

文章编号: 0258-7025(2001)08-0765-04

白宝石窗口增透膜的研究

王英剑 王 靖 宋永香 张 虹 李庆国 范正修

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

提要 对白宝石(Al_2O_3) 和石英(SiO_2) 窗口的性能进行了比较,并在白宝石上镀制增透膜,进行初步的判断实验,取得了良好的效果,同时对存在的问题进行了分析,指出白宝石是一种比较有前途的高功率激光窗口材料。

关键词 白宝石, 石英, 增透膜

中图分类号 TQ 164.9; O 484 文献标识码 A

Study of Anti-reflection Films Coated on the Sapphire Window

WANG Ying-jian WANG Jing SONG Yong-xiang

ZHANG Hong LI Qing-guo FAN Zheng-xiu

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract An anti-reflection film coated on the sapphire window is made. By comparing the sapphire window with quartz window, it is found that the sapphire is a very promising window material for high power laser.

Key words sapphire, quartz, anti-reflection films

1 引 言

随着激光技术的不断发展,以石英(SiO_2) 为基底的窗口已经不能满足系统的要求,因此必须寻找新的窗口材料。鉴于白宝石(Al_2O_3) 优异的物理性能,我们选择白宝石做高功率激光的窗口材料,其物理性能如表 1 所示(包含石英的物理性能,以便对比)。白宝石的晶体结构如图 1^[1]。

从表中可以看出,白宝石的密度、熔点、热传导、硬度等几个关键参数都比石英高,只有热膨胀系数比石英差,但前期的实验表明,即使零膨胀的石英做窗口,在高功率激光的作用下,仍然产生严重形变,导致光束质量严重下降,可见热膨胀系数在这里不起决定作用。相比之下,白宝石的热传导是石英的两倍多,而正是由于石英的热传导性不如白宝石好,在高功率激光的实验中,当光通过石英窗口时,产生了严重形变。相对而言,白宝石在同样的条件下就好得多,强光通过后几乎不发生什么变化。白宝石的折射率比较大(见表 1),决定其反射率也较大(透过率 T 约为 85%,见图 3),这反而给白宝石窗口蒸镀增透膜提供了机会:可以更有效地增加透过,降低

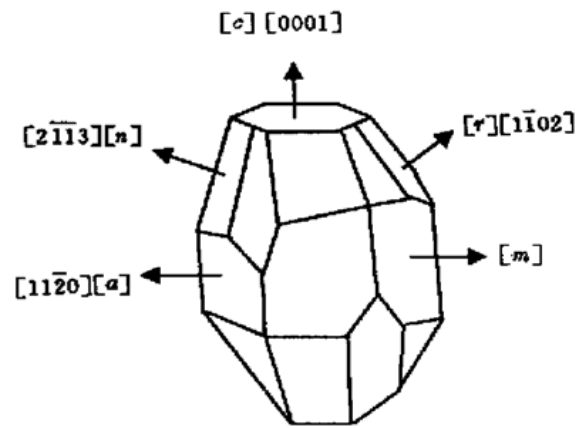


图 1 白宝石的晶体结构示意图

Fig. 1 Diagram of the structure of sapphire crystal

反射。事实表明,在高功率激光器上用白宝石做窗口是非常有前途的。

用白宝石做窗口的缺点在于它的高硬度和双折射现象。白宝石的硬度仅次于金刚石,除了金刚石外,其他材料是无法用来抛光白宝石的,这给精加工带来许多困难,而且成本很高。另外,白宝石还具有双折射现象,也影响光的透过,为避免这种现象的产生,应准确地选出垂直于光轴的晶体切面,即[0001]面(参见图 1),而生长该方向的大尺寸白宝石也是

极其困难的。令人欣慰的是,目前生长大尺寸的白宝石已经成为可能,加工精度虽然滞后,但也在提高。据文献[1,2]报道,国外的白宝石加工精度可达:0.1 nm (rms), $\lambda/10$ ($\lambda = 623.8 \text{ nm}$), 尺寸为 305

mm \times 965 mm \times 2.5 mm。本所晶体研究中心可以生长出直径 100 mm 以上的晶体,而且是极难生长的平行于 c -光轴面[0001]的晶体,为我们以后进行实验和实用提供了可靠的保证。

表 1 白宝石和石英的基本物理性能

Table 1 Basic physical characters of sapphire and quartz

	Sapphire	Quartz
Density/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	3.98	2.202
Crystal structure	Hexagonal	Amorphous
Melting point/ $^{\circ}\text{C}$	2040	1743
Young's modulus/GPa	379	76
Thermal expansion coefficient/K	7.8×10^{-6}	0.5×10^{-6}
Thermal conductivity/ $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ (25 $^{\circ}\text{C}$)	24	11
Index of refraction	1.75(1150 nm O)	1.46 (visible)
Poisson's ratio	0.27	0.1682
Knoop's hardness/ $\text{kg}\cdot\text{mm}^{-2}$	2200	741
Specific heat/ $\text{cal}/\text{g}\cdot^{\circ}\text{C}$	0.1813(18 $^{\circ}\text{C}$)	0.1657(0 $^{\circ}\text{C}$)
Mohs hardness	9	5.5

2 膜系的初步设计及实验

对于增透膜来说,膜系设计的基本原则就是在给定基底材料的条件下尽可能地增加透过率,然后再考虑镀膜材料之间与基底材料的匹配,避免应力的集中,并保证薄膜与基底结合的牢固性。基于此,我们的实验设计了两种膜系: $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 和 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 。在计算机上模拟的结果十分理想(第一种膜系),如图 2 所示。由图可知,在 1315 nm 处透过率可达 99.999%,甚至 100%;在 632.8 nm 处也达到了 92%(以白宝石为基底)。考虑到白宝石成本高,初期的实验是在 K9 玻璃上进行的(在可见和近红外波段,可用 K9 代替白宝石来确定波长位置,但在实际应用中 K9 是无法代替白宝石的)。经过一系列的调整,待工艺稳定后,再在白宝石(小样品)上蒸

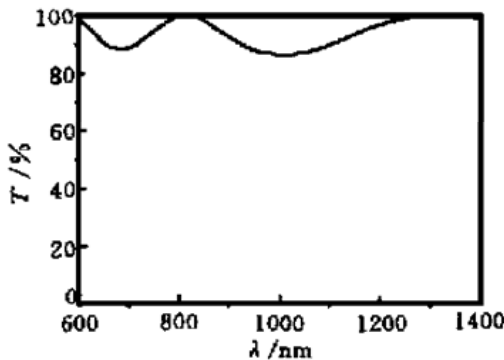


图 2 计算机模拟白宝石双面增透膜曲线
Fig. 2 Transparent curve of anti-reflection films on both sides of sapphire simulated by computer

镀增透膜,经过测试和分析之后,又在两块正式样品上镀膜,并在高功率激光上进行对比判断实验。镀膜实验是按电子枪蒸镀这一传统方法进行的。

3 测试结果与分析

样品测量是在 Pekin-Elmer 公司制造的 Lambda 9UV/UIS/NIR 上完成的。图 3 是 1# 和 2# 白宝石镀膜前的透过曲线,图中有三条线,表明在不同位置有

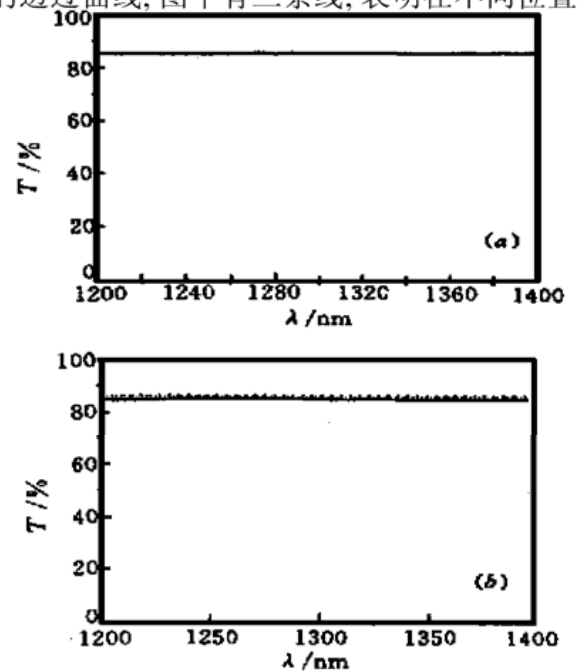


图 3 1# (a) 和 2# (b) 白宝石的透过曲线(未镀膜)
Fig. 3 Transparent curves of No. 1 and No. 2 of sapphires (before coating)

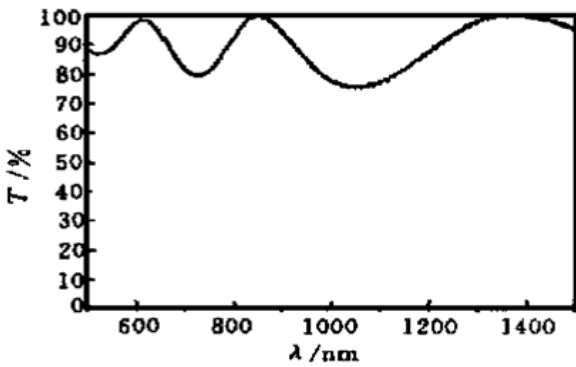


图 4 1[#] 白宝石双面增透膜的透过曲线

Fig. 4 Transparent curve of anti-reflection films on both sides of No. 1 sapphire

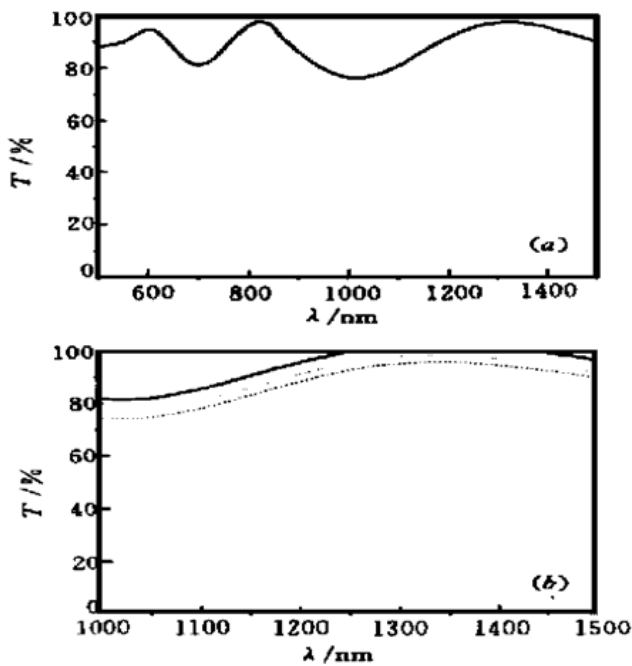


图 5 2[#] 白宝石双面增透膜的透过曲线 (a) 和在不同位置的透过曲线(b)

Fig. 5 Transparent curve of anti-reflection films on both sides of No. 2 sapphire (a) and different transparent curves of anti-reflection film on both sides of No. 2 sapphire in different position (b)

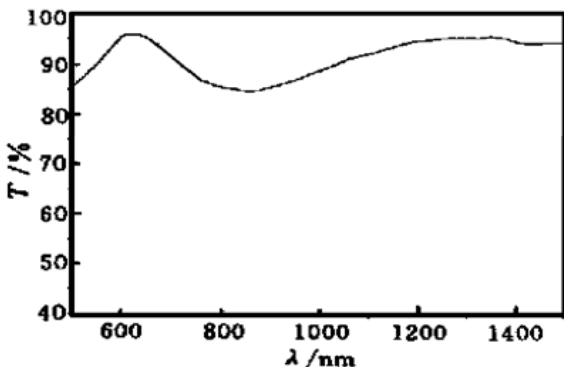


图 6 白宝石单面增透膜的透过曲线

Fig. 6 Transparent curve of the anti-reflection film on one side of sapphire

不同的曲线,这是双折射造成的;图 4 是 1[#] 白宝石双面增透膜的曲线,图中也有三条曲线,原因同上;图 5 是 2[#] 白宝石双面增透膜的曲线,分两个部分,图 5 (b) 更清楚地表明双折射的影响是比较大的,应尽可能避免这种情况;1[#] 和 2[#] 白宝石是用同一个膜系蒸镀的,所以曲线是相同的;图 6 是 $\phi 100$ mm 的白宝石样品单面镀增透膜后的透过曲线(第二种膜系,和图 4,图 5 不大一样);图 7 是双面增透膜的剩余反射率曲线,用来估算剩余反射率的大小,这个指标能够反映出增透膜的增透效果。

在此,有必要说明一下剩余反射率的测量。借助上面提到的光谱测量仪的相对测量反射附件,选用双面抛光的白宝石作标准,对样品进行 100% 平衡校正后,取走测量光路的标准样品,测量仪器的零点不为零而具有一定的数值,并随波长有所变化,将此数值扫描了一条本底曲线(图 7 中的虚线),显然在进行正式的样品膜片测量中包含了这个本底值,那么,膜片的实际剩余反射率 R 应该等于测量值减去本底值。从图 7 可以算出剩余反射率为 0.08%。

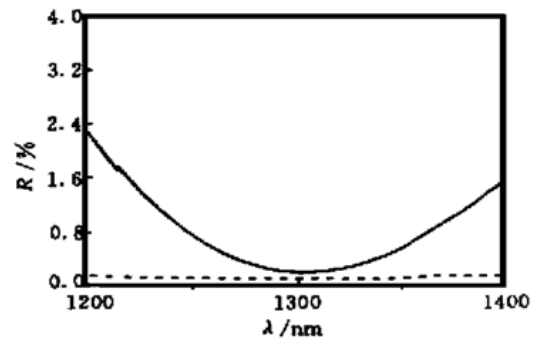


图 7 白宝石双面双波长增透膜的剩余反射率曲线

Fig. 7 Remained reflection curve of the anti-reflection film on both sides of sapphire

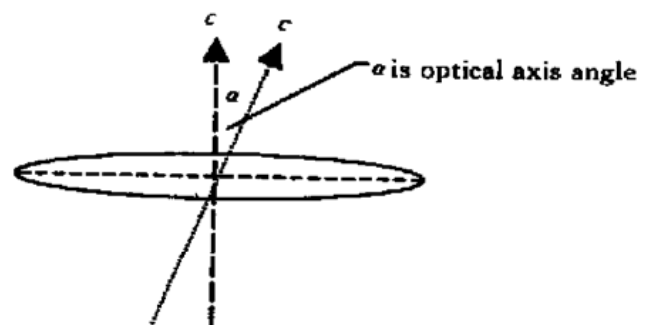


图 8 光轴角示意图

Fig. 8 Diagram of the angle of optical axis

从这些图中可以看出,白宝石增透膜的透过曲线非常好,实验结果与计算机模拟十分吻合。但从图 4 和 5 (b) 则可看出有一些偏差:白宝石片子在不同的位置,有不同的结果。从表 2 可以看到,白宝

石晶体在不同位置时,其透过曲线并不重合,而是有所分开,表中所列的透过率数据就是在 1315 nm 处各个样品在不同角度下测得的。这些样品都与 *c* 轴有大小不同的夹角:夹角越大,双折射就越明显,见图 8。由此可以判断,正是白宝石的双折射效应,才造成图中曲线位置的不重合和偏差。

另外,白宝石基底加工的精度也很重要。如平行度的不同,对透过率的影响也不同:1# 和 2# 样品在夹角相同的情况下,2# 的平行度比较大,它对透过率的变化就大一些。

表 2 一些白宝石基底的光学性能

Table 2 Optical characters of several sapphire samples

No.	Size/mm	T_0	T_{90}	T_{180}	$\alpha/(\circ)$	σ/nm	Parallel
1	$\phi 20$	85.00	86.00	86.20	5	4.563	3'
2	$\phi 20$	84.00	86.00	86.80	5	5.583	7
3	$\phi 20$	88.00	86.88	86.80	2.5	7.786	2'
4	$\phi 50$	85.00	86.50	86.60	big	-	1'
5	$\phi 30$	87.56	85.30	84.20	5	-	3'

Note: Transmission rates in the table were measured at 1315 nm.

表 3 两块正式样品的光学性能

Table 3 Optical characters of two sapphire samples

Size/mm	$\alpha/(\circ)$	σ/nm	Parallel	Wave front	T (before coating)	T (after coating)
$\phi 100^{-0.1} \times 6$	≈ 0	4	$< 2'$	8	86.6% (632.8 nm) 86.8% (1315 nm)	95% (632.8 nm) 99.7% (1315 nm)
$\phi 92^{-0.3} \times 6$	≈ 5	4	$< 44''$	8	86.35% (632.8 nm) 86.35% (1315 nm)	95% (632.8 nm) 99.2% (1315 nm)

表 4 白宝石和石英在强激光作用下的变形情况

Table 4 Variation of sapphire and quartz under the high power laser

Material of the window	Size/mm	Density of power/ $\text{kW} \cdot \text{cm}^{-2}$	$\Delta \lambda (\lambda = 632.8 \text{ nm})$
Quartz	$\phi 100 \times 6$	2.65	8 ~ 10 λ
Sapphire	$\phi 100 \times 6$	2.65	0.2 λ

白宝石变形很小,干涉条纹仅有些微抖动,几乎看不出来,而石英变形非常大,干涉条纹扭曲在一起,有 8~ 10 个波长的变化,光束质量严重受到影响,已不能再作高功率激光器的窗口了,从而清楚地表明了白宝石的优越性。

4 讨 论

通过上述分析可以得出以下结论:

1) 对白宝石的选材和精加工十分关键。必须严格控制各个条件:如光轴角、粗糙度、平行度等因素,使其符合要求。鉴于目前国内的情况,要求白宝石精加工应满足:尺寸: $\phi 100 \text{ mm}$;粗糙度:2~ 3 nm;

如果排除双折射的干扰,白宝石增透膜的效果还是比较理想的,这就要求选取材料时,要严格控制光轴角,使其接近于 0,并在精加工时保持尽可能小的平行度,当然,其他因素如粗糙度、面形也是很关键的,缺一不可。

基于上述结果,我们选用了两块较大的白宝石蒸镀增透膜,作为正式样品,用于判断实验。它们的性能如表 3 所列。在强光的作用下,对白宝石窗口和石英窗口(在同样条件下镀上了增透膜)作了比较,结果见表 4。

平行度:30''~ 40'';光圈: $\lambda/5 (\lambda = 632.8 \text{ nm})$;无双折射现象;

2) 晶体的生长质量应进一步提高,消除杂质及不均匀性,并向大尺寸方向发展;

3) 镀膜工艺和镀膜条件仍有待改进,深入探讨白宝石窗口增透膜的光学性能和机械性能,为以后正式使用提供充分的依据。

参 考 文 献

- Richard Gentilman, Edward Maguire, Theodore Kohane *et al.*. Comparison of large ALON and sapphire windows. *SPIE*, 1989, **1112**: 31~ 39
- Brain G. Pazol, Richard Devito, Philip J. Giguere *et al.*. Development of sapphire windows for use in high quality IR imaging systems. *SPIE*, 1992, **1760**: 55~ 65