

文章编号: 0253-2239(2006)05-0767-6

利用导波耦合角度实时控制光刻胶光栅掩模的占宽比^{*}

林 华 李立峰 曾理江

(清华大学精密仪器系 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 研究一种控制多层介质膜上的光刻胶光栅掩模占宽比(线宽与周期之比)的新方法。该方法基于下面的原理:如果某泄漏模在包层中的隐失尾较强,那么它的等效折射率受光刻胶光栅占宽比变化的影响就大,从而可以利用耦合角度来实时控制光栅占宽比。在光栅制作的显影阶段,采用实时监测技术,根据耦合角度和占宽比之间的关系预设入射光角度,在出现共振反常的时刻停止显影来控制占宽比。实验结果表明,固定适当的入射角度可以得到特定的占宽比;改变入射角度,占宽比按照预计的规律变化,因此定性地验证了这种占宽比控制方法的可行性。文中给出了监控装置和具体的实验方法,并讨论了误差来源和影响。

关键词: 物理光学; 光刻胶光栅; 光栅波导; 占宽比; 实时监控技术

中图分类号: TH74 文献标识码: A

Controlling the Duty Cycle of Photoresist Gratings by Setting the Guided-Wave Coupling Angles in Monitoring of Photoresist Development

Lin Hua Li Lifeng Zeng Lijiang

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: A new technique for controlling the duty cycle (ratio of ridge width to period) of photoresist gratings made on top of a multilayer dielectric stack is studied. It is used in conjunction with the real-time monitoring technique during photoresist development, and based on the principle that the effective refractive index of the leaky mode that has a strong evanescent tail in the cladding varies with the duty cycle of the grating situated at the interface between the top dielectric layer and the cladding. By applying the relationship of the coupling angle and duty cycle, a desired duty cycle can be obtained by terminating development when the leaky mode is excited under a preset incident angle. The experimental results showed that the duty cycle of the resulting grating can be adjusted by changing the incident angle. The work preliminarily establishes the feasibility of the technique. Experimental setup and procedure are presented, and the error sources and their influences are discussed.

Key words: physical optics; photoresist grating; grating waveguide; duty cycle; real-time monitoring technique

1 引 言

高衍射效率的多层介质膜光栅是实现大功率激光脉冲压缩的关键元件^[1~3]。因为这种光栅在工作状态只有一个非零的衍射级次,所以它的衍射效率主要依赖于槽深和占宽比。其制作方法一般是采用离子束刻蚀方法,即先制作出浮雕型的全息光刻胶光栅掩模,再通过离子束刻蚀把图形转移到介质膜层中。离子束刻蚀光栅的槽深在一定程度上可以通过控制

刻蚀时间来调节,而离子束刻蚀光栅的占宽比则主要依赖于光栅掩模的占宽比,很难进行控制和调整,因此,有必要对光栅掩模的占宽比进行控制。

为了使得做出的光栅掩模具有所需要的占宽比,一种可能的处理方法是在光刻胶光栅掩模做好后,先对掩模进行等离子灰化处理,然后进行离子束刻蚀。但这种方法在牺牲掩模高度的前提下,只能在一定程度上使占宽比减少,没有从根本上解决对

^{*} 国家 863 计划资助课题。

作者简介: 林 华(1968~),女,山东乳山人,博士,主要从事光栅设计、制作和应用,光学检测,光学传感器研制方面的工作。E-mail: greatlin02@gmail.com

收稿日期: 2005-03-20; 收到修改稿日期: 2005-06-01

光刻胶掩模占宽比的控制问题。赵劲松等^[4]采用实时监测技术,先保证玻璃基片上的光刻胶光栅槽底干净无残胶,然后对占宽比进行调控,根据停止显影点与显影衍射效率监测曲线最后一个峰值的距离来控制占宽比。虽然这种方法能保证显影到槽底,但是由于在最后一个峰值之后显影监测曲线没有明显的特征点,而且曲线形状与胶厚有关,胶厚未知或显影中胶厚减薄都会增加停显点的判断难度,因此占宽比控制的精度不理想。

由于缺乏有效的光栅掩模占宽比控制方法,目前普遍采用的制作工艺是先使用扫描电子显微镜(SEM)对同一批掩模光栅进行抽样测量,当样品光栅的占宽比满足要求时,再对其它光栅掩模进行离子束刻蚀。虽然这种方法技术上比较成熟,但使用起来费时费力并损伤基片,对于小批量的光栅制作成本太高,且被刻蚀光栅掩模的占宽比也会和样品光栅有差别,难以保证刻蚀后的光栅质量。为克服扫描电子显微镜方法的缺点,人们一直在寻找无损、快速的测量方法。在微电子加工行业,比较成功的微小尺寸线宽的测量方法是散射方法^[5~7]和不同衍射级次光强的比值方法^[8,9]。但是由于多层介质膜光栅掩模的光谱和角谱变化规律复杂,并且需要散射仪在很大的角度或波长范围内进行测量,使得散射方法很难应用到实时的占宽比监控中。而光强比值方法,因为需要至少两个非零衍射级次同时存在,所以测量的光栅周期不能比测量波长小;同时,该方法要求槽深已知,并且在所关心的占宽比范围内,衍射光强比值是占宽比的单值函数,两者的关系曲线的斜率相对较大,否则,结果会不准确。

针对多层介质膜上的光刻胶光栅,最近,李立峰等^[10]提出了一种占宽比测量的新方法。该方法的原理是,在包层中有较强的隐失尾的泄漏模的等效折射率随光刻胶光栅占宽比的变化而变化,从而使光栅占宽比的变化可以明显地反映在耦合角度的变化上。把测量得到的泄漏模的耦合角度与已知的耦合角度和光栅占宽比之间的关系进行对比,就可以确定光栅的占宽比。这种方法的好处是:1)对胶厚(即槽深)不敏感,2)被测光栅周期可以比测量波长短,3)只需要精确测量耦合角度,而不需要光强的绝对或相对测量。但该文作者只是做了成品光栅的被动测量,而没有直接去制作出占宽比满足要求的光栅。

本文把文献^[10]的原理应用到光栅掩模制作中,通过实验方法研究利用耦合角度在显影中主动

控制多层介质膜上的光刻胶光栅掩模占宽比的可行性。显影过程是一个动态过程,不可能象一般的测量那样允许重复测量多次来保证光强测量的精确度,并且为了避免再曝光,不能使用短波长的蓝绿光监测,所以该方法的上述三个优点对短周期的介质膜光栅的制作意义尤为突出。

2 占宽比控制原理

多层介质膜光栅是通过多层介质膜系来提供高的反射率,从而达到高的衍射效率。因为其中存在高折射率的介质层,所以多层介质膜光栅基片相当于一个多层膜平面波导。对于给定的光波长,一个平面波导可以支持有限个导波模,也称束缚模。所谓束缚是指模式所携带的能量被束缚在波导中,在波导外其电场强度以指数形式很快衰减,成为隐失波。如果平面波导表面有皱折(如光栅),则会发生辐射损耗,导波模变成为泄漏模^[11],其在波导中的场强随传播距离衰减。因为受到光栅的周期结构调制,这些由波导中泄漏出来的光能的传播方向应满足下式:

$$n_c \sin \theta_m^{(i)} = N^{(i)} + m\lambda/d, \quad (1)$$

其中 $N^{(i)}$ 为光栅波导的第 i 阶模的等效折射率的实部, m 是衍射级次, d 为光栅周期, λ 为导波在真空中的光波长, n_c 为衍射光所在媒质的折射率, $\theta_m^{(i)}$ 为对应第 i 阶导波模的 m 级衍射级次的衍射角,称为耦合角度。

光栅波导的 $N^{(i)}$ 与原来的平面波导的等效折射率会稍有差别,差别程度大小与光栅的位置和模式的电场分布有关。对于在光栅所处的位置有较强的电场强度(大的隐失尾)的模,光栅参量变化影响相对比较大,使得对应不同的占宽比的耦合角度差别较大,但是耦合角度几乎不受槽深影响^[10]。

以上讨论是假设泄漏波已经存在于波导中,反之,当入射激光束扫过耦合角度时,会激发起泄漏波,此时各衍射级次(包括0级)的光强会发生突变,这种现象称为光栅的共振反常。显影时,随着光栅槽底部的光刻胶的剥蚀,那些在光栅所坐落的位置有大的隐失尾的泄漏模的等效折射率会发生较大的变化。对某一束固定方向的入射光,如果光栅的槽形变化恰好使得光栅的等效折射率满足耦合条件,同样会激发起泄漏波,各级次衍射光的能量也会重新分配而发生急剧跳变。

因此,若已知耦合角度与占宽比的关系,把入射光角度预先设定在对应所需要的占宽比的耦合角度

上,在泄漏波出现时停止显影,就可以控制占宽比。该方法的好处是只需要监测到衍射光强跳变点,而不需要测量具体的衍射光强,并且被监测光栅的周期可以比监测波长短。

3 理论计算分析

在具体描述占宽比监控实验前,我们先从理论上确定基本的实验参量。我们要制作的介质膜光栅的膜系结构为 $S|H_1L_1(H_1L_2)^9H_1L_3H_2|C$, 其中 S 和 C 分别代表基底(玻璃)和包层(光栅所在媒质); H 和 L 分别代表组成高反射率的多层介质膜系的高和低折射率介质,不同的下标表明膜层厚度不同。在显影时,包层为显影液,图 1 中的方齿形折线给出了该膜系的折射率分布情况,横坐标 0 点对应膜系中 S 与 H_1 的界面。

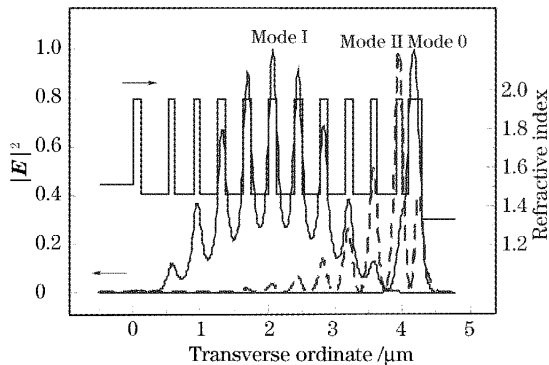


图 1 多层介质膜基片的折射率分布以及导波模 (TE 模, 632.8 nm) 的归一化横向电场分布

Fig. 1 Refractive-index distribution of the multilayer dielectric stacks that were used as substrates of the photoresist gratings and normalized electric field distribution of three selected TE guided-wave modes

我们分别采用文献[12]和[13]的方法计算介质膜平面波导中的模式分布和光栅波导耦合角度。当入射激光为 He-Ne 激光时(波长 632.8 nm, TE 模偏振,文中下面所指入射光参量均同此),该膜系可以支持共 12 个导波模,其中只有第 0 阶和第 11 阶模式在包层中有较大的隐失尾,因此,与其它阶模相比,光刻胶光栅的存在将对它们产生较大的扰动,它们的等效折射率会强烈地依赖于光栅的占宽比。图 1 给出了一些导波模式的归一化横向电场分布,可以看出第 1 阶模在包层的隐失尾要远小于第 0 阶和第 11 阶模。假设光栅周期为 675.7 nm,光刻胶折射率取 1.65,图 2 给出了第 0 阶模的-2 级耦合角度(绝对值)随光栅占宽比的变化情况。

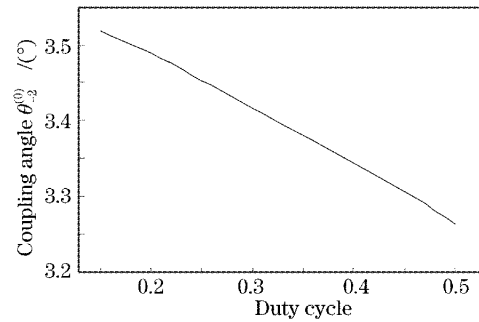


图 2 第 0 阶模-2 级耦合角度随光刻胶光栅占宽比变化关系

Fig. 2 Coupling angle of the 0th mode as function of duty cycle of the photoresist gratings made on top of the dielectric multilayer stacks

从理论上讲,第 0 阶模和第 11 阶模都可以用于控制占宽比。进一步分析表明第 0 阶模的耦合角度与其它阶模的耦合角度差别较大,容易与其它阶模区分开来,例如 $\theta_2^{(0)}$ 的绝对值约为 3° ,而第 1 阶到第 11 阶模的-2 级耦合角度分布在 9° 到 14° 之间。又因为比起第 0 阶模的其它耦合级次, $\theta_2^{(0)}$ 较小,从垂直入射开始调节入射角,第一个出现的模就是第 0 阶模,非常容易识别,所以我们选择 $\theta_2^{(0)}$ 做监测。以下凡耦合角度均指 $|\theta_2^{(0)}|$ 。该耦合角度随占宽比的增加而减小,当占宽比由 0.15 变化到 0.5 时,它由 3.5° 变化到 3.2° 。由此推算,如果占宽比控制精度要达到 0.05,耦合角度测量精度应达到 $2.5'$,需要的转台精度应好于 $2.5'$ 。这样的转角精度,一般的精密转台都是可以达到的。

下面我们来分析衍射效率随显影过程的变化情

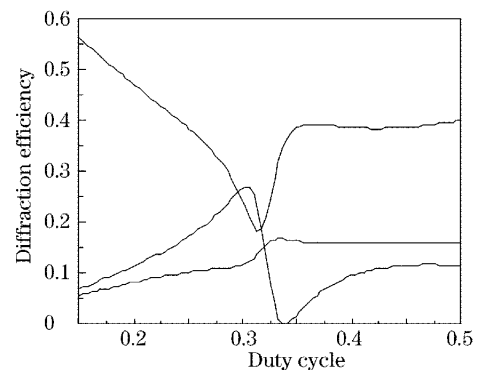


图 3 衍射效率和占宽比变化之间的关系。入射角度是 3.4° ,在占宽比为 0.32 时出现光栅共振反常现象

Fig. 3 Relationship between diffraction efficiency and duty cycle. Beam incident angle is 3.4° , and grating anomaly of resonance type occurs when duty cycle approaches 0.32

况。根据经验模型^[4],我们假设显影过程中光栅的槽形始终为矩形,显影初期占宽比保持为 0.5 不变,而槽深逐渐增加;当显影到槽底后,占宽比开始逐渐减小。我们主要考察衍射效率随占宽比的变化情况,光栅衍射效率计算采用傅里叶模法^[14]。图 3 给出了入射角为 3.4° 时的计算结果,这里光刻胶厚度取 500 nm。从该图可以看到在占宽比为 0.32(对应耦合角度为 3.4°)附近,衍射效率出现骤变。如果入射角在一定范围内增大或减小,骤变点(即跳变峰或谷)将向占宽比减小或增大的方向移动,其对应关系与计算得到的耦合角度和占宽比关系相符。因此,通过监测衍射光强,在光强出现骤变时停止显影可以控制掩模占宽比。

4 实 验

4.1 实验装置和方法

我们的显影监控装置主要包括以显影罐为主体的显影装置、转台、激光器以及探测系统,其原理如图 4 所示,图中光栅栅线垂直纸面。显影罐为圆柱形玻璃罐,光栅可以通过专用夹具与显影罐精确重复定位;显影罐轴心位于光栅面内并与光栅栅线平行。显影罐固定在转台上,转台转轴与显影罐轴线重合,并垂直于光学平台。转台转角读数精度为 $1'$ 。由 He-Ne 激光器发出的波长为 632.8 nm、TE 模偏振的激光入射到位于转台轴心的光栅表面上,激光光束与光学台表面平行,光束发散角(全角)为 1 mrad。光栅到激光器距离约 600 mm,转动转台可以调节光栅栅面与入射激光的夹角 θ 。考虑到衍射光强度和探测器灵敏度以及探测器的摆放方便,我们选择监测近似对称的 ± 1 级透射光。同时,我们在反射光方向设置探测屏,目视观察反射 0 级和 -1 级的衍射光。以 0 级衍射光在探测屏上的位置作为重复定位的参考点,保证每次安装基片时 0 级衍射光在屏上的位置不变。设反射 0 级位置的判断

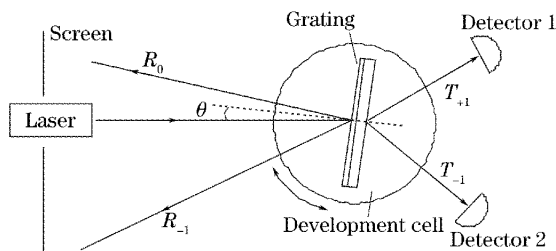


图 4 显影监测装置简图

Fig. 4 Schematic diagram of the experimental setup for development monitoring

误差为 0.5 mm,若要重复定位角度误差小于 0.02° (对应占宽比误差小于 0.02),光栅平面与参考定位点距离应大于 700 mm。

因为实际的光栅参量与理论值会有差异,我们通过样片设置耦合角度。即先用同批次基片制作出一片光栅作为样片,样片光栅的周期同要制作的光栅一样。把样片光栅按照显影方式放置,但此时显影罐中是去离子水而不是显影液。转动转台使入射光垂直入射到光栅表面。缓慢转动转台改变入射光与光栅夹角,调节到激发起第 0 阶泄漏模的角度。第 0 阶模的 -2 级衍射为后向衍射,所以波导中被激发起的光波的传播方向与入射光波矢在光栅面上的投影的方向相反。当入射角扫过耦合角度时,可以看到在耦合点处与入射光方向相反的一侧出现彗尾状的泄漏波;另外当耦合发生时,耦合点附近的光栅表面会变亮^[10],同时在观察屏上很可能会看到由光栅表面投射出的亮弧线。入射角度设定好后,锁定转台,在探测屏上记录下相应的反射 0 级的位置,作为光栅重复定位参考点;把水换成显影液进行其它光栅的显影。

在显影初期,透射 ± 1 级衍射效率逐渐增加(实时监测曲线图 5 给出了 $+1$ 级的变化情况),在这个阶段主要是槽深增加,当显影到槽底后,衍射效率达到峰值附近;此后,衍射效率随占宽比变化,当满足耦合条件时,发生共振反常现象,衍射效率发生跳变(这种跳变可能是尖峰也可能是低谷),此时停止显影。当曲线出现跳变时,探测屏上也可以看到导波投射出的亮弧线,说明确实是出现光栅共振反常。

这里说明一点,水的折射率与显影液的折射率有微小差别,我们测量得到去离子水的折射率为

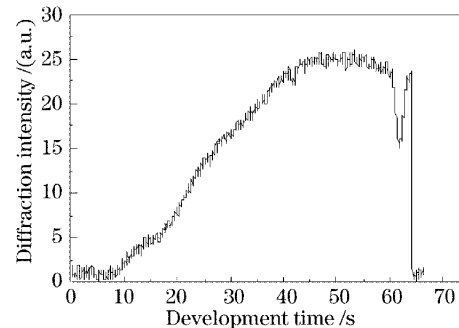


图 5 透射 $+1$ 级显影监测曲线。图中衍射效率跳变的位置表明出现共振反常,此时停止显影

Fig. 5 Development monitoring curve of the $+1$ st transmitted order. The grating anomaly of resonance type occurs at the resonance area, and development is stopped right after the anomaly occurs

1.333(室温下),而显影液(具体参量见下节)的折射率为 1.337,由此引起的占宽比绝对误差约为 0.02,制作出的光栅会比调试用的光栅的占宽比稍小,但一般情况下,这种误差是允许的。若要得到与调试用的光栅相同占宽比的光栅,可以适当把角度稍稍转小。

4.2 实验结果

曝光采用 He-Cd 激光,波长为 441.6 nm,TE 模偏振,标称功率为 180 mW,曝光时间为 140 s。光刻胶为 Shipley 9912 正性光刻胶。显影液是 Shipley 351,按照显影液与去离子水的体积比为 1:4 稀释。光栅周期为 675.7 nm,测量精度 0.4 nm。在发生光栅共振反常时停止显影,然后用扫描电子显微镜拍照光栅槽形,根据扫描电子显微镜图片测量光栅占宽比。图 6 给出了其中一片光栅的扫描电子显微镜图片。

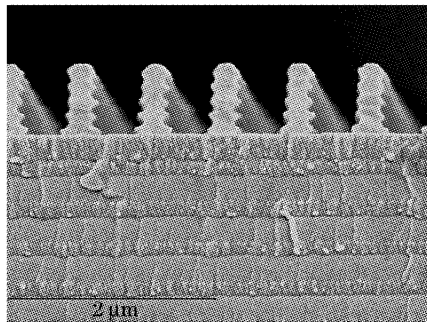


图 6 实验中得到的典型光栅的电子扫描显微镜图片

Fig. 6 SEM picture of a typical grating sample

我们统计了在入射角为 2.6° 下得到的光栅的占

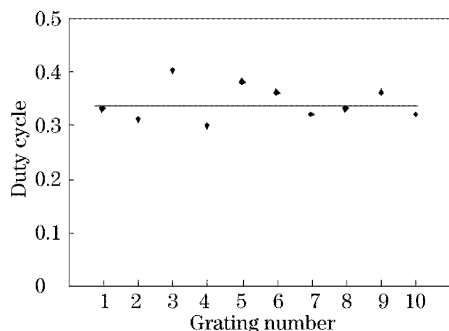


图 7 在导波出现时刻停止显影得到的光栅占宽比分布。入射角为 2.6° 。光栅编号按槽深从小到大的顺序排列;图中横线位置为占宽比的平均值

Fig. 7 Duty cycle distribution of gratings whose developments were stopped when guided waves occurred. Incident angle is 2.6° . Grating number arranged in increasing order of groove depth. Solid line represents the mean value of the duty cycles

宽比,占宽比分布见图 7。这 10 片光栅的占宽比的统计平均值为 0.34,标准偏差为 0.03。我们的实验结果表明利用耦合角度实时控制占宽比的方法是可行的。显影后的光刻胶光栅槽深为 480~670 nm,可见槽深对占宽比的控制没有什么影响。

由第 3 节分析我们知道,当入射角度增加时,在出现共振反常的时刻停止显影,制作出的光栅的占宽比较小,反之占宽比较大。为验证此分析结果,我们有意识地改变入射角度,仍在衍射效率发生跳变后停止显影。为排除基片差异和角度设置误差影响,我们重点考察同一基片在不同入射角度(角度差大于 0.2°)下得到的占宽比情况。基片 A 在入射角为 2.1° 时,发生反常现象后停止显影,得到的占宽比为 0.5,而入射角增加到 2.6° 时,得到的光栅占宽比为 0.32;基片 B 在入射角为 2.6° 时发生反常现象后停止显影,得到的占宽比为 0.4,而入射角增加到 3° 时,得到的占宽比为 0.3。结果表明如果增大入射角度,可以得到较小的占宽比,即光栅的占宽比按照预计的趋势变化。

4.3 实验误差分析和讨论

占宽比控制实验误差主要来源于以下几个方面:

1) 占宽比测量误差。从光栅的扫描电镜图片可以看到存在驻波现象,光栅槽形不是严格的矩形;同时,扫描电子显微镜样片的镀金厚度以及拍摄角度和图片的清晰度等因素,也使得通过扫描电子显微镜图片估计光栅的占宽比存在一定的误差。对同一样品的扫描电子显微镜图片多次测量结果表明,根据扫描电子显微镜图片测量占宽比的不确定性为 0.02。另外,我们的曝光光强不是非常均匀,光栅基片不同位置显影结果会有所不同。我们尽量使扫描电子显微镜测量点靠近监测点以反映监测点的情况,但不能保证监测点和扫描电子显微镜采样点是一个位置,由此会引起误差。

2) 耦合角度依赖于介质膜层厚度和折射率,所以基片之间的差异以及基片本身的不均匀性会引起占宽比控制误差。因为第 0 阶模的电场强度峰值处在顶层氧化铪中,由此判断顶层材料氧化铪参量变化对占宽比控制影响较大。氧化铪的折射率相对比较稳定,所以我们只考虑由厚度引起的差异。对于同批次镀膜的基片,可能导致顶层氧化铪变化约 1%,折算到占宽比绝对误差为 0.03。

3) 入射角度误差。定位精度误差引起的角度误差折算到占宽比绝对误差为 0.02。

因为实际的光栅基片参与与计算值可能有差异,所以理论计算只给出变化趋势,实际应用中占宽比的控制规律需要标定。

5 结 论

本文针对具体的多层介质膜光栅,利用光栅占宽比和泄漏模耦合角度的关系,通过预设入射光角度,在显影过程中观察到了光栅共振反常现象并在此时停止显影。对固定入射角度,得到了特定的占宽比,改变入射角度,占宽比按照预计的规律变化,定性验证了通过占宽比和耦合角度的关系控制光刻胶掩模光栅占宽比的可行性。该方法的优点是:1)对胶厚不敏感,2)被监测光栅的周期可以比监测波长短,3)只需要精确测量耦合角度,而不需要光强的绝对或相对测量。本方法对其它具有导波层结构的全息光刻胶光栅的制作具有借鉴作用。

致谢 本文使用的多层介质膜基片由中科院上海光机所薄膜中心提供,在此作者对他们的支持表示感谢。周倩同学和王惠芝师傅分别在扫描电子显微镜图像和光刻胶基片制备方面提供了帮助,本文作者对他们的协助表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Shore B W, Perry M D, Britten J A *et al.*. Design of high-efficiency dielectric reflection gratings[J]. *Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(5): 1124~1134
- 2 Hehl K, Bischoff J, Mohaupt U *et al.*. High-efficiency dielectric reflection gratings; design, fabrication, and analysis[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(30): 6257~6271
- 3 Michael Perry. Multilayer dielectric gratings; increasing the power of light[J]. *Science & Technology Review*, 1995. 25~33 (<http://www.llnl.gov/str/09.95.html>)
- 4 Zhao Jinsong, Li Lifeng, Wu Zhenhua. Method for controlling groove depth and duty cycle of rectangular photoresist gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1285~1291 (in Chinese) 赵劲松,李立峰,吴振华. 一种控制矩形光刻胶光栅槽深和占宽比的方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1285~1291
- 5 Raymond C J, Murnane M R, Naqvi S S H *et al.*. Metrology of subwavelength photoresist gratings using optical scatterometry [J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1995, **B13**(4): 1484~1495
- 6 Coulombe S A, Minhas B K, Raymond C J *et al.*. Scatterometry measurement of sub-0.1 μm linewidth gratings[J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1998, **B16**(1): 80~87
- 7 Huang H T, Terry Jr F L. 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
- 8 Kleinknecht H P, Meier H. Linewidth measurement on IC masks and wafers by grating test patterns[J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(4): 525~533
- 9 Marciano J R, Farmiga N O, Hirsh J I *et al.*. Optical measurement of depth and duty cycle for binary diffraction gratings with subwavelength features[J]. *App. Opt.*, 2003, **42**(16): 3234~3240
- 10 Li Lifeng, Zeng Lijiang. Measurement of duty cycle of photoresist grating masks made on top of multilayer dielectric stacks[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(21): 1~7 (to be published)
- 11 Tamir T. *Integrated Optics* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1979. 93~101
- 12 Li Lifeng. Determination of bound modes of multilayer planar waveguides of integration of an initial-value problem[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(3): 984~991
- 13 Nevière M. *The Homogeneous Problem. in Electromagnetic Theory of Gratings* [M]. R. Petit ed., Berlin: Spring-Verlag, 1980. 123~157
- 14 Li Lifeng. Mathematical reflections on the Fourier modal method in grating theory. in *Mathematical Modeling in Optical Science*, SIAM (Society for Industrial and Applied Mathematics) Frontiers in Applied Mathematics, Eds. G. Bao, L. Cowsar, and W. Masters, SIAM, Philadelphia, 2001. 111~139