

不同类型板条形激光玻璃的 泵浦功率负载特性

朱丛善 黄国松 张国轩
(中国科学院上海光机所, 201800)

提要: 研究了不同类型的硅酸盐板条型钕激光玻璃的热物理性质与其耐泵浦功率密度的关系, 并实验研究了某些激光玻璃的激光功率负载性能。

关键词: 激光玻璃, 热致损坏

Thermal loading limits of different types of laser glass slabs

Zhu Congshan, Huang Guosong, Zhang Guoxuan

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

Abstract: The thermal properties and thermal loading limits for different types of silicate and phosphate Nd: glass slabs have been studied. The average laser power limits for the slabs have been investigated by calculation and experiment.

Key words: laser glass, thermal stress fracture

在高平均功率玻璃激光器中, 激光工作物质所能承受的泵浦功率负载密度取决于材料的热应力断裂极限^[1]。本文选择若干种商品硅酸盐、磷酸盐以及正处于研制开发阶段的新型磷酸盐板条形钕玻璃为对象, 研究了玻璃的热膨胀系数 α 、弹性模量 E 、热导率 K 、抗张强度 σ 、以及反映这些参数综合作用的品质因数 $M_s (= (1-\nu)K/\alpha E)$ 和热冲击参数 $R_s (= M_s \cdot \sigma)$ 对玻璃泵浦功率密度的影响, 并对某些激光玻璃的泵浦功率负载限度及激光功率限度进行了估算和实验验证。

一、板条激光玻璃理论热破坏功率极限的简单分析

根据激光工作物质在光泵作用下的非均匀发热模型, 可以推导出在双面泵浦下板条钕玻璃产生热应力破坏时的最大平均泵浦功率密度^[2]:

$$(P_{in})_{max} = \frac{\beta \cdot R_s \cdot e^{\beta d}}{2d \cdot \eta_1 \cdot \eta_2} \frac{1}{\cosh(\beta d) - \frac{1}{\beta d} \sinh(\beta d)} \quad (1)$$

式中, β 为钕玻璃对泵浦光各波长的平均吸收系数, η_1 和 η_2 分别为电光转换效率和反射器匹

配效率, d 为板条的两泵浦面间厚度的一半, R_s 称作玻璃的热冲击参数:

$$R_s = \frac{1-\nu}{\alpha E} \cdot K \cdot \sigma = \mu_s \cdot \sigma \quad (2)$$

ν 为玻璃的泊松比。本实验中, η_1 和 η_2 的积约为 0.42。假定选用的各钕玻璃的 Nd_2O_3 含量为 3 wt%, 则玻璃对泵浦光各波长的平均吸收系数 β 约为 0.6 cm^{-1} 。这样, 根据(1)式, 若取各样品厚度一致, 则 $(P_{in})_{max}$ 与 R_s 呈正比关系。一般地, 不同玻璃的 ν 值变化很小, 可视为常数。所以决定 R_s 的主要因素即是 α 、 E 、 K 和 σ 。

Tab. 1 The thermo-physical properties of some commercial silicate laser glasses

glass trade-mark	country company	K ($\frac{10^{-3}W}{\text{cm} \cdot ^\circ\text{C}}$)	σ ($\frac{10^3\text{kg}}{\text{cm}^2}$)	E ($\frac{10^5\text{kg}}{\text{cm}^2}$)	α ($\frac{10^{-6}}{^\circ\text{C}}$)	M_s ($\frac{10^{-3}W \cdot \text{cm}}{\text{kg}}$)	R_s (W/cm)	reference
N ₀₁₁₂	China		0.97	6.79	9.0*			[3]
N ₀₃₁₂	China	10.1	1.18	7.59	8.0	1.25	1.47	[3]
N ₀₇₁₂	China		0.91	6.47	8.9			[3]
N ₀₈₁₂	China		0.91	6.47	10.7			[3]
N ₀₉₁₂	China		1.02	6.87	8.7			[3]
N ₁₀₁₂	China	14.4	0.89	7.50	8.9	1.62	1.44	[3]
LG-680	Germany Schott	13.5		9.19	9.3*			[4]
LSG-91H	Japan Hoya	10.3		8.89	10.5*	0.85		[5]
ED-2	U. S. A. Owens-Illinois	13.5	0.96	9.19	10.3*	1.07	1.03	[6]

* notes: the temperature ranges of α measurements are 15~200°C, 20~40°C, 100~300°C, and 25~300°C for N₀₁₁₂-N₁₀₁₂, LG-680, LSG-91H and ED-2 respectively.

Tab. 2 The thermo-physical properties of some phosphate laser glasses

glass trade-mark	country company	K ($\frac{10^{-3}W}{\text{cm} \cdot ^\circ\text{C}}$)	σ ($\frac{10^3\text{kg}}{\text{cm}^2}$)	E ($\frac{10^5\text{kg}}{\text{cm}^2}$)	α ($\frac{10^{-6}}{^\circ\text{C}}$)	M_s ($\frac{10^{-3}W \cdot \text{cm}}{\text{kg}}$)	R_s (W/cm)	reference
LHG-5	Japan Hoya	7.7	1.03*	6.91	8.6	0.99	1.02	[5, 9]
LHG-8	Japan Hoya	5.8	0.84*	5.11	11.2	0.75	0.63	[5, 9]
HAP-4	Japan Hoya	9.4		7.03	7.3	1.43		[5, 9]
LG-750	Germany Schott	6.2	0.79*	5.11	11.4	0.79	0.62	[4, 9]
LG-760	Germany Schott	6.7		5.48	12.5	0.73		[4]
APG-1	U. S. A. Schott	8.3		7.24	7.6	1.15		[4]
Q-89	U. S. A. Kigre	8.2			8.8			[7]
N ₂₁₃₅	China	5.6	0.65	5.64	10.5	0.90	0.46	[8]
SPG-1030	China	7.5	0.56	6.00	8.4	1.15	0.64	[8]

* notes.: derived from R_s

表 1 和 2 分别列出了若干商品硅酸盐和磷酸盐玻璃的热物理性质。

由表 1 和表 2 可见,磷酸盐玻璃的热导率明显低于硅酸盐玻璃,其抗张强度也低于后者。统计地看,硅酸盐玻璃的 $\alpha \cdot E$ 之积仅略高于磷酸盐玻璃。因此,决定两类玻璃 R_p 值差别的主导因素在于 K 和 σ 。这是由两类玻璃的结构差异决定的。

二、激光玻璃热致破坏功率密度的估算和实验研究

本工作选择了四种型号的国产硅酸盐和磷酸盐玻璃作样品(型号如表 3 所示)。经精密退火的所有样品均加工成 $100 \times 35 \times 6 \text{ mm}^3$ 的平板,两大面及两端面抛光。热破坏实验装置如图 1 所示^[10]。板条样品的实际泵浦体积是 $80 \times 25 \times 6 \text{ mm}^3$ 。全腔水冷,水流量 30 L/min ,外部水温控制在 $15 \pm 1^\circ\text{C}$,经器件流出的水温升高小于 2°C 。泵浦的均匀性波动约 7%。放电时间 $500 \mu\text{s}$ 。固定单脉冲泵浦能量,靠改变脉冲频率得到不同的平均泵浦功率,直至样品破坏。一束 He-Ne 激光平行于泵浦灯方向穿过板条样品,以其光斑的突变表征玻璃是否破坏。所有样品的破坏部位都呈现自板条中心向两端及边沿伸展的体破坏。每种试验样品为 3~4 块取平均。表 3 列出了四种玻璃泵浦功率极限密度的实验结果以及根据 (1) 式的计算值。实验值约等于理论计算值的 70~80%。误差的产生一是来自材料本身的诸因素,如内部缺陷、表面加工中产生的微裂纹以及残余应力;二是公式(1)中的各个系数的假定值有一定近似性,玻璃各参数测量值也包含某些波动,特别是 K 和 σ 的测量往往是取多次测定的平均;三是样品在器件中的受力情况不尽一致(夹头等)。此外,泵浦的不完全均匀性也起一定作用。一般说来,取理论计算值的 70% 作为实际的泵浦功率密度极限是大体准确的。

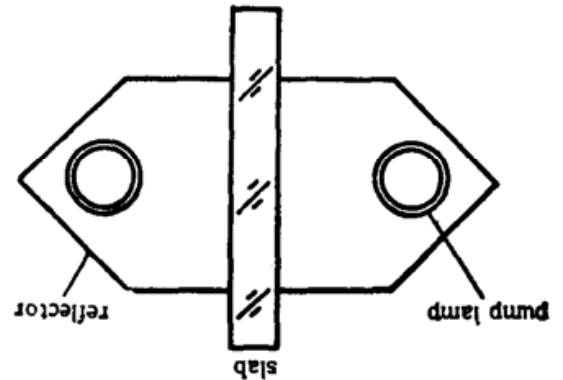


Fig. 1 laser set-up for pump/fracture test

Tab. 3 The pump power limits of slab laser glasses

glass trade-mark glass type	pumped slab volume (cm^3)	average pump/ fracture power(W)	$(P_{in})_{\max} (\text{W}/\text{cm}^2)$	
			experiment	calculation
N ₀₃₃₅ silicate	$8 \times 2.5 \times 0.6 = 12$	3534	295	386
N ₁₀₃₅ silicate	$8 \times 2.5 \times 0.6 = 12$	3700	308	378
N ₂₁₃₅ phosphate	$8 \times 2.5 \times 0.6 = 12$	1116	93	120
SPG-1030 phosphate	$8 \times 2.5 \times 0.6 = 12$	1392	116	165

三、激光输出特性

激光腔体的结构与图 1 相同。输出端反射率取 76%。根据作者的实验,在此反射率下,

表 3 中的 N_{0335} 和 N_{2135} 两种玻璃的激光输出特性均接近最佳状态。两种玻璃的激光输出性能示于图 2。由图可见, 磷酸盐玻璃(N_{2135})的激光效率明显高于硅酸盐玻璃。在本实验所取板条尺寸和双面泵浦条件下, 前者效率达 1.4%, 后者只有 0.8%。当输入为 700 J 时, 以 1.5 Hz 的泵浦频率抽运 N_{2135} 玻璃, 单脉冲激光输出近 10 J, 平均激光功率约 15 W, 功率密度 1.25 W/cm²。对于 N_{0335} 型硅酸盐玻璃, 同样输入 700 J 时, 以 3 Hz 频率抽运, 单脉冲激光能量约 6 J, 平均激光功率约 18 W, 功率密度 1.5 W/cm²。上述功率均是在长时间安全运转条件下获得的。

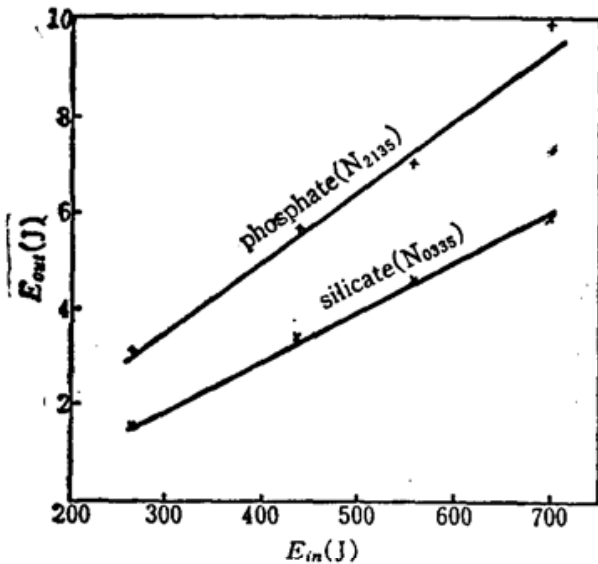


Fig. 2 The lasing characteristics of silicate and phosphate slabs (8, 2.5, 0.6 cm)

在板条式器件中, 一般设硅酸盐与磷酸盐激光玻璃的激光效率分别为 1% 和 1.5%。在此情况下, 根据表 3 中的数据估算的 N_{0335} 及 N_{2135} 玻璃的实际激光功率密度极限分别应是 2.95 W/cm² 和 1.40 W/cm²。图 2 所示的 N_{2135} 玻璃的激光功率密度已接近极限值, 但仍能长时间稳定输出, 效率不呈下降。 N_{0335} 玻璃的激光功率密度虽还远未达极限值, 但是却难以继续升高, 因为玻璃中已开始出现导致效率下降的光致色心。由于磷酸盐玻璃效率高、无色心, 所以近十年来高功率和高平均功率玻璃激光器都采用磷酸盐。为了克服这类玻璃热负载功率密度低的缺点, 近几年报道了不少研究改进工作^[11, 12], 并陆续形成了以高强度为特点的新型磷酸盐激光玻璃, 如日本的 HAP-4 型, 美国的 Q-89 型和 APG-1 型, 以及我国上海光机所的 SPG-1030 型等。这些玻璃除在化学组成和结构上融合了硅酸盐与磷酸盐玻璃的各自优点外, 有的还采用了表面增强技术, 以大幅度提高玻璃的耐热冲击强度。表 4 是我所最近研制的增强型磷酸盐玻璃泵浦功率负载特性。由表可见, 增强后玻璃的 R_s 值和 $(P_{in})_{max}$ 均提高 3 倍以上。若按较保守的 1.3% 激光效率估计, 增强玻璃的激光功率密度有可能达到 4 W/cm²。若要产生 100 W 的平均功率输出, 只需要 25 cm³ 的玻璃, 因此是一种有发展前景的高平均功率玻璃工作物质。

Tab. 4 The properties of SPG-1030 phosphate glasses

glass trade-mark	$\sigma \left(\frac{10^3 \text{kg}}{\text{cm}^2} \right)$	$R_s (\text{W/cm})$	pumped slab volume (cm ³)	pump/fracture power (W)	$(P_{in})_{max} (\text{W/cm}^2)$	
					exp.	cal.
N_{2135}	0.65	0.46	$8 \times 2.5 \times 0.6 = 12$	1116	93	120
SPG-1030 unstrengthened	0.56	0.63	$8 \times 2.5 \times 0.6 = 12$	1392	116	165
SPG-1030 strengthened	1.44	1.62	$8 \times 2.5 \times 0.6 = 12$	4640	386	424

四、结 论

1. 根据理论估算和实验, 相对于 0.6 cm 厚、 Nd_2O_3 浓度为 3 wt% 左右的硅酸盐板条玻 (下转第 516 页)

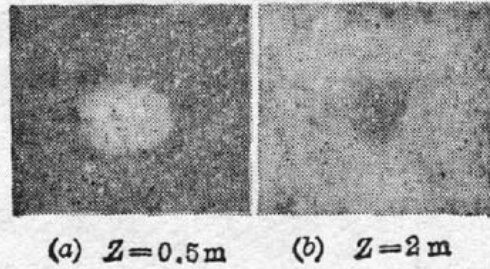


Fig. 9 Detection of the beam concentration distance

为了进一步研究列阵激光输出的远场光场特性,我们编制了能模拟一至七列阵激光输出的计算机程序,可人为控制各列的输出光振幅及初位相,并能画出任意距离处 w 轴上的光强分布曲线。

参 考 文 献

- 1 D. G. Youmans, *Appl. Phys. Lett.*, **44**(4), 365(1984)
- 2 L. A. Newman *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **48**(25), 1701(1986)
- 3 K.D. Laakmann, W. H. Sterier, *Appl. Opt.*, **15**, 1334(1976)
- 4 D.M. Henderson, *Appl. Opt.*, **15**, 1066(1976)
- 5 Gary J. Swanson *et al.*, *Opt. Lett.*, **12**(4), 245(1987)

(上接第 510 页)

璃,其实际泵浦功率密度极限约 300 W/cm^2 , 激光功率密度极限约 3 W/cm^2 , 但稳定的输出功率密度小于 1.5 W/cm^2 ; 相应磷酸盐玻璃的泵浦功率密度极限约 $90 \sim 100 \text{ W/cm}^2$, 激光功率密度极限近 1.5 W/cm^2 , 稳定的激光输出功率密度高于 1.2 W/cm^2 。

2. 发展增强型磷酸盐玻璃是开拓激光玻璃在高平均功率激光器中应用的有效途径。

参 考 文 献

- 1 周 烽 *et al.*, *物理学报*, **38**, 617(1989)
- 2 顾绍庭 *et al.*, *物理学报*, 待发表
- 3 中国科学院上海光机所研究报告集第二集:“激光玻璃”。1974, 257
- 4 Joseph S. Hayden *et al.*, *Proc. SPIE*, **1021**, 36(1989)
- 5 HOYA Laser Glasses(catalog)
- 6 Laser Glasses (catalog, Owens-Illinois, U. S. A.)
- 7 KIGRE. INC, Product Catalog
- 8 朱从善 *et al.*, *中国激光*, **17**(7), 429(1990)
- 9 Laser Program Annual Report 1985, LLNL UCRL-50021 85(1986), 9~58
- 10 K. A. Cerqua *et al.*, *Appl. Opt.*, **27**(12), 2567(1988)
- 11 Zhu Congshan *et al.*, *J. Non-Cryst. Solids*, **112**, 368(1989)