

文章编号: 0258-7025(2008)10-1573-06

激光玻璃与包边玻璃的折射率匹配

唐景平 胡丽丽 孟涛 董擎雷 干福熹

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 从理论上详细探讨了基质激光玻璃与包边玻璃的折射率匹配与剩余反射率的关系, 并从实验上验证了折射率匹配越好, 吸收系数与包边玻璃厚度的乘积越大, 则剩余反射率越低, 从而对激光放大器中寄生振荡的抑制越好, 增益也就越高。

关键词 激光技术; 激光玻璃包边; 折射率匹配; 剩余反射; 增益

中图分类号 TQ171.73⁺5; O435.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083510.1573

Cladding Glass' Refract Index Match up to the Laser Glass

Tang Jingping Hu Lili Meng Tao Dong Qinglei Gan Fuxi

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

Abstract We theoretically discussed the relation between the refractive index matching and the residual reflectance of the laser glass and cladding glass. The experimental results show that the better the refractive index matching and the higher product of the absorption coefficient and the cladding glass thickness, the lower the residual reflection, which result in the better restraint of the parasitic oscillation in amplified spontaneous emission (ASE) and the higher gain from the laser system.

Key words laser technique; cladding of laser glass; refract index matching; residual reflection; gain

1 引 言

用作高功率激光装置工作物质的激光玻璃^[1], 其性能依赖于三大要素: 一是优良的光谱与发光特性, 二是高的光学均匀性和抗激光损伤性能, 这两点主要取决于玻璃化学组成以及玻璃制备工艺; 三是对激光能量的有效放大能力, 这是保证激光系统最终输出能量水平的关键, 主要取决于对片状激光玻璃放大器中寄生振荡放大自发辐射 (ASE) 的抑制程度^[2]。在高功率激光系统中, 激活元件内寄生振荡的消除, 对于提高器件的激光输出效率, 特别是提高放大级的增益, 具有十分重要的意义。目前抑制这种寄生振荡的主要方法是对激光玻璃进行包边^[3], 也就是在垂直于光路方向的片状激光放大器的侧边配以吸收 ASE 的介质。因此, 包边是激光玻璃研制

过程的三大组成部分之一。在包边中钽玻璃与包边玻璃的折射率匹配对剩余反射起着至关重要的作用, 最终将影响寄生振荡的抑制程度, 从而影响放大器的增益。

目前激光玻璃包边方式大体上分为两类: 一类是采用粉末烧结方法在激光玻璃周边涂上一薄吸收层粉末, 烧结后形成一薄吸收层^[4,5]或是将物化参数与基体激光玻璃高度匹配的熔融态包边玻璃直接浇注于高温片状激光玻璃周边, 待冷却后二者融为一体, 称这种方法为“硬包边”^[6]; 另一类是采用光学胶粘剂将吸收 ASE 的包边玻璃粘贴在基体激光玻璃的周围, 并通过化学组成的优化使基体激光玻璃、粘结剂材料及吸收 ASE 的包层物理性质尽量匹配, 称这种方法为“软包边”^[7]。

收稿日期: 2007-09-17; 收到修改稿日期: 2008-01-25

基金项目: 国家 863-804 资助项目。

作者简介: 唐景平(1973—), 男, 主要从事激光玻璃及熔炼工艺和包边研究。E-mail: jipptang@mail.siom.ac.cn

导师简介: 胡丽丽(1963—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光玻璃和特种玻璃方面的研究。

E-mail: Hulili@laserglass.com.cn

2 实验过程

用不同折射率的包边玻璃对基质激光玻璃进行硬包边和软包边,包边玻璃吸收系数与厚度的乘积为一常数。

将物性参数与基质激光玻璃高度匹配的包边玻璃制备好,并有合适的吸收系数和折射率。由于硬包边工艺十分复杂,操作困难,样品制作难度较大,只做了包边玻璃折射率分别为 1.54 和 1.70 的 Y1 和 Y2 两种类型的硬包边样品。对于软包边,由于胶的物性参数除需要与激光玻璃匹配外,还需要满足耐激光辐照、耐氙灯辐照、耐水、耐环境和固化收缩率小等特性,也只研制了与激光玻璃折射率匹配较好的胶,用折射率分别为 1.538, 1.55, 1.60 的包边玻璃对激光玻璃进行包边。

对于 Y1 样品,采用整体包边的方法,将激光玻璃四周加工好后进行抛光处理^[8],加热到 T_g 温度,然后将熔融态的 Y1 包边玻璃直接浇注于高温激光玻璃周边,再将玻璃进行退火,冷却后加工成需要的测试样品代测试。对于 Y2 样品,采用粉末烧结法^[9],将熔制好的包边玻璃粉碎后用高速球磨机球磨 60min,过 300 目筛,制成粒径约 50 μm 的粉末。将激光玻璃的侧边进行加工并抛光,清洗干净。选择粘结性能和烧失性能良好的有机粘结剂,按一定比例与玻璃粉均匀混合,经陈放一段时间后,用涂刷方法均匀涂于抛光的激光玻璃侧边,厚度约 1 mm。将浆料烘干后进行热处理,第一阶段缓慢升温到一定温度保温,以使有机粘结剂烧失,第二阶段将涂层烧结到熔融温度之上,保温一段时间后进行精密退火。做好的样品待加工测试。对于 R1, R2, R3 样

品,采用软包边的方式,将精密退火后的激光玻璃的包边面加工好并抛光清洗,包边玻璃加工成 5 mm 的薄片,并抛光清洗干净,与激光玻璃的包边面相匹配。选择合适的胶粘剂均匀涂于包边玻璃上,并将包边玻璃轻轻贴在激光玻璃包边面上,经特定的固化工艺将粘接剂固化后,将样品加工成待测形状。

3 理论分析

在硬包边的情况下,为简化分析寄生振荡产生的条件,设片状激光放大器为图 1 所示直径为 d 的薄圆盘,折射率为 n_1 ;圆盘的周边是一假定的包层(即吸收 ASE 的包边玻璃层),折射率为 n_2 ,层厚为 L ;包边层对激光波长的光具有吸收本领,吸收系数为 α ;圆盘内的平均激光增益系数为 β_s 。在光抽运作用下,自任一点 A 发出的荧光在行进放大中于圆盘的抛光表面以临界角 θ 被全反射,反射光到达 B 点时,部分以反射率 R_0 反射回圆盘内部,另一部分透射至 n_2 层,在 C 点以 θ' 角反射。可以证明,当 $n_1 \geq \sqrt{2}$ 时, θ' 角总是满足全反射条件。在 E 点,部分反射光进入圆盘内部,透过率为 R_1 ,其余被反射回 n_2 层。如此反复,可以想象,由于自发辐射的荧光充满整个体积,在 $n_1 \sim n_2$ 界面上的任一点(例如 B 点)可能同时汇集有 $R_0, R_1, R_2, R_3, \dots$ 的反射(透射)光。也就是说,界面上任一点的反射率都可以看作其值为 $R_0, R_1, R_2, R_3, \dots$ 的叠加。

由菲涅耳(Fresnel)反射以及上述条件^[10],可以得出 $n_1 \sim n_2$ 界面上任一点的反射率为

$$R = \sum R_i = \frac{\left[\frac{n_1 \sin \theta - \sqrt{n_2^2 - n_1^2 + n_1^2 \sin^2 \theta}}{n_1 \sin \theta + \sqrt{n_2^2 - n_1^2 + n_1^2 \sin^2 \theta}} \right]^2 + \frac{16n_1^2 \sin^2 \theta (n_2^2 - n_1^2 + n_1^2 \sin^2 \theta)}{(n_1 \sin \theta + \sqrt{n_2^2 - n_1^2 + n_1^2 \sin^2 \theta})^4 \exp(2\alpha L n_2 / \sqrt{n_2^2 - n_1^2 + n_1^2 \sin^2 \theta}) - (n_2^2 - n_1^2)^2}}{(1)} \quad (1)$$

式(1)是 θ 的增函数,在临界角处具有极小值,根据折射定律,当 θ 处在临界角时,有 $n_1 \sin \theta = 1$;所以在全反射条件下界面反射率可以简化为

$$R = \sum R_i \geq \frac{\left[\frac{1 - \sqrt{n_2^2 - n_1^2 + 1}}{1 + \sqrt{n_2^2 - n_1^2 + 1}} \right]^2 + \frac{16(n_2^2 - n_1^2 + 1)}{(1 + \sqrt{n_2^2 - n_1^2 + 1})^4 \exp(2\alpha L n_2 / \sqrt{n_2^2 - n_1^2 + 1}) - (n_2^2 - n_1^2)^2}}{(2)} \quad (2)$$

由产生寄生振荡的阈值条件^[11]

$$\sum R_i \cdot e^{n_1 D \beta} = 1, \quad (3)$$

可以得到激光玻璃圆盘的饱和增益系数 β_s ^[11] 为

$$\beta_s = \frac{1}{n_1 D} \ln \left[\frac{1}{\sum R_i} \right]. \quad (4)$$

图 2,3 为饱和增益系数 β_s 随包层折射率 n_2 , 吸

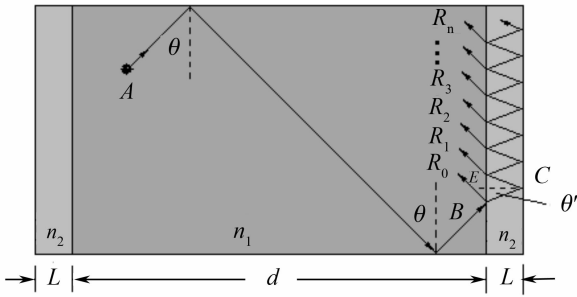


图 1 激光玻璃与硬包边层的界面反射

Fig. 1 Reflection between the interface of laser glass and melted cladding glass

收系数 α 及层厚 L 的变化。

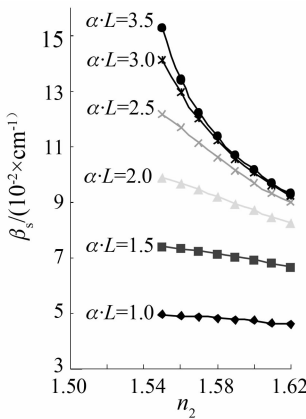


图 2 β_s 随包层折射率 n_2 的变化

Fig. 2 β_s versus the refractive index of cladding glass n_2

在软包边的情况下(图 4),采用光学胶粘剂将包边玻璃与基体激光玻璃粘结起来。因粘胶层很薄,可以将粘胶层看作是处于包边玻璃与基体激光玻璃之间的单层介质膜层。根据单层介质膜的反射率计算公式^[12]

$$R_0 = \frac{(\eta_0 - \eta_2)^2 \cos^2 \delta_1 + \left(\frac{\eta_0 \eta_2}{\eta_1} - \eta_1\right)^2 \sin^2 \delta_1}{(\eta_0 + \eta_2)^2 \cos^2 \delta_1 + \left(\frac{\eta_0 \eta_2}{\eta_1} + \eta_1\right)^2 \sin^2 \delta_1}, \quad (5)$$

其中 η 为修正光学导纳, $\eta_s = N \cdot \cos \theta$, $\eta_p = N / \cos \theta$;

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot N \cdot d \cdot \cos \theta \quad (6)$$

从(5),(6)式可以看出,反射率 R_0 是激光玻璃折射率 N_0 ,粘胶层折射率 N_1 ,包边玻璃折射率 N_2 以及粘胶层厚度 d 和入射角 θ 的函数。软包边一旦完成, N 与 d 值便不再改变, η 与 δ 只随 θ 改变而改变,因而, R_0 也只随 θ 而变,是入射角 θ 的函数。当折射率匹配较好,若只在小数点后第三位有差别,如

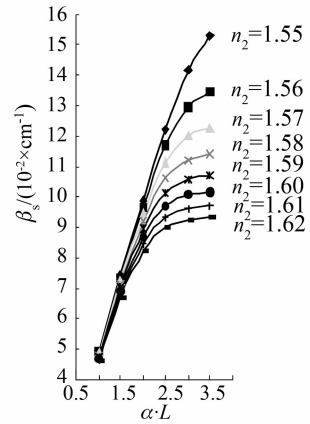


图 3 β_s 随吸收系数 α 及层厚 L 的变化

Fig. 3 β_s versus the product of the absorption coefficient and the thickness of cladding glass ($\alpha \cdot L$)

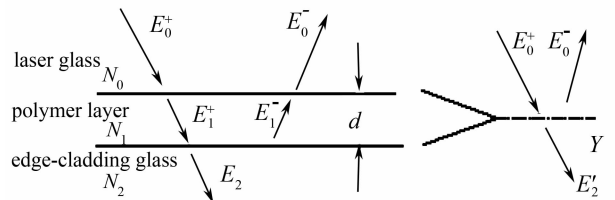


图 4 激光玻璃包边层与等效界面反射

Fig. 4 Equivalent interface reflection between laser glass and cladding glass

$N_0 = 1.534$, $N_1 = 1.535$, $N_2 = 1.538$,这对光学玻璃和胶层来说都是能够做到的,这时反射率 R_0 值小于十万分之一,且随 θ 变化不是很大。当 $N_0 = 1.534$, $N_2 = 1.538$,粘胶层的折射率 N_1 逐渐增大,这时界面反射将快速增大,且随角度 θ 的变化,波动加剧。由计算可知,当 N_1 增加 1%,则 R_0 将增加几十倍;当 N_1 增加 4%, R_0 将增加上千倍(图 5), N_1 的减少亦是如此。 $N_0 = 1.534$, $N_1 = 1.535$,随着包边玻璃的折射率 N_2 增大, R_0 值亦是快速增加(图 6)。所以当包边玻璃或是粘胶层与激光玻璃的折射率失

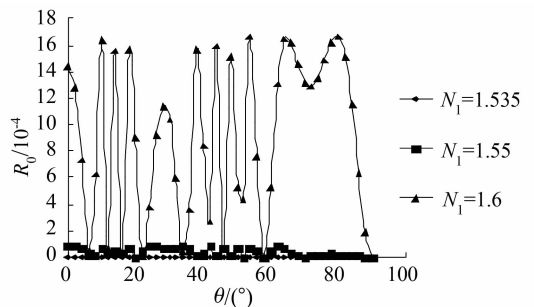


图 5 $N_0 = 1.534$, $N_2 = 1.538$ 时,反射率 R_0 随胶层折射率 N_1 与反射角 θ 的变化

Fig. 5 $N_0 = 1.534$, $N_2 = 1.538$, reflectivity R_0 versus reflective angle θ

配时,界面反射不容忽视,无法消除的 ASE 将大大降低激光增益,从而降低激光输出能量。

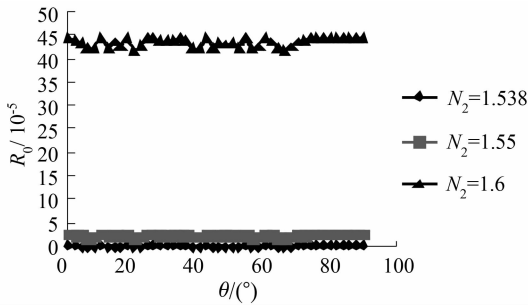


图 6 $N_0 = 1.534, N_1 = 1.535$ 时,反射率 R_0 随包边玻璃折射率 N_2 及反射角 θ 的变化

Fig. 6 $N_0 = 1.534, N_2 = 1.535$, reflectivity R_0 versus refractive index of cladding glass and reflective angle θ

从对硬包边的讨论可以知道,自 A 点发出的光在抛光表面被全反射后,在软包边的情况下 θ' 角满足全反射的条件,除反射光 R_0 外,其余的光将透过胶层到包边玻璃,并在包边玻璃与空气界面处发生全反射。若包边玻璃吸收系数较大且厚度很厚,这时透过胶层的光将会很快衰减,经一次全反射后反

射进入激光玻璃的光强为

$$I_1 = I_0(1 - R_0)^2 \cdot e^{-2\alpha \cdot L \cdot n_2 / \sqrt{n_2^2 - n_0^2 + 1}}, \quad (7)$$

若吸收系数 $\alpha > 5 \text{ cm}^{-1}$ 包边层厚度 $L > 1 \text{ cm}$, 则 $I_1 / I_0 \leq e^{-10} = 4.5 \times 10^{-5}$, 所以,总反射

$$R = R_0 + \sum_i R_i = R_0 + \frac{(1 - R_0)^2}{e^{2\alpha \cdot L \cdot n_2 / \sqrt{n_2^2 - n_0^2 + 1}} - R_0}. \quad (8)$$

4 结果与讨论

4.1 剩余反射率测试

将包好边的样品加工成一直角边长为 7 cm 的等腰直角三角形,厚度为 5 cm,两直角面抛光,未包边的斜面也要抛光好。激光器发出的光经过一分光器后直接投射到测试样品的直角面上,进入玻璃后在斜面上发生全反射,反射光由热释电光能量计接收,通过对比可以得出包边面的剩余反射率。剩余反射的测试如图 7 所示,测试结果如表 1 所示。

表 1 采用不同折射率包边玻璃包边的玻璃的剩余反射率值

Table 1 Residual reflectivity of the cladding glass with different refractive index and cladding ways

Cladding glass	Y1	Y2	R1	R2	R3	N31 laser glass
Cladding ways	Melted cladding	Melted cladding	Polymer cladding	Polymer cladding	Polymer cladding	
Refractive index N_K ($K = 1.053 \mu\text{m}$)	1.54	1.7	1.538	1.55	1.6	1.535
Coeff. thermal expansion RT~300°C ($\times 10^{-7}/\text{K}$)	110	109	115	110	110	115
Transformation temp. $T_g / \text{°C}$	435	430	450	450	450	450
Coeff. absorption α $1.053 \mu\text{m}/\text{cm}^{-1}$	7.5	35	7.5	7.5	7.5	
Thickness of glass L / mm	5	1	5	5	5	
$\alpha \cdot L$	37.5	35	37.5	37.5	37.5	
Residual reflectivity	$< 5 \times 10^{-4}$	$< 2\%$	$< 5 \times 10^{-4}$	$< 5 \times 10^{-3}$	$< 1\%$	

4.2 钕玻璃的激光增益

对于通光口径约 200 mm 的 N31 钕玻璃片,采用不同的包边方式以及使用不同折射率的包边玻璃将其包边好后,在神光 II 激光装置上测试其饱和增益系数,并与不包边的钕玻璃进行对比,结果如图 8 所示。

4.3 讨论

理论分析可知,硬包边和软包边的界面反射率都会随着包边界面折射率的失配而变大,表 1 也反映了这一点。界面反射率越大,越容易产生寄生振荡,使得寄生振荡消除就越困难,最终影响到激光放大器增益。从表 1 与图 8 可以看到,在相同的光抽

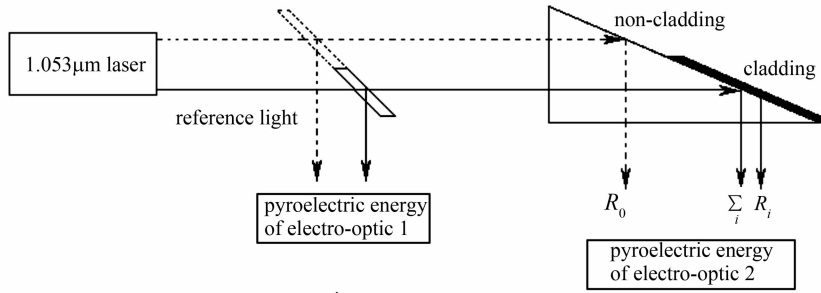


图 7 包边界面反射率测量示意图

Fig. 7 Testing the residual reflectivity of the cladding interface

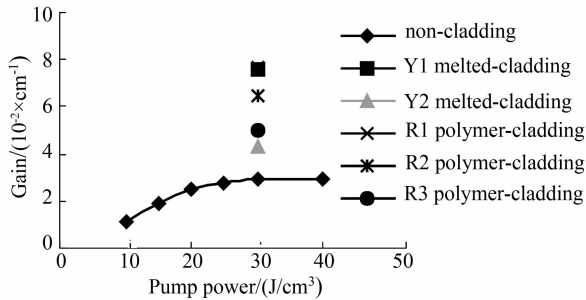
图 8 增益系数 β 与光抽运能量密度以及包边的关系

Fig. 8 Gain versus pump power and cladding ways

运功率密度下,界面反射率越小,激光增益系数就越大。从(2)和(8)式可以知道,无论是硬包边或是软包边,其反射率都由 R_0 和 $\sum_i R_i$ 组成,若包边玻璃与激光玻璃的折射率匹配较好, R_0 非常微小, R 主要由 $\sum_i R_i$ 构成,而 $\sum_i R_i$ 又取决于吸收系数与包边玻璃厚度的乘积 ($\alpha \cdot L$),若 $\alpha \cdot L$ 较小,对透过钕玻璃与包边玻璃界面的光吸收不够充分,则全反射后会重新回到钕玻璃内部,无法抑制寄生振荡,直接影响激光放大器增益的提高。当 $\alpha \cdot L$ 足够大, $\sum_i R_i$ 将很小,这时的反射率会取决于 R_0 的大小,折射率的匹配起到关键作用,当折射率匹配较好时, R_0 非常小,这时 R 也很小。当折射率匹配较差时(见图 5 和 6),反射率将成百倍(甚至上千倍)增长,折射率匹配差别越大,反射率增长越快。在硬包边的情况下,由图 2 和 3 可知, n_2 越接近 n_1 ,和 $\alpha \cdot L$ 越大,则 β 越高。但是,当 β 较小时,其随 $\alpha \cdot L$ 变化比随 n_2 的改变灵敏得多,这时应主要依靠增大 $\alpha \cdot L$ 值来提高 β 值,这时 $\sum_i R_i$ 的变化起决定作用;当 $\alpha \cdot L$ 相当大时, β 随 $\alpha \cdot L$ 的变化即缓慢下来,而随 n_2 的改变则渐趋显著,这时 R_0 的变化起关键作用,应主要通过对 n_2 的调节(向 n_1 靠近)来提高 β 。对于软包边的情况亦是如此,从(7)和(8)式可知,当 $\alpha \cdot$

L 较小,则 $\sum_i R_i$ 起决定作用;当 $\alpha \cdot L$ 很大时,自发辐射的光通过界面进入包边层后经包边层吸收,若再反射回激光玻璃内部的光强是非常微弱的。当折射率匹配较好时, R_0 值也非常微小,这时的包边反射率值完全满足激光增益的要求;当折射率匹配不好时, $\sum_{i=1}^{\infty} R_i$ 值同样较小, R 值主要决定于 R_0 , R_0 的急剧增大使得激光增益快速下降。从表 1 可以看出,虽然 Y2 样品的吸收系数较大,但是其厚度较小,因为光线透过界面后,其吸收程度由 $\alpha \cdot L$ 值所决定,另外所有样品的 $\alpha \cdot L$ 值都很大且大致相当,对于这些样品,透过界面的光线基本被吸收,所以这些样品的 β 值主要决定于 R_0 ,也即是决定于界面的折射率匹配。从表 1 和图 8 可以看出,折射率匹配较好,剩余反射率较低,增益系数也较大。当然 $\alpha \cdot L$ 要适当大,以起到吸收 ASE 的作用,但若太大吸收太强烈,则界面温升过大容易使包边界面破坏^[13]。

5 结 论

剩余反射率的大小由基质激光玻璃与包边玻璃折射率匹配、吸收系数与包边玻璃厚度的乘积决定。当基质激光玻璃与包边玻璃折射率匹配较好时,主要以增大吸收系数与包边玻璃厚度的乘积来减少剩余反射;而当吸收系数与包边玻璃厚度的乘积较大时,则主要以提高基质激光玻璃与包边玻璃折射率匹配来减少剩余反射。若基质激光玻璃与包边玻璃折射率匹配较好,而且吸收系数与包边玻璃厚度的乘积足够大,则剩余反射率很低,能够有效抑制寄生振荡,因而激光增益系数越大。

致谢:感谢中国科学院上海光学精密机械研究所联合实验室以及唐贤忠老师提供的激光增益数据。

参 考 文 献

- 1 Jiang Zhonghong. ICF laser glasses [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1265~1276
姜中宏. 用于激光核聚变的钕玻璃[J]. 中国激光. 2006, **33**(9):1265~1276
- 2 He Shaobo, Chen Yuanbin, Yu Haiwu *et al.*. Energy transmission in high power laser amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(suppl.):276~279
贺少勃, 陈远斌, 於海武等. 高功率激光放大器中的能量传输[J]. 中国激光. 2006, **33**(增刊):276~279
- 3 Laser Program Annual Report [R]. Lawrence Livermore National Laboratory, 1981
- 4 Alexander J. Marker. Cladding Glass Ceramic for Use in High Powered Lasers[P]. U. S. English, 5508235, Apr. 16, 1996
- 5 Richard F. Cooley. Glass Laser Discs with Annular Alkali Lead Borate Coatings and Uses Thereof [P]. U. S. English, 3906396, Sept. 16, 1975
- 6 Yoshiyuki Asahara, Tetsuro Izumitani. Sealing Glass for Laser Glass[P]. U. S. English, 3885974, May 27, 1975
- 7 Howard T. Powell, Michael O. Riley, Charles R. Wolfe *et al.*. Composite Polymer-Glass Edge Cladding for Laser Discs[P]. U. S. English, 4849036, Jul. 18, 1989
- 8 Zhang Baoan, Zhu Jianqiang, Fan Quantang. Chemical-mechanical polishing of phosphate laser glass[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8):1151~1154
张宝安, 朱健强, 樊全堂. 磷酸盐激光玻璃的化学机械抛光[J]. 中国激光. 2007, **34**(8):1151~1154
- 9 Hisayoshi Toratani. Edge-Cladding Glass of Disc Laser Glass [P]. U. S. English, 4217382, Aug. 12, 1980
- 10 Gong Zutong, Li Jingzhen. Optics Handbook [M]. Xi'an: Shanxi Sciences & Technology Press, 1985
龚祖同, 李景镇. 光学手册[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1985
- 11 Li Yude, Du Yanqing. Analyses of parasitic oscillation of a multiple-pass resonator with a multipath cell [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(3):216~220
李育德, 杜言庆. 含有多程室的多光程谐振腔的寄生振荡分析[J]. 中国激光. 1997, **A24**(3):216~220
- 12 Lu Jinjun, Liu Weiguo. Optical Film Technology [M]. Xian: Northwestern Polytechnical University Press, 2005. 10
卢进军, 刘卫国 编著. 光学薄膜技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005. 10
- 13 John H. Pitts *et al.*. Thermal Stress in the Edge Cladding of NOVA Glass Laser Discs [C]. 12th Symposium on Fusion Engineering Monterey, California, October 12~16, 1987