

钕玻璃板条激光器

黄国松 张国轩 周峰 顾根才 顾绍庭

(中国科学院上海光机所, 201800)

提要: 本文报道了输出平均功率为 64 W、重复频率 4 Hz 的磷酸盐钕玻璃板条激光器的设计和运转特性。

关键词: 板条激光器, 应力断裂极限

Nd:glass Slab lasers

Huang Guosong, Zhang Guoxuan, Zhou Feng, Gu Gencai, Gu Shaoting

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract: The design and characteristics of a Nd:Phosphate glass slab laser operating at 16 joules per pulse and 4 pulses per second is reported.

Key words: slab laser, stress fracture limit

一、引言

近几年来,高平均功率固体激光器获得显著进展。采用多棒串接的 YAG 器件已达到 2.3 kW 的激光输出^[1],但由于热效应的影响,输出激光发散角很大。为克服棒状器件热效应引起的激光束质量变坏而发展起来的 YAG 板条激光器,已获得 600 W 的输出^[2]。由于难于得到大尺寸的 YAG 板条,人们期望于容易获得优质大尺寸,高掺杂浓度的钕玻璃,采用氟磷酸钕玻璃运动板条器件,已达到 300 W 的准连续输出^[3]。

板条激光器光束在平板内部以波导方式传播,使热效应对光束的影响在两次内全反射中相抵消,容易获得高质量激光输出。这种器件用于工业加工时,其效果提高了 3 倍^[2],玻璃板条激光器可获得重复频率的高峰值功率激光,用于产生软 X 射线或作为 X 射线显微镜的光源^[3]。

本文介绍了国产磷酸盐钕玻璃板条激光器的设计和运转特性。

二、设计的基本考虑

2.1 板条最大输出功率

玻璃板条激光器输出平均功率受到玻璃热应力断裂极限的限制。理论分析表明,板条所能承受的最大输入功率为^[4]

$$P_{\text{inmax}} \leq \frac{R_s}{2\chi K_s^2} V \quad (1)$$

其中 R_s 为玻璃的热冲击参数; χ 为玻璃内热耗散功率与泵浦功率之比; V 为板条受泵浦的体积; K_s 为器件结构参数, 对厚度为 t 的矩形板条有

$$K_s = t/2\sqrt{3} \quad (2)$$

设板条长为 L , 宽为 W , 激光转换功率为 η , 那么矩形板条玻璃激光器的最大输出功率为

$$P_{\text{out max}} = \frac{6LW}{\chi t} \eta R_s \quad (3)$$

对国产磷酸盐玻璃, $R_s = 0.4 \text{ W/cm}$, χ 一般取 8% ^[5], η 取 1.5% , 厚度为 0.6 cm 的板条, 每立方厘米玻璃输出最大功率为 1.25 W 。文献[6]中给出的磷酸盐玻璃板条尺寸为 $140 \times 30 \times 5 \text{ mm}^3$, 总体积为 21 cm^3 , 文中给出的激光功率 $\eta = 1\%$, 按(3)式计算, 其最大输出功率为 25 W 。文中报道该板条可获得 125 W 输出, 已超过玻璃热应力断裂极限的 5 倍, 表面张应力达到 1788 kg/cm^2 , 已超过玻璃抗张强度 650 kg/cm^2 的近 3 倍。

2.2 板条几何尺寸选择

激光器安全运转的必要条件是其尺寸必须满足(3)式。显然, 厚度 t 较小可获得较高输出功率, 但厚度还受到掺钕浓度和光学加工的制约。绝大多数板条器件厚度小于 0.6 cm , 既保证光学加工面精度而又兼顾输出功率。而宽度选取主要是要保证泵浦均匀, 一般宽度不小于泵浦灯的圆周长, 板条长度选取应考虑泵浦体积、增益长度、泵浦灯负载, 同时必须满足光线在板条两表面之间产生偶次反射。为减小边界热交换对板条热均匀性的影响, 其四边应当有不小于厚度的非泵浦区域。

图 1 所示的板条, 有如下几何关系和光学关系:

$$\psi = \theta + \varphi, \quad \beta = 90^\circ - i - \varphi, \quad \Delta = t(\text{tg } \psi - \text{tg } \varphi),$$

$$L = t(N \text{tg } \psi - \text{ctg } \varphi);$$

$$\sin i = n_0 \sin \theta, \quad i_B = \text{tg}^{-1}(n_0) \quad \psi \geq \sin^{-1}(n_c/n_0)$$

其中 ψ 为内全反射角, θ 为折射角, φ 为板条顶角, i 为入射角, N 为全反射次数, i_B 为布儒斯特角, n_0 、 n_c 分别为板条内、外介质的折射率。对 N_{2135} 型磷酸盐玻璃, $n_0 = 1.564966$, $i_B = 57.4^\circ$, 当 $\varphi = 28^\circ$ 时, $\psi = 60.57^\circ$, 用水作冷却剂时, 临界角为 58.5° 。定义板条中通光区域体积与总体积之比为复盖因子 F , 则

$$F = 1 - \frac{1}{4}(1 - \text{ctg } \varphi \cdot \text{ctg } \psi)^2 \quad (4)$$

当 $\varphi \leq 90^\circ - \psi$ 时, $F = 1$ 。为充分利用工作物质, F 因子应接近于 1, 这对于难以得到的 YAG 板条可能是十分重要的, 而对于玻璃板条, 这决不是最佳设计的唯一因素。激光在板条内部多次全反射, 玻璃表面状态和表面倏逝波效应将产生反射损失, 最佳设计应同时考虑增益长度、反射损失和 F 因子。

玻璃表面状态对反射损失的影响远大于表面倏逝波效应。曾经用长为 30 cm 的磷酸盐玻璃板条进行损耗测量。当表面加工光洁度为 5 级并有腐蚀时, 每次反射损失为 $1.3 \sim 1.5\%$, 当表面光洁度提高到 3 级时, 每次反射损失下降到 2×10^{-4} 。当用去离子水作冷却剂时, 表面

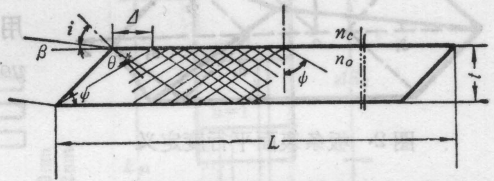


图 1 板条各几何量

倏逝波效应引起的每次反射损失约为 9×10^{-4} 。因此对板条表面加工光洁度不能低于三级,在此情况下,表面倏逝波的影响成为损耗的主要来源。

板条几何尺寸的加工误差将影响光束的传输。设厚度、长度和顶角加工误差分别为 δt 、 δL 和 $\delta\varphi$, 它们的影响可归结为 N 次反射后光程长度的变化:

$$\Delta L = L\delta t + \delta L + t(N + g^2\psi + N - \text{ctg}^2\varphi - 1)\delta\varphi \quad (5)$$

当取板条长度为 300 mm, 其加工公差为 ± 0.2 mm, 厚度为 6 mm, 其加工公差为 0.01 mm, 磷酸盐玻璃板条顶角加工误差为 $\pm 0.03^\circ$ 时, $\Delta L < 0.5$ mm。 ΔL 的存在将使部分光线成奇数次反射而使热效应不能全部抵消。在上述加工误差范围内不会引起光束质量显著破坏。

板条两内反射面和两端面之间的不平行, 将引起光束的偏转。图 2 所示的板条, 两内反射面的不平行交角为 δ_1 和 δ_2 , 两端面之间不平行交角为 δ_3 和 δ_4 , 利用折射定律和矢量反射定律求得光线通过板条后在 yoz 和 xoz 平面上的偏角分别为 Δ_{yoz} 、 Δ_{xoz} :

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{yoz} &= Nn_0^2\delta_1 + (n_0^2 - 1)\delta_3 \\ \Delta_{xoz} &= (n_0 \sin i - \cos i)\delta_4 - Nn_0 \cos(2i)\delta_2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

图 2 板条表面平行度定义

当板条两全反射面加工平行度 $< 10''$, 端面平行度 $< 30''$ 时, 对上述板条求得 $\Delta_{yoz} < 3.5$ mrad, 而 $\Delta_{xoz} < 1$ mrad。虽然板条各面的平行度使光束偏转可以通过谐振腔的调节而加以校正, 但公差 δ_1 也将影响每次全反射的光程, 经多次反射后必将产生光程偏差而使部分光线成奇数次反射。

端面和全反射面的平度会影响光束波面。端面平度度 S_e 和全反射面平度度 S_r 引起的波面畸度可用类似方法求出:

$$S_w = 2[n_0 \cos(\psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi)]S_e + 2Nn_0 \cos[2(\psi - \varphi)]S_r \quad (7)$$

将上述磷酸盐玻璃板条有关参数代入得

$$S_w = 1.55S_e + 34.10S_r$$

这表明对板条两全反射面的平度要求远高于端面, 若端面平度度为 $\lambda/4$, 全反射面平度度为 $\lambda/50$, 则经 20 次全反射后波面畸变约为 1 个波长。

2.3 泵浦灯与聚光器

高重复率脉冲氙灯由于管壁的热断裂而限制了输入电功率^[7]:

$$fE_m \leq \frac{2R_s S}{(1 - \eta_0)t'} \pi l d \quad (8)$$

式中 f 为脉冲频率, E_m 为氙灯每次脉冲放电能量, S 为灯管热应力与应力断裂极限之比, 一般取 0.3, R_s 为石英灯管材料的热冲击参数, 其值为 14.5 W/cm, η_0 为灯的电光转换效率, 一般取值为 0.75, d 、 l 、 t' 分别为灯管内径, 电弧长度和管壁厚度。由 (1)、(2) 和 (8) 建立板条与灯之间几何尺寸的匹配关系:

$$3R_s W L t' (1 - \eta_0) = \pi S R_s' a t l d \quad (9)$$

采用双灯泵浦板条, 设灯管壁厚 $t' = 0.1$ cm, 板条厚度 $t = 0.6$ cm, 灯管内径 $d = 1$ cm, 代入 (9) 求得板条长宽与灯长之间的匹配关系:

$$LW = 18l/R_s \quad (10)$$

R_s 为板条材料的热冲击参数。由于玻璃的热冲击参数较小,一般为 $0.5 \sim 1.5 \text{ W/cm}$, 因此氙灯可以在较大范围内与玻璃板条尺寸相匹配,而对 YAG 板条,其热冲击参数约为 8 W/cm ,脉冲氙灯功率负载将限制板条尺寸。

但是,玻璃由于受激辐射截面小只适用于高泵浦能量下运转,因此泵浦灯还必须考虑能量负载极限^[7]:

$$E_{\max} = Kld\sqrt{L_e C} \quad (11)$$

其中常数 $K = 2 \times 10^4 \text{ J/cm}^2$, L_e 、 C 为放电回路的电感、电容量。为使泵浦灯有较长的使用寿命,一般取输入能量

$$E_{\text{in}} \leq 0.4E_{\max} \quad (12)$$

传统的成像照明已不适用于需均匀面照明的板条器件。对不同形状的聚光器进行照明过程的模拟和实验表明,三角形聚光器具有较高的效率和较好的均匀性^[6],聚光器参数选取如图 3 所示。

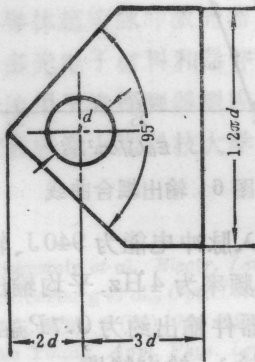


图 3 三角形聚光器



图 4 玻璃板条器件结构

三、实 验

采用上述三角形聚光器,玻璃板条尺寸为 $300 \times 55 \times 6 \text{ mm}^3$,有效泵浦体积为 $240 \times 44 \times 6 \text{ mm}^3$,由两支直管氙灯泵浦,放电通道为 $\phi 12 \times 210 \text{ mm}$ 。器件冷却采用去离子水全腔水冷,水温控制在 $15 \pm 0.5^\circ \text{C}$,水流量为 30 L/min 。板条两侧面隔热,谐振腔为平行平面腔,腔长 640 mm ,器件基本结构见图 4。

实验首先进行玻璃板条热应力断裂的负载功率测量。改变器件运转的重复频率或每次输入脉冲电能达到改变平均泵浦功率的目的。图 5 给出了热应力断裂时的典型样品。对磷酸盐玻璃样品和硅酸盐玻璃样品进行了试验,结果如表 1 所示。表 1 给出了按(1)式计算的结果,表明计算与实验很好地相符,因而(1)、(3)式可作为板条器件设计的基本公式。为了保证板条能长期运转,输入平均功率只能取(1)的 70%,所以对 0.6 cm 厚的磷酸盐玻璃板条,每立

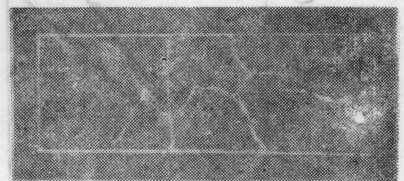


图 5 玻璃板条的热应力断裂

方厘米玻璃输出最多为 1 W。

玻璃板条被泵浦体积较大，而脉冲灯受能量负载限制，其泵浦功率密度较棒状器件低几倍，棒状器件中的高输出耦合已不适用。实验测量了板条器件在不同泵浦能量密度下的最佳输出耦合，结果如图 6 所示。上述结果显示，对玻璃板条器件，输出宜采用低输出耦合，一般输出镜透过率取 20~30% 为宜。

表 1 玻璃板条的平均泵浦功率负载

样品	E_s (W/cm)	断裂时的 泵浦功率 (W)	最大泵浦功率密度 (W/cm ³)	
			实测	计算
N_{21-1}	0.4	5900	93	95
N_{21-2}		5800	92	95
N_{03}	1.2	18500	292	286

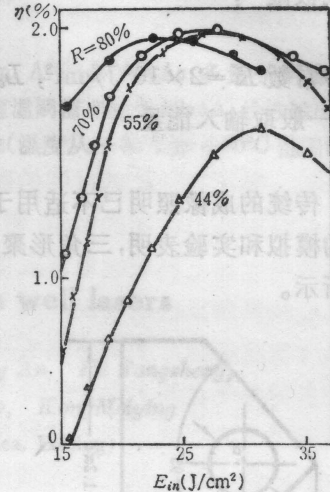


图 6 输出耦合曲线

实验最后测量了激光输出特性。当输出镜反射率为 80% 时，输入脉冲电能为 940 J、输出为 16 J，激光转换效率为 1.7%，泵浦能量密度为 15 J/cm³，最高重复频率为 4 Hz，平均输出功率为 64 W。按 (3) 式计算，实验所用板条最大输出功率为 90 W，实际器件输出约为 0.7 P_{outmax} ，该器件能长期运转。图 7 给出了器件在不同泵浦能量密度下的平均输入-输出特性。

板条器件光束沿“之”字形光路传播，大大减轻了热效应对光束质量的影响。图 8 给出了对同一板条光沿光轴传播和沿“之”形光路传播时，在不同泵浦平均功率下，输出光束发散角的

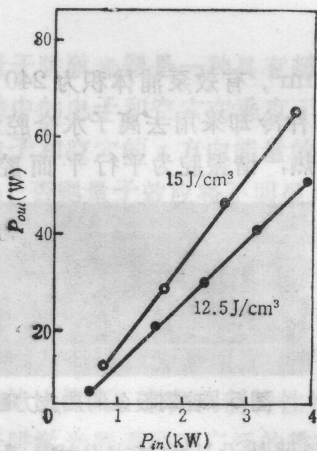


图 7 器件输入-输出特性

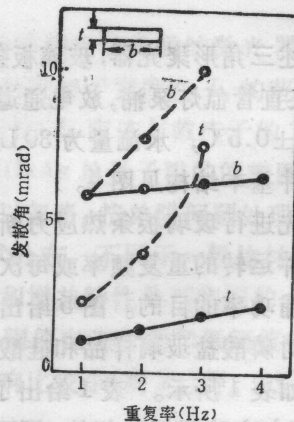


图 8 器件输出发散角

变化情况,其中虚线为直通光路情况。发散角测量结果表明,Z字形光路传播使光束发散角减小了3倍以上,激光器亮度提高了一个数量级。

四、讨 论

钕玻璃板条激光器由于可获得较高的平均功率输出和高的光束质量而受到重视。但玻璃低热导率和低机械强度使其耐热冲击能力差,这是玻璃器件的致命弱点。但由于玻璃的物理性质可随组分变化而在很大范围内进行调整,因而提供了改进玻璃热物理性质的可能性。如 N_{2}O_{3} 钕玻璃的耐热冲击能力为磷酸盐玻璃的3倍。许多玻璃经表面离子交换处理后机械强度可提高几倍,如 N_{2}O_{3} 玻璃经表面处理,其泵浦功率负载已接近YAG板条的一半。因此在这方面进行研究,可望获得进展。

玻璃的另一缺点是受激辐射截面小,必须有较高的泵浦能量密度才能获得较高的激光转换效率,这与玻璃的低泵浦功率负载相矛盾。因而钕玻璃板条器件只适合于低重复率运转。然而,运动板条器件仍可获得高重复率激光输出^[4]。

钕玻璃掺杂浓度的最佳化有助于提高激光效率,高掺杂的钕玻璃仍可获得良好的光学质量。而板条中Z字形光路可消除厚度方向上的增益梯度对输出的影响。

在器件结构上,用气体冷却可避免冷却剂对玻璃表面的侵蚀,避免表面倏逝波对激光的损耗,但冷却效果远比水冷差。采用水冷却时,还必须解决密封问题。玻璃折射率低,难于找到满足内全反射临界角匹配的密封材料,解决方法之一是使 $F < 1$,在表面没有光反射区域进行封接。更好的办法是在玻璃表面涂一层折射率、热性能相匹配的膜,它可简化器件结构,同时又可防止玻璃表面侵蚀和倏逝波损耗等问题。

参 考 文 献

- 1 M. J. Darby, *Laser Magazin*, (3), 54(1988)
- 2 L. Holmes, *Laser Focus*, 22(11), 58(1986)
- 3 *O Plus E*, (106), 123(1988)
- 4 周峰 *et al.*, 物理学报, 38(2), 247(1989)
- 5 S. Basu *et al.*, *Opt. Lett.*, 11, 617(1986)
- 6 张梅珍 *et al.*, 激光与红外, 19(2), 16(1989)
- 7 W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, Springer-Verlag, 1976
- 8 周峰 *et al.*, 中国激光, 待发表

(上接第59页)

效率,采用 90° 匹配是合适的。实验做到从 $1.064\mu\text{m}$ 的基波转换到 $0.266\mu\text{m}$ 的紫外光的总体转换效率大于11%。

感谢陆雨田同志提供的声光调制器、董景元同志协助对脉宽的测量、乔福堂同志设计的器件样机。

参 考 文 献

- 1 J. M. Eggleston *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, QE-20(3), 289(1984)
- 2 Thomas J. Kane *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, QE-21(8), 1195(1985)
- 3 刘亚纲 *et al.*, 光学学报, 7(7), 577(1987)
- 4 何慧娟 *et al.*, 中国激光, 10(11), 765(1984)
- 5 李永春 *et al.*, 中国激光, 11(3), 170(1984)