

Р. П. Сейсян НАНОЛИТОГРАФИЯ В ЭКСТРЕМАЛЬНОМ УЛЬТРАФИОЛЕТЕ И МЯГКОМ РЕНТГЕНЕ

Р. П. Сейсян

**НАНОЛИТОГРАФИЯ В ЭКСТРЕМАЛЬНОМ
УЛЬТРАФИОЛЕТЕ И МЯГКОМ РЕНТГЕНЕ**

Р. П. Сейсян

НАНОЛИТОГРАФИЯ
В ЭКСТРЕМАЛЬНОМ УЛЬТРАФИОЛЕТЕ
И МЯГКОМ РЕНТГЕНЕ



ПОЛИТЕХ-ПРЕСС

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Санкт-Петербург

2024

ББК 32.844.1:37.83:30.61:22.346

С28

Сейсян Р. П. **Нанолитография в экстремальном ультрафиолете и мягком рентгене** / Р. П. Сейсян. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 134 с.

Выполнен анализ тенденций развития микроэлектроники, в том числе основания известного закона Мура. Рассматривается роль в этом процессе фотолитографии и возможная роль в дальнейшем развитии микроэлектроники нанолитографии в экстремальном ультрафиолете и мягком рентгене. Обзор основан на обширном экспериментальном и теоретическом материале, на рассмотрении известных литературных данных, а также собственных работ автора и взаимодействующих с ним исследователей, главным образом вовлечённых в разработку нанолитографической системы, названной автором проектом ФТИ. Изложение охватывает основные элементы, входящие в построение ЭУФ- и МР-литографа. Такой подход даёт возможность рассмотрения проблемы с единых позиций, а также максимального приближения к актуальным отечественным задачам.

ISBN 978-5-7422-8528-1

© Сейсян Р. П., 2024

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2024

Содержание

1. Фотолитография в микроэлектронике. Нанолитография в ЭУФ и МР	4
2. Основные закономерности развития микроэлектроники	5
3. Эволюция интеграции ИС	10
4. Основания «закона Мура»	12
5. Геометрия «чипа» и интеграция ИС	16
6. Принципиальное сравнение фото- и электронной литографии... ..	19
7. Преимущества волнового метода формирования изображения... ..	23
8. Фотолитография с использованием ультракоротковолнового излучения	26
9. Первые ЭУФ нанолитографы. Техника и технология ЭУФ нанолитографии	27
10. Проект ЭУФ и МР нанолитографии ФТИ. История становления и развития	42
11. Концепция нанолитографа для научно-технического применения ..	51
12. Из начал рентгеновской оптики — применительно к ЭУФ и МР нанолитографии	55
13. Оптическая система экспериментального ЭУФ-литографа ФТИ... ..	63
14. Общая конструкция нанолитографа ФТИ (ЭНЛ).	67
15. Источники ЭУФ и МР излучения. Источник ЭУФ излучения, разработанный в проекте ФТИ.....	69
16. Неорганический ЭУФ резист.....	95
17. Контрольно-измерительные системы	101
18. Системы фокусировки и совмещения	109
19. Нанопозиционеры образца и маски	113
20. Вибро- и пылезашита	118
21. Перспективное решение источника ЭУФ-излучения для нано-литографии, следующее из Проекта нанолитографии ФТИ им. А. Ф. Иоффе	120
22. Пути дальнейшего повышения разрешающей способности ЭУФ нанолитографа.....	125
23. Заключение	126
Список литературы	128

1. Фотолитография в микроэлектронике. Нанолитография в ЭУФ и МР

Ключевым моментом, обеспечивающим уже в течение полувека беспрецедентно высокие темпы развития микроэлектроники, являлась возможность непрерывного уменьшения минимального характеристического размера элемента интегральной схемы (ИС) в плоскости кристалла, a_{min} , называемого CD (critical dimension), или проектной нормой. До настоящего времени это уменьшение обеспечивалось лишь некоторыми усовершенствованиями процессов фотолитографии, использовавшей последовательно видимый и ультрафиолетовый диапазоны электромагнитного излучения. Сегодня посредством фотолитографии удаётся достичь существенно нанометровых размеров, когда $a_{min} \ll 100 \text{ nm}$. В связи с устойчивой тенденцией к уменьшению CD, обычно упоминают т.н. «закон Мура», который сводится к экспоненциальному росту интеграции производимых электронной промышленностью интегральных схем. Такой рост интеграции, естественно, базируется на соответствующем, также близком к экспоненциальному, уменьшению характеристического размера элементов ИС. Экспоненциальный характер роста интеграции (а также и уменьшения CD) не является строгим. В разное время и для различных видов микроэлектронной продукции характер зависимости, в целом близкий к экспоненте, видоизменялся, например, порой демонстрируя явные признаки насыщения. Отдельные данные, используемые в построении очередной экспоненты, как следует из анализа источников реального хода зависимости, постоянно меняются. На рис. 1 мы приводим одну из последних по времени реализаций «закона Мура» Moore's Law — с указанием около экспериментальных точек конкретных марок микропроцессоров, взятых для демонстрации обсуждаемой зависимости. Точки хорошо аппроксимируются в логарифмическом масштабе прямой, с наклоном, соответствующим одной из самых ранних формулировок «закона Мура», а именно: «интеграция увеличивается вдвое в течение полутора лет». Если учитывать, что экспериментальные точки охватывают полувековой период времени в развитии человеческого общества, нельзя не признать, что некий «закон» существует, и, более того, носит глобальный характер.

ров, их составляющих. Но особенно неожиданными оказались данные, посвященные общим объемам производства и продаж в электронике, наряду с анализом долговременных изменений в структуре производительных сил американского общества.

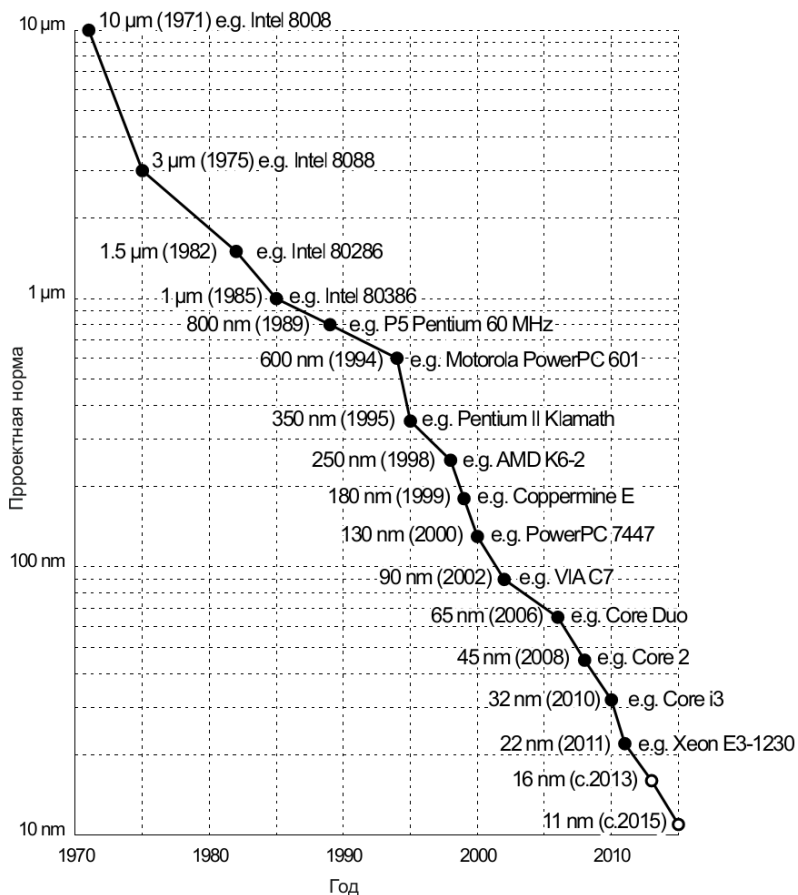


Рис. 2. Уменьшение CD, сопровождающее увеличение интеграции ИС — с привязкой к конкретным типам ИС МИКРОПРОЦЕССОРОВ, фигурирующих на Рис.1.

Как выяснилось, большинство процессов, связанных с развитием микроэлектроники, носит явно выраженный экспоненциальный характер, а темпы изменений таковы, что подобных им еще не знало человечество на всем протяжении того, что принято

называть научно-технической революцией. Это справедливо и для электроники в целом, которая, как было показано С. Зи, развиваясь в течение последнего полувека с темпом 15% годовых, в конце 80-х вышла на уровень товарооборота, превосходящий любую другую отдельно взятую отрасль промышленности США. Такого темпа не знало ни одно из направлений научно-технического прогресса (рис. 3).

Естественно ожидать, что столь быстрое развитие в ограниченной среде не сможет продолжаться сколь угодно долго. Как известно, экспонента — неумолимо крутая функция, и результат здесь (применительно к электронике) будет увеличиваться 2.3 раза относительно предыдущего состояния приблизительно в каждые шесть с половиной лет. Тем не менее, такой характер развития уже имел место, по-видимому, в течение ~50-ти лет. И способ, при помощи которого этот темп оказалось возможным поддерживать, также очевиден из доклада С. Зи. Это становление и развитие микроэлектроники, темп роста которой и вовсе беспрецедентен — 25% годовых (рис. 4).

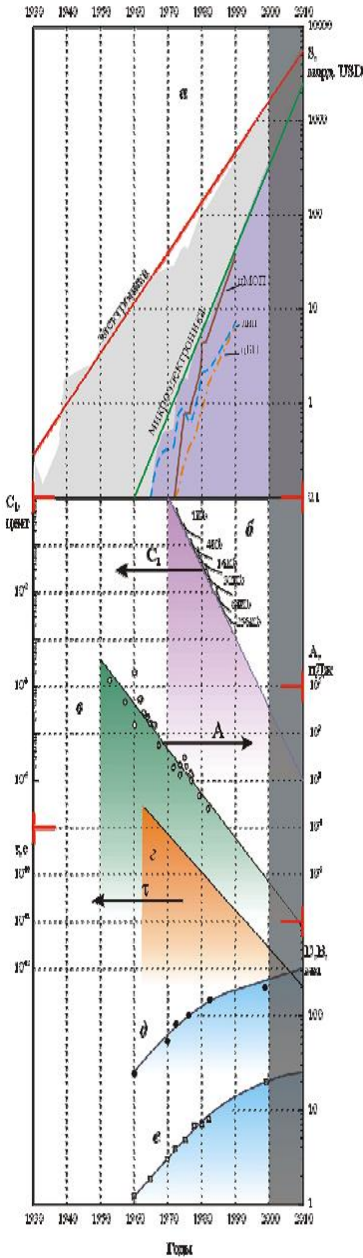


Рис. 3. Изменения в объемах производства электроники и микроэлектроники, сопровождающие их изменения электронных свойств элементов ИС, себестоимости единицы площади подложки, а также диаметра кремниевой подложки (d) и площади чипа (e).

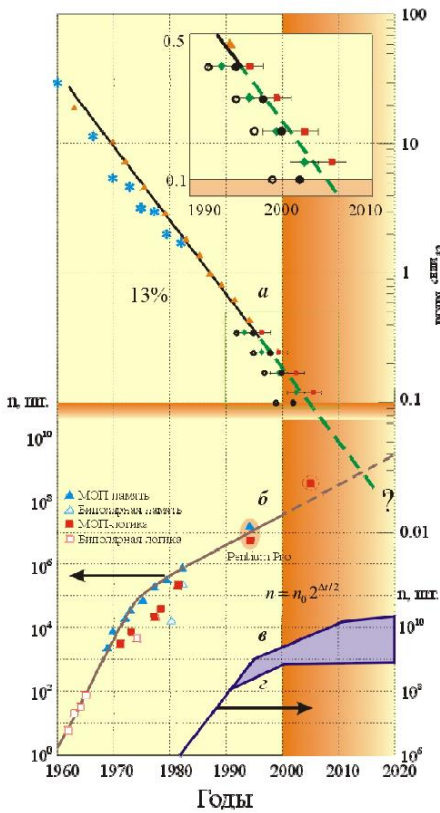


Рис. 4. Уменьшение по годам минимального размера, занимаемого элементом ИС в чипе (а), и рост интеграции ИС по годам (б). Прогноз Мейндла по росту интеграции ИС, ограниченному предельными возможностями электронной литографии 1980-х годов, предельное разрешение (г) – 500 нм, (в) 250 нм.

Отметим, что одновременно происходит также беспрецедентное снижение энергопотребления, сопровождающееся ещё и снижением удельной себестоимости элементов ИС до исключительно низких величин. Соответствующие зависимости от текущего времени для работы, затрачиваемой на единицу информации (бит), или же — иначе — для «параметра качества», A , полупроводникового прибора в составе интегральной схемы (ИС), и для себестоимости элементарного микро-участка ИС, предназначенного для обработки этой единицы информации, также приводятся С. Зи. Они представляют собой падающие экспоненциальные зависимости, что соответствует быстрому относительному удешевлению ИС при одновременном уменьшении удельного энергопотребления. Важно, что характеристические параметры элементов ИС при этом только улучшаются. Происходит это

также по экспоненте, о чем свидетельствует такая важная характеристика, как постоянная времени переключения, t , определяющая быстродействие (рис. 3 z). Особенно неожиданным может показаться первоначальный экспоненциальный рост еще и такой консервативной величины, как диаметр кристаллической пластины (D) — параллельно с увеличением размера кристалла, на котором располагается каждая отдельная ИС (чип) (рис. 3 d, e). Действительно, выращивание кристалло-физически высокосвершенных полупроводниковых монокристаллов кремния большого диаметра при соблюдении высочайшей чистоты (менее одного атома непредусмотренной примеси на десять миллионов атомов кремния) и однородности — сложнейшая задача, требующая одновременного решения целого комплекса научно-технических проблем на каждом сколько-нибудь существенном этапе увеличения диаметра полупроводниковой подложки. (Заметим, однако, что в данных, опубликованных С. Зи, еще не содержалось необходимых подтверждений экспоненциальности исследуемой зависимости, так как функция на рассмотренном интервале времени изменялась меньше, чем на порядок величины. Только сейчас этот диаметр в массовом производстве наиболее передовых фирм достиг значения больше, чем $D = 200$ мм, и это означает почти 10 раз, если вести отсчет со второй половины 50-х годов, когда диаметр едва доходил до 20-ти мм.) Сегодня уже используются кремниевые пластины диаметром в 300 мм, и даже в 450 мм. Но здесь, естественно, заметно некоторое замедление роста.

3. Эволюция интеграции ИС

Одним из наиболее важных процессов, сопровождающих развитие микроэлектроники, является быстрый рост интеграции ИС, который, на примере интеграции схемы микропроцессора был показан ещё на рис. 1.

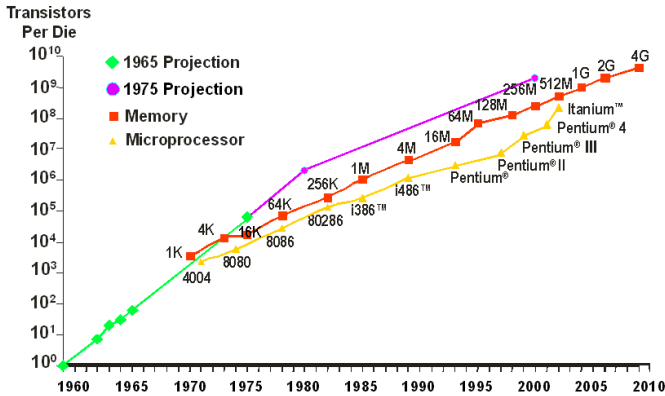


Рис 5. Интеграция различных ИС – с1960 по 2010 г.

На рис. 4, где приводится реализованная интеграция ИС различного назначения, замечается определённое замедление темпов роста, выражающееся в сублинейной зависимости роста $n(t)$. На рис. 5, где мы показываем рост интеграции различных ИС по годам, это также хорошо видно.

На рис. 6 приводится вид полупроводниковых пластин различного диаметра с расположенными на них чипами.

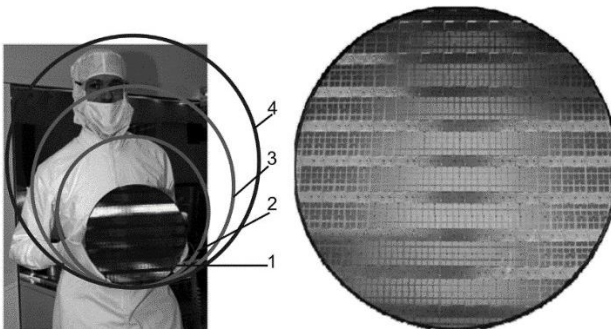


Рис. 6. Кремниевая пластина диаметром 200мм на руках у оператора (слева); поверхность пластины увеличенного размера: исходная — 1, 300мм — 2, 400 мм-3. 500 мм — 4. Справа – исходная пластина отдельно, в увеличенном масштабе, чтобы были различимы на поверхности пластины будущие чипы.

Увеличение диаметра приводит к квадратичному падению себестоимости чипа. Понятно, что увеличение диаметра пластины уже создаёт проблему её транспортировки между технологическими установками. Одновременно с увеличением диаметра кремниевого монокристалла происходит гигантский рост стоимости всего остального технологического оборудования для изготовления интегральных схем, которое необходимо согласовать по размерам с уже и так большой величиной диаметра пластины. Интересно, что при этом размер «чипа» вплоть до 80-х растет вполне параллельно с диаметром, притом локальный наклон соответствует наклону зависимости от времени диаметра пластины, оставляя неизменным общее количество чипов на пластине: от 400 до 1000.

4. Основания «закона Мура»

Естественно, задаться вопросом: не существует ли некоторой общей причины столь стремительного развития уровня интеграции и, если таковая существует, то нет ли соответствующей ключевой зависимости, это развитие обеспечивающей? Тогда можно было бы попытаться ответить и на следующий вопрос: какой фактор окажется, в конце концов, ограничительным обстоятельством, или, иначе — что, наконец, остановит стремительную экспоненту?

Этими вопросами пришлось задаться автору статьи еще в конце 60-х, отвечая, в частности, на запрос Госплана СССР относительно прогнозов на новую пятилетку. Для ответа казалось естественным проанализировать тенденции развития элементной базы электроники на основе широкодоступных статистических данных по США. Мы построили зависимость количества выпущенных промышленностью США резисторов и конденсаторов, а также активных элементов и прочих электронных компонентов от времени по годам [2].

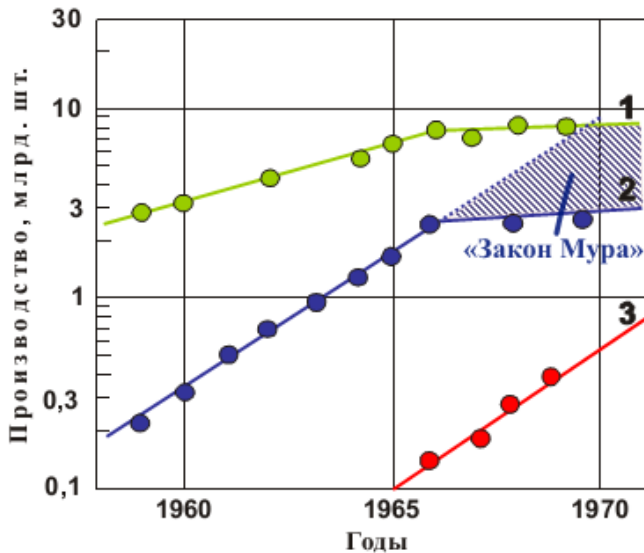


Рис. 7. Moor's Law. «Закон Мура».

Электронные компоненты, выпускавшиеся электронной промышленностью США: 1 – резисторы и конденсаторы, 2 – резисторы, конденсаторы, активные элементы и прочие электронные компоненты, 3 – интегральные схемы.

И выяснилось, что растут они весьма круто. Как и зависимости, изображенные на рис. 3, и впервые продемонстрированные С. Зи, более, чем 10 лет спустя, эта зависимость оказалась экспоненциальной. Количество ИС по сравнению с другими компонентами незначительно, но если учесть интеграцию ИС, мы должны будем вернуться к продолжению кривой (2), показанному пунктиром. По-видимому, отсюда (как разность между 1 и 2) и могла бы следовать зависимость, получившая широкую известность, как «закон Мура».

Если считать зависимость (1, рис. 7) вполне устойчивой, и экстраполировать её на следующие годы, пришлось бы только для выпуска дополнительных резисторов и конденсаторов построить в следующей пятилетке новых заводов столько, сколько их уже существовало до этого. Ответственный вывод! А как быть тогда с прочими компонентами, а также с отраслями промыш-

ленности, эти компоненты потребляющими для создания электронной аппаратуры?

Общий анализ возможных первопричин этой зависимости приводил нас к выводу о естественной связи количества востребованных электронных компонентов с количеством информации, накопленным человечеством в ходе исторического развития, и с темпами ее дальнейшего пополнения. Проблема эволюционного развития количества информации изучалась наукой «наукометрия» [3]. Оно накапливается экспоненциально, и именно этот процесс развития естественно рассматривать в качестве главного стимулирующего момента, и полагать, что всякое изменение в количестве электронных компонентов необходимо, прежде всего, для построения средств получения, обработки, хранения и воспроизведения информации. Именно электронная техника призвана это развитие обеспечить технологически.

Обратимся к математическому смыслу экспоненциальной зависимости. Как известно, экспонента является решением простого линейного дифференциального уравнения первого порядка:

$$dy/dx - ky=0.$$

Физический смысл зависимости, описываемой таким уравнением, можно было бы свести к простому условию: «скорость» изменения некоторой величины y по x пропорциональна (коэффициент пропорциональности — k) реализации этой величины. Вспомним известное высказывание Ф. Энгельса в «Набросках к развитию натурфилософии» [4]: «Наука (измеряется количеством информации, прим. автора) движется вперед пропорционально массе знаний, унаследованных ею от предшествующих поколений: чем дальше, тем быстрее ее развитие». Обозначая количество информации через Q и рассматривая ее изменение во времени t , запишем:

$$dQ/dt=kQ,$$

что и будет означать пропорциональную связь скорости накопления новой информации, dQ/dt , информации, уже имеющейся в распоряжении в настоящее время, Q . Понятно, что закон эволю-

ционного увеличения накопленной информации в таком случае описывается экспонентой:

$$Q=Q_0 \exp (kt)$$

(Энгельс ошибочно полагал, что соответствующий закон описывается параболой, и был позже поправлен Луи де Бройлем.) Как выяснено наукометристами, такую зависимость действительно можно проследить, по крайней мере, начиная со времени становления и развития полиграфии — при изучении количества информации, заключенного в научных печатных изданиях [3].

Естественно предположить определенную связь между количеством обслуживаемой информации, Q , и количеством электронных компонентов, N , выпускаемых для этого промышленностью. Это вполне объяснило бы экспоненциальный ход зависимости на рисунках 1-6, но ещё не даёт ответа на вопрос: не надо ли было на самом деле построить в начале 70-х столько заводов по производству электронных компонентов, сколько их уже перед тем существовало? Ответ понятен, если обратить внимание на излом этой зависимости, произошедший в середине 60-х. Рост выпуска дискретных электронных компонентов с этого момента резко замедлился, но одновременно появилось новое производство, а именно производство интегральных схем (ИС). И если эта добавка и не составит заметного изменения в общем количестве электронных компонентов, то учет интегрированных в каждой ИС электронных приборов, или же интеграции ИС — n , вновь приведет нас к продолжению исходной экспоненциальной зависимости — безо всяких переломов.

Крутой рост реализующейся интеграции n явился основанием т.н. «закона Мура» в первоначальной его формулировке: «интеграция увеличивается вдвое каждый год». Это соответствовало действительности несколько более 10-ти начальных лет развития микроэлектроники, но далее, начиная со второй половины 70-х, ход зависимости несколько замедлился, что заставило Мура искать другие формулировки: «два раза в два года» или же, потом, точнее, «четыре раза в три года» (модифицированный закон Мура).

5. Геометрия «чипа» и интеграция ИС

Рассматривая проблему темпов роста интеграции ИС, отметим, прежде всего, что увеличивать n выгодно с точки зрения достижения более высокой производительности обработки информации, как ввиду возможности запараллеливания большого количества каналов обработки и использования более емких внутренних резервуаров памяти, так и ввиду увеличения быстродействия всех процессов. Однако реальные возможности всегда ограничены предельно малым размером того элемента, из которого строятся все входящие в ИС приборы. Этот минимальный размер, a_{min} , в свою очередь определяется минимальными физически достижимыми размерами, или же предельной разрешающей способностью того или иного вида микро-техники, т.е. техники создания микро-рисунка на поверхности полупроводниковой пластины. Формально интеграцию можно определить как количество элементарных компонентов, которые возможно разместить на поверхности чипа. Обозначая интеграцию n , запишем:

$$n=(B-b)^2/k_3a_{min}^2.$$

Здесь b — это площадь технологических и контактных полей, не занятая непосредственно под элементы ИС, а коэффициент заполнения k_3 это коэффициент, определяющийся реальной конструкцией элемента ИС, а также зазорами между элементами (рис. 8). Можно сказать, что начало производства ИС сопровождается переходом электронной промышленности к принципиально новому методу производства. Его мы называем интегрально-групповым методом (ИГМ). ИГМ сводится к объединению всех электронных элементов на едином плоском носителе в строгом порядке — типа двумерной периодической решётки, и к сохранению этого порядка на протяжении всего технологического процесса. Это позволяет — при точном совмещении начала координат далее не заботиться о совмещении каждого элемента в отдельности. На рис. 8 схематически изображены элементы ИС, размещённые на носителе, как правило, представляющем собой относительно тонкую кремниевую полупроводниковую пластину с хорошо обработанной поверхностью. Элемент ИС на рис. 8 искусственно сведён к квадрату, хотя в

реальной ИС он занимает обычно прямоугольную площадку, минимальный размер которой задаётся a_{min} , или CD.

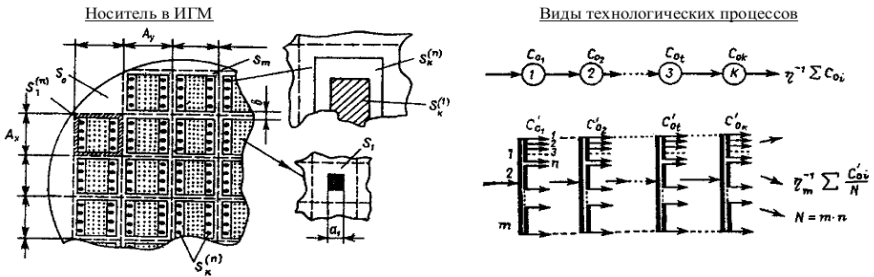


Рис. 8. Носитель в ИГМ и последовательность технологических процессов изготовления ИС.

Все величины, входящие в выражение для n , в принципе, не являются константами и изменяются во времени. Величина b составляет обычно малую долю B , и эта доля уменьшается с увеличением интеграции. Анализ вклада в интеграцию коэффициента заполнения k_3 весьма поучителен. В первое десятилетие развития микроэлектроники уменьшение этой величины обусловило 21-кратный рост интеграции. К концу первого десятилетия (пределы «классического» закона Мура), вклад k_3 далее уменьшился в результате применения автоматизированных систем проектирования и, главное, понимания важности этого показателя качества топологического рисунка ИС — до 2.1 раза за последовавшие годы. В дальнейшем он будет изменяться слабо, и мы будем считать k_3 константой, большей или равной ~ 10 . Таким образом, пренебрегая малым изменением этих величин со временем, мы могли бы получить $n(t)$, главным образом, как произведение квадратов только двух временных зависимостей: $B(t)$ и $a_{min}^{-1}(t)$, притом зависимость $B(t)$ относительно слаба. Таким образом, определяющей зависимостью оказывается $a_{min}(t)$.

Обратимся теперь к c_1 , т.е. к себестоимости микро-участка полупроводниковой пластины, осуществляющего элементарную логическую операцию в 1 бит. Ее площадь и будет приблизительно равна $S_1 = k_3 a_{min}^2$. Значение c_1 можно определить как [5]

$$c_1 = \left(\frac{S_1}{\Pi \eta_{ij}} \right) \frac{\Pi \eta_0}{\sum N_i S_i}$$

Здесь $\Pi\eta_{ij}$ является результирующим выходом годных — произведением выхода элементов (i) и технологических операций (j), $\Sigma C_{wj} = C_0$ — себестоимость этих технологических операций, плюс стоимость кремниевой пластины, а $\Sigma N_i S_i$ полная полезная площадь пластины, отведенная под элементы ИС. Эта полная полезная площадь равна

$$\Sigma N_i S_i = m n \kappa / a_{\min}^2,$$

где m — это количество «чипов» на полупроводниковой пластине, $m \approx \pi D^2 / 4B^2$. Оно составляло, как уже отмечалось, почти постоянную величину 400-1000, затем, с дальнейшим увеличением интеграции стало падать и уменьшилось около 10 раз. Выход годных ИС промышленность стремится удерживать на постоянном уровне. Что же касается технологических затрат на уровне обработки полупроводниковой пластины, то эта величина растет, но относительно медленно. Таким образом, как выясняется, c_1 определяется прежде всего величиной $(mn)^{-1}$.

$$\text{Точнее, } c_1 = (C_0 / \eta_0) (\kappa / a_{\min}^2 / m (B-b)^2) \approx (C_0 / \eta_0) (4\kappa / a_{\min}^2 / \pi D^2).$$

Первое выражение справедливо при постоянстве m , второе зависит только от диаметра пластины и более подходит для СБИС высокого уровня интеграции (здесь себестоимость падает как обратный квадрат диаметра пластины, вот почему выгодно увеличивать диаметр!). Определяющей эволюцию удельной себестоимости вновь оказывается зависимость $a_{\min}(t)$.

Что же касается характеристических параметров приборов, входящих в ИС, таких как параметр качества A , или же τ , определяющее быстродействие, то и здесь решающая роль принадлежит a_{\min} . Действительно, A пропорционально переключаемому заряду и, таким образом, объему активной области прибора, т.е. a_{\min}^2 при неизменной ее толщине (на самом деле толщина тоже уменьшается, но медленно). Быстродействие (τ^{-1}) также ограничено временем прохождения носителей заряда между истоком и стоком ($\tau = a_{\min}^2 / \mu U$, где μ — подвижность носителей, а U — приложенное напряжение; приближение постоянной подвижности) и растет как a_{\min}^{-2} (a_{\min}^{-1} — в режиме насыщения).

Таким образом, у нас имеются все основания считать $a_{min}(t)$ ключевой зависимостью, предопределяющей основные характерные черты эволюции в микроэлектронике.

6. Принципиальное сравнение фото- и электронной литографии

До некоторого времени ответ на этот вызов казался простым. Роль электромагнитного излучения в формировании микро-рисунка перейдет к заряженным электронным пучкам, при применении которых дифракционный предел отодвигается далеко за пределы значимых величин. Действительно, длина волны электрона по де Бройлю $\lambda_e = h/(2mE)^{1/2}$ определяется его массой m и энергией, приобретенной в ускоряющем потенциале. Уже при разности потенциалов в 15кВ λ_e составляет 10^{-2} nm, и соответствующий предел по Рэлею уменьшается до атомных размеров. Способность электронных пучков разрешать изображения на таком уровне хорошо известна по электронной микроскопии. Рассмотрим возможность ее применения к формированию микро-рисунка ИС.

На рис. 9 мы приводим относительно современный микро-рисунок, изготовленный на полупроводниковой пластине электронным пучком по специальной технологии.

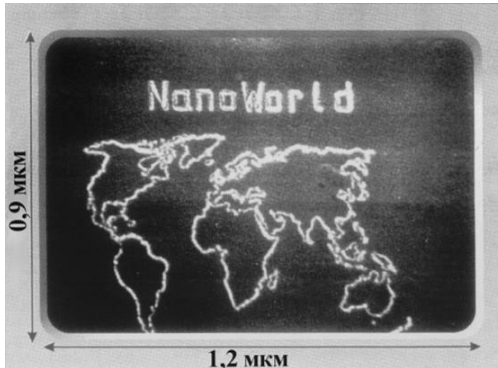


Рис. 9. Карта мира, выгравированная электронным пучком по специальной технологии, многократно помещающаяся на срезе человеческого волоса (любезно предоставлена автору директором НИИ чистых материалов микроэлектроники (г. Черноголовка).

Заметим, что эта технология хорошо демонстрирует экстремальные возможности электронной литографии, но ещё не может быть применена в планарной технологии ИС. Основная трудность, которую до сих пор стремились преодолеть разработчики электронной литографии, состояла в излишне глубоком проникновении электронов в вещество, приводившем к размытию микрорисунка из-за вторичных процессов в материалах резиста и подложки. Этот недостаток отсутствует у ионных пучков, но их трудно остро сфокусировать, так как сильным оказывается дефокусирующее действие объемного заряда ионов в кроссоверах ионно-оптической системы. Но и это обстоятельство было преодолено техникой ионных пучков в результате создания особо ярких ионных источников типа жидкометаллических [6-8]. Однако, несмотря на все замечательные достижения, заряженные пучки, по-видимому, не смогут быть эффективно применены в микроэлектронике СБИС. Причиной этому становится то, что долгое время могло рассматриваться как преимущество. Пучок «рисует» — в простейшем случае — точку за точкой, например, обходя весь рисунок ИС по растру. Очевидно, что это входит в принципиальное противоречие с крутым графиком роста интеграции. Легко видеть, что создание ИС с интеграцией 10^8 — 10^9 элементов в «чипе» столкнется с совершенно неприемлемыми временами экспонирования даже при реализации теоретического предела чувствительности электронных резистов. (Учтем при этом, что каждый активный элемент содержит не менее 20 точек в отдельном слое, а слоев по технологии СБИС только на активный элемент понадобится порядка 10-ти). Усовершенствования электронной литографии последнее десятилетие и шли, главным образом, в направлении разработок новых стратегий построения микро-рисунка с максимальным запараллеливанием обхода элементов схемы. Однако реализация этих усовершенствований безнадежно отстает от темпов повышения интеграции. Что касается дифракционного предела, электронная литография (ЭЛ) всегда считалась альтернативой фотолитографии, способной разрешить все проблемы перехода к большему разрешению — к нанолитографии. Потенциальные возможности этой техники хорошо известны (например, электронный микроскоп). Как правило, ЭЛ

всегда опережала ФЛ по разрешению. Но, в принципе, использование острогофокусированного пучка приводит к поэлементному (или мелко-фрагментарному) экспонированию, что удлиняет результирующую экспозицию. Это вступает в противоречие с экспоненциальным ростом интеграции, или с выполнением «закона Мура».

Но более принципиальным обстоятельством можно считать следующее. Ещё Уолмарком на заре микроэлектроники было отмечено, что между предельно малым размером элемента микросхемки на поверхности полупроводниковой пластины, достигаемым при применении того или иного технологического метода – CD , и его реализацией в ИС должна существовать некоторая дистанция, определяемая нормой допуска на электрические параметры $\Delta P/P$ и уровнем интеграции [9] (рис. 10). Этот вывод вполне актуален и сегодня. Действительно, для нормального функционирования схемы мы должны потребовать, чтобы с отличной от нуля вероятностью (соответствующей выходу η) ни один из n элементов не превысил нормы допуска на параметр P . Это и приведет к тому, что мы не сможем воспользоваться минимальной величиной $a_{min} = CD$, и должны будем отступить в сторону больших размеров $a_{min} \gg CD$. Так, если отклонения размеров элементов ИС от заданных распределены по плоскости равномерно, случайно, и подчиняются нормальному распределению, вероятность того, что отличие параметра P от номинала, не превышает нормы допуска на величину параметра $\Delta P/P$ можно вычислить, пользуясь интегралом вероятностей Гаусса.

$$S_a = 1 - \left[\sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \int_0^{y_1} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy \right]^2, \text{ где } y_1 = a/(2)^{1/2} \delta_a.$$

Согласно теории вероятностей это неизбежно, и для n случайных независимых событий, где n – уровень интеграции чипа, мы должны будем потребовать $S_{an} > 1$. Допустимый минимальный размер элемента ИС (a_{min}) для реализуемого $CD = \delta$, согласно теории вероятностей, можно определить по следующему графику.

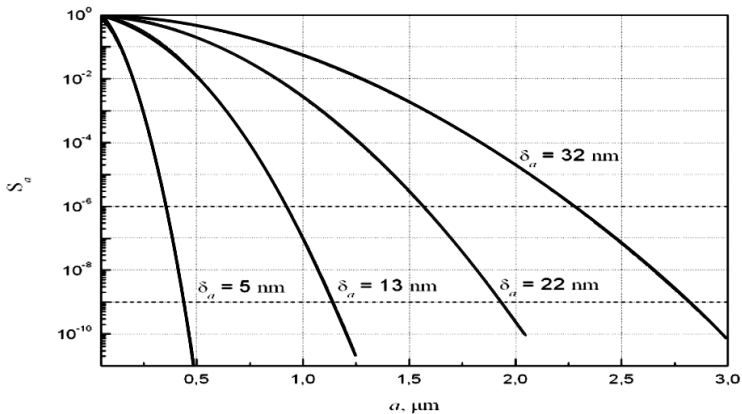


Рис. 10. Допустимый минимальный размер элемента ИС (a_{min}) для реализуемого $CD = \delta$, согласно теории вероятностей.

Результат выглядит несколько обескураживающим: даже для столь больших технологических стандартов, как 32-22 нм, минимальный размер элемента в УБИС с 10^6 элементов должен составить величину в 1,5-2,3 μ , а для 10^9 — 1,9-2,8 μ ; уменьшение стандарта вплоть до 5-13 нм, являющееся целью разработок следующего десятилетия, могло бы обеспечить возможность изготовления УБИС, состоящих из элементов с — как минимум — субмикронными (a не нанометровыми) размерами [10]. Меньшие размеры при большом числе элементов неизбежно приведут к недопустимым отклонениям реализовавшихся параметров ИС и резкому падению выхода годных ИС. Тем не менее, в действительности ИС с таким уровнем интеграции сегодня уже существуют [11], и созданы они по технологическим стандартам практически равным предельным технологическим возможностям фотолитографии. Это парадоксальное обстоятельство можно понять, только если не считать процесс изготовления каждого элемента (транзистора) ИС независимым случайным событием. Так могло бы быть в случае последовательного и независимого изготовления элементов схемы остросфокусированным электронным лучом, но не в волновом методе переноса изображения, когда все элементы «прорисовываются» одновременно и коррелировано. Можно полагать, что это обстоятельство и является главным источником преимущества фотолитографии (т. е.

волнового переноса изображения) и причиной её доминирующего положения в микроэлектронике во все годы её развития [10].

7. Преимущества волнового метода формирования изображения

Важнейшим преимуществом техники фотолитографического создания микрорисунка – с нашей точки зрения — является возможность одновременного и параллельного переноса изображений, состоящих из множества элементарных фрагментов — благодаря волновому характеру оптических процессов [12]. Именно это обстоятельство предопределило, на наш взгляд, высочайшую техническую и экономическую эффективность производства и возможность достижения гигантского уровня интеграции, характеризуемого сегодня уже величинами порядка 10^{8-10} транзисторов в кристалле (чипе). Интересно, что тенденции роста интеграции, которые принято описывать «законом Мура», претерпели с течением времени ряд модификаций в связи с появлявшимися на некоторых отрезках времени признаками насыщения, но сейчас их вновь можно описать формулировкой одной из наиболее крутых ранних версий: «рост два раза за два года». Анализ тенденций дальнейшего развития микроэлектроники не обнаруживает никаких признаков насыщения темпов уменьшения CD в ближайшие 5-10 лет и убеждает в том, что эта величина не только достигнет, но и пересечёт рубеж 10 nm, переходя к единицам нанометров. На рис. 1 мы приводили реализованные данные по интеграции ультрабольших интегральных схем – УБИС и по соответствующим проектным нормам – CD (рис. 2), подводящие на сегодня итоги всей истории развития микроэлектроники и учитывающие известные прогнозы. Притом экспоненциальный темп уменьшения CD, составлявший многие годы около 13% за год, даже несколько увеличился к концу 10-х годов XXI века!

Уменьшение CD в фотолитографии ограничено дифракционным пределом, описываемым критерием Релея-Аббе, и, казалось бы, не может быть значительно меньше, чем длина волны активного излучения, т.е. света, при помощи которого модифицируется вещество резиста, и, таким образом осуществляется перенос изображения. Поэтому ожидалось, что естественным выхо-

дом из создающегося положения может быть только резкое уменьшение длины волны и переход к экстремальному ультрафиолету (ЭУФ) и, далее, к мягкому рентгену (МР) – с сохранением волнового характера процессов переноса изображения.

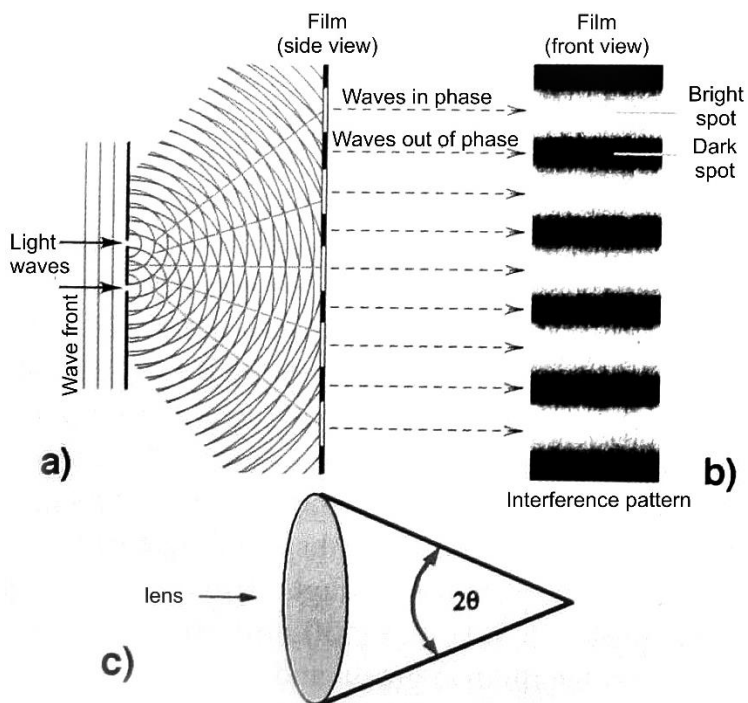


Рис. 11. Иллюстрация волнового характера процесса формирования изображения в оптической литографии.

Как уже отмечалось, сначала фотолитография обеспечивалась контактным, или «теневым» методом переноса изображения, доминировавшим до начала 80-х годов прошлого века, который затем уступил проекционному методу (см. рис. 3), оказавшемуся существенно более эффективным в деле достижения меньших CD, так как здесь минимальный размер, ограниченный дифракционным пределом, пропорционален длине волны актиничного излучения, тогда как в контактном методе – только корню квадратному длины волны [4], что делало недостаточно эффективным её уменьшение. Итоговый микро-рисунок ИС обычно является ре-

результатом сканирования по площади чипа и мультипликации для заполнения всей площади полупроводниковой подложки чипами.

Этот подход стал основным содержанием трех крупномасштабных национальных программ по экстремально-ультрафиолетовой литографии, обеспечиваемых смешанным частно-государственным финансированием: США, Японской и Европейской. Эти проекты, выполняемые передовыми странами, направлены на создание промышленного нанолитографа, основанного на проекционном переносе изображения рисунка ИС с уменьшением масштаба – при использовании экстремального ультрафиолета (ЭУФ). ЭУФ — наиболее коротковолновое ультрафиолетовое излучение, (10-20 nm), граничащее с мягким рентгеновским излучением (МР, равным, или меньшим 10 nm). ЭУФ более, чем на порядок сокращает длину волны рабочего излучения, применяемого в настоящее время в мировой микроэлектронной промышленности. Работы по ЭУФ нанолитографии основаны на использовании некоторых наработок, возникших в процессе подготовки к «звёздным войнам», например, работ над рентгеновским лазером. В них участвовали крупнейшие институты США, ранее участвовавшие в национальных проектах ядерных вооружений. Вложения в эти проекты исчисляются миллиардами долларов США.

Использование ЭУФ нанолитографа обещает ещё на один — два порядка увеличить уровень интеграции микропроцессоров с одновременным увеличением производительности и быстродействия компьютеров. Естественно, что технологии, которые лежат в основе создания этой установки с оптическим разрешением в области первых единиц и десятков нанометров, предназначенной для изготовления УБИС с 10^9 – 10^{10} элементов в кристалле, находятся сейчас в фокусе интересов предпринимателей, разработчиков и учёных.

Однако здесь следовало бы заметить, что темпы развития ЭУФ нанолитографии оказались сдерживаемыми беспрецедентно эффективным развитием оптической литографии, базирующейся на использовании ArF и KrF эксимерных лазеров [11]. Успехи этого направления таковы, что сегодня уже решена задача промышленного выпуска УБИС по стандартам 22 nm, и успешно осваивается проектная норма (стандарт) CD = 14 nm, а планиру-

ется $CD = 10 \text{ nm}$, и ниже. В то же время, применение оптической литографии, использующей для экспонирования длину волны 193 nm , более чем на порядок величины, превышающей реализуемое CD , в этих случаях сопряжено с существенным усложнением технологического процесса, в частности, с применением многократного экспонирования. При этом используется иммерсия, но — главное, используется многократное экспонирование и «паттернирование»: происходит наложение микрорисунков, формируемых многочисленными масками, в том числе и с элементами искусственного фазового сдвига изображений. Понятно, что экономическую конкуренцию между оптической литографией и ЭУФ при дальнейшем уменьшении CD — могло бы в конечном итоге предрешить то обстоятельство, что на длинах волн ЭУФ литографии искомое разрешение обеспечивается прямо, без такого усложнения техпроцесса — но, естественно, при условии доступности соответствующих ЭУФ-литографов [13].

8. Фотолитография с использованием ультракоротковолнового излучения

Учтем, что вплоть до настоящего времени основным и практически единственным приёмом микроэлектронной микротехники являлась фотолитография [14]. Настолько, что большинство особенностей и свойств микроэлектронной технологии по существу являются свойствами именно фотолитографии. Последняя сводится к фотопечати микро-рисунка слоя ИС с заданным уменьшением или же 1:1 с фотошаблона, содержащего эталонный рисунок, на поверхность полупроводниковой пластины, покрытую специальным фоточувствительным химически стойким составом — фоторезистом. Оптический объектив, используемый для проекционной печати в системах высокого разрешения, должен быть широко-полевым высоко-апертурным объективом, предназначенным для работы с излучением на длине волны λ (чувствительности фоторезиста). Тогда предельно-малое расстояние между двумя ближайшими разрешаемыми точками рисунка будет определяться дифракционным пределом соответственно критерию Рэля-Аббе:

$$a_{min}=0.61\lambda/NA,$$

$NA < 1$ — числовая апертура объектива. Возможности увеличения разрешения ограничены. Кардинальный путь увеличения разрешающей способности проходит через уменьшение длины волны излучения. Но с приближением к 0.1 μ , или же к 100 nm, иссякают оптически прозрачные материалы, существующие в природе. Более того, отсутствуют достаточно эффективные источники излучения, а окружающая атмосфера начинает поглощать свет. Так что возникают физические основания для глобального кризиса микро-техники и микроэлектроники в целом [7, 8].

9. Первые ЭУФ нанолитографы. Техника и технология ЭУФ нанолитографии

Зависимость $a_{min}(t)$ изображенная на рис. 3 объединяет данные многих авторов, включая план-прогнозы индустриальных фирм, производящих оборудование для микроэлектронной промышленности. Для достаточно длительного периода протяженностью в почти 40 лет это постоянно падающая зависимость с годовым спадом порядка 13%. Рассмотрение участка этой зависимости, принадлежащего 90-м годам, не позволяет обнаружить никаких тенденций насыщения или даже ослабления темпов спада. В то же время более крутая и связанная с ней функция интеграции $n(t)$ имеет явные признаки снижения темпов роста. Прогноз «Интел», выполненный в конце 80-х годов, согласно которому в 1995 г. должен был появиться микропроцессор 80686 с интеграцией в 10^8 транзисторов на кристалл, как известно, не оправдался. Пентиум Про, выпущенный в середине 90-х и интегрирующий 21×10^6 транзисторов, на самом деле является гибридом, соединяющим два кристалла: собственно процессора на 5.5×10^6 элементов и т.н. «кэш»- памяти второго уровня на 15.5×10^6 элементов. Не произошло существенного роста интеграции и в последующих модификациях микропроцессоров «Интел» — в «Пентиумах» II и III. Правда, это практически не повлекло за собой снижения темпов роста производительности микропроцессора в целом. Нашлись т.н. «архитектурные» решения, обеспечившие повыше- ние быстроедействия и производительности микропроцессора без

существенного увеличения интеграции. Что же оказалось причиной наметившегося было «кризиса» интеграции? Почему понадобились хоть и весьма эффективные, но обходные, «архитектурные» пути дальнейшего развития? Проблему дальнейшего повышения уровня интеграции удалось решить при помощи оптических систем, работающих на ультракоротковолновом излучении. Такие системы удастся построить при использовании брэгговских зеркал, принцип действия которых иллюстрируется на рис. 12.

Брэгговское отражение

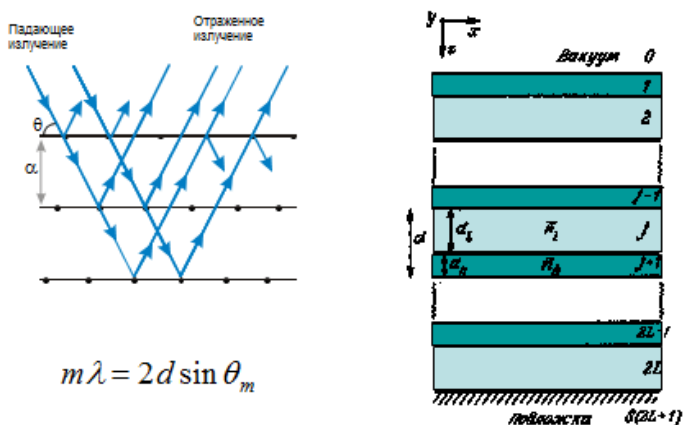


Рис. 12. К принципу действия брэгговского зеркала [15].

Многослойная структура, построенная на паре материалов, один из которых относительно прозрачен на выбранной длине волны, а второй эффективно рассеивает это излучение, строится с брэгговской периодичностью. В результате рассеянные пучки от множества слоев суммируются, что приводит к относительно высокому коэффициенту отражения на выбранной длине волны. Спектр отражения одного из наиболее удачных брэгговских зеркал Mo – Si приводится на рис. 13.

Брэгговское зеркало Mo-Si

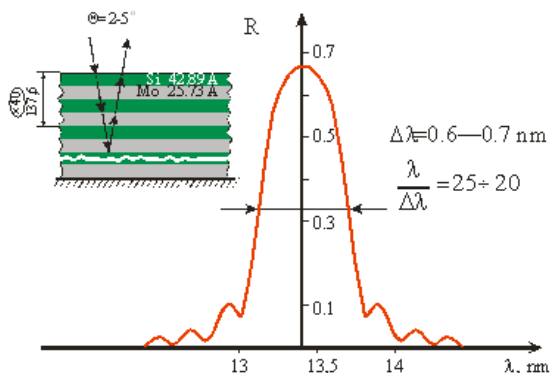


Рис. 13. Коэффициент отражения брэгговского зеркала Mo-Si.

Брэгговское зеркало, состоящее из нескольких десятков пар слоев Mo – Si, теоретически достигает максимума отражения около 70%. Этого недостаточно для эффективного резонатора лазера, но достаточно для построения проекционного изображающего зеркального объектива нанолитографа [15].

На рис. 14 мы приводим возможную принципиальную схему оптической системы ЭУФ нанолитографа, построенного на брэгговских зеркалах. В общих чертах именно такая схема (с различными модификациями) составляет основу ряда национальных проектов, в частности, крупного проекта, выполненного в США [16]. Мощное импульсное излучение, например, эксимерного, или твердотельного лазера, фокусируется при помощи оптического объектива на мишени из тяжелых элементов. Микро-плазма, возникающая в результате облучения, в течение наносекунд после импульса служит эффективным источником коротковолнового излучения, конвертируя единицы процентов энергии первичного излучения иницилирующего лазера в ЭУФ или мягкий рентген на нужной полосе частот. Это излучение поступает в конденсор, который, так же, как и вся остальная оптическая система, строится по принципам зеркальной оптики с брэгговскими покрытиями. Брэгговское зеркало для столь коротковолнового диапазона частот — это одно из высших научно-технических достижений последних десятилетий. А один из лучших результатов получен при использовании

многослойного покрытия Mo-Si. На нем при почти нормальном падении пучка света с длиной волны $\lambda=13.4$ nm реализуется коэффициент отражения в 60—70%.

При помощи «брэгговских» зеркал и источника ЭУФ излучения, а также «брэгговской» маски, несущей изображение топологического слоя ИС, можно построить ЭУФ нанолитограф, приблизительная общая схема которого изображена на рис. 14.

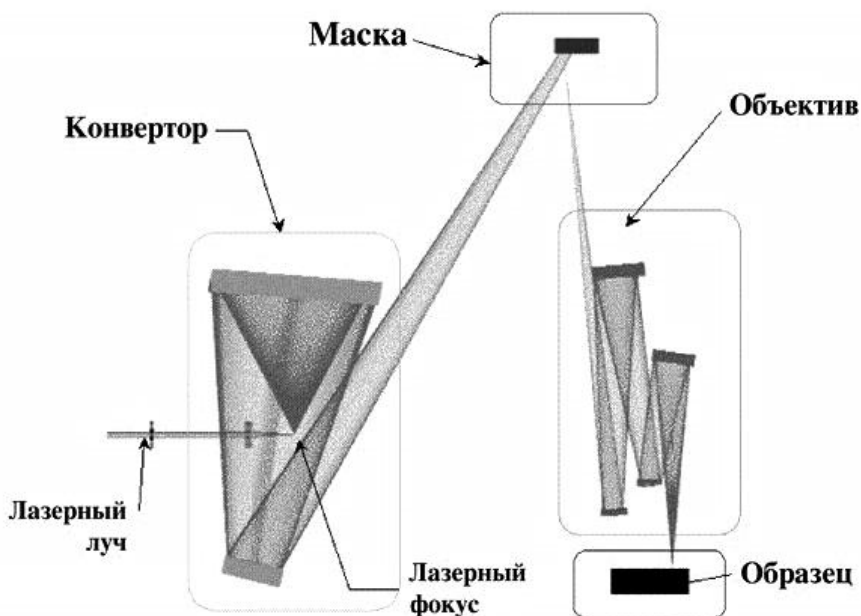


Рис. 14. Приблизительная общая оптическая схема ЭУФ нанолитографа (изображён стандартный 4M объектив).

Отметим, что практическое изготовление «брэгговского» зеркала сопряжено с преодолением чрезвычайных трудностей, в числе которых изготовление «атомарно» гладких поверхностей и избежание размытия интерфейсов. Неровность поверхности и диффузионное размытие интерфейса губительно сказывается на величине коэффициента отражения. Так что реализация теоретического предела отражения удаётся только на передовых оптических производствах.

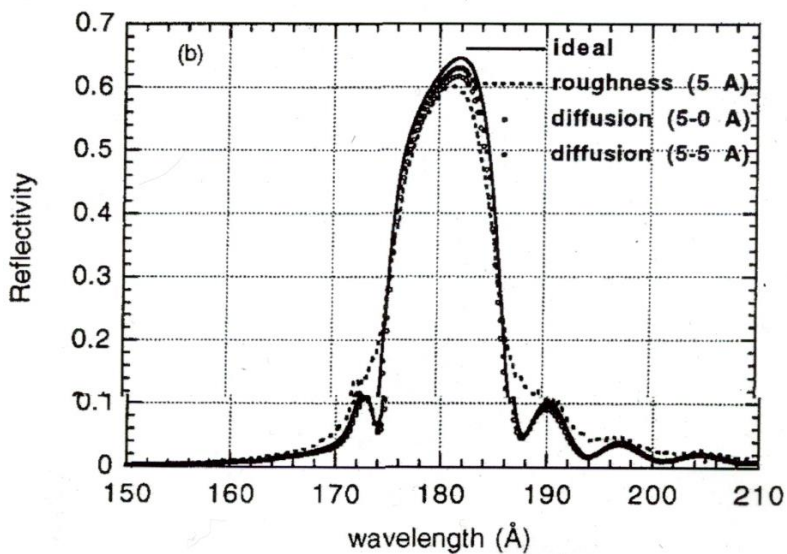
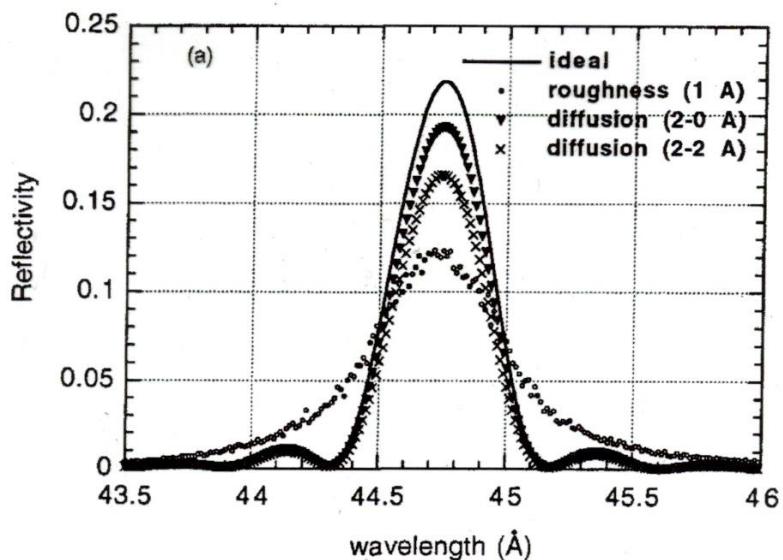


Рис. 15. Влияние чистоты поверхности и размытости интерфейсов на максимально достижимые коэффициенты отражения брэгговских зеркал.

Но при этом построение не искажённого изображения, например, при помощи вогнутых зеркал, возможно лишь в окрестностях геометрической точки. Для того чтобы изображение занимало заметную площадь, придётся ввести определённые отклонения от сферичности, построив поверхности зеркал с определёнными отклонениями от сферической конфигурации, т.н. «асферику». Создание «асферики» требует высочайшего мастерства и прецизионной точности. И, в частности, применения адекватных методов контроля профиля поверхности. Один из принятых методов интерферометрического контроля асферики.

Создание необходимой асферики, обеспечивающей минимально необходимую площадь изображения с плоским волновым фронтом — один из наиболее сложных и ответственных моментов изготовления изображающей оптики. В проекте МНТЦ 0991 [17] было принято решение контроля асферики, на базе интерферометра Линника (рис. 16).

Interferometric measurements of the substrate surfaces

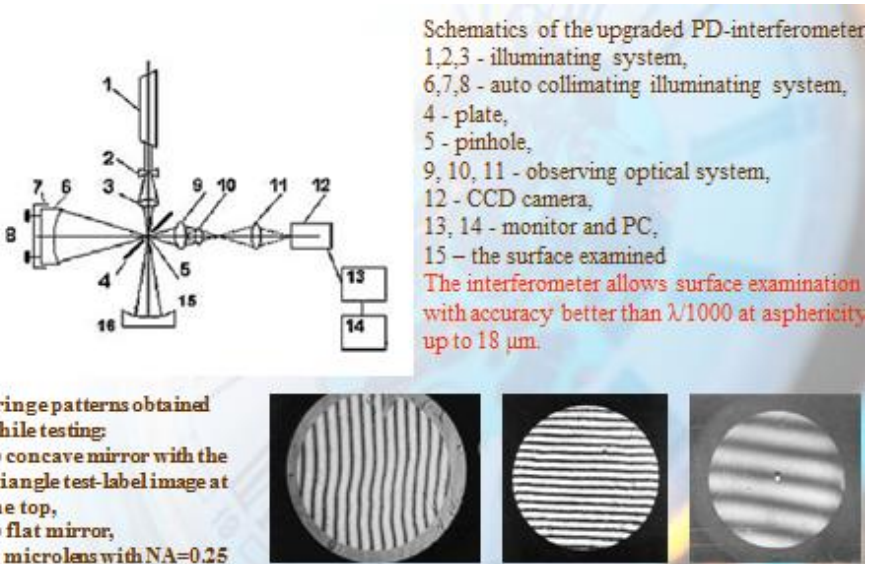


Рис. 16. Интерференционный контроль асферики.

Одно из последних достижений в этой области – построение волоконно-оптической системы интерферометра в ИМС РАН, Нижний Новгород [18].

Далее при фотолитографии это излучение при помощи поворотного зеркала (например, плоское брэгговское, на ту же длину волны) попадает на ЭУФ-шаблон, представляющий собой также брэгговское зеркало, но покрытое сверху поглощающим слоем, к примеру, пленкой вольфрама. Эта пленка предварительно гравировается в соответствии с рисунком слоя ИС в необходимом масштабе. Таким образом, части шаблона с удаленным слоем W будут отражать излучение, тогда как оставшаяся пленка его полностью поглотит. Изготовление ЭУФ-шаблона — это уже задача, вполне достойная применения на этапе гравировки поглощающего слоя электроно-литографии остросфокусированным пучком. Здесь уже можно допустить длительный цикл изготовления, так как один шаблон затем будет использоваться при изготовлении множества ИС. Изображение рисунка на шаблоне проецируется в рабочий изображающий объектив. На рис. 17 нами изображена оптическая схема простейшего двух-зеркального объектива шварцшильдовского типа.

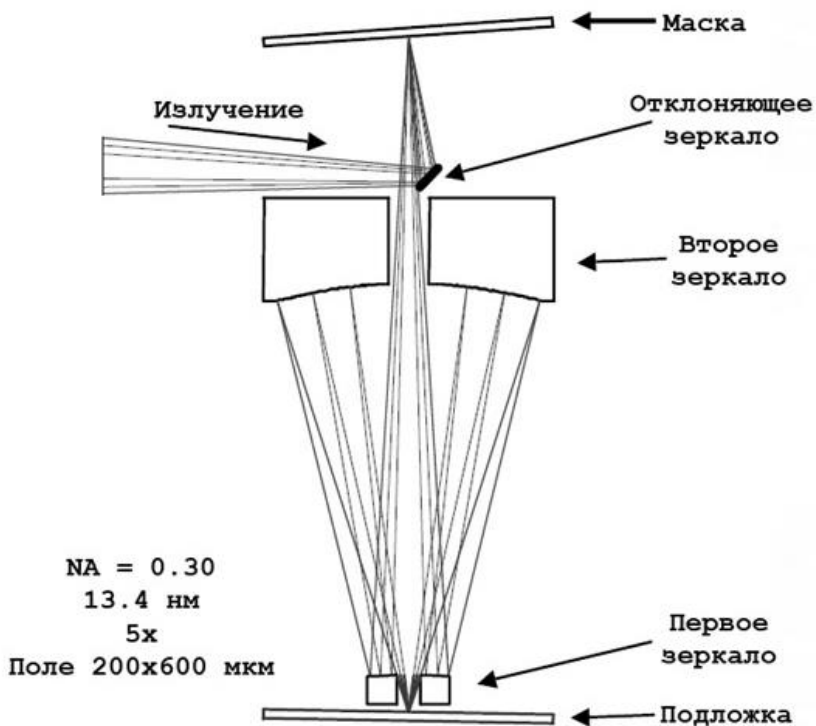


Рис. 17. Ход лучей в «шварцшильдовском» изображающем объективе ЭУФ нанолитографа.

Уменьшенное до необходимого масштаба изображение попадает теперь на полупроводниковую пластину, покрытую фоторезистом. Таким образом, луч испытывает по крайней мере 5 отражений от брэгговских зеркал, и проблема повышения коэффициента отражения с увеличением числа отражений становится всё более актуальной.

Такова в общих чертах система, разработкой которой были заняты ведущие лаборатории мира. Опытные варианты нанолитографа (рис. 18) уже в 2001 г. показали возможность достижения разрешающей способности на уровне от 50 до 100 nm [16].



Рис. 18. Внешний вид опытного ЭУФ нанолитографа, изготовленного в США (2001 г).

Брэгговский зеркальный объектив находится в колонне слева. Справа — система, возбуждающая лазерную плазму и проецирующая пучок ЭУФ излучения на маску-ретикл.

Достигнутая на нём разрешающая способность оставляет желать лучшего. Вместе с тем, его авторы впервые продемонстрировали совокупное решение всего комплекса проблем ЭУФ нанолитографа.

Одна из принципиально трудноразрешимых проблем — это защита оптического тракта от загрязнений, являющихся результатом микровзрыва при генерации лазерной плазмы в источнике излучения. Кроме того, в нём низок коэффициент конверсии. Имеются трудности в получении высококачественного неискаженного изображения.

Пределы нанолитографии

Более коротковолновое излучение ДВУФ-нанолитографа, отодвигая дифракционный предел, казалось бы, способствует достижению существенно более высокого разрешения. Применяя, однако, формулу Рэлея для дифракционного предела и учитывая принципиальную трудность построения уменьшающих изображение широко-апертурных объективов этого диапазона λ при помощи зеркал и брэгговских покрытий, мы вынуждены будем признать, что весь запас разрешающей способности легко и быстро может быть утерян. Так, возьмем $NA < 0.1$, реализованное в первых экспериментальных объективах, и мы вернемся к исходному уровню в 150 nm и более, который определенно решается и при применении вполне традиционных приемов. Отсюда становится ясной необходимость создания изображающих объективов с повышенной числовой апертурой.

Здесь возникает общий вопрос, как в принципе долго может быть уменьшаем минимальный размер элемента ИС, и, если предел такой миниатюризации существует, то какой интеграции он мог бы соответствовать? И всегда ли будет существовать необходимость в непрерывном сокращении размеров, не войдет ли это в противоречие со здравым смыслом и физическими принципами построения электронных приборов? Обратим внимание на кривые, приведённые в нижнем правом углу рис. 4. Там приводился известный прогноз Дж. Мейндла из Стенфордского университета США, опубликованный впервые в 1984 г. [19]). Особенностью этого прогноза является тенденция к насыщению в области 2010-2020-х годов. Притом фактором, приводящим к насыщению, в расчетах Мейндла служит предполагаемая предельно достижимая ширина линии. «Насыщающиеся» зависимости можно описать кривыми типа

$$y = A / [1 + \text{Вexp}(-kt)]^q,$$

где A представляет собой предельную реализацию, которой функция достигает при t , стремящемся к бесконечности. Остальные параметры найдём из начальных условий. При t , стремящемся к нулю, функция превращается в простую экспоненту, харак-

теризующую начальные стадии эволюции. Выпуклость кривой $n(t)$ регулируется показателем степени q .

Рассмотрим физический смысл такой зависимости применительно к интеграции n . Для $q=1$ она удовлетворяет уравнению:

$$dn/dt=kn(t)[1-n(t)/n^*],$$

где n^* есть предельно достижимая величина интеграции. Решение этого уравнения приобретает вид:

$$n(t)=n^*/[1+\exp(-k(t-t_0))].$$

Принимая $\exp(kt_0)=n^*/n_0$, получим:

$$n(t)=n^*/[1+(n^*/n_0) \exp(-kt)].$$

Это выражение сводится при $t < t_0$ к «закону Мура»:

$$n(t)=n_0 \exp(kt),$$

где n_0 характеризует исходный уровень интеграции. При сравнении с реальным ходом зависимости $n(t)$ при $t < t_0$ мы можем оценить «действующие» величины n_0 и k . Предыдущая формула хорошо описывает выход на уровень насыщения n^* при $t > t_0$, однако — на проверку — ход зависимости $n(t)$ оказывается существенно круче ее реализации на практике. Функция может быть несколько сглажена, т.е. «замедлена», при введении в исходное уравнение показателя степени $\alpha=1/q$ у отношения $(n(t)/n^*)$ в квадратной скобке

$$dn/dt = k^* n(t)[1-(n(t)/n^*)^\alpha],$$

что приведет результирующее решение к искомому виду:

$$\begin{aligned} n(t) &= n^*[1+\exp(-\alpha k^*(t-t_0))]^{-1/\alpha} = \\ &= n^*[1+(n^*/n_0)\exp(-kt)]^{-q}. \end{aligned}$$

Здесь $\alpha k^*=k$. В принципе, могут существовать и другие, более сложные виды зависимости для «замедляющей» функции, и использованная здесь функция $G(n/n^*)=1 - (n/n^*)^\alpha$ может рассматриваться как частный случай.

Можно убедиться, что для $\alpha=2$, или же $q=1/2$, а также $n^*=10^9$ и $n_0=30$, зависимость (16) удовлетворительно описывает ход $n(t)$ за все время развития микроэлектроники — с начала 60-х и до конца 90-х годов [8]. Таким образом, полученное выражение

$$\begin{aligned} n(t) &= n^* [1 + \exp(-\alpha k^*(t-t_0))]^{-1/\alpha} = \\ &= n^* [1 + (n^*/n_0) \exp(-kt)]^{-q}. \end{aligned}$$

можно рассматривать как одну из наиболее универсальных формулировок «закона Мура». Интеграция актуальных микропроцессоров описана в [20]. Экстраполяция приведённой зависимости в будущее даёт значения $n=10^9$ к 2020 г. и $n=1.5 \times 10^8$ в 2006 г., находящиеся несколько ниже прогноза Альберта Ю, старшего вице-президента «Интел» [21], следующего, по-видимому, «модифицированному закону Мура» ($n=3.5 \times 10^8$ в 2006 г.).

С другой стороны, $a_{min}=70$ nm могло бы соответствовать предельному значению $n_{max}=10^{10}$ из чисто геометрических соображений [9] при определённом выборе k_z . Таким образом, следуя (16) в ближайшие 20 лет человечеству предстоит выйти на уровень интеграции микропроцессорной СБИС порядка 10^9 — 10^{10} элементов на один кристалл. Учитывая много порядков преимущества в быстродействии ($\tau \rightarrow 10^{-13}$ s к 2020 г., см. рис. 3), по производительности вычислений это уже может составить конкуренцию человеческим интеллектуальным возможностям.

Анализ последствий общего уменьшения размеров полупроводниковых приборов свидетельствует о возникновении на этом уровне других проблем, в частности, связанных с физическими механизмами работы приборов. Особенно острыми они оказываются для контактных узлов и проводниковых меж-соединений. С другой стороны, дальнейшее уменьшение размеров вводит нас в совершенно удивительную область физики, до сих пор исследованную, главным образом, теоретически, называемую мезоскопией. Здесь все привычные представления об электронных процессах в проводниках и полупроводниках нарушаются настолько, что не работает даже закон Ома. Хотя ни в коей мере не исключаются приборы, работающие на других, и, в частности, мезоскопических, принципах. Однако же наиболее современные данные различных исследовательских лабораторий мира свидетельству-

ют о том, что традиционный кремниевый транзистор с изолированным затвором не собирается сдавать своих доминирующих позиций и вполне способен эффективно работать даже при столь ничтожной толщине диэлектрика SiO_2 как 5 nm и при зазоре «исток-сток» менее 100 nm. Поэтому не исключено, что, несмотря на множество заманчивых новых физических решений, максимальный уровень интеграции удастся реализовать на традиционных принципах, существующих уже с первых лет становления и развития микроэлектроники [22].

Что же касается потребности человечества в приумножении полученной информации, то, по убеждению автора, это единственная функция, которой никакие колебания, насыщения или, более того, спады, не угрожают, и она будет оставаться основной движущей силой прогресса микроэлектроники. Согласно наукометрическим представлениям, мы по времени все еще находимся в зоне преобладающего применения полиграфической продукции как основного носителя информации, а компьютерная революция еще не вступила в полную силу, оттеснив, однако, печатное слово с большинства принципиальных позиций, особенно в области оперативной информации.

Признаком полного торжества микроэлектроники и вычислительной техники должно было бы стать повсеместное использование домашних информационных роботов (машин, ДИМ), возможность появления которых предсказывалась автором ещё в конце 1960 годов — на заре зарождения микропроцессорной техники [23].

Возникновению ДИМа предшествовало появление и широкое применение интегральных схем в телевизорах. Это не только освободило пространство для новых компонентов, но и создало возможность существенного расширения функций электроники в телевизионных приёмниках. За этим последовало появление микропроцессоров и других новых компонентов электронной вычислительной техники. Так, телевизор превратился в ДИМ [23] (рис. 19).



Рис. 19. ДИМ

В центре внизу стоит электронный блок, объединивший свойства входных устройств и процессора, (его место впоследствии и занял МП – микропроцессор). Это и есть прототип персонального компьютера (ПК), созданный в 1970 году Сейсяном Р. П. и др. (авторское свидетельство № 375640 с приоритетом от 5 января 1971 г.) [24].

Этот персональный компьютер начала 1970 года (до появления первого МП в США) был собран на гибридных микросхемах с кремниевыми монокристаллическими ИС малой интеграции. Понятно, что увеличение интеграции – главный тренд микроэлектроники, и появление СБИС (УБИС) было неизбежно. Малогабаритные компьютеры авторами [23] уже изготавливались и до 1970 года. Так, межпланетная станция Марс-3, запущенная с Байконура в 1970 году, осуществила мягкую посадку на Марс в 1973 г. Мягкая посадка была осуществлена автоматически – в результате управле-

ния бортовым компьютером, собранным с применением около двух десятков БГИС (серии 240, Гл. конструктор Р.П. Сейсян), собранных на многослойных платах коммутации с твердотельными ИС малой интеграции (надо ли подчёркивать, что бортовой компьютер не мог не быть малогабаритным?).

На рис. 19 наверху справа – клавиатура для формулировки команд, а сверху накопитель информации, который в ДИМе был осуществлён на базе видеоманитона, выполнявшего функции хранения видеоинформации и цифро-буквенной информации. Он тоже был собран на базе электроники с собственными интегральными схемами. Дисплеем служил серийный ТВ приемник. Для связи между ДИМами была предложена система проводной и беспроводной связи (рис. 20).

Информация о ДИМе [23] заинтересовала кембриджского профессора Л. Розенблюма, который, опираясь на широкие возможности университетских библиотек, провел детальное исследование появления и развития WEB TV. Кропотливое исследование привело его к однозначному выводу: всё, что было сделано фирмой WEB TV (в дальнейшем купленной MICROSOFT Corp) в США, ранее было осуществлено в СССР, в Ленинграде [25].

«Для меня нет никаких сомнений, — пишет в заключение своей статьи профессор Л. Розенблюм, — что родоначальниками WEB TV или ДИМов следует признать Р. П. Сейсяна и М. Л. Выдревича. Они были первыми! Более того, они по существу предвосхитили создание Интернета и осознали роль телекоммуникаций в жизни общества, в котором мы живём». О ДИМе и его японском аналоге можно прочесть в [24].

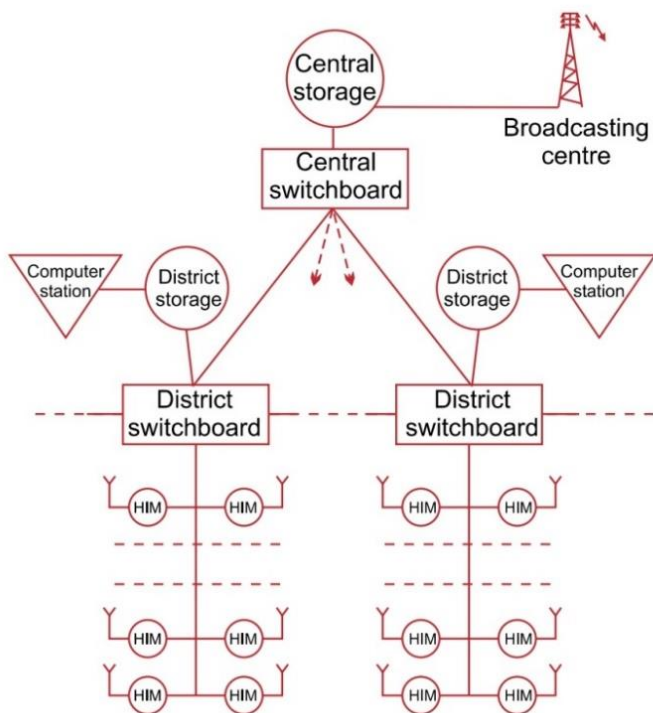
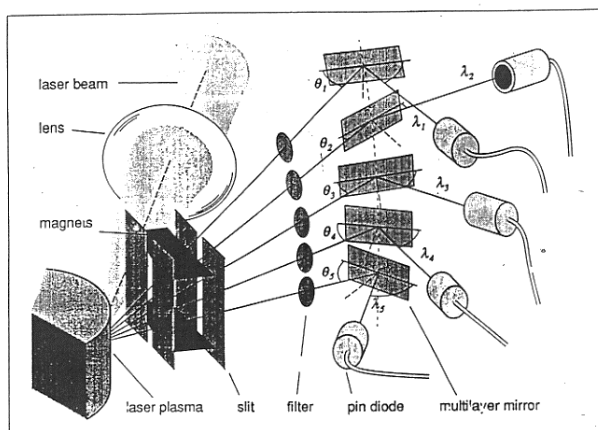


Рис. 20. Схема «димофикации» городского района.
 РТЦ – региональный телецентр, ДИМ→НИМ

10. Проект ЭУФ и МР нанолитографии ФТИ. История становления и развития

Идеи, лежащие в основе ЭУФ нанолитографии, успешно разрабатывались и в Советском Союзе, здесь был накоплен существенный научно-технический задел. Отметим в этой связи, что первые работы по брэгговскому зеркалу (изготовленному методом импульсного лазерного распыления) в СССР были выполнены ещё 1981г. С.Гапоновым, Н.Салашенко и др. [26], почти одновременно с интенсивным началом аналогичных работ за рубежом [27]. Работы по лазерной плазме как источнику ЭУФ и МР излучения, с применением брэгговских зеркал для спектральной селекции полос этого излучения, были выполнены С. Бобашевым, Н. Салашенко, Л. Шмаёнком и др. уже в 1986-91 гг., (рис. 21), [28].



Ti

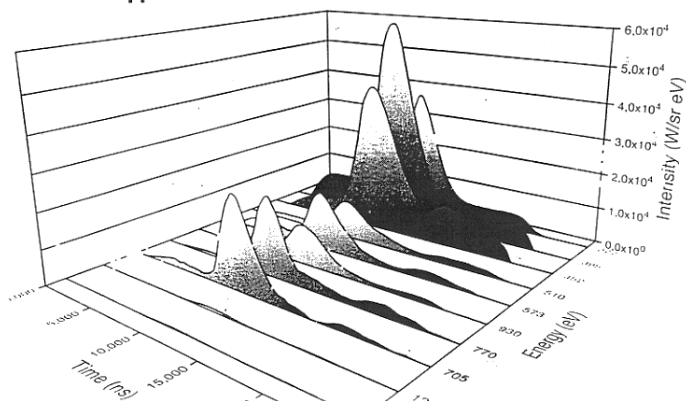


Рис. 21. Результат использования прибора Бобашева для исследования конверсии лазерного излучения в ВУФ на примере мишени из титана.

В 1988-1994 гг. в ФТИ была осуществлена разработка первого лабораторного лазер-плазменного вакуумно-ультрафиолетового (ВУФ) контактного литографа (Р. Сейсян, Л. Жданов) [29], см. рис. 22. Заметим, что в этот период времени использовалась исключительно теньевая, или контактная фотолитография.

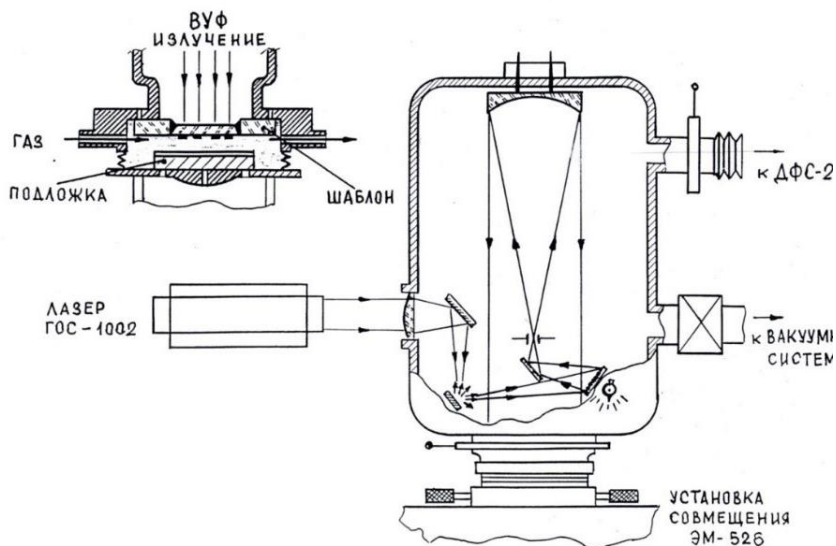


Рис. 22. Схема разработанной в ФТИ установки для субмикронной контактной литографии, развивающей обнаруженный эффект усиления контраста передачи изображения при использовании ВУФ и ХСП резиста. ГОС-1002 — марка лазера, ЭМ-526 — марка установки контактной литографии, ДФС-29 — марка спектрометра.

Контактный литограф представлялся перспективным в 1994 г. в связи с обнаруженным эффектом усиления контраста, но, чертежи его так и остались в архиве СКБ ФТИ. К 1988-96 гг. относятся многочисленные опыты по ВУФ абляции различных неорганических тонких плёнок, рассматриваемых как потенциальные ВУФ фоторезисты (Р. Сейсян, Е. Бараш, А. Кабин и др. [30]). В конечном итоге эти работы привели к обнаружению эффекта «усиления контраста передачи изображения» при воздействии ЭУФ излучения на тонкие плёнки халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП) [31] рис. 23.

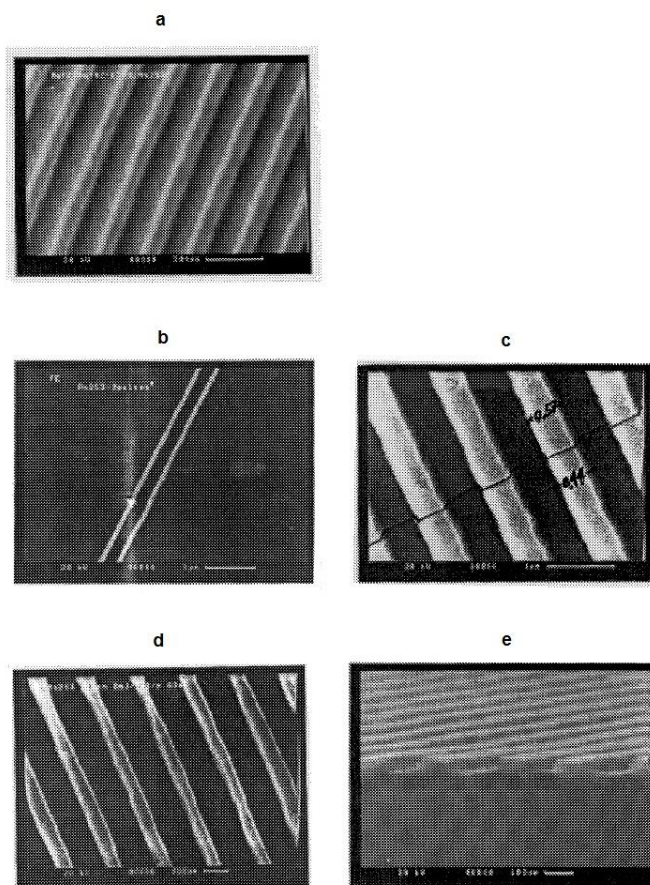


Рис. 23. К эффекту усиления контраста. Как можно видеть по снимкам СЭМ, применение коротковолнового излучения и ХСП резиста делает возможным создание субмикронных полос для затвора МДП транзистора.

К ним и возник интерес со стороны руководителей только что сформированной американской программы ЭУФ-нанолиитографии (R. Stylen, Sandia Lab. и R. Freeman, AT&T Bell. Lab., прибывших в 1994 г. совместно с Т. Jewell (Т. J. Optics) в Санкт – Петербург для детального ознакомления с работами ФТИ. С их участием 19-го октября 1994 г. в ФТИ был проведён однодневный семинар по перспективам ЭУФ литографии (см. афишу на рис. 24) [32]. На нём Ри-

ком Стуленом был сделан подробный доклад об идеях и содержании американской программы.



Рис. 24. Афиша однодневного семинара в ФТИ с руководителем американской программы ЭУФ литографии.

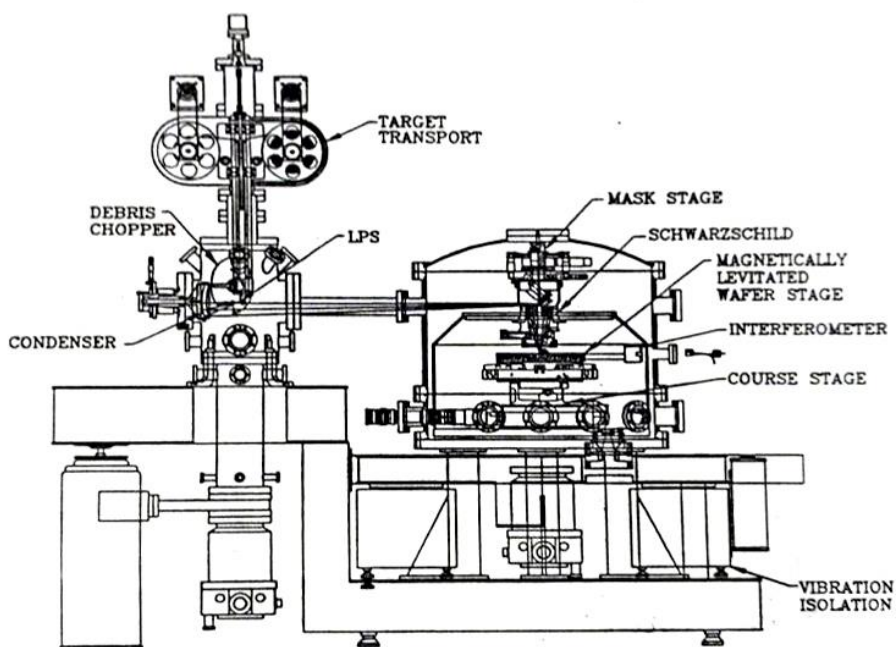


Рис. 25. Набросок проекта американского ЭУФ нанолитографа, представленный Р. Стуленом на семинаре в ФТИ.

Слева сверху изображён планировавшийся лазер-плазменный источник ЭУФ излучения с мишенью в виде протягиваемой между двумя бобинами ленты из золотой фольги. Отражённое от маски излучение с 10-кратным уменьшением проецируется шварцшильдовским объективом на полупроводниковую пластину, находящуюся в вакууме на изолированный от вибраций, левитирующий при помощи магнитной подвески стол для образцов. Этот проект в дальнейшем претерпел многочисленные изменения и представлен в окончательном виде на рис. 16.

Обсуждение результатов этого семинара в течение пребывания американской делегации во ФТИ и привело к формулировке идеи проекта МНТЦ с участием НИИЛФ (ГОИ), НИИЭФА, (Санкт-Петербург), ИМС РАН (Нижний Новгород) и ВНИИЭФ (Саров), ФТИ им. А.Ф.Иоффе в качестве головного института. Этот проект был разработан и представлен в МНТЦ в 1996г. Он был поддержан г. Сакамото, представителем Японии в МНТЦ.

Идея и содержание проекта были изложены в докладе в главном офисе Matsushita Electric Industr. (Panasonic) в г. Осака и привлекли внимание г. Реджи Сано, managing director, member of the board Matsushita Electric Industr. (Panasonic).



Рис. 26. Реджи Сано, управляющий директор, член совета директоров Matsushita Electric Industr. (Panasonic) по новым разработкам, и Р. П. Сейсян в ФТИ (на выходе из НОЦа), 1997.

Реджи Сано в течение нескольких лет неоднократно посещал ФТИ для ознакомления с проводимыми здесь работами, и в дальнейшем принял неоценимое участие в продвижении проекта. Проект обсуждался в Японии (Осака, 1998г.), и в токийской штаб-квартире Matsushita E.I. (1999г.) — с участием Реджи Сано и ряда правительственных организаций, затем, в Токио, на Японо-Российском форуме, созванном в 2000г [33] — по инициативе Р. Сано и, далее, в Москве на 2-м Японо-Российском форуме (Москва, офис правительства Москвы, 2001г.). После этого проект, наконец, в 2002г. был принят советом директоров МНТЦ — опять-таки по инициативе японской стороны, о чём было торжественно сообщено нам по междугороднему телефону из Токио М. Сакамото и Р. Сано.

Таким образом, начиная с 2002 г., в лаборатории микроэлектроники Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе под

руководством Сейсяна Р. П. стала выполняться научно-исследовательская и конструкторская работа, непосредственно направленная на создание комплекта инструментов и технологий для изготовления произвольных наноструктур, т.е. структур с заданной конфигурацией и с наименьшими размерами элементов порядка первых десятков нанометров. В основу проекта была принята проекционная ЭУФ-фотолитография с уменьшением масштаба — на длине волны $\sim 13,5$ nm. Существенную роль в выполнении проекта сыграло участие НИИЛФ (ГОИ), накопившего к этому времени большой опыт в проектировании и изготовлении оптических систем коротковолнового диапазона, в разработке мощных импульсных лазеров и лазер-плазменных источников коротковолнового излучения. Определённую роль сыграли также и другие участники проекта: ВНИИЭФ Российского Ядерного центра, (исследование проблемы повышения эффективности источника ЭУФ излучения, выпуск технических чертежей экспериментальной установки по ТЗ ФТИ), а также НИИЭФА им. Ефремова, изготовивший мощный эксимерный лазер и разрабатывавший капиллярный ЭУФ лазер. ИМС РАН брал на себя обязательство по нанесению многослойных брэгговских покрытий на зеркалах оптической системы. В течение 2002-2006 гг. исследования поддерживались правительством Японии через МНТЦ (Международный Научно-Технический Центр, Москва), в рамках проекта МНТЦ 0991 под названием «Физика и техника процессов формирования элементов ИС с нанометровыми размерами, основанных на взаимодействии ВУФ излучения эксимерных лазеров и вторичного ЭУФ излучения с материей», с общим финансированием порядка 1 миллиона долларов США. Затем, с 2009 г., с более чем трёхлетним перерывом, работы продолжились уже в рамках проекта МНТЦ 3857, «Ключевые технологии ЭУФ нанолитографической системы сверхвысокого разрешения на основе высокоэффективного источника излучения с лазерной плазмой», сформулированного в процессе выполнения проекта №-0991, [34], поддержанного ЕС и выполнявшегося ФТИ (головной), совместно с НИИЛФ (ГОИ).

Рассматривая актуальные проблемы ЭУФ и МР литографии, мы будем пользоваться — в первую очередь, собственным опы-

том, накопленным в процессе подготовки и выполнения проектов МНТЦ №0991 и №3857 [35], а также информацией, полученной от организаций, сотрудничавших с нами в процессе выполнения этих проектов. Коллабораторами проекта 0991 выступили ASET (Association of Super-Advanced Electronic Technologies, Япония) и представители известных фирм CANON и NIKON. По проекту №3857 коллабораторами выступили Gerry O'Sullivan, John Costello (Оба Дублин, Ирландия), Torsten Feigl, Йена, институт Фраунгофера, ФРГ, Peter Choi, Франция и Ladislav Pina (Прага, Чешская республика), все участники общеевропейской программы COST [36].

В то же время, поставленные задачи требовали тщательного рассмотрения всех принципиально важных технических и технологических элементов структуры ЭУФ и МР нанолитографа, что позволяет нам высказать выверенное мнение по поводу возможных пределов достигаемого разрешения, а также и по поводу возможных методов развития крупномасштабного производства БИС и УБИС.



Рис. 27. Руководитель проекта COST Alan Mishett, сотрудник Kings college, London, (в центре), John Costello (справа) и Р. Сейсян (слева) — на рабочей встрече COST в Саламанке (Испания).

11. Концепция нанолитографа для научно-технического применения

Около середины 90-х годов в США в рамках национальной программы США уже были созданы прототипы промышленных ЭУФ-нанолитографов, позволившие достичь CD порядка 50-70 nm [16]. Но применения они так и не получили. Причиной, отодвинувшей реализацию ЭУФ-нанолитографа в производстве, оказались те же новые научные идеи, которые, как уже отмечалось, существенно расширили возможности традиционной оптической литографии, основанной на излучении эксимерных лазеров ArF и KrF — с длинами волны 193 и 248 nm [11]. По-видимому, именно с их помощью будет в ближайшие годы освоен диапазон технологических стандартов с CD вплоть до 22-16(14) nm, и даже 10 nm. Так, исследования в лаборатории им. Линкольна, MIT, показали, что оптической литографии с использованием эксимерных лазеров под силу изготовление полевого транзистора с затвором длиной всего в 9 nm [37]. Это более чем на порядок меньше длины волны актиничного излучения и далеко перекрывает все известные достижения современной планарной технологии, включая ЭУФ литографию. Таким образом, вопрос о преимущественно используемом методе печати УБИС переходит из плоскости физико-технической в плоскость технико-экономическую. В производстве УБИС преимущество получает метод, обеспечивающий меньшие затраты в пересчёте на один чип.

Потенциальные преимущества ЭУФ (MP) литографии проистекают от возможности «прямого» достижения необходимого разрешения (см. формулу Релея-Аббе) – без применения специальных приёмов увеличения реализованного разрешения, и, соответственно, без дополнительных фотошаблонов и затрат на их изготовление, а также затрат времени на проведение дополнительных операций. В результате становится всё более очевидным, что достижение более высокого разрешения, намечаемое на 2020-е годы, также как и дальнейшее уменьшение CD до величин меньше 10 nm, уже потребуют намечавшегося ранее уменьшения длины волны и, соответственно, перехода к применению ЭУФ излучения, а далее и мягкого рентгеновского (MP) излучения с длиной волны 4-10 nm. Однако же обстоятельства отказа от

традиционной оптической литографии и момент времени полного перехода к ЭУФ и МР остаются под вопросом.

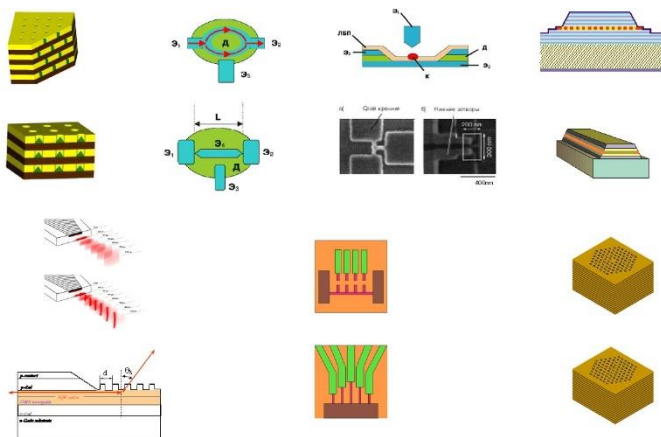


Рис. 28. Возможный набор объектов первоочередного исследования на ЭУФ нанолитографе, 2008. 1) квантово-точечная псевдокристаллическая решётка, типа гексагональной (сверху), и типа кубической (снизу). 2) интерференционные мезоскопические транзисторы, сверху с интерферометром типа Маха-Цендера, внизу с интерферометром типа Фабри-Перо, 3) одноэлектронный транзистор, схема, показывающая расположение гетеро-слоёв (сверху) и СЭМ изображение в плане (сверху); гетеро-лазер с слоем квантовых точек, разрезы, сверху — вдоль направления излучения, внизу — поперёк; гетеро-лазер с распределённой обратной связью, с управляемой плоскостью поляризации излучения, (сверху), сечение гетеро-лазера с дифракционной решёткой на излучающей поверхности, там же стрелкой показано направление вывода излучения, правее возможные мезоскопические пассивные элементы. Далее – микрорезонаторы в многослойной гетероструктуре.

Широкому применению промышленной ЭУФ-нанолитографии, по-видимому, должна будет предшествовать интенсивная разработка новой элементной базы и структуры СБИС, основанной, например, на мезоскопических и квантовых принципах. Взамен исчерпывающей свои функциональные возможности традиционной элементной базы, использующей МДП транзисторы с изолированным затвором и металлические межсоединения [22], возникает необходимость поиска новых решений. Действительно,

с выходом на размеры порядка единиц нанометров придётся уже учитывать возможные отклонения от закона Ома и другие эффекты понижения размеров. Такие исследования будут остро нуждаться в ЭУФ литографических средствах сверхвысокого разрешения, ещё не усложнённых, однако, требованиями высокой производительности. На рис. 28 мы приводим ориентировочный набор ближайших объектов исследования на нанолитографах сверхвысокого разрешения.

Отметим также, что нанолитограф такого рода включает в себя все главные узлы, аналогичные используемым в промышленном нанолитографе, и требует их общей технологической проработки. Притом, выходя на реализацию единиц нанометров, он оказывается уникальным инструментом нанотехнологий, обеспечивающим возможность изготовления произвольных, или произвольно упорядоченных наноструктур, тогда как инструментарий, основанный на создании наноструктур в результате природной самоорганизации, оставляет довольствоваться лишь хаотическим распределением нано-частиц и нано-элементов. Концепция по изготовлению Нанолитографа для научно-исследовательского применения отстаивалась на многочисленных форумах в нашей стране и за её пределами. В числе основных презентаций такого нанолитографа отметим, прежде доклад Р.П.Сейсяна *EVUV Nanolithography for VLSI// Japan-Russia advanced Science and Technology Forum, 2000, Токуо, Japan, p.164-172*. [33] Затем, 1-й Японо-Российский форум по нанолитографии, Токуо, 2001, в котором участвовали представители ведущих японских фирм и научно-исследовательских корпораций. После этого — совещание МНТЦ по ЭУФ и МР нанолитографии, Vienna 2007, затем лекция в техническом университете Берлина (TUB) 2010. Эта тема многократно обсуждалась на совещаниях COST Action 0601 под руководством А. Мишетта [38-43]. Он в 2008 г. написал письмо в Европейскую комиссию по международному научному сотрудничеству, в котором полностью поддержал наш проект. В результате он был поддержан ЕС и получил название Проект МНТЦ №3857[35]. Впервые наш проект обсуждался перед этим в Pisa 2006[38], затем в Dresden, 2008 [39], Salamanca, 2009 [40], Krakow, 2010 [41], Southampton 2011[42],

Paris, 2012 [43]. При этом участниками дискуссии являлись группы научных сотрудников и учёных ведущих университетов различных европейских стран. Нанолитограф, предложенный к рассмотрению нами, является установкой с относительно упрощённой механикой и пониженными уровнем требований к мощности источника излучения (относительно прибора для массового производства ИС). Вместе с тем он включает в себя все типичные узлы нанолитографа для промышленного применения и требует их принципиальной проработки и освоения соответствующих технологий. Более того, отказ от высокой производительности компенсируется в нём требованием к достижению «сверхразрешения». Такой нанолитограф должен на один-два шага опережать по разрешению промышленный, чтобы предупреждать возникновение новых физических и технологических проблем при создании и при эксплуатации УБИС.

Разработчиками Проекта ФТИ были представлены на Всероссийском форуме по нанотехнологиям 10 докладов по материалам выполненных работ на тему нанолитографии в ЭУФ и МР, а также оптической нанолитографии. Здесь, помимо концептуальных проблем типа перспектив применения оптической и ЭУФ (МР) литографии [12] и голографических методов, рассматривались возможные решения ЭУФ оптической системы, нанопозиционирования, ЭУФ резиста, пыли и вибро-защиты, техники и технологии ЭУФ маски-ретикла, способов сопряжения топологических слоёв, автоматической фокусировки маски на образце и другие проблемы создания современного нано-литографа. Все работы были приняты оргкомитетом, доложены в Москве, обсуждались и вызвали значительный интерес [44-52]. Оргкомитетом было выдано Р. Сейсяну удостоверение эксперта РОС-НАНОТЕХа. Доклады охватывали все основные направления и этапы разработки Нанолитографа ФТИ. Заявка ФТИ на создание нанолитографа для научно-исследовательских применений рассматривалась корпорацией РОСНАНОТЕХ в течение двух лет. По существу вопроса не было высказано никаких замечаний, но финансирования проект не получил.

12. Из начал рентгеновской оптики – применительно к ЭУФ и МР нанолитографии

12.1. Из начал рентгеновской оптики

Оптические свойства веществ в ЭУФ и МР областях спектра электромагнитного излучения определяются его комплексным показателем преломления, имеющим для каждого типа атомов следующий вид [10]:

$$n = 1 - \delta + i\beta = 1 - \frac{n_a r_e \lambda^2}{2\pi} (f_1^0 + if_2^0),$$

где n_a – концентрация атомов в единице объема вещества, r_e – классический радиус электрона, f_0^1 и f_0^2 вещественная и мнимая части комплексного атомного фактора рассеяния, соответственно, а λ – длина волны излучения. Данные по атомным факторам рассеяния для различных элементов Периодической таблицы рассчитаны и доступны с сервера Центра рентгеновской оптики Национальной лаборатории Лоренса Беркли [37]. Как следует из этих данных, для всей интересующей нас области величина δ , характеризующая рефракцию, не превышает $10^{-2} - 10^{-4}$. Соответственно, линейное поглощение, определяемое как $\alpha = 4\pi\beta/\lambda$, так велико ($\beta \ll 1$, также как и δ), что, практически, в этой области не существует достаточно прозрачных конденсированных сред, а поглощение газов столь существенно, что необходима эвакуация оптического пути вплоть до высокого вакуума.

Реализующееся линейное поглощение в конденсированном состоянии можно рассматривать как $\alpha = \mu\rho$, где μ – сечение поглощения в см^{-2} , а ρ – плотность вещества. Тогда коэффициент поглощения α для сплава, или смеси веществ, можно представить как

$$\alpha_i(\nu) = N_A \rho \sum_j (C_j/A_j) \mu_i(\nu),$$

где индекс j соответствует типу атомов, C_j – концентрация, а индекс i – орбитам К, L, M..., с которых совершается переход. В случае газообразного состояния следует учесть степень разреженности или величину давления. Типичный спектр поглощения для ЭУФ и МР области, представляет собой ряд падающих кривых, быстро уменьшающихся к большим ν , и скачкообразно не-

сколько вырастающих при достижении энергии ионизации соответствующей орбиты, при этом огибающая спектра поглощения падает обратно пропорционально частоте. Схема построения такого спектра приводится на рис. 29, наряду с конкретным расчётом для золота — с использованием данных.

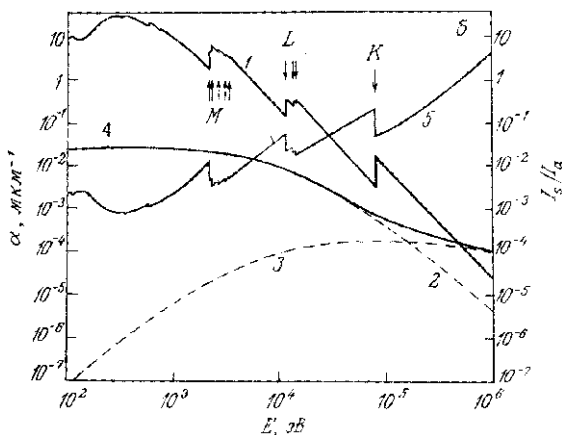


Рис. 29 Типичный спектр поглощения для ЭУФ и МР областей.

Расчёты коэффициентов поглощения показывают нереальность использования рефракционной оптики и сводят всю используемую в литографических устройствах оптику к оптике зеркальной. Но так как показатель преломления всегда близок к единице, коэффициент отражения нормального падения поверхности раздела с вакуумом, который можно рассчитать по формулам Френеля, равен:

$$R_N = (\delta^2 + \beta^2) / [(2 - \delta)^2 + \beta^2],$$

и для однократного отражения во всём интересующем нас диапазоне пренебрежимо мал (порядка 10^{-2}). Приемлемый коэффициент нормального отражения может быть получен только в случае такого многократного отражения, при котором отражённые пучки совпадают по фазе и складываются (для получения приемлемой величины R при отсутствии поглощения надо было бы сложить порядка 100 отражённых пучков). Эта задача и выполняется применением «брэгговских» зеркал, принцип работы которых иллюстрировался рис. 11. Другой способ построения отражательной

оптики в рассматриваемом диапазоне длин волн сводится к использованию оптики скользящего падения. Так как δ мало и положительно, то при углах скольжения θ_i , таких, что выполняется неравенство $\theta_i \leq \theta_c$, где

$$\cos\theta_c = (1 - \delta_2)/(1 - \delta_1),$$

коэффициент отражения равен единице. Для $\delta = 0$, при углах скольжения, меньших критического θ_c , имеет место полное внешнее отражение. На рис. 30 показаны расчётные угловые и частотные зависимости коэффициента отражения в режиме скользящего падения для ряда материалов.

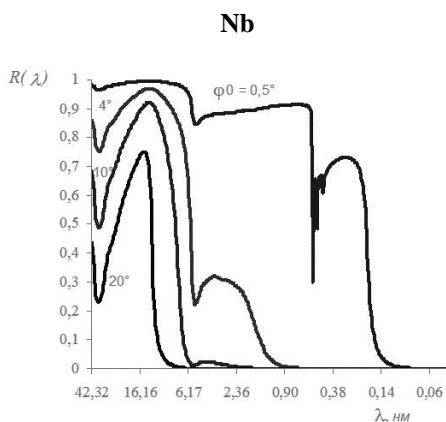


Рис. 30. Спектр отражения зеркала скользящего падения для МР на примере слоёв Nb.

Видно, что при углах падения, близких к нулю, существуют довольно широкие полосы частот, в которых отражение скользящего падения близко к 1. С увеличением угла эти полосы сжимаются, но вплоть до 4-10 градусов сохраняется возможность построения для ЭУФ и МР оптических систем, построенных на «скользящем» падении излучения. Это используется, например, для построения коллекторов излучения разрядных источников света в нанолитографах с разрядным возбуждением излучающей плазмы.

12.2. Изображающая оптика ЭУФ и МР литографов

Первая публикация по использованию зеркальной оптики с уменьшением масштаба на многослойных брэгговских зеркалах принадлежит, по-видимому, Н. Kinoshita et al. и датируется 1989 г. В этой работе предлагалось использовать 2М Шварцшильдовский объектив, синхротронный источник излучения и маску «на просвет», типа рассматривавшихся позже масок для ионно-лучевой литографии [8].

В силу ряда причин, связанных с качеством и точностью переносимого изображения, для изображающей оптики ЭУФ и МР литографов используются исключительно интерференционные (брэгговские) зеркала нормального падения. Такие зеркала состоят из подложки, обработанной таким образом, чтобы достичь минимальной шероховатости поверхности при одновременном внесении заданных отклонений от исходной сферической формы поверхности — асферики, обеспечивающей необходимую минимальную площадь неискажённого плоского волнового фронта изображения, и многослойного интерференционного покрытия. В целях достижения максимальной возможной величины коэффициента отражения интерференционное покрытие строится из чередующихся слоёв материалов с большими и малыми атомными номерами, притом период одной пары слоёв для нормально падающего излучения с длиной волны λ составляет $d = \lambda/2$. Слой материала с большим атомным номером выступает в роли рассеивающего слоя, тогда как слой материала с меньшим атомным номером играет роль «спейсера» — прослойки с минимальным коэффициентом поглощения, на которой рассеяния почти не происходит. Оптимальное отношение толщин этих материалов, как показали теоретически Виноградов и Зельдович [53], описывается формулой:

$$\tan(\pi k_{opt}) = \pi [k_{opt} - \beta_h / (\beta_h - \beta_l)],$$

где k – отношение d_l/d_h толщин материала с низким (l) и высоким (h) значениями атомного номера, β_l и β_h соответствуют компонентам коэффициента преломления, ответственным за поглощение в материалах с низким (спейсер) и высоким (рассеиватель) значениями атомного номера. Это оптимальное соотношение не

всегда реализуемо ввиду ряда технологических факторов, таких как шероховатость поверхности, зернистость и взаимная диффузия слоёв, образование соединений и твёрдых растворов, и, как правило, находится в пределах 0,3 – 0,5. В том случае, когда интерфейсы являются вполне определёнными, становится возможным расчёт с использованием заданных показателей преломления и вычисление оптимального коэффициента отражения для данной пары материалов. Результат такого расчёта для большого набора пар материалов приводится – согласно [54], на рис. 31.

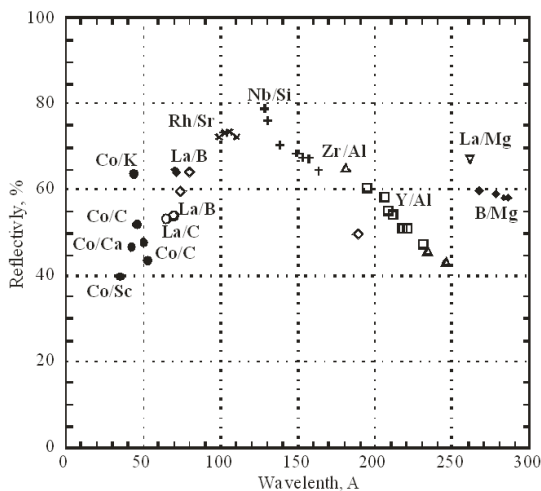


Рис. 31. Максимальное отражение брэгговских зеркал с различными комбинациями металлов.

Максимальные значения коэффициента отражения достигают величины порядка 0,7 и приходятся на длину волны в диапазоне 10-14 nm, а одной из наиболее «удачных» пар оказывается пара «кремний (спейсер) – молибден (рассеиватель) – максимальное теоретическое отражение 0,72 при длине волны 13,5 nm). Существует возможность реализации «брэгговского» зеркала и на несколько большую, и на меньшую длину волны, но отклонения сопровождаются определённым падением максимального отражения. Это обстоятельство и предопределило рабочую длину волны на сегодняшний день 13,5-0,1 nm и выбор «рабочего» ко-

эфициента отражения одного зеркала $0,65 - 0,70$. Поперечное сечение типичного зеркала, полученное в электронном микроскопе «на просвет» приводится на рис. 32.

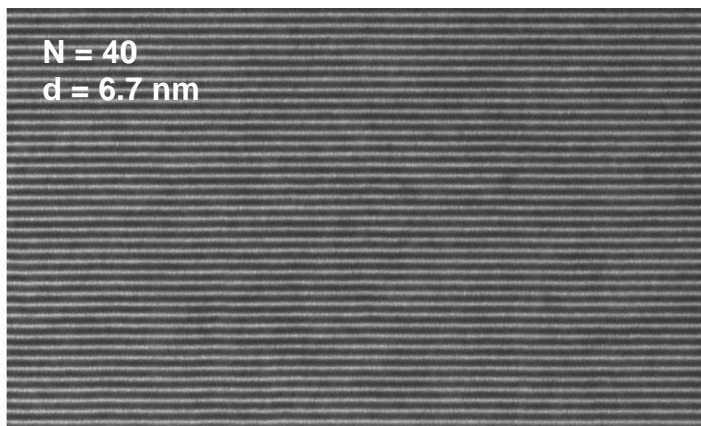


Рис. 32. Брэгговская структура Si – Mo, электронно-микроскопический снимок.

С целью блокирования интердиффузии и поверхностного окисления используются тонкие прослойки из карбида бора, а также прикрывающий слой рутения (рис. 33).

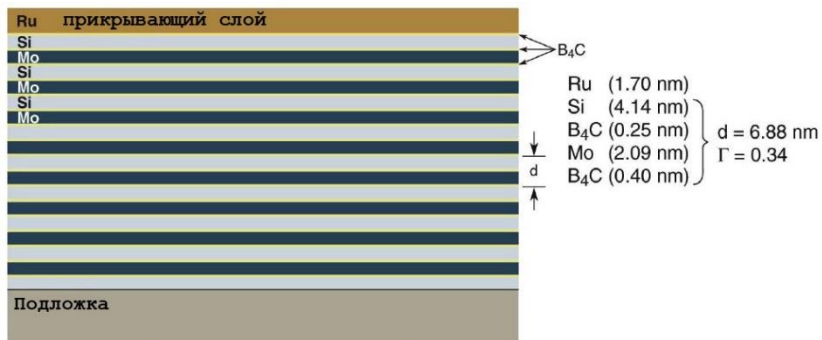


Рис. 33. Структура современной брэгговской системы Si – Mo с защитой от интердиффузии и поверхностного окисления.

Спектр современного модернизированного (рис. 13) брэгговского зеркала отличается от этого спектра незначительно. Прежде всего, несколько большим отражением в максимуме, но существеннее стабильность спектра, несмотря на возможный перегрев в работе, т.к. коллекторное зеркало находится в непосредственной близости от мишени, разогреваемой мощными лазерными импульсами.

Изображающие объективы нормального (почти нормального) падения, использующие многослойные брэгговские покрытия, строятся по законам геометрической оптики аналогично системам видимого и ИК диапазонов. Заметим, что по части aberrаций, апертуры и величины поля зрения они имеют соответственно определённые преимущества перед системами объективов скользящего падения. При построении изображающей оптики, учитывая коэффициенты отражения зеркал $R_N < 1$, конструктору приходится искать компромисс между числом зеркал, необходимым для достижения необходимых апертуры и поля зрения, и степенным увеличением энергетических потерь (пропорциональных $1/(R_N)^n$). В результате количество брэгговских зеркал, используемых в проектируемых изображающих объективах, изменялось от 2М (объектив Шварцшильда) до 8М, и даже 10М. Эту тенденцию можно проследить на примере разработок Canon (рис. 34)

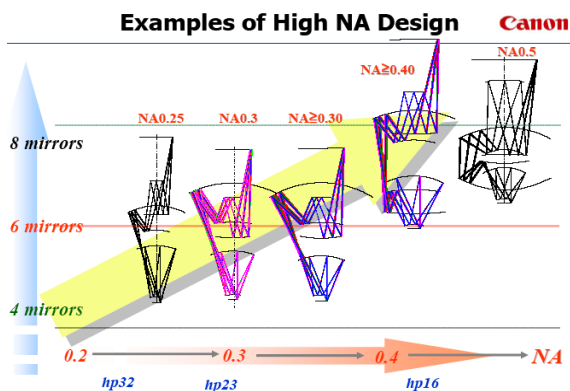


Рис. 34. Ряд изображающих объективов с увеличивающейся апертурой Canon.

Увеличение количества зеркал до 10М осуществлялось с целью повышения NA: до 0.5 (Canon), и даже до 0.7 (Carl Zeiss), с одновременным увеличением предельного оптического разрешения до 16 (10) nm. Считается, что получение оптического разрешения лучше 10 nm уже требует использования, по крайней мере 10-ти зеркального объектива! Ход лучей одного из таких многозеркальных объективов разработки Carl Zeiss показан на рис. 35.

Понятно, что использование столь сложного объектива возможно только при наличии существенного запаса мощности источника излучения.

Как выясняется, есть и другой путь увеличения NA – без изменения числа зеркал в объективе. Изображение может быть построено на двух зеркалах, но с большим количеством последовательных отражений (рис. 36). Здесь достижимы $NA = 0.5$ при поле изображения порядка $20 \times 300 \text{ mm}^2$ на двух зеркалах, но при четырёх отражениях.

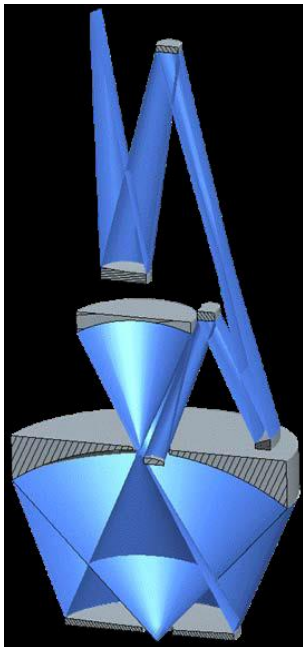


Рис. 35 Зеркальный объектив с $NA = 0.7$ фирмы Carl Zeiss.

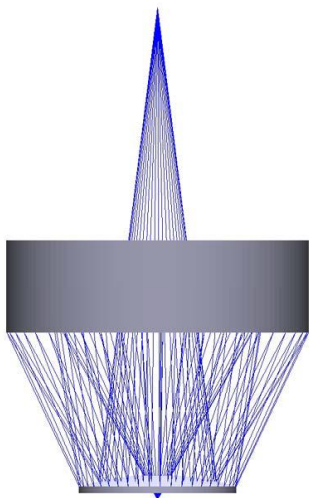


Рис. 36. Изображающий объектив с $NA = 0.5$ на двух зеркалах, но с четырьмя отражениями.

Этот путь требует осуществления весьма сложной асферики и вызывает затруднения при изготовлении, притом энергетические потери при двух зеркалах соответствуют четырёх-зеркальному случаю.

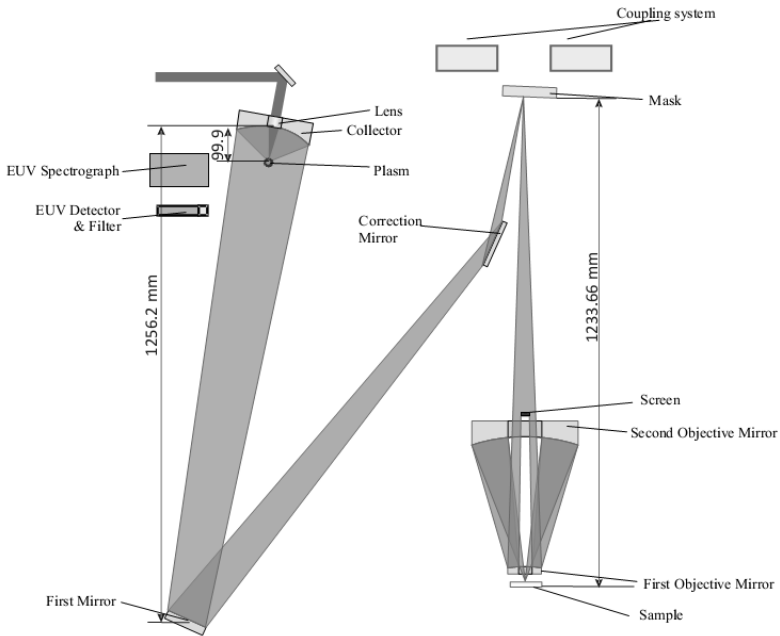
В проекте ФТИ – в соответствии со сформулированными задачами было решено ограничиться 2М и 4М объективами с полем изображения S_i порядка единицы mm^2 . При этом расширение рабочей площади изображения на проектный размер рабочего поля чипа достигается одновременным синхронным сканированием чипа и маски-ретикула при помощи соответствующих микропозиционеров образца и маски.

13. Оптическая система экспериментального ЭУФ-литографа ФТИ

Общая оптическая система ЭНЛ, с учётом полной конструкции литографа, построена Вознесенским Н.Б. по программе «Опал». Разработанная оптическая схема нанолитографа учитывает необходимость размещения в ограниченном пространстве «чистой комнаты», (помещение 119, расположенное на первом этаже здания ФТИ по ул. Политехническая, 26).

На рис. 37 приводится общая схема оптической системы экспериментального нанолитографа, включая лазер-плазменный ис-

точник излучения. Это простейший вариант организации рабочей схемы прибора, оперирующий минимальным количеством зеркал. Здесь облачко нагретой и излучающей плазмы, которое находится в фокусе брэгговского зеркала коллектора, через поворотное зеркало и – корректирующее зеркало скользящего падения направляются на маску-ретикул, и, далее в изображающий объектив – для экспонирования образца, покрытого фоторезистом. 2М изображающий объектив, ход лучей в котором изображён на рис. 38, имеет следующие расчётные параметры: размер изображения (площадь) $0.82 \times 0.82 \text{ mm}^2$, (соответствующая площадь ретикла — $8.2 \times 8.2 \text{ mm}^2$, увеличение — $10\times$, глубина фокуса (DOF) на краю площади изображения равна $\pm 15 \text{ nm}$, DOF для центральной части изображения ($0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$) $\pm 50 \text{ nm}$.



*Рис. 37. Оптическая система нанолитографа ФТИ
(Вознесенский Н.Б.)*

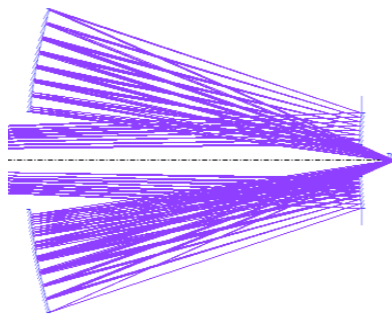


Рис. 38. Ход лучей в 2М объективе.

На рис. 39 приводится результат численного моделирования разрешающей способности разработанного и используемого в первой версии ЭН проекционного изображающего 2М объектива (Н. Б. Вознесенский).

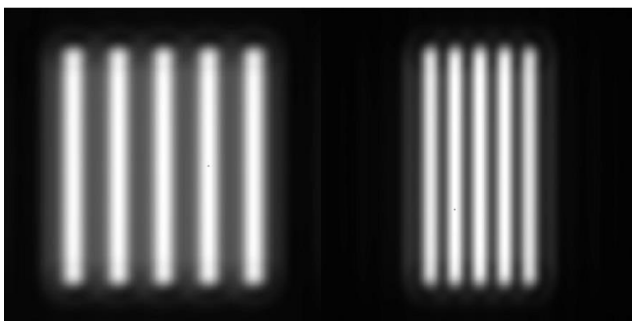


Рис. 39. Численное моделирование показывает, что в случае 2М объектива ($NA = 0.36$) предельное оптическое разрешение полос и зазоров может составить 15 нм при контрасте $\sim 60\%$ (справа).

Более высокоразрешающим оказывается спроектированный 4М объектив, в первоначальном дизайне фигурировавший ещё в заявке на грант 0991 (автор С. А. Родионов). В нём были удачно скомпенсированы сферические аберрации ($NA = 0.485$) и разрешение при численном моделировании составляет 10 нм на площади $0.5 \times 0.5 \text{ nm}^2$. Этот объектив (рис. 40) был усовершенствован в ходе выполнения проекта МНТЦ №3758, на усовершенствованный вариант 4М объектива получен патент №114524 от

16.05.2012, авторы: Сейсян Р.П., Гаврилов Е.В., Жевлаков А.П. (RU), Кирилловский В.К., Вознесенский Н.Б. Этот объектив может быть установлен в нанолитограф вместо 2М объектива без существенной переработки остальной части полной оптической схемы.

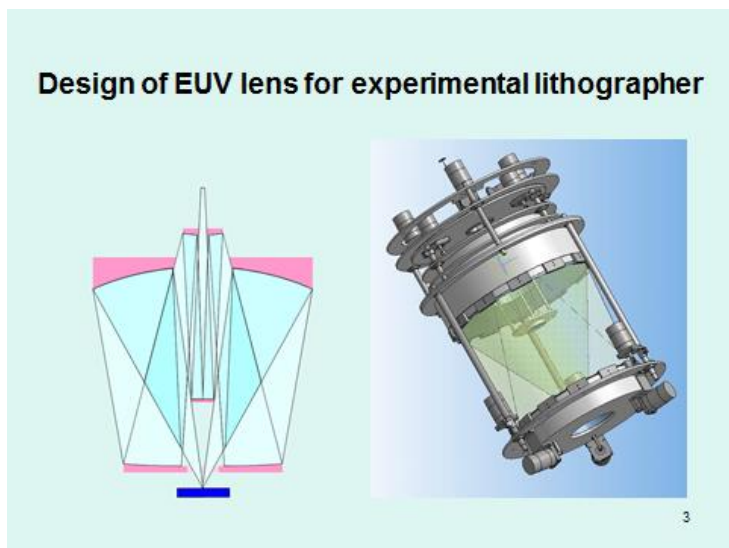


Рис. 40. Оптическая схема и общий вид 4М изображающего объектива.

Некоторым недостатком такого объектива при установке в корпус литографа оказывается малая величина зазора между плоскостью изображения и задней поверхностью третьего зеркала, что не даёт возможности использовать заготовки зеркал с толщиной, достаточной для прецизионной механической обработки (при общем диаметре зеркала порядка 450 mm). С целью преодоления отмеченного недостатка объектив был дополнен парой зеркал, осуществляющей перенос изображения 1:1 и обеспечивающей таким образом возможность не стеснённой установки образца над позиционером. Более того, при наличии малого поворотного зеркала становится возможным перенос позиционера образца на вертикальную плоскость с поворотом на 90° . При таком же размере поля изображения, что и описанный выше 2М объектив, предложенная система имеет числовую апертуру в простран-

стве изображения $NA' = 0.43$, линейное увеличение — 12 при волновой aberrации в пределах поля двух-зеркальной подсистемы не более 0.05λ . Предельная разрешающая способность всей системы 70000 1/mm , или минимальный размер разрешаемого элемента $a_{min} = 7.1 \text{ nm}$. (Патент РФ №7777, Р. П. Сейсян, А. А. Багдасаров, А. П. Жевлаков). Разработанные оптические системы в рассматриваемом диапазоне длин волн обеспечивают задачу «сверхразрешения» в ЭНЛ (Экспериментальный нанолитограф).

14. Общая конструкция нанолитографа ФТИ (ЭНЛ).

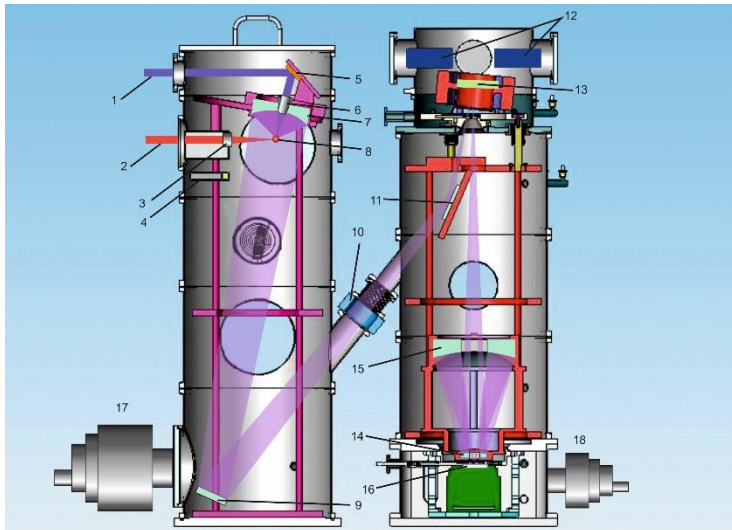


Рис. 41. Общая конструкция экспериментального нанолитографа с 2М объективом может быть представлена двумя основными блоками: (1) блок источника излучения — слева, и (2) блок формирования изображения — справа.

Общая конструкция ЭНЛ показана на рис. 41. Обозначения: 1 – пучок УФ возбуждающего лазерного импульса, 2 – пучок разогревающего ИК импульса, 3 – ИК фокусирующий объектив, 4 – интегральный датчик излучения, 5 – поворотное зеркало для УФ импульса, 6 – фокусирующий объектив для УФ излучения, 7 – коллекторное брэгговское зеркало, 8 – облачко излучающей микроплазмы, 9 – поворотное брэгговское зеркало, 10 – шиберный затвор и сильфон на переходе к наклонному патрубку, 11 –

корректирующее зеркало скользящего падения, 12 – элементы системы фокусировки и сопряжения топологических слоёв, 13 – ретикл, 14 – малое (выпуклое) зеркало брэгговского изображающего объектива, 15 – большое (вогнутое) брэгговское зеркало брэгговского изображающего объектива, 16 – шибберный мини-затвор между образцом и брэгговским изображающим объективом, 17 – большой ТМН блока источника излучения, 18 – малый ТМН блока формирования изображения.

Установка состоит из двух модулей: осветительного модуля (ОМ, слева) и изображающего модуля (ИМ, справа), соединённых между собой наклонным патрубком, пропускающим пучок актиничного ЭУФ-излучения. Модули представляют собой многосекционные вакуумные объёмы, помещающие в себя оптические элементы и их держатели. Модули размещаются на специальном виброзащитном столе внутри «чистой» комнаты.

Излучение, генерируемое лазерной плазмой в ОМ собирается эллипсоидальным коллекторным многослойным интерференционным (брэгговским, настроенным на 13,4 nm) зеркалом, затем поворачивается другим плоским интерференционным зеркалом и направляется в ИМ. Лазерный пучок, генерирующий плазму, входит в ОМ через кварцевое окно в верхней части модуля и при помощи трёхлинзового кварцевого объектива, размещаемого в отверстии, находящемся в центре коллекторного зеркала, фокусируется на мишени, представляющей собой плотную сверхзвуковую струю ксенона. Плазменное облачко формируется в непосредственной близости к первому фокусу эллипсоидального зеркала. Далее ЭУФ излучение попадает на поворотное брэгговское зеркало и при помощи корректирующего зеркала скользящего падения освещает маску-ретикл, расположенную на нанопозиционере маски в фокусе изображающего объектива. Свет, отражённый маской, экспонирует образец, покрытый ЭУФ резистом. Синхронное движение нанопозиционеров образца и маски позволяет проэкспонировать весь образец вплоть до размера 10×10 nm при сканировании площади образца освещённым изображением маски. Переходя к следующему изображению увеличенного топологического поля маски (из 9 возможных), мы осуществляем экспозицию всех необходимых топологических полей, образуя-

щих данный элемент ИС. Нанопозиционер образца в режиме степера позволяет поочередно проэкспонировать все чипы полупроводниковой пластины.

Нанолитограф с 4М объективом может быть размещён в тех же блоках с незначительными изменениями. Возможную компоновку 4М объектива в блоке 2 на вместе 2М объектива мы изобразили на рис. 42.

ЭУФ НАНОЛИТОГРАФ С 4М ОБЪЕКТИВОМ

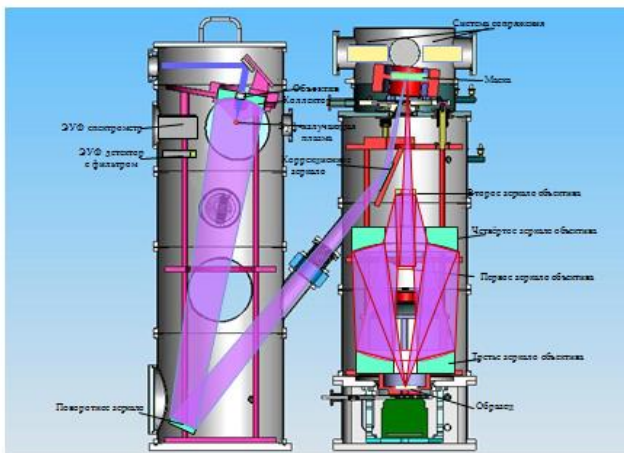


Рис. 42. Компоновка 4М объектива в корпусе

15. Источники ЭУФ и МР излучения. Источник ЭУФ излучения, разработанный в проекте ФТИ.

15.1. Создание эффективного источника излучения оказывается на сегодня ключевой проблемой ЭУФ и МР литографии. Существует два различных варианта решения блока источника ЭУФ радиации: электроразрядный (DPP, Discharge Produced Plasma), и лазер-плазменный (LPP, Laser Produced Plasma), выбор между которыми диктуется преимуществами, достигнутыми на текущий момент времени теми или иными группами разработчиков.

Обратимся далее к рис. 10, показывающему изменения потенциальных возможностей нанолитографии при уменьшении длины волны актиничного излучения. Наибольшая выгода в достижении максимального разрешения (при условии независимой

от длины волны эффективности фоторезиста), достигается в ограниченной области энергий фотона – в связи с увеличением размытия экспонируемого пятна при увеличении энергии фотона за счёт рождения и распространения фотоэлектронов [10]. Эта область перекрывает диапазон длин волн от десятков до единиц нанометров и приходится на ЭУФ и МР диапазоны. И большие, и меньшие длины волн оказываются не вполне эффективными для целей нанолитографии. Отметим, что граница между ЭУФ и МР при 10 nm является сугубо условной, так как при её переходе не происходит никаких принципиальных изменений в природе протекающих оптических процессов. Верхнюю границу ЭУФ по длине волны по физическому признаку резонно ассоциировать с достижением максимального линейного коэффициента поглощения, который приходится на полосу переходов в валентные состояния некоторых веществ. Здесь же, ограничиваясь применением в нанолитографии, мы сузили диапазон рассматриваемых ЭУФ — длин волн отрезком 20 – 10 nm.

Создание достаточно мощного и стабильного источника излучения, как отмечалось, является одной из центральных проблем ЭУФ и МР литографии. Трудность реализации необходимых параметров источника связана со следующими обстоятельствами. Ширина полосы отражения $\Delta\lambda/\lambda$ для Mo/Si зеркал составляет ~ 4,5%. Однако, после 10-ти отражений она уже уменьшается до ~ 2%, что налагает ограничение на спектральную ширину полосы излучения источника. Притом, для того, чтобы обеспечить прохождение излучения через оптическую систему от источника к фоторезисту без геометрических потерь, необходимо чтобы выполнялось соотношение: $E_{ист} \leq E_{опт}$, где $E_{ист}$ и $E_{опт}$ – соответственно этандю источника и оптической системы. Этандю или оптический выход системы определяется как $E = A \cdot \Omega$, где A – площадь источника, Ω – телесный угол, в пределах которого собирается излучение. Величина этандю оптической системы промышленного литографа определяется из соотношения $E_{опт} = d \cdot h \cdot \pi \cdot \omega^2 \cdot NA^2 \sim 3,5 \text{ mm}^2 \cdot \text{ср}$, и при 1D сканировании чипа микропроцессора с площадью $25 \times 33 \text{ mm}^2$ освещённой полосой $d \cdot h = 2 \cdot 25 \text{ mm}^2$, получают $E_{опт} \leq 3,3 \text{ mm}^2 \cdot \text{ср}$. Увеличение собираемого телесного угла источника излучения повышает КПД осветителя

за счёт уменьшения доли неиспользуемого ЭУФ излучения, но при условии не превышения $E_{\text{опт}}$. Это приводит к необходимости уменьшать размер излучающей плазмы до величин, получить которые не всегда представляется возможным. Поэтому часто для коллектора источника промышленной установки выбирается компромиссное значение $\Omega_{\text{кол}} = 1,8$ ср, которому соответствует излучающая площадь источника $A \leq 1,8 \text{ mm}^2$.

Таковы обстоятельства выбора этандю для промышленного нанолитографа массового производства. Наш случай нанолитографа для научно-технических применений оставляет несколько больше свободы выбора.

15.2. Выбор материала плазмы для ЭУФ-источника определяет эффективность источника и на его конструктивные особенности. На рис. 43 слева мы приводим спектры излучения различных материалов: Xe, I, Sn, Li, In. Они перекрывают область 10-15 nm. Эти спектры лежали в основе выбора материала и конструкции источника перед окончательной формулировкой целей и задач проекта МНТЦ 0991 [34]. Рассматривались, прежде всего, Li III, кислород воды (OVI) и ксенон Xe XI. Позже стало рассматриваться олово (От Sn VIII до Sn XIII). Но от кислорода вскоре пришлось отказаться в связи с непопаданием основной полосы излучения в полосу отражения $\Delta\lambda$ для Mo/Si зеркал. Поэтому для работы при 13.5 nm остаются только литий, ксенон и олово. Рассмотрим потенциальные возможности применения этих материалов, обращая внимание на физические свойства соответствующих плазм.

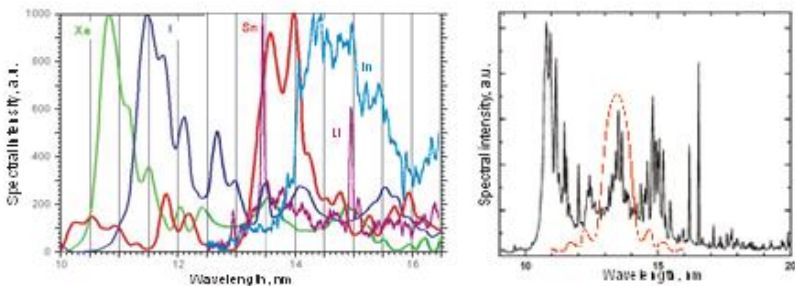


Рис. 43. Спектры излучения для различных материалов плазмы (слева), и спектр излучения ксенона (справа).

Штриховой кривой показан спектр отражения брэгговского зеркала с покрытием Si – Mo. Видно, что в спектр отражения попадает только относительно слабая полоса излучения Хе-плазмы. Существенно выгоднее использование зеркал, отражающих при 10.8 nm.

Излучающим ионом лития является Li III. Для получения иона Li III необходима температура $\sim 10\div 40$ eV. Линия на 13,5 nm вызвана переходом 1s-2p Li III, т.е. является головной линией серии Лаймана (L_{α}) для данного иона. Она и представляет наибольший практический интерес. Резонансный характер данного перехода и большая относительная концентрация рабочего иона обеспечивают высокую интенсивность ЭУФ излучения, в данной линии излучается $\sim 40\div 50$ % от всей энергии в ЭУФ области спектра. Достигнутая в настоящее время максимальная эффективность источников ЭУФ излучения, работающих на литиевой плазме, составляет $\sim 2\div 3$ %.

Рассмотрим основные параметры плазмы, необходимые для эффективной генерации ЭУФ излучения на различных мишенях.

Важным параметром, определяющим кинетику плазмы, является критическая плотность $n_{кр}$. Если плотность плазмы меньше, чем $n_{кр}$, то для описания плазмы применима коронарная модель (KM). В рамках этой модели плотность плазмы низка, электрон-ионные столкновения редки и возбуждение ионов, возникающее под действием электронного удара, приводит к излучению фотона, т.е. происходит в основном излучательная релаксация возбуждения. При повышении плотности плазмы происходит уменьшение времени между столкновениями, что приводит к увеличению вероятности тушения возбуждения в результате электрон-ионного столкновения. При плотности, равной критической, время между столкновениями становится равным времени жизни возбужденного состояния. При плотности больше $n_{кр}$ происходит в основном безызлучательная релаксация возбуждения под действием электрон-ионных столкновений. Для достижения высокой средней мощности и эффективности источника, необходимо чтобы плотность плазмы была немного меньше критической. При этом не происходит столкновительного гашения возбуждения и достигается высокая плотность излучающих ионов, что необходимо для получения высокой мощности. Оценка зна-

чения $n_{кр}$ для литиевой плазмы для радиационного перехода $1s \rightarrow 2p$ иона $Li\ III$ [44] даёт $n_{кр} \sim 1,9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при $T \sim 18 \text{ eV}$ и для максимальной относительной концентрации $Li\ III$ $\mu \sim 0,7$.

Другим важным параметром плазмы является ее оптическая толщина. Если плазма оптически «тонкая», то ЭУФ излучение покидает ее пределы без поглощения. В случае оптически «толстой» плазмы излучение не может покинуть плазменный объем вследствие поглощения. Таким образом, наружу выходит только излучение из тонкого поверхностного слоя. Для получения максимальной эффективности и, соответственно, получения максимальной мощности источника ЭУФ излучения, наиболее привлекательным является случай, когда плазма находится на границе между оптически «тонким» и оптически «толстым» пределами. В этом случае излучение покидает плазму без существенного поглощения и достигается максимальная концентрация плазмы, приводящая к высокой мощности излучения. Оценка оптической толщины плазмы перехода $1s \rightarrow 2p$ иона $Li\ III$ даёт $n_{ион} d \sim 3,4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Поскольку преобладает излучательный распад возбужденного состояния, число рожденных фотонов будет равно числу возбужденных состояний. Основным механизмом рождения возбужденного состояния считается столкновительное возбуждение при соударении электрона и иона. Число рожденных фотонов будет $\sim \langle v\sigma \rangle \cdot n_e \cdot n_{ион} \cdot t$, где t – время, $\langle v\sigma \rangle$ — скорость реакции столкновительного возбуждения, а энергию ЭУФ излучения можно найти как

$$E_{ЭУФ} = 1,47 \cdot 10^{-17} \cdot \langle v\sigma \rangle \cdot n_e \cdot n \cdot \mu \cdot t \cdot V [J],$$

где V – объем плазмы, μ — относительная концентрация ионов $Li\ III$ в плазме, $1,47 \cdot 10^{-17} \text{ J}$ – энергия одного фотона при $\lambda = 13,5 \text{ nm}$. Затраты энергии на получение каждого иона $Li\ III$ при $T \sim 18 \text{ eV}$ составляют $\sim 160 \text{ eV}$. Тогда, для получения плазмы с температурой T необходимо затратить энергию $E_{плаз} = n \cdot V \cdot (3/2 \cdot kT \cdot (Z+1) + e \cdot \Sigma U)$, где n – плотность плазмы. КПД можно оценить как $E_{ЭУФ} / (E_{плаз} + E_{ЭУФ} + E_n)$, а E_n – потери энергии на излучение в другом спектральном диапазоне, уход частиц из плазмы и т.д. Наиболее эффективным способом повышения КПД является увеличение генерируемой энергии ЭУФ излучения и уменьшение

других потерь энергии (E_n). Повышение плотности плазмы n ограничено достижением оптической непрозрачности плазмы и $n_{кр}$. Увеличение объема плазмы V ограничивается требованиями к источнику ЭУФ излучения. Отсюда следует, что оптимальным способом повышения эффективности источника ЭУФ излучения является увеличение времени существования излучающей плазмы. Высокая эффективность излучения в районе 13,5 nm и низкие затраты энергии на получение иона Li III приводят к относительно высокой эффективности источников ЭУФ излучения, работающих на литии. Кроме того, вследствие малой массы лития и относительно низкой температуры плазмы, существенно уменьшаются импульсы ионов и атомов, покидающих разрядную область. Однако существенным недостатком лития является его чрезвычайно высокая, особенно при высоких температурах, химическая активность. Это существенно усложняет создание источника ЭУФ излучения из-за химической эрозии элементов оптической системы и конструкции. Создают проблемы также система подачи лития и возможность осаждения паров лития на элементах оптической системы.

Лазерная плазма была и остаётся одним из наиболее удобных и эффективных методов генерации ЭУФ. Собственно источником здесь является ~50-100 микронное, быстро (со скоростью ~ 10^6 cm/s) расширяющееся, ионизированное до 20 крат облачко вещества мишени в плазменном состоянии при температуре от 0,12 до 1,2 миллионов градусов, соответствующей 10-100 eV. Кваситочечный источник излучения весьма удобен для разработки и оптимизации всей оптической системы. Первоначально исследовались «тяжелые» металлы, обеспечивающие достаточно высокую эффективность преобразования (порядка 1% на 2π стерадиан в необходимой для работы нанолитографа полосе 2% от рабочей длины волны 13,4 nm). Исследовалась, главным образом, непрерывная часть спектров излучения. Однако, в этом случае непреодолимым препятствием оказалось образование — наряду с излучением — большого количества микроосколков, загрязняющих оптическую систему и быстро выводящих ее из строя. Особенно опасным является их попадание на фотошаблон, что приводит к воспроизводству бракованных структур в ИС. Изобретение и ис-

пользование многочисленных специальных приемов защиты оптического тракта не привело к радикальному решению проблемы. Это вынудило в дальнейшем сосредоточиться на сверхзвуковых газовых струях тяжелого инертного газа — ксенона. Именно на лазерной плазме ксенона построены источники излучения в опытных версиях – американских и европейской — ЭУФ нанолитографов. Применение в качестве мишени инертного газа, в первом приближении, решает проблему загрязнений. Наиболее опасное положение в источнике занимает коллекторное зеркало, находящееся в максимальной близости от мишени конвертора. Только на нём в случае газовой струи ксенона ещё регистрируется некоторая коррозия, вызванная бомбардировкой высокоэнергетичными ионами и атомами инертного газа, ограничивающая срок службы. Существеннее, однако, что во имя борьбы с загрязнениями приходится жертвовать коэффициентом конверсии η , который падает до десятых долей процента и становится трудно поднять его до приемлемых величин. Предельно достижимой величиной для газообразного Хе принято считать $\eta = 0.7\%$ (при максимальном достигнутом коэффициенте $\eta \approx 0.55\%$). Это связано с относительно низкой плотностью вещества в газообразной мишени. В погоне за увеличением коэффициента конверсии приходится направлять луч лазера в область, близко примыкающую к соплу, через которое газ выходит, где плотность максимальна. Но это приводит к повышению вероятности разрушения сопла и появлению загрязнений, являющихся частицами материала сопла. Выходом из положения могло бы стать образование кластеров Хе в сверхзвуковой струе, или же применение жидкого, либо твёрдого ксенона. Такие работы проводились в начале работы по проекту 0991 и показали потенциальную возможность получения довольно высоких значений коэффициента конверсии – вплоть до $\eta = 1.5\text{--}2\%$. Но в связи с конструктивно-техническими причинами дальнейшего развития в проекте они не получили. В частности, была выполнена работа по созданию мишени в виде (замороженной) жидкой струи инертного газа. (Ф. Абзаев, А. Бессараб). Такая мишень оказалась неустойчивой из-за образования при лазерном облучении и распространения ударной волны вдоль мишени, и далее в проекте ФТИ не применялась.

Спектроскопические и теоретические исследования позволяют установить одно чрезвычайно важное обстоятельство. Основным источником ЭУФ-фотонов в интересующей нас области спектра оказывается десятикратно ионизированный ксенон Xe^{10+} и эмиссия здесь обязана дискретным линиям поглощения в серии оптических переходов с участием четвёртой и пятой атомных оболочек Хе: $4p^64d^8 - 4p^54d^9 + 4d^7(4f + 5p)$. Однако, доля излучения, приходящаяся на нужную длину волны 13,4 nm, отвечает только относительно слабым переходам $4p^64d^8 \rightarrow 5p4d^7$ и многократно меньше излучения, приходящегося на 11 nm и отвечающего остальным переходам, осуществляемым внутри четвёртой оболочки $n = 4 \rightarrow n^* = 4$ (рис. 43). Притом, увеличение интенсивности возбуждения приводит не столько к увеличению эмиссии, сколько к сдвигу максимума в сторону более коротких волн. Расчёты показывают, что подходящие для генерации 13.4 nm интенсивности возбуждения от первичного лазера не должны выходить за пределы 10^{10} - 10^{12} W/cm², а максимальная электронная температура не должна превысить 55 eV [55-56]. Отметим, что ряд принципиально важных для источника на ксеноновой плазме параметров удалось установить С. Г. Калмыкову в результате относительно простых экспериментов в процессе работы над Проектом [57-60]. Хе оказывается не самым удачным выбором для работы с зеркальной оптикой, обладающей максимальным абсолютным коэффициентом отражения на 13,4 nm.

Основным излучающим ионом ксенона является Хе XI (Xe^{10+}). В отличие от Li III, который имеет один переход в районе 13,5 nm, Хе XI имеет несколько линий, попадающих в требуемый спектральный диапазон. Другой характерной особенностью является то, что вероятность переходов в районе 13,5 nm у Хе XI (переходы 4d-5p) много меньше, чем в районе 11,0 nm. Температура, необходимая для получения иона Хе XI, составляет $\sim 25 \div 55$ eV. Максимальная концентрация достигает $\mu \sim 0,4 \div 0,5$ при $T \sim 36$ eV. Вследствие меньшей вероятности этих переходов по сравнению с 4d-4f переходами, а также относительно низкой концентрации иона Хе XI, в требуемый спектральный диапазон попадает только $\sim 7 \div 10$ % от всей энергии, излучаемой в ЭУФ области спектра. По этой причине максимальная эффективность источников излу-

чения, работающих на ксеноне, составляет $\sim 0,7 \div 1$ %. Оценка $n_{кр}$ даёт $\sim 3,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Оптическая толщина ксеноновой плазмы $n_{ион} d \sim 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Большая температура, необходимая для получения Хе XI, приводит соответственно к большим затратам энергии на нагрев плазмы. Для получения иона с $T \sim 36 \text{ eV}$ необходимо $\sim 1560 \text{ eV}$.

Низкая эффективность излучения в районе $13,5 \text{ nm}$, относительно невысокая концентрация иона Хе XI и высокие затраты энергии на получение плазмы приводят к низкой общей эффективности источников ЭУФ излучения, работающих на ксеноне. Основным достоинством ксенона по сравнению с другими источниками селективного излучения, является простая система подачи газа в источнике ЭУФ излучения. Преимуществом ксенона является и то, что он не осаждается на элементы оптической системы и не приводит к их загрязнению.

В отличие от лития и ксенона, у олова в районе $13,5 \text{ nm}$ излучает несколько ионов: от Sn VIII (Sn^{7+}) до Sn XIII (Sn^{12+}) включительно. Как и в случае с ксеноном, в требуемый спектральный диапазон попадает несколько переходов у каждого иона. При этом вероятность этих переходов относительно велика. Температура, необходимая для получения ионов Sn VIII (Sn^{7+}) \div Sn XIII (Sn^{12+}), составляет $\sim 15 \div 75 \text{ eV}$. Максимальная относительная концентрация каждого иона достигает $\mu \sim 0,4 \div 0,5$. Однако вследствие того, что каждый из этих ионов излучает в районе $13,5 \text{ nm}$, при $T \sim 27 \div 35 \text{ eV}$ концентрация излучающих ионов достигает $\sim 100\%$. Интенсивность ЭУФ излучения имеет максимум в районе $13,5 \text{ nm}$. Высокая вероятность переходов в районе $13,5 \text{ nm}$ и большая концентрация излучающих ионов приводят к тому, что в требуемый спектральный диапазон попадает $\sim 18 \div 25\%$ от всей энергии в ЭУФ области спектра. Максимальная эффективность источников излучения, работающих на олове, составляет $\sim 4 \div 5\%$. Оценка даёт $n_{кр} \sim 6 \cdot 10^{18} \div 10^{21} \text{ см}^{-3}$ для разных ионов. С другой стороны, высокая вероятность переходов и большая относительная концентрация излучающих ионов приводят к сильному поглощению излучения в плазме. По данной причине, в источниках ЭУФ излучения, работающих с оловом, часто встречается ре-абсорбция излучения в районе $13,5 \text{ nm}$. Оптическую толщину

плазмы многозарядных ионов олова в районе 13,5 nm можно оценить как $n_{ион} d \sim 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Затраты энергии необходимые для получения излучающих ионов составляют, от $\sim 660 \text{ eV}$ до $\sim 3760 \text{ eV}$ на атом.

Как и в случае с литием, к недостаткам источников ЭУФ излучения, работающих на олове, можно отнести технологически сложную систему подачи и осаждение паров олова на элементах оптической системы. В то же время, благодаря высокой эффективности подобных источников и меньшей химической активности олова по сравнению с литием, применение олова в качестве источника селективного излучения признаётся наиболее перспективным.

Сравнение табличных данных по литию, ксенону и олову показывает существенное преимущество по выходу ЭУФ излучения для олова и лития по сравнению с ксеноном. Тем не менее, при проектировании ЭНФ решающим обстоятельством оказалась безопасность настройки и работы установки по отношению к оптическому тракту и зеркалу отражательной маски. Поэтому предпочтение получил вариант со сверхзвуковой струёй ксенона, как не вносящий дефектов и каких-либо изменений в элементы оптической схемы и брегговскую маску.

15.3. Источник ЭУФ излучения, разработанный в проекте ФТИ.

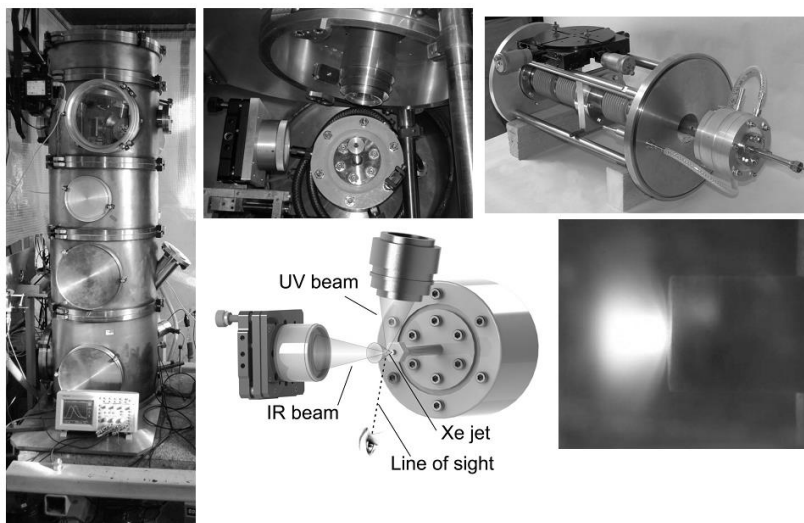


Рис. 44. Фрагменты двух-импульсного источника биспектрального возбуждения и разогрева ксеноновой плазмы в проекте ФТИ.

На рис. 44 показаны фрагменты двух-импульсного источника биспектрального возбуждения и разогрева ксеноновой плазмы в проекте ФТИ. Слева вид работающего блока источника излучения с осциллографом, регистрирующим время и форму ЭУФ вы света (справа внизу). В центре — расположение фокусирующих объективов УФ и ИК лазеров относительно сопла источника сверхзвуковой струи ксенона. Справа вверху — управляемый по трём координатам источник струи с соплом Лавалья и быстродействующим затвором.

15.4. Следующее поколение LPP систем, излучающих в мягком рентгене

Источники с длиной волны короче 10 нм представляют особый интерес для использования в следующем поколении полупроводниковой литографии, а также и для других применений [61]. Исключение инжестируемых загрязнений в современных промышленных моделях оловянных источников ЭУФ-излучения достигается отклонением ионов магнитным полем. Полная ионизация, которая способствует контролю дебрисов и, таким образом, избеганию порчи коллекторного зеркала, достигается применением коротко-импульсного облучения CO₂ лазером.

Недавно была рассмотрена возможность включения ещё более коротковолнового излучения с длиной волны около 6 нм [62]. Излучение ниже EUV (BEUV) может быть собрано многослойным зеркалом Мо/карбид бора (Mo/B₄C), или лантан/карбид бора (La/B₄C), отражение которого в настоящее время при 6.5–6.7 нм составляет 40% (теоретический максимум отражения >70%). УТА излучение, используемое в олове, может быть масштабировано к более коротким длинам волнам при использовании РЗЭ (Редко-земельных элементов). Так, гадолиний (Gd) обладает SE, подобным таковому для олова в пределах узкого спектрального диапазона с центром около 6,7 нм, хотя и при более высоких температурах плазмы.

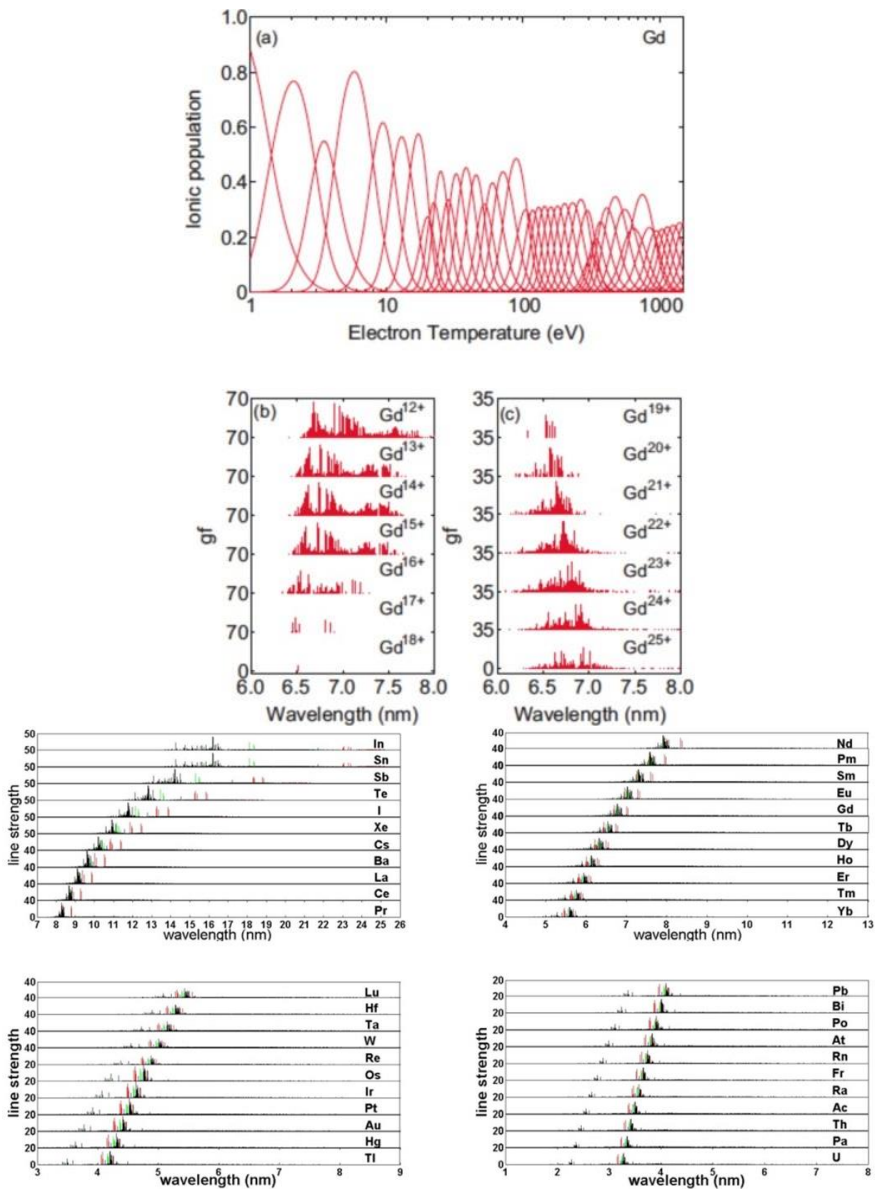


Рис. 45. Положения излучательных переходов, вычисленные для различных плазм.

На рис. 45 приводятся вычисленные в рамках СРМ положения переходов $n=4-n=4$ в ключевых ионах (справа на каждом рисунке) элементов Периодической таблицы, от индия ($Z=49$) к урану ($Z=92$). Локализация излучения около 6.7nm в Gd и 3.9nm в висмуте (Bi) очевидна. С использованием плазмы этих ионов перекрывается широкий диапазон мягкого рентгеновского излучения. Наблюдались также изменения в спектральном поведении в гадолиниевой плазмы: разные длины волн лазера приводили к изменению критических электронных плотностей. Соответствующие эффективности EUV конверсии (CE) составили 1.1, 0.7, и 0.5% для длин волн 1064, 532 и 355nm. Отношения интенсивностей для резонансных линий вблизи 6.7nm к интенсивности сателлитного излучения при длинах волн больше, чем 7 nm, уменьшалось для 532 и 355nm лазерных импульсов в сравнении с 1064nm. Из-за того, что эффекты рассеяния в резонансных линиях гадолиниевой плазмы существенны, полезно генерировать плазму низкой плотности используя длинноволновый лазер и низкую начальную концентрацию мишени. Как и в случае олова, спектр, полученный с использованием мишени низкой начальной плотности, оказывается более интенсивным, чем спектр чистой твёрдой мишени. Соответственно максимальное CE оказывается порядка 1.8% в случае двойного Nd:YAG лазерного воздействия или низкой плотности лазерной плазмы с 30% начальной плотностью гадолиния в мишени.

Так как длина волны становится короче с увеличением атомного числа, такие источники могут быть использованы для других приложений, таких как трансмиссионная x-ray микроскопия для получения изображений, скажем, биологических объектов. Интересны потенциальные возможности висмута как BEUV источника. Вычисления показывают, что при электронной температуре в диапазоне 570–600 eV, висмутовая плазма эффективно излучает вблизи 3.9 nm.

15.5. Конструктивные особенности источников излучения для коротковолновой литографии.

Для плазменного преобразования длинноволнового излучения лазеров в коротковолновое используются мишени разных типов: конденсированные, жидкостные и газообразные. Среди мишеней первого типа наибольшее распространение получили мишени из тяжелых металлов (Au, Cu, Fe и др.). К их преимуществам следует отнести высокие эффективности преобразования, возможность широкой вариации излучаемых длин волн путем подбора подходящего материала, легкодоступность, широкое разнообразие, технологичность. Однако их использование в литографических процессах в производстве интегральных микросхем сильно затруднено из-за загрязнения оптических деталей литографа и облучаемых образцов продуктами разрушения мишени. В этой категории мишеней хорошую перспективу имеют криогенные мишени из инертных газов (Xe, Kr, Ar), которые не взаимодействуют с элементами литографа и легко удаляются из вакуумной камеры. На начальных этапах проекта исследовалась возможность работы с твёрдым ксеноном. Газ, поступавший на охлаждаемый жидким азотом «палец», формировал возобновляемый слой твёрдого ксенона и облучался импульсами мощного (до 5 J) йодного лазера с длиной волны 1.315 μm . Оценки коэффициента конверсии показали достижимость 1-10% преобразования в широком диапазоне энергий ЭУФ и МР (до 100 eV) при длительностях импульсов до 100 ns (А. Бессараб, Ф. Абзаев, ВНИИЭФ).

Конденсированные мишени не рассматриваются для использования в источнике ЭУФ излучения из-за сильного запыления оптики материалом мишени. Так, плоские мишени дают в $\sim 200\div 300$ раз большее загрязнение зеркал, чем массо-ограниченные жидкокапельные мишени. В то же время, именно на этих мишенях достигнута относительно большая эффективность преобразования лазерного излучения в ЭУФ излучение. В частности, на ранней стадии проекта 991 была испытана твёрдая мишень из замороженного ксенона. Ксенон подавался на охлаждаемый жидким азотом «палец». В этой системе был реализован самый высокий СЕ на ксеноне.

В категории жидкостных мишеней наибольшей популярностью в предпроектный период времени пользовалась вода. В этом случае используется дискретная полоса излучения, связанная с ионизированным кислородом, вполне совпадающая с полосой отражения одного из видов брэгговских зеркал литографа. К преимуществам этого типа мишеней следует отнести возможность фокусировки лазерного излучения на значительном расстоянии от выходного торца сопла (порядка сантиметра и выше), через которое жидкость подается в вакуумную камеру. Такого вида мишень с системами фокусировки лазерного импульса на центре падающей капли докладывались в первых отчётах по проекту 0991. Пример источника падающих капель, использованного в работе, изображен слева на рис. 46.

Разработанная система фокусировки (рис. 46) лазерного излучения на центр падающей капли включала в себя фоторегистрацию движущейся капли, вычисление её скорости и фокусировку лазера на точке пространства, в которой она должна будет появиться в момент лазерного импульса. Система была испытана и налажена в ВНИИЭФ, г. Саров, авторы А. Бессараб и Ф. Абзаев.

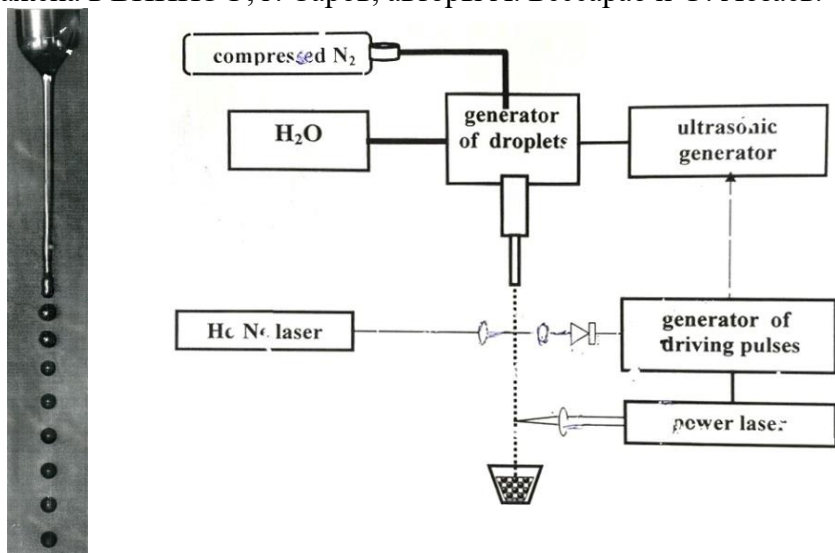


Рис. 46. Фото источника падающих капель (слева) и система фокусировки лазерного излучения на центр падающей капли.

Однако, эта система распространения и развития не получила, главным образом, из-за низкого коэффициента преобразования воды. В то же время, такая мишень со свободно падающими оловянными каплями, благодаря высокому коэффициенту преобразования олова, сейчас рассматривается как наиболее перспективная. Концепция узла мишени со свободно падающими каплями олова повторяет конструкцию и систему управления водяного мишенного узла, изложенную уже на ранних стадиях выполнения проекта 0991. Различие состоит в необходимости подогрева контейнера с оловом до температур, превышающих температуру плавления олова.

Наиболее «чистыми» являются газообразные мишени, использующие инертные газы. Именно такую мишень с использованием сверхзвуковой струи ксенона, несмотря на относительно низкий коэффициент преобразования, используется в проекте ФТИ. К их недостаткам следует отнести необходимость фокусировки лазерного излучения в непосредственной близости от торца сопла, из которого вытекает газ в вакуум, в результате чего возникает опасность повреждения сопла при высоких мощностях лазера.

Лазерный источник излучения для ЭУФ литографии и коллекторная оптика для него имеют некоторые характерные особенности. Импульс лазерного излучения фокусируется на мишени из рабочего вещества, поступающего из системы подачи, и нагревает ее до температуры несколько десятков эВ. Размер образующейся плазмы определяется диаметром пятна лазерного излучения в фокусе и составляет обычно $\sim 100 \div 300 \text{ мкм}$, что позволяет применять в качестве коллектора параболическое Mo/Si зеркало, собирающее в промежуточный фокус ЭУФ излучение в телесном угле π и более стерadian. Фильтр спектральной очистки обеспечивает пропускание излучения в нужном диапазоне длин волн.

Для каждого нового лазерного импульса необходимо, чтобы в фокусе лазера находилась свежая порция материала мишени. Для этого применяют разнообразные системы подачи материала мишени.

Для газообразного рабочего вещества (Xe, SnCl₄ и др.) в качестве мишени используют газовую струю, истекающую в вакуум.

Недостатком подобного типа мишеней является быстрое падение плотности газа при удалении от сопла. В то же время, для эффективного поглощения энергии лазерного импульса необходима большая плотность мишени. Поэтому приходится фокусировать лазерный импульс очень близко от сопла, что приводит к его быстрому выходу из строя в результате большой тепловой нагрузки и распыления материала сопла под действием плазмы. Другим недостатком подобных мишеней является поглощение образующегося ЭУФ излучения в газовой струе.

Возможно использование в качестве мишени спрея, который состоит из жидких капель и кластеров. По сравнению с газовой струей спрей имеет большую плотность и меньшую расходимость, однако и в этом случае расстояние от сопла до фокуса лазера составляет всего несколько миллиметров. Существенно увеличить расстояние до фокуса лазера удавалось при использовании мишени в виде струи из жидкого рабочего вещества (Xe, Kr, Ar). С помощью специального охлаждаемого сопла формировалась струя диаметром несколько десятков или сотен микрон, которую и предполагалось использовать в качестве мишени. В этом случае расстояние от сопла до фокуса лазера может достигать нескольких сантиметров. Недостатком данного типа мишеней оказалось то, что при работе с такой мишенью по жидкости могут распространяться ударные волны, приводящие к неустойчивости и разрушению струи.

В настоящее время наиболее перспективными считаются жидко-капельные мишени. В этих мишенях добиваются того, чтобы жидкая струя разбивалась на следующие друг за другом капли рабочего вещества диаметром в те же десятки или сотни микрон. Данный тип мишени привлекателен тем, что соответствует концепции масс-ограниченной мишени, когда лазерный импульс воздействует только на необходимое количество рабочего вещества, что позволяет существенно снизить загрязнение оптической системы. Поскольку энергетическая и пространственная стабильность ЭУФ излучения критическим образом зависит от точности фокусировки лазерного импульса на мишени, при использовании жидко-капельных мишеней применяют специальную систему синхронизации.

Массовое производство с использованием ЭУФ-излучения предполагает получение уже в промежуточном фокусе 180-500 W [63] этого излучения. Чтобы получить 180 W ЭУФ излучения в промежуточном фокусе, при эффективности преобразования лазерной энергии в излучение на уровне нескольких процентов, необходимо $\sim 10\div 20$ kW лазерной мощности. При энергии лазерного импульса $\sim 100\div 1000$ mJ частота следования импульсов должна составлять несколько десятков kHz. Создание лазерной системы с подобными характеристиками является сложнейшей задачей и является основным ограничением лазерных источников ЭУФ излучения.

Большая часть энергии лазерного импульса поглощается в области плазмы с плотностью $\sim n_{кр}$, где $n_{кр}$ можно оценить из соотношения $n_{кр} \cdot \lambda^2 \approx 10^{13}$. Здесь λ — длина волны излучения лазера. Для ХеF лазера с $\lambda \sim 0,351$ μm , Nd лазера с $\lambda \sim 1,06$ μm и CO₂ лазера с $\lambda \sim 10,6$ μm , получаем соответственно $n_{крит} \sim 10^{22}$ cm^{-3} , $\sim 10^{21}$ cm^{-3} и $\sim 10^{19}$ cm^{-3} . Учитывая, что оптическая плотность плазмы олова $n_{ион} d \sim 3 \cdot 10^{16}$ cm^{-2} , можно увидеть, что поглощение излучения с $\lambda \leq 1,06$ μm и, соответственно, передача энергии плазме происходит в области, из которой ЭУФ излучение выходит с сильным поглощением. Таким образом, образующаяся плазма оптически непрозрачна для ЭУФ излучения, что негативным образом сказывается на эффективности источника. Для решения этой проблемы приходится применять мишени специального состава, в которых олово разбавлено в $\sim 3\div 100$ раз буферным веществом, плазма которого прозрачна для ЭУФ излучения. В то же время, излучение CO₂ лазера с $\lambda \sim 10,6$ μm поглощается в области плазмы, из которой ЭУФ излучение выходит без заметного поглощения. Это приводит к высокой эффективности источников ЭУФ излучения на основе CO₂ лазера при работе с оловянными мишенями.

Еще одним преимуществом CO₂ лазера является снижение требования к необходимой плотности мощности лазерного излучения на мишени. Так, если для получения максимальной эффективности при использовании Nd:YAG лазера необходимо обеспечить плотность мощности $\sim 1\div 3 \cdot 10^{11}$ W/cm², то для CO₂ лазера

достаточно $\sim 10^{10}$ W/cm², что существенно упрощает создание лазерной системы.

Малый размер излучающей плазмы в лазерных источниках ЭУФ излучения позволяет добиться высокой эффективности сбора излучения. Они обладают хорошей стабильностью размера и положения излучающей плазмы. Преимуществом подобных источников является слабое запыление зеркал оптической системы материалом мишени. Максимальная эффективность преобразования вложенной в плазму энергии в ЭУФ излучение в требуемом диапазоне длин волн составляет для ксеноновых мишеней $\sim 1\%$, для оловянных $\sim 4\div 5\%$ и для литиевых $\sim 2\div 2,5\%$.

Учитывая эффективность лазера, к недостаткам следует отнести низкую общую эффективность источника и, соответственно, высокие затраты на эксплуатацию. Большую техническую проблему представляет также обеспечение стабильности размеров и местоположения капель мишени, а также связанную с этим задачу стабильного попадания лазерного луча в каплю мишени. С целью решения этой проблемы был создан «струнный» источник на олове. (Патент № 94003 с приоритетом от 27.01.2009, Сейсян Р.П.)

Идея двух импульсного и двух спектрального возбуждения плазмы принадлежит участнику проекта ФТИ А. Андрееву (см. доклад на «RUSNANOTECH 08» [45]). Она была изложена на Японо-российском форуме [33] в присутствии большого количества представителей японских фирм и государственных организаций, ответственных за развитие электроники, типа ASET. Идея вызвала заметный интерес, и, как показало дальнейшее развитие событий, широко использовалась в японских разработках [66].

15.6. DPP или Discharge Produced Plasma (разрядный) источник

В настоящей работе мы не будем подробно останавливаться на разрядном источнике ЭУФ излучения. Применение того, или иного типа ЭУФ источника определяется успехами в получении максимальной мощности излучения. Здесь мы отошлём читателя к многочисленным публикациям, выполненным В.М. Борисовым и сотрудниками его лаборатории в ТРИНИТИ (под Москвой).

Целый ряд решений по разрядному источнику запатентован В. М. Борисовым и др. [64]. Успехи в этих работах таковы, что этими источниками оборудованы первые версии ЭУФ нанолитографов. В их числе экспериментальный нанолитограф EXCITECH 13, а также ADT, выпущенный ASML (Голландия). Принцип действия разрядных источников ЭУФ излучения основан на получении высокотемпературной плазмы с помощью пинч-эффекта. Суть этого эффекта (рис. 47) заключается в сжатии начальной плазмы под действием магнитного поля, протекающего через разряд тока, в результате чего температура плазмы повышается и достигает нескольких десятков эВ. При этом в результате сжатия также достигаются малые размеры излучающей плазмы.

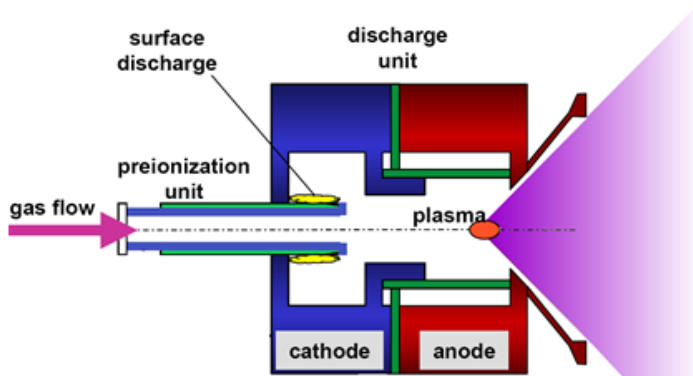


Рис. 47. Эскиз принципиальной схемы разрядного источника с газовой мишенью. Z- пинч разряд как источник ЭУФ излучения (DPP).

Основным ограничением подобных источников ЭУФ излучения стала тепловая нагрузка на электродную систему и эрозия электродов. Максимальная мощность, полученная газовыми источниками, составляет $\sim 200 \text{ W} / 2\pi \text{ см}$ для ксенона и $\sim 800 \text{ Вт} / 2\pi \text{ см}$ для оловосодержащих газов.

К недостаткам подобных источников следует отнести образование большого количества продуктов эрозии электродов, загрязняющих элементы оптической системы. Поэтому большое внимание уделяется созданию систем защиты оптических элементов от продуктов эрозии и методов очистки оптических элементов от продуктов эрозии электродов. Кроме того, создание

источников ЭУФ излучения с вращающимися электродами требует решения большого количества сложных технических и технологических проблем.

Длительное время ФТИ совместно с В. М. Борисовым разрабатывался проект нанолитографа ФТИ с таким же источником радиации. Этот проект, в частности, стал победителем конкурса ОНЕКСИМ гр. в 2008г. Приводим выдержку из протокола закрытого заседания Экспертного совета ОНЕКСИМ гр. 17 июня 2008г.: «По результатам закрытого голосования («14» за, «0» против) рекомендовать проект Сейсяна Р. П. «Создание технологии и оборудования нанолитографии для производства интегральных схем следующего поколения» к инвестированию в объеме I-го этапа». Приведём также Итоговый доклад на конкурсе [65].

Проект обсуждался в течение 2-х лет, для чего специально приезжал в ФТИ уполномоченный президента инвестиционного фонда ОНЕКСИМ М. Д. Прохорова Корзников А. М. Проект обсуждался в присутствии эксперта из Израиля, был оценен положительно, но финансовой поддержки не поступило, что не дало возможности завершить изготовление нанолитографа.

15.7. Проблемы ЭУФ-источника

Источник ЭУФ-излучения в нанолитографе, ориентированном на широкомасштабное промышленное производство, должен удовлетворять нескольким почти очевидным требованиям. Во-первых, он должен быть квазиточечным. Это необходимо для получения надлежащего качества (однородности по интенсивности и по углам падения лучей) освещения маски и, в конце концов, для достижения заявленного разрешения изображающей системы с разрешением в 5-20 nm. Во-вторых, источник ЭУФ-излучения должен быть «чистым», т.е. не должен повреждать отражающую поверхность дорогостоящих интерференционных зеркал ЭУФ-оптики и, в особенности, фото-маски потоком корпускул, порождаемых в источнике вместе с излучением. (т. к. ее повреждения будут воспроизводиться при фотопечати, снижая выход годных микросхем) В количественных терминах, степень «чистоты» источника должна обеспечивать ресурс оптической системы (т.е. «время жизни» оптической системы до момента потери 10% ее

отражательной способности) 30000 часов, или 10 лет односменной работы. Наконец, по интенсивности излучения и коэффициенту полезного действия источник должен удовлетворять требованиям, связанным с высокой производительностью современного промышленного процесса фотолитографии.

Первые два требования, казалось бы, несложно удовлетворить выбором лазерно-плазменного источника с мишенью в виде струи газообразного Хе – лазерная плазма обладает существенной «точечностью», ее характерные размеры обычно варьируют в пределах пары сотен микрон, а инертный газ Хе практически не осаждается на каких-либо поверхностях и корпускулярный поток в этом случае связан только с распылением материала сопла, из которого вытекает струя газа. Однако, третье условие оказывается намного более жестким.

Детальный анализ необходимой интенсивности потока ЭУФ-излучения, обусловленной производительностью фотолитографического процесса, и потерь энергии как при ее преобразовании (электроэнергия => лазерное излучение => ЭУФ-излучение), так и при прохождении ЭУФ-луча через оптическую систему нанолитографа выполнен в работе [мой анализ из SWT] (рис. 48, 49).

В соответствии с данными, приведенными в этой работе, современная производительность фотолитографов (сканнеров-степперов) составляет около 100 пластин в час, причем каждая из пластин диаметром 300 mm содержит порядка 100 индивидуальных чипов и, таким образом, требует соответствующего количества экспозиций каждого чипа. При стандартной фоточувствительности 5 mJ/cm^2 (а в ЭУФ-литографии чувствительность может оказаться более низкой, т. е. требующаяся доза – более высокой) такая производительность требует, чтобы мощность падающего на экспонируемую пластину потока ЭУФ-излучения в полосе $134 \pm 2.5 \text{ \AA}$ была не менее 3 W.

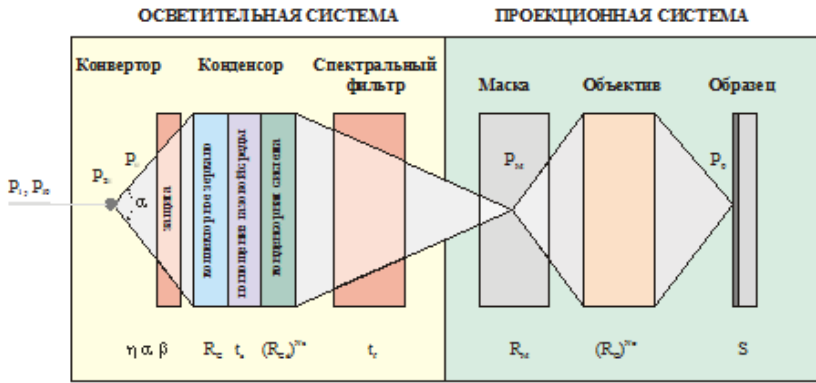


Рис. 48. Потери в системе ЭУФ литографа. Коэффициент конверсии (η) и угол сбора излучения (α), прозрачность элементов защиты от микро-частиц («дебрисов») (β), коэффициент отражения первого брэгговского зеркала коллектора (R_c), поглощение частицами мишени, общий коэффициент отражения системы зеркал коллектора, пропускание фильтра спектральной очистки, потери на отражение в маске, потери в зеркалах изображающего объектива, чувствительность фоторезиста.

Energy transmission of different nanolithograph elements

Conversion efficiency, %	Collector efficiency (with respect to 2 π)	Transmission of debris mitigation system	Collector mirror reflectivity	Other mirror reflectivity	Gas transmission	Transmission of spectral purity filter	Mask reflectivity	Transmission of mirror objective
η	α	β	R_c	R_{ot}	t_g	t_f	R_m	T_0
0.55		1.0	0.5	0.65-0.96	0.9			2M 0.0225
0.70						0.5	0.65	4M 0.1725
0.75	0.1-0.3			Condenserefficiency losses	1.0			6M 0.0756
0.7		0.9		0.7				8M 0.03156
1.1								
2.0								

Energy requirements in the nanolithograph resulting from photoresist sensitivity

Photoresist sensitivity, mJ/cm ²	Power required to expose 100 WPM (300mm wafer), W	Total power on mask surface, W	Collectable optical power from EUV source, W	Total EUV source optical power, W	Total optical power of primary light source, kW	Total electrical power, kW
S	P	P_{te}	P_{se}	P_{se}	P_{se}	P_e
5	2.65*	230	9.8	77	310	13
		430	23	133	734	37
		634	33	434	1736	87
		838	43	637	2538	127
		1042	53	840	3340	167
		1246	63	1043	4142	207
		1450	73	1246	4944	247
		1654	83	1449	5746	287
		1858	93	1652	6548	327
		2062	103	1855	7350	367
		2266	113	2058	8152	407
		2470	123	2261	8954	447
		2674	133	2464	9756	487
		2878	143	2667	10558	527
		3082	153	2870	11360	567
		3286	163	3073	12162	607
		3490	173	3276	12964	647
		3694	183	3479	13766	687
		3898	193	3682	14568	727
		4102	203	3885	15370	767
		4306	213	4088	16172	807
		4510	223	4291	16974	847
		4714	233	4494	17776	887
		4918	243	4697	18578	927
		5122	253	4900	19380	967
		5326	263	5103	20182	1007
		5530	273	5306	20984	1047
		5734	283	5509	21786	1087
		5938	293	5712	22588	1127
		6142	303	5915	23390	1167
		6346	313	6118	24192	1207
		6550	323	6321	24994	1247
		6754	333	6524	25796	1287
		6958	343	6727	26598	1327
		7162	353	6930	27400	1367
		7366	363	7133	28202	1407
		7570	373	7336	29004	1447
		7774	383	7539	29806	1487
		7978	393	7742	30608	1527
		8182	403	7945	31410	1567
		8386	413	8148	32212	1607
		8590	423	8351	33014	1647
		8794	433	8554	33816	1687
		8998	443	8757	34618	1727
		9202	453	8960	35420	1767
		9406	463	9163	36222	1807
		9610	473	9366	37024	1847
		9814	483	9569	37826	1887
		10018	493	9772	38628	1927
		10222	503	9975	39430	1967
		10426	513	10178	40232	2007
		10630	523	10381	41034	2047
		10834	533	10584	41836	2087
		11038	543	10787	42638	2127
		11242	553	10990	43440	2167
		11446	563	11193	44242	2207
		11650	573	11396	45044	2247
		11854	583	11599	45846	2287
		12058	593	11802	46648	2327
		12262	603	12005	47450	2367
		12466	613	12208	48252	2407
		12670	623	12411	49054	2447
		12874	633	12614	49856	2487
		13078	643	12817	50658	2527
		13282	653	13020	51460	2567
		13486	663	13223	52262	2607
		13690	673	13426	53064	2647
		13894	683	13629	53866	2687
		14098	693	13832	54668	2727
		14302	703	14035	55470	2767
		14506	713	14238	56272	2807
		14710	723	14441	57074	2847
		14914	733	14644	57876	2887
		15118	743	14847	58678	2927
		15322	753	15050	59480	2967
		15526	763	15253	60282	3007
		15730	773	15456	61084	3047
		15934	783	15659	61886	3087
		16138	793	15862	62688	3127
		16342	803	16065	63490	3167
		16546	813	16268	64292	3207
		16750	823	16471	65094	3247
		16954	833	16674	65896	3287
		17158	843	16877	66698	3327
		17362	853	17080	67500	3367
		17566	863	17283	68302	3407
		17770	873	17486	69104	3447
		17974	883	17689	69906	3487
		18178	893	17892	70708	3527
		18382	903	18095	71510	3567
		18586	913	18298	72312	3607
		18790	923	18501	73114	3647
		18994	933	18704	73916	3687
		19198	943	18907	74718	3727
		19402	953	19110	75520	3767
		19606	963	19313	76322	3807
		19810	973	19516	77124	3847
		20014	983	19719	77926	3887
		20218	993	19922	78728	3927
		20422	1003	20125	79530	3967
		20626	1013	20328	80332	4007
		20830	1023	20531	81134	4047
		21034	1033	20734	81936	4087
		21238	1043	20937	82738	4127
		21442	1053	21140	83540	4167
		21646	1063	21343	84342	4207
		21850	1073	21546	85144	4247
		22054	1083	21749	85946	4287
		22258	1093	21952	86748	4327
		22462	1103	22155	87550	4367
		22666	1113	22358	88352	4407
		22870	1123	22561	89154	4447
		23074	1133	22764	89956	4487
		23278	1143	22967	90758	4527
		23482	1153	23170	91560	4567
		23686	1163	23373	92362	4607
		23890	1173	23576	93164	4647
		24094	1183	23779	93966	4687
		24298	1193	23982	94768	4727
		24502	1203	24185	95570	4767
		24706	1213	24388	96372	4807
		24910	1223	24591	97174	4847
		25114	1233	24794	97976	4887
		25318	1243	24997	98778	4927
		25522	1253	25200	99580	4967
		25726	1263	25403	100382	5007
		25930	1273	25606	101184	5047
		26134	1283	25809	101986	5087
		26338	1293	26012	102788	5127
		26542	1303	26215	103590	5167
		26746	1313	26418	104392	5207
		26950	1323	26621	105194	5247
		27154	1333	26824	105996	5287
		27358	1343	27027	106798	5327
		27562	1353	27230	107600	5367
		27766	1363	27433	108402	5407
		27970	1373	27636	109204	5447
		28174	1383	27839	110006	5487
		28378	1393	28042	110808	5527
		28582	1403	28245	111610	5567
		28786	1413	28448	112412	5607
		28990	1423	28651	113214	5647
		29194	1433	28854	114016	5687
		29398	1443	29057	114818	5727
		29602	1453	29260	115620	5767
		29806	1463	29463	116422	5807
		30010	1473	29666	117224	5847
		30214	1483	29869	118026	5887
		30418	1493	30072	118828	5927
		30622	1503	30275	119630	5967
		30826	1513	30478	120432	6007
		31030	1523	30681	121234	6047
		31234	1533	30884	122036	6087
		31438	1543	31087	12283	

Однако, очень велики оказываются потери энергии в оптическом тракте нанолитографа. Среди геометрических доминируют потери, связанные с неполным телесным углом собирания излучения плазмы – из технических соображений его вряд ли удастся сделать бóльшим, чем 0.2-0.25 от полного. Потери на пропускание, в основном, связаны с потерями при отражении от брэгговских интерференционных зеркал ЭУФ-оптики. Теоретический предел коэффициента отражения для них составляет около 70% (в указанной выше спектральной полосе и резко падает за ее пределами, определяя тем самым полосу пропускания оптической системы). Число отражений в нанолитографе даже при 2-зеркальном объективе (а совместное требование высокого разрешения и относительно большого поля изображения приводит к желательности использования объективов с 2-мя, 3-мя и даже 4-мя парами зеркал) ожидается равным 5 (по 2 отражения в объективе и источнике и одно – на маске), что приводит к пропусканию не более 17%. Дополнительно к потерям на отражение следует учесть потери на спектральном фильтре, который подавляет длинноволновый фон излучения плазмы, – его пропускание на $\lambda = 13.4 \text{ nm}$ обычно не превышает 50%.

Аккуратный учет всех потерь приводит, в результате, к тому, что требующаяся от источника промышленного назначения мощность узкополосного ЭУФ-излучения (в полный телесный угол) составит от 300 W (при 2-зеркальном объективе) до 4 kW (при 8-зеркальном). Даже меньшая из указанных величин по состоянию дел на настоящий момент оказывается недоступной для лазерно-плазменного источника.

Одной из очевидных причин, объясняющих такое невысокое значение коэффициента конверсии, является относительно низкая плотность вещества в газообразной мишени. Выходом из положения могло бы стать возбуждение лазерной плазмы на конденсированных фазах Хе – на кластерах в сверхзвуковой струе или на поверхностях жидкого или твердого ксенона. Выполненные в недавнее время в этом направлении расчетные работы продемонстрировали возможность получения довольно высоких значений коэффициента конверсии – вплоть до $\eta = 1.5\text{-}2\%$. Лазер с диодной накачкой при наращивании мощности теряет часть своей привле-

кательности из-за трудностей с отводом тепла от миниатюрных полупроводниковых лазерных линеек, и трудно уже становится рассчитывать на общий КПД порядка 10%, использованный в расчётах выше. Относительно новой идеей является использование в качестве первичного лазера ещё более длинноволнового ($\lambda = 10.6 \mu$) газового CO_2 -лазера. Возможность разработки мультикиловаттного CO_2 -лазера для технологических целей была продемонстрирована в НИИЛФ. Лазер основан на применении эффективного щелевого CO_2 -усилителя с непрерывной RF-накачкой и с коэффициентом усиления 50 на один каскад. Лазер работает на частотах до 100 kHz и обладает высоким η и качеством пучка, обеспечивающим фокусировку в пятно почти дифракционного размера (порядка 20 μ).

Отдавая должное тем огромным усилиям, которые были предприняты в разных странах, и которые позволили накопить большую базу данных, тем не менее, отметим, что в научной периодике последнего десятилетия, в сущности, трудно найти описания сколько-нибудь детальных исследований свойств лазерной плазмы и их эволюции во времени. Исследовательская направленность присутствует лишь в расчетных работах по математическому моделированию лазерной плазмы. С другой стороны, в подавляющем большинстве случаев, в качестве первичных источников энергии рассматриваются сравнительно дешевые и практически удобные инфракрасные лазеры. Разработчики оптимизационных схем для лазерно-плазменных источников с газовой мишенью опираются только на столкновительные механизмы поглощения лазерной энергии, нагрева и ионизации плазмы, которые имеют высокие скорости для более длинноволновых лазеров, но неэффективны в начальной стадии развития плазмы, когда количество заряженных частиц невелико. В результате игнорируются возможные преимущества, которые могут быть получены, если создать условия для эффективного проявления иных физических процессов, в частности, многофотонного механизма.

16. Неорганический ЭУФ резист

Одной из ключевых проблем современной литографии, использующей вакуумный ультрафиолет (ВУФ), а также литографии следующего поколения, использующей экстремальный мягкий рентген (МР), является проблема фоторезиста, обладающего достаточно большой разрешающей способностью для создания изображения в десятки и единицы нанометров. В настоящее время в качестве фоточувствительных сред для воспроизведения уменьшенного изображения используются органические материалы. С целью увеличения их стойкости к технологической обработке, чувствительности к актиничному излучению и контраста применяют смолы, сенсбилизаторы, контраст-усиливающие добавки, разрабатывают сложные многослойные покрытия. Применение ВУФ и, особенно, ЭУФ и МР излучения в качестве актиничного, вынуждает пересмотреть основные концепции формирования фоточувствительных резистных материалов. В первую очередь это приводит к возникновению интереса к другому классу материалов — к неорганике, обладающей меньшими размерами фоточувствительной ячейки. Здесь, естественно, исключается использование смолы в качестве добавки, усиливающей химическую резистентность к проявителям. Кроме того, используемые в настоящее время фоторезистные слои представляют собой линейные среды. В случае их применения результат зависит только от дозы облучения, и не зависит от того, какой интенсивности импульсами она набирается. Применение интенсивного коротковолнового излучения приводит к возможности возбуждения разнообразных нелинейных процессов в фоточувствительном слое.

В настоящее время признано перспективным направление разработки нелинейного фото-резиста. В таком фото-резисте существует пороговая интенсивность излучения, при превышении этого уровня интенсивности имеют место фотохимические трансформации и растворимость резко меняется. Таким образом, малый контраст светового поля не мешает созданию высококачественного изображения.

Дополнительным преимуществом неорганических покрытий является возможность вакуумного напыления, или других технологий, позволяющих создавать однородные и сплошные тонкие

пленки нанометрового диапазона толщин. Это имеет принципиальное значение, поскольку сильное поглощение не позволяет использовать слои толщиной, превышающей $\sim 100\text{nm}$. С другой стороны, толщины резиста, превышающие регламентированное размытие линий рисунка топологического слоя интегральной схемы, требуют создания специальных технологий проявления, обеспечивающих вертикальность стенок с большим аспектным отношением.

Одними из наиболее перспективных кандидатов на роль нелинейных фоторезистов являются халькогенидные стеклообразные полупроводники (ХСП). Было проведено детальное изучение ХСП с целью изучения механизмов, приводящих к нелинейности. В настоящее время в микроэлектронной промышленности используется излучение 193nm ($6,4\text{ eV}$). По этой причине основные исследования были сосредоточены на этой длине волны. Однако ХСП выглядят многообещающе и для работы в ЭУФ диапазоне. О высокой чувствительности ХСП к ВУФ излучению ранее уже сообщалось. Даже низкие дозы (несколько mJ/cm^2) излучения 193nm способны вызвать структурные изменения в пленке. Однако, до сих пор никаких предположений относительно механизмов, ответственных за такие изменения при столь высоких энергиях фотонов, выдвинуто не было.

Наиболее простым, однако, достаточно информативным, методом обнаружения фотоиндуцированных изменений является оптическая спектроскопия. На рис. 50 приведены зависимости относительного пропускания для AsS и MoO:H. Хорошо видно, что даже сравнительно небольшие дозы облучения ($2\text{-}3\text{ mJ}/\text{cm}^2$) приводят к изменению пропускания AsS.

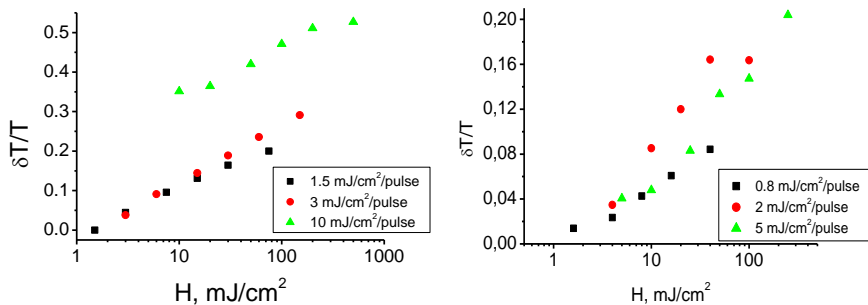


Рис. 50. Относительное пропускание для AsS (слева) и MoO:H (справа).

Более глубокое понимание процессов, происходящих в этих материалах под действием ВУФ излучения, может быть получено из спектров оптической плотности. Проблема заключается в том, что применяемые в настоящее время в литографии пленки имеют толщину, сравнимую с длиной волны оптического диапазона. Таким образом, в измеряемых спектрах возникают интерференционные эффекты. Для проведения анализа оптических спектров, соответствующие интерференционные эффекты должны быть исключены. Спектры оптической плотности, свободные от влияния интерференционных эффектов, могут быть получены из измеренных спектров отражения и пропускания. Соответственно могут быть рассчитаны изменения ширины запрещенной зоны.

Анализ фундаментального края поглощения проэкспонированных и не проэкспонированных пленок и аппроксимация его с помощью различных моделей (классическая полупроводниковая модель и модель Тауца для аморфных полупроводников) подтверждает предположение, что под воздействием ВУФ-излучения в исследуемых пленках происходят некоторые структурные изменения, связанные с частичной кристаллизацией пленки. Были проведены эксперименты по формированию изображения в пленках As₂S₃ при помощи синхротронного излучения с длиной волны 13.5nm. На рис. 51 приведена оптическая схема эксперимента, а также фотография полученной периодической структуры. Полученная структура имеет вертикальные края, даже на тех участках, где оптическое поле затухает, и ширина полосы становится значительно меньше.

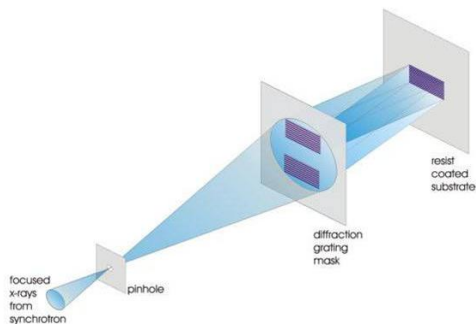


Рис. 51. Схема экспериментального определения разрешающей способности, а также чувствительности неорганического резиста As_2S_3 на длине волны 13.4 нм.

Определение параметров фоторезиста на базе As_2S_3 было выполнено в процессе работы над проектом DECHIR-CHAFILI, EPFL, Лозанна, Швейцария, руководитель Патрик Хоффман с привлечением сотрудников института ФТИ им. Иоффе Р. Сейсана, С. Нестерова, Н. Калитеевской.

С. Нестеровым под руководством сотрудника IPS Harun H. Solak (Харуна Солака) при экспериментах на синхротроне института Пауля Шерера (IPS) были выполнены эксперименты по определению чувствительности к ЭУФ излучению, и разрешающей способности плёнок ХСП, нанесённых на пластины кремния в качестве ЭУФ фоторезиста. Пучок излучения одного из каналов синхротрона через точечное отверстие (pinhole) поступал на маску, представлявшую собой две дифракционные решётки, разделённые непрозрачным промежутком. Дифрагировавший пучок попадал на фоточувствительную пластину из кремния, покрытую тонкой плёнкой ХСП As_2S_3 , изготовленной по технологии, разработанной в проекте МНТЦ 0991 С. Нестеровым. Им же выполнялось жидкостное проявление фоторезиста. СЭМ-изображение поверхности одной из таких пластин и приводится на рис. 52. Изображение позволяет оценить предельное для данной маски разрешение.

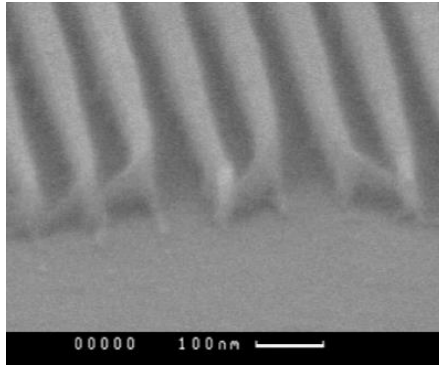


Рис. 52. Проявленное изображение, сформированное в процессе экспонирования излучением синхротрона на длине волны 13,4 нм.

Параметры фоторезиста на базе As_2S_3 , определённые в процессе эксперимента на синхротроне швейцарского инсититута Пауля Шерера: показывает, что доза $H = h/C = 1.7 \text{ мДж/см}^2$ является достаточной для экспонирования плёнки фоторезиста толщиной $h=50 \text{ нм}$. Импульсная пороговая доза при 20 пс импульсах составляет $H_{th} = \tau I_{th} = 0.34 \text{ мДж/см}^2$. Это означает, что необходимая доза набирается за 5 импульсов при пороговой интенсивности и 20 пс длительности импульсов.

Приведём систему уравнений, позволяющую – подобно уравнениям Дила для позитивного резиста – полностью описать процесс образования скрытого изображения и его проявления в случае плёнок ХСП:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I(z,t)}{\partial z} &= -\alpha(z,t)I(z,t), \\ \frac{\partial \rho_1(z,t)}{\partial t} &= -C\alpha(z,t)I(z,t)F[I(z,t)]\rho_1(z,t), \\ \alpha(z,t) &= \alpha_1\rho_1(z,t) + \alpha_2\rho_2(z,t) = \alpha_2 + (\alpha_1 - \alpha). \end{aligned}$$

Здесь α_1, α_2 — коэффициенты поглощения материалов I и II при экспонировании актиничным излучением; ρ_1, ρ_2 — относительные концентрации этих материалов ($\rho_1+\rho_2=1$), $F[I(z,t)]$ — безразмерный коэффициент, описывающий нелинейные эффекты:

$$F(I) = \frac{1}{2} \left\{ \tanh \left(\frac{I - I_{th}}{\delta} \right) \right\} = \frac{1}{1 + \exp \left(-2 \frac{I - I_{th}}{\delta} \right)}$$

Из анализа уравнений следует, что наилучшее качество изображения достигается при следующих условиях:

$$\ln \left(\frac{\frac{1}{\rho_{1s}} + \gamma}{1 + \gamma} \right) = \alpha_2 C I_p F(I_p) T_p$$

$$\exp \left(2 \frac{I_p - I_{th}}{\delta} \right) \left(1 - \frac{2I_p}{\delta} \right) + 1 = 0,$$

где $\gamma = (\alpha_1 - \alpha_2) / \alpha_2$, I_p , T_p — интенсивность и длительность импульса при пороговой интенсивности I_{th} , δ размытие порога. Возможное усиление контраста может быть описано как $U = (\delta r_1 / \delta x) / b$ (при $r = \rho_{1s}$, $b = 1 / I_p (\delta I / \delta x)$). Это даёт зависимость усиления контраста от интенсивности освещения, показанную на рис. 53.

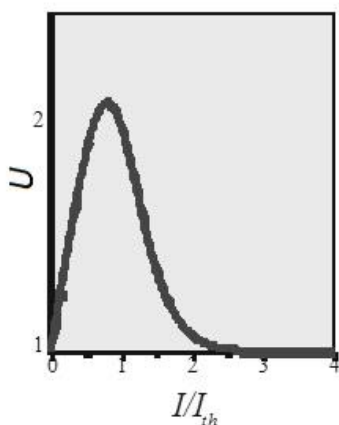


Рис. 53. Условие достижения максимального контраста передачи изображения, следующее из анализа процессов фотопотемнения ХСП.

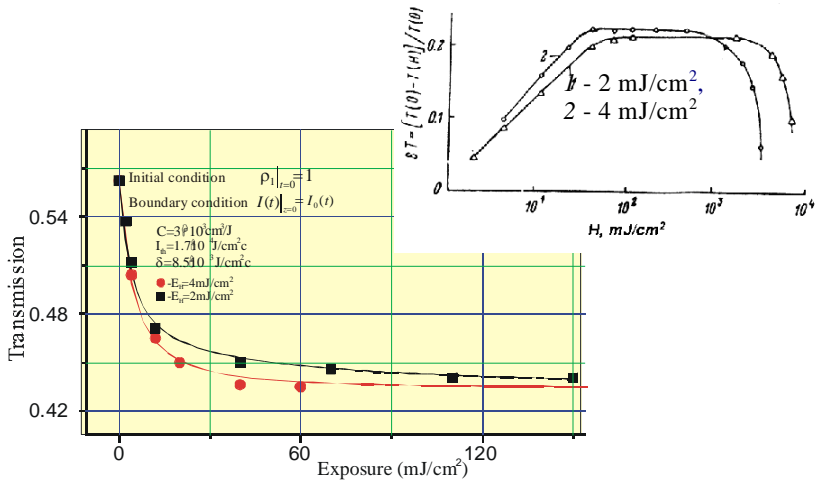


Рис. 54. Относительное фото-потемнение As_2S_3 (вверху справа), изменение пропускания в зависимости от дозы на начальном участке от «0» до 10^3 mJ/cm^2 , и следующие из него чувствительность C , порог I_{th} и размытие порога δ (внизу).

Таким образом, для интересующего нас диапазона интенсивностей освещения при облучении ЭУФ с длиной волны 13.5nm установлены основные характеристики ХСП резиста As_2S_3 (рис. 54): чувствительность C , а также порог H_{th} и его размытие δ , и условия получения наилучшей передачи контраста изображения. Для этого резиста определены параметры, аналогичные параметрам Дила, позволяющие аналитическое описание процесса формирования изображения [67].

17. Контрольно-измерительные системы

17.1. Мини-спектрометр

Для спектрального анализа излучения лазерной плазмы (источника излучения нанолитографа) разработан спектрометр на основе отражательной дифракционной решетки с позиционно-чувствительным детектором (ПЧД). Одно из условий при создании спектрометра заключалось в необходимости размещения его внутри вакуумной камеры (корпуса) нанолитографа, что накладывало существенные ограничения на размеры прибора. Порта-

тивный и простейший спектрометр для ЭНЛ спроектирован и изготовлен В. Беликом. Оптическая схема спектрометра представлена на рис. 55. Действующий образец прибора показан на рис. 56. Диспергирующим элементом в спектрометре служит тороидальная дифракционная решетка. Для компенсации астигматизма перед решеткой расположено тороидальное зеркало. Поскольку спектрометр предназначен для «точечного» источника излучения размером $200 - 300 \mu\text{m}$, он не имеет входной щели. Перед зеркалом расположена входная диафрагма, ограничивающая пучок излучения в пределах поверхности зеркала, а между зеркалом и решеткой, в фокусе зеркала, расположена промежуточная щель (входная для решетки). Решетка нарезная, с переменным шагом, что позволяет создать в пределах рабочего спектрального диапазона достаточно плоское фокальное поле. Это дает возможность располагать в фокальной плоскости ПЧД с плоским входным окном без существенной расфокусировки изображения во всем спектральном диапазоне. На решетку и зеркало нанесено золотое покрытие. В этом случае коэффициент отражения излучения с длиной волны 13 nm от решетки составляет $\sim 70\%$, а от зеркала $\sim 60\%$. Предел разрешения спектрального прибора, оцененный экспериментально, составляет $0,2 \text{ nm}$.

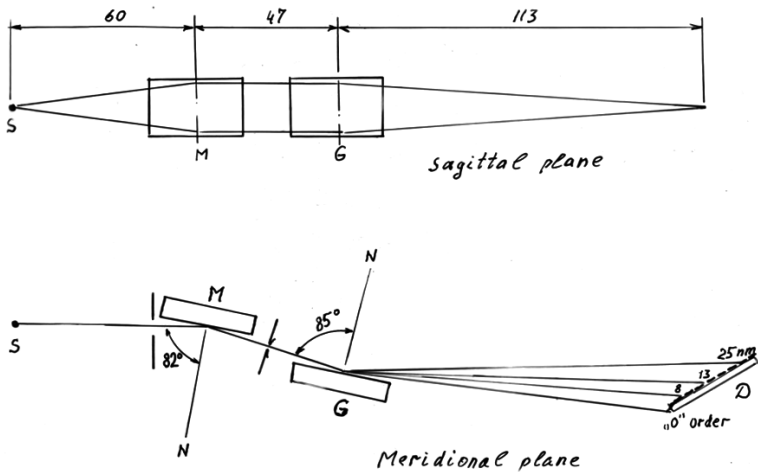


Рис. 55. M — отклоняющее зеркало, G — дифракционная решетка, D — детектор, S — источник излучения (точечный).

Основные параметры спектрометра: Спектральный диапазон $\lambda = 8 \div 25 \text{ nm}$. Обратная линейная дисперсия $\sim 1,3 \text{ nm/mm}$. Тороидальная дифракционная решетка: Шаг решетки (период) – переменный: $e_0 = 1/1200 \text{ mm}$, $e(y) = e_0(1 + \mu(y))$, где μ – числовой коэффициент, меридиональный радиус $R_m = 500 \text{ mm}$, сагиттальный радиус $R_s = 50 \text{ mm}$, угол падения излучения на решетку — 85° . Тороидальное зеркало: меридиональный радиус $R_m = 228 \text{ mm}$, сагиттальный радиус $R_s = 15.6 \text{ mm}$, угол падения излучения на зеркало — 82° , Расстояние от источника излучения до (вершины) зеркала – 60 mm . Размеры решетки и зеркала (одинаковые): ширина 30 mm , высота 20 mm . Габариты спектрометра – $245 \times 90 \times 60 \text{ mm}$.

В качестве ПЧД используется фотодиодная линейка ILX 554A фирмы SONY, содержащая 2048 пикселей размером $14 \mu\text{m}$ на $56 \mu\text{m}$ (высота). Длина чувствительной области линейки составляет 28 mm . На входном окне линейки смонтирована волоконная шайба, на поверхность которой нанесен люминофор р-терфенил, конвертирующий EUV излучение в видимое.

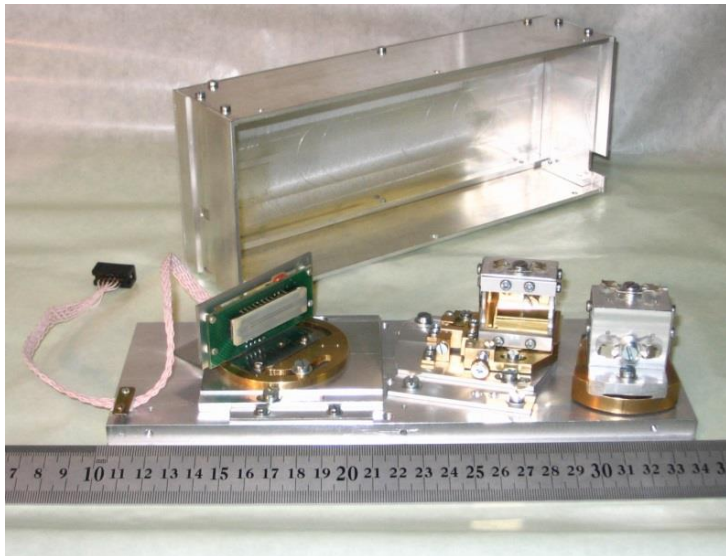


Рис. 56. Опытный образец спектрометра.

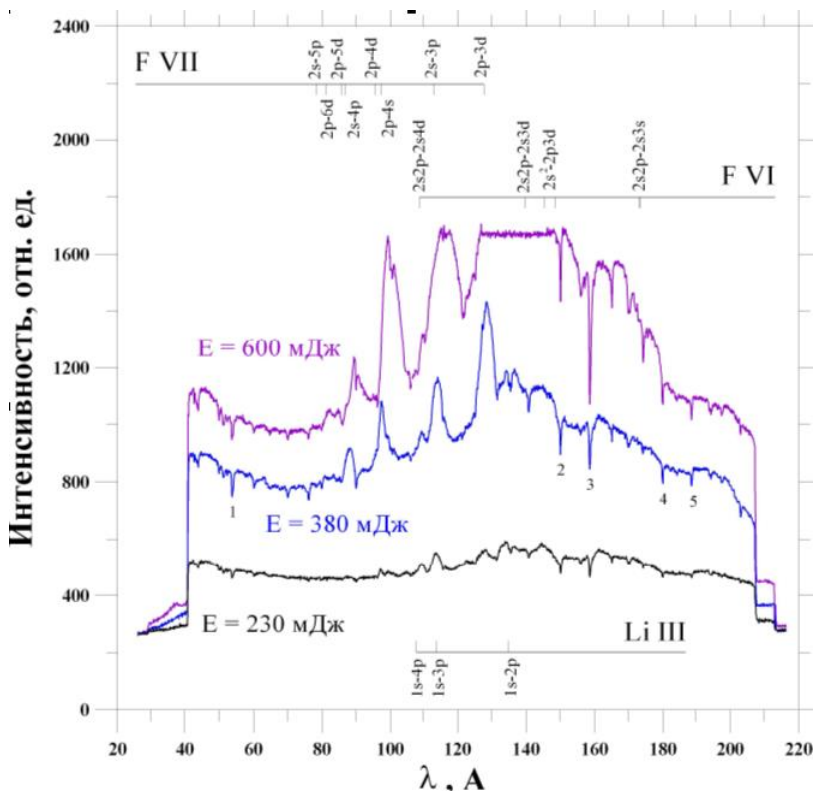


Рис. 57. Спектры LiF.

Спектрометр использовался для измерений спектров излучения лазерной плазмы (как источника излучения нанолитографа), инициированной на мишенях из LiF, Si, Sn, W, Xe. Возможности спектрометра и качество спектральных измерений хорошо видны на примере спектра излучения лазерной плазмы LiF мишени (рис. 57).

Здесь же представлена расшифровка спектров (скобочки F VI F VII (сверху), а также Li III (снизу), для различных интенсивностей возбуждения лазером ($E = 600, 380$ и 230 мJ). На спектре плазмы LiF, как и на спектрах других источников, виден ряд обращённых узких пиков. Спектры включают как квазинепрерывную компоненту (включая тормозное излучение подложки), так и линейчатый спектр, представленный яркими лини-

ями F VII, FVI, Li III, с амплитудой, зависящей от энергии лазерного луча.

17.2. Фильтр спектральной очистки

Создание оптических фильтров излучения на область спектра $(13.5 \pm 0.2) \text{ nm}$ является одной из обязательных составляющих современных проектов нанолитографии СБИС. Оптическая схема нанолитографа базируется на многослойных Mo-Si зеркалах, которые, формируя пучок излучения, одновременно являются диспергирующим элементом, выделяющим из широкодиапазонного спектра источника (обычно это лазерная плазма) длину волны 13.5 nm со спектральным разрешением $\lambda/\Delta\lambda = (25-20)$. Однако в длинноволновой области спектра такие зеркала отражают не селективно, как обычные зеркальные поверхности, и вот это паразитное для нанолитографии излучение ($\lambda > 13.5 \text{ nm}$) требуется подавлять оптическим фильтром. При этом фильтр должен иметь эффективное окно пропускания в области $\lambda = 13.5 \text{ nm}$.

Получение фильтра на указанную область спектра связано со значительными трудностями. Имеется лишь крайне ограниченное число химических элементов и их соединений, имеющих окно пропускания в данной области спектра. Это три металла — Zr, Nb, Mo; к ним можно добавить Si, Si₃N₄, SiC. Однако материалы на основе кремния прозрачны в видимой области спектра и могут быть использованы в качестве требуемых фильтров только в комбинации с приведенными выше тремя металлами. Толщина фильтров должна быть в пределах 80-200 nm, чтобы получить коэффициент пропускания фильтра $\approx (70-30)\%$ на длине волны 13.5 nm. Получить свободные пленки такой толщины требуемой площади (от нескольких mm^2 до десятков cm^2) и достаточной механической прочности — сложная физико-техническая задача.

В рамках проводимой в ФТИ работы по созданию экспериментального нанолитографа авторами разработана методика получения фильтров на область спектра 12-15 nm и измерены их коэффициенты пропускания.

Наши первые попытки получить свободные пленки из Zr, Nb, Mo методом магнетронного и лазерного испарения на органическую или солевую (водорастворимую) подложку с последующим

снятием пленки в растворителе и осаждением ее на поддерживающую сетку не привели к положительным результатам. При напылении в пленке образовывались внутренние напряжения, и после осаждения на сетку малейшие механические воздействия приводили к трещинам и последующему разрушению фильтра. В процессе дальнейших поисков подходящей методики мы остановились на следующем варианте получения свободных пленок-фильтров.

Метод основан на создании многослойной структуры из кремния и одного из металлов (Zr, Nb) с целью повышения прочности получаемой структуры, уменьшения внутренних напряжений. Основным требованием, с точки зрения оптики, для такой многослойной структуры должно быть условие, чтобы период структуры d (сумма толщин слоя Nb (или Zr) и слоя Si) существенно отличался от его значения при условии брэгговского отражения:

$$n\lambda = 2d \sin \theta,$$

где n — порядок спектра (в нашем случае $n = 1$), $\lambda = 13.5 \text{ nm}$, θ — угол между направлением падения излучения и поверхностью фильтра (в нашем случае нормального падения излучения на фильтр $\theta = 90^\circ$). Исходя из этого, период структуры многослойного фильтра излучения должен значительно отличаться от величины $\lambda/2$, т.е. от $\sim 6.7 \text{ nm}$.

Для напыления многослойной Nb/Si структуры фильтра использовалась установка магнетронного распыления BAS 450, включающая в себя два DC-магнетрона и два RF-магнетрона с размерами мишени $250 \times 125 \text{ mm}$. Распыление мишени из ниобия производилось на DC-магнетроне при подаваемой мощности 0.5 kW , а кремниевой мишени на RF-магнетроне при подаваемой мощности 1.5 kW . Распыление происходило в среде аргона при давлении в камере $(2 - 4) \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$. Толщина слоев многослойной структуры и ее общая толщина определялись временем прохождения подложки мимо мишени и количеством таких проходов. Такая технология получения многослойных структур достаточно изучена при создании зеркал в рентгеновской оптике. Они представляют собой чередующиеся слои аморфного кремния и поликристаллического ниобия, внутренние напряжения в кото-

рых зависят как от толщины отдельных слоев, так и от соотношения толщины ниобия и периода структуры. При выборе толщин слоев мы исходили из необходимости минимизировать внутренние напряжения для получения прочной пленки. Обычно такие пленки приклеивают к поддерживающей сетке после отделения от подложки. Мы использовали другую технологию получения свободных пленок. На подложке GaAs с нанесенной многослойной структурой методом фотолитографии формировался рисунок шестигранной сетки, обрамленной широкой шестигранной рамкой. Далее напылялось золото с адгезионным подслоем хрома. Затем методом гальванического осаждения проводилось усиление сетки до толщины 3 мкм и толщины рамки до 30 мкм. Полученная структура приклеивалась к предметному стеклу воском и методом химического травления в аммиачном травителе удалялась подложка GaAs. Отделение готового фильтра от стекла производилось растворением воска в CCl_4 .

Были получены образцы фильтров площадью от 9 mm^2 до $\sim 1 cm^2$ [51]. Общая толщина фильтров варьировалась от 120 до 240 nm, число слоев — от 15 до 30. Механическая прочность фильтров оказалась значительно лучше, чем для моно-слойных фильтров, они выдерживали все манипуляции при их исследовании и при использовании их в измерениях на экспериментальном нанолитографе.

Спектральная зависимость коэффициента пропускания фильтров исследовалась на рентгеновском спектрометре-монокроматоре РСМ-500 с рабочей областью спектра 1-55 nm. Измерения проводились с использованием тормозного спектра вольфрамового анода со спектральным разрешением 0.1 nm.

На рис. 58 в качестве примера приведена фотография многослойного Si + Nb фильтра и график (рис. 59) спектральной зависимости его коэффициента пропускания.

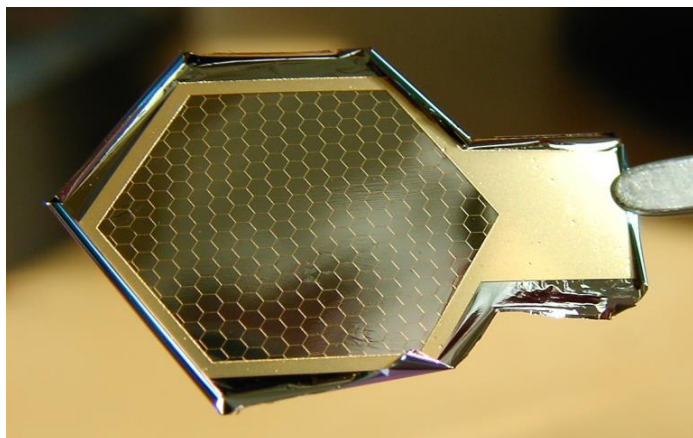


Рис. 58. Образец многослойного Nb-Si оптического фильтра размером 11 мм.

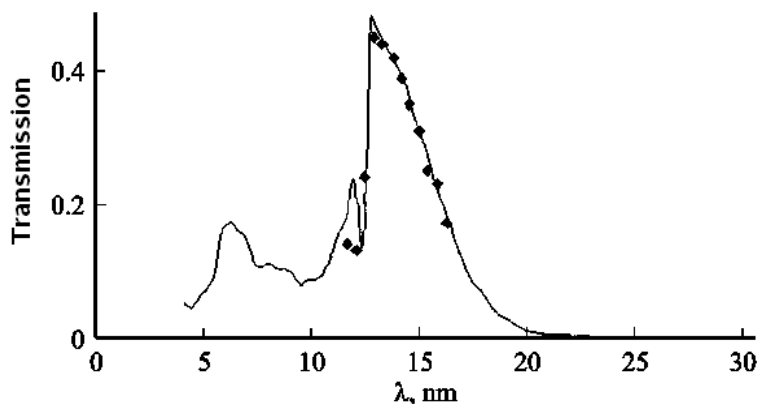


Рис. 59. Пропускание многослойного (20 пар) Si—Nb оптического фильтра с толщиной одного слоя каждого элемента ~ 6 нм. Сплошная кривая — расчетное значение пропускания данного фильтра.

Проведенные исследования дали обнадеживающие результаты по получению качественных свободных оптических пленок-фильтров на область спектра 12- 15 nm с требуемыми оптическими характеристиками (рис. 59). На фильтр спектральной очистки получен патент РФ: Spectral cleaning filter and its manufacturing method. Invention. №.2510641 From 19/04/2012 Seisyan R. P., Il'inskaya N. D., Zadiranov Y. M.

17.3. Интегральный датчик излучения

В процессе работы над проектом в ФТИ был создан интегральный датчик ультракоротковолнового излучения. Он представляет собой сверхмелкий кремниевый ФД, изготовленный по специальной технологии, исключающей коротковолновый спад чувствительности. В результате этот ФД оказывается чувствительным вплоть до ЭУФ и МР, и может рассматриваться как источник сведений об абсолютной дозе ультракоротковолнового излучения (авторы В. Забродский и др.).

18. Системы фокусировки и совмещения

Оригинальные системы фокусировки и сопряжения топологических слоёв ИС были в рамках проекта ФТИ разработаны В. Хавинсоном. Для фокусировки и сопряжения топологических слоёв разработана специальная дифракционная система, базирующаяся на оригинальной конструкции и технологии масок и подложки, предназначенных для нанесения рабочих слоёв СБИС. Площадь будущей СБИС обрамляется дифракционными решётками, как это показано на Рис. 60. Здесь 9 площадок, предназначенных для нанесения (модификации) одного из топологических слоёв (они на рисунке пустые, и заполняются при подготовке к печати конкретной ИС). При последовательной модификации микро-рисунка, заключающейся в селективном диффузионном внедрении необходимой примеси, или наращивании нового эпитаксиального слоя, при должном их сопряжении, они образуют 3D структуру будущего пассивного или активного элемента ИС, а также контактов и соединений между ними. Эта процедура производится известным и принятым в планарной технологии методом создания стойкого защитного слоя SiO_2 с последующим нанесением фоторезиста, его проявлением и протравливанием в SiO_2 локальных окон заданной конфигурации, например, при помощи фото-маски. В нашем случае, это брэгговское зеркало, покрытое тонким, поглощающим ЭУФ излучение слоем, выгравированным по заданному рисунку. Участки с удалённым поглощающим слоем отражают ЭУФ излучение и создают негативное,

или позитивное изображение топологического слоя – в зависимости от свойств ЭУФ резиста.

- An original **technology for photomask production** is developed in the Ioffe Institute for the EN. It includes originally invented mask pattern and construction, and technologies for deposition both reflecting and absorbing structures on the mask surface. The patterns can be formed either interference technique or an ArF-laser projection system.

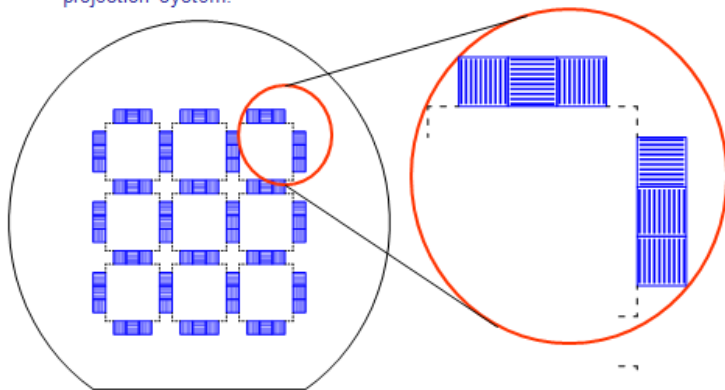


Рис. 60. Конструкция маски-ретикла с обрамлением информационных полей (9 белых квадратов) системой дифракционных решёток с горизонтальными и вертикальными штрихами. Эти 9 полей заполняются последовательностями рисунков, формирующих активные (пассивные) элементы ИС.

Аналогичная система дифракционных решёток в увеличенном k -раз виде наносится на маску. (k – коэффициент редукиции оптической системы). Маска предназначена для проекции 9-ти различных слоёв, вместе образующих структуру одного из элементов ИС.

При проектировании маски через оптическую систему на подложку возникают две дифракционные картины, которые могут быть совмещены поворотом и смещением по ХУ.

Принцип действия системы иллюстрируется на рис. 61.

Поворот и смещение производятся до исчезновения сигнала рассогласования, регистрируемого датчиком интегрального светового сигнала от лазера, отражённого дифракционными системами маски и подложки.

Scheme of the focusing system realization

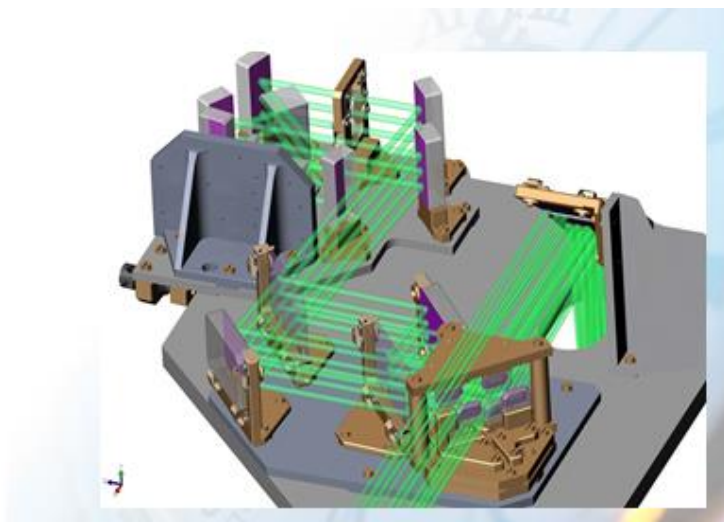
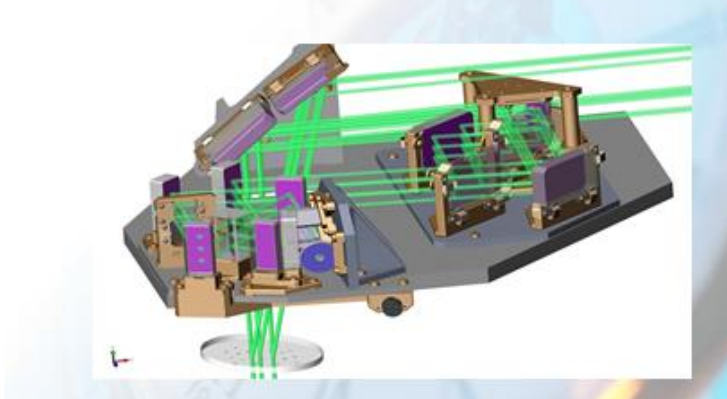


Рис. 63. Ход лучей лазера, управляющего системами фокусировки и сопряжения топологических слоёв.

Фокусировка маски-ретикула на образец со слоем фоторезиста (рис. 62) происходит в результате настройки по оси Z при движении позиционера по нормали от плоскости XY. Признаком достижения фокуса служит отсутствие (исчезновение) сигнала расфокусирования.

На рис. 63 схематически изображён ход лучей лазера, управляющего системами фокусировки и сопряжения.

Свет после дифракции на системах дифракционных решёток с горизонтальными и вертикальными штрихами на маске и образце, регистрируется системой ФД на выходе, вырабатывающих управляющий сигнал для соответствующих нано-позиционеров.

19. Нанопозиционеры образца и маски

На основе проведённых исследований была создана система позиционирования образца и маски для нанолитографа, разрабатываемого в лаборатории функциональной и физической микроэлектроники ФТИ. Фотографии шестикоординатного позиционера образца и трёхкоординатного позиционера маски приведены на рис. 64.

Позиционеры образца и маски относятся к основным узлам нанолитографа, от которых зависят основные его технические характеристики: структура, точность воспроизведения элементов ИС и меж-соединений, а также общая производительность установки. Наиболее жёсткие задачи происходят от вида и конструкции активных элементов ИС. Для их воспроизведения необходима комбинация полос и зазоров нанометровой ширины, притом их взаимное расположение задаётся с субнанометровой точностью.

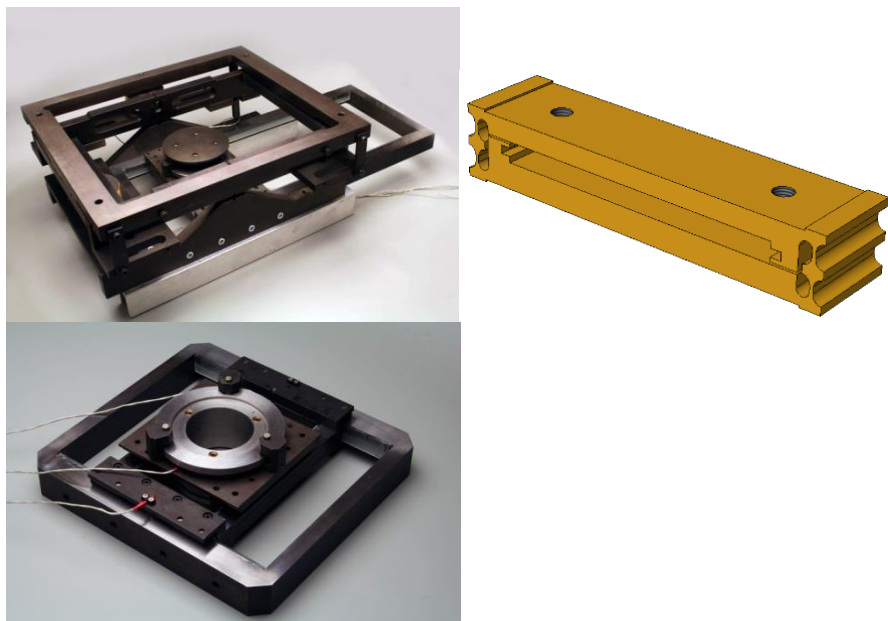


Рис. 64. Фотографии шестикоординатного позиционера образца и трёхкоординатного позиционера маски и эскиз пьезодвижителя параллелограммного типа – вверху справа.

Известный способ осуществления механических перемещений в субмикронном диапазоне с высочайшей точностью – это использование пьезоэффекта. Они эффективно используются в туннельной и атомно-силовой микроскопии, где разрешающая способность достигает долей нанометра. Однако, диапазон таких перемещений ограничен, и не может превышать 10^{-3} длины пьезоэлемента. Но активные элементы располагаются с произвольными координатами по всей поверхности полупроводниковой пластины.

Таким образом, возникает задача, создавая субмикронный рисунок в одном, двух, и более слоях структуры, точно размещать их по всей площади подложки.

Разрабатывая задание на конструкцию ЭНЛ, мы исходили из перспективности многослойных гетеро-структур, выращиваемых газо-фазной, или молекулярно-пучковой эпитаксией. Максимальный размер подложек для гетеро-эпитаксии в настоящее время

ограничен. Отсюда и следует принятый в проекте максимальный размер подложки $d_{\max} = 150 \text{ mm}$. Заметим, что принципиальных ограничений этого размера не имеется, он может быть при необходимости увеличен.

В проекте решалась задача создания позиционеров, сочетающих относительно большой диапазон перемещения (до сотен μm) и разрешающую способность, характерную для классических пьезопозиционеров (порядка $1,0 \text{ nm}$, и лучше).

Основные требования к позиционерам можно сформулировать как обеспечение высокой разрешающей способности перемещения при высокой точности определения положения и большом диапазоне перемещения, превышающем показатель разрешающей способности, по крайней мере, на 3 – 4 порядка. При этом необходимы высокая стабильность положения в условиях внешних воздействий, отсутствие смазки скользящих элементов, высокая нагрузочная способность и стойкость к ударным нагрузкам, а также вакуумная совместимость.

Пьезо-позиционер, отвечающий этому перечню требований, был создан В.А. Юкишем в результате продолжения исследований, выполненных им в работе по магнитооптике узко-щелевых полупроводников — в процессе усовершенствования пьезомодуляционной методики оптико-спектроскопических измерений. Им было осуществлено инновационное решение, объединяющее пьезодвигатель, плавно перемещающий объект на сотни μm и нанопозиционер, осуществляющий прецизионную субнанометровую подстройку образца при фиксированной координате. Позиционер В. А. Юкиша оригинален и аналогов не имеет [49].

На основе проведённых исследований была создана система позиционирования образца и маски для нанолитографа, который изготавливался в лаборатории ФФМ ФТИ. Подчеркнём, что это не имеющее аналогов инновационное решение. Отсутствие смазки скользящих элементов делает устройство не только более точным и стабильным, но и вакуум-совместимым. Разработаны устройства, способные превратить микронные перемещения в последовательные шаги. Они показали возможность перемещения больших масс (более 10 kg) с высокой разрешающей способностью) за счёт многократного повторения цикла расширения-

сжатия пьезоэлементов, синхронизированного с поочерёдной фиксацией его концов.

Создание фиксирующего усилия пружинным прижимом в сочетании с инерционным принципом перемещения, отсутствие смазки, замкнутых объёмов и материалов с высоким давлением паров позволяют таким устройствам работать в высоком вакууме.

Сначала пьезоэлемент, резко сокращаясь, вызывает проскальзывание слайдера в фиксаторах без смещения каретки (из-за её инерции). Затем, медленно возвращаясь к исходному размеру, пьезоэлемент перемещает каретку в новое положение. Сам слайдер, при соответствующей форме, становится направляющим для каретки. Притом в режиме медленной подачи напряжения на пьезоэлемент происходит обратимое перемещение каретки на малые расстояния (не более амплитуды смещения пьезокерамики). Это самый точный, плавный режим работы устройства, применение которого требует лишь переключения режима электронного блока управления.

Таким образом, питание пьезодвижителей в процессе юстировки в зависимости от требуемой точности и направления перемещения происходит тремя различными способами. Это (1) плавная подача напряжения на пьезоэлемент (напряжению от 0 до 600 V соответствует смещению каретки в диапазоне от 0 до 5 μ) и удержание его на заданном уровне. Такое управление устройством обеспечивает реальную разрешающую способность не хуже 1.0 nm в диапазоне 5 μ m. Далее (2) относительно плавное (за 300 – 900 μ s) изменение напряжения, недостаточно быстрое для проскальзывания. Оно вызывает смещение каретки. Затем, (3) резкое изменение напряжения за время около 10 – 20 μ s, когда пьезоэлемент столь быстро меняет размеры, что инертная каретка не успевает сдвинуться, и происходит проскальзывание (смещение движителей).

Объединяя режимы (2) и (3), можно осуществить шаговое перемещение в ту или иную сторону. Фактически такое перемещение происходит при подаче пилообразных импульсов амплитудой от 100 до 650 V и частотой от одиночных импульсов до 1 kHz.

Исследование шаговых пьезодвижителей параллелограммного типа на шарнирах с внутренним трением показало, что они

обеспечивают безлюфтовое движение предметного стола (каретки) в пределах одного шага. Такие пьезодвигатели аналогов не имеют и являются изобретением В. Юкиша. Им изготовлены много вариантов таких устройств и проведены их испытания с различными парами материалов для направляющих, проведены ресурсные испытания, рассчитаны оптимальные геометрические параметры взаимодействующих поверхностей.

Использование пьезоэффекта – известный и общепризнанный способ осуществления механических перемещений в субмикронном диапазоне. Наиболее яркий пример этого – применение пьезосканеров в туннельной и атомно-силовой микроскопии, где разрешающая способность достигает долей нанометра. Но диапазон таких перемещений ограничен и не может превышать 10^{-3} длины пьезоэлемента. При создании экспериментального нанолитографа решалась задача создания позиционеров, сочетающих большой диапазон перемещения (до сотен мкм) и разрешающую способность, характерную для классических пьезопозиционеров (до 10 нм и выше).

Исследования были направлены на разработку устройств, способных превратить микронные перемещения в последовательные шаги. Они показали возможность перемещения больших масс (более 10 кг) с высокой разрешающей способностью (лучше 20 нм) за счёт многократного повторения цикла расширения-сжатия пьезоэлементов, синхронизированного с поочерёдной фиксацией его концов. Исследовались различные способы фиксации с переменным усилием фиксирования (электромагнитный, электростатический, пьезоэлектрический) и с постоянным – создание фиксирующего усилия пружинным прижимом в сочетании с инерционным принципом перемещения.

20. Вибро- и пылезащита

20.1. Индивидуальная чистая комната



Рис. 65. Вид на «чистую комнату» для ЭНЛ с открытой входной дверью. Справа сверху блоки фильтров воздуха, ещё правее видны мощные вентиляционные трубы, подводящие воздух

- Конструкция индивидуальной «чистой комнаты» для ЭНЛ
- The EN is installed inside a special dustless room and is planned to be served with a single operator. At the acceptance testing, the room had confirmed its normal performance – less than 2-3 particles with size of 0.5μ and larger in 1 liter of the air (class 100). In turn, the room is located inside a conditioned-air experimental hall (class 10000).

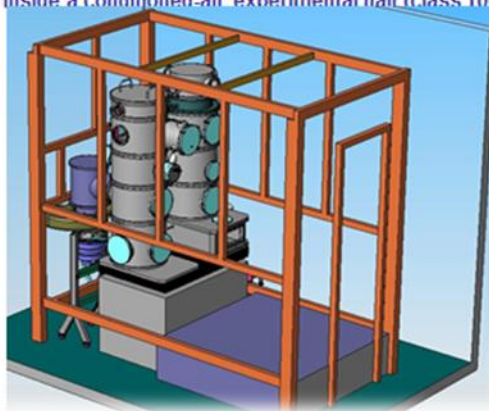


Рис. 66. Конструкция «чистой комнаты».

«Чистая» комната снабжена мощной вентиляционной системой, обеспечивающей многократный обмен воздуха в помещении, очищаемого фильтрами грубой и тонкой очистки. В результате за промежуток времени порядка нескольких минут устанавливается уровень запылённости на уровне 2-3 частиц размером не более $0.5 \mu\text{m}$ в литре воздуха, что соответствует классу 100.

20.2. Система виброзащиты и горизонтирования

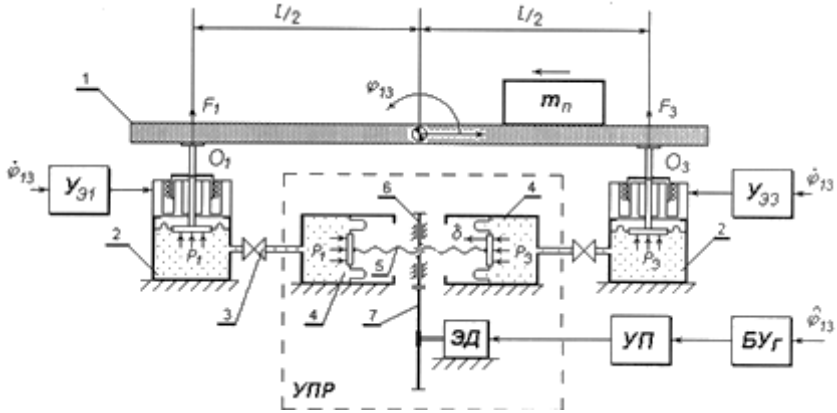
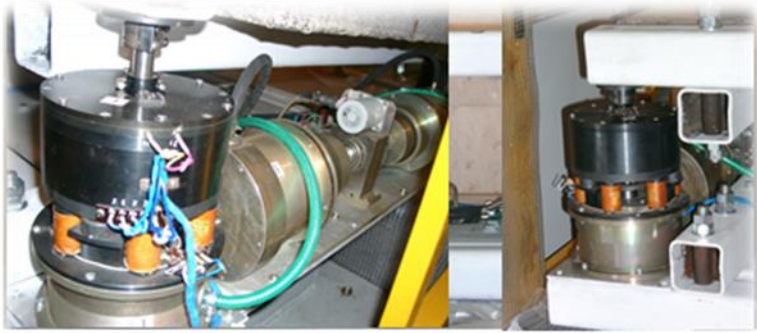


Рис. 67. Устройство виброзащитного стола с электромеханическими модулями (O1, O3), осуществляющими функции автоматического выстраивания рабочей плоскости стола (1) по горизонту («горизонтирования»), а также пассивной и активной виброзащиты.

Активная виброзащита осуществляется регистрацией показаний акселерометра и выработкой эквивалентного противодвижения, осуществляемого при помощи магнитного поля соленоида. Активная виброзащита позволяет нейтрализовать инфранизкие частоты колебаний стола и обеспечивает экспонирование при относительно длинных выдержках. Пассивная виброзащита исключает высокочастотные вибрации стола за счёт упругой реакции поршня.



- The EN modules are installed on massive granite plate of vibroprotective table. The table has been invented in the Baltic University (St. Petersburg) and later finished off in conformity with the EN needs. The table has high performance characteristics and provides both passive and active vibroprotection including infralow frequencies

Рис. 68. Виброзащитный стол под ЭНЛ с массивной гранитной плитой.

Стол обеспечивает пассивную и активную виброзащиту вплоть до инфранизких частот, а также горизонтирование ЭНЛ. ЭНЛ устанавливается на массивной гранитной плите. На рис. 68 справа — модуль активной виброзащиты, отрабатывающий противо-движение, в соответствии с сигналом акселерометра. Слева в глубине — система горизонтирования.

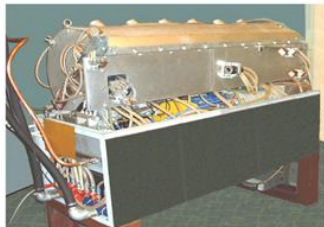
21. Перспективное решение источника ЭУФ-излучения для нано-литографии, следующее из Проекта нанолитографии ФТИ им. А. Ф. Иоффе

Необходимая для экспозиции доза излучения складывается из энергии в импульсе и частоты следования импульсов (в случае линейного резиста). Для нелинейного резиста это справедливо только после превышения порога нелинейности. Известные и широко применяемые в нанолитографии СА-резисты относятся к линейным, тогда как применявшиеся в проекте нанолитографии ХСП-резисты обладают существенной нелинейностью, и для их экспонирования необходимо преодолевать порог в каждом импульсе. Эта величина, рассчитанная в [42] для одного из составов, составляет 0.34 mJ/cm^2 .

В случае линейного СА-резиста 200W ЭУФ потока в промежуточном фокусе достигаются использованием щелевого CO₂-лазера (усилителя) при частоте следования импульсов порядка 40 kHz и энергии в 0.1 J (рис. 69).

Slab-shaped 4000 W CO₂-laser with RF excitation.

2500W CO₂-laser has been designed for integration into laser based processing systems for cutting, drilling, welding or heat treating. The diffusion cooled RF excited Slab-shaped construction allows for a compact, rugged Design, which produces a high quality, round, symmetrical beam. This results in faster cutting speeds with improved edge quality and a minimum heat affected zone. Complex tests of pilot model of the laser were today successfully completed.



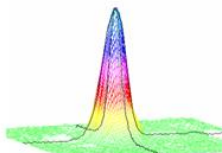
The laser S-2500 on test stand of ILP

Essential features:

- Excitation frequency – 40MHz.
- Laser Head is integrated with Power Supply Unit.
- The divergence of laser radiation is near diffraction limit.

Specification

Average output power:	4000 W
Power range:	200- 4000 W
Beam quality:	$M^2 \leq 1.2$
Beam diameter:	25mm.
Wavelength:	10,6 μ m
Output power stability:	$\pm 3\%$ (24 hours)
Polarization:	Linear, 45° to base
Pulsed mode	
Frequency:	10 Hz – 10 kHz
Duty cycle:	0–100%
Dimensions (L×W×H):	2070×800×1350mm
Total weight:	1500kg



Far-field pattern of the output radiation.

Research Institute of Laser Physics, St.Petersburg, Russia.
Phone: +7 812 328 5734, Fax: +7 812 328 5891, E-Mail: rdslax@newmail.ru
www.slablaser.ru

Рис. 69. Щелевой радиочастотный CO₂ лазер.

Для приемлемой стабильности излучения плазмы в ДИБС режиме её возбуждения можно перейти к струнному источнику олова, что в дифракционном пределе (пятно возбуждения < 20 μ) потребует скорости перемотки струны равной или более 2 см/с. Такой подход перспективен для обеспечения массового производства ИС, СБИС и УБИС.

Для крупномасштабного производства ИС оптимальна двухимпульсная биспектральная система инициации и возбуждения лазерной плазмы. В процессе работы над проектом нами разработана лазерная система с ВКР (вынужденное комбинационное рассеяние) преобразованием частоты и оптической линией задержки,

решающая задачу создания оптимального источника ЭУФ радиации на оловянной мишени. Идею такой лазерной системы иллюстрирует рис. 70.

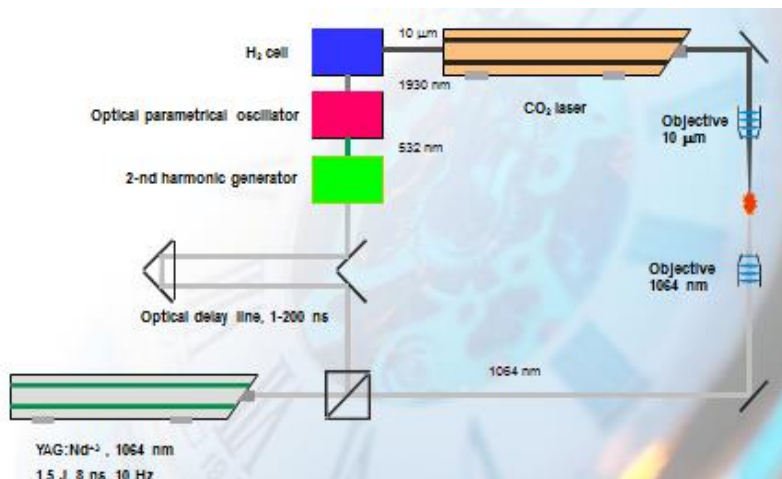


Рис. 70. Первоначальный дизайн лазерной системы, обеспечивающей двух-импульсную, биспектральную (1,06 μm 10,6 μm инициацию и возбуждение плазмы).

Здесь импульс твердотельного лазера YAG:Nd³⁺ разделяется на две части. Первая часть через ИК объектив фокусируется на мишени. Вторая, пройдя оптическую линию задержки, генератор 2-й гармоники, затем, оптический параметрический генератор на длине волны 1930 nm, поступает в кювету со сжатым (150 atm) водородом- в смеси с другими инертными газами — для ВКР преобразования в ~10 μm, и, после сжатия импульса до 100 ps, инициирует силовой импульс CO₂ лазера на 10,6 μm. Последний — через ИК объектив направляется в ту же точку мишени, что и более коротковолновый импульс.

Экспериментальное исследование системы, показанной на рис. 70, показало необходимость её существенного усложнения для обеспечения устойчивой работы (рис. 71) [40].

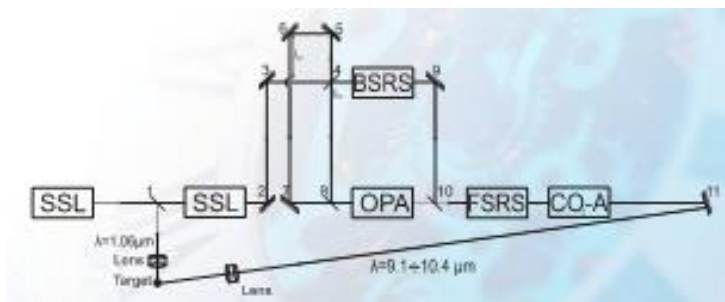
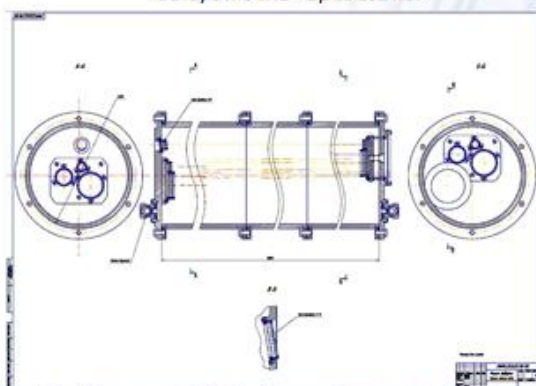


Рис. 71. Окончательный дизайн лазерной системы, обеспечивающей двух-импульсную, биспектральную (1,06 мкм 10,6 мкм инициацию и возбуждение плазмы).

Функция ВКР преобразования в этой системе осуществляется в сжатом водороде вместе с другими инертными газами (150 atm), помещенном в трубу из нержавеющей стали длиной 6 м и диаметром 200 мм, на двух фланцах которой размещены системы зеркал и вентили для подачи сжатого газа (рис. 72).

The SCS 1.90...1.96 μm => 9.1...10.6 μm conversion in multipass cavity and simultaneously delay time line – up to 200 ns.



Multipass cavity for laser beam conversion

The cavity is filled up by a mixture of hydrogen, nitrogen, helium. Maximum mixture pressure is of 150 atm. There are two sets of different mirrors at the top and at the bottom of cavity (total length 6000 mm).

Рис. 72. Труба из нержавеющей стали длиной 6 м и диаметром 200 мм.

ВКР преобразование и оптическая задержка до 200 ns, были осуществлены в стальной кювете длиной 6 м, снабжённой системой настраиваемых зеркал, которые обеспечивали полную длину оптического пути задержки до 200 ns. Система с преобразованием в сжатом водороде с необходимой задержкой между силовым и инициирующим импульсами была испытана с CO₂ усилителем типа «Фиалка» в схеме с многократным прохождением резонатора. Однако, продолжения она не получила как ввиду громоздкости «Фиалки», так и ввиду не востребованности массового производства УБИС в России.

Если же говорить о широкомасштабном производстве микропроцессоров за рубежом, то требования к источнику ЭУФ радиации здесь выглядят как на рис. 73, и удовлетворить их оптимально можно было бы при помощи ДИБС схемы, описанной выше, и изготовления щелевого радиочастотного лазера с резонансной частотой 80-100 kHz.

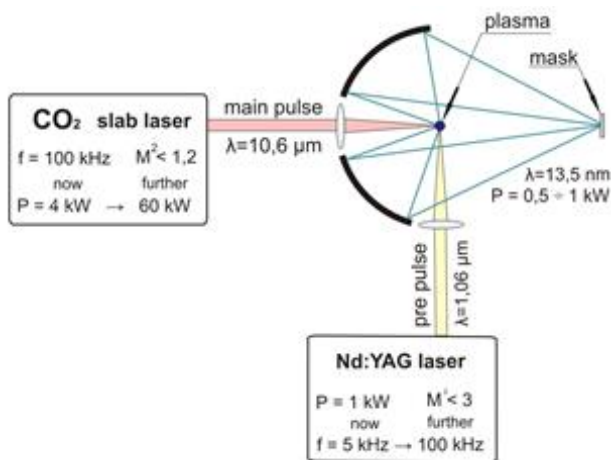


Рис. 73. Современные требования к промышленной лазерной системе для массового выпуска микропроцессоров.

Наиболее приближенная к ним система разрабатывается фирмой Сумег (США) [44], именно на неё ориентируется в настоящее время подготовка производства ЭУФ УБИС на ASML (Голландия). При этом, исходя из результатов проекта №3857, мы считали бы вполне перспективным использование в ка-

честве лазерных усилителей, рассмотренных нами в процессе работы по проекту ЭНЛ ФТИ щелевых лазеров с радиочастотным возбуждением, а также струнной системы подачи олова в качестве материала излучающей плазмы. Для борьбы с загрязнениями оптической системы и отражательных масок можно было бы предложить замкнутый магнитный контур с использованием ВТСП-кабеля, как предлагалось патентом 94003 от 27.01.2009. Автор Р. П. Сейсян.

В числе основных результатов проекта ФТИ можно назвать, помимо создания уникального 4М объектива, ещё и разработку технологии создания сверх гладких оптических поверхностей зеркал со среднеквадратичной шероховатостью в пределах 0.2 – 0.5 nm.

Что же касается мелкосерийного производства, рассчитанного на пластины Si, или GaAs с гетеропереходами, которые доступны диаметром не более 150 mm, здесь возможно как применение описываемой системы инициации и возбуждения оловянной плазмы, так и упрощённой ДИБС системы для работы со сверхзвуковой струёй ксенона, преимущество которой состоит в безопасности экспонирования и пуско-наладочных работ для оптической системы и маски. При этом предпочтителен переход к несколько более коротковолновой линии излучения Хе на длине волны 10.8 nm, хотя это потребует перехода всей оптики на соответствующие брэгговские покрытия, например, Ве-Мо, где Ве весьма непопулярен из-за своей токсичности. Но в этом случае, особенно при двух-импульсном биспектральном возбуждении и инициации плазмы можно рассчитывать на существенное увеличение СЕ, и КПД источника. Изображающую оптику можно построить на исследованном 4М зеркальном объективе, обеспечивающем оптическое разрешение 7 nm.

22. Пути дальнейшего повышения разрешающей способности ЭУФ нанолитографа.

В связи с волновым характером процессов в ЭУФ и МР здесь возможны все те приёмы, которые уже были использованы в оптическом диапазоне [10]. В числе таких приёмов (1) коррекция оптической близости, (2) иммерсия, введение искусственного фазового сдвига (3), двойная экспозиция и двойное «паттернирование» (4).

Коррекция оптической близости не вызывает затруднений, она требует некоторого изменения конфигурации элементов ИС, предупреждающего возможные искажения микро-рисунка при приближении к пределу разрешения оптической системы. Применение иммерсии в этом диапазоне сомнительно, так как здесь отсутствуют прозрачные материалы. Искусственный фазовый сдвиг возможен, но требует соблюдения определённых условий в связи с брэгговским характером многослойных структур, этот вопрос был рассмотрен в [42], и были выработаны некоторые предложения. Естественно, повышение разрешающей способности возможно при переходе на меньшие длины волн, что потребует соответствующих источников излучения и использования высоко-разрешающего объектива.

23. Заключение

Мы привели аналитический обзор ЭУФ и МР нанолитографии, опирающийся, в основном, на собственные результаты, полученные в ходе выполнения Проекта ФТИ по нанолитографии в ЭУФ и МР диапазонах. Выполняя Проект, мы следовали, главным образом, концепции Нанолитографа для научно-технического применения.

Полученные в ходе работы по Проекту данные свидетельствуют о возможности реализации при помощи существующего нанолитографа ФТИ (при окончательном вводе в эксплуатацию) экспериментального производства нано-структур для исследования перспективной элементной базы микроэлектроники. Нанолитограф ФТИ может быть применен также для мелкосерийного производства УБИС с проектной нормой на уровне единиц нанометров.

В связи с тем, что конструктивные и технологические элементы разработанной нами установки и установки для промышленного производства вполне аналогичны, мы позволили себе высказать мнение и о возможной оптимальной структуре нанолитографа для крупномасштабного производства. Этому способствовало то обстоятельство, что в процессе выполнения Проекта нам удалось создать оригинальную систему двух-импульсного биспектрального лазерного возбуждения и инициации плазмы в

источнике экстремально-ультрафиолетового излучения для нанолитографии, оптимальную для получения ЭУФ и МР радиации. Эта система и рассмотренные СО₂ лазерные источники вполне перспективны и для крупномасштабного производства.

В заключении считаю своим приятным долгом высказать благодарность А. Е. Портной за помощь в оформлении работы, М. Э. Сасину, подготовившему существенную часть рисунков, а также моей жене Татьяне Сейсян за долготерпение и неоценимую помощь в окончательном оформлении этого обзора.

Список литературы

1. S. M. Sze. VLSI technology Overviews and Trends. In: Proc. of the 14-th Conf. on Solid State Devices, Tokyo, 1982; Jap. J. of Appl. Phys., V.22 (1983) Suppl.22-1, pp.3-10.
2. Р. П. Сейсян. Основы микроэлектроники. Материалы IV Зимней школы ФТИ. Т.3. Л.: ФТИ, 1971. С.417-4 37; Техника и технология информации. Материалы VII Зимней школы по физике полупроводников. ФТИ. Л.: 1975. С.200-231.
3. В. В. Налимов. Наукометрия. М.: Наука.1969.
4. Ф. Энгельс. «Наброски к развитию натурфилософии» 1886.
5. Р. П. Сейсян. Принципы микроэлектроники. Ч.1. Санкт-Петербург: ЛГТУ.1991. С.110.
6. К. А. Валиев, А. В. Раков. Физические основы субмикронной литографии в микроэлектронике. Москва, «Радио и связь», 1984.
7. Р. П. Сейсян. Скрытый кризис микроэлектроники на пороге 21-го века. В сб. ЛГУ, (2002).
8. Р. П. Сейсян. Прикладная физика. Микроэлектроника, ч.2, 2002, СПбГПУ. 80 стр.
9. Wallmark J. T. Statistical model for Determining the Minimum Size in Integrated Circuits, IEEE Trans, Electronic Devices, ED-26, # 2, 135(1979).
10. Р. П. Сейсян. Нанолитография в микроэлектронике. ЖТФ, 2011, т.81, №8, с.1-14.
11. Ye. G. Varash, R. P. Seisyan. Practical limits of Excimer Laser Nanolithography. International conference on Laser Optics, SPb, 2014.
12. Р.П.Сейсян. Формирование наноизображений волновыми методами// Сб. тезисов Международного форума по нанотехнологиям «RUSNANOTECH 08», 2008, 3-5.12, Москва, с.278.
13. EUV Status rev. Sent by Ye.G. Varash. 03.01.2018.
14. У.Моро. Микролитография. Ч.1 и 2. Москва, Мир, 1993.
15. Алан Мишетт. Alan Mishette, Optical systems for soft X rays. В русском переводе: А. Мишетт. Оптика мягкого рентгеновского излучения М. «Мир» 1989 с. 351.
- 16.<http://www.sandia.gov/news-center/publications/sandia-technology/2003/st2003v5no3.pdf>

17. Заявка на проект МНТЦ 0991 <http://www.wmw-magazine.ru/euv-lithography//0991/1996/r.seisyan/euv-proposal>
18. М. М. Барышева, А. Е. Пестов, Н. Н. Салашенко, М. Н. Торопов, Н.И. Чхало. Прецизионная изображающая многослойная оптика для МР и ЭУФ, УФН. 182, №7, стр.727- 747 (2012).
19. J. D. Meindl. Low Power Microelectronics: Retrospect and Prospect. IEEE Proc. V.83, #4, 619-635 (1995).
20. A. Robinson. Science, Vol. 223, 267-268.1984.
21. Альберт Ю. Будущее микропроцессора. On Line, 1997, В7, С.3-5.
22. G. Bourianoff, Intel, 2004.
23. Р.П.Сейсян, М.Л.Выдревич. Что такое ДИМ? Электронная промышленность. В. 1(7), С.28-32, 1972.
24. С. Марков, Ю. Э. Китаев ДИМ или НИМ. ОВММ №4, (2002).
25. Л. Розенблюм, журнал «Север» «Кто же изобрел WebTV, или за державу обидно!» Профессор Леонид Розенблюм, Кембридж (Massachusetts), USA. Север, №5-6, (2006), с. 171-174.
26. S. V. Garonov et al. Opt. commun 38, 7-9, (1981).
27. E. Spiller et al. APL 37, 1048 (1980).
28. С. Бобашев, Н. Салашенко, Л. Шмаёнок и др. S. V. Bobashev, I. G. Zabrodin, Yu. Ya. Platonov, N. N. Salashchenko, D. M. Simanovskii, and L. A. Shmaenok."Spectral characteristics of multilayer soft-X-ray mirrors measurement using the radiation of a recombining beryllium plasma " //Techn. Phys Lett. (USSR), 1986, v.12, n. 21, 1339-1343.
29. Р.П. Сейсян, Л. Жданов Проект ВУФ контактного литографа (1988- 1996) Архив СКБ ФТИ.
30. А. Ю. Кабин, Е. Г. Бараш, В. И. Любин, Р. П. Сейсян //Воздействие импульсного ВУФ излучения на халькогенидные стекла// Тезисы IV Всес. конф. по физике диэлектриков, г. Томск, 1988.
31. Е. Бараш, Р. Сейсян Эффект усиления контраста передачи изображения при воздействии ЭУФ излучения на тонкие плёнки халькогенидных стеклообразных полупроводников.
32. Проект МНТЦ, разработанный после обсуждения американской программы ЭУФ нанолитографии на семинаре в ФТИ. <http://www.wmw-magazine.ru/euv-lithography//0991/1996/r.seisyan/euv-proposal>

33. Р. П. Сейсян. EUV Nanolithography for VLSI// Japan-Russia advanced Science and Technology Forum, 2000, Tokyo, Japan, p.164-172
34. Проект, принятый МНТЦ под № 0991.
35. Второй проект МНТЦ, поддержанный ЕС, №3857.
36. Общеввропейская программа COST, подпрограмма COST action 0601, руководимая Alan Mishett и посвященная созданию лабораторного источника ЭУФ радиации.
37. CXRO — The Center for X-ray Optics — Lawrence Berkeley National... www.cxro.lbl.gov
38. COST Action 0601 Pisa 2006.
39. COST Action 0601, Dresden2008.
40. COST Action 0601, Salamanca2009.
41. COST Action 0601, Krakow2010.
42. COST Action 0601, Southampton 2011.
43. COST Action 0601, Paris 2012.
44. М. А. Ган, Р. П. Сейсян. Перспективы развития оптической нанолитографии // Сб. тезисов Международного форума по нанотехнологиям «RUSNANOTECH 08», 2008, 3-5.12, Москва, с.48.
45. А. А. Andreev, V. G. Nikolaev, K. Yu. Platonov, R. P. Seisyan. Лазер-плазменный ЭУФ и МР источники для нанолитографии // Сб. тезисов Международного форума по нанотехнологиям «RUSNANOTECH 08», 2008, 3-5.12, Москва, с.209
46. Бобашев С. В., Жевлаков А. П., Калмыков С. Г., Ройз И. М., Сейсян Р. П., Тумакаев Г. К. Экспериментальный EUV-нанолитограф и нанолитографический комплекс ФТИ // Сб. тезисов Международного форума по нанотехнологиям «RUSNANOTECH 08», 2008, 3-5.12, Москва, с. 225.
47. Р. П.Сейсян, А. П.Жевлаков Создание высокоапертурных оптических систем для экстремально-ультрафиолетового и рентгеновского диапазонов // Сб. тезисов Международного форума по нанотехнологиям «RUSNANOTECH 08», 2008, 3-5.12, Москва, с.753.

48. Калитеевская Н. А., Нестеров С. И., Горелов В. А., Сейсян Р. П. Регистрация наноизображений при помощи нелинейных фоторезистов работающих в вакуумно- и экстремально-ультрафиолетовых диапазонах // Сб. тезисов Международного форума по нанотехнологиям «RUSNANOTECH 08», 2008, 3-5.12, Москва, с.249.
49. Ивентьева О. О., Нелюбов В. М., Юкиш В. А., Сейсян Р. П., Сасин М. Э. Прецизионные пьезопозиционеры для систем формирования наноизображений в нанолитографе // Сб. тезисов Международного форума по нанотехнологиям «RUSNANOTECH 08», 2008, 3-5.12, Москва, с.247.
50. Коротков Е. Б., Левинзон Г. Л, Мороз А. В., Сейсян Р. П., Сасин М. Э. Система активной виброзащиты и координатной стабилизации технологического и метрологического оборудования для наноэлектронного производства // Сб. тезисов Международного форума по нанотехнологиям «RUSNANOTECH 08», 2008, 3-5.12, Москва, с.256.
51. Белик В. П., Задиранов Ю. М., Ильинская Н. Д., Маркосов М. А., Сейсян Р. П. Оптические фильтры на область спектра 13,5 нм для нанолитографии.// Сб. тезисов Международного форума по нанотехнологиям «RUSNANOTECH 08», 2008, 3-5.12, Москва, с.746.
52. Р. П. Сейсян, А. П. Жевлаков Голографические методы коррекции волнового фронта при создании наноизображений с элементами на уровне 5-20нм // Сб. тезисов Международного форума по нанотехнологиям «RUSNANOTECH 08», 2008, 3-5.12, Москва, с. 242.
53. А. В. Виноградов и Б. Я. Зельдович. X-ray and far UV multilayer mirrors: Principles and possibilities, Appl. Opt., 16, 89-93 (1977).
54. G. Dao, A. Yen, W. Trybula. Future Fab. Int. v.12, 2.02.2002.
55. В. В. Забродский, Ю. М. Задиранов, С. Г. Калмыков, А. М. Можаров, М. В. Петренко, М. Э. Сасин, Р. П. Сейсян. Воздействие УФ предионизационного импульса на выход коротковолнового излучения из лазерно-плазменного источника с Хе газоструйной мишенью. Письма в ЖТФ, 2014, т. 40, №15, с.38-44.

56. Д. А. Борисевичус, В. В. Забродский, С. Г. Калмыков, М. Э. Сасин, Р. П. Сейсян. Absorption of Laser Radiation by the Laser Plasma with Gas Microjet Targets. Письма в ЖТФ, 2017, т. 43, № 1, с. 67-70.
57. Исследование лазерной плазмы в стационарных газах при низких давлениях. С. Г. Калмыков, М. В. Петренко, М. Э. Сасин. Письма в ЖТФ, 2011, том 37, №4, с.23.
58. Распространение лазерной искры вдоль луча в стационарных газах при низких давлениях. С.Г. Калмыков, И.В. Мирошников, М. В. Петренко, М. Э. Сасин. Письма в ЖТФ, 2011, том 37, №6, с.63.
59. Динамика ионизации в лазерной плазме на газовой мишени при низких давлениях. Письма в ЖТФ, 2012, том 38, №22, с.1.
60. Численное моделирование газовой струи-мишени в лазерно-плазменном источнике коротковолнового излучения. Письма в ЖТФ, 2010, том 36, №23, с.9.
61. G. O'Sullivan & P. Dunne. The Proceedings of EUVL Source Workshop, Dallas, October 14, 2002.
62. T. Higashiguchi, T. Otsuka, N. Yugami, W. Jiang, A. Endo, P. Dunne, B. Li and G. O'Sullivan. 7 October 2011, SPIE Newsroom DOI:10.1117/2.1201109.00376.
63. <http://www.asml.com>
64. В. М. Борисов, А. Ю. Виноходов, Ю. Б. Кирюхин и др. Материалы всероссийского совещания, Нижний Новгород, 23–26 февраля 2003г., стр. 124–130.
65. Доклад ОНЕКСИМ.
66. J. Fjugimoto, Ts. Hori, T. Yanagida, H. Mizoguchi. Development of Laser Produced Tin plasma based HVM EUV Light Source Technology for HVM EUV Lithography. Physics research International, v. 2012 Article ID 249495, 11 pages doi: 10.1155/2012 /249495.
67. N. A. Kaliteevskaya, R. P. Seisyan. Simulation of photochemical transformations and photodarkening of photoresist films under influence of pulse vacuum ultraviolet radiation. ФТП v. 34 (2000), в.7, pp. 587–860. (in Russian); The Proceedings of EUVL Source Workshop, Dallas, October 14, 2002.

68. Р. П. Сейсян, В. Г. Беспалов, А. П. Жевлаков, Е. А. Макаров, А. Ю. Родионов. Двухимпульсное биспектральное лазерное возбуждение и инициация плазмы в источнике экстремально-ультрафиолетового излучения для нанолитографии. Оптический журнал, т. 84, №11, ноябрь 2017, с.45-54.
69. Igor V. Fomenkov; David C. Brandt; Nigel R. Farrar; Bruno La Fontaine; David W. Myers, et al.» Laser produced plasma light source development for HVM ", Proc. SPIE 9048, Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography V, 904835 (April 17, 2014).

Сейсян Рубен Павлович

**НАНОЛИТОГРАФИЯ
В ЭКСТРЕМАЛЬНОМ УЛЬТРАФИОЛЕТЕ
И МЯГКОМ РЕНТГЕНЕ**

Подписано в печать 08.04.2024. Формат 60×90/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 8,5. Тираж 500. Заказ 0966.

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного автором,
в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.