

中红外激光宽带偏振分束膜研制

岳威, 武淑明, 韩隆, 韩永昶, 张阔, 刘连泽
(固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

摘要:以薄膜光学和激光技术为背景,介绍了中红外固体激光器中宽带偏振分束膜用途、设计与制备方法。基于波动光学原理,首先分析了核心元件硒化锌晶体的偏振特性以及中波宽带偏振分光的难点,其次讨论了布儒斯特角入射时薄膜选材、通带展宽、工艺制备等研究过程中的主要技术问题。利用计算机优化软件进行优化计算后,结合离子辅助工艺得到了吸收小、偏振比高、抗激光性能与附着力良好的薄膜。目前相关的技术应用在中红外固体激光器中达到了5kHz下大于15W的输出效果。

关键词:中红外;光学薄膜;偏振;布儒斯特角

中图分类号: O484 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2014.02.018

Research on coatings of broadband polarized separator in middle infrared lasers

YUE Wei, WU Shu-ming, HAN Long, HAN Yong-chang, ZHANG Kuo, LIU Lian-ze
(Science and Technology on Solid-State Laser Laboratory, Beijing 100015, China)

Abstract: Based on thin film optics and laser technology, the use, design and preparation methods of coatings of broadband polarized separator in middle infrared lasers are reported. Based on the principle of wave optics, the polarization characteristics of core components ZnSe crystal and difficulties of broadband polarization beam splitter are first analyzed, then the main technical problems in the process of the Brewster angle incidence film selection, pass band broadening, and other studies are discussed. After computer optimization, combined with ion-assisted, low absorption, high polarization ratio, excellent anti-laser performance and adhesion of the coatings are obtained. Related technologies currently used in the mid-infrared solid-state lasers have achieved greater than 15W output power under 5kHz.

Key words: mid-infrared; optical film; polarization; Brewster

1 引言

中红外激光目前已经在光电对抗、制导侦察、定向探测和材料分析等多个领域内具有了广泛的应用。目前在3~5 μm波段能够实现稳定可调谐激光输出的主要方式是利用非线性的光参量振荡技术,将现有短波固体激光工作波长转换到中红外区域^[1]。

光学薄膜对于此类激光器至关重要,不仅每种谐振腔镜和非线性晶体都需要镀膜,以达到特定的性能指标,而且单路激光输出不足时,需要对于双路激光进行偏振合成,以达到更高的能量,这就对于光学薄膜提出了很高的技术要求,同时薄膜的吸收、附着力以及阈值效应也成为了激光器性能的关键所

在。本文所涉及到的单路中红外激光器结构和双路合成示意图如图1和图2所示。

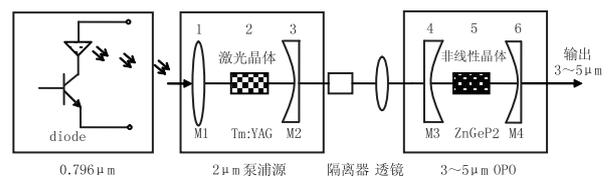


图1 单路中红外激光器结构

Fig. 1 Single mid-infrared laser structure

作者简介:岳威(1980-),男,硕士,高级工程师,现主要从事光学薄膜技术研究。E-mail: ywei2008@gmail.com

收稿日期: 2013-08-12; **修订日期:** 2013-08-24

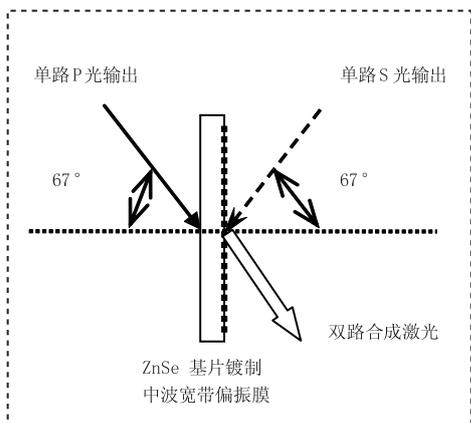


图2 双路合成示意图

Fig. 2 Dual synthesis schematic diagram

2 工作原理

一般情况下,自然光在电介质界面上反射和折射时,反射光和折射光都是部分偏振光,只有当入射角为某特定角时反射光才是线偏振光,其振动方向与入射面垂直,此特定角称为布儒斯特角,如图3所示。

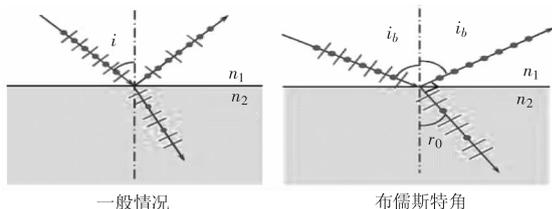


图3 布儒斯特角示意图

Fig. 3 Brewster angle schematic diagram

光学透镜应用中,为了把振动方向与入射面平行的光波(P光)和与入射面垂直的光波(S光)完全分离,即P光高透射,而S光全部反射,无能量透过,则需要针对特定透镜介质的布儒斯特角设计偏振光分束薄膜,利用此类全介质薄膜可以对某一波长的光束进行完全的偏振分离^[2]。值得注意的是,通常的偏振分束薄膜,多是针对可见光532 nm或者近红外1064 nm等单一波长设计使用。

激光薄膜是所有元件中最薄弱的环节,对于高功率中红外激光器来说,激光能量极易产生热能沉积,从而在薄膜约束边界上产生不均匀的热效应,致使薄膜元件产生热畸变及损伤,激光对于薄膜元件的这种破坏效应已逐渐成为了发展新型中红外激光技术的“瓶颈”。另一方面,由于中红外激光器输出本身为线偏振光,当单光路能量不足时,需要对于一路P光和一路S光在镀膜表面达到合成输出。目前中长波红外激光器中大量采用硒化锌(ZnSe)制作的光学透镜,ZnSe作为一种重要的II-VI族半导体光电材料,对波长范围0.5~22 μm的光具有良好

透射性能。当选用ZnSe作为中波红外3.65~4.35 μm波段光学透镜使用时,如果表面不镀制光学薄膜,中红外激光在其布儒斯特角(67°)入射情况下,振动方向与入射面垂直的S光仍有34%透射,单面反射只有50%左右,反射能量太低,无法满足中红外激光双光路偏振合成的需求。

3 薄膜设计

中波宽带偏振分束膜要求对3.65~4.35 μm的激光P分量选择性透过,而对S分量的激光选择性反射。由于此薄膜的偏振分离波段宽、偏振分离度要求高,需要采用双本征分离带结合的薄膜设计方法。具体指标要求如表1所示。

表1 中波宽带偏振分束膜技术指标要求

Tab. 1 Broadband polarized separator technology index requirements

| item | index |
|----------------------------------|---------------------------------|
| FWHM/μm | 0.8 ± 0.05 |
| center wavelength/μm | 4 ± 0.05 |
| average transmittance of P light | ≥90% |
| average reflectivity of S light | <5% |
| cut-off region | 3000 ~ 3400 nm & 4500 ~ 5500 nm |

对于偏振膜来说,膜系设计的基本原则就是在给定入射角度(通常是布儒斯特角)和基底材料的前提下,尽可能通过最少的膜层数,实现尽可能高的偏振分离度,同时考虑镀膜材料之间及其与基底材料之间的匹配,避免应力的集中,保证膜层与基底之间结合的牢固性。用高、低折射率交替的介质多层膜能够得到更高的反射率,当膜系所有界面上的反射光束回到前表面时具有相同位相,从而产生相长干涉。在折射率为 n_g 的基片上镀以光学厚度为 $\lambda_0/4$ 的高折射率(n_1)膜层后,由于空气/膜层和膜层/基片界面的反射光同位相,使得反射率大大增加。

在薄膜材料不确定的情况下,改变材料及层数,可以得到满足匹配条件的解。在薄膜材料确定的情况下,改变膜层的层数和层数,可得到不同的等效折射率 E 和等效相位 F ,使其近似满足匹配条件^[3]。初始膜系为G/(HL)^mS(mHmL)ⁿS/A的典型结构,高折射率材料选取ZnSe,低折射率材料选取YbF₃,利用长短波两个初始偏振分束带结合,逐步增加反射膜对,它们由光学厚度为设计波长的四分之一、折射率分别为 n_H 和 n_L 的单层膜叠加而成,以H、L表示,S代表了HL的重复次数,即反射周期, m 代表两

个反射带相对的中心波长比,最后以非等厚周期方法进行优化处理,注意修正了反射带平坦度^[4],得到设计结构为:SUB\ (1.207H 0.978L)^13 (1.405H 1.662L)^12 1.447H 1.264L 1.354H\AIR。值得注意的是,中波偏振膜由于单个膜堆本征偏振分离带宽度不够,采用双带结合优化的方式,但同时也成倍增加了膜层数和制备难度。本征偏振分离带,设计曲线和实测光谱图如图4、图5和图6所示。

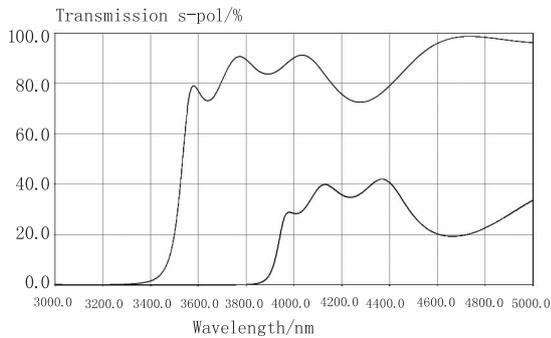


图4 未经设计的本征偏振分离带

Fig.4 Intrinsic polarization separation

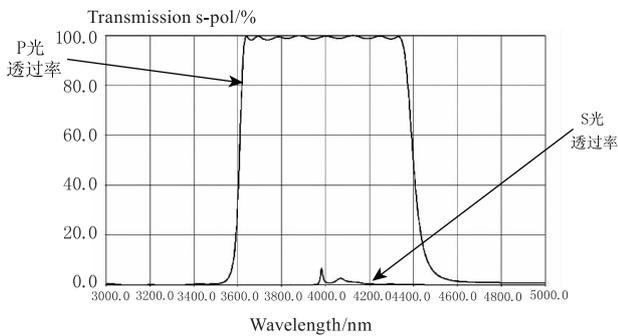


图5 中波宽带偏振分束膜设计曲线

Fig.5 Spectral of 1311nm reflection

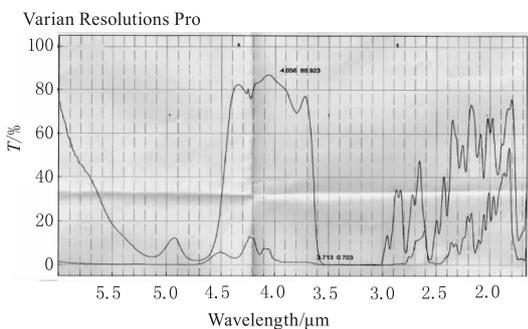


图6 实测光谱曲线

Fig.6 Measured spectral curve

样品膜层在具有扩散泵系统、球罩转动装置和APS离子源的德国LEYBOLD设备中镀制,采用电子枪结合钨舟蒸发材料,石英晶体控制蒸发速率和膜厚。制备完成后以傅里叶红外干涉仪(扫描范围近红外至1400 nm长波至25 μm,分辨率紫外0.01 μm)进行光谱特性测试。薄膜样品基底材料选用

ZnSe,光学加工指标 $N=0.2$, $\Delta N=0.04$, $RMS=0.3$ nm,镀膜前用超声波弱清洗基片。

4 薄膜的应力与吸收降低方法

薄膜应力与吸收是一种宏观现象,然而它却反映薄膜的内部状态,是决定薄膜性能的重要因素。中红外偏振薄膜元件的吸收是其损耗的主要来源之一,这是由于材料本身的纯度和折射率消光系数不同,另外还和清洗、制备工艺与基体的特性有关,而应力涉及膜料成核自应力、膜系匹配应力以及制备工艺应力^[5]。应力严重时会导致薄膜破裂、脱落,使薄膜损伤,甚至使整个元件失去功能。应力过大导致薄膜损伤如图7所示。

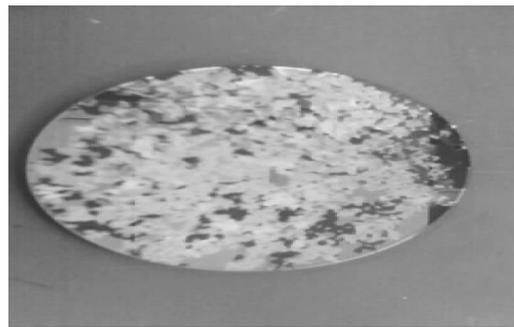


图7 应力过大导致薄膜损伤

Fig.7 Film damage caused by excessive stress

在传统的蒸发技术中,由于凝聚粒子的能量低,热蒸发薄膜的堆积密度较低,具有明显的柱状结构,造成膜本身不稳定,光机性能的蜕变和降低^[6]。

利用高能离子源可在基板和蒸发源间建立了稳定的等离子区,由于外来离子对凝聚中粒子的动量传递,材料原子在通过等离子区的时候被加速而获得能量,从而导致高的堆积密度。高能离子的轰击使基板得到了清洁,获得了高温,促进了膜层材料的表面扩散和化学反应,甚至产生了注入效应。

离子束辅助沉积技术,不仅对薄膜的折射率、吸收形成了有效控制,而且对薄膜应力和抗激光强度提升具有明显的作用。离子源辅助沉积状态如图8所示。



图8 离子源辅助沉积状态

Fig.8 State of the ion source assisted deposition

5 具体应用与小结

采取以上技术方案,经过多次反复试验,获得了 ZnSe 透镜表面,入射角 67° , P 光透过率大于 90%, S 光反射率大于 95% (即透过率小于 5%),抗激光损伤阈值 $LDT \geq 10\text{MW}/\text{cm}^2$ 的中红外宽带偏振光分束薄膜。应用中红外固体激光器中达到了 5 kHz 下大于 15 W 的输出效果。中红外激光器与偏振膜照片如图 9 所示。

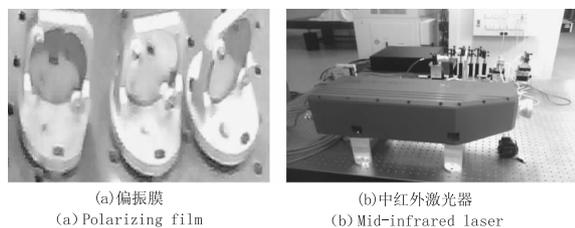


图 9 中红外激光器与偏振膜照片

Fig. 9 Photos of Mid-infrared laser and a polarizing film

本文讨论了中红外激光宽带偏振膜的原理、设计和制备方法,实际研制过程中需要持续关注以下几点:

(1) 设计结构、材料特性和工艺方式对于薄膜的偏振度有着明显的影响。

(2) 离子束辅助能量存在着临界参数使薄膜性能取得最优。

(3) 应力与吸收持续降低,同时偏振分离带难以展宽的问题有待进一步解决。

参考文献:

[1] Yao Baoquan, Wang Yuezhu, Wang Qi. Development of mid-infrared optical parametric oscillator[J]. Laser Technology, 2002, 26(3): 217 - 220. (in Chinese)

姚宝权,王月珠,王骥. 中红外光参量振荡器发展状况分析[J]. 激光技术, 2002, (6): 217 - 220.

[2] Tang Jinfa, Gu Peifu. Modern optical thin film technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. (in Chinese)

唐晋发,顾培夫. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2006.

[3] Liu Hongxiang, Xiong Shengming. Experimental study for ion beam sputtering deposition of Ta_2O_5 optical thin film [J]. Opto-electronic Engineering 2004, 31(3): 41 - 44. (in Chinese)

刘洪祥,熊胜明. 离子束溅射沉积 Ta_2O_5 光学薄膜的实验研究[J]. 光电工程, 2004, 31(3): 41 - 44.

[4] Zhang Dongyan, Wang Rongrui. Progress on mid-infrared lasers[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(5): 487 - 491. (in Chinese)

张冬燕,王戎瑞. 高功率中红外激光器进展[J]. 激光与红外, 2011, 41(5): 487 - 491.

[5] Cole, colin. Nonradioactive infrared coatings for single and multi-spectral application[C]. Processings of SPIE, 1996, 2776: 72 - 83.

季一勤,刘华松,张艳敏,等. 光学薄膜常数的测试与分析[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(5): 513 - 518. (in Chinese)

季一勤,刘华松,张艳敏,等. 光学薄膜常数的测试与分析[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(5): 513 - 518.