

## ФОРМИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ В ЭКСТРЕМАЛЬНОМ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ДИАПАЗОНЕ

**М.Ю. Корначёв**  
факультет Электроники

Ключевым моментом, обеспечивающим в течении последних 40 лет беспрецедентные темпы развития микроэлектроники, явилась возможность уменьшения минимального характеристического размера элементов интегральных схем  $d_{min}$ .

Анализ тенденций показывает неизбежность выхода в нанометровый диапазон с размерами  $d_{min} = 5 - 30$  нм. Очевиден непрерывный прогресс, характеризуемый экспоненциальным уменьшением этой величины в течении всего времени развития микроэлектроники, с одним и тем же показателем степени, соответствующим уменьшению  $d_{min}$  приблизительно на 13% ежегодно. Однако возможности оптических систем ограничены дифракционным пределом и разрешаемая полоса не может быть существенно уже длины волны экспонирующего излучения.

Всё это обращает внимание к волновым процессам в экстремальном ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазонах ( $50 > \lambda > 1$  нм). Именно здесь в последнее десятилетие достигнут заметный прогресс в создании отражательных оптических элементов и высокоэффективных источников излучения.

Одним из центральных моментов здесь можно считать создание зеркал, обладающих весьма высоким коэффициентом отражения в ЭУФ и мягкой рентгеновской части электромагнитного излучения. Для этого используется многослойное брэгговское покрытие на атомарно-гладкой поверхности массивной подложки с заданной кривизной [1].

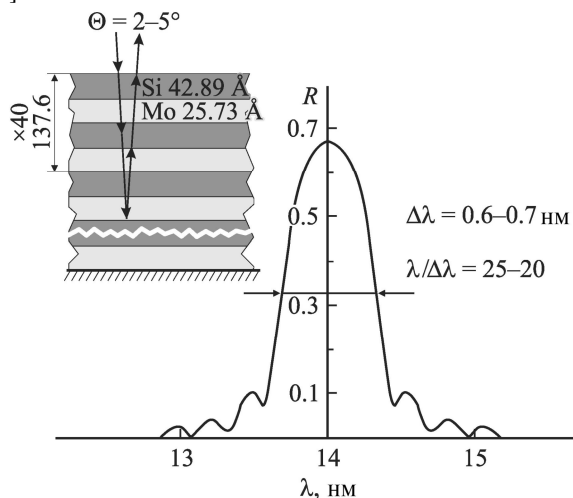


Рис. 1. Типичный спектр отражения „брэгговского“ зеркала на примере многослойной системы Mo-Si

На рис. 1. приведена типичная зависимость коэффициента отражения от длины волны для одной из наиболее эффективных систем. На многослойных брэгговских зеркалах Mo-Si в настоящее время достигнут коэффициент отражения, приближающийся к  $R = 70\%$  при  $\lambda = 13.4$  нм (теоретическое  $R_{max} \sim 74-78\%$ ). 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 четвертой и пятой атомных оболочек Xe:  $4p^6 4d^8 - 4p^5 4d^9 + 4d^7 (4f + 5p)$ . Однако доля излучения, приходящаяся на нужную длину волны

13.4 нм, отвечает только относительно слабым переходам  $4p^6 4d^8 - 5p 4d^7$  и многократно меньше излучения, приходящегося на 11 нм и отвечающего остальным переходам, осуществляемым внутри четвертой оболочки  $n = 4 \rightarrow n^* = 4$  [2] (рис. 2). Притом увеличение интенсивности возбуждения приводит не столько к увеличению эмиссии, сколько к сдвигу максимума в сторону более коротких волн. Расчеты показывают, что подходящие для генерации 13.4 нм интенсивности возбуждения от первичного лазера не должны выходить за пределы  $10^{10} - 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>, а максимальная электронная температура не должна превышать 55 эВ

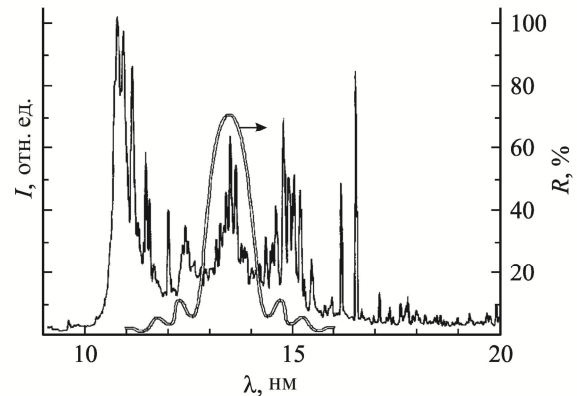


Рис. 2. Спектр излучения десятикратно ионизированного Xe и спектр отражения типичного „брэгговского“ зеркала Mo-Si

Для эффективной конверсии на 13.4 нм выгоднее вещество с атомным номером 50 (Sn); с увеличением атомного числа (Sb, I) длина волны излучения сдвигается в коротковолновую сторону, и наоборот (In, Cd). Кроме того, выясняется, что определенный интерес для эмиссии 13.4 нм представляют Li, F и Sc, а также O, имеющие подходящие линии дискретного спектра в сильно ионизированном состоянии.

Рассмотрим возможность построения проекционных литографических систем в данной области излучения.

Пусть оптическая система и фотошаблон создаются по принципам отражательной рентгеновской оптики, тогда согласно критерию Рэлея минимальный размер элемента, прорабатываемого в резисте есть

$$\begin{cases} d_{мин рез} = f_1 ( NA, \lambda, k_1, резист ) \\ NA = f_{NA} ( l_1, \dots, l_n ) \\ k_1 = f_{k1} ( тип излучения, \sigma ) \end{cases}$$

NA – числовая апертура, для отражательных зеркальных объективов лежит в диапазоне  $NA = 0.1 - 0.35$ ;

$k_1$  – параметр разрешения воздушного изображения;

$l_i$  – размеры в схеме;

$\sigma$  – степень когерентности излучения.

Параметр  $d_{мин рез}$  в первую очередь определяется воздушным изображением шаблона с минимальным размером  $d = k_1 \lambda / NA$ , а дальше идёт воспроизведение воздушного изображения в резисте. Ситуация с резистами такова, что для полученной структуры в резисте, при правильном подборе времени экспонирования и режима проявления, справедлива аналогичная формула

$$\begin{cases} d_{мин рез} = k_1^I \frac{\lambda}{NA} \\ k_1^I = f ( k_1, резист ) \\ NA = f_{NA} ( l_1, \dots, l_n ) \end{cases}$$

Вторая формула в системе означает, что параметр разрешения  $k_1^I$  зависит как от параметра разрешения воздуш-

ного изображения, так и от резиста. Диапазон значений  $K_1^I$  составляет  $K_1^I = 0.4-0.8$  в зависимости от применяемых технологий улучшения изображения и химического усиления резиста. Тогда, при использовании излучения с длиной волны  $\lambda = 13.4$  нм минимальный размер элемента, прорабатываемый в резисте может достигать величины

$$d_{\text{мин рез}} = K_1^I \frac{\lambda}{NA} = 0.4 \frac{13.5}{0.35} \approx 15.5 \text{ нм.}$$

Таким образом, применение проекционных литографических систем, осуществляющих экспонирование в экстремальном ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазонах приведёт к сокращению проектных норм литографического процесса до нескольких десятков нанометров, что позволит существенно повысить быстродействие и снизить энергопотребление микронных компонентов сверхбольших интегральных схем и вычислительных комплексов на их основе.

Для реализации технологического процесса микролитографии в экстремальном ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазонах предложено следующее техническое решение [3].

В основу идеи положена задача обеспечить возможность формирования уменьшенного изображения шаблона.

Согласно предложенному устройству источник света выполнен в виде лазерного источника, собирающее асферическое коллекторное зеркало и плоское отклоняющее коллекторное зеркало выполнены в виде чередующихся четвертьволновых слоёв двух пар материалов – молибдена и кремния (Mo-Si), проекционный объектив выполнен двухзеркальным, состоящий из большого вогнутого зеркала с центральным отверстием и малого вогнутого, причём поверхность зеркал также выполнена многослойной в виде чередующихся четвертьволновых слоёв двух пар материалов – молибдена и кремния (Mo-Si). Устройство дополнительно снабжено вакуумной камерой и средством откачки.

Введение в устройство для формирования изображения лазерного источника, собирающего асферического коллекторного зеркала и плоского отражательного зеркала, проекционного объектива, вакуумной камеры и средства откачки, обеспечивает возможность формирования уменьшенного изображения шаблона.

Сущность устройства поясняется на (рис. 3) где показано устройство для формирования изображения [4].

Устройство для формирования изображения содержит образец 1 с фоторезистом 2, источник света 3, собирающее асферическое коллекторное зеркало 4, плоское отражающее зеркало 5, маску – фотошаблон 6, и проекционный объектив 7. Источник света 3 выполнен в виде лазерного источника 8, собирающее асферическое коллекторное зеркало 4 и плоское отражающее зеркало 5 выполнены в виде чередующихся четвертьволновых слоёв 9,10,11,12 двух пар материалов – молибдена и кремния (Mo-Si), проекционный объектив 7, выполнен двухзеркальным, состоящий из большого вогнутого зеркала с центральным отверстием 13 и малого выпуклого 14, причём поверхность зеркал также выполнена многослойной в виде чередующихся четвертьволновых слоёв 15,16,17,18 двух пар материалов – молибдена и кремния (Mo-Si). Устройство дополнительно снабжено вакуумной камерой 19 и средством откачки 20. Устройство для формирования изображения (рис. 3) работает следующим образом.

Лазерный источник 8, обеспечивает генерацию электромагнитного излучения, которое отражается от чередующихся четвертьволновых слоёв собирающего асферического коллекторного зеркала 4 а затем плоского отражающего зеркала 5, сфокусированным пучком, попадает на маску фотошаблон 6, проходя которую, переносит изображение содержащее структуру топологии на малое вы-

пуклое зеркало 14, проекционного объектива 7. Малое выпуклое зеркало 14 отражает падающее излучение таким образом, что оно, попадая на большое вогнутое зеркало с центральным отверстием 13 проекционного объектива 7, фокусируется на подложке 1, экспонируя фоторезист 2. Отражение от многослойных зеркал 4,5,13,14 возможно благодаря тому, что малая часть падающего излучения отражается от каждой пары слоёв молибдена и кремния (Mo-Si), причём толщина слоя в четверть волны подобрана так, чтобы отражённые волны при интерференции складывались. Процесс проходит в вакуумной камере 19 с поддержанием необходимого разряжения средством откачки 20.

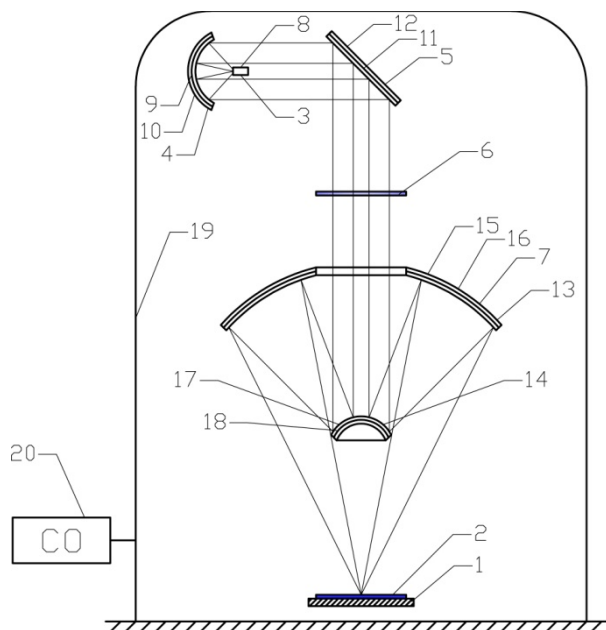


Рис. 3. Устройство для формирования изображения

Применение предлагаемого устройства для формирования изображения позволяет обеспечить возможность формирования уменьшенного изображения шаблона.

#### Литература:

1. Сейсян Р. Нанолитография СБИС в экстремально дальнем вакуумном ультрафиолете // Журнал технической физики. – 2005. – Т. 75, – В. 5. С. 1-13.
2. O'Sullivan G., Dunne P. // Proc. EUVL Source Workshop. Dallas, 2002.
3. Патент на полезную модель 104772 Российская федерация, МПК<sup>7</sup> 7H01J 37/28. Устройство для формирования изображения [Текст] / М.Ю. Корпачев, П.С. Костомаров, Е.Н. Ивашов, П.А. Лучников, М.М. Якункин; заявитель и патентообладатель МИЭМ. – № 2010146416/07; заявл. 15.11.2010; опубл. 20.05.2011, Бюл. № 14.
4. Корпачёв М. Ю. Формирование изображения в вакуумном ультрафиолете [Текст] / Е.Н. Ивашов, М.Ю. Корпачев, П.С. Костомаров, П.А. Лучников// Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения (INTERMATIC – 2010) : матер. VII Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 23 - 27 ноября 2010 г. – М. : МИРЭА, 2010. – Ч. 1, – С. 303-305.