presented and the main research that continues on this topic is described**.**

Оглавление

[Введение 7](#_Toc485232453)

[1. Экономические и технологические предпосылки перехода к топологической норме менее (22-14) нм при производстве ИМС 10](#_Toc485232454)

[1.1. Дифракционные ограничения литографического процесса 13](#_Toc485232455)

[1.2 Недостатки электронно-лучевой и рентгеновской литографии 14](#_Toc485232456)

[2. Литография в ЭУФ 18](#_Toc485232457)

[2.1 Основные требования к техническим характеристикам установки ЭУФ литографии 19](#_Toc485232458)

[2.1.1 Образование консорциума по созданию ЭУФ литографа 19](#_Toc485232459)

[2.1.2 Методы генерирования излучения с длиной волны 13,5 нм и основные требования к источнику излучения 20](#_Toc485232460)

[2.1.3. Основные требования к оптической системе установки, проблемы ее создания. 25](#_Toc485232461)

[Расчёт 28](#_Toc485232462)

[2.1.4. Основные требования к свойствам маски и резиста 31](#_Toc485232463)

[2.1.5. Вклад российских учёных в решении проблемы создания ЭУФ-литографа 35](#_Toc485232464)

[3. Полученные результаты по состоянию на 2016-2017г.г. 38](#_Toc485232465)

[Список литературы 40](#_Toc485232466)

# Введение

На сегодняшний день можно точно сказать, что современная полупроводниковая промышленность продолжает своё развитие и не стоит на месте. Одним из примеров этого является постоянно уменьшаемая топологическая норма. Топологическая норма (ТН) – это минимальный размер в топологии рисунка, который можно получить на данном оборудовании и контролируемый на каждом шаге литографии с целью оптимизации характеристик устройства. Её постоянное уменьшение позволяет создавать быстрые и сложные устройства. Одним из важных сегментов рынка полупроводниковых СБИС - центральные и серверные процессоры, которые играют большую роль в обработке информации на любом устройстве. В 2015 году компания Intel выпустила линейку процессоров Skylake с топологической нормой 14 нм. Начиная с декабря 2015 г. и по настоящее время в научной литературе отсутствуют сведения о дальнейшем прогрессе в этой области. На рисунке 1.1. представлен график уменьшения топологии начиная с 1970 года, синим цветом представлена достигнутая топологическая норма, красным - прогнозируемая.

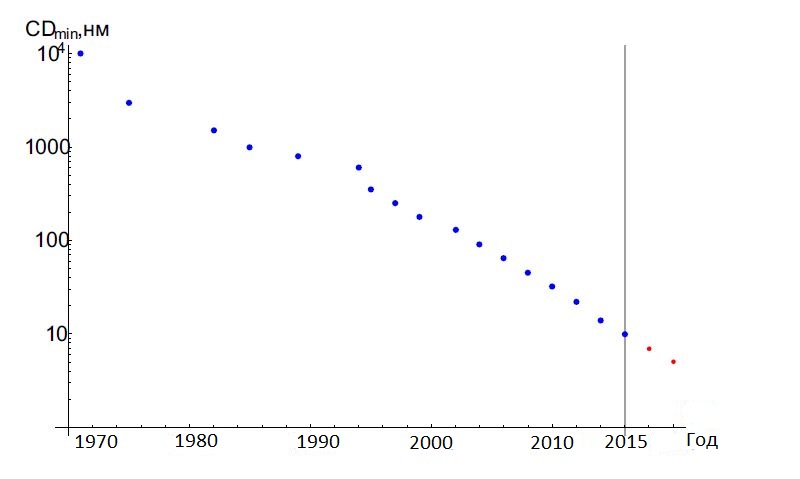


Рис.1.1. Критические размеры используемых (синие точки) и запланированных

(красные точки) технологических процессов, начиная с 1970 года

Из вышесказанного можно сделать вывод, что топологическая норма процессоров не уменьшалась с 2015 года.

Самой значимой технологией полупроводниковой промышленности является оптическая литография. В процессе литографии топология микросхемы создаётся на кремниевой пластине, которая служит основой для будущей микросхемы. Схематичное изображение литографической системы показано на рис. 1.2.

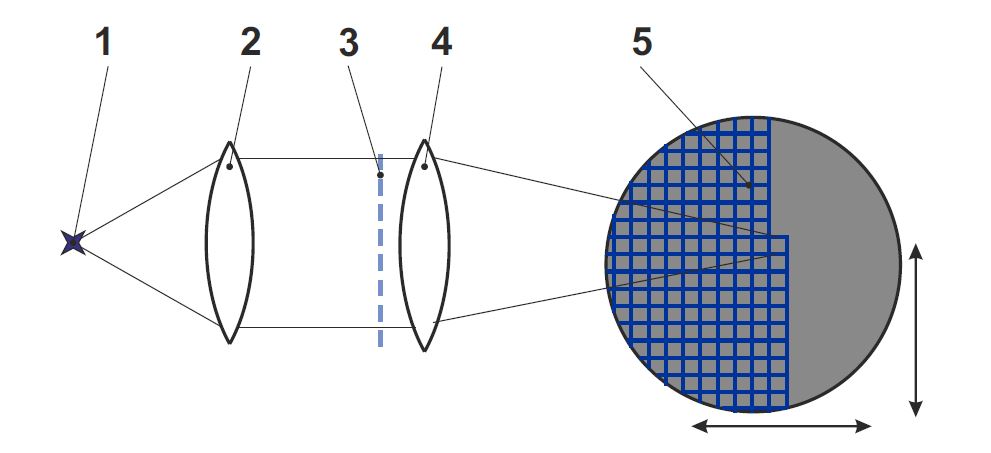


Рис.1.2. Схематичное изображение оптической системы литографа

Самым главным элементом любого литографа является - источник излучения (1). Его излучение проходит через оптическую систему (2) и попадает на маску (3), которая является изображением микросхемы, увеличенным в несколько раз. Далее излучение, прошедшее через маску (или отражённое, для системы отражательной оптики), проходит через проекционную оптику (4). На этом этапе изображение уменьшается в 3-5 раз и проецируется на кремниевую пластину, (5), покрытую чувствительным к свету фоторезистом. Под действием излучения в нем проходят химические реакции, после которых засвеченная часть фоторезиста может быть химическим способом удалена с пластины, оставив открытые участки пластины с рисунком нужного слоя микросхемы. Дальше следует обработка пластины, и после всех этапов технологического процесса появляется микросхема. Следует отметить, что стадия литографии, а именно оптическое разрешение литографической системы, определяет размеры самых мелких деталей топологического рисунка ИМС. В свою очередь, это означает, что разрешение литографии определяет, сколько элементов, в частности, транзисторов, с минимальными размерами активных областей, можно разместить на одном кристалле.

В связи с этим мировые лидеры продолжают освоение новых технологий литографии и затрачивают на это колоссальные средства. Одна из технологий, с помощью которой будут производиться новые устройства это – литография в экстремальном ультрафиолете (ЭУФ).

## Экономические и технологические предпосылки перехода к топологической норме менее (22-14) нм при производстве ИМС

В 21 столетии глобализация всех сфер человеческой деятельности сопровождается существенным ростом потоков информации и, соответственно, необходимостью создания баз данных и методов их обработки.[1] Человечество уже нельзя представить с той техникой, что была эталоном совершенства 10 лет назад.

Последние несколько десятков лет характеризуются быстрым развитием микроэлектроники, а конкретно интегральных микросхем. При этом эволюция таких показателей микроэлектроники, как быстродействие, уменьшение минимального размера элемента электронной схемы, уменьшение энергопотребления не стоит на месте.

Одна из тенденций, которая управляет полупроводниковым прогрессом в отрасли, связана с потребляемой мощностью. Каждый год общество требует более высокой вычислительной мощности, а, следовательно, увеличивается процент потребляемой мощности. До 2005 уменьшение размера транзисторов и одновременно увеличение тактовой частоты, масштабирование, шли рука об руку. Это позволяло одновременно уменьшать стоимость микросхемы и значительно увеличивать производительность компьютера. Одним из влияющих факторов было чрезмерное требование к питанию компьютерных микросхем. Таким образом, масштабируемость и эффективность питания вычислительной техники становятся значительными проблемами на данном этапе развития микроэлектроники.

Для многих компаний переход к 20-нм топологической норме замедлился из-за более значимых затрат на обработку пластин и производство микросхем, чем на топологии 40 нм и выше.

После Второй Мировой Войны вся электроника выпускалась на радиолампах, которые были не надёжны и крупногабаритны. Только в 1948 г был создан первый германиевый транзистор, работа которого заинтересовали компании всего мира. Это время можно назвать «началом микроэлектроники», т.к. уже через 3 года, было выпущено огромное количество транзисторной техники, и эта технология стала массово развиваться. В 1965 году, один из начальников и создателей крупнейшей корпорации Intel Гордон Мур предположил, что «Число транзисторов на кристалле будет удваиваться каждые полтора-два года, а их размеры с той же скоростью уменьшаться», это предположение в последствие и стало законом Мура.

Долгое время полупроводниковая промышленность развивалась в соответствии с законом Мура. Он есть не что иное, как наблюдение, согласно которому каждые 16-25 месяцев число транзисторов микросхеме увеличивается в два раза, без значительного роста стоимости элемента. Теперь уже неясно, будет ли продолжаться это увеличение при снижении или становлении удельных издержек ее производства. В связи с этим будет справедливо суждение о том, что при уменьшении топологических размеров элемента будет увеличиваться и рост производительности микросхемы, что соответственно влияет и на рост цен на нее. Наблюдать увеличение числа транзисторов на квадратный сантиметр можно на рис. 1.3.

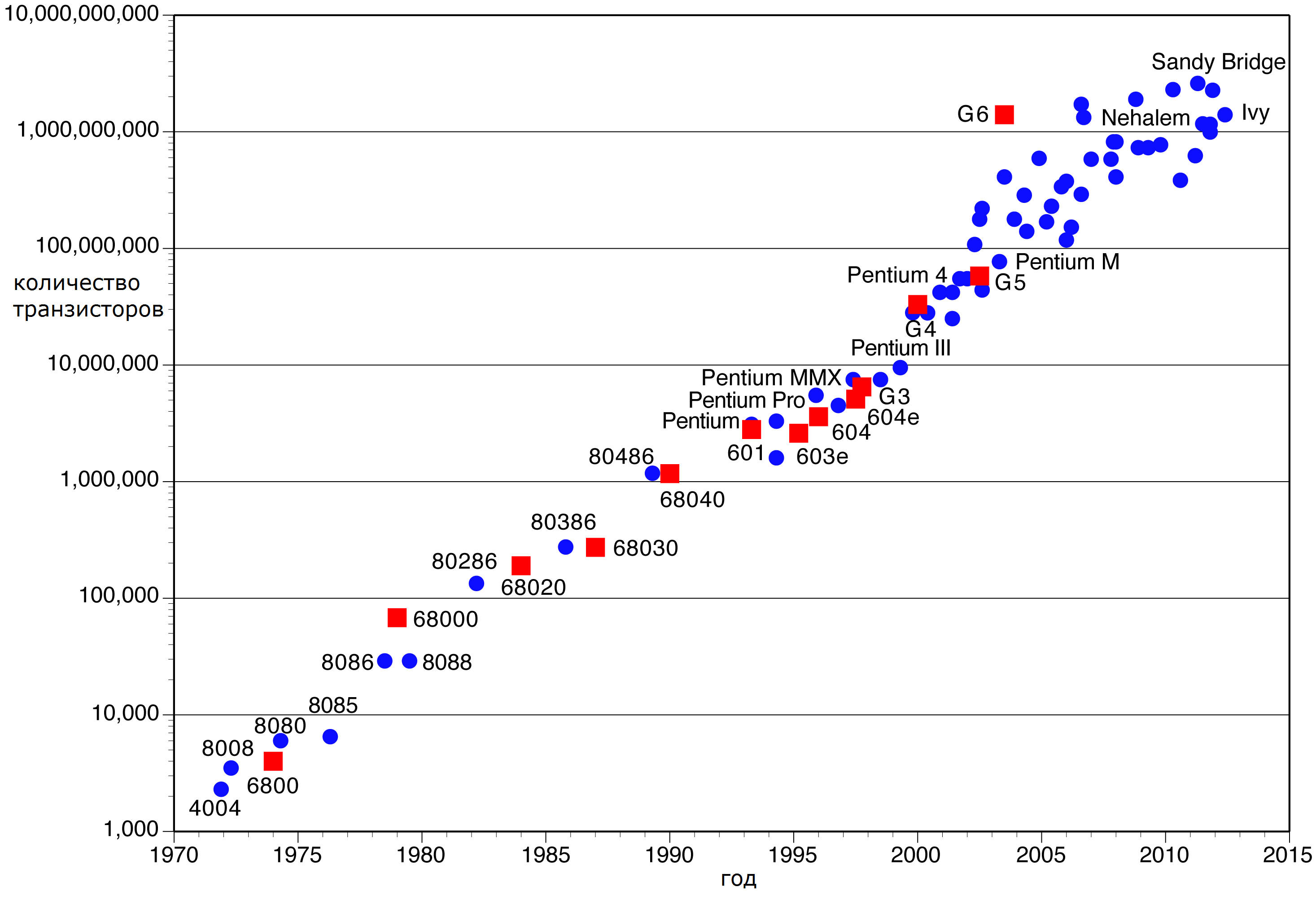


Рис 1.3. График зависимости количества транзисторов от года производства

Литография - один из самых важных показателей совершенства полупроводниковой технологии. Основная характеристика процесса литографии - разрешающая способность, то есть способность раздельно воспроизводить мелкие элементы рисунка.[2] Разрешающая способность оценивается минимальной шириной воспроизводимой линии и определяется преимущественно способом экспонирования резиста и длиной волны воздействующего на него излучения. По мере увеличения требований к уровню разрешения литографического процесса длина волны используемого излучения становится все меньше. Увеличение разрешающей способности ведёт к уменьшению топологической нормы и увеличению плотности упаковки ИМС и позволяет:

* Повысить быстродействие транзистора и СБИС в целом, за счет уменьшения времени переноса носителей заряда через активные области прибора и межсоединения в ИМС, а также за счет снижения паразитных емкостей между областями затвора и подложки, стока, истока.
* Увеличить процент выхода бездефектных чипов, т. к. чем больше площадь чипа, тем выше вероятность, что чип окажется на участке пластины, содержащий неустранимый дефект.
* Уменьшить вес и габариты аппаратуры, что особенно важно для устройств, содержащих миллиарды элементов.
* Увеличить количество элементов на той же площади чипа.

Новые технологии идут нога о ногу с уменьшением топологической нормы ИМС. Одна из таких технологий – это литографический процесс с использованием ЭУФ излучения с длиной волны 13,5 нм.

## Дифракционные ограничения литографического процесса

Минимальное разрешение в фотолитографии - это функция длины волны экспонирующего УФ - света и числовой апертуры фокусирующей системы. В соответствие с формулой Гельмгольца предельное разрешение оптической системы определяется:

(1.1)

где l – разрешение, λ – длина волны света, n – показатель преломления, α – апертурный угол между центральным лучом и лучом, ограниченным диафрагмой.

Из формулы (1.1) вытекает, что размеры элементов можно уменьшить как путем уменьшения длины волны λ, так и выбором объектива максимально большого диаметра. Однако увеличение угла падения уменьшает глубину фокуса объектива в квадратичной зависимости. По этой причине доминирующим подходом в литографии за прошедшие 40 лет являлось уменьшение длины волны света.

Обычные методы оптической литографии уже давно находятся в арсенале крупных корпораций на производстве микросхем. Но «классическая» оптическая литография, из-за дифракционного предела, имеет ограничения. В то же время, другие методы литографии, например, ближнепольная оптическая литография не дают возможность получать годные приборы в больших объемах.

Наименьший размер элемента определяется пределом и возможностями конкретного способа литографии. На разрешающую способность литографии накладывают ограничения как технические, так и физические факторы. Основные физические ограничения связаны с дифракцией излучения в оптической системе литографа и на краях маски.

Существует дифракционное размытие изображения, его отрицательное воздействие уменьшается с уменьшением длины волны используемого излучения. Оптическая литография обеспечивает получение элементов ИМС с размерами до 0,5 мкм. Использование ультрафиолетовых лучей с λ=13.5 нм. позволяет сместить этот предел до 0,1 мкм. Рентгеновская литография сдвигает указанный предел в нанообласть.[3]

Такие же возможности открывает электронно-лучевая литография и литография с использованием потоков ускоренных частиц. В этих видах литографии почти нет дифракционного предела, поскольку длина волны де Бройля для электронов и ионов, движущихся с достаточно большими скоростями в пучках частиц, меньше деталей шаблона.

Ограничения в литографии, которые обусловленные рассеянием излучения в полупроводнике и резисте, дают наименьшую ширину технологических линий ≈ 0,01 мкм. Смягчить эти ограничения можно использованием излучения с меньшей длиной волны. Сейчас интенсивно развиваются новые виды литографических процессов, которые позволяют получать элементы с размерами вплоть до 14 нм. - это литография в экстремальном ультрафиолете.

## 1.2 Недостатки электронно-лучевой и рентгеновской литографии

Как уже отмечалось, литография - это метод получения заданного топологического рисунка на поверхности полупроводниковой пластины с использованием облучения пленки резиста частицами или коротковолновым электромагнитным излучением. По способу воздействия литография условно разделяется на фотолитографию (облучение ультрафиолетовым излучением), рентгеновскую литографию (облучение рентгеновским излучением), электронно-лучевую (облучение электронами) и ионно-лучевую (облучение ионами).

Электронно-лучевая литография (ЭЛЛ) является способом создания поверхности подложек заданного рельефа или топологии с помощью электронного луча. ЭЛЛ может быть реализована двумя способами: проекционным – с использованием шаблонов, и сканирующим –

путем обработки электронного резиста сфокусированныи электронным лучем (обычно используется наиболее чувствительный полимерный электронный резист полиметил- метакрилат – ПММА). Характерное разрешение ЭЛЛ составляет при этом порядка 20 и 2 нм соответственно.

Существуют две основные возможности использования электронных пучков для облучения поверхности пластины с целью нанесения рисунка. Это одновременное экспонирование всего изображения целиком и последовательное экспонирование (сканирование) отдельных участков рисунка подобно тому, как это происходит в электронном сканирующем микроскопе.

Современные электронные литографы позволяют не только создавать поверхность ИМС, но и проводить контроль технологического процесса при анализе структуры ИМС методом электронной микроскопии без привнесения радиационных дефектов в полупроводниковую структуру исследуемых ИМС.[4]

Наибольшее распространение получили установки ЭЛЛ с накальными катодами из вольфрама или гексаборида лантана, а также холодным полевым автоэмиссионным катодом. При использовании такой установки при снижении ускоряющего напряжения происходит уширение электронного зонда, т.е. ухудшение разрешающей способности. Установки ЭЛЛ с автоэмиссионной пушкой, поле объективной линзы которого выходит из полюсного наконечника и, при больших увеличениях достигая образца, препятствует уширению электронного зонда при выходе из объективной линзы в результате электростатического

отталкивания электронов в зонде.

Схему электронно-лучевой литографии можно видеть на рисунке 1.5.

Поток электронов, выходя из источника, проходит ряд диафрагм и электромагнитных линз, в результате, большая часть пучка отсекается и объекта достигает всего несколько процентов исходного пучка.

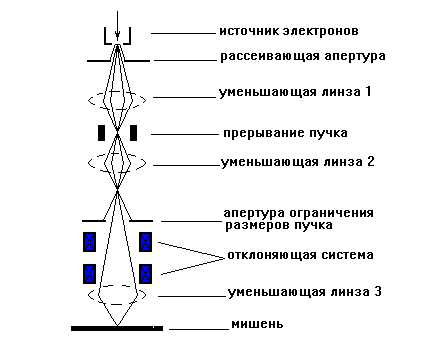


Рис.1.5. Схема установки электронно-лучевой литографии

Основными недостатками ЭЛЛ является снижение разрешающей способности вследствие рассеяния электронов в обратном направлении, нагрев резиста падающими на него потоком электронов, а также низкая производительность.

Рентгеновская литография является способом формирования заданной топологии ИМС с помощью рентгеновского излучения с высоким разрешением. Для экспонирования используется низкоэнергетическое излучение с энергией 0,5 – 10 кэВ, при поглощении которого в слое резиста происходит образование или разрыв межмолекулярных связей. Резисты для рентгеновской литографии обладают высокой разрешающей способностью и могут быть как позитивными, так и негативными. Основная проблема рентгеновской литографии состоит в изготовлении сложной структуры шаблона, которая должна иметь тонкую, но прочную основу, прозрачную для рентгеновского излучения. Для этих целей используют органические и неорганические мембраны. Формирование структур ИМС высокого качества обеспечивается за счет наличия высокоинтенсивного коллимированного источника, высокоточного совмещения шаблона с подложкой, прецизионного контроля зазора. Рентгенолитография может быть осуществлена с помощью пучка фотонов с λ ~ 1 нм, в качестве которого используется синхротронное излучение. Общий вид схемы установки для литографии с использованием рентгеновского излучения представлен на рисунке 1.6.

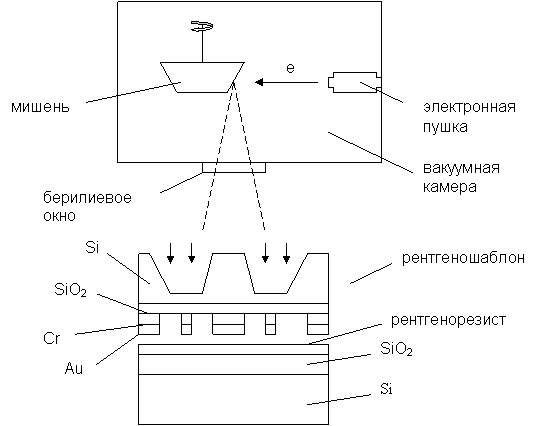
******

Рис. 1.6. Принципиальная схема установки для рентгеновской литографии

К достоинствам рентгенолитографии относятся: высокая разрешающая способность, отсутствие контакта шаблона с резистом, что снижает уровень дефектов и повышает срок службы шаблонов. Наиболее критичными проблемами рентгенолитографии являются трудность изготовления шаблонов высокого качества, применение мощного и громоздкого источника рентгеновского излучения, высокая его стоимость, невозможность фокусировки рентгеновского излучения с помощью зеркал или линз. Основным ограничением этого метода для массового использования является необходимость, предварительного изготовления высокоточных шаблонов, защита от радиационного воздействия обслуживающего персонала.

Хотя потенциально и электронно-лучевая и рентгеновская литография обеспечивают разрешение на уровне единиц нанометров, применение они нашли только для изготовления мастер-шаблонов, по которым производятся рабочие маски.

# Литография в ЭУФ

Достигнут предел 14 нм, дальнейший прогресс возможен при использовании длины волны 10-15нм, источником излучения которой является плазма газового разряда.

Для этого типа литографии проблемы, уменьшения размеров элементов связаны с тем, что существуют сложности с фокусировкой УФ-излучения, из-за того, что использование пропускающих линз или оптики в ЭУФ-диапазоне оказывается невозможным по двум причинам. Во-первых, показатели преломления твердых веществ в ЭУФ-диапазоне близки к единице. Во-вторых, ЭУФ-излучение поглощается в твердых веществах на глубине 100-150 нанометров. Это значит, что оптическую систему для ЭУФ-излучения надо строить на отражающих элементах, для которых существуют очень жесткие требования.

Также есть ряд требований и к самому источнику излучения, в качестве которого, например, может быть лазерно-плазменное излучение высокой мощности. При такой мощности не допускается выход вещества из самого источника и других блоков системы, это может привести к загрязнению подложки и зеркал. На рисунке 2.1 представлена принципиальная схема литографической установки с использованием ЭУФ-излучения.

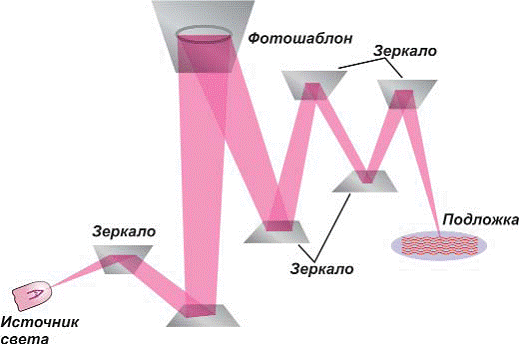


Рис 2.1. Схема установки литографии в ЭУФ

В источнике ЭУФ-излучения используется лазерная плазма. Мишенью в этой плазме служат оловянные капли диаметром несколько десятков микрометров, в которых фокусируется излучение импульсного CO2 лазера. При воздействии импульсного излучения в капле происходит оптический пробой, и образующаяся плазма излучает в УФ с λ=13.5 нм. Это излучение собирается эллиптическим коллектором нормального падения и фокусируется в так называемый промежуточный фокус. Источник ЭУФ-излучения отделён от остального объёма по вакууму с помощью дифференциальной откачки. За промежуточным фокусом ЭУФ-излучение проходит через осветительную оптику, которая создаёт равномерную засветку на печатной маске. Маска наносится на многослойное зеркало в качестве верхнего поглощающего слоя. Затем, изображение открытых участков маски с помощью блока проекционной оптики переносится на

подложку с фоторезистом.

В ЭУФ-литографии существуют и проблемы, связанные с созданием новых материалов резистивных масок, созданием малодефектных шаблонов, высокой стоимостью литографического оборудования. Хотя этому методу литографии характерно большое количество проблем, которые ограничивают внедрение этой технологии в массовое производство, большое количество разработок в этой области доказывают, что ЭУФ-системы скоро обеспечат производство микросхем с размерами менее 10 нм.

# 2.1 Основные требования к техническим характеристикам установки ЭУФ литографии

## 2.1.1 Образование консорциума по созданию ЭУФ литографа

В отличие от ЭЛЛ и рентгена, ЭУФ имеет значительно более длительную продолжительность поглощения. Ультрафиолет поглощается микрометрами любого твердого материала и микрометрами при нормальных условиях в газах. Это определяет высокую степень технологии, которую нужно использовать в таком типе литографии (специальная многослойная отражательная оптика, высокий вакуум, горячая плазма имеющая энергию в диапазоне 20-50 эВ).

Изучение и освоение методов литографии следующего поколения разрабатывается уже более 20 лет, наиболее перспективным из них является ЭУФ-литография.

Разработка технологии ЭУФ-литографии была начата консорциумом EUV LLC под руководством корпорации Intel в 1997 году. [3] Запустить ее на массовое производство планировалось в 2005 году на топологической норме 90 нм., но этого до сих пор не произошло. Большинство отраслевых аналитиков прогнозируют запуск этой технологии к 2018 году.

Для решения вопросов создания и освоения технологии для ЭУФ-литографии ведущими производителями микро и нано электроники в США был создан консорциум EUVLLC. Впоследствии был подписан контракт в 1994 году на 250 млн. долларов с национальными ядерными центрами США (Лоуренс Ливермор, Лоуренс Беркли, Сандия) на разработку и создание основ лазерного плазменного источника излучения с длиной волны 13,5 нм. После трех лет успешной работы, компания CYMER, которая являлась и является крупнейшим производителем лазеров для фотолитографов, начала работы по созданию и испытанию прототипа плазменного источника на длине волны 13,5 нм.

## 2.1.2 Методы генерирования излучения с длиной волны 13,5 нм и основные требования к источнику излучения

Одной из ключевых проблем ЭУФ литографии является создание интенсивного ЭУФ источника с высокой усредненной мощностью излучения. Существует два принципиальных подхода к получению излучения в ЭУФ области спектра: синхротронное излучение и излучение плазмы.

Уже давно был созданы и протестированы все источники, способные испускать ЭУФ-излучение, включая лазеры и ускорители частиц. После нескольких лет исследований, был создан источник, позволявший экономным образом достичь достаточной мощности, включающий использование плазмы. Было установлено – что, если подвергнуть материал облучению мощного лазера или действию электрического тока, можно отделить электроны от атомов. В результате плазма будет излучать ультрафиолет с длиной волны 13,5 нм., а разогретая материя – охлаждаться.  
 В случае использования плазмы, на входе излучения, его мощность составляет 250 Вт. Такие характеристики позволят установке обрабатывать примерно125 подложек в час. Это значение не удовлетворяет стандартам массового производства, это в два раза меньше по сравнению с современным оборудованием, работающим с 40 нм.  
 Из-за сложности проблемы ученые только к 2011 году, через пять лет после появления первых экспериментальных сканеров от ASML, один из ведущих разработчиков источников света, компания Cymer, смогла создать источник, способный обеспечивать входную в литограф мощность 11 Вт, способный длительное время поддерживать работу установки.

Для излучения длиной волны 13.5 нм были разработаны и созданы газоразрядные и лазерно-плазменные источники излучения, которые используют импульсные разряды в каплях олова или ксеноне. Более эффективными источниками признаны источники на парах олова.

В качестве источника EUV была использована плазма, полученная при помощи лазера. Десятки тысяч микроскопических капель ультрачистого олова проходят в секунду через вакуумную камеру, каждая из них освещается лучом углекислотного лазера, прошедшего через несколько усилителей.[4] После взаимодействия излучения лазера с каплей, она нагревается до состояния плазмы и излучает УФ. Оптика отражает свет и направляет его в сканнер. Чтобы не допустить скопление остатков олова, оптику постоянно продувают водородом.

Одно из открытий произошло благодаря технологии, исследованной в Cymer. Было обнаружено, что если давать каплям небольшой импульс перед главным лазером, каждая оловянная капля, нагреваясь, превращалась в диск, и, следовательно, площадь поверхности возрастает, так как площадь поверхности диска, с таким же объемом вещества, как и в шарообразной капле больше. Таким образом взаимодействие с основным лазером увеличивалось, увеличивая КПД плазмы с 1% до 5%. Благодаря этому и другим нововведениям компания в начале года сообщила о достижении мощности в 200 Вт. Ещё один разработчик источников света, Gigaphoton, тоже сообщил о большом прогрессе. На настоящие тесты технологии на её готовность к массовому производству произойдут в лабораториях клиентов ASML.

Для достижения высокой производительности (100 пластин), ЭУФ-литограф должен обладать источником излучения, генерирующим порядка 100 Вт непрерывной мощности. Японский технологический консорциум заявил, что добился высокого значения мощности излучения – 104 Вт. Этого удалось добиться благодаря исследованиям излучения на лазере, возбуждаемом плазмой. На рисунке 2.2. представлена принципиальная схема источника ЭУФ-излучения.

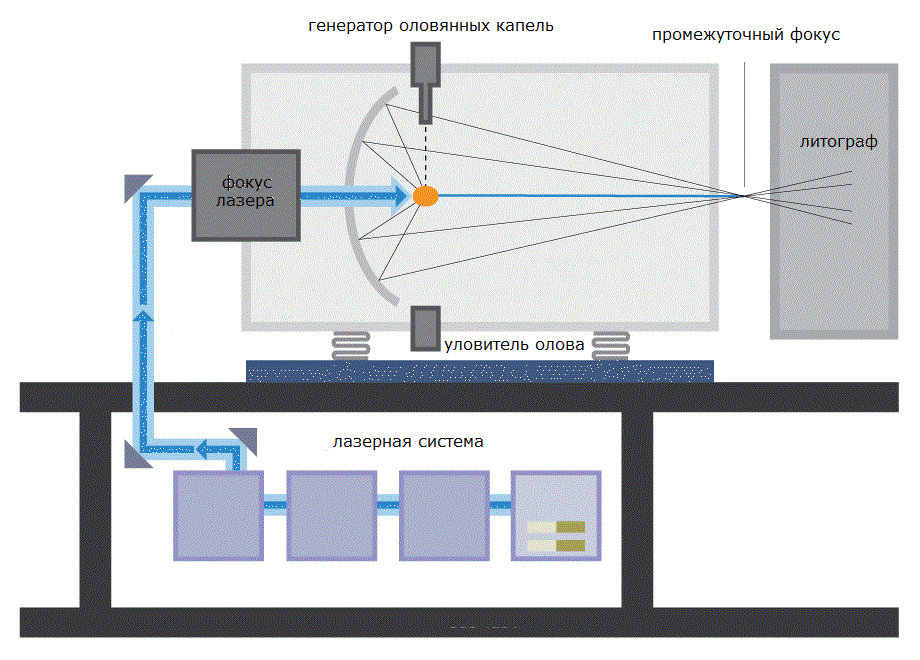


Рис 2.2. Принципиальная схема источника ЭУФ-излучения

Эффективность этого метода может быть повышена в лазерно-плазменных источниках излучения при использовании одновременно твердотельных и СО2-лазеров.

История развития источника делится на 4 этапа:

* 1 Этап. В течение этого периода, начиная с 1998 года и примерно до 2001-2002 годов, была разработана первая система EUVL. В это же время изучены требования источника, в частности, требуемой мощности. Так же был изучен ряд вариантов производства ЭУФ , таких как основанная на ускорителях технология, лазерная плазма и различные типы источников плазмы. Уровень мощности, достигнутый в тот период был ~ 0,1 Вт.
* 2 Этап. В то время как основные требования к источнику EUV были изучены, список источников излучения сузился до плазмы, произведенной Xe-лазером, и источников плазмы разряда пинча. Достигнутый уровень мощности с источником Xe за этот период (до 2003 года) был порядка 1 Вт. В конце этого периода также стало ясно, что из-за низкой эффективности плазмы Xe, шанс для этих источников достигнуть 100 Вт невелик, поэтому в течение этого же периода была сформулирована и исследована необходимость излучения на другом источнике ЭУФ, а именно олово-Sn.
* 3 Этап. Переход источников на топливо с использованием олова начался в 2003 году. Использование олова позволило повысить эффективность источника на 5-6%. Источник с применением олова имел не только преимущества, но и недостатки- по сравнению с ксеноном, пары олова загрязняли камеру несмотря на её непрерывную продувку водородом.
* 4 Этап. Он начинался с поставки 2 литографов с источниками ЭУФ на основеолова и продолжился с NXE-3100, а затем с литографами NXE-3300. В то время как пиковые характеристики этих источников достигали уровня почти 100 Вт, средняя мощность и использование по-прежнему являются проблемой. Скорее всего в ближайшее время может понадобиться источник с мощностью 1 кВт.

Плазменные источники на основе олова после 15 лет совершенствования вышли на свой предел по многим параметрам.[5] Прежде всего большая потребляемая мощность и проблема отведения тепла (~ 500 кВт на один плазменный источник), ограничение на скорость подачи оловянных мишеней, проблема загрязнения первого зеркала – коллектора. Поэтому предельная мощность плазменного источника в 2017 году составила всего в 250 ватт. Поставлена задача получить дешёвый и более экономичный источник с мощностью 1 кВт на сканер в 2018 году. Это позволит улучшить качество за счёт возможности использования менее чувствительного резиста, а при переходе на производство структур с разрешением 5 нанометров до 200 mJ/см2. В связи с этим пять лет назад вновь стали обсуждать обсуждать вопрос более мощного источника на базе лазера на свободных электронах (ЛСЭ).

Коммерческие требования к ЭУФ-литографу таковы, что оптическая система должна иметь рабочий ресурс 30000 часов до 10% снижения мощности ЭУФ-излучения на подложке. Так как оптическая система литографа состоит из 11 зеркал, то для выхода литографа из строя достаточно ухудшения отражения всего по одному проценту на каждом зеркале.

Таким образом, исследование физических процессов образования высокотемпературной плазмы и генерации ЭУФ излучения в разряде типа лазерноиндуцированной искры в парах олова является важной и актуальной задачей для создания источника ЭУФ излучения.

## Основные требования к оптической системе установки, проблемы ее создания.

Идея использовать излучение с длиной волны 13,5 нм в оптической литографии вполне естественна, когда речь идёт о разрешении ниже 100 нм. Однако разработка ЭУФ-литографии сталкивается с серьёзным препятствием - с отсутствием подходящей оптики.

Существует затруднение со способами отклонения и фокусировки излучения. Использование линз в ЭУФ-диапазоне оказывается невозможным по двум причинам. Во-первых, показатели преломления твердых веществ в ЭУФ-диапазоне близки к единице. Во-вторых, ЭУФ-излучение поглощается в твердых веществах на глубине порядка 100-150 нанометров. Кроме того, отражающая способность от любой поверхности в нормальном падении довольно низкая (<<1%). Было принято решение отказаться от стеклянных линз и использовать зеркала. Простое зеркало не подходило требованиям этой технологии, так как не имело высокого показателя отражения из-за своей шероховатости. Новшеством стало использование Брэгговских отражателей - это многослойные зеркала, которые собирают несколько лучей в один достаточно сильный.

Брэгговская оптика - это набор сверхтонких слоев из чередующихся материалов показателем преломления n1 и n2. Толщина каждого слоя подбирается так, чтобы при прохождении света через такую структуру, возникающая интерференция для отраженных от границ раздела сред лучей приводила бы к их взаимному усилению.[6] Вследствие чего в определенном диапазоне длин волн такая многослойная структура начинает эффективно отражать свет, несмотря на то, что каждый ее слой в отдельности прозрачен. Для реализации оптической системы для ЭУФ литографии используются интерференционные покрытия, состоящие из слоёв молибдена и кремния. На данный момент зеркала в EUV-литографе состоят из 40-60 пар чередующихся между собой слоёв Mo-Si толщина каждого из которых равна

примерно 6,7 нм. Разработавшая и изготовляющая зеркала компания Zeiss производит их с высокой точностью. Отражение этих зеркал равно 70%, следовательно, пара зеркал вдвое снижает эффективное излучение. Из-за

того, что литографу для фокусировки излучения используется порядка десяти зеркал, после прохождение всей оптической системы литографа останется примерно 7% от начального излучения. На Рисунке 2.3. изображено поперечное сечение многослойного зеркала на основе кремний-молибдена.

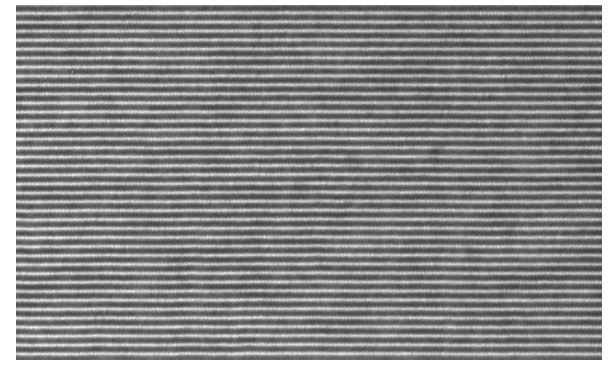


Рис 2.3 Поперечное сечение многослойного зеркала на основе кремний-молибдена

Вследствие малых размеров отражение от многослойного зеркала усиливается, потому что при отражении ЭУФ-излучения между лучами, отражёнными от разных бислоёв происходит конструктивная интерференция. Аналогичным эффектом в рентгеновской области является брэгговское отражение излучения от атомных плоскостей кристаллов.

Чтобы иметь хорошее отражение 60-70%, достаточное для работы системы, а также чёткое изображение, форма поверхности зеркал, используемых в оптической системе сканера, должна быть очень точной и не иметь структурных дефектов.

Теоретическая кривая нормального отражения для этой пары имеет пиковое значение 74% на длине волны 13,5 нм (рис. 2.4.), реальные значения оказываются ниже и составляют 64-69%. Это связано, во-первых, с тем, что в реальных оптических элементах лучи падают на поверхность под углом к нормали, а во-вторых с неровностями поверхности, которые также вносят отрицательный вклад в отражение. Так или иначе, хорошее отражение зеркал из Mo/Si и обусловило выбор длины волны для ЭУФ-литографии. Принцип действия многослойных зеркал и кривая отражения Mo/Si многослойных зеркал изображены на рисунке 2.4.

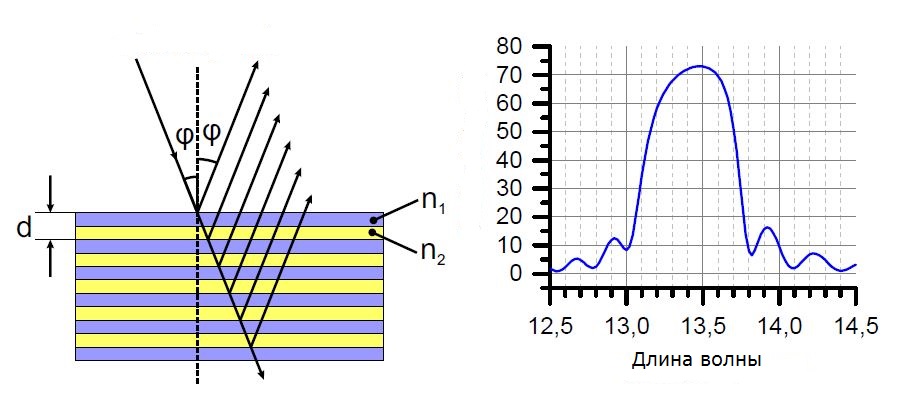


Рис.2.4. Принцип действия многослойных зеркал и кривая отражения Mo/Si

Требования к оптике для ЭУФ с 2012 года остались неизменны: шероховатость поверхности зеркала при диаметре d =100мм – должна быть не более 0,05 нм, погрешность толщины одного слоя материалов– не более 1%, что составляет порядка доли ангстрема, при толщине слоев Si и Mо равной 6,8 нм. Рассматривая производительность многослойной оптики на рисунке 2.3., можно увидеть улучшение достигнутой шероховатости зеркала с 0,25 нм до 0,05 нм . Эти значения совпадают с размерами атома. Элементы рентгеновской оптики для длины волны 13.5 нм изображены на рисунке 2.5.



Рис.2.5. Элементы рентгеновской оптики для длины волны 13.5 нм

Рассеяние, которое происходит при отражении ЭУФ-излучения от границы поверхности среды - это интерференция вторичных волн от элементарных излучателей в приповерхностном слое вещества. В случае малого рассеяния угловое распределение отражённого излучения содержит две компоненты: зеркальный пик, соответствующий отражению от идеально гладкой поверхности и повторяющий распределение интенсивности в падающем пучке, и широкую диффузную компоненту, распределение интенсивности в которой определяется свойствами рассеивающей поверхности.

Потери на отражение должны быть скомпенсированы большой яркостью источника света, и эта задача оказалась очень трудной в исполнении и на данный момент все силы направлены на неё.

## Расчёт

Принцип работы Брэгговских зеркал – это, интерференция волн, отраженных от границ раздела материала. Поскольку отражающая способность каждого зеркала равна примерно 30%, то после прохождения всей системы остаётся всего лишь 7%. Для достижения максимального КПД системы, при условии, что материал зеркал останется прежним должно выполняться условие Брэгга-Вульфа :

Условие конструктивной интерференции и, следовательно, максимума коэффициента отражения определяется соотношением Брэгга:

*(2.1)*

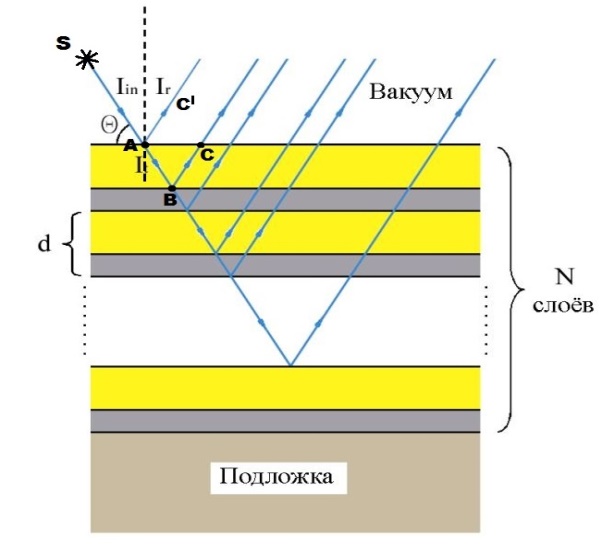
Где d – толщина слоя зеркала, θ-угол скольжения, n-целое число волн, λ-длина волны. Ход лучей ЭУФ-излучения можно видеть на рис. 2.6.

Рис. 2.6. Ход лучей ЭУФ-излучения

Достаточно рассмотреть только одну пару слоев 𝑛1/𝑛2, находящихся где-то внутри зеркала (за счет периодичности результат распространится и на всю структуру в целом)

Волна УФ излучения падает на многослойное зеркало с периодом d, под углом θ. Есть разница хода в путях лучей AC’ и BC эта разница обозначается:

Если эта разница равна целому числу волн n, то происходит наложение волн – интерференция. Известно, что при падении света с длиной волны 𝜆 на такую многослойную структуру для достижения эффективного отражения необходимо выполнение следующего условия интерференционного максимума для отраженных лучей

Используя теорему Пифагора получим:

Собрав всё вместе получим:

=

Упростим и получим условие Брэгга-Вульфа:

Из условия ясно, что чем больше угол скольжения, тем должна быть меньше толщина слоёв материала, но при этом должно выполняться другое условие – толщина 1 слоя материала d должна быть равна четверти длины волны излучения т.к. выполняется условие интерференционного максимума:

Максимальная толщина слоя равна:

Подставив в формулу (2.1) получим:

75+3,75)

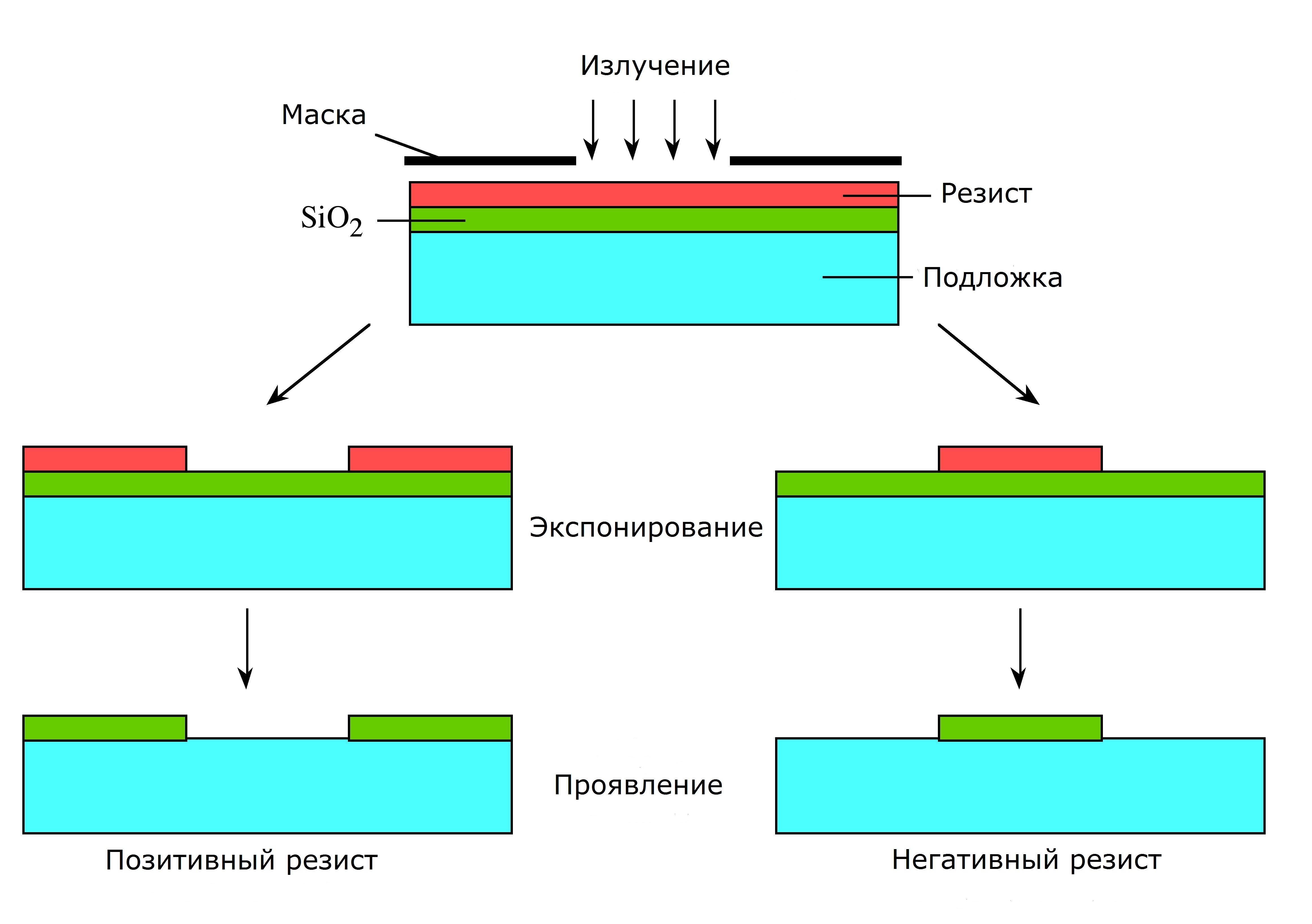
Следовательно искомый угол скольжения, при котором выполняется условие интерференционного максимума равен:

Из расчётов можно сделать вывод, что при соблюдение угла скольжения в наблюдается условие интерференционного максимума и тем самым увеличивается КПД сфокусированного оптической системой излучения. Сам материал зеркала и способ его изготовления при этом остаются неизменными, тем самым не повышается цена на этот процесс литографии в общем.

## Основные требования к свойствам маски и резиста

Основная проблема, возникающая при поиске фоторезиста для ЭУФ литографии, состоит в очень высоком поглощении ЭУФ излучения всеми природными материалами. Глубина поглощения для этого диапазона у стандартных органических фоторезистов не превышает 100 нм. Наиболее вероятным сценарием работы ЭУФ резиста представляется формирование требуемого изображения в тонком приповерхностном слое подложки. В настоящее время активно исследуются однослойные силилированные резисты, а также двух- и трехслойные резисты. Фоторезист, применимый для крупносерийного производства, должен обладать как высоким контрастом передачи изображения, так и чувствительностью, обеспечивающей приемлемые темпы производства. Чувствительность на уровне 5−10 мДж/см2 считается наиболее адекватно отвечающей поставленным задачам.

Как правило, в качестве резиста используются полимерные молекулы, образованные из мономерных звеньев на базе органических молекул. Экспонирование (УФ- или ЭУФ-излучение, рентген, электронный пучок) воздействует на молекулярные связи, и, как следствие, либо за счет разрыва связей в позитивных резистах уменьшается средняя молекулярная масса полимера, либо в результате облучения происходит «сшивка» исходных молекул (макромолекул) негативного резиста и его средняя молекулярная масса увеличивается. Таким образом в резисте создается скрытое изображение маски (области резиста с измененной средней молекулярной массой), которую требуется сформировать на подложке. Виды резистов можно увидеть на рис. 2.7.



Позитивные резисты, как правило, потенциально обеспечивают лучшее предельное разрешение, известным позитивным резистом высокого разрешения является полиметилметакрилат (ПММА), в котором теоретически можно достичь разрешения до 2÷3 нм.

Рис.2.7. Виды резистов и принцип их действия.

При последующем проявлении в позитивных резистах в специально подобранном растворителе (или под воздействием плазмы) с определенной селективностью удаляется созданная при экспонировании низкомолекулярная фракция позитивного резиста, то есть низкомолекулярная фракция удаляется быстрее. Соответственно, для качественного проявления заданной структуры маски, при экспонировании необходимо обеспечить существенное изменение средней молекулярной массы исходного резиста, то есть определенную концентрацию разорванных атомных связей. Таким образом, для создания маски на поверхности резиста требуется определенная доза энергии экспонирования.

Достижение предельного разрешения на каждой длине волны требовало решения сложнейших аппаратурных проблем. Все резисты должны удовлетворять совокупности следующих ключевых требований:

* Под воздействием излучения резист должен менять гидрофобно – гидрофильные свойства так, чтобы пленка фоторезиста после экспонирования могла быть проявлена в подходящем проявителе, как правило, в щелочном растворе.
* Полимерное связующее резиста должно быть прозрачно на длине волны излучения.
* Резист должен обеспечивать высокую устойчивость в процессах плазмохимического травления.
* Резист должен иметь высокую температуру стеклования, пленка резиста должна сохранять рисунок при высоких температурах, развивающихся в процессе плазмохимического травления.
* Резист должен иметь хорошую адгезию к различным подложкам.
* Резист должен иметь разумные сроки хранения и минимальные токсикологические риски.

Для увеличения производительности, необходимой в массовом производстве, необходимо улучшение характеристик резиста, используемого с длиной волны излучения 13,54 нм, при этом точность ширины линии должна соответствовать доле нанометра. Для мощности источника 250 Вт и чувствительности резиста 25 мДж/см2 ЭУФ степпер мог бы обрабатывать примерно по 100 подложек за час, что могло бы обеспечить доступное по цене использование при совмещении ЭУФЛ с другими литографическими процессами.

Исследователи, работающие с резистами на основе металло-оксидных соединений, обнаружили, что поглощение таких резистов в 4-5 раз выше, чем химически усиленных.

На рисунке 2.8. показано, что более высокое поглощение позволяет использовать пропорционально более тонкие резисты, что несколько снижает возникновение искажений в формируемых линиях. Резист толщиной 18 нм, наносился на слой легированного углерода толщиной 70 нм без использования необходимого в таких случаях нижележащего антиотражающего покрытия. Компания  TSMC, проводившая исследования, может на сегодняшний день поставлять резист с чувствительностью 26 мДж/см2, который обеспечивает неоднородность ширины линии 4,6 нм при глубине фокусного расстояния 140 нм.

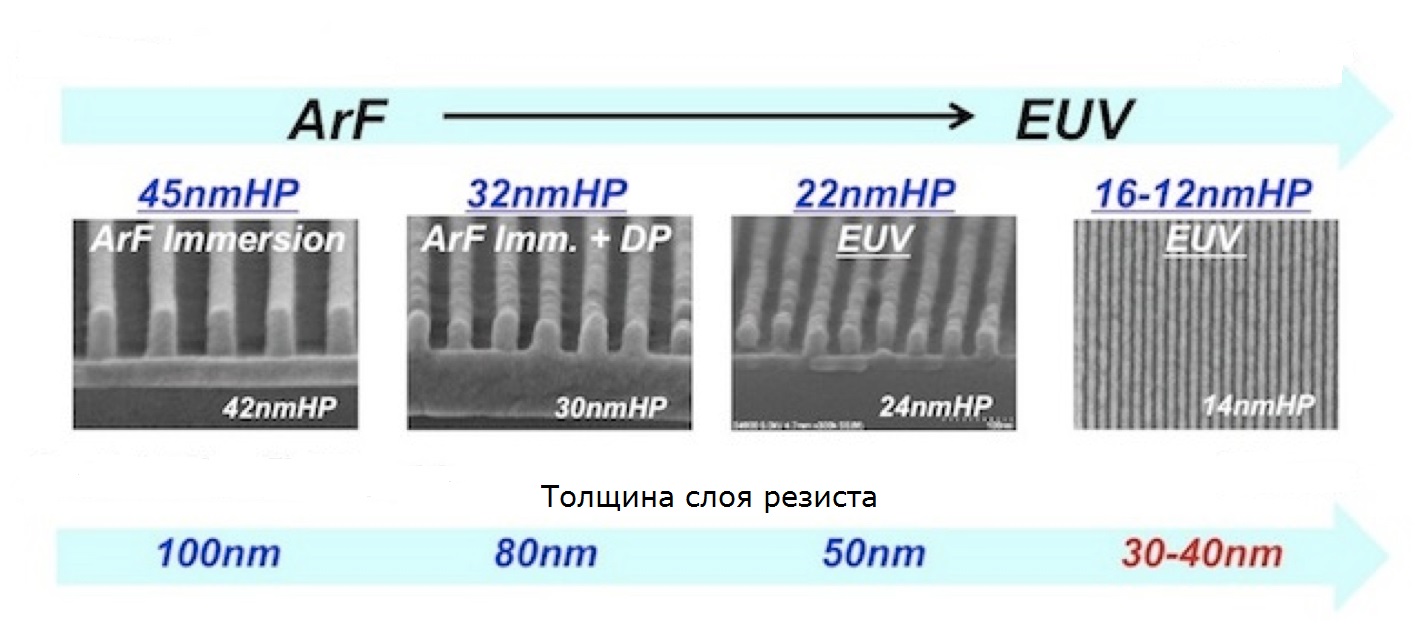


Рис. 2.8. Зависимость получившейся толщины линии образца от

толщины наносимого резиста

* 1-й рис: половина шага между дорожками металлизации 45 нм, иммерсионная литография в ArF
* 2-й рис: половина шага между дорожками металлизации 32 нм, иммерсионная литография в ArF и двойное паттернирование
* 3-й рис: половина шага между дорожками металлизации 22 нм,
* 4-й рис: половина шага между дорожками металлизации 13 нм, ЭУФ

Компания TSMC представила вывод о компромиссе между чувствительностью и неравномерностью линии для резистов на основе металло-оксидов для ЭУФ: либо ультравысокая чувствительость 7 мДж/см2 для получения лини 17 нм с неравномерностью ширины линии 5,6 нм, либо низкая чувствительность 33 мДж/см2 и создание линий 23 нм с неравномерностью ширины линии 5,6 нм.

## Вклад российских учёных в решении проблемы создания ЭУФ-литографа

В настоящее время EUV литография – основной фронт развития технологии производства наноэлектроники со структурами ~ 20 нм. По мнению ведущих производителей микроэлектроники использование EUV литографии на базе лазера на свободных электронах (ЛСЭ) в ближайшем будущем может стать основной технологией массового производства приборов со структурами до 5 нм. Одним из основных препятствий для этого является отсутствие работающего ЛСЭ с нужными параметрами. Рассматривается возможная программа разработки и создания такого ЛСЭ для реализации производства наноэлектроники в России на базе ЭУФ- литографии силами ИЯФ, других институтов РАН, Росатома, микроэлектронной промышленности России и промышленности Белорусси.

Чтобы оценить важность открытия российских ученых, нужно просто рассмотреть несколько фактов. EUV-нанолитография, действующая в диапазоне менее 15 нанометров – это технология производства микропроцессоров завтрашнего дня. И владеют этой технологией только три компании: ASML, Nikon и Canon.

Два года назад на базе компании «РнД-ИСАН» была создана новая фирма EUV Labs, которая в свою очередь стала фундаментом для новой технологической компании в Троицке.[9] Также в состав учредителей вошли Фонд инфраструктурных и образовательных программ (ФИОП) и Совместный центр трансфера технологий РАН и РОСНАНО.

Впоследствии, перехватив опыт своих коллег из США, российские учёные начали разрабатывать, создавать и тестировать новое оборудование для EUV-литографии. Оно не должно было уступать качеству всех современных разработок и стоить намного дешевле. Отображение этапов изучения и производства данной технологии российскими учёными можно увидеть в таблице (2.1).

Таблица 2.1

Этапы производства компонентов литографии в ЭУФ российскими учёными

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Годы | Этапы | Соисполнители |
| 2010 | Создание DUV-наносканеров на λ=193 нм (NA≥0,9), разрешение 45 нм и 32 нм | НПК ГОИ  НИТИОМ ГОИ  ГУ ИТМО  МГУ НИВЦ  ФТИ РАН  ЦФП ИОФ РАН  ОАО «НИИМЭ и Микрон»  ФТИАН БГТУ |
| 2014 | Экспериментальный образец с иммерсией, разрешение 45 нм |
| 2014 | Опытно-промышленный образец с иммерсией, разрешение 45 нм |
| 2016 | Экспериментальный образец с иммерсией, разрешение 32 нм |
| 2017 | Опытно-промышленный образец с иммерсией, разрешение 32 нм |
| 2010-2017 | Создание EUV- наносканеров на λ=13,5 нм. разрешение 16–22 нм | ИФМ РАН  ФТИАН  ФТИ РАН  НПК ГОИ  ТРИНИТИ  ГУ ИТМО  ОИЯИ  МГУ  ИС РАН  ОАО «НИИМЭ и Микрон» |
| 2014 | Лабораторно-экспериментальный образец степпера, разрешение 10–16 нм, поле изображения 2,0×2,0 мм2 |
| 2017 | Опытно-промышленный образец, разрешение 16–20 нм, поле изображения 26 ×32 мм2 |

Создание Технологической Компании на базе EUV Labs стало логическим продолжением развития компании после получения поддержки от Сколково. Руководить работой EUV Labs стал Константин Кошелев, который сосредоточился на работе только в России, – специалисты ЭУФЛабс и Института спектроскопии работают над созданием нового EUV-источника, способного работать в диапазоне 6,5–6,7 нм.

## Полученные результаты по состоянию на 2016-2017г.г.

Эксперты компании IBS считают, что переход к меньшим топологическим нормам может оказаться продолжительнее, чем ожидалось. Это связано с более высокими издержками и долгими сроками проектирования. [10]

Мировые лидеры в производстве электроники утверждают, что и при переходе на топологическую норму 10 нм будут улучшения быстродействия, но конкретных сроков начала поставок электроники не называют. Если ориентироваться на предыдущие планы, то приборы с использованием компонентов с 10 нм появятся на прилавках в конце 2017 или начале 2018 года. Intel учится на своих ошибках при работе над 14 нм и надеется избежать тех же проблем при движении к 10 нм. Подтверждение тому, что уменьшение топологии замедлилось служит последний процессор компании Intel - core i7 7700k , выполненный по топологической норме 14 нм. В настоящее время самые прогрессивные из доступных на рынке микропроцессоров производятся по 14-нанометровому техпроцессу.[11]  
 Пока что GlobalFoundries рассчитывает освоить технологию в 7 нм к 2018 году без использования ЭУФ, но когда последняя дойдёт до готовности, не откажется и от неё. Intel рассматривает глубокий ультрафиолет, но не хочет использовать его без крайней необходимости из-за более медленного процесса его развития, чем это ожидалось.

Основные условия, необходимые для внедрения ЭУФ-технологии в промышленное производство:

• наличие бездефектных масок, сохраняющих свои параметры в течение жизненного цикла, и комплекс оборудования для контроля и классификации дефектов масок;

• долговременный режим работы источника излучения с мощностью 100 Вт в промежуточном фокусе и энергией порядка 5 МДж в день;

• материал резиста, который одновременно должен удовлетворять требованиям по разрешению, чувствительности и размытию края линии.

• решение проблем с точностью изготовления и контроля форм зеркал и увеличение коэффициента их отражения

Реализация проекта заложит фундамент для создания инновационной продукции, востребованной на всём рынке микроэлектроники, в первую очередь, для широкомасштабного производства ИС по технологическим нормам 20 нм и менее.

В рамках российских и европейских научных программ в Институте физики микроструктур РАН (ИФМ РАН) получены значительные научно-практические результаты в области EUV-литографии на λ=13,5 нм для реализации наноструктур с минимальными размерами 14 нм и ниже. Работы выполнены с участием ASML.

# Список литературы

1. Салащенко Н.Н. , Чхало Н.И. Коротковолновая проекционная нанолитография**,** [Вестник Российской академии наук](http://naukarus.com/j/vestnik-rossiyskoy-akademii-nauk) 2008. - Т. 78, N 5. - С. 450-457 ISSN: 0869-5873
2. Лапшинов Б.А. Технология Литографических Процессов, М., 2011.–95с. ISBN 5-230
3. Макушин М. Домасштабировались? Экономика уменьшения топологий. Электроника: НТБ №3 (00134) 2014
4. Агеев О.А, Федотов А.А., Смирнов В.А. «Методы формирования структур элементов наноэлектроники и наносистемной техники» Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. - 72 с.
5. Калита В. И., Комлев Д. И. «Плазменные покрытия с нанокристаллической и аморфной структурой»— М.: «Лидер М», 2008.–388 с
6. В.И. Козловский, П.А. Трубенко, Ю.В. Коростелин, В.В. Роддатис «Распределенные брэгговские зеркала» Физика и техника полупроводников, 2000, том 34, вып. 10
7. М.Макушин Электроника: НТБ 3/2010 с.с. 21-75
8. Сейсян Р. Нанолитография СБИС в экстремально дальнем вакуумном ультрафиолете, Журнал технической физики, 2005, том 75, вып. 5 76с.

## Издательский Дом Коммерсант «Ультрафиолет – свет прогресса»

www.kommersant.ru

1. «Geektimes» Ведущие производители чипов присматриваются к фотолитографии в глубоком ультрафиолете
2. Россоленко А.Н., Голикова Т.Е., Зверев В.Н., Литографии в микроэлектронике, Методическое пособие ИФТТ РАН, 2015