

556 nm 黄光激光器激光反射镜的研制*

卜 轶 坤^{1,2}, 陈 颖 新¹, 郑 权¹, 薛 庆 华^{1,2}, 贾 富 强^{1,2}, 钱 龙 生¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 从激光晶体低增益谱线的运转机理出发, 对 LD 泵浦 Nd: YAG, LBO 腔内倍频 556 nm 激光器所使用的光学薄膜进行了研制。在激光反射镜的设计上, 为保证基频光 1 112 nm 的高效振荡, 并获得高的倍频 556 nm 激光输出, 对膜系要求进行了深入分析。采用离子束反应溅射和离子辅助沉积的方法, 运用时间监控膜厚法成功置备出 556 nm 激光器所使用的特殊的全介质激光反射膜, 在国内首次实现了 1 112 nm 激光高效振荡, 通过 LBO 腔内倍频, 在 2 W 的 LD 泵浦功率下获得 102 mW 556 nm 激光输出。

关键词: 激光反射镜; 黄光激光器; LD 泵浦; LBO 倍频

中图分类号: TN248.5 **文献标识码:** A

采用 LD 泵浦, 非线性晶体腔内倍频的全固态红、绿、蓝三色激光器, 已成为近年来激光发展的研究热点。对于 Nd: YAG 晶体来说, 人们研究最为广泛的是 1 064 nm 这条谱线, 其次是 1 319 nm 和 946 nm 两条谱线, 通过对这三种基频光进行倍频, 已获得绿光(532 nm), 红光(660 nm)和蓝光(473 nm)的三基色激光输出^[1~3]。而对于 Nd: YAG 晶体的低增益谱线 1 112 nm 研究相对较少, 通过对 1 112 nm 腔内倍频可以得到 556 nm 波长的黄色激光输出。对波长范围从 550 nm 到 650 nm 的橙黄色激光辐射, 在分子生物学、化学分析、激光医疗、激光彩色显示方面有着广泛的应用前景。特别是 556 nm 黄光, 由于该波长非常接近于人眼视网膜等眼部疾病, 还非常适合于激光显示和照明。所以该类型激光器正显示出巨大的商用前景。由于该类型激光器使用的泵浦波长与激光晶体的振荡波长以及倍频输出波长均不相同, 泵浦方式和使用的激光材料种类繁多, 因此所涉及到的薄膜类型也是多种多样。对该类型激光器所使用的光学薄膜国内外已有文献进行了报道^[4~6]。但在 556 nm 激光反射镜的设计上, 为实现基频光 1 112 nm 的有效振荡, 不仅要保证 1 112 nm 在谐振腔镜上的高反射率要求, 还要对其它的强发射谱线进行抑制, 在一个镜面上涉及到多个谱线的同时透射和反射, 并存在某几个波长相邻较近而难以有效分离的问题, 传统的 M_4 反射膜系结构已不能满足要求, 必须寻找新的膜系设计方法和新的制备工艺。

本文从激光晶体低增益谱线的运转机理出发, 对 LD 泵浦 Nd: YAG, LBO 腔内倍频 556 nm 黄光激光器所使用的光学薄膜进行了研制。尤其是在激光反射镜的设计上, 为保证基频光 1 112 nm 的高效振荡, 并对其它谱线 1 064, 1 319, 946 nm 进行有效抑制, 还要获得高的倍频 556 nm 黄光输出, 对膜系要求进行了深入分析。由于 1 112 nm 与 1 064, 946 nm 很接近, 难以有效分离, 我们采用将光谱特性要求合理分配在谐振腔的两个端镜上, 从整体上考虑谐振腔对各谱线的透射/反射率要求, 这样既降低了膜系设计难度, 又获得了高效率的黄光输出。在国内首次实现了 1 112 nm 激光高效振荡, 通过 LBO 腔内倍频, 在 2 W 的 LD 泵浦功率下获得 102 mW 556 nm 黄光输出, 光光转换效率达 5.1%。

1 膜系要求分析

在 Nd: YAG 晶体的激光谱线中, 一共存在 30 多条谱线^[7], 除了 1 064 nm 谱线外, 它还可以激发出许多波长, 如 $^4F_{3/2} - ^4I_{3/2}$ 能级的 1 319 nm, 以及 $^4F_{3/2} - ^4I_{9/2}$ 准三能级的 946 nm 谱线, 1 112 nm 同 1 064 nm 对应于 $^4F_{3/2} - ^4I_{11/2}$ 能级间的跃迁, 只是上下能级对应于不同的 Stark 分裂子能级, 其中 1 064 nm 对应的是 R_2 到 Y_3 的跃迁, 1 112 nm 对应的是 R_2 到 Y_6 的跃迁。与常规三条谱线相比, 1 112 nm 谱线的受激发射截面积最小, 约为 1 064 nm 的 1/13, 是 1 319 nm 的 1/3, 是 946 nm 的 3/5。所以为了在激光二极管泵浦下实现增益较小的 1 112 nm 激光谱线的运转, 不仅要保证谐振腔两反射面对 1 112 nm 基频光有足够高的反射率, 还要对另三条谱线 1 064, 1 319, 946 nm 进行充分的抑制, 来最大限度的降低它们与 1 112 nm 的谱线竞争; 同时为有

* 收稿日期: 2004-11-22; 修订日期: 2005-01-20

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 卜轶坤(1979-), 男, 博士生, 主要从事 LD 泵浦全固态激光器及大功率激光反射膜的研究; E-mail: buyikun139@163.com。

效的注入泵浦光以形成高的泵浦功率密度,还应在 Nd:YAG 晶体入射端面尽可能提高对泵浦光 808 nm 的透过率,为获得倍频黄光 556 nm 的高效输出,在输出镜反射面还应对 556 nm 实现高的透过率。通过以上分析,可以看出在谐振腔的两个反射镜上,需要满足对 1 112 nm 高反射,对 808, 1 064, 1 319, 946, 556 nm 高透过的要求,所以这种激光反射镜与传统的激光反射镜有很大区别,单纯采用 $\lambda/4$ 反射膜系结构已不能满足光谱特性要求,必须寻找新的设计方法来实现。在实际设计中我们发现,由于 1 064 nm 和 1 112 nm 两条谱线仅相差 48 nm,要将这两条谱线有效的分离已非常困难,这也是 Nd:YAG 晶体中几条弱增益谱线难以实现激光运转的瓶颈所在,再加上其它几点的透射要求,无疑大大增加了膜系设计的难度。为此我们将所提的光谱要求合理的分配在两个谐振腔镜上,在每一个面上满足一部分光谱特性的要求,从整体上考虑谐振腔对各谱线的透射/反射率要求,这样既降低了膜系设计难度,又获得了高效率的黄光输出。通过实验证明这种思路是可行的,并成功的获得了 556 nm 的激光输出。

2 膜系理论设计

图 1 给出了黄光激光器的腔型构造,表 1 列出激光器各表面具体的膜系要求。

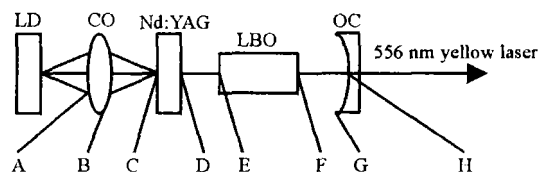


Fig. 1 Setup of LD pumped yellow laser

图 1 LD 泵浦的黄光激光器装置

表 1 激光器各表面具体的膜系要求

Table 1 Requirements of the coatings for optical elements of the laser

surface	requirements of the coatings
A	808 nmAR($T > 95\%$)
B	808 nmAR($T > 95\%$)
C	808 nmAR($T > 95\%$), 1 112 nmHR($R > 99.9\%$), 1 319 nmAR($T > 90\%$)
D	1 112 nm/ 556 nmAR($T > 99.8\%$)
E	1 112 nm/ 556 nmAR($T > 99.5\%$)
F	1 112 nm/ 556 nmAR($T > 99.5\%$)
G	556 nmAR($T > 98\%$), 1 112 nmHR($R > 99.9\%$), 1 064 nmAR($T > 95\%$), 946 nmAR($T > 80\%$)
H	556 nmAR($T > 98\%$), 1 064 nm/946 nmAR($T > 95\%$)

这里我们主要给出难度较大的谐振腔激光反射膜的设计过程:即 C 面和 G 面的膜系设计过程,高反射膜是多层膜体系中的重要产品。高反射率的多层反射膜主要有两种:全介质多层反射膜和在基板表面上镀金属膜的多层介质增强反射膜。对于激光谐振腔的反射镜,要求超高反射率和低的损耗,一般来说,要实现基频光的有效振荡,腔镜反射率应高达 99.9%,

采用全介质高反膜系,从理论上讲,当层数足够多时,可望达到足够接近 100% 的反射率。但实际上膜层的层数不可能无限的增加,最高可达的反射率要受到膜层吸收和散射损耗的限制。根据薄膜光学理论可知,传统的高反射膜可由高低折射率材料交替叠加而成。基本的膜系结构为 $\text{Sub}/(\text{HL})^S\text{H}/\text{Air}$ (玻璃、熔石英基片) 或 $\text{Sub}/\text{L}(\text{HL})^S\text{H}/\text{Air}$ (Mo, Si 基片), 常规使用的高低折射率材料一般为 TiO_2 , ZrO_2 , Ta_2O_5 , HfO_2 等,由于我们所使用设备的限制,高折射率材料为 Ta_2O_5 , 设其折射率为 2.085, 低折射率材料采用 SiO_2 , 折射率为 1.452, SiO_2 膜层结构为无定型态,在工作波长上色散较小,消光系数低,吸收少,具有较高的激光损伤阈值,是一种理想的低折射率材料。为了保证基频光 1 112 nm 的运转,需要对 1 064, 1 319, 946 nm 进行抑制,由于 1 112 nm 与 1 064 nm 两条谱线仅相差 48 nm,要将这两条谱线有效的分离非常困难。为了降低膜系设计难度,我们将光谱特性要求合理的分配在两个谐振腔镜上,反射镜 C 面: 808 nmAR($T > 95\%$), 1 112 nmHR($R > 99.9\%$), 1 319 nmAR($T > 90\%$), 不考虑 1 064 nm 和 946 nm; 反射镜 G 面: 556 nmAR($T > 98\%$), 1 112 nmHR($R > 99.9\%$), 1 064 nmAR($T > 95\%$), 946 nmAR($T > 80\%$), 不考虑 1 319 nm。在每一个面上满足一部分光谱特性的要求,从整体上考虑谐振腔对各谱线的透射/反射率要求,这样既降低了膜系设计难度,又获得了高效率的黄光输出。由于涉及到多点的透反射要求,波长覆盖从可见光到近红外的多个波长,从膜系类型上讲,所设计的薄膜既不属于标准的反射膜,也不属于截止滤光片中的长短波通,只能称其为一种特殊的反射膜系。由于我们所采用的离子束溅射系统具有长期稳定工作的优点,这使得通过沉积时间来控制膜厚成为可能,在对沉积速率准确定标的条件下,可监控任意厚度的光学膜层,而且监控精度很高,这为我们的膜系设计提供了很大的自由度。基于以上分析,我们采用传统的解析设计法与计算机膜系自动优化设计相结合的办法,首先提出一个基本的截止滤光片膜系结构,利用薄膜自动设计软件,通过设计合理的光谱特性要求,采用全局搜索

和局部优化相结合的方法,对常规的基本膜堆,进行了优化设计。膜系对 C 面的初始结构为 $\text{Sub}/0.5\text{L}(\text{HL})^{20}\text{H}0.5\text{L}/\text{Air}$, $n=1.83(\text{Nd:YAG})$, 通过计算机优化,在此基础上得出总层数 43 层的非 $\lambda/4$ 膜系结构,中心波长 $\lambda=1112\text{ nm}$, 其在 1112 nm 处的反射率 $R=99.997\%$, 1319 nm 处的透射率 $T=97\%$, 808 nm 处的透过率 $T=99.6\%$ 。

输出镜凹面 G 面的初始结构为 $\text{Sub}/0.5\text{L}(\text{HL})^{25}\text{H}0.5\text{L}/\text{Air}$, 也是一个传统的短波通结构,中心波长选取为 1200 nm , 目的是防止反射带覆盖 1064 nm , 这样既能保证 1112 nm 的高反射率要求,又满足 $1064, 946, 556\text{ nm}$ 的高透过率,在该结构的基础上采用计算机局部优化算法 Powell 法和单纯形法对该结构进行了局部优化, sub 为 K9 光学玻璃, $n=1.52$, 通过优化计算,得到总层数为 53 层的非规整反射膜系, 1112 nm 处的理论反射率为 $R=99.983\%$, 1064 nm 处 $T=97.6\%$, 946 nm 处的透过率 $T=95.2\%$, 倍频光 556 nm 透过率为 99.94% 。理论设计曲线如图 2, 图 3 所示。与传统的设计相比,在满足膜系光谱特性的条件下,新的膜系结构大大降低了高折射率膜层的厚度,从而有效的降低了吸收和散射的损耗,提高了薄膜的抗激光损伤阈值,并降低了膜系设计难度,减少了膜系镀制的生产成本。

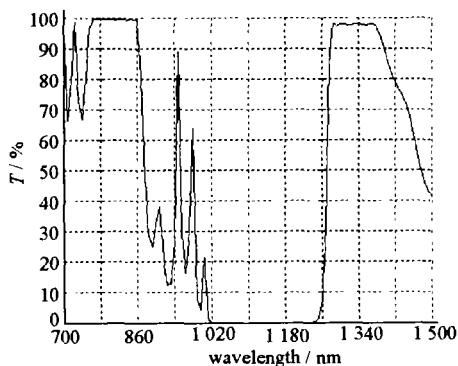


Fig. 2 Theoretical transmittance curve for incident facet on Nd:YAG crystal

图 2 Nd:YAG 晶体入射面理论透射率曲线

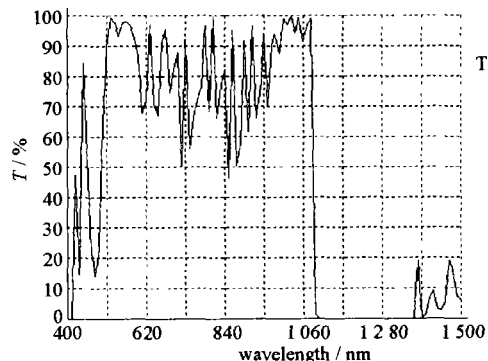


Fig. 3 Theoretical transmittance curve for left facet on output mirror

图 3 输出镜凹面理论透射率曲线

3 实验装置及结果

实验使用射频离子束溅射与离子辅助沉积薄膜系统。

主、辅离子源采用美国 Ion Tech INC 生产的 16 cmRF 和 12 cmRF 射频离子源,离子源的射频频率为 13.56 MHz , 16 cm 离子源为聚焦型, 12 cm 离子源为发散型。图 4 是本实验所使用的双离子束溅射镀膜系统结构示意图。如图所示,主离子源使石英放电室中的 Ar 气发生电离,电离产生的 Ar^+ 由屏栅极正电压聚焦后又经加速栅极的负电场加速,经中和器电子中和后,以和靶表面的法线成 40° 的溅射角轰击直径为 $\phi 36.83\text{ cm}$ 的靶材,溅射出靶材料的分子或原子,溅射出的粒子在沉积到基片上形成薄膜。 12 cm 辅助离子源产生 Ar 和 O_2 离子,主要作用是在成膜前对基片进行预清洗并使基片表面活化改善膜基过渡层的结构和性质,同时在沉积过程中对溅射材料的分子或原子进行辅助轰击,增加膜层的附着力和堆积密度。实验所用材料为高纯度的金属 Ta (纯度为 99.9%) 和 SiO_2 (纯度为 99.99%) 靶,溅射离子源、靶和基板互成直角,即靶平面和基板平面成 45° 角,并在溅射时靶材以 $\pm 3.5^\circ$ 角扫描。夹具采用单轴高速旋转式金属夹具,通过加修正挡板对半径 60 mm 到 150 mm 范围内的膜厚分布进行了修正。

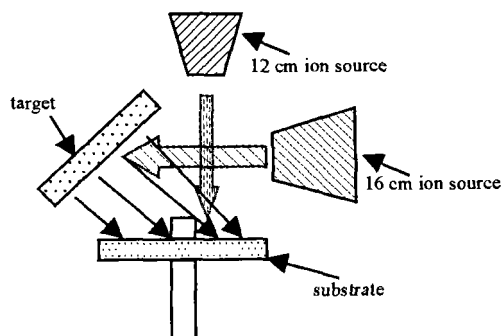


Fig. 4 Dual-ion beam sputtering deposition thin film system

图 4 双离子束溅射沉积薄膜系统

由于该离子束溅射系统具有长期稳定运行的优点,离子源工作时加速电流、加速电压的变化误差可控制在 1% 内,薄膜的沉积速率相对稳定,这使得运用时间来监控膜厚成为可能。以各层膜的沉积时间作为膜厚控制参数。而且通过时间来控制膜厚的一个最突出的优点就是在对沉积速率进行准确定标后可以镀制任意厚度的非规整膜系,尤其对于我们所设计的黄光反射镜,由于为了满足多个波段的高反射和高透射率要求,通过计算机对各膜层厚度进行优化后所得的膜系结构为任意膜厚的非规整膜系,且层数较多,采用传统的光控法或晶振

控制技术难度较大,而采用时间来控制则很容易实现,且镀制的重复性、稳定性及成品率有了很大提高。通过定标得到沉积速率为 Ta_2O_5 : 3.05A/S, SiO_2 : 2.71A/S, 以此计算出各膜层所需的时间,编入机器程序中进行镀制。

采用日本岛津 UV—3100 分光光度计对所镀制的激光反射镜进行了测试。由于实际所镀制的激光晶体 Nd:YAG 与平凹镜体积很小,难以准确测量,我们对其同时镀制的 K9 测试片进行了光谱透过率的测试。实际测试结果: C 面基频光 1112 nm, $R=99.91\%$; 1319 nm, $T=92.5\%$; 808 nm, $T=94.63\%$ 。输出镜凹面 G 面 1112 nm, $R=99.98\%$; 1064 nm, $T=97.2\%$; 946 nm, $T=93.86\%$ 。倍频光 556 nm 输出达 99.5% 由于背反射的影响实际透过率要低于理论透过率。我们通过计算机程序对背反射进行了修正,以上测试结果和分析表明:以沉积时间作为膜厚控制手段的双离子束溅射沉积系统可以用于镀制具有特殊光谱要求的激光反射镜。

4 结 论

本文从激光晶体 Nd:YAG 低增益谱线的运转机理出发,对 LD 泵浦 Nd:YAG, LBO 腔内倍频 556 nm 黄光激光器所使用的光学薄膜进行了研制。采用传统的光学薄膜解析设计法与计算机膜系自动优化设计相结合的方法设计了 556 nm 黄光激光器特殊的全介质激光高反射膜,采用离子束反应溅射和离子辅助沉积的方法,运用时间监控膜厚法成功制备出 556 nm 黄光激光器所使用的激光反射膜,在对其它谱线 1064, 1319, 946 nm 进行了有效抑制后,在国内首次实现了 1112 nm 激光高效振荡,通过非线性晶体 LBO 腔内倍频,在 2 W 的 LD 泵浦功率下获得 102 mW 556 nm 黄光输出,光-光转换效率达 5.1%。

参考文献:

- [1] Chen Y F, Huang T M. Compact and efficient 3.2 W diode-pumped Nd:YAG/KTP green laser[J]. *Appl Opt*, 1998, **37**(24): 5727—5730.
- [2] 郑权, 薛庆华, 王军营. LD 泵浦 1.2 W 连续 Nd:YAG/LBO 红光激光器[J]. *激光与红外*, 2004, **34**(1): 24—26. (Zheng Q, Xue Q H, Wang J Y. LD pumped 1.2 W Nd:YAG/LBO CW red laser. *Laser and Infrared*, 2004, **34**(1): 24—26)
- [3] 刘伟仁, 钱龙生, 檀慧明, 等. LD 泵浦的 946 nm Nd:YAG 激光器及腔内倍频 473 nm 蓝光输出[J]. *激光杂志*, 2000, **21**(3): 12—13. (Liu W R, Qian L S, Tan H M, et al. LD pumped 946 nm Nd:YAG laser and intracavity second harmonic generation at 473 nm. *Journal of Laser* 2000, **21**(3): 12—13)
- [4] Dinca A, Trifan M E, Lupei V. Dichroic mirror for diode pumped Nd:YAG laser[A]. *Proc of SPIE*[C]. 1997, **2776**: 262—270.
- [5] Niederwald H, Greve P, Eichinger R. Dielectric coatings for diode pumped solid state laser devices[A]. *Proc of SPIE*[C]. 1989, **1125**: 76—84.
- [6] 洪冬梅, 朱震. 二极管泵浦固体激光器使用的光学薄膜[J]. *激光与红外*, 1999, **29**(6): 372—374. (Hong D M, Zhu Z. Optical thin films for diode pumped solid state lasers. *Laser and Infrared*, 1999, **29**(6): 372—374)
- [7] Marling J. 1.05~1.44 μ m tenability and performance of the CW Nd³⁺:YAG laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1978, **14**(1): 56—62.

Preparation of coatings for optical elements of 556 nm laser resonator mirror

BU Yikun^{1,2}, CHEN Ying-xin¹, ZHENG Quan¹, XUE Qing-hua^{1,2}, JIA Fu-qiang^{1,2}, QIAN Long-sheng¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Optical thin films for LD-pumped Nd:YAG/LBO yellow laser at 556 nm are presented in this paper. To achieve 1112 nm laser action and output 556 nm yellow laser with high power, the coating design of resonator mirrors was analyzed. The spectrum transmittance/reflectance request was reasonably distributed on the two resonator facet reflectivity to restrain the other laser lines such as 946 nm, 1064 nm and 1319 nm. The dielectric high reflective laser mirrors was achieved by double ion beam sputter technique for the first time, which was controlled by a time-power monitoring method. When the incident pump power was 2 W, CW 556 nm yellow laser output power of 102 mW was obtained.

Key words: Laser mirror; Yellow laser; LD-pumped; LBO frequency-doubling