

文章编号: 0253-2239(2007)02-0280-7

千瓦级半导体抽运的固体热容板条激光器

郭明秀 李劲东 付文强 施翔春 胡企铨 陈卫标

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 报道了千瓦级激光二极管面阵抽运固体热容激光器的理论与实验研究, 分别采用 Nd:YAG 单板条和双板条串接的热容激光器, 利用热容激光器的理论计算模型计算了在一定的工作时间内激光输出特性, 并进行了实验验证。实验中采用的晶体尺寸均为 $59\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 4.5\text{ mm}$, 对单板条进行抽运时平均功率大约为 5.6 kW , 双板条串接时为 11.2 kW , 重复频率为 1 kHz , 占空比为 20% 。实验中观察了 1 s 的工作时间内脉冲能量输出的波动情况, 单板条时单脉冲能量输出最大为 1.3 J , 在 1 s 后单脉冲能量输出下降到开始的 70% 左右, 而双板条串接时单脉冲能量输出最大为 2.06 J , 在 1 s 后单脉冲能量输出下降到开始的 50% 左右, 对单块晶体采用通水冷却的准热容热管理模式能有效地降低其热效应。

关键词: 固体激光器; 热容激光器; 激光二极管面阵; 侧抽运; 板条; Nd:YAG

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

Kilowatt Laser Diode-Pumped Solid-State Heat Capacity Slab Laser

Guo Mingxiu Li Jindong Fu Wenqiang Shi Xiangchun Hu Qiquan Chen Weibiao

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

Abstract: A kilowatt laser diode stack pumped solid state heat capacity laser is studied theoretically and fabricated respectively with single slab and double Nd:YAG slabs. Using the theoretical model of heat capacity laser, the output characteristic for a certian time, the relation of the output power, temperature and time, is obtained. The Nd:YAG slab size is $59\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 4.5\text{ mm}$. The average pump power is 5.6 kW for single slab and 11.2 kW for double slabs, repetition rate of 1 kHz and duty cycle of 20% . In the 1 s running time, the output energy of the laser shows a fluctuation. And the maximal output energy is 1.3 J for one slab laser and 2.06 J for two slabs laser respectedly. After the 1 s process the output energy declines to 70% and 50% of the original values for two lasers respectively. The thermal effects have been minished for one slab cooled by water. The experimental results match well with the calculation data.

Key words: solid-state laser; heat capacity laser; diode laser stack; side pumped; slab; Nd:YAG

1 引 言

固体激光器在热容型的运行方式下, 激光介质表面的温度要高于中心的温度, 表面是压应力, 中心是张应力。因此在相同的抽运功率下, 热容型运行的激光介质的最大应力要远小于常规运行的激光介质的最大应力。由于热容型激光器有以上特点, 因而可以在短时间内获得极高的输出能量。1997 年,

美国 LLNL 实验室利用灯抽运钕玻璃系统演示了 1.4 kW ($140\text{ J} \times 10\text{ Hz}$) 热容固体激光器 (solid-state heat capacity laser, SSHCL); 2001 年成功研制出了万瓦级 (12.8 kW , $639\text{ J} \times 20\text{ Hz}$) 灯泵热容固体激光器; 2003 年采用 8600 只激光二极管抽运三块 Nd:GGG 板条实现了大于 10 kW 的输出; 2004 年, 获得了 30 kW 的输出, 工作时间 1 s ; 计划到 2007 年实

作者简介: 郭明秀(1975—), 女, 湖北麻城人, 博士研究生, 主要从事半导体抽运的固体激光器方面的研究。

E-mail: guomingxiu@siom.ac.cn

导师简介: 陈卫标(1969—), 男, 上海人, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光雷达技术、空间激光技术、激光海洋应用技术的应用。E-mail: wbchen@mail.shcnc.ac.cn

收稿日期: 2006-05-26; 收到修改稿日期: 2006-06-14

现可装车演示的 100 kW 激光二极管抽运的热容固体激光器^[1~4]。

以热容模式工作的固体激光器与传统的适时主动冷却的固体激光器有不同的温度、热应力及激光输出特性,因此通过理论分析计算再结合实验对固体热容激光器的发射过程中激光输出等特性进行深入研究有利于掌握热容激光器的工作规律。文中结合实验结果,通过理论计算了这些特性,为热容激光器的进一步设计和研究提供一些依据。

2 实验装置

实验结构如图 1 所示,采用平-平腔结构,两边对称侧面抽运方式,输出镜透射率 30%,实验中采用了单块 Nd:YAG 板条和双 Nd:YAG 板条串接两种方式,分别如图 1(a)、图 1(b)所示,图 1(b)是图 1(a)的简单扩充,其采用的抽运耦合系统是一样的。腔长分别为 130 mm 和 265 mm, Nd:YAG 板条晶体为 59 mm × 40 mm × 4.5 mm,掺杂原子数分数为 0.8%。板条两边使用的抽运光源为在快轴方向带有准直微柱透镜的面阵激光二极管阵列(LDA),平均抽运功率在单板条时大约为 5.6 kW,双板条串接时为 11.2 kW,重复频率为 1 kHz,占空比为 20%。

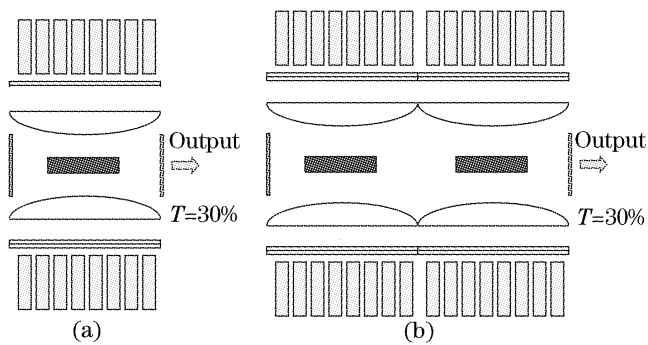


图 1 热容激光器实验系统图。(a)单 Nd:YAG 板条热容激光器, (b)双 Nd:YAG 板条热容激光器

Fig.1 Schematic of Nd:YAG slab solid state heat capacity laser (SSHCL). (a) Single Nd:YAG slab, (b) double Nd:YAG slabs

3 系统的仿真计算及结构设计

3.1 抽运耦合结构设计

图 1(a)中采用的抽运源是由 200 个靶条组成的二维面阵激光二极管阵列,面阵的发光面积为 100 mm(慢方向) × 32 mm(快方向),每一组面阵激光二极管阵列由 25 个靶条(快轴) × 8 个靶条(慢轴)二维排列而成,每个靶条的发光面积为 1 μm(快) × 10 mm(慢),组之间的间隔理论上为 2 mm,

但实际装配上有一些误差,所以慢方向光束尺寸为 100 mm,工作电流 118 A 时峰值功率为 100 W,占空比 20%,沿着快方向上两个靶条之间的间隔为 1.2 mm,慢方向发散角为 12°,快方向每个靶条都经过了微柱透镜准直,理论上每个靶条的发散角应该在 2°之内,但由于面阵封装问题,快方向的实际测量下来大约也是 12°。要求二维面阵激光二极管阵列抽运模块通过耦合系统后在增益介质上的抽运面积小于 40 mm × 60 mm,主要是将慢方向压缩到 1/2,且抽运区光斑均匀性较好。

较高的耦合效率、抽运光强分布的均匀性、足够的抽运密度、抽运区宽度与模体积匹配是耦合系统设计的关键所在。均匀的抽运能减少局部热效应和在增益介质内获得均匀的小信号增益系数,影响抽运光分布均匀性的因素主要有:一是面阵二极管激光器输出的激光经微柱透镜准直后分布的均匀性,与面阵激光二极管阵列的封装密切相关;二是光束的两个方向的发散角;三是柱透镜本身的像差;四是每个靶条的 smile 效应。

通过 Zemax 软件设计,假设二极管激光器在垂直(快方向)和平行(慢方向)于结平面上的光强分布为角度的高斯函数:

$$I = I_0 \exp[-2(\theta/\phi)^2], \quad (1)$$

式中 ϕ 是峰值功率降到一半时的角宽度, $\phi = 10.2^\circ$ 。为了减小整个耦合系统的尺寸,快轴耦合柱透镜要尽量靠近抽运模块发光端面,慢轴柱透镜则尽量靠近快轴柱透镜,同时也就确定了耦合柱透镜与抽运模块间的位置关系,最终透镜材料选用了光学特性好的大尺寸 K9 玻璃,快慢方向分别采用一组正交柱透镜进行压缩,其快、慢轴耦合柱透镜的曲率半径分别为 $R_f = 40 \text{ mm}$, $R_s = 80 \text{ mm}$,柱透镜的两个通光面镀有 808 nm 的消反膜以提高抽运光的传输效率。图 2 为面阵二极管经过正交柱透镜耦合后的在

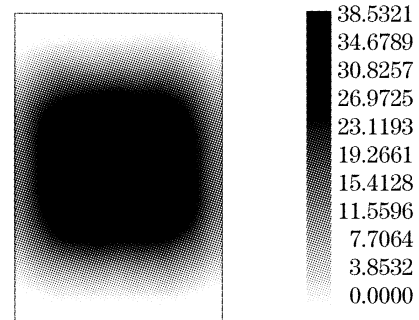


图 2 理论计算经过正交耦合透镜后晶体处的光斑图
Fig.2 theoretical result for light spot at the position of crystal after two orthogonal coupling lenses

晶体位置处的理论计算得到的光斑,从图中可以看出快慢轴发散光经过耦合透镜后的光强分布比较均匀;图3为 $R_f=40$ mm确定后慢方向上的耦合柱透镜不同曲率和改变晶体与激光二极管距离时对抽运光耦合效率的影响。

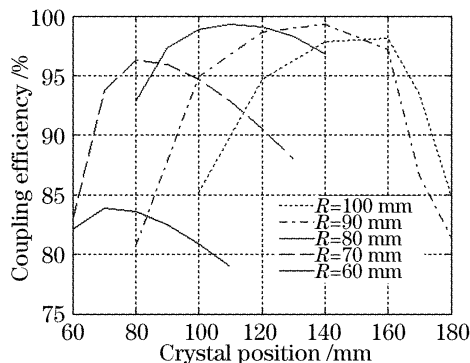


图3 不同曲率半径下耦合效率与晶体位置的关系

Fig. 3 Relation of coupling efficiency and crystal position for different curvatures of slow axis lens

3.2 激光发射阶段输出特性的计算

在重复频率周期性光脉冲抽运下,激光介质内的温度分布主要决定于脉冲周期 t_p 与激光介质热驰豫时间 τ 之比。当抽运频率较高,使 $t_p < \tau$ 时,抽运脉冲产生介质内的温度升高还未恢复到初始状态,后继抽运脉冲又已到来,在前一抽运脉冲残存温度分布基础上叠加而产生新的温度分布,所以重复频率抽运脉冲的作用使温升不断积累。

设激光器工作在热容方式下,在出激光阶段是绝热的,随着抽运能量的积累,工作介质的温度会迅速提高,当其温度升高到一定程度时,激光发射将停止。在计算中将抽运光的热沉积作为内热源,并假设激光介质的温度为均一化的整体^[5]。

在激光发射过程中热沉积功率为

$$P_{\text{heat}} = \frac{2I_p V \eta_{\text{abs}}}{\omega} \frac{\chi}{1 + \chi} = 2P_p \eta_c \eta_{\text{abs}} \frac{\chi}{1 + \chi} = aP_{\text{dio}} D_t \eta_c \eta_{\text{abs}} \frac{\chi}{1 + \chi} = aP_{\text{dio}} D_t \eta_c \eta_{\text{abs}} h, \quad (2)$$

式中 I_p 是抽运功率密度; ω 是板条的宽度;因子2考虑了双向抽运; a 是激光二极管阵列靶条的个数; P_{dio} 是每个靶条的峰值功率; η_{extr} 是提取效率, $\eta_{\text{extr}} = \eta_s \gamma_Q (1 - \eta_{\text{ASE}}) (1 - \eta_L)$,与谐振腔结构等有关,表示激光输出时上能态全部可用的能量或功率的百分数, η_s 是斯托克斯因子(76%), η_Q 是量子效率(95%), η_{ASE} 是放大的自发辐射损耗(0.1), η_L 是系统损耗(0.1); $a = 25 \times 4 \times 2 \times 2$,根据实际测量,100 A时平均功率只有118 A时的70%,微柱透镜

没有镀808 nm消反膜,损耗为8%,所以 $P_{\text{dio}} = 100 \times 0.7$; η_c 为抽运耦合系统的耦合效率,实验测量 $\eta_c = 0.8$; η_{abs} 为激光介质对抽运光的吸收效率,经实验测量计算约为0.95。

四能级系统中,激光下能级为激发态,在阈值状态下,在单位时间内单位体积中必须有 $n_{11}/(\eta_F \tau_{\text{life}})$ 个粒子自 E_0 能级跃迁到 E_3 能级,所以四能级的阈值抽运功率公式^[6]

$$P_{\text{th}} = \frac{h\nu_p n_{11} V}{\eta_F \tau_{\text{life}}} = \frac{V h \nu_p n_0 \exp(-E_{11}/kT)}{\tau_{\text{life}}}, \quad (3)$$

对于Nd:YAG, $\eta_F = 1$,抽运光波长808 nm, ν_p 为抽运光频率。激光介质的温度上限由能级粒子数再分配效应决定,当激光介质的温度持续升高时,根据玻耳兹曼分布粒子数会集聚在基能级上,这样在给定的抽运功率下就减小了有效增益,进而造成输出功率的下降。所以热容激光器的输出能量在整个抽运阶段是逐渐减少的,减小的幅度和抽运功率、介质的温升等有关。

按照玻耳兹曼分布下能级粒子数随温度升高增长,下能级粒子数与掺杂粒子数之比为

$$\frac{n_{11}}{n_0} = \exp\left(-\frac{E_{11}}{kT}\right), \quad (4)$$

则

$$P_{\text{th}} = \frac{V h \nu_p n_0 \exp(-E_{11}/kT)}{\tau_{\text{life}}}, \quad (5)$$

$h\nu_p = 2.449 \times 10^{-19}$ J是光子能量, $\tau_{\text{life}} = 230 \mu\text{s}$ 是激光上能级的寿命, n_{11} 是下能级粒子数密度, n_0 是掺杂粒子数密度,对于掺杂原子数分数为0.8%的Nd:YAG,基质YAG的化学式 $Y_3Al_5O_{12}$,其摩尔质量为593.7 g/mol,密度为4.56 g/cm³,Nd原子摩尔质量为144.2 g/mol,Nd₂O₃分子摩尔质量为336.4 g/mol,阿伏伽德罗常量 $N_A = 6.02 \times 10^{23}$ /mol,原子数分数为0.8%表示 $Y_3Al_5O_{12}$ 中有0.8%的 Y^{3+} 被 Nd^{3+} 取代而1 mol YAG中有3 mol Y^{3+} ,故 $n_0 = \frac{0.8 \times 1 \times 3 \times 6.02 \times 10^{23}}{100 \times 593.7 \div 4.56} = 1.1088 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ^[7], E_{11} 是激光下能级与基态的能差,根据Nd:YAG能级图,激光下能级 Y_3 比基能级高出2111 cm⁻¹,其粒子数密度是基能级的 $\exp\left(-\frac{E_{11}}{kT}\right)$ 倍,在室温300 K时约为 $\exp(-10)$,因此 $E_{11} \approx 4.2 \times 10^{-20}$ J,波尔兹曼常量 $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ ^[8]。

所以,由(2)式~(5)式推出系统输出功率与温度的关系可表示为

$$P_{out} = \frac{P_{heat} \eta_{extr}}{\chi} - \frac{n_0 V h \nu \eta_{extr} \exp(-E_{ll}/kT)}{\tau_{life}} = D_t \eta_{extr} \left(\frac{P_{heat}}{D_t \chi} - VP_{th} \right) = D_t \eta_{extr} \left[\frac{P_{heat}}{D_t \chi} - \frac{V h \nu n_0 \exp(-E_{ll}/kT)}{\tau_{life}} \right], \quad (6)$$

$D_t=0.2$ 是占空比; χ 是热参量, 为产生的热与存储能量的比, 产热比 H 为产生的热与吸收能量的比, 吸收能量包括存储能量和产生的热, 因此 $\chi = H(1 - H)$, $H = \chi/(1 + \chi)$, 对二极管抽运, $\chi = 0.5$, $H = 0.33$ 与工作介质和抽运方式有关^[11]; V 是激光介质体积。根据(6)式可得出单板条和双板条串接时激光器输出功率与温度的关系, 如图 4 所示。可以看出, 温度升高时, 串接时的输出功率下降得更快, 与实验结果图 9(a)、图 9(b)相符, 单板条时, 输出功率理论上最高达 1650 W 左右, 双板条时达 3300 W 左右, 串接时其输出功率大约为单板条的两倍输出功率, 随温度的升高而下降, 当温升小于 40°时, 输出功率下降不明显, 超过 40°时, 输出功率明显下降。

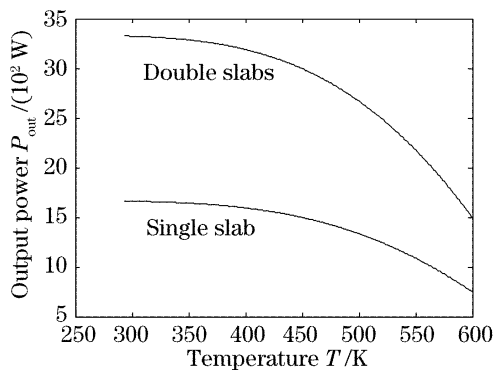


图 4 单板条和串接时输出功率与温度的关系

Fig. 4 Relation of output power and temperature for single slide and double slabs cascade

$C_p(T)$ 为激光介质的热容, 是温度的函数。根据爱因斯坦比热容公式, 固体激光介质的比热容为

$$C_p(T) = 3R \left(\frac{T_D}{T} \right)^2 \frac{\exp(T_D/T)}{[\exp(T_D/T) - 1]^2}, \quad (7)$$

式中 R 为与工作介质有关的气体常数, $R = NR_g/M_{mol}$, $R_g = 8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ 即气体摩尔常量, M_{mol} 为 Nd:YAG 的摩尔质量, $N = 23$ 为晶体分子式含有的原子个数, T_D 为晶体的德拜(Debye)温度, 对于 YAG 晶体, $T_D \approx 750 \text{ K}$ 。根据(7)式可得出热容值与温度的关系曲线如图 5 所示, 可以看出热容值随温度的升高而增大。

将激光介质的起始温度与工作结束温度称为温升, 则温升与工作时间的关系为

$$\Delta T = \frac{P_{heat} t}{m C_p(T)}, \quad T = 293 + \Delta T, \quad (8)$$

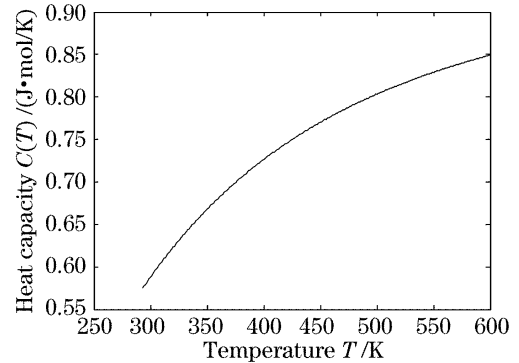


图 5 Nd:YAG 的比热与温度的关系

Fig. 5 Relation of heat capacity and temperature

即假定工作温度从 293 K 即室温 20 °C 开始, t 是工作时间, $m = \rho V$ 是介质质量。在热容运行方式下, 激光发射总是要求激光介质有更大的温升, 这样就能有更高的总脉冲串输出能量。从(8)式可以看出, 串接时抽运功率是单板条时的两倍, 但激光介质的大小也相当于前者两倍, 所以两种情况下温升与时间的关系理论上是一致的。根据(8)式可以得出温升与工作时间的关系曲线, 如图 6 所示, 在一秒的时间内平均温升大概为 37°左右。

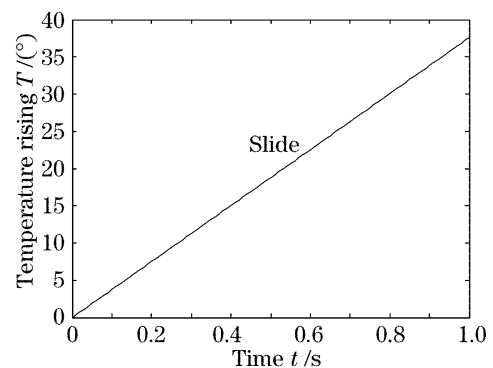


图 6 温升与时间的关系

Fig. 6 Relation of temperature rising and time

同时, 根据上述公式可以得出两种情况下输出功率与工作时间的关系, 其关系曲线如图 7 所示。可以看出, 在相同的激光运行时间内, 串接时输出功率下降得更快, 与实验结果是相符的[对比图 9(a)、图 9(b)], 实验在 1 s 的工作时间内输出能量下降达 30% [图 9(a)] 和 50% [图 9(b)] 之多, 与理论计算有差别, 原因是因为实际上实验中抽运不可能是绝对均匀的, 由于抽运不均匀性造成的热不均匀, 会随着介质温度的升高产生热交换, 从而破坏热平衡。

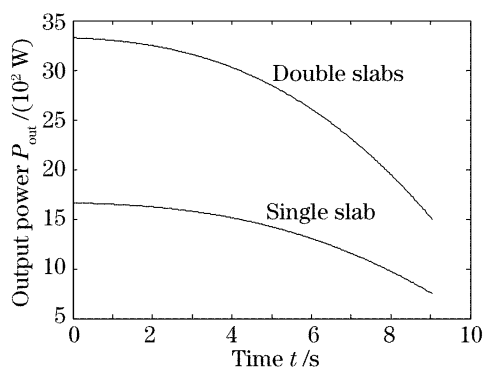


图 7 输出功率与时间的关系

Fig. 7 Relation of output power and time

介质也不是绝对绝热的,介质与周围环境或多或少的热交换会导致在介质的横向和纵向产生温度梯度。另外晶体质量不是很好,用 Zygo 干涉仪测量其应力很厉害,这些因素直接造成输出功率的迅速下降。

激光介质的最低温度由冷却系统决定,最高温度取决于介质的猝灭温度。在整个激光发射阶段,假设发热能量为 E_{heat} ,有 $E_{\text{heat}} = mC_p \Delta T$, $\Delta T = E_{\text{heat}} / (mC_p)$,设 E_{ul} 为存储在激光上能级的能量, E_{out} 为从系统得到的激光输出能量,有:

$$\begin{cases} E_{\text{heat}} = E_{\text{ul}} \frac{\chi}{1+\chi}, \\ E_{\text{out}} = \eta_{\text{extr}} E_{\text{ul}} \frac{1}{1+\chi}, \\ E_{\text{out}} = \frac{1}{\chi} \eta_{\text{extr}} E_{\text{heat}} = \frac{mC_p p}{\chi} \eta_{\text{extr}} \Delta T, \end{cases} \quad (9)$$

其中 η_{extr} 为系统的提取效率,所以, Walters 从速率方程出发,通过求解输出能量、损耗函数随温度的关系,得出了热容激光器输出能量(一次发射脉冲串能量总和)的表达式^[5]:

$$E_{\text{out}} = \eta_{\text{extr}} \frac{\rho C_p(T)}{\chi} \Delta TV, \quad (10)$$

利用(10)式可以得出输出能量与温升的关系曲线,如图 8 所示,可以看出,在 38° 左右的温升内,单板条时输出能量约为 1.45 J,而串接时约为 2.8 J,串接时其输出能量约为单板条的两倍。

热容激光器输出能量正比于工作物质的比热容 $C_p(T)$ 和温度变化幅度,在热容激光器工作过程中,较大的工作温度变化范围能产生大的平均功率输出。初始温度一般选为 20°C 以上。激光介质可以是固态,液态或气态。可以看出,激光输出的能量和激光介质的质量成正比,而从工程的角度讲,增加激光介质的质量比扩大介质工作的温度范围相对要容易一些,近年来则大多数采用板条结构或者片状结

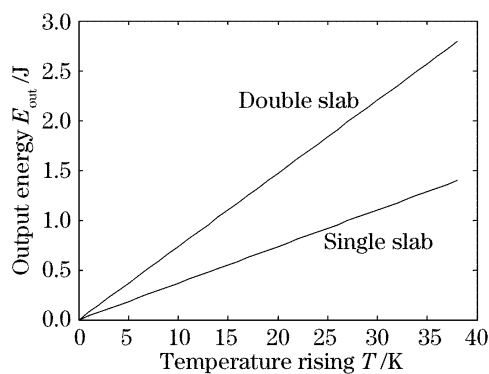


图 8 输出能量与温升的关系

Fig. 8 Relation of output energy and temperature rising

构来增加工作介质的质量,从而获得更多的激光能量输出。

4 实验结果及分析

实验采用图 1 所示的结构。激光输出平均功率测量方法为:低重复频率(10 Hz)下采用激光功率计测量。高重复频率时由于输出功率超出功率计测量范围,采用相对测量方法。利用光电管探测输出脉冲幅度,在低重复率时同时测量脉冲能量,建立脉冲幅度与脉冲能量的对应关系;高重复频率工作时采用光电管观察脉冲幅度的变化,反推脉冲能量的变化,从而间接估算平均功率输出。在重复频率为 1 kHz, 20% 的占空比,工作电流为 100 A,工作时间 1 s 时,脉冲能量输出波动如图 9 所示,三幅图分别为的单 Nd:YAG 板条晶体热容方式不冷却工作,两块相同的 Nd:YAG 板条晶体串接热容方式不冷却工作和单块 Nd:YAG 板条晶体通水冷却的(但冷却量很小,是一种准热容工作方式)激光输出图,图 9(a)、图 9(b)两幅图中均可以看到在激光器工作的前 0.2 秒左右脉冲能量是上升的,其原因可能是由于热效应在 0.2 秒以前热透镜的焦距大于腔长,这时激光器工作在稳腔的状态下,输出功率随着增大,有利于最大输出功率的获得。随着抽运能量的积累加上高的占空比,热效应非常严重,热透镜焦距急剧缩短,当热焦距短于腔长时,激光器处于非稳腔状态,能量输出和输出功率降低,同时表明激光晶体的热透镜效应对输出功率起制约作用。在 1 s 工作时间结束时,单 Nd:YAG 板条晶体热容方式能量输出降低到初始状态的 70% 左右,其单脉冲能量最大为 1.3 J,如图 9(a),而在抽运光重复频率为 10 Hz,占空比为 20%,工作电流为 100 A 时单 Nd:YAG 板条晶体热容方式单脉冲能量最大输出为 1 J,小于抽运光 1000 Hz 抽运时获得的单脉冲能量为 1.3 J,

其原因是在抽运光电流和脉冲宽度不变时,随着重复频率的提高,激光二极管的波长向长波移动而与Nd:YAG的吸收光谱匹配得更好;而双板条串接时能量输出达到了2.06 J,在1 s工作时间结束时,能量输出降低到初始状态的50%左右,如图9(b)所示;可以初步看出,两块晶体串接时热效应较单块晶体更严重,能量衰减更厉害。另外用单块晶体进行了通水冷却,其冷却量远没有达到使激光晶体达到

热平衡的程度,是一种介于热容和常规冷却方式之间的准热容的热管理方式,其激光输出如图9(c)所示,通水冷却在很大程度上减小了晶体的热效应,其输出在开始的短时间上升到最大输出后,激光输出稳定了一段很短的时间,由于冷却量不够,其残余的热效应使得输出开始下降,但较之不冷却的热容方式其输出能量衰减速度缓慢了很多。

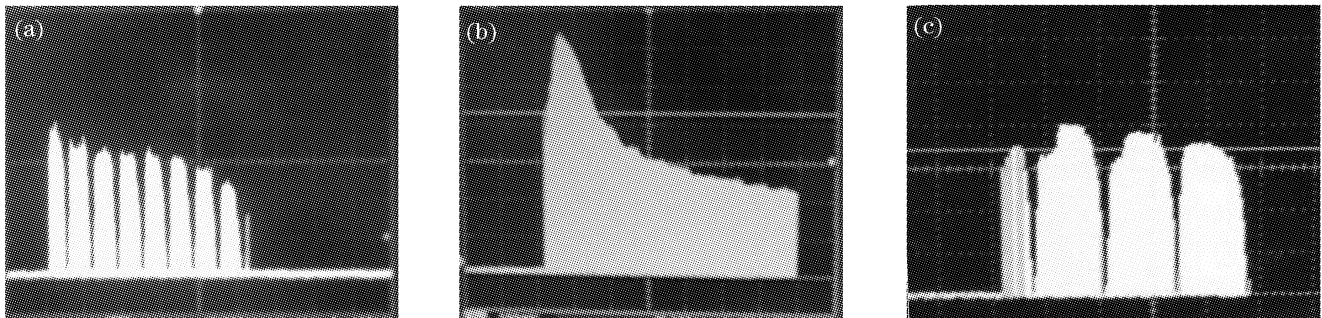


图9 热容激光器脉冲输出能量波动图。(a)单块晶体不通水,(b)两块晶体不通水,(c)一块晶体通水

Fig. 9 Output energy waving of heat capacity laser. Single crystal (a) and double crystal slabs (b) without water cooling, single crystal with water cooling (c)

热透镜效应是由于激光介质内的热量分布不均匀与热应变弹性引起的折射率不均匀变化而形成的。热透镜效应随着抽运功率而变化,因此焦距是动态变化的。一般热焦距的动态变化范围可以通过计算和实验两种方法来确定,实际最重要的是最短的热焦距。一旦确定了热透镜的最短焦距,就可以选择合适的腔结构参量来保证谐振腔工作在热稳状态,从而使激光达到稳定输出。

对于理想板条情况,如果光束直通板条,会存在柱透镜效应。板条温度分布在一维近似下,热透镜效应只在厚度方向存在,热透镜效应为类柱透镜。当板条为正的热透镜效应时,板条内出现聚焦情形,此时,传输光线与板条长度方向的中心线相交点将位于板条内部,这将导致板条的利用率降低,从而使输出功率降低。当板条为负的热透镜效应时,板条内存在散焦情形,此时,传输光线与板条长度方向的中心线相交点将位于板条外部,这将导致光场在通过板条时损失能量(增益降低),同样使得输出功率降低。当激光器从开始运转到经历若干次脉冲工作后,激光棒的热透镜效应会逐渐地由负透镜变为正透镜,所以激光输出在一定的时间内有一个短暂的上升时间,然后急剧下降。

对于激光器,激光模式有一个动态变化过程,当激光开始振荡时,基模半径一般远小于板条介质的半厚度,随着热透镜的加剧,基模光斑半径迅速变

小。随着抽运能量的积累,腔镜上和板条介质内光束半径下降,振荡光基模光斑半径减小到一定程度后将产生高阶模,发散角增加,致使输出功率上升;振荡光基模光斑半径达到最小值时,此时输出功率也将达到最大值,继续抽运,当腔镜上光斑半径降至很小时,由于衍射作用,振荡光基模光斑半径反而增大,增大到一定时候,高阶模式减少以至被抑制,最终仅剩基模振荡,输出功率又急剧下降,热透镜的加剧到一定程度谐振腔进入非稳状态,基模光斑半径等于介质半厚度是从稳腔向非稳腔转变的关节点,意味着衍射损失急剧增大,最终可使激光振荡停止^[9~13]。

5 结 论

对千瓦级激光二极管面阵抽运的固体热容激光器进行了理论计算与实验研究,系统地分析了在热容工作条件下双侧面对称抽运的Nd:YAG单板条和双板条串接激光器在一定的工作时间内激光输出特性,并分别采用单板条和双板条串接的热容激光器进行了实验验证,理论与实验符合得较好。对进一步设计更高输出功率的热容激光器具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- 1 Rotter M. D., Brent Dane C.. Solid-state Heat-capacity-laser Review[R]. www.llnl.gov/tid/lof/documents/pdf/245418.pdf

- 2 Brent Dane C. World's Most Powerful Solid-State Laser [R]. www.llnl.gov/str/October02/Dane.html
- 3 Bright future for tactical laser weapons. www.llnl.gov/str/April02/Dane.html
- 4 Mark D. Rotter, C. Brent Dane, S. A. Gonzales *et al.*. The solid-state heat-capacity laser [R]. www.llnl.gov/tid/lof/documents/pdf/245418.pdf
- 5 Albrecht G. F., Sutton S. B., Geroge E. V. *et al.*. Solid state heat capacity disk laser [J]. *Laser and Particle Beams*, 1998, **16**(4): 605~625
- 6 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Jiahua. *Theory of Laser* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996. 138~139 (in Chinese)
周炳琨,高以智,陈家骅. 激光原理[M]. 北京:国防工业出版社,1996. 138~139
- 7 Du Geguo. Discussion of laser material doping concentration [J]. *Laser and Infrared*, 2000, **30**(1): 58~60 (in Chinese)
杜戈果. 激光介质掺杂浓度浅议 [J]. 激光与红外, 2000, **30**(1): 58~60
- 8 Kocchner W. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang transl.. *Solid-State Laser Engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2002. 40~42 (in Chinese)
W. 克希耐尔 著. 孙文, 江泽文, 程国祥 译. 固体激光工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 40~42
- 9 Comsdkey B., Moran B. D., Albrecht G. F. *et al.*. Characterization of the heat loading of Nd-doped YAG, YOS, YLF and GGG excited at diode pumping wavelengths [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1995, **31**(7): 1261~1264
- 10 Zhenyu Yao, Jianfeng Jiang, Bo Tu. 550-W diode-pumped Nd:YAG disk laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(11): 647~649
- 11 Song Feng, Ding Xin, Zhang Chaobo *et al.*. Dips of output power curve of LD pumped Nd:YVO₄ [J]. *Chin. J. Lasers*, 2001, **A28**(11): 974~976 (in Chinese)
宋峰,丁欣,张潮波等. LD抽运Nd:YVO₄平行平面腔激光器中的激光输出功率凹陷 [J]. 中国激光, 2001, **A28**(11): 974~976
- 12 Wang Tao, Fan Dianyuan. Dynamics study for high power laser amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(4): 468~473 (in Chinese)
王韬,范滇元. 高功率激光放大器动力学的理论研究 [J]. 光学学报, 1999, **19**(4): 468~473
- 13 Zhao Changming, Wei Guanghui. An investigation on improvement of the beam quality of high average power solid-state lasers [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1997, **24**(5): 50~58 (in Chinese)
赵长明,魏光辉. 改善高平均功率固体激光器光束质量的研究 [J]. 光电工程, 1997, **24**(5): 50~58