

文章编号: 0258-7025(2006)06-0800-05

镀铬基片全息光栅光刻胶掩模槽形参量 光谱检测方法

陈 刚, 吴建宏, 陈新荣, 刘 全

(苏州大学信息光学工程研究所, 江苏 苏州 215006)

摘要 为了检测全息光栅掩模槽形, 运用严格耦合波理论(RCWT)分析镀铬基片光栅光刻胶掩模反射 0 级衍射效率光谱曲线与槽形参量的关系。测量了 400~700 nm 波长范围内 60° 入射角条件下的镀铬基片全息光栅光刻胶掩模反射 0 级衍射效率光谱曲线。将实验曲线与不同槽形参数对应理论曲线相减、求标准差进行匹配, 标准差最小者为匹配结果, 从而找到被测掩模的槽深和占宽比(光栅齿宽占光栅周期的百分比)。结果表明, 该方法图形匹配速度快, 误差容限大, 匹配结果与电镜结果相符。对于要求同时检测矩形或接近矩形槽形全息光栅光刻胶掩模的槽深和占宽比, 该方法完全适用。

关键词 衍射与光栅; 全息光栅掩模; 光谱检测; 槽深; 占宽比

中图分类号 O 436.1; O 438.2 **文献标识码** A

Measurement of Profile Parameters of Holographic Photoresist Grating Mask Made on Top of Chrome Stack in Spectroscopic Way

CHEN Gang, WU Jian-hong, CHEN Xin-rong, LIU Quan

(Institute of Information Optical Engineering, Suzhou University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

Abstract In order to detect the profile of holographic photoresist grating mask made on top of chrome stack, rigorous coupled wave theory (RCWT) was applied to analyze the relationship between zero order reflected spectrum and the profile of grating mask. Zero order reflected spectra range from 400 nm to 700 nm at the incident angle of 60° were measured in experiment. The standard deviation of differences between experimental curve and theoretic curve of different profiles is calculated for matching, and the duty cycle and groove depth were obtained by the best fitted theoretic spectra corresponding to minimum standard deviation. Results achieved in this way which is a quick in matching and high in error tolerance, agree very well with scanning electron microscope (SEM) pictures. The method is qualified for measurement of groove depth and duty cycle simultaneously for the rectangle-shaped or similar profile of holographic grating mask.

Key words diffraction and gratings; holographic grating mask; spectrum detect; groove depth; duty cycle

1 引 言

离子刻蚀全息光栅^[1]是一种重要的衍射光学器件,它在光谱仪分光、光纤光栅相位掩模^[2]、激光脉冲压缩光栅^[3]、X 射线分光光栅^[4,5]、光纤滤波器^[6]等方面有重要应用。离子刻蚀全息光栅的制作过程为,先在被刻蚀基底上涂布光刻胶,将光刻胶基板进行全息干涉曝光,经显影处理后在刻蚀基底上形成

光刻胶掩模,最后用离子刻蚀方法将掩模的浮雕形状转移到被刻蚀基底上。由于离子刻蚀工艺的需要,在光刻胶涂布前,往往在被刻蚀基底上镀一层铬,这样在离子刻蚀前就形成铬基底光刻胶掩模。无论在被刻蚀基底上有无镀铬,光刻胶掩模槽形,主要是槽深和占宽比与刻蚀后的刻蚀光栅槽形密切相关,最终会影响离子刻蚀光栅的衍射效率和损伤阈

收稿日期:2005-10-25; 收到修改稿日期:2006-01-10

基金项目:江苏省高新技术研究计划(BG2004020)和国家 863 计划(2004AA849023)资助项目。

作者简介:陈 刚(1976—),男,江苏镇江人,苏州大学信息光学工程研究所硕士研究生,主要从事衍射光学元件方面的研究。E-mail:dagangchen@163.com

值,所以光刻胶掩模槽形特别是槽深和占宽比的检测对离子刻蚀光栅制作非常重要。

光栅槽形检测最常用的方法是由 J. R. McNell 等^[7]提出的 scatterometry 方法,它利用光栅衍射特性与光栅槽形的密切关系,通过测量衍射效率特性并利用光栅电磁场理论来推算槽形,这些特性包括角度特性^[8]、光谱特性^[9]、偏振特性^[10,11]等等。该方法追求对槽形的精确描述,因而参数多,运算复杂,主要应用于以硅片为基底的集成电路表面的检测^[12,13],但文献少有报道离子刻蚀全息光栅掩模的检测,特别是铬膜基底的槽形检测。本文针对高密度光栅,采用基于严格耦合波理论(RCWT)^[14]的光谱检测方法,通过检测 0 级衍射光的光谱分布,按理论值与实验曲线标准差最小化拟合方法测量光栅槽形的占宽比和槽深。本方法参数少,运算简单。实验结果表明,测量精度达到了实用要求。

2 基本原理

以 TE 模式分析镀铬光栅掩模衍射效率与槽形参量的关系。镀铬光栅的光刻胶掩模如图 1 所示,其中 D 为光栅的槽深, Λ 为光栅的周期,入射光以 θ 角入射,在 1 区和 2 区分别是折射率为 n_1 和 n_2 的两种均匀介质,这里即为空气和光刻胶。光刻胶下面是铬膜,基底是玻璃。

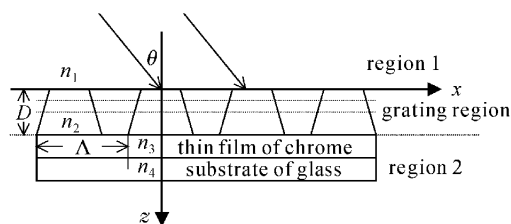


图 1 镀铬光栅掩模示意图

Fig. 1 Profile of the grating mask

实际光栅掩模槽形是很复杂的,这里采用梯形模拟槽形,由于被检测光栅掩模周期已知,而且显影工艺可以保证光刻胶掩模露底,因此描述槽形的参量只有三个,即槽深、占宽比(对于梯形而言,就是腰部宽度占周期的百分比)和顶部宽度。

利用严格耦合波理论计算铬膜基底光栅掩模的衍射效率。把铬膜看成单层膜系,入射介质是光刻胶,基底是玻璃,铬的折射率为复数。这样可以计算出每一传播衍射波本征态的反射场,将这一反射场纳入耦合波求解过程中的边界条件,即可计算出每

一衍射级的衍射效率。

以脉冲压缩光的栅制作参量为例计算 0 级衍射光的光谱分布。光栅条纹密度 1480 line/mm,光刻胶折射率 1.65,铬膜折射率 $1.67 - 1.37i$ (由本文第 3 部分实验测定),厚度 80 nm,玻璃基底折射率 1.52。用耦合波理论计算表明,当 TE 模以较大入射角入射时,也就是反射衍射光只有 0 级和 1 级时,衍射光的光谱分布对槽形比较敏感。图 2~4 为 TE 模 60° 入射角、不同槽深、不同占宽比、不同顶部宽度条件下 0 级反射的理论光谱曲线。

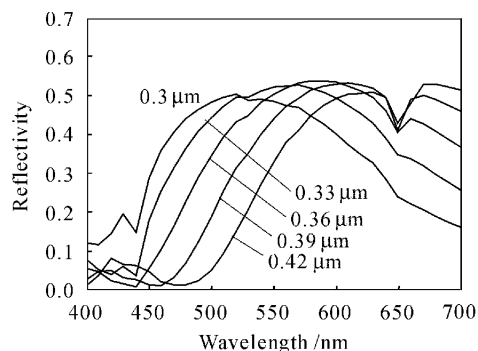


图 2 占宽比为 30%,槽深不同时的反射谱

Fig. 2 Reflected spectral curves of different groove depth at the same duty cycle of 30%

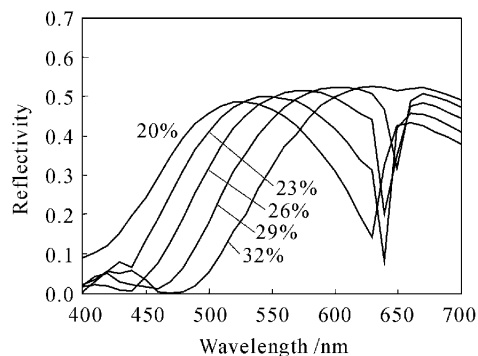


图 3 槽深为 $0.4 \mu\text{m}$,占宽比不同时的反射谱

Fig. 3 Reflected spectral curves of different duty cycle at the same groove depth of $0.4 \mu\text{m}$

从图中可以看出,0 级反射谱随槽深、占宽比、顶部宽度的变化而变化,即反射谱曲线当中包含了槽形参量的信息,反射谱线随占宽比和槽深变化明显,而随顶部宽度变化不明显。因此,谱线能够较为准确地反映槽深和占宽比的情况,而对顶部宽度信息反映就可能不精确。

由于 0 级反射光谱对顶部宽度不敏感,且对光栅槽形刻蚀影响最大的是光栅掩模的槽深和占宽比,在相同槽深和占宽比条件下,掩模的具体形状对

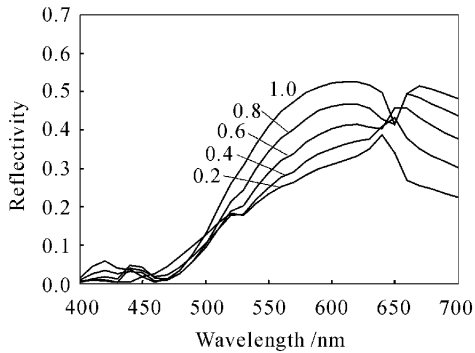


图 4 槽深为 $0.4 \mu\text{m}$, 占宽比为 30%, 顶部宽度分别为腰部宽度 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 和 1.0 倍时的反射谱

Fig. 4 Reflected spectral curves of different top widths of 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 and 1.0 times of mid width at the same duty cycle of 30% and groove depth of $0.4 \mu\text{m}$

刻蚀结果影响不大,而且光刻胶掩模形状在绝大部分情况下接近矩形,因此,可以采用矩形槽形来作理论匹配。

从理论上说,每一个槽形对应的反射谱是唯一的,反之,每条反射谱对应的槽形也是唯一的。只要测量出光栅掩模的 0 级反射谱,通过改变矩形槽形的槽深和占宽比计算理论衍射效率分布,并与实验测量曲线比较,找到最接近者,就可以得到实际槽形的槽深和占宽比。其具体方法是在一定的槽深、占宽比范围内(通过工艺条件控制,可以确定槽深和占宽比的范围),按照一定的间隔,选取特定的波长,分别算出其反射 0 级衍射效率,将这些结果分别与实验测量结果相减求标准差,标准差最小者最接近。标准差反映了图形匹配的相似程度,标准差越小,理论模拟的结果与实际情况越接近。

用计算图 2~4 的参量进行匹配模拟分析。如果被测实际槽形是槽深为 $0.382 \mu\text{m}$, 占宽比为 35.5%, 顶部宽度为周期 0.3 倍的梯形槽形, 0 级衍射光的光谱分布经耦合波理论计算如图 5 所示,这一曲线相当于实验测量曲线。用计算标准差方法用矩形槽形匹配模拟,在匹配过程中槽深变化范围为 $0.3 \sim 0.4 \mu\text{m}$, 占宽比范围为 10%~40%, 波长取 31 个值,经最佳匹配后计算得到的占宽比为 36%, 槽深为 $0.38 \mu\text{m}$, 在最佳匹配处的 31 个波长值也显示在图 5 中。从模拟匹配的结果看出,用矩形槽形的匹配模拟能较精确地反映被测槽形的槽深和占宽比。

在实际测量中,0 级光的光谱分布测量是有误

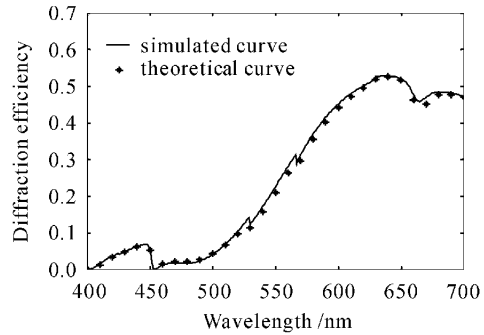


图 5 匹配结果

Fig. 5 Matching result

差的,如果人为地给图 5 的实线 10% 和 20% 的偏差,即假设测量曲线有 10% 或 20% 的系统误差,则在最佳模拟匹配后计算得到的槽深和占宽比分别为 $0.38 \mu\text{m}$, 36% 和 $0.39 \mu\text{m}$, 35%, 这表明系统测量误差对最终结果影响不大。

经过分析可见,通过测量镀铬基底掩模的 0 级衍射光的光谱分布可以精确地估计掩模的槽深和占宽比,并且该方法对系统测量误差敏感。

3 实验及结果

3.1 铬折射率的测定

由于金属铬的折射率在不同波长、不同入射角和不同温度条件下都不一样,因此有必要测定实验条件下铬膜的折射率。

铬膜厚度仅有 80 nm, 可看成单层膜系,入射介质是空气,基底是玻璃。在 60° 入射角条件下,分别测量出 400~700 nm 光谱范围内 TE 模和 TM 模的反射谱,如图 6 所示。可以看出,铬的反射谱线比较平直,因此可以近似认为铬的折射率是常数。TE 模和 TM 模反射率取测量结果的平均值。

要得到铬折射率的解析解比较困难,可采用数

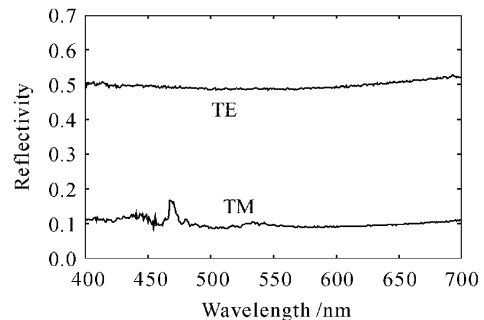


图 6 铬膜反射谱曲线

Fig. 6 Reflected spectral curves of chrome film

值方法,将可能范围里铬折射率的值代入反射率公式计算,直到找到同时满足 TE 模和 TM 模的反射率的铬折射率。按照这种方法,得到的铬折射率为 $1.67-1.37i$ 。

3.2 槽形参量的检测

按照如图 7 的实验装置测量了 6 块镀铬光栅掩模样品的 0 级反射率光谱,均为 60° 角 TE 模入射,光谱范围 $400\sim 700\text{ nm}$,光栅条纹密度 1480 line/mm 。光刻胶涂布厚度大约为 $0.42\ \mu\text{m}$,因此,槽深范围为 $0.3\sim 0.42\ \mu\text{m}$,占宽比范围 $15\%\sim 40\%$ 。

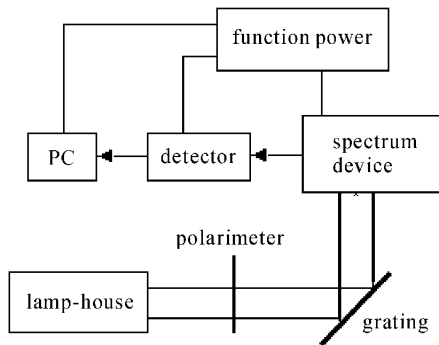


图 7 实验装置

Fig. 7 Experimental setup

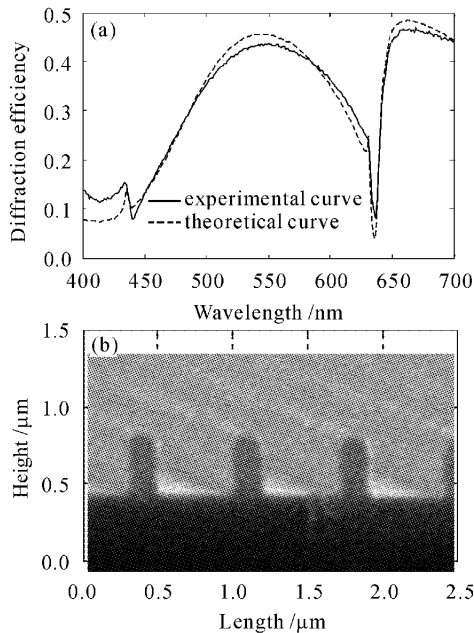


图 8 3号样品图形匹配结果(a)和扫描电子显微镜照片(b)

Fig. 8 Matching result (a) and SEM pictures (b) of sample 3

按照前面的方法进行匹配,结果表明测量光谱曲线与理论光谱曲线匹配速度很快,两者吻合得很

好,如图 8,9 所示。由表 1 可知,槽深的测量与扫描电子显微镜(SEM)照片符合得较好。在占宽比很小的情况下,占宽比的结果与扫描电子显微镜结果一致,但在占宽比较大的情况下,占宽比结果偏差较大。这是因为在占宽比较大时,其槽形与矩形偏差变大。以 6 号样品为例(见图 9)以腰部宽度来计算占宽比显然结果会偏大,但从整体光栅齿平均宽度来看,结果是接近的。因此匹配得到的占宽比反映的是光栅齿平均宽度与周期的比。

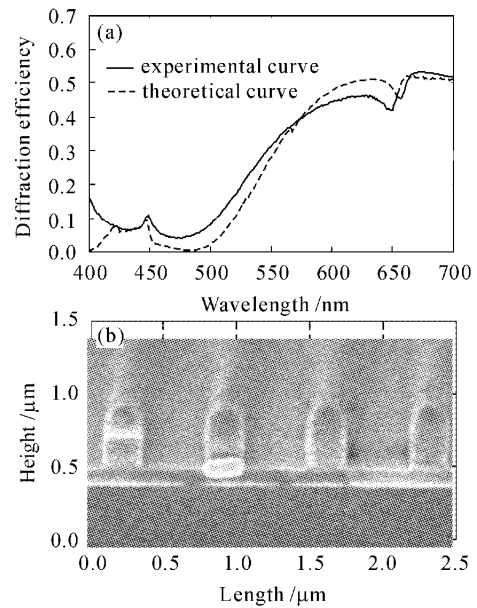


图 9 6号样品图形匹配结果(a)和扫描电子显微镜照片(b)

Fig. 9 Matching result (a) and SEM picture (b) of sample 6

表 1 测量数据

Table 1 Data collected

Sample	Groove depth / μm	Duty cycle /%	Std	
1	Matching	0.34	17	0.0187
	SEM	0.34	19	
2	Matching	0.30	20	0.0329
	SEM	0.30	21	
3	Matching	0.42	21	0.0234
	SEM	0.41	23	
4	Matching	0.42	25	0.0491
	SEM	0.41	25	
5	Matching	0.36	17	0.0405
	SEM	0.36	18	
6	Matching	0.42	31	0.0474
	SEM	0.42	36	

4 结 论

为了能够无损检测镀铬光栅掩模的槽形参量,采用了光谱检测、图形匹配的方法。该方法能够准确测量小占宽比条件下的光栅掩模的占宽比和槽深。在占宽比较大,槽形与矩形相差较大的情况下,仍然能准确地测量槽深和占宽比,此时占宽比反映的是光栅齿平均宽度与周期的比。因此,该方法完全能够满足离子束刻蚀对光刻胶光栅掩模槽深和占宽比的测量要求。

参 考 文 献

- Xu Xiangdong, Hong Yilin, Fu Shaojun *et al.*. Holographic ion beam etched diffraction gratings [J]. *Physics*, 2004, **33**(5):340~344
徐向东,洪义麟,傅绍军等. 全息离子束刻蚀衍射光栅[J]. *物理*, 2004, **33**(5):340~344
- Chen Genxiang, Cheng Meiqiao, Ge Huang *et al.*. Fabrication of zero-order null silica phase mask for 248 nm KrF excimer laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(7):623~626
陈根祥,程美乔,葛 璜等. 248 nm KrF 准分子激光零级抑制石英相位掩模器的研制[J]. *中国激光*, 1997, **A24**(7):623~626
- Wan Hua, Chen Xinrong, Wu Jianhong. Study on the characteristics of multilayer dielectric grating profile by the rigorous coupled-wave method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9):1275~1280
万 华,陈新荣,吴建宏. 利用严格耦合波方法研究多层介质膜光栅掩模特性[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9):1275~1280
- Xu Xiangdong. Fabrication of VUV and soft X ray diffraction gratings by holographic ion beam etching technique [D]. University of Science and Technology of China, 2001
徐向东. 全息离子束刻蚀真空紫外及软 X 射线衍射光栅研究[D]. 中国科学技术大学, 2001
- Wang Zhanshan, Ma Yueying, Lü Junxia *et al.*. Experimental vestigation of X-ray Bragg-Fresnel optics [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(7):993~996
王占山,马月英,吕俊霞等. X 射线布拉格-菲涅耳光学元件的实验研究[J]. *光学学报*, 1999, **19**(7):993~996
- Yan Hong, Lin Xiangzhi, Cui Xiaoming *et al.*. Single mode optaical fibre Bragg reflective filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(4):381~387
闫 宏,林祥芝,崔晓明等. 单模光纤布拉格反射滤波器[J]. *光学学报*, 1994, **14**(4):381~387
- J. R. McNell, S. S. H Naqvi, S. M. Gaspar *et al.*. Scatterometry applied to microelectronics processing-part 1 [J]. *Solid State Technol.*, 1993, **36**(3):29~30, 32
- S. Sohail H. Naqvi, John R. McNeil, Richard H. Krukar *et al.*. Grating parameter estimation using scatterometry [C]. *SPIE*, 1993, **1992**:170~180
- Conrad, Edward W. Paul, David P. *et al.*. Method and apparatus for measuring the profile of small repeating lines [P]. United States Patent 5,329,963, 1999
- Hsu-Ting Huang, Fred L. Terry Jr.. Spectroscopic ellipsometry and reflectometry from gratings (scatterometry) for critical dimension measurement and in situ, real-time process monitoring [J]. *Thin Solid Films*, 2004, **455-456**:828~836
- Xinhui Niu, Nickhill Jakatdar, Junwei Bao *et al.*. Specular spectropic scatterometry [J]. *Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2001, **14**(2):97~111
- Susan M. Gaspar Wilson, S. Sohail H. Naqvi, John R. McNeil *et al.*. Metrology of etched quartz and chrome embedded phase shift gratings using scatterometry [C]. *SPIE*, 1995, **2439**:479~494
- John R. Marciante, Nestor O. Farmiga, Jeffrey I. Hirsh *et al.*. Optical measurement of depth and duty cycle for binary diffraction gratings with subwave length features [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(16): 3234~3240
- M. G. Moharam, Drew A. Pommert, Eric B. Grann. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings; enhanced trasmittance matrix approach [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(5):1077~1086