

文章编号: 0253-2239(2006)07-1048-5

一种亚波长偏振分波/合波器的研制

张 亮^{1,2} 李承芳¹ 刘 文² 周立兵² 吴国阳² 王定理²

(¹ 武汉大学物理科学与技术学院, 武汉 430072
² 武汉邮电科学研究院光迅科技公司, 武汉 430072)

摘要: 针对传统偏振分束器窄波段、窄角度范围的不足,研制了一种在宽波段宽角度范围内具有 180°分光功能的偏振分束器/耦合器。该器件基于线栅偏振器和亚波长光栅结构原理设计,利用半导体工艺的刻蚀技术制作。利用一维金属线栅对入射电磁波的偏振响应和亚波长光栅仅存在零级衍射的特性,实现了较宽的通带宽度与可接受角度范围、极大的分光角度、高消光比和低插入损耗。实验测得透射、反射消光比均大于 20 dB,插入损耗小于 0.5 dB。通过自行搭建的微结构测试平台,测量了 p、s 光的透射率、反射率随入射角度变化的曲线,和严格耦合波理论模拟结果符合。深入分析了制作中的过刻蚀对性能产生的影响。

关键词: 集成光学; 偏振分束器; 反应离子刻蚀; 严格耦合波理论; 亚波长光栅; 消光比
中图分类号: TN256; O436.3 文献标识码: A

Development of Broadband Polarizing Beam Splitter/Combiner

Zhang Liang^{1,2} Li Chengfang¹ Liu Wen² Zhou Libing² Wu Guoyang² Wang Dingli²

(¹ College of Physics Science and Technology, Wuhan University, Wuhan 430072
² Accelin Technology Co. Ltd., Wuhan Institute of Post and Telecommunications, Wuhan 430074)

Abstract: To overcome the shortages of conventional polarizing beam splitters, narrow waveband and limited angle range, a polarizing beam splitter/combiner with wide waveband and angle range of 180° is developed. The device is designed with the principle of wire grid polarizer and subwavelength grating structure, and etched with semiconductor technique. Large pass width, acceptable angle and beam splitting angle, high extinction ratio and low insert loss are achieved based on that there exists only zeroth-order diffraction for the polarizing response of one-dimensional metal wire grid polarizer on the incident electromagnetic wave and subwavelength grating. The experiment verifies that the transmission and reflection extinction ratio is beyond 20 dB, insert loss below 0.5 dB. On the home-constructed microstructure testing platform, the transmissivity and reflectivity variation with the incident angle for the p and s components is obtained, which agrees well with simulated result by the rigorous coupled wave approach. The influence of excessive etching on the performance of the beam splitter/combiner during fabrication is analyzed deeply.

Key words: integrated optics; polarizing beam splitter; reactive ion etching; rigorous coupled wave approach; subwavelength grating; extinction ratio

1 引 言

偏振分束器是光网络组件中的重要器件,特别在光开关、光环形器和光隔离器等装置中。这些装置要求偏振分束器提供高消光比、宽广的入射光可接受角度和工作波长范围以及紧凑的体积。传统的

偏振分束器利用天然晶体的双折射效应(沃拉斯顿棱镜)或者多层膜结构的偏振选择性,偏振分束块(PBS cubes),性能不够理想。天然双折射晶体所固有的小分开角度决定了沃拉斯顿棱镜需要很大厚度才足以分开两个偏振态;多层膜结构作为其替代

作者简介: 张 亮(1980~),男,湖北武汉人,武汉大学物理科学与技术学院硕士研究生,从事微结构光学性质等的研究。
E-mail: liangliangz801021@yahoo.com.cn

导师简介: 李承芳(1946~),男,江西人,武汉大学物理科学与技术学院教授,博士生导师,主要从事信息光学方面的研究。
E-mail: chfli@whu.edu.cn

收稿日期: 2005-05-19; 收到修改稿日期: 2005-10-10

品^[1]利用自身较天然晶体几倍大的双折射特性,在很大程度上减小了厚度,但是制作这种多层结构过程较复杂;基于多层膜结构的偏振选择性只在一个较小的波长范围和角度范围内具有大的消光比^[2]。继 Ebbesen 发现亚波长金属孔/缝阵列奇异的透射增强效应以来^[3],亚波长结构受到越来越多的关注^[4,5],在最近的报导中,出现了基于准统计区域亚波长光栅的形式双折射原理的宽带偏振分束器^[6],具有高消光比,但却只在特定的入射角范围成立;含纳米尺度金属阵列的氧化铝膜^[7]具有类似金属线栅偏振器的偏振性质,但作为新型微偏振器件,透射率不够高。

在本文中,我们设计并制作了一种基于亚波长金属光栅的偏振分束器,它具有 180°的偏振分光功能,微小紧凑的自身体积,并有较大的入射角度和较宽的工作波长范围内适用,具有高消光比和低插损。通过严格耦合波理论优化了消光比和插入损耗等指标,讨论了金属膜厚度以及过刻蚀深度对性能的影响,比较了用铝、金两种不同材料制作的性能差异。通过实验制备了若干样品,样品的扫描电子显微镜(SEM)照片清晰地反映了其细微的结构。通过自己搭建的测试平台测试了样品在实际使用中的工作性能,并给出了性能随入射角在宽广范围内的变化曲线,与理论模拟结果符合。

2 理论设计和结构优化

图 1 给出了这种基于亚波长金属光栅的偏振分束器结构示意图,它由对入射光透明的基底和其上的金属栅条组成,栅条周期小于入射光波长。普通光入射到光栅表面后,金属表面的电子在 s 光(偏振方向平行于栅条)的作用下沿栅条方向自由振荡,反射同方向线偏振的电磁波,即反射光为 s 线偏振光;在垂直于栅条的方向上,由于光栅线宽远小于波长,电子在这个方向上的振荡受限,因此 p 光(偏振方向垂直于栅条)不被光栅反射,象通过电介质一样直接透射光栅。而在受限方向上振荡的表面波能量甚至可以“流入”栅条之间的狭缝,这种现象以及其讨论见于 Ebberson 在 Nature 上发表的实验发现^[3]和相关报导。这样就实现了普通光中振动方向相互垂直的两个偏振态 p、s 的分离。反之,将 p 光和 s 光逆原光路入射,则可以实现二偏振态的合波。

对于亚波长光栅,传统的标量衍射理论不适用,需要使用严格的矢量衍射理论来描述^[8]。(对于电介质结构,可以用等效折射率理论来简便分析,但仅仅

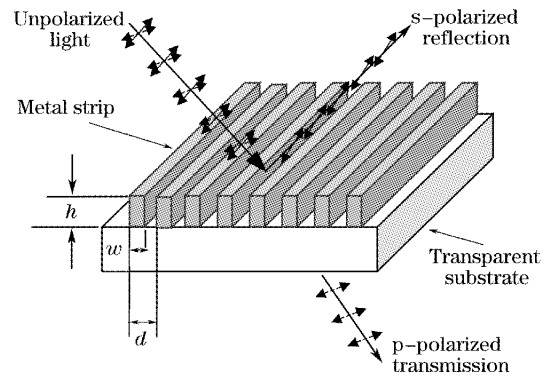


图 1 金属纳米光栅偏振分束器示意图, p 光透射, s 光反射

Fig.1 Schematic of metal-wire nanograting as a polarizing beam splitter for p-polarized light transmitted and s-polarized light reflected

在 $T/\lambda < 1/10$ 的准统计区域比较精确^[6]本文使用目前较成熟的严格耦合波方法^[9,10]。根据正入射下的衍射光栅方程 $d \sin \theta = m\lambda$, 对于亚波长光栅有 $d < \lambda$, 所以要使 $\sin \theta$ 有意义, 要求 $m=0$ (m 是衍射级次), 所以只存在零级衍射^[11], 斜入射情况下也能得到同样结论^[12]。通过计算得到光栅对 p 光和 s 光的透射率 (T_p, T_s) 和反射率 (R_p, R_s), 进而得到透射、反射消光比 $T_{\text{ext}} = 10 \lg(T_p/T_s)$, $R_{\text{ext}} = 10 \lg(R_s/R_p)$ 和透射、反射的插入损耗 $T_{\text{loss}} = 10 \lg(1/T_p)$, $R_{\text{loss}} = 10 \lg(1/R_s)$ 等指标。我们通过考察不同的光栅结构(包括周期, 填充比, 栅条高度)和不同波长范围对上述指标的影响来实现对光栅性能的优化。

周期相对于波长的大小决定光栅的基本属性。对于亚波长结构, 周期相对于波长越小, 亚波长结构的特性就表现得越明显, 同时适用的波长范围也就越大。计算发现, 一般 $1/10$ 波长的周期就可以获得很好的效果。不过实际制作出的周期大小受制作工艺的限制, 制作难度随周期的变小而加大。对于光通信波段, 光栅周期在 100~200 nm 之间较适合。

栅条的厚度的增大可以增加 s 光的反射率, 特别是在金属的透入深度附近表现得明显。但实际微结构制作中, 难以获得很大的深宽比, 因此对于既定的周期(特别是小周期), 栅条高度 3 倍于线栅宽度较合适。图 2 显示了栅条高度对性能的影响(消光比和插损), 入射波长 1550 nm, 光栅周期 140 nm, 占空比 $1/20$ 。图 2(a)表明, 当金属层厚度超过 40 nm, 可以使 p、s 光同时获得较低的插入损耗。厚度不足时将不能对电磁波产生足够的反射, 因此 s 光反射损耗较大。图 2(b)反映了消光比受金属厚度的影响: 随着金属厚度的增加, 透射消光比因为 T_s 的减小而增加。p

光绝大部分都能透射金属光栅,但在金属表面和金属一基底界面仍有反射产生,二反射光之间的相干叠加

结果将影响 p 光总的透射率和反射率,因此反射消光比受 R_p 的影响呈现轻微的周期性变化。

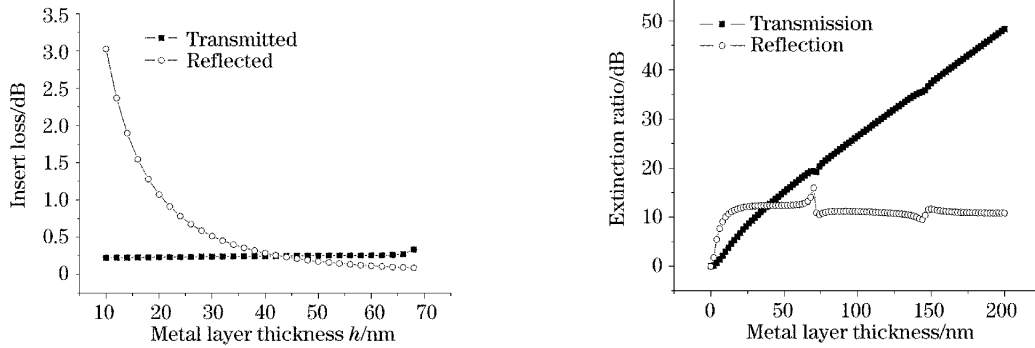


图 2 (a)p 光的透射损耗和 s 光的反射损耗随金属厚度的变化,(b)透射消光比和反射消光比随金属厚度的变化

Fig. 2 (a) Insert loss transmitted of p-polarized light and reflected s-polarized light as a function of the thickness of metal layer (b) polarizing extinction of ratios transmission and reflection as a function of the thickness of metal layer

占宽比(w/d)决定了既定周期下的线宽,对于 TM 波的表面振荡有一定的影响。填充比太小将导致 s 光的透射,过大则反过来降低了 p 光的透射率。计算表明, $w/d=0.6$ 适合本文的需要。

基于上述考虑,优化之后的参量为: $d=140$ nm, $h=200$ nm, $w/d=0.6$ 。在这样的结构下,其偏振分束特性在 $900\sim 1800$ nm 波段以及 40° 的偏转角范围内都体现出一致性,具有高消光比和低插损。我们进一步研究了实际制作中出现的过刻蚀情况下,过刻蚀深度对性能的影响,如图 3 所示。结果表明,过刻蚀深度周期性影响 p 光,可以利用适当的过刻蚀来调整 p 光的插损和提高透射消光比。

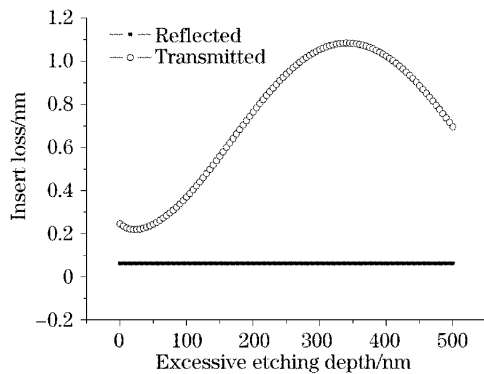


图 3 p 光的透射损耗和 s 光的反射损耗随过刻蚀深的变化

Fig. 3 Insert loss of transmitted p-polarized light transmission and reflected s-polarized light as a function of the excessive etching depth

3 实验制备

根据上面的设计结果,按如图 4 所示的过程制备。首先,以二氧化硅为基底,在上面利用真空溅射设备沉积一层金属(铝或者金),约 300 nm,作为后面光栅刻蚀的基础。然后在金属膜上用甩胶机涂覆 (spin)200~300 nm 的电子束感光胶 PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯),通过扫描电子束曝光的方法让 PMMA 曝光,显影后利用留存部分的 PMMA 作为掩膜对金属层进行反应离子刻蚀 (reactive ion etching),就得到了以二氧化硅为基底的亚波长金属光栅。其表面图案如图 5 所示,测得周期约为 150 nm,占宽比约为 0.6,栅条高度为 200 nm。

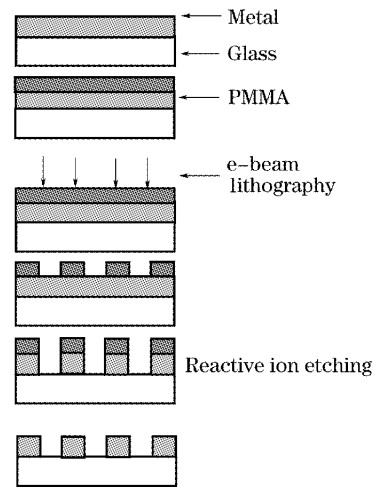


图 4 金属纳米光栅的制备方法

Fig. 4 Flow chart for fabrication of the metal-wire nanograting

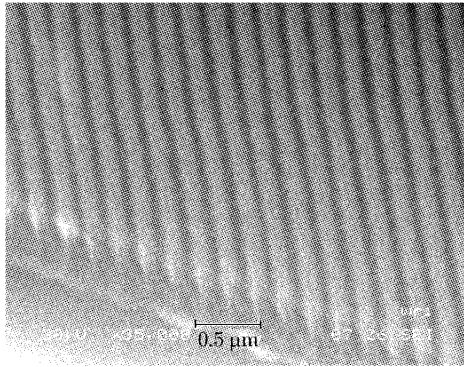


图 5 金属纳米光栅的扫描电子显微照片周期 150 nm, 占空比 0.6

Fig. 5 Scanning electron microscope photograph of the metal-wire nanograting with a period of 150 nm and duty cycle of 0.6

4 性能测试和结果分析

利用自搭建的光栅测试平台(如图 6 所示)进行实验样品的测试,因为普通的分光光度计不具备测量反射光及不同入射角情况下光栅性能的变化。我们使用 1550 nm, 1310 nm 等几个波长的激光器作为光源,考察样品在几个通信窗口下的性能,同时也可以和理论计算值做比较和验证。以 1550 nm 波长光源为例,通过偏振片起偏可分别得到 p, s 线偏振光,转动放置样品的刻度盘来改变入射角度。利用光功率计读出光强值。探头 1 测量透射光,探头 2 测量反射光,在探头 2 和样品之间放置一对相同的透镜,调整距离使样品上的入射点和探头 2 的接收点分别位于透镜的焦点处,这样即使转动角度变化时,探头 2 也可以在不需移动的情况下接收到反射光,如此可以极大地减小测量的操作和误差。入射光强可以通过移开样品直接由探头 1 测得。测量时角度转动的间隔是 5°。得到如图 7 所示的结果,

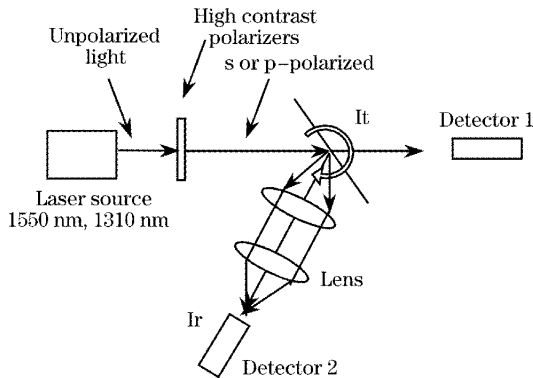


图 6 实验装置示意图

Fig. 6 Experimental arrangement

与理论模拟值吻合。

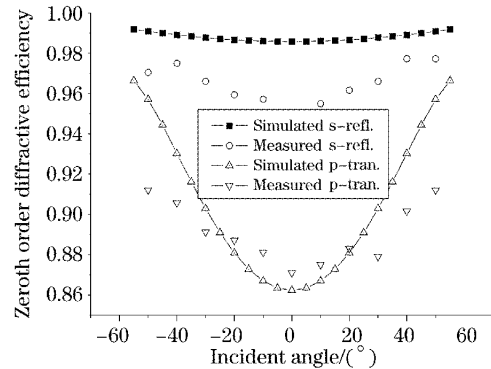


图 7 s 光反射效率和 p 光透射效率随入射角的变化

Fig. 7 Experimentally measured polarization efficiency of reflected s-polarized light and transmitted p-polarized light as a function of incident angle and the theoretically simulated ones

通过实验,我们分别制备了铝、金两种材料的光栅。因为这两种金属的微制作工艺比较成熟,而且这铝金两种材料的光学性质比较有代表性,金膜对 900 nm 以上的近红外光具有高反射性,而铝在可见光波段的反射性比金要好。我们还在通过在制备好的铝光栅上沉积金颗粒,得到金覆盖在铝上的复合金属光栅。三种光栅样品在 1550 nm 下的测试结果如表 1 所示。

表 1 三种光栅结构的消光比和插入损耗对比

Table 1 Comparison of extinction ratio and insert loss between three different gratings

Metal	Ext. T /dB	Ext. R /dB	Insert loss of p light /dB	Insert loss of s light /dB
Au	38	24	0.2	0.1
Al	30	20	0.4	0.3
Au-Al	32.5	22.5	0.2	0.2

在实际中,可以在光栅样品的表面和底面加上增透膜,以减弱 p 光在光栅表面以及基底下表面与空气临界处因介质折射率不连续而引起的反射。这样随着 p 光反射率的减小和透射率的增加,反射消光比和 p 光的透射插损都会得到优化,理论计算的结果表明,反射消光比可提高 5 dB,透射插损可减小 0.1 dB。并且,增透膜对 s 光的影响很小,透射消光比和反射损耗不会产生明显变化。

5 结 论

基于线栅偏振器(Wire grid polarizer)和亚波长光栅结构(SOEs)原理,我们设计了并制作了周期为 1/10 波长的亚波长金属光栅,作为偏振分束器,

具有大于 20 dB 的消光比, 低于 0.5 dB 的插损, 在 900~1800 nm 范围内可将普通光分为二线偏振光, 且该分光过程对波长和入射角度均不敏感, 并且模拟结果和实验结果基本吻合, 该器件以其自身紧凑轻小的优势, 有望在光网络系统中获得实际的应用。

参 考 文 献

- 1 K. Shiraishi, S. Kawakami. Spatial walk-off polarizer utilizing artificial anisotropic dielectrics[J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(9): 516~518
- 2 J. L. Pezzaniti, R. A. Chipman. Angular dependence of polarizing beam-splitter cubes[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(10): 1916~1929
- 3 T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaeml *et al.*. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. *Nature*, 1998, **391**(12): 667~669
- 4 Chen Sixiang, Yi Xinjian, Li Yi. Design and fabrication of antireflection structured surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8): 1001~1003 (in Chinese)
陈思乡, 易新建, 李毅. 亚波长结构对 10.6 μm 的抗反射表面的研制[J]. *光学学报*, 2001, **21**(8): 1001~1003
- 5 Li Yigui, Chen Di, Zhu Jun *et al.*. Sub wavelength gratings based on a new microfabrication technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 1008~1010 (in Chinese)
李以贵, 陈迪, 朱军等. 基于一种新微细加工技术的亚波长光栅的研制[J]. *光学学报*, 2002, **22**(8): 1008~1010
- 6 Deer Yi, Yingbai Yan, Haito Liu *et al.*. Broadband polarizing beam splitter based on the form birefringence of a subwavelength grating in the quasi-static domain[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(7): 754~756
- 7 Dong Yanfeng, Li Qingshan, Wu Fuquan *et al.*. Polarization properties of anodic alumina film with implanted nanohole metallic arrays[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 247~250 (in Chinese)
董艳锋, 李清山, 吴福全等. 含纳米金属阵列阳极氧化铝膜的偏振特性[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 247~250
- 8 Fu Kexiang, Wang Zhiheng, Zhang Dayue *et al.*. A vector analytical method of phase diffraction grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(12): 1652~1659 (in Chinese)
傅克祥, 王植恒, 张大跃等. 位相光栅衍射的矢量解法[J]. *光学学报*, 1997, **17**(12): 1652~1659
- 9 M. G. Moharam, T. K. Gaylord. Rigorous coupled-wave analysis of metallic surface-relief gratings[J]. *Opt. Soc. Am. A*, 1986, **3**(11): 1780~1787
- 10 Yuan Hui, Zhou Jin, Wang Xiaowei *et al.*. Rigorous coupled wave analysis of a new one dimensional deep subwavelength grating[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(9): 795~800 (in Chinese)
袁惠, 周进, 王晓伟等. 一维深亚波长光栅的耦合波分析及偏振特性的研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(9): 795~800
- 11 Eric B. Grann, M. G. Moharam. Hybrid two-dimensional subwavelength surface-relief grating-mesh structures[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(5): 795~800
- 12 Fu Kexiang, Wang Zhiheng, Wen Jun *et al.*. Diffractive order of phase grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(7): 870~876 (in Chinese)
傅克祥, 王植恒, 文军等. 位相光栅的衍射级次[J]. *光学学报*, 1998, **18**(7): 870~876