

# 一种测量二极管侧面抽运固体激光器热焦距的方法<sup>\*</sup>

耿爱丛<sup>1)†</sup> 赵 慈<sup>1)</sup> 薄 勇<sup>2)</sup> 鲁远甫<sup>2)</sup> 许祖彦<sup>2)</sup>

1) 北京工商大学数理系, 北京 100037)

2) 中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190)

(2008 年 1 月 22 日收到, 2008 年 5 月 16 日收到修改稿)

提出了一种能够简单、准确测量二极管侧面抽运固体激光器热透镜焦距的方法, 明确提出采用非对称平平腔测量时, 激光晶体端面与腔镜的间距不需要为零, 并从实验上证明了方法的可靠性. 应用该方法的测量结果可以优化复合折叠和频黄光激光器的结构, 保证两束基频在腔内达到最佳的空间重合, 提高腔内和频效率.

关键词: 全固态激光器, Nd:YAG 激光器, 热焦距, 腔内和频

PACC: 4255R, 4260B, 4260D, 4265M

## 1. 引言

Nd:YAG 晶体的 1064 nm 和 1319 nm 谱线通过和频能够产生与钠 D2 线共振的谱线, 二极管抽运(LD)的 Nd:YAG 全固态激光器与染料激光器相比, 具有高效率、高平均功率、长寿命等优点, 因此成为国际上黄光激光器技术研究的热点之一. 目前国际上已经开展了大量的研究, 例如, MIT Lincoln 实验室采用两台分别产生 1064 nm 和 1319 nm 的 Nd:YAG 调 Q + 锁模激光器和频的方法, 在实验室获得平均功率 8—10 W 589 nm 激光输出<sup>[1,2]</sup>. Air Force Research 实验室采用种子注入锁定 + 外腔和频的方法, 得到了 20 W 589 nm 的激光输出<sup>[3]</sup>. 但是这些激光器的结构都很复杂, 为此本实验组提出了双 Nd:YAG 棒串接复合折叠腔腔内 KTP 和频方案<sup>[4-7]</sup>, 该方案的优点在于激光器的结构简单, 易于调节, 目前已获得腔内和频最高 589 nm 黄光输出功率. 但是在以上的报道中, 只论述了 1064 nm 激光和 1319 nm 激光在腔内的空间重合和功率配比的优化问题.

对于双 Nd:YAG 棒串接复合折叠腔黄光激光器, 提高腔内和频效率的关键技术是 1064 nm 和 1319 nm 两束激光在空间上高度重合. 为此, 需要首先准确测定激光介质的热焦距, 然后优化设计激光腔结构, 保证 1064 nm 和 1319 nm 激光的抽运功率同

时升到最大时, 两束激光的光腰位置和光腰半径都相同. 因此, 本文介绍了一种简单且准确测定激光介质热焦距的方法, 并测得了不同运转条件下 1064 nm 和 1319 nm 激光介质的热焦距, 为优化复合折叠腔奠定了基础.

## 2. 优化理论

首先分析热透镜效应的产生机理, 在大功率激光抽运下, 激光棒内的热沉积将导致激光棒内温度分布不均、热应力和受热形变现象, 因而产生热透镜效应, 热焦距可表示为<sup>[8]</sup>

$$f = \frac{KA}{P_d} \left( \frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + n_0^3 \alpha C_r + \frac{\alpha r_0 (n_0 - 1)}{L} \right)^{-1}, \quad (1)$$

其中,  $K$  表示导热率,  $A$  是激光棒的截面面积,  $P_d$  是激光棒吸收的总热量,  $dn/dT$  表示折射率的温度梯度,  $\alpha$  为热膨胀系数,  $C_r$  和  $C_\phi$  分别对应径向和切向情况的常数, 是材料光弹系数的函数,  $r_0$  表示激光棒的半径,  $n_0$  表示激光棒中心的折射率.

实践证明热透镜效应作为腔设计中一个不确定因素, 对腔内模式分布影响很大. 激光介质热透镜效应的存在可能导致冷腔状态下处于稳区的谐振腔移至非稳区. 从(1)式可以看出, 激光棒的热焦距是诸多因子共同作用的结果, 仅  $P_d$  就与激光棒吸收系

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 60508013)、北京市教育委员会科技计划项目和北京工商大学教改项目(批准号: JG075219)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: aicong\_77@126.com

数、抽运功率、聚光效率、冷却液的热交换系数等因素有着直接联系,而这些量又无法确切地测量,可见采用理论计算的方法不能准确反映热焦距这一特性,因此通常采用实验方法测量激光介质热透镜焦距.

通常测量热透镜焦距的实验方法有探测光束法<sup>[9-11]</sup>、相干测量法<sup>[12,13]</sup>、非稳腔法<sup>[14]</sup>、横模拍频法<sup>[15]</sup>、利用光斑半径、发散角和热焦距的关系式间接测量<sup>[16]</sup>等,但是这些方法主要针对端面抽运固体激光器,此时激光介质体积小,长度可以忽略.对于 LD 侧面抽运的固体激光器而言,激光介质通常很长,再使用薄透镜模型近似处理,误差很大.对于 LD 侧面抽运固体激光器而言,必须考虑激光介质的长度,其中实用易行、精确度高的界稳腔法得到了广泛应用<sup>[17,18]</sup>,但是传统的测量采用对称平平腔,调节步骤较复杂,因此,采用非对称平平腔进行测量更具可操作性,虽然这种方法已应用于端面抽运固体激光器中<sup>[18]</sup>,但是,对于 LD 侧面抽运固体激光器,激光晶体端面与腔镜间距一般不为零,因此,我们提出了一种利用非对称平平腔测量 LD 侧面抽运固体激光晶体热透镜焦距的方法,并在实验上验证了该方法的简便性和可靠性.

如图 1(a)所示,一个激光谐振腔的稳定性条件可以用它的等价  $g$  参数来表示<sup>[19]</sup>,即

$$g_1 = 1 - \frac{L_2}{f} - \frac{L'}{R_1}, \quad (2)$$

$$g_2 = 1 - \frac{L_1}{f} - \frac{L'}{R_2}, \quad (3)$$

其中

$$L' = L_1 + L_2 - \frac{L_1 L_2}{f}, \quad (4)$$

式中  $f$  表示激光介质的热透镜焦距,  $R_{1,2}$  分别表示两个腔镜的曲率半径,  $L_{1,2}$  分别表示两个腔臂长度,当激光介质长度可以忽略时,  $L_1 = x_1$ ,  $L_2 = x_2$ . 如图 1(a)所示,  $x_{1,2}$  分别表示两个腔镜到激光介质端面的距离. 若采用对称平平谐振腔,每个腔镜的曲率半径为无限大,则谐振腔的稳定条件可表示为

$$0 < g_1 g_2 = \left(1 - \frac{x_1}{f}\right) \left(1 - \frac{x_2}{f}\right) < 1. \quad (5)$$

对于一根长度为  $l$  的 LD 侧面抽运激光介质,可等效为一个薄透镜加上一段折射率为  $n_0$  的各向同性介质,透镜的主面  $h$  从激光介质端面算起,如图 1(b)所示,图中  $L_1$ ,  $L_2$  分别表示两腔镜到薄透镜即到激光介质主面的距离. 当透镜焦距很长时,可

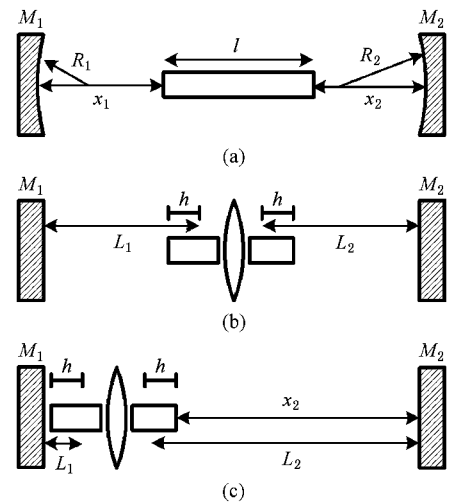


图 1 (a) 含有长度为  $l$  的激光介质、总腔长为  $x_1 + x_2 + l$  的激光腔示意图;(b) 激光介质被各向同性介质和薄透镜替代的对称平平谐振腔示意图;(c) 激光介质被各向同性介质和薄透镜替代的非对称平平谐振腔示意图

认为主面位置与热透镜焦距无关,即

$$h = \frac{l}{2n_0}. \quad (6)$$

考虑了激光介质的长度以后,有

$$L_1 = x_1 + h, L_2 = x_2 + h, \quad (7)$$

则谐振腔的稳定条件可表示为

$$0 < g_1 g_2 = \left(1 - \frac{L_1}{f}\right) \left(1 - \frac{L_2}{f}\right) < 1. \quad (8)$$

从(8)式可以看出,谐振腔的稳定条件只取决于热透镜焦距( $f$ )和激光腔长( $x_1 + x_2 + l$ ). 对于对称平平腔,当腔内透镜的焦距满足式  $f = L_1 = L_2$  时,激光腔处于临界状态,从而测得最短热焦距<sup>[17]</sup>,但是,对称腔的调整精度要求较高,不易于操作.

对于非对称平平腔,如图 1(c)所示,即  $L_1 \neq L_2$ ,通过理论计算可知,随着热透镜效应的逐渐增强,谐振腔的稳定曲线从  $g_1 \cdot g_2 = 1$  过渡为

$$g_1 \cdot g_2 = 0. \quad (9)$$

因此,保证  $g_1$  为小于 1 的正数时,即当  $L_1$  小于  $L_2$  并且小于  $f$  的前提下,只需  $g_2$  为正数,即只需满足  $L_2 < f$  的条件,谐振腔就稳定. 随着热透镜焦距的逐渐缩短,当  $g_2 = 0$  即  $L_2 = f$  时,谐振腔为界稳腔;当  $L_2 > f$  时,谐振腔变为非稳腔. 随着 LD 抽运功率的增加,激光介质热透镜效应越来越严重,谐振腔一旦变为非稳腔,激光将终止振荡,此时激光介质产生的热透镜焦距就等于  $L_2$ . 因此对于非对称平

平腔,界稳腔的条件被简化为

$$1 - \frac{L_2}{f} = 0. \quad (10)$$

由上述分析可以得出结论:利用非对称平平腔测量热透镜焦距时, $L_1$ 的取值只要保证 $g_1$ 为小于1的正数即可,而无需取接近于0的值.若用 $x_2$ 表示腔镜 $M_2$ 与激光介质端面之间的距离,如图1(c)所示,激光终止振荡时的抽运功率对应的热透镜焦距为

$$f = L_2 = x_2 + \frac{l}{2n_0}. \quad (11)$$

该理论的优点在于测定不同运转条件下的热透镜焦距时,激光头与腔镜 $M_1$ 的位置都不变,只需改变腔镜 $M_2$ 的位置即可.从原理上讲,并无任何近似,即精确度丝毫没有降低,但从实验方法上讲,操作简便,节省时间,更具实用性.

### 3. 实验结果与讨论

实验中,采用双Nd:YAG棒串接复合折叠腔腔内KTP和频方案,详细的激光器结构介绍见文献[5—7].选用四个相同的激光头(美国CEO公司),每个激光头包括9个最大输出功率为20 W的激光二极管阵列和一个Nd:YAG圆棒,激光棒长 $l = 65$  mm,直径 $\phi = 3$  mm,折射率 $n_0 = 1.82$ ,Nd掺杂浓度为1.0%,二极管阵列从侧面三向对称抽运Nd:YAG棒.激光头1和激光头2中的Nd:YAG棒双面镀1064 nm高透膜,而激光头3和激光头4中的Nd:YAG棒双面镀1319 nm高透膜.理论上已知:在相同的LD抽运功率下,1319 nm激光头中Nd:YAG激光棒产生的热透镜焦距较短.分析其原因:同样是808 nm抽运的Nd:YAG激光棒,其产生1064 nm激光时的量子亏损(即斯托克斯频移)是24%,而产生1319 nm激光时的量子亏损为39%.所以在同样的LD抽运功率下,1064 nm激光辐射时在Nd:YAG晶体中产生的总热量小于1319 nm激光辐射时产生的热量,因而1319 nm激光头中Nd:YAG激光棒产生的热透镜焦距较短.为了将1319 nm激光头中Nd:YAG激光棒的热透镜效应降至最低,在实验中首先选用同一根激光棒测试四个激光头的光光转换效率,选出两个输出功率较高的激光头产生1319 nm激光.

为了测定激光介质热透镜焦距,实验中选用非

对称平平腔,将腔镜 $M_1$ 与激光棒端面距离 $x_1$ 固定在50 mm,只需精确测量腔镜 $M_2$ 与激光棒端面之间的距离 $x_2$ ,将 $x_2$ 以及激光棒的长度 $l$ 值代入(11)式,通过计算便可以得到一个 $f$ 值.而后通过实验测量该焦距对应的808 nm抽运功率,逐渐增大LD功率,激光棒产生的热透镜效应逐渐增强,在这一过程中,红外激光输出功率首先逐渐增大,当LD功率加至某一值时,激光输出突然降至零,则该抽运功率对应的激光棒热焦距就等于利用理论计算得到的 $f$ .

为了验证理论的可靠性,在实验中,我们还分别采用对称平平腔和非对称平平腔方法,通过改变激光腔的腔长,对于同一激光头中同一根镀有1319 nm增透膜Nd:YAG激光棒,测定了其不同抽运功率下的热透镜焦距,实验结果如图2所示.从图中可以看出,无论是在低抽运功率下,还是在高抽运功率下,两种实验方法得到的结果均一致.可见,非对称平平腔同样适用于测定LD侧面抽运激光晶体的热透镜焦距,且精确度丝毫没有降低,但实验上更具有可操作性.

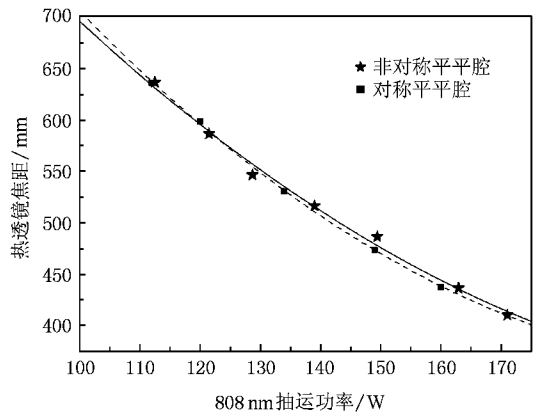


图2 分别采用对称和非对称平平腔测定的1319 nm激光头中激光棒的热透镜焦距

接着,我们固定腔镜 $M_2$ 与激光棒端面间距 $x_2 = 482$  mm,即 $L_2 = 500$  mm,只改变腔镜 $M_1$ 与激光棒端面间距 $x_1$ ,并且保证 $x_1$ 始终小于 $x_2$ ,对1064 nm激光头的热透镜焦距进行了测量.实验发现,虽然腔镜 $M_1$ 与激光棒端面间距不同,但是当808 nm抽运功率增加为170 W时,激光输出功率均突然降至零.将实验测得的 $x_2$ 以及激光棒的长度 $l$ 值代入(11)式,即可获得稳定谐振腔对应的最短热透镜焦距.实验结果如图3所示,其中 $L_1 \left( = x_1 + \frac{l}{2n_0} \right)$ 意

义同图1,五次测量中  $x_1$  分别取 50 mm,150 mm,250 mm,350 mm 和 450 mm,由测量结果拟合的直线斜率为 0.001,截距为 500 mm,五次测量的标准偏差小于 2 mm,这说明五种情况下 170 W 抽运功率对应的激光棒的热焦距均为 500 mm. 因此,只要  $L_1$  取小于  $L_2$  的任意值,热透镜焦距就满足(11)式,与上述理论结论一致. 值得说明的是,此时 808 nm 抽运功率为 170 W,对应的 LD 的抽运电流已高达 24 A,这说明该方法适用于测量大功率 LD 侧面抽运固体激光器.

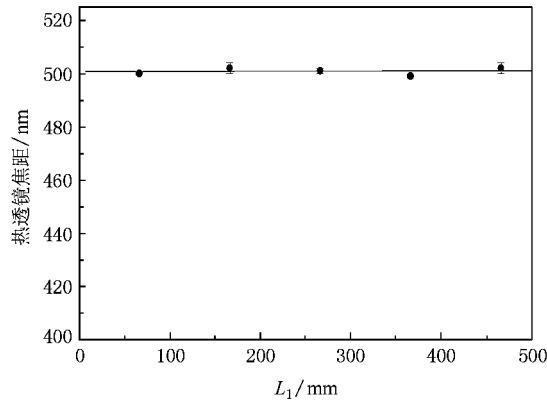


图 3 当  $L_2 = 500$  mm 时,改变腔镜  $M_1$  与激光棒端面间距,测得的稳定腔中 1064 nm 激光棒的最短热透镜焦距

另外,在不同抽运条件下,热透镜大小不同,相当于在腔内插入了一个可变的透镜,固体激光器谐振腔只在某段抽运区域内稳定. 因此实验中固定  $L_1$  的值,即激光头与腔镜  $M_1$  的位置都不变,只需不断改变腔镜  $M_2$  的位置,即可从实验中测得一系列红外激光输出功率降为零时对应的抽运功率,从而得到不同抽运功率下的热透镜焦距,实验结果如图 4 所示. 依据该结果,通过优化复合折叠腔的结构参数,使得最终设计的激光腔满足以下条件:当抽运功率达到最大时,和频晶体 KTP 上 1064 nm 和 1319 nm 两束基频光的光斑空间分布达到高度重合,同时两束激光的功率满足最佳的和频配比关系,

从而不但提高了和频效率,并且优化了输出黄光的光束质量<sup>[5-7]</sup>. 分析提高和频效率的根本原因,是因为两基频激光器中 Nd:YAG 晶体的热焦距被精确测得 4.8 W,  $M^2 = 4.6$  黄激光的获得更加证明了图 4 所示数据的正确性<sup>[7]</sup>,也证实了上述非对称平平腔测定 LD 侧面抽运激光晶体热透镜焦距的可靠性.

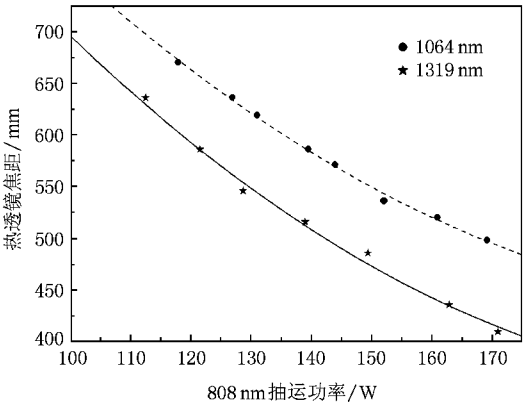


图 4 1064 nm 和 1319 nm 激光头中 Nd:YAG 激光棒在不同抽运功率下的热透镜焦距

4. 结 论

本文简化了 LD 侧泵固体激光器热透镜焦距的测量步骤,并保证测量精度未改变. 值得强调的是:对于腔内和频激光器而言,若 1064 nm 和 1319 nm 激光介质的热透镜焦距测量不准确,不但和频晶体的最佳位置不能确定,并且两束基频光的光腰不会重合,从而将大大降低和频效率. 使用上述方法简单准确地测定激光介质热焦距以后,即可通过 ABCD 传播矩阵和稳定腔谐振条件,优化复合折叠腔的结构参数. 另外,系列抽运功率下对应的激光介质热透镜焦距的测得,又为优化和频晶体上 1064 nm 和 1319 nm 两束激光的功率配比奠定了基础. 最后,在实验中得到了 4.8 W,  $M^2 = 4.6$  的高功率高光束质量黄光输出.

[ 1 ] Jeys T H , Brailove A A , Mooradian A 1989 *Appl. Opt.* **28** 2588

[ 2 ] Ge J , Jacobsen B P , Ange J R P *et al* 1998 *Proc. SPIE* **3353** 242

[ 3 ] Joshua C B 2003 *Opt. Lett.* **28** 2219

[ 4 ] Bi Y , Sun Z P , Zhang Y *et al* 2003 *Chinese J. Lasers* **30** 440 ( in Chinese ) [ 毕 勇、孙志培、张 颖等 2003 中国激光 **30** 440 ]

[ 5 ] Geng A C , Bo Y , Yang X D *et al* 2005 *Opt. Commun.* **255** 248

[ 6 ] Geng A C , Bo Y , Bi Y *et al* 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5227 ( in Chinese ) [ 耿爱丛、薄 勇、毕 勇等 2006 物理学报 **55** 5227 ]

[ 7 ] Bo Y , Geng A C , Lu Y F *et al* 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 1494

[ 8 ] Koechner W , Bass M 2003 *Solid-state Laser* ( New York : Springer-

- verlag ) p257
- [ 9 ] Koechner W 1970 *Appl. Opt.* **9** 2548
- [ 10 ] Kortz H P , Ihländer R , Weber H 1981 *Appl. Opt.* **20** 4124
- [ 11 ] Driedger K P , Krause W , Weber H 1986 *Opt. Commun.* **57** 403
- [ 12 ] Omat su T , Kato Y , Shimosegawa W *et al* 1995 *Opt. Commun.* **118** 302
- [ 13 ] Tidwell S C , Seamans J F , Bowers M S *et al* 1992 *IEEE J. Quantum Electron* **28** 997
- [ 14 ] Liu J H , Lu J R , Lu J H *et al* 1999 *Chin Phys Lett.* **16** 181
- [ 15 ] Ozygus B , Zhang Q C 1997 *Appl. Phys. Lett.* **71** 2590
- [ 16 ] Guo R X , Li F Q , Xie C D *et al* 2001 *Chinese J. Lasers A* **28** 721 ( in Chinese ) 郭蕊香、李凤琴、谢常德等 2001 中国激光 A **28** 721 ]
- [ 17 ] Lancaster D G , Dawes J M 1998 *Opt. Laser Technol.* **30** 103
- [ 18 ] Song F , Zhang C B , Ding X *et al* 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 2145
- [ 19 ] Lü B D 1992 *Laser optics-laser beam propagation and beam quality control* ( Chengdu : Sichuan University Press ) ( in Chinese ) [ 吕百达 1992 激光光学-激光光束的传输变换和光束质量控制( 成都 : 四川大学出版社 ) ]

## A method for measuring thermal focal length of LD-side-pumped laser crystal \*

Geng Ai-Cong<sup>1)†</sup> Zhao Ci<sup>1)</sup> Bo Yong<sup>2)</sup> Lu Yuan-Fu<sup>2)</sup> Xu Zu-Yan<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Department of Mathematics and Physics , Beijing Technology and Business University , Beijing 100037 , China )

<sup>2)</sup> Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics , Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100190 , China )

( Received 22 January 2008 ; revised manuscript received 16 May 2008 )

### Abstract

This paper reports a simple and accurate method for measuring thermal focal length of LD-side-pumped laser crystal . While applying the nonsymmetrical plane-plane-cavity to measure the thermal focal length , the distance from the end of the laser crystal to the end mirror need not be zero , and the reliability of this method is proved by experiments . Based on the obtained measurement results , folding configuration oscillators of yellow laser for intracavity sum frequency can be optimized , which ensures high space overlapping of two fundamental beams and high sum frequency efficiency .

**Keywords :** all-solid-state laser , Nd:YAG laser , thermal focal length , intracavity sum frequency

**PACC :** 4255R , 4260B , 4260D , 4265M

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60508013 ) , the Scientific Research Common Program of Beijing Municipal Commission of Education and the Teaching Innovation Program of Beijing Technology and Bussiness University ( Grant No. JG075219 ) .

† E-mail : aicong\_77@126.com