

1×11 亚波长结构 Dammann 光栅的研制

冷雁冰,董连和,孙艳军

(长春理工大学 光电工程学院,长春 吉林 130022)

摘要: 论文基于严格耦合波理论 (Rigorous Coupled-Wave Analysis, RCWA), 并采用遗传算法进行优化, 设计并制作了一种具有高衍射效率的亚波长结构 Dammann 光栅。光栅的分束比为 1×11, 最小特征尺寸为 0.95 μm, 衍射效率设计值达到 95%, 优于传统 Dammann 光栅约 15%, 且均匀性设计值小于 2%。论文采用电子束光刻直写技术和反应离子刻蚀技术在石英基底上制作出亚波长结构图形。实验结果表明, 电子束扫描曝光可以获得纳米级的图形分辨率。对石英基底的反应离子刻蚀中, 射频功率、工作气压及气体流量均对刻蚀速率和栅线的表面形貌产生不同程度的影响, 论文主要针对该问题进行了讨论。同时, 论文也对电子束光刻直写过程中产生的线宽误差因素进行了分析。

关键词: Dammann 光栅; 亚波长结构; 衍射效率; 均匀性

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)03-0812-06

Study on 1×11 Dammann grating with sub-wavelength structure

Leng Yanbing, Dong Lianhe, Sun Yanjun

(School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In this paper, a high-diffraction efficiency Dammann grating with sub-wavelength structure was designed and prepared based on the Rigorous Coupled-Wave Analysis (RCWA) theory and optimized by the genetic algorithm. The array number of diffractive spots was 11 and the minimum feature size achieved 0.95 μm. The design value of diffraction efficiency can achieves 95%, around 15% more than conventional Dammann grating while the uniformity can be less than 2%. By using Electron Beam Direct Writing and Reactive Ion Etching, the sub-wavelength structure was patterned on the silica basement. The experimental results show that the sub-wavelength structure with nanometer resolution can be patterned by electron beam scanning exposure. In reactive ion etching, the etching rate and the grating line-shape can be affected by radio frequency (RF) power, system pressure and gas flow, and the line-width error in Electron Beam Direct Writing was also analyzed.

Key word: Dammann grating; sub-wavelength structure; diffraction efficiency; uniformity

收稿日期: 2013-07-13; 修订日期: 2013-08-03

基金项目: 吉林省青年科研基金(20100111)

作者简介: 冷雁冰(1984-), 男, 博士生, 主要从事现金光学制造方面的研究。Email: custleng@hotmail.com

导师简介: 董连和(1953-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事现金光学制造与光学特种加工技术方面的研究。

0 引言

激光测距系统已广泛应用于工业及航空航天领域^[1-3]。在某些特殊应用中,为了实现系统的轻量化和小型化,同时增加系统设计的自由度,系统中分束器件的分束比、衍射效率及光斑均匀性指标显得至关重要。为了获得具有高衍射效率的二维光栅,先后出现了三种纯相位光栅,分别为连续相位光栅(Continuous Phase Grating, CPG)、多台阶相位光栅(Multiple Phase Grating, MPG)和二值相位光栅(Binary Phase Grating, BPG)。对于 CPG 而言, BPG 具有制作相对简单,加工费用相对较少的优点;而对于 MPG 而言,没有了制作过程中由多次对准产生的误差,而且结构更简单、均匀性更佳。这些优点使 BPG 在激光分束器件方面有更好的应用价值。传统的 Dammann 光栅作为典型的 BPG^[4-7],是基于标量衍射理论设计的具有特殊孔径函数的二值相位光栅,其对入射光波产生的夫琅和费衍射图样是一定数目点阵的等光强光斑,完全避免了一般振幅光栅由于 sinc 函数强度包络所引起的衍射光斑光强度不均匀分布,其衍射效率的最大值仅为 80%左右^[8],限制了其使用范围和进一步的发展。因此,文中研制了一种具有高衍射效率的 1×11 亚波长结构 Dammann 光栅,其衍射效率设计值达到了 95%。

1 亚波长 Dammann 光栅的设计

由于二维 Dammann 光栅可以看作是由两个方向正交的一维 Dammann 光栅组成的,因此只要研制出一维光栅,即可推广于二维光栅之中^[4]。文中基于 RCWA 法分析理论设计了一种亚波长 Dammann 光栅结构,并采用全局优化的遗传算法对其突变点坐标进行优化。

一维亚波长 Dammann 光栅结构如图 1 所示。

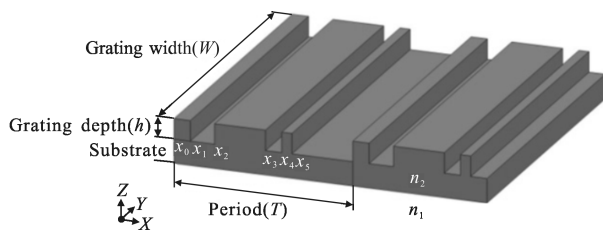


图 1 一维亚波长 Dammann 光栅结构图

Fig.1 Structure of one-dimensional sub-wavelength Dammann grating

一维光栅结构在 y 方向上保持不变,宽度为 W ;光栅沿 x 轴方向呈周期性分布,周期为 T ;同一个周期内有 k 个相位突变点,其坐标分别为 $x_1, x_2, \dots, x_{k-1}, x_k (0 < x_i < 1)$,对于图 1 而言,则一个周期内有 6 个突变点,其坐标为 x_1, x_2, \dots, x_5 ;光栅槽深为 h ;介质折射率为 n_1 ,光栅基底折射率为 n_2 。

当入射平面波以 θ 角入射到光栅上时,满足光栅方程:

$$n_1 \sin \theta_m - n_2 \sin \theta = \frac{m\lambda}{T}$$

式中: n_1 和 n_2 分别为入射介质和基底介质的折射率, m 为衍射级次, θ_m 为第 m 级的衍射角。由光栅方程可知,当平面波正入射(即 $\theta=0$)时,分束数为 N 的 Dammann 光栅,其周期需满足:

$$T > T_{\min} = \begin{cases} \frac{N-1}{2n_1} \lambda, N \text{ 为奇数} \\ \frac{N}{2n_1} \lambda, N \text{ 为偶数} \end{cases}$$

当 T 略大于 T_{\min} 时,光源通过光栅所产生的衍射级次中,只有有限个级次的光强度不为 0,即意味着光能量都集中在所需光束上,从而能够使光栅的总衍射效率得到大幅提升。适当调整光栅相位突变点坐标,即可得到尺寸小、衍射效率高、光强均匀性好的二值相位型光栅分束器件。由于光栅周期 T 取值很小,即特征尺寸达到亚波长量级时,标量衍射理论将不再适用,因此本文基于 RCWA 法分析亚波长 Dammann 光栅的衍射特性。RCWA 分析给出了光栅衍射电磁场边值问题的麦克斯韦方程组的精确解。

光栅的相位突变点坐标采用遗传算法进行优化,遗传算法是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局优化概率搜索算法。该算法具有跳出局部极值点的机制,可搜索全部解空间。遗传算法主要构成要素有:染色体编码方法、个体适应度评价、遗传算子及其运算参量。

针对波长 λ 为 $1.55 \mu\text{m}$ 的入射光源,设计初始相位突变点个数为 5^[9],设计结果参数如下:

光栅分束比为 1×11,周期数为 100,单个周期长度为 5.13λ ,同一周期内相位突变点个数为 5,光栅深度 1.510505λ ,突变点归一化坐标分别为 0.140105、0.397401、0.549784、0.709483、0.880499,设计总衍射效率为 95.20%,均匀性误差为 1.95%,最小特征尺寸为 0.61λ ,即 $0.95 \mu\text{m}$ 。

论文使用 VirtualLab 软件进行了模拟仿真,将光栅坐标值输入软件后,模拟的光栅结构如图 2 所示。

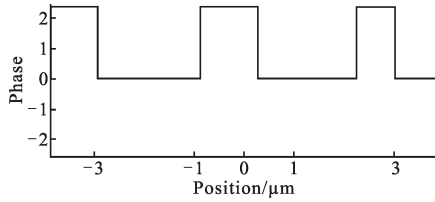


图 2 VirtualLab 模拟光栅结构图

Fig.2 Simulation graph of grating by VirtualLab

模拟计算出的衍射效率约为 95.03%,均匀性误差约为 1.99%,如图 3 所示。

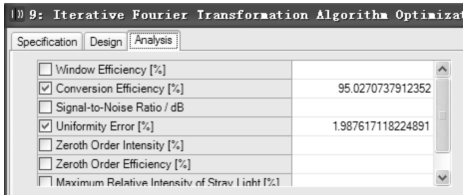


图 3 VirtualLab 模拟计算衍射效率和均匀性

Fig.3 Simulating results of efficiency and uniformity by VirtualLab

模拟出射场的光强分布如图 4 所示。

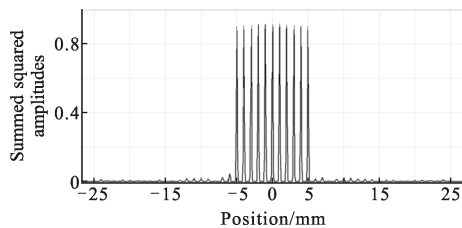


图 4 VirtualLab 模拟出射场结果

Fig.4 Simulating result of output field by VirtualLab

软件模拟结果与计算结果稍有出入,原因可能为计算方法和迭代次数不同所导致。

2 Dammann 光栅的制作实验

2.1 掩模版的制作

电子束光刻直写技术可以在计算机控制下直接产生所要求的图形,且易于修改,是迄今为止分辨率最高的一种实用曝光手段,广泛应用于微光学、微机械等微细加工领域。同时,电子束的束斑直径很小,在实验室条件下,已能将电子束聚焦成尺寸小于 2 nm 的束斑。而该实验所做亚波长光栅,其最小特征尺寸仅为 0.95 μm ,因此电子束光刻直写技术的加工精度

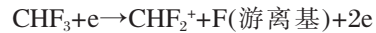
可以满足该实验的最小线宽要求,故该实验采用该技术进行了掩模版的制作。

该实验选用的光刻胶为 PMMA (poly methyl methacrylate)电子束光刻胶。掩模版制作的主要工艺过程为:喷胶-前烘-曝光-显影-后烘。喷胶使用 AltaSpray8 型喷胶机,将 PMMA 均匀喷涂在基片上。喷胶后,采用 WON-50 干燥箱烘烤,烘烤温度为 90 $^{\circ}\text{C}$,烘烤时间为 15 min。曝光使用 SDS-3 型电子束曝光机,曝光场为 0.775 mm \times 0.775 mm,加速电压为 20 kV。显影剂为 1:3 的 MIKB:IPA 的混合溶剂。显影后将基片再次放入高温干燥箱内进行后烘,时间为 20 min,温度为 130 $^{\circ}\text{C}$ 。

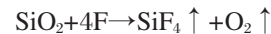
2.2 反应离子刻蚀制作光栅

反应离子刻蚀技术是一种物理作用和化学作用共存的刻蚀工艺,兼有离子溅射刻蚀和等离子化学刻蚀的优点,不仅分辨率高,而且刻蚀速率快。其刻蚀机理为:射频辉光放电,反应气体被击穿,产生等离子体。等离子体中的正负离子可与刻蚀表面发生化学反应;同时,离子在电场作用下射向样品表面,进行物理轰击。

实验采用 CHF_3 对石英基底进行刻蚀。 CHF_3 在反应室辉光放电发生的化学反应式为:



F 原子与 SiO_2 发生反应的化学式为:



SiO_2 分解出来的氧原子在高压下与 CHF_2^+ 基团反应,生成 $\text{CO} \uparrow$ 、 $\text{CO}_2 \uparrow$ 等多种挥发性气体,完成对 SiO_2 的刻蚀。

刻蚀在 ICP-801 型反应离子刻蚀机内进行,其中射频功率 350 W、工作气压 8 Pa、气体流量为 35 cm^3/min ,刻蚀速率达 0.7 $\mu\text{m}/\text{min}$ 。制得光栅最小特征尺寸为 0.95 μm ,基本与设计值相符。整个光栅制作流程图如图 5 所示。

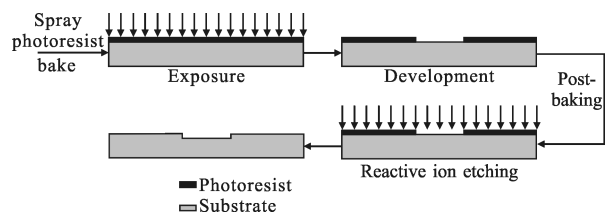


图 5 光栅制作流程图

Fig.5 Manufacturing process of Dammann grating

3 实验结果及分析

3.1 实验结果

实验中用 1 550 nm 激光器作为光源, 经过显微物镜扩束, 用平行光管得到平面光。从光栅出射的衍射光通过透镜在焦面上成像, 用一台 CCD 摄像机将结果导入计算机。经过衰减, 各衍射级次的光强可由计算机以灰度值读出并作数值处理。刻蚀深度可通过原子力显微镜测出。表 1 给出了测量结果与设计理论值的对比。在测量光栅的衍射效率时, 使用一个广角短焦透镜成像, 计算点光强与总光强的比值(分裂比)。各衍射级次的光强可用一长焦透镜得到。利用光栅效率与衍射级次光强灰度值, 得到归一化后的光强, 并将其用于计算评价均匀度函数。

表 1 实验结果分析

Tab.1 Analysis of experimental results

	Efficiency	Uniformity	Depth/ μm
Design value	95.2%	0.02%	2.341
Real value	93%	8.14%	2.366

实验得到分束后 9 个点如图 6 所示。

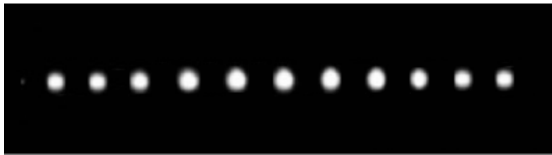


图 6 分束后 9 个点排列图

Fig.6 Spots diagram of the result

如图 6 所示, 边缘杂散光的衍射效果并不明显。采用 CSPM5500 原子力显微镜扫描对其剖面进行分析, 如图 7 所示。从图中可以看出, 光栅侧壁比较陡直, 且刻蚀深度基本保证在 2.3 μm 左右。

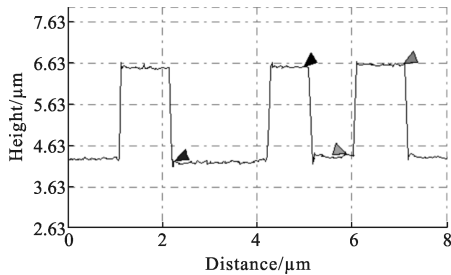


图 7 光栅剖面分析结果

Fig.7 Result of grating profile analysis

3.2 电子束扫描曝光过程中的邻近效应

当高能电子束照射到光刻胶上时, 很多电子产生了小角度前散射, 从而导致束斑变大。当电子进一步深入光刻胶到达基底材料时, 一些电子产生大角度散射, 即背散射, 这样使得电子深入到未预期曝光区域, 从而导致非曝光区域被曝光, 这种现象成为电子束的邻近效应。由于电子具有能量, 因此会使光刻胶部分过分曝光, 而部分曝光不足, 其影响范围可达 10 μm 量级, 将导致栅线宽度改变。通过适当增加加速电压的方法, 可以有效减小电子束的前散射和背散射电子对光刻胶成像的影响, 从而有效的抑制临近效应。由于该实验所做 Dammann 光栅图形只有三个槽型, 结构相对简单, 所以针对加速电压所做的改变将会在其他论文中给予阐述。

3.3 主要工艺参数对 RIE 速率的影响

对石英基片的反应离子刻蚀中, 射频功率、工作气压及气体流量均对刻蚀速率和栅线的表面形貌产生不同程度的影响, 从而影响光栅的衍射效率和均匀性等性能指标。

3.3.1 射频功率对 RIE 速率的影响

射频功率是控制刻蚀反应的主要因素之一。如图 8 所示, 当工作气压为 8 Pa、气体流量为 35 cm^3/min

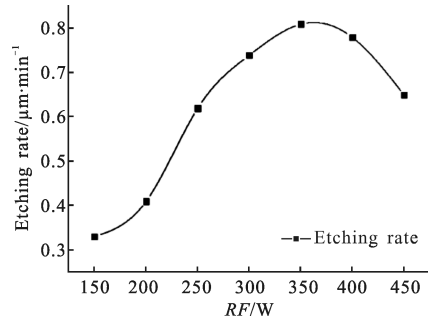


图 8 刻蚀速率与射频功率的关系

Fig.8 Relationship between etching rate and RF power

恒定不变时, 使射频功率在 100~350 W 范围内变化, 随着射频功率的增加, 刻蚀速率将呈非线性的增加。根据所得实验数据, 刻蚀速率在射频功率为 350 W 附近将达到峰值。这是由于射频功率增大时, 提高了等离子体的离化率, 增加了活性激发粒子的浓度, 从而使化学刻蚀作用大大增强; 同时也由于自由离子能量升高, 进而对基底表面的轰击作用增强, 使物理刻蚀作用也得到增强。但是, 当射频功率过高时(大

于 350 W),能够离化分解的分子数将达到饱和状态。此时,如果再继续增加射频功率,自偏压也会进一步增大,从而使刻蚀速度降低。实验同时发现,使用 CHF_3 气体对 SiO_2 进行刻蚀时,随着射频功率的增大,光栅表面也会越发变得粗糙、且更易烧焦变形,从而影响光栅槽型质量。

3.3.2 工作气压对 RIE 速率的影响

当射频功率 300 W,气体流量 $35 \text{ cm}^3/\text{min}$ 恒定不变时,工作气压对刻蚀速率的影响如图 9 所示。随着气压的增大,刻蚀速率将呈曲线变化。刻蚀速率从 3 Pa 时的 $0.4 \mu\text{m}/\text{min}$ 增加到 11 Pa 时的 $0.8 \mu\text{m}/\text{min}$,再降至 15 Pa 时的 $0.6 \mu\text{m}/\text{min}$ 。在气压为 11 Pa 刻蚀速率最快,说明在 11 Pa 时反应离子刻蚀把纯物理溅射和化学反应结合的最好。实验发现,低气压状态可改善刻蚀的不均匀性,这是由于气压较低时,气相粒子运动速度相对较快,从而降低了气相耗尽效应的影响。同时,过大的工作气压也不利于对基底的各向异性刻蚀。

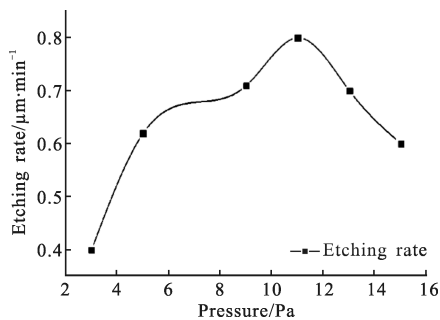


图 9 刻蚀速率与工作气压的关系

Fig.9 Relationship between etching rate and pressure

3.3.3 气体流量对 RIE 速率的影响

当保持射频功率 300 W,工作气压 8 Pa 恒定时,刻蚀速率与气体流量关系如图 10 所示。随着气体流量的增加,刻蚀速率会不断降低。这主要是由于随着气体流量的增加,将会增加分解得到的活性离子碰撞的几率,从而导致离子的能量损失,进而削弱了离子对 SiO_2 的物理轰击作用,使物理刻蚀效果削弱。反之,当气体流量增大时,活性粒子将会来不及与被刻蚀材料充分反应就被抽走,从而使反应气体没有被充分利用,即有效的活性反应离子数减少,进而限制了刻蚀速率。

此外,实验通过台阶仪对刻蚀前后的表面粗糙

度进行了测量,发现气体流量会直接影响刻蚀的均匀性。在刻蚀过程中如果气体流量较低,当基片中央区域的气相粒子耗尽时,基片边缘处将仍有大量的活性粒子未被抽走,从而导致边缘的刻蚀速率高于基片中部。因此,应该设定足够大的流量以及时弥补基片中央区域的气相耗尽效应,进而改善刻蚀的不均匀性。

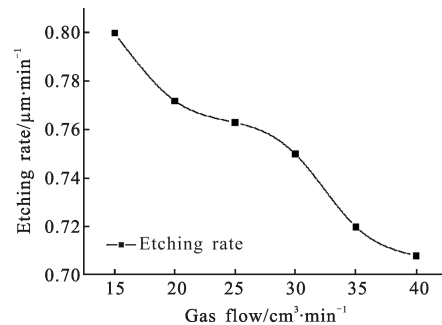


图 10 刻蚀速率与气体流量的关系

Fig.10 Relationship between etching rate and gas flow

4 结论

采用电子束光刻直写技术和反应离子刻蚀技术在石英基片上制备出衍射效率达到 93% 的亚波长结构 Dammann 光栅。电子束曝光过程中的邻近效应会对光栅线宽及光栅侧壁有影响,而反应离子刻蚀过程中射频功率、工作气压以及气体流量的变化都将对刻蚀过程产生影响,这些影响都会改变光栅的性能指标。实验表明,射频功率增加,刻蚀速率非线性增加,但当其大于 350 W 时不仅刻蚀速率会下降,且栅槽表面变得粗糙、易烧焦变形;工作气压在 11 Pa 时,离子刻蚀能把纯物理溅射和化学反应结合到最好,蚀刻速率最快;气体流量的增加会导致刻蚀速率的不断降低。

参考文献:

- [1] Di Huige, Huang Genghua, Shu Rong, et al. Calibration technology for maximum range of spaceborne lidar to point-target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (11): 2163-2167. (in Chinese)
狄慧鸽, 黄庚华, 舒嵘, 等. 星载激光雷达点目标最大测程标定技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2163-2167.
- [2] Zhang Dawei, Liu Zhi, Yang Yang, et al. 3D laser scanning technology based on right-angle reflection mode [J]. *Infrared*

- and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 443-447. (in Chinese)
张大威, 刘智, 杨阳, 等. 直角反射式三维激光扫描技术 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(3): 443-447.
- [3] Tang Jia, Gao Xin, Xing Qianglin, et al. Experiments on the measurement precision of asynchronous respond laser ranging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 939-943. (in Chinese)
唐嘉, 高昕, 邢强林, 等. 异步应答激光测距技术测量精度实验 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(3): 939-943.
- [4] Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Min, et al. Binary Optics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998: 55-179. (in Chinese)
金国藩, 严瑛白, 邬敏贤, 等. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 55-179.
- [5] Dammann H, Klotz E. Coherent optical generation and inspection of two-dimensional periodic structures [J]. *Opt Acta*, 1997, 24, 505-515.
- [6] Killat U, Rabe G, Rave W. Binary phase grating for star couples with a high splitting ratio [J]. *Fiber Integrat Opt*, 1982, 4: 159-167 .
- [7] Moharam M G, Gaylord T K. Diffraction analysis of dielectric surface relief gratings [J]. *J Opt Soc Am*, 1982, 72: 1385-1392
- [8] Wu Jun, Zhou Changhe, Cao Hongchao, et al. Beam splitting of a double-groove fused-silica grating under normal incidence[J]. *J Opt*, 2011, 13: 115703.
- [9] Zhou Changhe, Liu Liren. Numerical study of Dammann array illuminators[J]. *Appl Opt*, 1995, 34: 5961-5969.