

高重复频率磷玻璃锁模激光器

何慧娟 陆国贤 李永春 钱林兴 顾圣如 赵隆兴

(中国科学院上海光机所)

提要: 高重复频率磷玻璃微微秒激光器已获得运转,重复率达10赫,脉宽24微微秒,谱宽0.84埃,序列能量~6毫焦耳。

A high repetition rate and mode-locked phosphate glass laser

He Huijuan, Lu Guoxian, Li Yongchun, Qian Linxin, Gu Shenru, Zhao Longxin

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

Abstract: High repetition rate operation of a picosecond glass laser up to 10 Hz was achieved by using a new kind of phosphate glass. The Pulse duration is 24 ps, the spectral width is 0.84 Å and the total energy of pulse train is 6 mJ.

玻璃材料能在高重复率下运转,关键除了改进其热导外,还要避免或消除不希望有的光泵感生热效应,例如由于折射率随温度变化 $\frac{dn}{dt}$ 和线膨胀系数 α 所导致的光程变化。对硅玻璃而言, $\frac{dn}{dt}$ 和 α 都具有正值。我们采用的这种新型磷玻璃具有负的 $\frac{dn}{dt}$ 值,而 α 具有正值,从而使两者引起的光程变化相互补偿。因此,当光在激光腔中往返运行一次,其光程变化可达到最小值。

整个光程长的变化随温度变化的关系式如下:

$$\begin{aligned} \Delta p(r) &= l \frac{dn}{dt} \Delta T(r) + l(n-1)\alpha \Delta T(r) \\ &= Wl \Delta T(r) \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $\alpha = \frac{1}{l} \frac{dl}{dt}$, r 是离开棒中心的距离,

$W = \frac{dn}{dt} + (n-1)\alpha$ 是热光系数。

如果 $\frac{dn}{dt}$ 和 α 异号, $\Delta p(r)$ 陡然下降。这就是玻璃激光器不再遭受光泵感生热效应,而能在高重复率下运转的依据。

我们使用了两种磷玻璃,其性能参数列于表1。由此表可见,这两种磷玻璃都具有负的 $\frac{dn}{dt}$ 。由于其 W 分别是 $8.6 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ 和 $4 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$,显然式(1)中所示的 $\Delta p(r)$ 几乎趋于零。

激光器能在重复率下良好运转,尚需设计一种最佳热稳腔。我们曾分析过锁模激光器的热稳腔^[1],专门分析了 $\alpha \neq 0$ 的普遍情况, α 是从棒中心到输出镜的间距。内透镜焦长的小变化引起激光输出光束稳定性的变化依赖于光斑尺寸 W_1 对焦长 f 的导数

收稿日期:1983年7月20日。

表 1 磷玻璃的性能

参 数	N ₂₁	N ₂₄
非线性折射率 $n_2(10^{-13}\text{esu})$	1.3 ± 0.1	1.05 ± 0.1
发射截面 $\sigma(10^{-20}\text{厘米}^2)$	3.21	3.76
热 膨 胀 $\alpha(10^{-7}/^\circ\text{C})$	120.2	136.3
折射率的温度变化 $\frac{dn}{dt}(10^{-7}/^\circ\text{C})$	-59.3	-68.5
热 光 系 数 $W(10^{-7}/^\circ\text{C})$	8.6	4
折 射 率 $n_{1.054\text{微米}}$	1.564	1.532
激 光 波 长 $\lambda(\text{微米})$	1.054	1.054
荧 光 寿 命 $\tau(\text{微秒})$	320	280

$\frac{dW_1}{W_1} / \frac{df}{f}$ 。当共振腔的 G 因子满足

$$G_1 = \frac{G_2}{2G_2^2 + 2\beta G_2 + \beta^2} \quad (2)$$

时, $\frac{dW_1}{W_1} / \frac{df}{f} \rightarrow 0$ 。其中下角标 1、2 分别表示属于输出端和后端面的量。在镜 1、镜 2 和激光棒上的光斑尺寸是:

$$W_1^2 = \left(\frac{\lambda L}{\pi}\right) \frac{2G_2^2 + 2\beta G_2 + \beta^2}{G_2 + \beta} \quad (3)$$

$$W_2^2 = \left(\frac{\lambda L}{\pi}\right) \frac{1}{G_2 + \beta} \quad (4)$$

$$W_3^2 = \left(\frac{\lambda L}{\pi L}\right) \times \frac{[2G_2^2 + 3\beta G_2 + \beta^2]^2}{(1 + \beta^2)(G_2 + \beta)[2G_2^2 + 2\beta G_2 + \beta^2]} \quad (5)$$

其中 $\beta = \frac{a}{b}$, a 、 b 分别是内透镜到前腔镜 1 和 后腔镜 2 的间距。当腔内元件配置位置变化时, 即 $\beta = \frac{a}{b}$ 改变, 谐振腔的热稳状态将发生变化。图 1 是 β 取不同值时对激光棒热透镜最不灵敏腔的 $G_1 G_2$ 稳定曲线, β 是参数。按照我们现有光学元件的实际尺寸, 选取

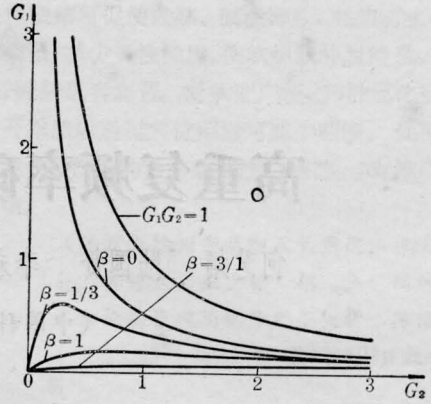


图 1 热不灵敏腔的 $G_1 G_2$ 稳定曲线

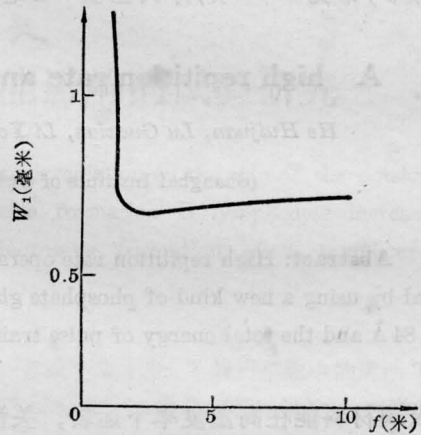


图 2 光斑尺寸 W_1 随热焦长的变化
纵轴: 光斑尺寸, 横轴: 重复频率

$\beta = 1/3$, 计算了光斑尺寸 W_1 随热焦长 f 的变化曲线示于图 2。从图 2 容易推出: 当 $f \rightarrow 1.5$ 米时腔偏离热稳区; 当 $f \leq 1.1$ 米时, 腔已处于非稳区。实测了磷玻璃 N₂₁、硅玻璃和 Nd:YAG 的热焦长随脉冲重复率的变化, 结果示于图 3, 虚线以下腔处于非稳区。显然, Nd:YAG 可在几十赫下运转^[1], 磷玻璃可在大于 10 赫下运转, 而硅玻璃材料只能运转在低于 5 赫。在 5 赫下运转的硅玻璃, 谐振腔已进入非稳腔区域。

激光器采用主被动锁模。腔长 1.5 米, 由 7 米全反凹面镜与 $R=88\%$ 楔形平镜组成, 厚度 1 毫米的染料盒与凹面镜直接连结。染料是五甲川溶于 1, 2 二氯乙烷, 小信号往

返透过率 0.84。棒的尺寸是 6 毫米×100 毫米。序列脉冲的半高度全宽是 150 毫微秒 (见图 4), 整序列的输出能量~6 毫焦耳。使用双光子荧光法测量了脉宽, 图 5 是其密度计扫迹, 脉宽 24 微微秒。用 1 米光栅摄谱仪测量其光谱, 其密度计扫迹示于图 6, 光谱宽度 0.84 Å。当激光器的重复频率从 1 赫变到 5 赫, 直到 10 赫, 示波器输出脉冲序列是稳定的, 输出能量基本上稳定, 这与 Nd:YAG 激光器的输出情况相似^[1]。然而, 在同样条件下的硅玻璃锁模激光器只能运转在 1 赫, 当重复频率达到 5 赫时, 输出迅速降到零。这些结果与上述热稳腔和热透镜的分析相一致。

由于对泵浦光的吸收和棒表面的冷却在棒中产生温度梯度, 在激光棒中产生机械应力。文献[2]给出了圆柱棒中的应力方程:

$$\sigma_r(r) = QS(r^2 - r_0^2) \quad (6)$$

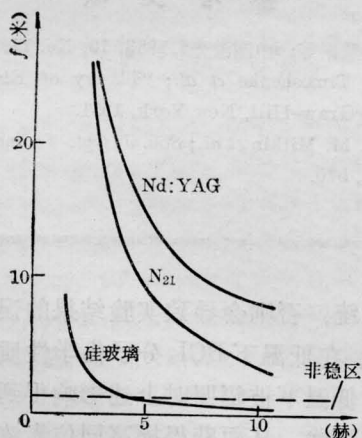


图 3 Nd:YAG、N₂₁、硅玻璃的热焦距随脉冲重复率的变化
纵轴: 焦距; 横轴: 重复频率



图 4 磷玻璃锁模序列脉冲示波器图
时标: 50 毫微秒/厘米

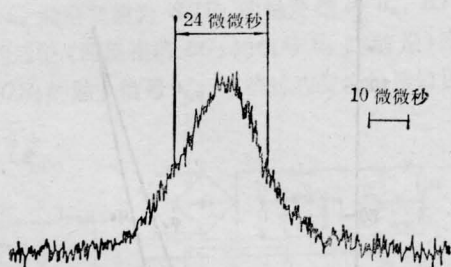


图 5 双光子荧光的密度计扫迹

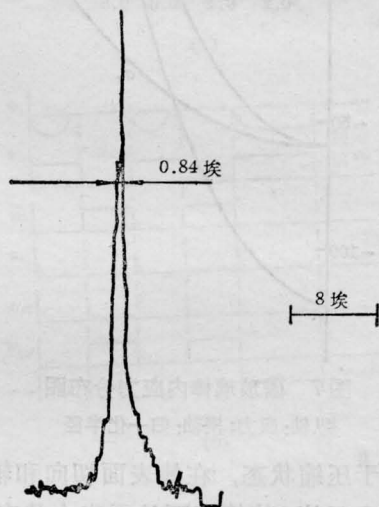


图 6 光谱照片的密度计扫迹

$$\sigma_\phi(r) = QS(3r^2 - r_0^2) \quad (7)$$

$$\sigma_z(r) = 2QS(2r^2 - r_0^2) \quad (8)$$

方程(6)到(8)描述无限长的各向同性棒中的径向应力 σ_r 、切向应力 σ_ϕ 和轴向应力 σ_z , 其中

$$S = \alpha E [16K(1-\nu)]^{-1} \quad (9)$$

这些都是材料的特性参数, E 是杨氏模量, K 是热导, ν 是泊松比。

$$Q = \frac{P_a}{\pi r_0^2 L} \quad (10)$$

r_0 是棒的半径, L 是棒长, P_a 是棒内耗散功率。应力分布是 r 的抛物线。按式(6)~(8), 在泵浦功率为 850 瓦时, 代入材料特性参数, 计算得出图 7 中应力随磷玻璃棒半径的变化。从这些曲线说明, 应力的径向分量在棒表面趋于零, 棒中心三个分量都具有负值, 棒

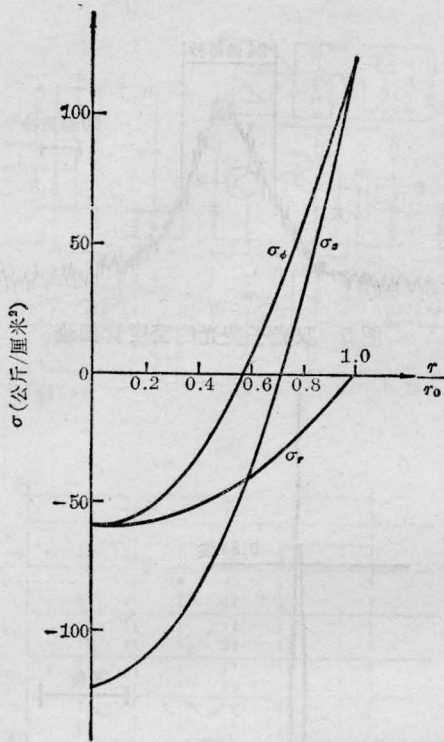


图7 磷玻璃棒内应力分布图
纵轴:应力;横轴:归一化半径

中心处于压缩状态,在棒表面切向和轴向分量都具有正值,使棒表面处于张力状态。最高的应力出现在棒中心与棒表面。棒内功率耗散增加,棒表面的张力也增加。把式(7)和

(8)的 σ_ϕ 与 σ_z 矢量相加得到 σ_{\max} :

$$\sigma_{\max} = \frac{\sqrt{2} \alpha E}{8\pi K (1-\nu)} \frac{P_a}{L} \quad (11)$$

我们测量了引起棒断裂的耗散功率, N_{21} 在 850 瓦和 N_{24} 在 990 瓦产生热炸。由此估算其抗张强度,对 N_{21} 是 180 千克/厘米²,对 N_{24} 是 230 千克/厘米²。当然一根激光棒的实际断裂应力强烈地依赖于棒的表面加工。苏联^[3]曾报道过一种磷玻璃的实际测量断裂应力是 205 千克/厘米²,其膨胀系数是 $99 \times 10^{-7} \text{C}^{-1}$,其抗张强度与本文相似。

磷玻璃锁模激光器的实际运转能量是 54 焦耳,根据热炸数据,说明高于 10 赫情况下运转是可能的,其主要障碍是热炸。当然精心地加工使棒表面无缺陷,不引入应力,其热负载会有所提高。

姜中宏、张俊洲、陈泽兴等同志提供玻璃材料与参数,深表感谢。

参 考 文 献

- [1] 何慧娟等;《中国激光》,1983, 10, No. 11, 765
- [2] S. Timoshenko *et al.*; "Theory of Elasticity". McGraw-Hill, New York, 1951.
- [3] V. M. Mitkin *et al.*; *Sov. J. Opt. Technol.*, 1978, 45, 570.

(上接第 418 页)

硼同位素浓缩系数 ~ 1.44 。在室温下用同样条件(辐照时间增加到 40 分钟),辐照后的红外吸收光谱如图 5(b),测得硼同位素浓缩系数 ~ 1.02 。图 5(c) 为未经辐照过的 BCl_3 红外吸收光谱。用上述同样条件选用 P_{18} 支线辐照,经辐照后测得硼同位素浓缩系数在低温下 ~ 1.43 ,室温下 ~ 1.09 。

5. BCl_3 这一分子的化学性质非常活泼,易与其他物质产生化学反应,当它受到激光辐照后和在激光辐照过程中的物理、化学性质是非常复杂,在进行 BCl_3 中硼同位素分离时,使用的反应池及真空系统装置都得用

无油系统,否则会导致实验结果的误差或错误^[1,2]。在低温下 BCl_3 分子化学性质比较稳定,在低温下被辐照时上述影响得到一定的减轻或消除,从而获得提高同位素浓缩系数的效果。

本工作使用的 CW CO_2 激光器,承蒙张泽渤同志大力支持,低温反应池由姚进珍等工人师傅改进和制造,在此谨表感谢。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院物理研究所,盐湖所激光同位素研究组;《激光》,1979, 6, No. 11, 11.
- [2] 唐福海等;《激光》,1981, 8, No. 3, 32.