

用于空间激光通信系统的近红外分色片设计与研制

庄秋慧^{1,2} 付秀华^{1*} 刘国军³

¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022
² 重庆理工大学电子信息与自动化学院, 重庆 400050
³ 长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022

摘要 介绍了一种 1530 nm 透射、1560 nm 反射和 45° 工作列近红外分色片的设计与制备方法。选择 Ta₂O₅ 和 SiO₂ 两种光学薄膜材料, 采用多谐振腔法布里-珀罗(F-P)窄带滤光片结构作为初始膜系, 并选择 4H 作为谐振腔的间隔层进行消偏振设计, 实现分色片透、反射过渡区域的压缩。采用电子束蒸发加离子辅助沉积技术, 并应用光学极值法监控各膜层厚度, 实现分色片多层膜的制备。利用分光光度计对分色片的光谱进行了分析测试, 结果表明研制出的分色片在工作波长的光学能量传递效率高于 92%, 适用于空间激光通信系统中不同波长信号的分离与高效传递。

关键词 薄膜; 近红外; 分色片; 多谐振腔; 空间激光通信

中图分类号 O484.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0831002

Design and Fabrication of a Near-Infrared Dichroic Beam Splitter Used for Space Laser Communication System

Zhang Qiuhui^{1,2} Fu Xiuhua¹ Liu Guojun³

¹ School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

² Institute of Electronic Information and Automation, Chongqing University of Technology, Chongqing 400050, China

³ State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract 45° near-infrared dichroic beam splitter, with the spectrum 1530 nm transmitted and 1560 nm reflected, is designed and fabricated. Ta₂O₅ and SiO₂ are selected as high and low refractive index materials. The structure of multiple cavity Fabry-Perot filter with 4H spacer is used to reduce the transitional region between transmittance and reflectance wavelength. The materials are evaporated by ion-assisted electron beam deposition, and optical monitoring method is used to control the thickness of each layer. The spectrum of the dichroic beam splitter is measured by spectrophotometer. The result shows that the optical energy transfer efficiency is higher than 92%, and the dichroic beam splitter is suitable for space laser communication system to separate different wavelength efficiently.

Key words thin films; near-infrared; dichroic beam splitter; multiple cavity; space laser communication

OCIS codes 310.1629; 310.5448; 310.1860; 310.4165

1 引言

激光通信因其诸多显著的特点和优势而受到国内外研究人员的广泛关注, 随着数据传输速率和实时性要求的不断提高, 自由空间激光通信技术得到

了飞速发展, 并日趋成熟。空间激光通信系统一般由发射、接收捕获和跟踪瞄准等部分构成。根据大气中气体分子和气溶胶的散射、吸收特性, 为了减小激光信号在空间传输过程中的衰减, 目前自由空间

收稿日期: 2014-03-17; 收到修改稿日期: 2014-03-27

作者简介: 庄秋慧(1979—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事光学工艺及数字图像处理方面的研究。E-mail: zqh@cqut.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: goptics@126.com

激光通信采用的大气信道多选择在波长 810、1064、1550 nm 等大气窗口附近。为了减小体积和重量,提高集成度,光学系统经常采用共光路设计,即不同激光波长的信号集成于同一光学系统中,然后在系统的终端,采用分色片或滤光片将不同波长的信号导出到不同的链路^[1]。

当光线倾斜入射时,由于 s 偏振光和 p 偏振光的有效折射率不同,会产生 s 光和 p 光分量的分离,即所谓的偏振效应。偏振效应造成分色片光谱过渡区域展宽,给相邻波长信号的分离造成困难^[2]。基于应用需求,国内外先后开展了分色片的消偏振技术研究:1961 年, Baumeister^[3] 从多层膜的透射率及偏振度与薄膜的折射率及入射角的关系出发设计了消偏振薄膜;1976 年, Thelen 在 Baumeister 设计思想的基础上,利用 1/4 膜堆给出了可见光谱范围内的消偏振分束设计^[4];顾培夫等^[5]于 1999 年设计并制备了用于 450~750 nm 波段的 45°角入射的金属-介质消偏振分光镜,它相比于全介质消偏振分光镜具有优良的特性;马小凤等^[6]于 2007 年针对海洋遥感的应用,设计制备了宽光谱消偏振分色片,对薄膜器件的偏振能量特性进行了一定程度的控制。

本文基于多谐振腔法布里-珀罗(F-P)滤光片的膜系结构进行消偏振设计,实现了 1530 nm 和 1560 nm 两个激光通信工作波长的有效分离。

2 薄膜材料选择与膜系设计

2.1 薄膜材料选择

薄膜材料的选择是膜系设计与制备的基础,针对不同的光学薄膜元件,需考虑材料的工作波段、光学常数、应力匹配、机械性能、工作环境等诸多因素^[7]。在近红外波段,可选择的低折射率材料有以 SiO₂, Al₂O₃, SiO 为代表的氧化物以及以 MgF₂, YbF₃, YF₃ 为代表的氟化物。考虑到材料的折射率以及应力匹配,选择 SiO₂ 作为本分色片设计的低折射率材料。对于高折射率材料的选取, TiO₂, Nb₂O₅, Ta₂O₅, Si 等材料都是近红外波段常用的高折射率材料。从消偏振的角度考虑,更高的折射率比值有利于偏振的消除,然而对于激光通信系统,光学能量的损耗是需要优先考虑的因素,并且综合考虑光谱稳定性、膜层的机械性能,选择 Ta₂O₅ 作为高折射率材料。

2.2 膜系设计

利用干涉截止滤光片的基本结构(0.5L H 0.5L)^x 或(0.5H L 0.5H)^x,在一定入射角度下实现

不同波长光信号的分离,是分色片常用的设计方法,其中 H 和 L 分别表示 λ/4 波长厚度的高折射率膜层和低折射率膜层, x 为周期数。根据电磁波理论,对于电矢量垂直于入射面的振动分量(s 偏振分量),其有效折射率 $\eta_s = n \cos \theta$, 对于电矢量平行于入射面的振动分量(p 偏振分量),其有效折射率 $\eta_p = n / \cos \theta$ 。当光线垂直入射时 $\theta = 0$, s 偏振分量和 p 偏振分量对于薄膜界面来说是完全相同的;当光线斜入射时,不仅薄膜的有效物理厚度发生了变化,而且其 s 偏振分量和 p 偏振分量的有效折射率也发生了变化。由于通常 p 偏振分量的有效折射率比值 η_H / η_L 比 s 偏振分量的比值大,两者的反射带宽度也不相同,这就不可避免的产生 s 偏振分量和 p 偏振分量光谱的分离,造成截止带边缘陡度降低,通带和截止带之间的过渡区域展宽。偏振效应对于普通分色片的性能并不会造成重大影响,但对于波分复用多通道激光通信系统中的分色片和用于彩色工作的分色滤光片等影响较大,需要消除或减小薄膜系统中的偏振效应。

利用多谐振腔 F-P 干涉滤光片结构,减小和消除因入射角度造成的分色片过渡区域的偏振效应,已经被证明是一种行之有效的方法。对于间隔层的设计,一般有两种结构:一种是以 2H2L2H 或 2L2H2L 为代表的对称间隔层设计;另一种结构是采用单一材料的 2H 或 2L 结构设计。第一种设计可以适当调节 s 和 p 偏振分量的主透射峰位置,从而使两个偏振分量即使在倾斜入射时的中心波长仍然保持重叠。这种效应在倾斜入射的波分复用窄带滤光片中颇有应用价值。但是,这种设计对 45°大入射角的消偏振截止滤光片,难以使两个偏振分量的过渡边缘完全重合而构成长波通或短波通截止滤光片。因此,主要介绍以单一材料作为间隔层进行的消偏振分色片设计与制备。

以 Ta₂O₅ 和 SiO₂ 分别为高、低折射率材料,设计波长 1000 nm,讨论分别以 H 和 L 为间隔层,45°角入射情况下, s 光和 p 光的光谱分离。图 1 列出了(L H L H L 2H L H L H)⁵ 结构的光谱曲线,其过渡带 s 光和 p 光的光谱分离约为 13 nm;图 2 列出了(H L H L H 2L H L H L)⁵ 结构的光谱曲线,其过渡带 s 光和 p 光的光谱分离达到了 25 nm;图 3 列出了分别以 2H 和 4H 作为间隔层 s 光和 p 光的光谱分离对比。

对于 F-P 结构的消偏振设计,从图 1~3 的对比可以得出:1)以高折射率材料为间隔层的设计可获

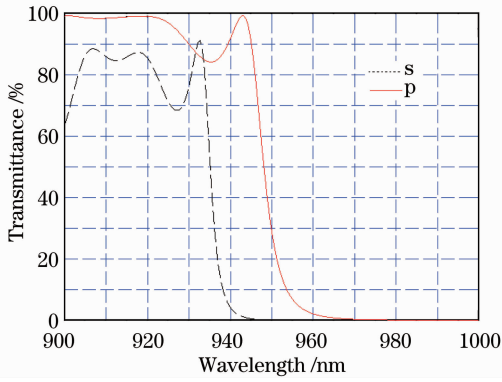


图 1 (L H L H L 2H L H L H)⁵ 结构光谱
Fig. 1 Spectra of (L H L H L 2H L H L H)⁵ structure

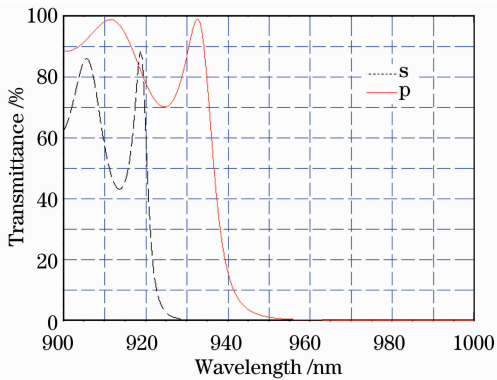


图 2 (H L H L H 2L H L H L)⁵ 结构光谱
Fig. 2 Spectra of (H L H L H 2L H L H L)⁵ structure

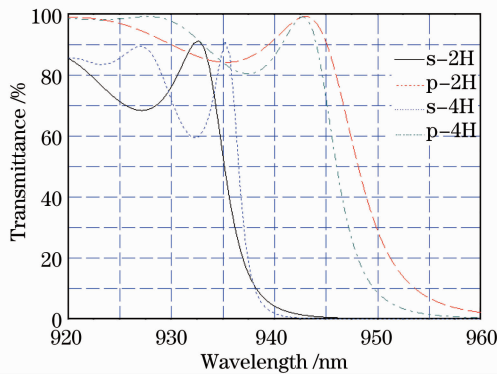


图 3 2H 和 4H 间隔层光谱分离对比

Fig. 3 Spectra comparison between 2H and 4H spacer
得更小的 s 光与 p 光偏振分离; 2) 采用高级次的间隔层设计更利于偏振的消除。

根据以上理论计算得出的结论, 选择三谐振腔 F-P 滤光片结构, 设计波长为 1670 nm, 在石英基片上得到的设计膜系结构为: SUB | (1L 1H 1L 1H 1L 1H 1L 4H 1L 1H 1L 1H 1L 1H 1L 1H)³ 1L | AIR, 其中, H 为 Ta₂O₅, L 为 SiO₂, SUB 为石英基

底, AIR 为入射介质空气。

以上设计得到的光谱曲线如图 4 所示。

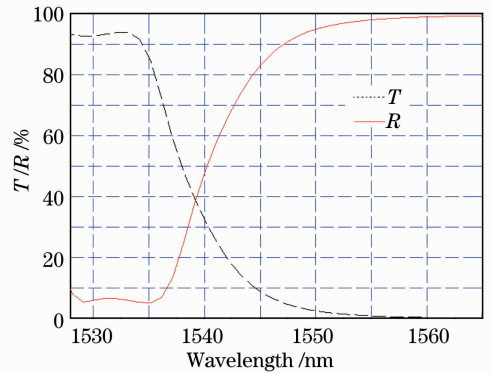


图 4 分色片设计光谱曲线

Fig. 4 Design spectra of dichroic beam splitter

图 5 列出了采用以上消偏振设计 s 偏振分量与 p 偏振分量产生的光谱分离, 两者偏离约为 5 nm, 设计光谱满足分色片使用要求。

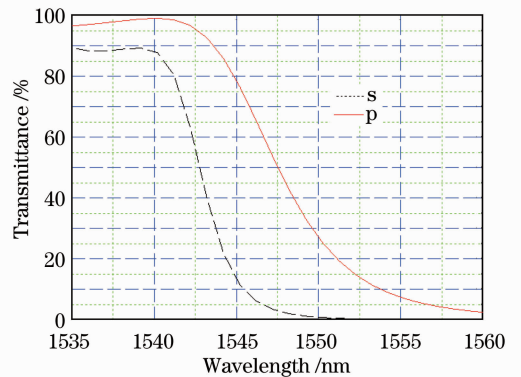


图 5 s 分量与 p 分量光谱分离图

Fig. 5 Spectral deviation between s component and p component

3 分色片的制备与结果分析

3.1 分色片的制备与工艺控制

分色片的制备在 Leybold Optics 公司生产的 SYRUSpro1110 型真空镀膜机上进行。该设备配置了两组 e 型电子束蒸发源, 一套先进的等离子体源 (APS) 离子辅助源, 工件盘采用伞状夹具, 真空系统采用传统的机械泵 + 罗茨泵 + 油扩散泵的配置, 极限真空可达 6×10^{-5} Pa。采用石英晶体振荡和 OMS5000 光学监控系统对膜层厚度进行准确监控, 其中 OMS5000 系统是同时具有直接监控和间接监控能力的高精度光学膜厚控制系统。该设备的软件控制部分对各个模块的控制进行了高度集成, 真空系统和膜层制备与控制具有较高的自动化程度。

真空室真空度达到 5×10^{-3} Pa 对基片进行烘烤

加热,温度为 150 ℃,保温 1 h,本底真空约为 8.5×10^{-4} Pa。为了去除基片表面吸附的各类杂质,并清除油扩散泵系统微量返油带来基片的污染,在薄膜沉积之前开启离子源对基片进行轰击 5 min。 Ta_2O_5 和 SiO_2 材料的沉积速率分别为 0.2 nm/s 和 1.0 nm/s。

3.2 光谱测试与数据分析

分色片的测试在 Perkin Elmer 公司 Lambda 950 型分光光度计上进行,其光谱测量范围为 185~3200 nm,配备 VW 型绝对反射附件可对样品在 $8^\circ \sim 80^\circ$ 角度范围进行绝对反射率测量。进行偏振测量时,将测量光路前面的窗口片换为起偏晶体,通过调节起偏晶体的旋转角使测量光路的入射光变为 p 偏振光或 s 偏振光,进行相应的光谱测试。测量样品的尺寸为 40 mm×40 mm,厚度为 0.7 mm。由于基片的厚度较小,因此可忽略光线倾斜入射引起光线造成的测量误差。分色片 45° 反射率、透射率以及偏振分量的测试结果如图 6 和图 7 所示。

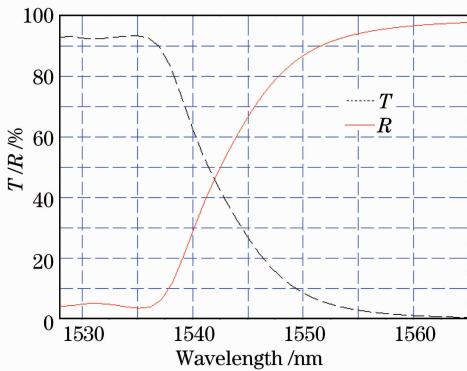


图 6 实测透射率与反射率曲线

Fig. 6 Measured transmittance and reflectance curve

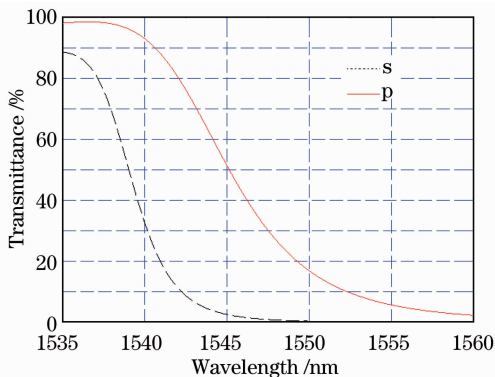


图 7 偏振光谱实测曲线

Fig. 7 Measured polarization spectra curves

从图上可以看出,分色片在 1530 nm 的透射率达到了 92%(石英光学基片背面未增透),1560 nm 的反射率高于 95%。与设计光谱曲线对比发现,实际研制的分色片样品光谱与设计值相比整体蓝移了

5 nm,反射率有 2%左右的下降,且设计光谱从透射波段到反射波段的过度区域较实际测量的样品更陡。由于在透射波段设计光谱与实际测试光谱透射率能量基本相当,造成反射光谱能量损失和过渡带陡度下降的原因可基本排除薄膜材料的吸收和表面散射的影响。通过设计软件的反演可知,造成差异可能有两个方面的原因:第一,分色片工艺实施过程中,膜层厚度的监控误差;第二,用于制备分色片的两种薄膜材料,制备单层膜样品时的折射率与交替制备多层膜样品相比,存在一定的折射率差异,导致设计膜系时通过单层膜材料实验获取的材料光学常数与实际制备工艺时光学薄膜材料的光学常数有细微差别。要得出确切结论,后续可进行相关实验做进一步研究。

4 结 论

利用多谐振腔 F-P 滤光片结构在短波红外区域设计和制备了激光通信用消偏振分色片,在 45° 入射条件下,实现了 1530 nm 和 1560 nm 通信波长信号的分离。测试结果表明,分色片在 1530 nm 的透射率大于 92%,在 1560 nm 的反射率大于 95%。解决了邻近波长光学信号的低损耗分离与光学能量的高效传递,满足激光通信系统的使用要求。

参 考 文 献

- 1 Zhao Shanghong, Wu Jili, Li Yongjun, *et al.*. Present status and developing trends of satellite laser communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(9): 092801.
- 2 赵尚弘, 吴继礼, 李勇军, 等. 卫星激光通信现状与发展趋势 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(9): 092801.
- 3 H A Macleod. *Thin-Film Optical Filter* [M]. Tucson: Thin Film Center Inc, 1999. 348—391.
- 4 P Baumeister. The transmission and degree of polarization of quarter-wave stacks at non-normal incidence [J]. *Opt Acta*, 1961, 8: 105—119.
- 5 A Thelen. Advance or enhancement of polarization in multilayer [J]. *J Opt Soc Am*, 1980, 70(1): 118—121.
- 6 Gu Peifu, Chen Weibin, Liu Xu. Design of depolarization thin film cutoff filters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(2): 274—278.
- 7 顾培夫, 陈卫斌, 刘旭. 薄膜截止滤光片的消偏振设计 [J]. *光学学报*, 2005, 25(2): 274—278.
- 8 Ma Xiaofeng. Control of Polarization and Processing Technology Study of Broadband Dichroic Filter for Ocean Remote Sensing [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, 2007. 87—94.
- 9 马小凤. 海洋遥感用宽光谱分色片的偏振控制与工艺研究 [D]. 上海: 上海技术物理研究所, 2007, 87—94.
- 10 Zhong Disheng. *Vacuum Deposition* [M]. Shenyang: Press of Liaoning University, 2001. 20—42.
- 11 钟迪生. *真空镀膜* [M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 2001. 20—42.

栏目编辑: 韩峰