

文章编号: 1001-3806(2009)03-0249-03

KTP 倍频晶体增透膜的改进

王瑞华, 刘训民, 祝俐, 何京良

(山东大学 晶体材料国家重点实验室, 济南 250100)

摘要: 为了改进 KTP 晶体倍频增透膜的镀膜质量, 采用 SiO₂ 代替原来使用的 MgF₂ 材料作外层膜并重新设计了膜系。实验结果表明, 运用上述技术将镀有 1064nm 和 532nm 增透膜的 KTP 倍频晶体应用在高功率 Nd:YAG 激光器中, 当重复频率 1kHz、脉宽 25ns、基波功率密度高达 450MW/cm² 时, 没有观察到 KTP 晶体表面激光损伤, 膜层表面抗激光损伤和光学性能都得到提高。

关键词: 薄膜; 增透膜; KTP 晶体; 激光损伤阈值

中图分类号: O484.4 **文献标识码:** A

Improvement of antireflection coating on KTP crystal

WANG Rui-hua, LIU Xun-min, ZHU Li, HE Jing-liang

(Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Ji'nan 250100, China)

Abstract: By redesigning the film with substituting SiO₂ instead of MgF₂ as the outer layer film, the frequency doubling antireflection coating on the KTP crystal is improved. After the KTP crystal with 1064nm and 532nm antireflection coating is applied in high power Q-switched Nd:YAG laser, any surface damage have not been observed even at intensity as high as 450MW/cm² at a pulse repetition rate of 1kHz and 25ns of pulse duration. The experimental results show that both the surface quality and the optical property of the film have been improved.

Key words: thin film; antireflection coating; KTP crystal; laser-induced damage threshold

引言

磷酸钛氧钾(KTP)晶体是一种综合性能优越的新型非线性光学材料,它具有非线性系数大、光学均匀性好、热导性好、透过波段宽等优点,同时具有良好的物理、化学和机械性能,在激光频率转换包括倍频、和频及光参量振荡的应用方面,具有重要的应用价值。特别是在激光医疗、加工、全息照相、高速摄影、非线性光学研究等领域有着广泛的应用。在应用最多的高效倍频 532nm 绿光器件中, KTP 晶体器件的优劣更是起着至关重要的作用,而晶体通光面的镀膜技术指标将直接影响器件的正常运转^[1-3]。在应用最多的倍频器件中,通常 KTP 晶体倍频增透膜是 1064 nm 和 532 nm 的双波长增透膜,技术要求在波长 1064 nm 和 532 nm 处的剩余反射越小越好,且膜层表面牢固度和光洁度要高。目前一般使用的膜系是 GHMXA 3 层膜(H 为 ZrO₂, M 为 Al₂O₃, X 为 MgF₂)。由于外层膜使用的是氟化镁,这

种材料在蒸镀时容易产生微细的喷点,影响膜层表面的光洁度,容易受水气的影响,使薄膜的牢固度、稳定性以及抗激光性能受到影响。光学薄膜的抗激光损伤能力对高功率激光器来说是一个重要指标,其大小直接影响激光器设计建造的成败^[4-6]。研究表明,光学薄膜的抗激光损伤能力与多种因素有关,主要包括镀膜材料的选定、膜系设计和镀膜参数的优化等,其中膜系的设计最为重要^[7-11]。膜系设计一般有两种方法,一种是固定选择的膜层材料,改变每层膜的厚度;另一种是固定膜层 λ₀/4 厚度,选择适当的膜层材料^[12]。本文中,作者采用后面一种方法,对这种倍频膜系进行了改进,用 SiO₂ 代替传统使用的 MgF₂ 设计新的膜系,设计出 4 层 λ₀/4 膜系,应用到高功率绿光倍频激光器中,获得了满意的结果。

1 对 3 层倍频增透膜的分析

用矢量作图法分析增透膜的光学特性是很方便的,下面就用矢量作图法对 3 层增透膜进行分析。

1.1 膜系为 GHMXA

如图 1 所示, G 为 KTP 晶体, H 为 ZrO₂, M 为 Al₂O₃, X 为 MgF₂, A 为空气。各层膜的厚度均为 λ₀/4, λ₀ = 710nm。故每层膜的位相厚度为 δ₁ = δ₂ =

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60478009)

作者简介:王瑞华(1966-),女,工程师,主要从事光学设计、镀膜等研究工作。

E-mail: rhwang@sdu.edu.cn

收稿日期:2008-05-04;收到修改稿日期:2008-07-09

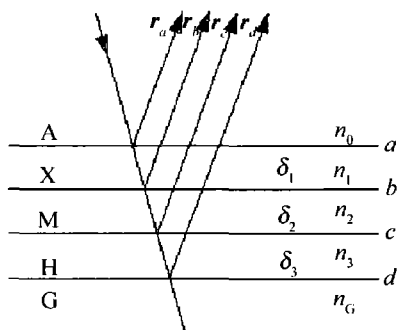


Fig. 1 Scheme for GHMXA thin film

$\delta_3 = 90^\circ (\lambda = \lambda_0)$ 。已知 $n_0 = 1, n_1 = 1.38, n_2 = 1.63, n_3 = 1.95, n_G = 1.78$ (KTP 晶体的折射率)。通过计算各个界面的反射系数为: $r_a = -0.16, r_b = -0.083, r_c = -0.0894, r_d = 0.0456$ 。

该膜系在 $\lambda_1 = 3\lambda_0/4$ 和 $\lambda_2 = 3\lambda_0/2$ 处反射率有最小值。矢量图见图 2 和图 3。

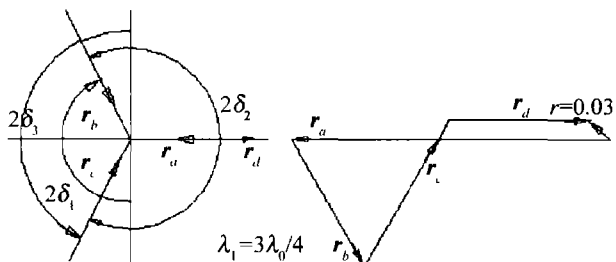


Fig. 2 The vector diagram of GHMXA thin film for $\lambda_1 = 3\lambda_0/4$

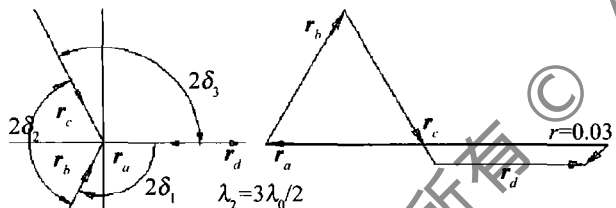


Fig. 3 The vector diagram of GHMXA thin film for $\lambda_2 = 3\lambda_0/2$

由此可见, 剩余反射率已经很小 ($r = 0.03, R = 0.09\%$)。

1.2 膜系为 GHML

现在用 SiO_2 (L) 代替 MgF_2 (X) 作外层膜的情况进行分析。已知 $n_0 = 1, n_1 = 1.45, n_2 = 1.63, n_3 = 1.95, n_G = 1.78$ 。各个界面的反射系数为: $r_a = -0.184, r_b = -0.058, r_c = -0.0894, r_d = 0.0456$ 。

为简便起见, 只画出 $\lambda_2 = 3\lambda_0/2$ 的矢量图分析。见图 4。

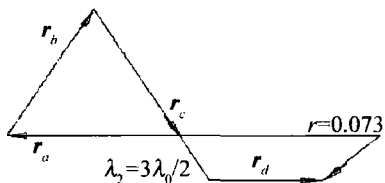


Fig. 4 The vector diagram of GHML thin film for $\lambda_2 = 3\lambda_0/2$

从图 4 可以看出, 该膜系所产生的反射系数 $r = 0.073$, 反射率 $R = 0.53\%$, 与 MgF_2 外层膜相比, R 值

大了许多, 要减小 R 的值并使它趋于 0, 应增加膜系的层数。

2 膜系设计

最简单的方法是在基片与 3 层膜系之间插入一层膜, 令其折射率为 n_4 , 用矢量作图法计算出其界面上的反射系数, 从而求出 n_4 。如果 n_4 能找到实用的材料, 则设计完成, 否则重新设计。

现令插入的这层膜的光学厚度为 $\lambda_0/4$, 因而 r_d 和 r_e 的位相厚度都已知, 即 $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = \delta_4 = 90^\circ (\lambda = \lambda_0, \lambda_0 = 706\text{nm})$ (见图 5), 在极坐标上看出, r_a 与 r_d 重合, r_b 与 r_e 重合 (见图 6)。

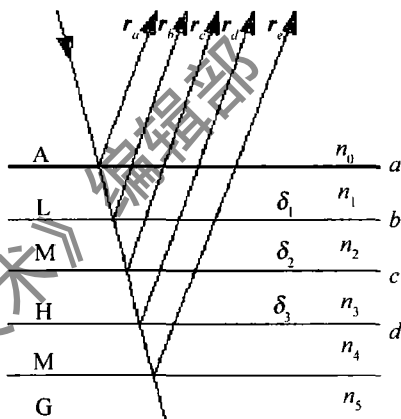


Fig. 5 Scheme for GMHMLA thin film

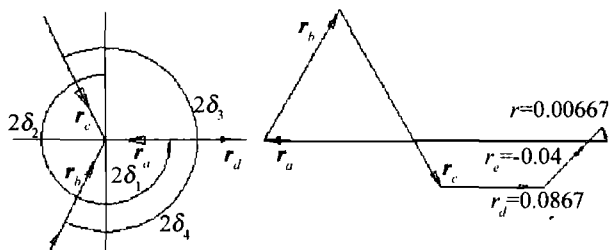


Fig. 6 The vector diagram of GMHMLA thin film

的矢量图基础上 (见图 4), 作 4 层膜系的矢量图 (见图 7)。在 r_c 的顶点 h 作 r_a 的平行线, 在 r_a 的起点 o 作 r_b 的平行线, 两线相交于点 p , 则 $hp = r_d, op = r_e$, 测出 r_d 或 r_e 值, 即可求得 n_4 。

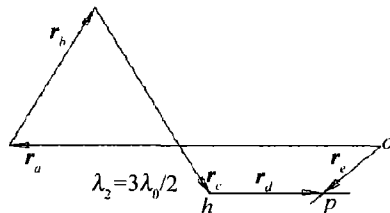


Fig. 7 The vector diagram of GMHMLA thin film for $\lambda_2 = 3\lambda_0/2$

从图 7 中测得 $r_d = 0.0933$, 则 n_4 由下式求得:

$$n_4 = \frac{n_3(1 - r_d)}{1 + r_d} = \frac{1.95(1 - 0.0933)}{1 + 0.0933} = 1.617$$

$n_4 = 1.617$ 与 Al_2O_3 的 $n = 1.63$ 接近, 因此, 可以选用 Al_2O_3 作该层膜的膜料, 在 3 层膜系中以 M 表示。

所以4层膜系可以写成GMHMLA,将这一结果再用矢量作图法作图,有关参量标在图上(见图5和图6)。

计算出该膜系的反射系数 $r=0.00667$,剩余反射率 $R=0.000044=0.0044\%$ 。可见它比3层膜系GHMXA的 $R=0.09\%$ 小了很多。

3 用计算机对膜系作精确计算

由于矢量作图法受技术的精确程度影响较大,因此会有一些的误差,所以将矢量作图法的设计结果GMHMLA用计算机作精确计算(未考虑色散的影响), λ_1 和 λ_2 处的反射率列于表1中。实验结果和曲线分别见表2和图8。

Table 1 The theoretical results for thin film

capability	thin films	
	GHMXA	GMHMLA
$R_{532}/\%$	0.0814	0.001
$R_{1064}/\%$	0.00715	0.00216
bandwidth($R_{532} < 0.1\%$)/nm	12	14
bandwidth($R_{1064} < 0.1\%$)/nm	56	62

Table 2 The experimental results for thin films

capability	thin films	
	GHMXA	GMHMLA
$R_{532}/\%$	0.1073	0.0714
$R_{1064}/\%$	0.0749	0.0848
bandwidth($R_{532} < 0.1\%$)/nm	10	12
bandwidth($R_{1064} < 0.1\%$)/nm	52	56

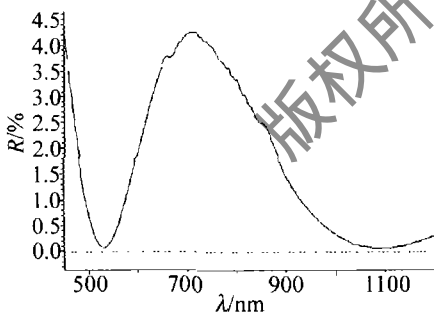


Fig. 8 The experimental curve of GMHMLA thin film

从表1可见,膜系GMHMLA的剩余反射率比膜系GHMXA的更小,且该膜系在 $R < 0.1\%$ 时的带宽也略有增加,这对于镀膜工艺是有利的。

镀制结果与理论设计的差异主要是由于实际材料的折射率与设计值有差异,以及由膜料的散射、光学控制不稳定性、镀膜工艺等多种因素造成的^[13-14]。在剩余反射率的测量中,其精度受到很多人工因素的影响,为了得到比较可靠的数据,采用了多次试验并进行多次测量来减小误差。整个工作是在ZZS-660型镀膜机

上进行的,实验结果是用U-4100日立分光光度计测试反射率 R 值和反射曲线。

4 结论

运用上述技术,将镀有1064nm和532nm增透膜的KTP倍频晶体应用在声光开关高功率YAG激光模块实验中,取得了单次通过光-光转换效率为64%,绿光平均功率输出达28.5W。当重复频率1kHz、脉宽25ns、在基波功率密度高达450MW/cm²时,没有观察到KTP晶体表面激光损伤。

参考文献

- [1] TAN T Y, ZHAN M Q, TIAN G L, *et al.* Development of coatings on the crystals for diode pumped lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004(7): 31-34 (in Chinese).
- [2] ZHANG W Q, TANG Y X, LIU X L, *et al.* Protective coatings for large size KDP crystals [J]. *Proc SPIE*, 1997, 3175: 94-97.
- [3] DENG Zh X, GAO H H, XIAO L J, *et al.* Design and preparation of frequency doubling antireflection coating with different thicknesses of interlayer for LiB₃O₅ crystal [J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(1): 60-62.
- [4] DENG Zh X, HE H B, SONG Y X, *et al.* Fabrication and performance evaluation of 1064nm, 532nm frequency-doubled antireflection coating for LBO crystal [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(8): 1325-1328 (in Chinese).
- [5] HU J P, QIU F M, FU X Y, *et al.* Effect of $\lambda/2$ silica overcoat on laser damage of HfO₂/SiO₂ high reflecting coating [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, 13(2): 137-141 (in Chinese).
- [6] YU A F, FAN F D, LIU Zh X, *et al.* Effect of SiO₂ barrier layer on laser induced damage threshold of second harmonic antireflection coatings on LiB₃O₅ crystal [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(4): 603-606 (in Chinese).
- [7] ZHOU W J, YUAN Y H, GUI Y Zh, *et al.* Research on damage of TiO₂/SiO₂ film induced-by 1.06 μ m CW laser [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(1): 77-81 (in Chinese).
- [8] ZHOU W J, YUAN Y H, GUI Y Zh. Simple time measurement of TiO₂/SiO₂ film damaged by laser [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(4): 381-383 (in Chinese).
- [9] ZHOU W J, YUAN Y H, GUI Y Zh. Thermal effect of TiO₂/SiO₂/K9 film by 1.06 μ m CW laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 17(9): 1308-1311 (in Chinese).
- [10] ZHU Y N. Discussion of the measurement methods for laser induced damage threshold of optical coating [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(5): 532-535 (in Chinese).
- [11] MELNINKAITIS A, MIKSYS D, GRIGONIS R, *et al.* Laser-induced damage thresholds of ion beam sputtered and magnetron sputtered AR-coatings on lithium borate [J]. *Proc SPIE*, 2005, 5991: 59911C/1-59911C/11.
- [12] KOECHNER W. *Solid-state laser engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2002: 582-607 (in Chinese).
- [13] TAN T Y, HUANG J B, ZHAN M Q, *et al.* Design and error analysis of 1064nm, 532nm frequency-doubled antireflection coating for LBO [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(2): 242-247 (in Chinese).
- [14] TAN T Y, YI K, SHAO J D, *et al.* Measurement of refractive index of the optical crystal with spectrophotometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(12): 1678-1682 (in Chinese).