

极紫外投影光刻掩模的多层膜与照明误差*

杨 雄^{1,2} 金春水¹ 张立超^{1,2}

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 讨论了极紫外投影光刻掩模的反射光谱随多层膜参量的变化, 通过曲线拟合得到了峰值反射率、带宽和中心波长与多层膜粗糙度、材料比值以及周期厚度的 9 个函数关系. 模拟了 6 镜极紫外投影光刻系统的反射光谱, 并计算了晶圆片处的相对照明强度. 分析了由掩模在晶圆片处引入的照明误差, 给出了照明误差的合成公式.

关键词 薄膜光学; 极紫外投影光刻; 掩模; 照明误差

中图分类号 O484.4+1 **文献标识码** A

0 引言

极紫外投影光刻 (Extreme Ultra-Violet Lithography) 是制造 <65 nm 集成电路的候选技术之一, 整个系统采用全反射式光学设计, 工作于 13.0 nm 波长, 掩模是影响 EUVL 系统性能最主要的因素之一. 在照明均匀性方面, EUVL 系统严格限制由掩模引入的照明误差, 即对掩模的反射光谱提出了严格的要求. 极紫外投影光刻掩模镀有工作在 13.0 nm 波长、近正入射工作的 Mo/Si 高反射多层膜. 为了制备出满足照明误差要求的掩模, 首先需要完成以下三方面的工作: 1) 获得多层膜反射光谱与多层膜参量之间的函数关系; 2) 获得晶圆片的相对照明强度与多层膜的反射光谱的函数关系; 3) 得到照明误差的合成计算公式. 在完成上述三方面的工作后, 结合实际的掩模制备工艺, 就能确定合理的照明误差分配. 确定误差分配方式是指导开展 EUVL 掩模工程化研究的基础之一.

文献[2,3]讨论了薄膜误差问题, 本文主要讨论多层膜反射光谱与其参量之间的关系, 以及晶圆片的相对照明强度与多层膜反射光谱的关系, 然后分析由掩模引入的照明误差并给出误差合成公式.

1 掩模多层膜的参量与反射光谱

EUVL 系统采用全反射式光学设计, 工作于 13.0 nm 波长. 图 1 是 EUVL 的原理示意图: 激光轰击靶材获得极紫外辐射, 通过 C₁、C₂、C₃、C₄ 四面反射镜收集会聚并照射到掩模上, 由 M₁、M₂、M₃、M₄ 组成的成像系统将均匀照明的掩模缩小成像在硅片上, 通过掩模和硅片的同步扫描实现整个掩模

的复制. 其中 C₂ 和 C₄ 工作于掠入射, 所以该系统属于 6 镜投影光刻系统. 因为 Mo/Si 多层膜具有的许多优点^[3], EUVL 系统中所有的反射光学元件表面均镀有 Mo/Si 多层膜, 其中包括掩模基底表面.

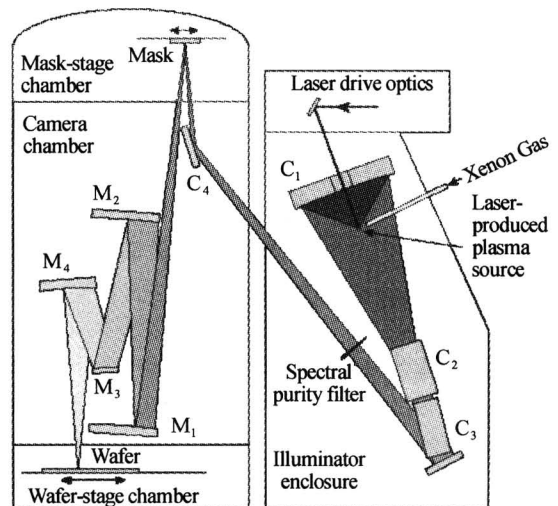


图 1 极紫外投影光刻装置原理

Fig. 1 EUVL exposure tool schematic

用递归法计算 Mo/Si 多层膜反射率的核心公式为

$$r_i = \frac{r_t + r_b \exp(2i\varphi)}{1 + r_t r_b \exp(2i\varphi)} \quad (1)$$

式中 r_t 是每一膜层的振幅反射系数, r_t 表示该膜层的上界面的振幅反射系数, r_b 表示该膜层下界面的振幅反射系数, φ 表示入射光在膜层中单向行进时的位相延迟. 在实际计算中, 首先计算出紧邻基底膜层的反射系数 r_t , 以此作为上面相邻膜层的 r_b 带入式(1), 容易计算得到倒数第二层膜的振幅反射系数. 如此直到完成整个多层膜的计算. 由于极紫外波段的多层膜都是规整的周期膜, 所以容易利用计算机实现程序化的自动计算. 当考虑非理想界面的影响时(界面粗糙度的影响), 只需要将 r_t 乘上相应的系数即可.

*应用光学国家重点实验室资助项目
Tel: 0431-6708778 Email: opticsy@yahoo.com.cn
收稿日期: 2005-03-02

这里主要讨论多层膜构成参量变化时,其反射光谱的变化情况.具体包括三方面:反射光谱随多层膜界面粗糙度的变化、随多层膜材料比值(高 Z 比低 Z)的变化以及随多层膜周期厚度的变化.实际中,通常以峰值高度、带宽以及中心波长等三个特征量表示反射光谱,因此我们总共将计算得到9个函数关系式.计算使用的Mo/Si折射率来自Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL)

在1997年发布的数据,并且用Nevot-Croce因子^[4]描述界面粗糙度的影响.这些计算结果是一些离散点,利用Origin的曲线绘制工具和曲线拟合工具,绘制了曲线并拟合得到了相应的函数关系表达式.反射光谱特征量与粗糙度的函数关系表达式列在表1中,与材料比值的函数关系表达式列在表2中,与周期厚度的函数关系表达式列在表3中(所有参量的长度单位都是nm).

表1 粗糙度的影响

	拟合结果(x 为粗糙度值)	拟合函数
峰值反射率:	$R_p = -0.14708x^2 + 0.01885x + 0.74063$	多项式拟合
带宽:	$W = 0.33042 + \frac{0.31655}{1 + e^{\frac{(x-0.81395)}{0.26908}}}$	S拟合
中心波长:	$\lambda_c = -0.0098x^2 - 0.0016x + 13.4185$	多项式拟合

表2 材料比值的影响

	拟合结果(x 为高 Z 材料与周期厚度的比值)	拟合函数
峰值反射率:	$R_p = -1.31084x^2 + 1.08837x + 0.50043$	多项式拟合
带宽:	$W = -2.51928x^2 + 2.39645x - 0.07082$	多项式拟合
中心波长:	$\lambda_c = -0.92941x + 13.81985$	线性拟合

表3 周期厚度的影响

	拟合结果(x 为周期厚度)	拟合函数
峰值反射率:	$R_p = \frac{0.00398}{1 + e^{\frac{(x-8.9624)}{0.040549}}} + 0.69931$	S拟合
带宽:	$W = 0.19539x - 0.75342$	线性拟合
中心波长:	$\lambda_c = 1.68654x + 1.65945$	线性拟合

2 晶圆片的相对照明强度

EUVL系统采用全反射式的光学设计,如果不考虑照明光源的影响因素^[5],在晶圆片处的相对照明强度可以用式(2)^[6]计算

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} R_o(\lambda) R_m(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

式中的 $R_o(\lambda)$ 表示光刻系统的反射光谱, $R_m(\lambda)$ 表示掩模的反射光谱.对于实际的光刻系统, $R_o(\lambda)$ 是固定的,所引入的误差是系统性误差,可以通过调节扫描过程进行补偿.但掩模所引入的误差,由于每一片掩模的反射特性都不相同,无法得到补偿,因此只能通过严格限制掩模反射光谱的变化量,以满足晶圆片处的照明误差要求.在定量计算掩模反射光谱变化所引起的照明误差之前,必须先知道掩模的反射光谱与相对照明强度 I 之间的关系.在以下的计算中,仅讨论反射光谱的三个特征量,即峰值反射率、带宽和中心波长等分别与相对照明强度 I 的函数关系.

为了更好地模拟实际的光刻系统,在获得系统反射光谱 $R_o(\lambda)$ 时,引入了均方根为0.03 nm的膜厚随机变化量到多层膜中,同时设定多层膜的界面粗糙度为0.5 nm.任意计算了6条具有该参量的多层

膜反射光谱曲线,并将这些曲线的反射率连乘,得到了6镜光刻系统的反射光谱 $R_o(\lambda)$.在图2中同时给出单面反射镜的反射光谱与6镜光刻系统的反射光谱(掩模等于单面反射镜),以便直观地比较和认识,虚线是单面反射镜的反射光谱曲线,实线是6镜光刻系统的反射光谱曲线.

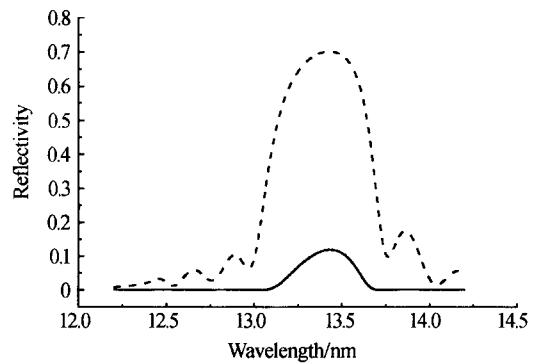


图2 单面反射镜的反射光谱与6镜光刻系统的反射光谱
Fig. 2 Spectral reflectivity of a single mirror compared to the spectral reflectivity of 6-mirrors lithography system

因为要分别讨论掩模反射光谱的三个特征量,即峰值反射率、带宽和中心波长等分别与相对照明强度 I 的函数关系,这就需要得到其中一个量变化而另外两个量保持不变的掩模反射光谱曲线.根据前面关于多层膜参量与多层膜反射光谱的分析结

果,首先模拟计算得到了峰值反射率不变而带宽变化和峰值反射率变化而带宽保持不变的掩模反射光谱曲线,但此时中心波长一般是变化的,通过将光谱

曲线平移,保证了掩模反射光谱 $R_m(\lambda)$ 的中心波长与光刻系统反射光谱 $R_s(\lambda)$ 的中心波长重合. 相对照明强度 I 的计算结果列在表 4 中.

表 4 相对照明强度与掩模反射光谱的函数关系(长度单位: nm)

	拟合结果(6 镜)拟合函数	
相对照明强度随峰值变化	$I_p = 0.04197p - 0.00214$	线性拟合
相对照明强度随带宽变化	$I_w = 0.00692w + 0.02306$	线性拟合
相对照明强度随中心波长变化	$I_\lambda = -0.14767\lambda^2 + 0.00775\lambda + 0.02725$	多项式拟合

3 EUVL 掩模引入的照明误差

多层膜反射光谱相对理想值的偏差,是 EUVL 掩模引起照明误差的直接原因,同时也因为反射光谱容易被测量,因此,由 EUVL 掩模引入的照明误差将描述为这样一个函数

$$\Delta E = f(\Delta E_p, \Delta E_w, \Delta E_\lambda) \quad (3)$$

式中 ΔE 是掩模引入的总照明误差, ΔE_p 、 ΔE_w 、 ΔE_λ 分别是由掩模反射光谱的峰值反射率、带宽和中心波长变化所引入的误差. ΔE_p 、 ΔE_w 、 ΔE_λ 可以从表 4 中的等式计算得出, $\Delta E_p = (I_p - I_p)/I_p$, 式中的 I_p 表示 I_p 的平均值, ΔE_w 和 ΔE_λ 的计算方法与此相同. 系统误差一般是通过代数和进行合成的,而偶然误差一般通过平方和进行合成^[7],因此确定误差合成函数 f 的前提是判断 ΔE_p 、 ΔE_w 、 ΔE_λ 三个误差的属性.

多层膜的构成参量相对理想值的偏离是 EUVL 掩模引起照明误差的根本原因,而且任何一个参量的变化,都将改变反射光谱的峰值反射率、带宽和中心波长,即同时引起 ΔE_p 、 ΔE_w 、 ΔE_λ 三种误差. 采用下面的方法判断该三种误差的属性:首先假定 ΔE_p 、 ΔE_w 、 ΔE_λ 都是 1%,则根据第三节中分析得到的相对照明强度 I 的计算式,可以计算出峰值反射率、带宽和中心波长相应的变化量 Δp 、 Δw 、 $\Delta \lambda$ (表 5),然后根据第二节中的计算公式,就可以得出多层膜构成参量的相应变化范围(表 6),跟据这些变化范围的大小,就能判断出 ΔE_p 、 ΔE_w 、 ΔE_λ 是偶然误差或系统误差.

表 5 掩模反射光谱的变化

峰值 @0.65	$I = 0.0251405 \text{ nm}$	$\Delta p = 0.00599$
带宽 @0.58 nm	$I = 0.0270736 \text{ nm}$	$\Delta w = 0.03912 \text{ nm}$
中心波长 @0.02624 nm	$I = 0.0273517 \text{ nm}$	$\Delta \lambda = 0.04304 \text{ nm}$

表 6 多层膜参量的变化

	$\Delta p = 0.00599$	$\Delta w = 0.03912 \text{ nm}$	$\Delta \lambda = 0.04304 \text{ nm}$
粗糙度	$\pm 0.0254 \text{ nm}$	$\pm 0.1696 \text{ nm}$	$\pm 0.5500 \text{ nm}$ 以上
周期厚度	$\pm 0.2600 \text{ nm}$	$\pm 0.2002 \text{ nm}$	0.0255 nm
比值	± 0.0318	± 0.1100	± 0.0463

从表 6 中的数据,结合极紫外多层膜的实际制备工艺,可以分析得到这样的结论: ΔE_p 主要由多层

膜的粗糙度变化引起;引起 ΔE_w 的因素不明确,表现出随机特征; ΔE_λ 主要由多层膜周期厚度的变化引起;比值对照明均匀性的影响很小. 至此可以确认, ΔE_p 、 ΔE_w 、 ΔE_λ 三种误差是偶然误差,其合成公式为

$$\Delta E = \sqrt{\Delta E_p^2 + \Delta E_w^2 + \Delta E_\lambda^2} \quad (4)$$

4 结论

掩模是 EUVL 系统中的一个反射光学元件,掩模基底上表面镀有工作在 13.0 nm 波长的多层膜. 首先对多层膜的反射光谱进行了计算,得到了峰值反射率、带宽和中心波长随多层膜的粗糙度、材料比值以及周期厚度变化的 9 个函数关系. 然后模拟计算了 6 镜光刻系统在晶圆片处的相对照明强度跟峰值反射率、带宽和中心波长的函数关系. 最后分析了由 EUVL 掩模引入的照明误差,得到了误差的合成公式,该公式是进行照明误差分配的依据.

参考文献

- 占美琼,张东平,杨健,等. 石英晶体振荡法监控膜厚研究. 光子学报,2004,33(5):585~588
Zhan M Q, Zhang D P, Yang J, et al. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(5):585~588
- 张晓晖,丁双红. 规整膜系层厚允许误差的研究. 光子学报,2003,32(9):1145~1148
Zhang X H, Ding S H. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(9):1145~1148
- Skulina K M, Alford C S, Bionta R M, et al. Molybdenum silicon multilayer mirrors for normal incidence in the extreme ultraviolet. Appl Optics, 1995, 34(19):3727
- Eberhard S. Soft X-Ray Optics. Bellingham Washington: Optical Engineering Press, 1994. 110~114
- Chao W, Gullikson E, David A. Equivalent multilayer bandwidth and comparison between 13.4 nm and 14.4 nm for EUV throughput calculation. Proc of SPIE, 2001, 4343:676~683
- Bujak M, Burkhart S, Cerjan C, et al. Mask Technology for EUV Lithography. Proc of SPIE, 1999, 3665:30~39
- 何国伟. 误差分析方法. 北京:国防工业出版社,1978. 97~101
He G W. Error Analysis. Beijing: National Defence Industry Press, 1978. 97~101

Multilayers on Extreme Ultraviolet Lithography Masks and Illumination Error

Yang Xiong^{1,2}, Jin Chunshui¹, Zhang Lichao^{1,2}

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022

² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date: 2005-03-02

Abstract The peak reflectivity, bandwidth and centroid wavelength of Extreme Ultraviolet Lithography (EUVL) Mask as a function of roughness, period thickness and thickness ratio of Mo/Si multilayers were calculated. Nine equations were obtained by fitting the calculated data. Then, the reflective spectrum of 6-mirror EUVL system were simulated, and calculation were performed to work out the relative illumination intensity at wafer plane. Finally, illumination uniformity error at wafer plane induced by the mask were analyzed, and resulted a formula for estimating the error.

Keywords Film optics; Extreme ultraviolet lithography; Mask; Illumination error



Yang Xiong was born in 1976 in Sichuan Province, and graduated from Shenyang Institute of Technology in 1999. At present, he is a Ph. D. candidate of State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics. His research interests include film optics and extreme ultraviolet lithography mask.