

文章编号: 0258-7025(2007)01-0045-05

热畸变对单板条热容激光器输出的影响

李劲东, 郭明秀, 复文强, 姜本学, 胡企铨, 施翔春

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 开展了激光二极管(LD)抽运的全固态热容激光器的理论与实验研究,数值模拟了在热容工作条件下侧面抽运的 Nd:YAG 板条激光器的热透镜效应,分析了热透镜效应对激光输出的影响,并进行了相应的实验论证。实验中采用的晶体尺寸为 57 mm×40 mm×4 mm,激光二极管阵列的抽运峰值功率为 12 kW,重复频率为 1 kHz,占空比为 20%,为了获得较高的增益,将抽运光通过光学系统进行聚焦,抽运光在晶体侧面的光斑大小为 15 mm×57 mm。实验中观察了 1 s 内的脉冲能量输出的波动情况,在开始工作的时候单脉冲能量输出为 1 J,在 1 s 后单脉冲能量输出下降到开始的 50%。

关键词 激光器;瞬态热畸变分析;激光二极管阵列;侧抽运

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Thermal Distortion Influence on Single-Slab Heat Capacity Laser Output

LI Jin-dong, GUO Ming-xiu, FU Wen-qiang,
JIANG Ben-xue, HU Qi-quan, SHI Xiang-chun

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

Abstract Experimental and theoretical studies of a laser diode (LD) array pumped solid-state heat capacity laser (SSHCL) were reported. The thermal lens effect of heat capacity slab Nd:YAG laser under side pumped condition was calculated, and the influence of the thermal lens effect on the output energy fluctuation of the SSHCL was studied. In experiment, slab crystal size is 57 mm×40 mm×4 mm, peak pumped power of the LD array is 12 kW with 1 kHz repetitive frequency and 20% duty ratio. In order to obtain high laser gain, the pump beams were focused as small as 15 mm×57 mm spot in profile. In the experimental examination, the output of single pulse energy was 1 J at the beginning, after 1 s operation it fell down to 50%.

Key words laser; transient thermal distortion analysis; laser diode array; side pumped

1 引言

热效应是限制传统激光器获得高平均功率的主要原因,20 世纪 90 年代美国利弗莫尔国家实验室提出热容激光器的新概念^[1],这是一个获得高输出功率、高光束质量的新途径。热容工作方式和传统工作方式的主要区别在于热容方式在工作时介质是不冷却的,当工作介质温度升高到一定程度后停止工作再进行冷却。由于在工作过程中不对工作介质进行冷却,介质内部产生的温度梯度比较小,同时其

产生的热应力也比较小,这样就减小了晶体内的热畸变,有利于获得更好的光束质量^[2]。此外,采用不对工作介质进行冷却的方式还能保证晶体表面温度高于晶体内部,这样在表面产生的是压应力,而不是传统激光器运行时的张应力^[3]。激光增益介质压应力的破坏阈值是张应力的 5 倍以上^[4],不但降低了介质材料破坏的可能性,同时也降低了对工作介质的表面光洁度的要求^[1]。这种冷却过程和工作过程分离的方式使得热容激光器比传统激光器能输出更高的功率,目前已经获得了 30 kW 的输出^[2],更高功

收稿日期:2006-05-23;收到修改稿日期:2006-08-17

作者简介:李劲东(1978—),男,吉林省白城市人,博士研究生,主要从事大功率高重复频率固体激光技术的研究。
E-mail:trampingnow@hotmail.com

导师简介:胡企铨(1942—),男,苏州人,研究员,博士生导师,主要从事大功率高重复频率固体激光技术方面的研究。
E-mail:qqhu@mail.shcnc.ac.cn

率的兆瓦、兆焦耳级的热容激光输出也将成为可能^[1]。

在热容工作方式下,由于在工作期间激光介质不冷却,晶体并不能达到一种平衡的工作状态,使得谐振腔同时也处于一种动态变化的过程中,这就会影响到激光输出能量的稳定性^[5]。而激光二极管(LD)抽运的不均匀性以及增益介质内废热的积累将造成在工作过程中光束质量变差和能量的下降^[2,6]。因此,为了能够在热容工作状态下获得稳定的激光输出,有必要研究在激光器工作期间固体增益介质热畸变对激光输出的影响。

2 理论分析

激光器输出稳定性与谐振腔在工作中的状态有很大关系。热容激光器在工作过程中,由于热量的积累,激光晶体温度分布不断变化,因而导致热应力分布的变化,温度与热应力分布的变化一起导致固体增益介质热透镜焦距的变化。

从热传导和热应力方程出发,求得晶体内瞬态温度场和应力场的分布,然后根据光弹性效应得出晶体内折射率的分布,进而求得晶体热透镜焦距与时间的关系,为实验提供了理论依据。最终,在实验上观测了热容板条激光器输出能量在1 s内的波动情况。

2.1 温度场分布

实验中采用的晶体为Nd:YAG板条,取向如图1所示, z 方向长度为57 mm, x 方向宽度为40 mm, y 方向厚度为4 mm。激光二极管阵列的平均抽运功率为2.4 kW,抽运光在晶体侧面的光斑大小为15 mm×57 mm,工作时间为1 s,晶体处在绝

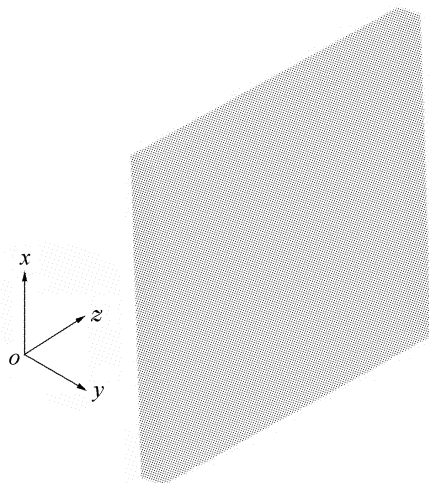


图1 晶体取向坐标

Fig.1 Coordinate of the slab

热状态下。

热传导公式及其边界条件为^[7]

$$\rho c \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v, \quad (1)$$

$$T(x, y, z; 0) = 300, \quad (2)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_c(T - T_{\text{out}}), \quad (3)$$

式(1)中 ρ 为材料的密度, c 为材料热容, k 为导热系数, T 为温度, q_v 为单位体积热功率。式(2)为初始条件,晶体的初始温度为室温20℃。式(3)为晶体表面与外界存在对流的边界条件,实验晶体不采取冷却措施。通过以上初始条件,使用ANSYS软件计算得到晶体工作1 s内的温度场的变化,图2为1 s时晶体内的温度分布。图3为晶体内沿 x 轴的温度分布,由于抽运功率主要集中在晶体的中间部位,从曲线可以看出中间的温度明显高于晶体边缘的温度,这个方向是温度梯度最大的方向,也是热透镜效应最明显的方向,是对实验中激光输出影响最大的方向。图4为晶体内沿 y 轴的温度分布,从图4可以看出晶体表面吸收的功率较多,使表面温度略高于晶体内部,但是由于晶体厚度仅为4 mm,并且晶体

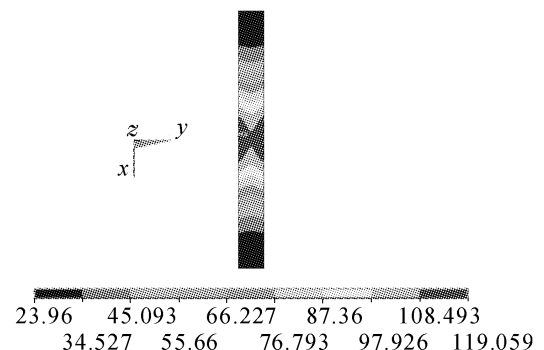


图2 晶体内温度分布的截面图(1 s时)

Fig.2 Temperature distribution in the laser slab (at 1 s)

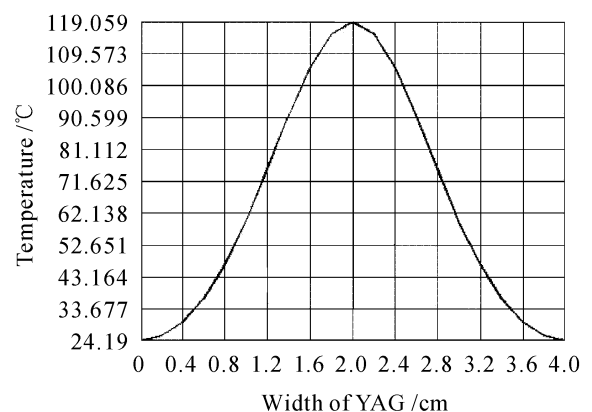
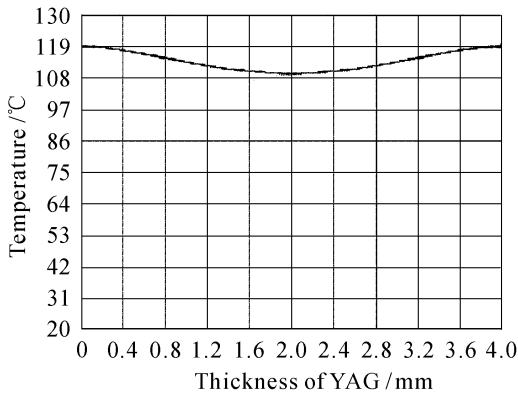


图3 沿 x 轴晶体内的温度分布曲线(1 s时)

Fig.3 Temperature distribution in the laser slab along x axis (at 1 s)

图 4 沿 y 轴晶体内的温度分布曲线(1 s 时)Fig. 4 Temperature distribution in the laser slab along y axis (at 1 s)

的导热系数比较高,所以在这个方向上晶体的温度梯度并不是很大,故在热应力和热透镜的计算中暂且忽略 y 方向的影响。

2.2 应力场分布

由于抽运光在晶体内呈非均匀吸收,导致晶体内部温度分布不均匀,使得晶体内部存在热应力。热应变及热应力公式为^[8]

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= 0, \\ \sigma_{yy} &= \frac{E\alpha}{1-\nu}T'(x), \\ \sigma_{zz} &= \sigma_{yy},\end{aligned}\quad (4)$$

式中 $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ 分别为 x, y, z 方向的应力, E 为弹性模量, α 为泊松比, $T'(x)$ 为温度分布。

通过以上公式及边界条件和平衡方程可求得晶体内部 1 s 后的热应力分布如图 5 所示。

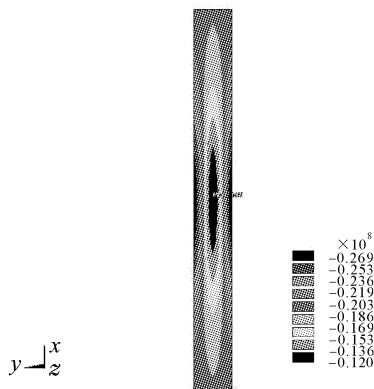
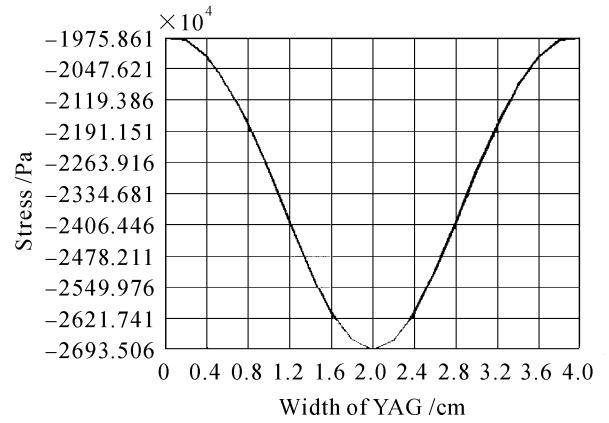


图 5 晶体内部应力分布的截面图(1 s 时)

Fig. 5 Stress distribution in the laser slab (at 1 s)

图 6 为晶体表面 x 方向应力分布曲线,从图 6 中可以看出,在工作 1 s 后晶体表面中间部位压应力最大达到 269 kg/cm^2 ,小于晶体的应力极限 $1800 \sim 2100 \text{ kg/cm}^2$,仅为极限的 15%。

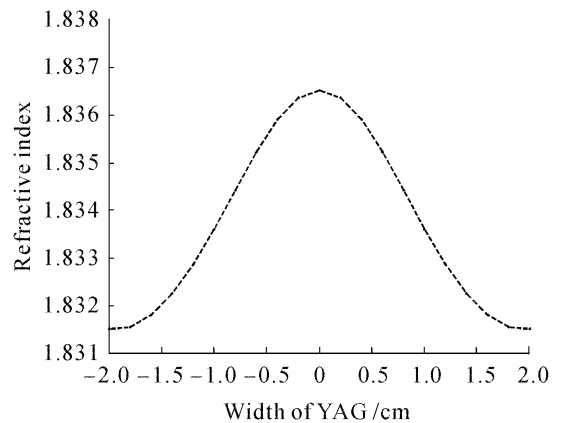
图 6 沿 x 轴晶体内的应力分布曲线(1 s 时)Fig. 6 Stress distribution in the laser slab along x axis (at 1 s)

2.3 折射率分布

通过以上求得的热应力和温度可进一步求得折射率分布,公式为^[8]

$$\begin{aligned}n_{xx} &= n + \frac{dn}{dT}T'(x) + B_{\perp} \sigma_{zz} + B_{\parallel} \sigma_{xx}, \\ n_{yy} &= n + \frac{dn}{dT}T'(x) + B_{\perp} (\sigma_{zz} + \sigma_{xx}), \\ B_{\perp} &= 0.34 \times 10^{12} / \text{Pa}, \\ B_{\parallel} &= -0.91 \times 10^{12} / \text{Pa}^{[9]},\end{aligned}\quad (5)$$

其中 dn/dT 为 YAG 折射率温度系数,通过温度和应力曲线和式(3)可求得晶体内部折射率的分布如图 7。

图 7 沿 x 轴晶体内的折射率分布曲线(1 s 以后)Fig. 7 Refractive index distribution in the laser slab along x axis (after 1 s)

平行光通过具有图 7 折射率分布的材料来模拟热透镜效应,光路如图 8 所示,通过对整个过程的模拟可以得到热焦距与工作时间的关系如图 9,从图 9 中可以看到在 0.2 s 之后热焦距已经接近腔长,等到 1 s 以后可以看到热透镜的焦点已经在谐振腔

内部了。这时谐振腔由稳腔变成非稳腔,将导致激光输出功率的明显下降^[10]。

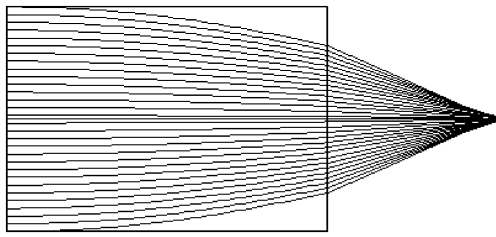


图 8 光线追踪图

Fig. 8 Calculated light distribution

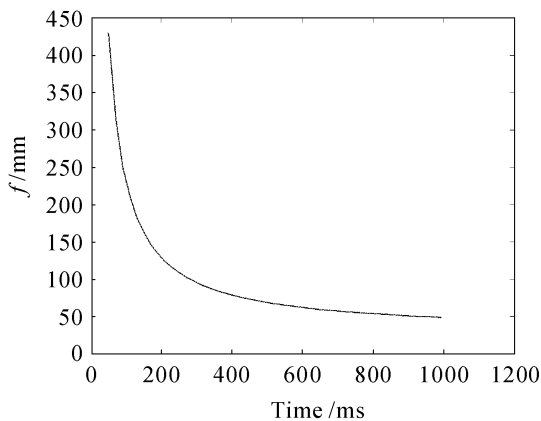


图 9 热焦距与工作时间的关系

Fig. 9 Dependence of focus length on the time

3 实 验

实验采用侧抽运方式,激光器结构如图 10 所示,其中 M_1 为全反镜, M_2 为耦合输出镜。为了提高抽运功率密度,采用柱面镜 LEN 对带有微柱镜的激光二极管阵列快轴进行压缩。当采用平-平腔,输出镜透过率为 30%,重复频率为 10 Hz,工作电流 100 A 时,单脉冲输出能量为 1 J。当重复频率为 1 kHz,工作电流为 100 A 时,工作时间 1 s 中脉冲能

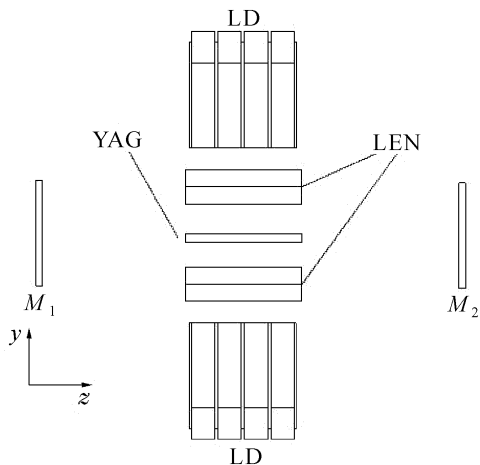


图 10 激光器结构示意图

Fig. 10 Configuration of laser system

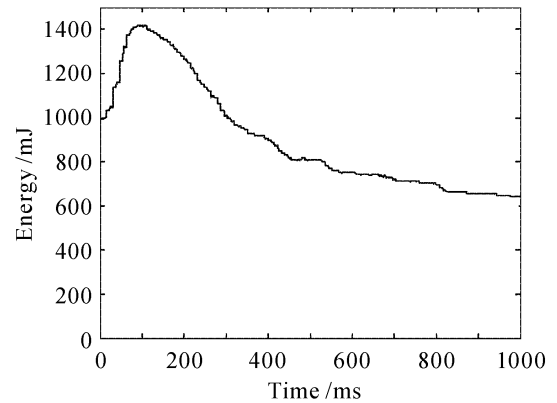


图 11 输出能量变化图(1 s 内)

Fig. 11 Dependence of output energy on the time (in 1 s)

量输出波动如图 11 所示。从图 11 中可以看到在工作的开始阶段脉冲能量是上升的,这是由于开始的时候热透镜的焦距长于谐振腔,这时激光器工作在稳腔状态下,随着工作时间的增加,热透镜焦距逐渐变短。当热焦距短于腔长时,激光器处于非稳腔状态,能量输出降低^[10],在工作结束时,能量输出降低到初始状态的 60%。

4 结 论

报道了重复频率 1 kHz,单脉冲能量 1 J,输出功率千瓦级的全固态热容激光器,并对其温度和应力做了详细的理论计算,得到了热透镜焦距与时间的关系,找到了功率下降的主要原因,对进一步设计更高输出功率的热容激光器具有指导意义。

参 考 文 献

- 1 G. F. Albrecht, S. B. Sutton, E. V. George *et al.*. Solid state heat capacity disk laser [J]. *Laser and Particle Beams*, 1998, **16**(4):605~625
- 2 Mark D. Rotter, C. Brent Dane, Scott Fochs *et al.*. Solid-state heat-capacity lasers: Good candidates for the marketplace [J]. *Photonics Spectra*, 2004, **38**(8):44~56
- 3 George F. Albrecht, Steven B. Sutton, E. V. George *et al.*. The heat capacity disk laser [C]. *SPIE*, 1998, **3343**:661~666
- 4 Jin Feng, Zhou Dingfu. High power solid-state heat capacity laser development [J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(5):534~538
金 锋,周鼎富. 高功率固体热容激光器[J]. *激光技术*, 2004, **28**(5):534~538
- 5 Xie Wu, Yu Jianhua, Bi Chen *et al.*. Thermal-lens effect and influence on laser output and stability of resonator in the all-solid-state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(Suppl.):70~73
谢 武,余建华,毕 成等. 全固态激光器热透镜效应及其对激光输出和腔稳定性的影响[J]. *中国激光*, 2006, **33**(增刊):70~73
- 6 Hu Hao, Jiang Jianfeng, Tu Bo *et al.*. Numerical simulation of

- laser characteristics for heat capacity laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11):1485~1488
- 胡浩,蒋建峰,涂波等. 热容激光器激光输出特性的数值模拟[J]. *中国激光*, 2005, **32**(11):1485~1488
- 7 Yuan Xiaodong, Jiang Xinying, Cao Dingxiang *et al.*. Theoretical research on output performance of laser resonator at heat capacity model [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(Suppl.): 93~97
- 袁晓东,蒋新颖,曹丁象等. 热容模式下谐振腔输出特性的理论研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(增刊):93~97
- 8 J. M. Eggleston, T. J. Kane, K. Kuhn *et al.*. The slab geometry laser—part 1: theory [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1984, **QE-20**(3):289~301
- 9 Thomas J. Kane, Jone M. Eggleston, Robert L. Byer *et al.*. The slab geometry laser—part 2: thermal effects in a finite slab [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1984, **QE-20**(3):1195~1210
- 10 Liu Junbai, Lu Jianren, Lu Junhua *et al.*. Thermal lens determination of end pumped solid-state laser by a simple direct approach [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 1999, **16**(3):181~183

欢迎成为《中国光学期刊网》企业会员

为进一步提高服务水平,中国光学期刊网从2006年起在信息服务上实行会员制度,凡光电子、激光、光通信等相关的企业均可申请成为中国光学期刊网的企业会员,中国光学期刊网将为企业会员提供优质超值的专业服务。

一、会员企业享受的服务包括:

- 1) 企业名称在中国光学期刊网首页的“会员企业”栏目中出现,并链接到企业自己的网址。
- 2) 会员企业可获赠光学类期刊一份,全年12册,请在《中国激光》、《光学学报》、《激光与光电子学进展》和 *Chinese Optics Letters* 中任选一种。
- 3) 可免费在本站“特别推荐”栏目发布文字信息(含广告)10条,每篇不过2000字。
- 4) 如在中国光学期刊网发布广告,可享受广告报价的80%优惠。
- 5) 优先或免费参加光学期刊网组织的各类学术和业务活动。
- 6) 可免费阅读本网站期刊全文300篇次。

二、会员义务:

1. 注册时向中国光学期刊网递交企业真实信息。
2. 每年交纳会员费2800元,会员资格从交费之日起计算,一年内有效。
3. 不得将中国光学期刊网提供给会员的信息转给第三方使用。
4. 尊重并保护本网及论文作者的知识产权。
5. 在本网发布信息必须遵守中华人民共和国相关法律法规。

三、成为企业会员的步骤:

- ① 注册成为中国光学期刊网的一般用户,也可以直接填写广告投放申请表,说明您的意向。
- ② 来信至 mail@opticsjournal.net 告知您已经注册成功。并请告知选择何种期刊及收刊地址、联系人。
- ③ 银行汇款2800元至下列帐户:
开户行:工商银行上海嘉定支行营业部 户名:中国科学院上海光学精密机械研究所
帐号:1001700809026400195
- ④ 联系人:郑继承; 电话:021-69918253; Email: expert@mail.siom.ac.cn

