

500.8 nm Nd : YAG 青光激光器光学薄膜 的设计与制备 *

卜轶坤^{1,2} 郑 权¹ 薛庆华^{1,2} 元 言^{1,2} 钱龙生¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理所, 长春 130022)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 从双波长激光运转及和频的机理出发, 对 LD 泵浦 Nd : YAG, LBO 腔内和频 500.8 nm 青光激光器所使用的光学薄膜进行了设计和制备. 在激光反射镜的设计上, 为了达到最佳的和频输出, 对膜系要求进行了深入分析. 采用对谐振腔一端面反射率固定不变并通过对另一腔镜基频光的透射率进行调谐的方法, 在给出合理初始结构后, 利用计算机对膜厚进行了优化. 并采用双离子束溅射沉积的方法, 通过时间监控膜厚法成功制备出青光激光器所使用的全介质激光反射膜, 在室温下实现 946 nm 和 1064 nm 双波长连续运转, 并通过 I 类临界相位匹配 LBO 晶体腔内和频在国内首次实现 500.8 nm 青色激光连续输出. 当泵浦注入功率为 1.4 W 时和频青光最大输出达 20 mW.

关键词 光学薄膜; Nd : YAG 激光器; LD 泵浦; 腔内和频

中图分类号 **文献标识码** A

0 引言

Nd : YAG 是一种性能优良的激光晶体, 到目前为止已实现了 20 多条谱线的激光运转^[1], 其中研究最为广泛的是 1064 nm、1319 nm 和 946 nm 三条谱线. 目前人们采用激光二极管 (LD) 泵浦 Nd : YAG, 通过非线性晶体腔内倍频已获得绿光 (532 nm)、红光 (660 nm) 和蓝光 (473 nm) 三基色激光输出^[2~4]. 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^[5~7]. 而对于波长为 500.8 nm 的青色激光, 由于缺乏能产生相应高效振荡基频光的激光晶体, 所以无法通过倍频转换来实现. 在全固态激光器方面, 目前主要是利用双波长 (1064 nm 和 946 nm) 激光器进行和频实现 500.8 nm 的青光输出. 从双波长激光运转及和频理论进行分析, 该类型激光器所使用的光学薄膜与倍频激光器有很大不同. 膜系类型涉及单点增透, 多点增透, 特殊的截止滤光片等, 尤其是激光反射镜的设计, 涉及到对多个波长同时反射和透射, 为达到最优化的和频输出, 还要对参与和频作用的两基频光进行能量调谐. 传统的 $\lambda/4$ 反射膜系结构设计已不能满足要求, 必须寻求新的膜系设计方法和新的制备工艺.

本文从双波长激光运转及和频机理出发, 对 LD 泵浦 Nd : YAG 晶体 1064 nm/946 nm 双波长运转, LBO 腔内和频输出 500.8 nm 青光激光器所使用的光学薄膜进行了设计和制备. 通过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, 设计出 500.8 nm 激光器所使用的激光薄膜, 采用双离子束反应溅射沉积的方法, 运用时间监控膜厚法成功制备出 500.8 nm 青光激光器所使用的全介质激光反射膜, 实现了 Nd : YAG 晶体 1064 nm/946 nm 双波长运转, 通过 LBO 腔内和频, 在 1.4 W LD 泵浦功率下获得 20 mW 500.8 nm 青色激光输出.

1 激光晶体分析

Nd : YAG 晶体主要有 1064 nm、1319 nm 和 946 nm 三条发射谱线, 分别对应的是 ${}^4F_{3/2} \sim {}^4I_{9/2}$ 、 ${}^4F_{3/2} \sim {}^4I_{11/2}$ 、 ${}^4F_{3/2} \sim {}^4I_{13/2}$ 的跃迁, 其中 1064 nm 和 1319 nm 属于四能级系统, 而 946 nm 属于准三能级系统. 由于 946 nm 的受激发射截面最小, 且属于准三能级结构, 振荡阈值较高, 不易获得激光输出, 在实现激光运转时与 1064 nm 和 1319 nm 存在严重的谱线竞争, 所以常见的双波长运转, 由于激光阈值 $P_{th1064} < P_{th946}$, 所以在相同的条件下 1064 nm 谱线优先振荡. 根据和频理论, 为达到最佳的和频输出, 不仅要求两基频光的功率密度要高, 而且参与和频作用的两基频光 ν_{1064} 和 ν_{946} 的腔内光子数要达到大致平衡, 即 $N_{1064} = N_{946}$, 也就是说 1064 nm 和 946 nm 的腔内光功率要满足分支比 $P_{1064} : P_{946} = 1 : 1.12$ 这一条件^[9]. 同时由于激光阈值 $P_{th1319} < P_{th946}$, 为保证

* 国家高技术研究发展计划 (2002AA311141) 资助项目
Tel: 0431-5530043 Email: buyikun139@163.com
收稿日期: 2004-11-01

946 nm 的高效振荡,还应对 1319 nm 谱线进行有效的抑制,最大限度减小其与 1064 nm 和 946 nm 的谱线竞争. 根据上述分析可以看出,要实现最优化和频输出,必须对两基频光的损耗进行调谐以达到较好的增益匹配. 这里对 1064 nm 和 946 nm 的能量调谐是通过谐振腔反射镜来实现的,所以对膜系设计提出了相当严格的要求,除了要尽量减少对弱谱线 946 nm 的透射和反射损耗外,降低其振荡阈值,还要严格控制对 1064 nm 的透过率. 既不能太大也不能太小,对 1064 nm 的透过率太大,造成 1064 nm 谱线输出损耗过大,腔内光功率过低,不利于和频;对 1064 nm 的透过率太小,就会对其抑制不够,与 946 nm 谱线产生强烈的竞争,严重时会将 946 nm 的振荡完全抑制掉. 同时为有效的注入泵浦光并形成高质量的泵浦光斑,应尽可能提高 Nd:YAG 入射端面对泵浦光 808 nm 的透过率,为获得和频 500.8 nm 青色激光的高效输出,在输出镜反射面还应对 500.8 nm 实现高的透过率. 在这里采用将谐振腔左端面即 Nd:YAG 晶体的入射面反射率固定不变,通过调整输出镜凹面对 1064 nm 的透过率来达到优化配比. 实际中精确控制 1064 nm 输出镜的透射率值是非常困难的,只有通过反复实验,结合实际工艺,找到对 1064 nm 的最佳透射率值.

2 膜系设计

图 1 给出了和频 500.8 nm 激光器的腔型构造,如图 1,为了缩小激光器体积,使结构更为紧凑,将激光反射膜直接镀于激光晶体的外端面上作为谐振腔的一个腔镜,谐振腔由晶体 Nd:YAG 的入射面 A 和输出镜凹面 C 构成. 根据上述对膜系要求的分析,A 面的膜系要求为:808 nm AR($T > 90\%$),1064 nm/946 nm HR($R > 99.9\%$),1319 nm AR($T > 90\%$),在输出镜 C 面上镀制特殊的全介质反射膜,不仅要保证 946 nm 高反射率要求,还要通过控制 1064 nm 谱线的透过率来实现其激光运转的增益匹配,达到腔内光子数的平衡. 文献[9]基于最优化和频输出的理论对 1064 nm 的最佳透过率进行了计算,确定在 1.4 W 泵浦功率下 1064 nm 的最佳透过率为 10%,膜系要求:500.8 nm AR($T > 98\%$),946 nm HR($R >$

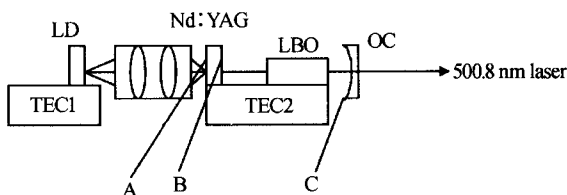


图 1 LD 泵浦的 500.8 nm 激光器装置

Fig. 1 The setup of LD-pumped 500.8 nm laser

99.9%),1064 nm PT($T = 10\%$),1319 nm AR($T > 90\%$). 为保证激光输出功率的稳定,避免晶体 Nd:YAG 在高功率泵浦下出现自激振荡现象,对于晶体的内端面 B 面还要镀制高质量的 946 nm/1064 nm 宽带减反膜(剩余反射率 $R < 0.5\%$).

这里主要给出难度较大的谐振腔激光反射镜的设计过程:由于在实际膜系镀制中存在吸收和散射以及制造误差的影响,一般来说理论设计值要高于上述所提出的光谱特性要求. 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,通过改变膜层的结构参量来设计所要求的全介质膜系,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. 高折射率材料为 Ta_2O_5 ,其折射率为 2.075,低折射率材料为 SiO_2 ,折射率为 1.452. 对于晶体入射面 A,由于 1064 nm 和 946 nm 两点相距较近,由薄膜光学理论可知:对于介质膜系,反射带宽主要依赖于介质材料高低折射率之比,所以在选择合适的中心波长时,实验中所使用的高低折射率材料 Ta_2O_5 和 SiO_2 确定的反射带宽可以使 1064 nm 和 946 nm 处于一个反射带内. 尽管这两点无法达到最高反射率的要求,但通过适当的增加反射膜堆的周期数,仍可以使两点同时满足所提的反射率要求,从而降低了膜系设计的难度. 设计中心波长为 980 nm,为满足短波部分 808 nm 高透过率的要求,初始结构为一常规的短波通, sub/0.5L(HL) \cdot 20 H0.5L/Air,sub 代表基底, $n = 1.83$ (Nd:YAG). 但该结构无法满足长波部分 1319 nm 的高透射,所以通过计算机膜系优化软件采用模拟退火法与共扼梯度法相结合的算法对该结构进行了局部优化,设计结果 1064 nm 理论反射率为 $R = 99.9927\%$,946 nm 理论反射率为 $R = 99.9959\%$,808 nm $T = 99.84\%$,1319 nm $T = 94.41\%$,所设计的曲线在 808 nm 附近保持一个宽阔平坦的高透带. 这种设计可以避免因工作温度变化而造成激光

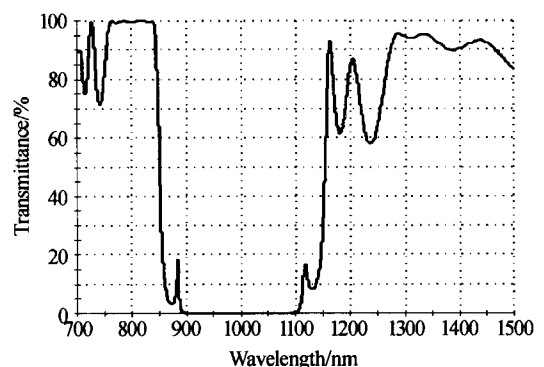


图 2 Nd:YAG 晶体入射面膜系透射曲线

Fig. 2 Transmission curve of incident face on Nd:YAG

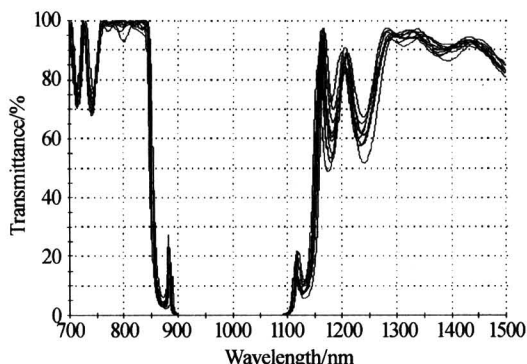


图3 相对标准差 1.5% 的误差分布曲线
Fig. 3 Error distribution curves at standard deviation 1.5%

二极管中心发射波长漂移的问题,理论设计曲线如图 2. 对该膜系的容差特性进行分析,当给定 1.5% 的相对标准偏差时,从图 3 的十次误差分布曲线可以看出,在要求的光谱波段仍具有较好的光谱透射特性,808 nm 在 Worst case 的情况下透过率仍大于 90%,满足设计要求,并且有好的容差特性.

对于输出镜的凹面C,设计中心波长即为 946 nm,以保证在较少层数下达到 946 nm 的高反射要求,降低膜系镀制的成本. 初始结构为 sub/0.5L(HL)-15 H0.5L/Air,sub 代表基底, $n=1.52$ (K9 玻璃),该结构只满足了 946 nm 高反射和 500.8 nm 的高透过,无法满足 1064 nm 的部分透射和 1319 nm 的高透过,本文通过计算机优化,采用 OPTIMIC^[10] 的优化算法,得出总层数 35 层的非 $\lambda/4$ 膜系结构:在 946 nm 处的反射率 $R=99.992\%$,1319 nm 处的透射率 $T=94.93\%$,500.8 nm 处的透射率 $T=99.69\%$;1064 nm 的透过率为: $T=10.344\%$,理论设计曲线如图 4,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.

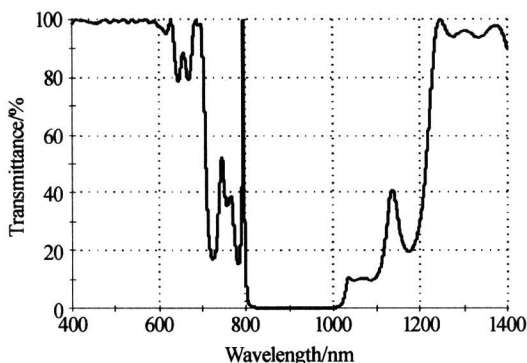


图4 平凹输出镜左端面膜系透射曲线
Fig. 4 Transmission curve of left face on output mirror

3 实验装置及结果

实验使用双离子束溅射沉积薄膜系统. 主、辅离子源采用美国 IonTech Inc 生产的 16 cm 和 12 cm 射频离子源,并分别配有射频中和器. 离子光学系统为三栅网型,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 5 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 5,基本工作原理: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 141/2 英寸的靶材,溅射出靶材料的分子或原子,溅射出的粒子沉积到基片上形成薄膜. 12 cm 辅助离子源发射反应气体 O_2 和 Ar 气的混合气体离子束轰击生长的薄膜,则沉积在基底表面的金属原子与反应气体离子发生化合反应,转为形成和生长化合物薄膜,同时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,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 99.95%)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° ,并在溅射时靶材以 $\pm 3.5^\circ$ 扫描.

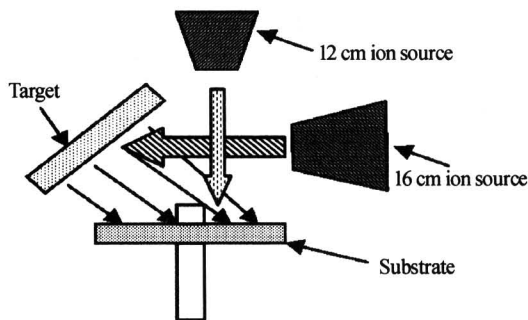


图5 双离子束溅射沉积薄膜系统
Fig. 5 Dual-ion beam sputtering deposition thin film system

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% 以内,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量,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,尤其对于实验中所设计的青光反射镜,为了满足多个波段的高反射和高透射以及部分透射的要求,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.通过定标得到薄膜沉积速率为 Ta_2O_5 :0.305 nm/S, SiO_2 :0.271 nm/S,以此计算出各膜层所需的时间,编入薄膜运行控制程序 Sourcer Spector 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,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:B 面基频光 946 nm $R=99.97\%$,1064 nm $R=99.91\%$,1319 nm $T=90.51\%$,808 nm $T=94.63\%$,输出镜凹面 C 面实际测试曲线向长波漂移 15 nm,946 nm $R=99.98\%$,1064 nm $T=9.47\%$,1319 nm $T=93.86\%$,和频光 500.8 nm 输出达 95.89%.由于背反射的影响实际透过率要低于理论透过率,通过计算机程序对背反射进行了修正,实际测试曲线如图 6.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.

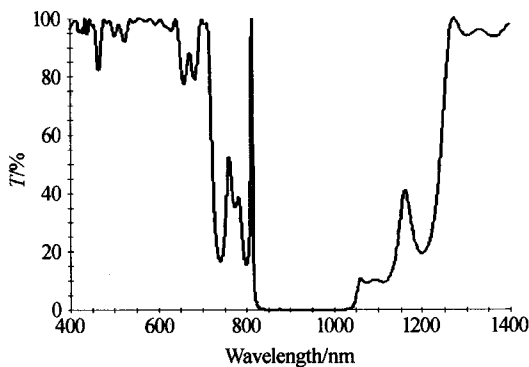


图 6 输出镜凹面实验透射率曲线

Fig. 6 Experimental transmittance curve for output mirror

4 结论

设计出符合要求并具有好的容差特性的膜系,制备出具有优良光性能并满足应用要求的激光反射镜,用该反射镜作为激光谐振腔的两个腔镜,在室温下实现 946 nm 和 1064 nm 双波长连续运转,并通

过 I 类临界相位匹配 LBO 晶体腔内和频在国内首次实现 500.8 nm 青色激光输出,当泵浦注入功率为 1.8 W 时和频黄激光最大输出达 20 mW,光光转换效率为 1.4%,功率稳定性 24 h 内优于 $\pm 2.8\%$.

参考文献

- 1 Jack Marling. 1.05-1.44 μm tenability and performance of the CW Nd^{3+} : YAG laser. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1978, **14**(1): 56~62
- 2 Chen Y F, Huang Ting-Ming, Wang Chi-Luen, et al. Compact and efficient 3.2 W diode-pumped Nd:YAG/KTPgreen Laser. *Applied Optics*, 1998, **37**(24): 5727~5730
- 3 郑权,陈颖新,钱龙生. LD 泵浦 Nd:YAG/LBO 结构 660 nm 红光激光器. *光子学报*, 2003, **32**(10): 1153~1155
Zheng Q, Chen Y X, Qian L S. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10): 1153~1155
- 4 高兰兰,檀慧明. 利用复合 Nd:YAG 实现 600 mW 高效紧凑型蓝光激光器. *光子学报*, 2004, **33**(1): 8~10
Gao L L, Tan H M. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 8~10
- 5 Andreea Dinca, Mihai E Trifan, Voicu Lupei. Dichroic mirror for diode pumped Nd:YAG laser. *SPIE*, 1997, **2776**: 262~270
- 6 Niederwald H, Greve P, Eichinger R. Dielectric coatings for diode pumped solid state laser devices. *SPIE*, 1989, **1125**: 76~84
- 7 洪冬梅,朱震. 二极管泵浦 Nd:YVO₄ 倍频激光器使用的光学薄膜. *激光与红外*, 2001, **31**(6): 118~120
Hong D M, Zhu Z. *Laser & Infrared*, 2001, **31**(6): 118~120
- 8 Farley R W, Dao P D. Development of an intracavity-summed multiple-wavelength Nd:YAG laser for a rugged solid-state sodium lidar system. *Applied Optics*, 1995, **34**(21): 4269~4273
- 9 亓言,卜轶坤,郑权,等. LD 泵浦腔内和频连续 500.8 nm Nd:YAG/LBO 激光器. *激光与红外*, 2004, **34**(6): 436~438
Qi Y, Bu Y K, Zheng Q, et al. *Laser & Infrared*, 2004, **34**(6): 436~438
- 10 Essential Macleod User Manuals. Angus Macleod Thin Film Center Inc. 2004. 135~136

Design and Manufacture of Optical thin Films for 500.8 nm Nd : YAG Laser

Bu Yikun^{1,2}, Zheng Quan¹, Xue Qinghua^{1,2}, Qi Yan^{1,2}, Qian Longsheng¹

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022

² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date: 2004-11-01

Abstract Based on dual-wavelength action and sum-frequency-mixing theory, a series of optical thin film for LD pumped Nd : YAG crystal, LBO intracavity sum-frequency-mixing 500.8 nm laser are designed and manufactured. To obtain optimum output power, the coating design of resonator mirror is analyzed. The method that adjusts one resonator facet reflectivity for fundamental laser by fixing the other resonator facet reflectivity is used, by computer thin film optimization methods based on the reasonable starting design. The dielectric high reflective laser mirror for 500.8 nm laser is achieved by double ion beam sputter technique, which is controlled by a time-power monitoring method. An optimized CW 500.8 nm laser at room temperature is obtained for the first time in China. The maximum laser output power of 20 mW is obtained when a incident pump laser of 1.8 W is used.

Keywords Optical thin film; Nd : YAG laser; LD pumped; Intracavity sum-frequency mixing



Bu Yikun was born in 1979, in Hebei Province, China. He graduated from ChangChun Science and Technology University in 1998, majored in Fine mechanical engineering. Since then he has studied in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences for his Ph. D. degree. He mainly research on LD pumped all solid-state laser and designing, fabricating on high-damage induced threshold optical thin film.