

文章编号: 0258-7025(2009)06-1327-05

环形腔高脉冲能量 $2\ \mu\text{m}$ 激光器

乔 亮 侯 霞 陈卫标

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)

摘要 报道了激光二极管侧面抽运 $\text{Tm, Ho} : \text{LuLF}$ 晶体 $2\ \mu\text{m}$ 脉冲激光器。采用环形腔结构, 理论计算了腔型参数, 主要确定了束腰位置和大小, 便于在腔内插入调 Q 等器件。三方向对称侧面抽运方式, 具有更好的抽运均匀性, 为获得高能量的激光输出提供保障。在自由运转模式下, 脉冲重复频率 $1\ \text{Hz}$, 抽运能量 $3.25\ \text{J}$, 获得输出激光单脉冲能量为 $114\ \text{mJ}$, 光光转换效率为 3.5% , 系统斜率效率为 8.0% 。插入声光调 Q , 对应抽运能量 $2.75\ \text{J}$ 时, 获得调 Q 激光输出 $35\ \text{mJ}$, 脉冲宽度约 $700\ \text{ns}$ 。

关键词 激光器; 脉冲能量; 环形腔; $\text{Tm, Ho} : \text{LuLF}$ 晶体; 侧面抽运

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093606.1327

High Pulse Power $2\ \mu\text{m}$ Ring Laser

Qiao Liang Hou Xia Chen Weibiao

(Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Shanghai 201800, China)

Abstract Experimental results of laser diode lateral-pumped $\text{Tm, Ho} : \text{LuLF}$ crystal $2\text{-}\mu\text{m}$ ring laser is reported. Using a ring cavity of six mirrors, the beam waist and diameter are determined after theoretically calculating the cavity parameters. And it is convenient for inserting Q -switch in the cavity. Three-direction lateral-pumping is implied for the better pumping homogeneity and getting high pulse energy laser. In the free running mode, when the pumping energy is $3.25\ \text{J}$, and the pulse repetition frequency is $1\ \text{Hz}$ the maximum laser energy is $114\ \text{mJ}$ per pulse with the optical efficiency of 3.5% and the slope efficiency of 8.0% in the system. In the Q -switched mode, when the pumping energy is $2.75\ \text{J}$, 35-mJ Q -switched laser with pulse duration of about $700\ \text{ns}$ is obtained.

Key words lasers; pulse power; ring cavity; $\text{Tm, Ho} : \text{LuLF}$ crystal; lateral-pump

1 引 言

$2\ \mu\text{m}$ 波长的激光具有良好的大气穿透性, 同时又处于人眼安全波段的范围内, 在激光遥感方面有着重要的应用前景^[1,2]。例如相干多普勒测风雷达 (CDWL) 和二氧化碳差分吸收雷达 (DIALs) 能够高精度地测量出对流层风场轮廓和二氧化碳垂直轮廓。这类雷达系统中关键因素之一是需要有一套人眼安全波段的高脉冲能量单频激光发射器^[3,4]。铥离子对抽运光的吸收较强; 而钬离子虽然对抽运光吸收相对弱, 但是具有较大的增益。通过双掺的方式, 可以充分利用铥、钬离子的优点。Vikas Sudesh 等^[5]的研究结果证明, 在低重频室温条件下,

$\text{Tm} : \text{Ho} : \text{LuLF}$ 晶体具有较好的激光性能。2006 年, Jirong Yu 等^[6]采用此种晶体利用主振荡能量放大技术 (Master-oscillator-power-amplifier, MOPA), 获得了单脉冲能量 $1.1\ \text{J}$ 的 $2053\ \text{nm}$ 激光输出。在国内, 哈尔滨工业大学自 2001 年, 就开展了 $\text{Tm} : \text{Ho} : \text{YLF}$ 晶体获得 $2\ \mu\text{m}$ 激光的研究^[7~9]; 2007 年, 北京理工大学利用 $\text{Tm} : \text{YAG}$ 获得了 $4.04\ \text{W}$ 连续 $2.018\ \mu\text{m}$ 的激光^[10]。

本文介绍了激光二极管三向侧面抽运 $\text{Tm, Ho} : \text{LuLiF}$ 的结构, 并进行环形腔的设计。开展正常运转和调 Q 方面的初步试验研究, 得到了试验结果。

收稿日期: 2008-09-09; **收到修改稿日期**: 2008-10-23

作者简介: 乔 亮 (1981—), 女, 博士研究生, 主要从事全固态激光器等方面的研究。E-mail: qiaoliang@siom.ac.cn

导师简介: 陈卫标 (1969—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光遥感技术等方面的研究。

E-mail: wbchen@mail.shcnc.ac.cn

2 谐振腔设计

2.1 谐振腔参数设计

相干多普勒测风雷达需要单频运转的高脉冲能量激光光源。环形腔为行波腔,因此可以避免“空间烧孔”效应,再利用种子注入或其他纵模手段,能够更有效地实现单纵模输出^[11]。对于相干激光雷达,激光器的线宽与速度测量精度直接相关,有意延长激光器的脉冲宽度对减小激光器线宽是有利的。

基于以上需要,选用6镜环形腔,环形腔的稳定性分析设计一般通过ABCD传输矩阵获得^[12]。腔结构示意图如图1所示。环形腔由两个球面反射镜和4个平面反射镜组成。两个曲面镜的作用是在腔内产生两个高斯光束束腰。这样,将激光晶体棒置于束腰处时,使得增益介质内的模体积相对均匀和对称。而另一个束腰处,便于插入声光Q开关等光学器件,在插入声光开关时,能够更有效地实现调Q。图1中1,2号镜为大曲率半径的高反射镜,3,4,5,6号镜为平面反射镜,其中6号镜作输出耦合镜。抽取环形腔,以便得出对应的ABCD矩阵。设1号镜和2号镜之间的臂长为 L_2 ,由2号镜走正Z方向到达晶体的左端臂长为 L_3 ,激光棒长设为 t ,

2号镜沿正Z方向到达1号镜的距离为 L_1 ,则总的腔长为 L_1+L_2 ,参考面选在1号镜与晶体右端面之间,距离晶体右端面距离为 z 。这样谐振腔等效成如图2所示的等效透镜波导图。

其环绕矩阵写为

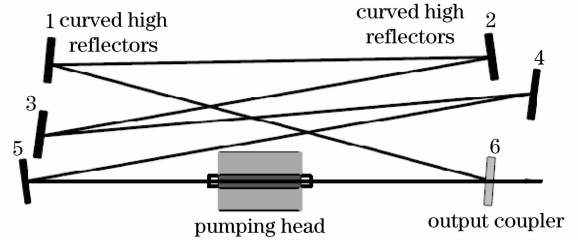


图1 环形腔结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the laser ring resonator

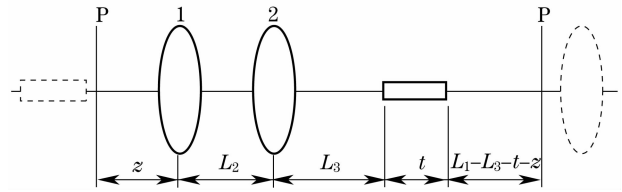


图2 谐振腔等效透镜波导图

Fig. 2 Equivalent schematic diagram of the laser ring resonator

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_i} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_i} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{t}{n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 - L_3 - t - z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

我们将矩阵改写为

$$\begin{cases} A(z) = mz + A_0 \\ B(z) = mz^2 + nz + B_0 \\ C = C_0 \\ D(z) = -mz + D_0. \end{cases} \quad (2)$$

这样可求得各个表达式

$$A(z) = mz + A_0 = \frac{z(2fn - nL_2)}{f^2 n} + \frac{f^2 n + 2f(-1+n)t - fnL_2 - (-1+n)tL_2 + nL_1(-2f + L_2)}{f^2 n}, \quad (3)$$

$$B(z) = mz^2 + nz + B_0 = \frac{z^2(2fn - nL_2)}{f^2 n} + \frac{z[2f(n-1)t - 2fnL_1 + (1-n)tL_2 + nL_1L_2] + f^2(t - nt) + f^2nL_1 + f^2nL_2 + f(-1+n)tL_2 - fnL_1L_2}{f^2 n}, \quad (4)$$

$$C = C_0 = \frac{-2f + L_2}{f^2}, \quad (5)$$

$$D(z) = -mz + D_0 = \frac{z(-2f + L_2)}{f^2} + \frac{f^2 - fL_2}{f^2}, \quad (6)$$

由(3)~(6)式可推导出光腰位置

$$z = -\frac{A_0 - D_0}{2C_0}, \quad (7)$$

该光腰的共焦参数

$$Z_0^2 = \sqrt{\frac{B(z)}{-C_0}}. \quad (8)$$

将(3),(5),(6)式代入(7)式,可以得出

$$z = \frac{t + nL_2 - nt}{2n}. \quad (9)$$

将(4)、(5)代入(8)式,得到共焦参数为

$$Z_0^2 = -\left(\frac{-nt + t + nL_1}{2n}\right) + \frac{f^2(t - nt) + f^2nL_1 + f^2nL_2 + f(-1 + n)tL_2 - fnL_1L_2}{\frac{f^2n}{2f - L_2}}. \quad (10)$$

光腰与共焦参数的关系式表示为

$$w_0^2 = \frac{\lambda}{\pi} Z_0. \quad (11)$$

根据稳定性条件,即共焦参数大于零,为了确保长腔长,选 $L_2 = 2200$ mm,计算共焦参数的情况。从图 3 可以看出,所设定的 L_1, f 变化范围内,都符合稳定性条件。

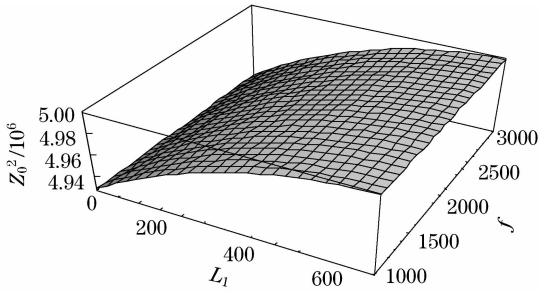


图 3 共焦参数随 L_1 和透镜焦距 f 的变化

Fig. 3 Confocal parameter versus L_1 and focal length f

由(9)式可以看出,束腰位置几乎处于腔中心处。在晶体长度 $t = 20$ mm 时,得到 5 号镜和 6 号镜之间的束腰变化情况,如图 4 所示。最终所采用的环形腔,晶体处束腰约为 1.18 mm。另一处束腰处在 L_2 臂中间的位置,约为 0.91 mm。确定了束腰位置和大小,便于在腔内插入调 Q 器件,和调 Q 器件口径的选取。

2.2 抽运结构设计

为了获得高的脉冲能量和均匀抽运,采用了三向侧面抽运结构,如图 5 所示。激光介质为 Tm, Ho: LuLF 晶体, Tm, Ho 掺杂原子数分数分别为 5%, 0.5%。沿 a 轴为通光方向切割的圆棒,尺寸为 $\phi 4$ mm \times 20 mm。晶体棒两端粘有铜制棒套,固定时卡住两端棒套即可。晶体棒放置在玻璃套管内,其中的空间以供冷却水直接接触棒进行循环冷却至 16 °C。玻璃套管外侧放置在镀金腔内,这样被晶体吸收的抽运光,可被镀金腔内表面反射回去,再次

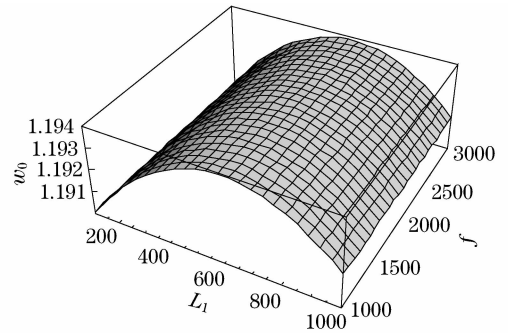


图 4 光腰随 L_1 长度和透镜焦距 f 的变化

Fig. 4 Waist versus L_1 and focal length f

利用。三面抽运光的导入,是利用三组柱透镜组,每组柱透镜组中曲率 R32.06 的柱透镜用来整形激光二极管阵列(LDA)慢轴, R18.03 的柱透镜压缩快轴。每组 LDA 由 15 bar 组成,单 bar 峰值功率 100 W,脉宽 1 ms,因此三组 LDA 能够提供的最大单脉冲能量为 4.5 J, LDA 最高可以工作在 10 Hz 重复频率下。中心波长为 792 nm,光谱宽为 2.8 nm (半峰全宽)。LDA 是从美国 Nlight 公司购置。三组 LDA 直接固定在特制的不锈钢通水板上,用循环水冷却至室温。

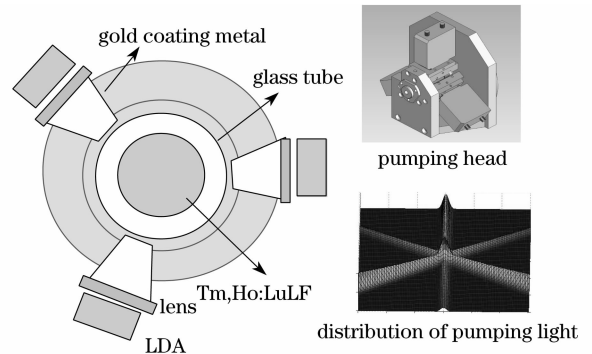


图 5 抽运结构设计和激光棒的抽运光强分布
Fig. 5 Design of diode pump configuration and distribution of pumping light

3 实验与结果

为了验证抽运头(包括三组 LDA 和激光棒)的设计效果,进行了直线平-平腔的试验验证。腔长 330 mm,得到了不同耦合输出率下的一组输出能量值,如图 6 所示。在输出耦合率为 20% 时,得到了最高的斜率效率 12%。可以看出,抽运头的设计是有效的。并且,在直腔侧面抽运结构中,这个斜率效率是相当可观的。

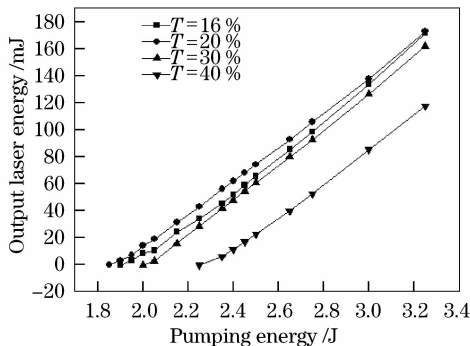


图 6 不同耦合输出率下,输出激光能量与抽运能量的关系

Fig. 6 Output laser pulse energy versus pump energy under different output couplers

同时,对抽运头的热焦距进行了测量。利用高斯光束经过薄透镜的变换方法,在抽运光能量约为 3.3 J,脉冲重复频率(PFR)为 10 Hz 下,测量计算得到热透镜焦距为 -2.3 m。由于 $T_m, Ho: LuLF$ 晶体的 dn/dt 是负值^[13],说明它随着温度的升高,而产生负透镜的效应,因此这个测量结果是与理论分析相匹配的。为日后优化改进抽运头结构和冷却方式提供理论储备。在接下来的激光试验中,是在 PFR 1 Hz 下进行的,而 1 Hz 抽运下,并没有测量到明显的热透镜效应。因此在腔设计时,没有考虑补偿热透镜效应。

根据第 2 节的环形腔设计参数,进行了环形腔激光器的实验研究。由于种子激光器尚在研制阶段,本实验还没有实现种子注入,因此激光器输出是两个方向的,能量测量值按照一个方向计算。环形腔的腔长约为 2.6 m,输出耦合透过率为 20%。在自由运转时,激光输出能量与抽运能量的关系见图 7。在抽运能量 3.25 J,单向输出脉冲能量为 114.95 mJ,对应的光光转换效率为 3.53%,系统斜率效率为 8.02%。如果实现单向输出,则整个光光转换效率要增加一倍,这在种子注入状态是可以实现的。

声光调 Q 选用古奇·休斯古公司 QS027-4H-AP1 型声光 Q 开关器件,声光材料是红外级的熔融石英,两端面镀抗反膜,反射率小于 0.2% @

2050 nm。当抽运能量为 2.75 J 时,得到调 Q 脉冲激光能量 35.7 mJ,对应的光光转换效率 1.29%。动静比接近 50%。对应的激光脉宽为 698 ns,如图 8 所示。

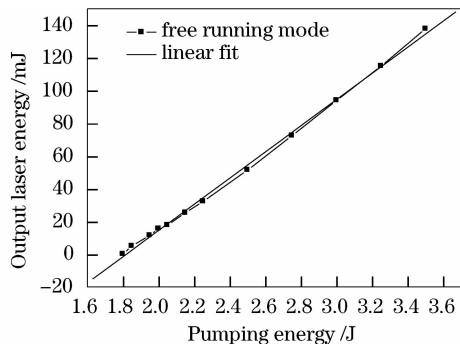


图 7 输出激光脉冲能量与抽运能量的关系

Fig. 7 Output laser pulse energy under different pump energies

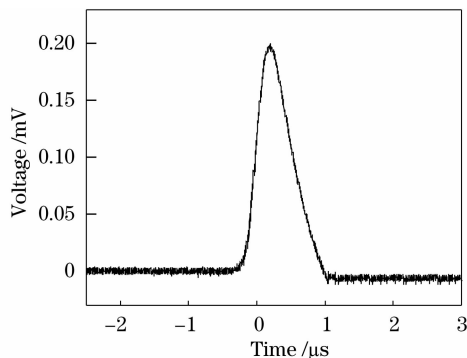


图 8 调 Q 激光脉冲波形图

Fig. 8 Q-switched pulse of the output laser

目前,激光器的整体效率偏低,主要是在非种子注入下,没有对环形腔进行单向抑制,由于环形腔的特点,激光输出是两个方向的,两个方向输出能量的大小基本相等。这里只取一个方向输出激光的能量,即只有一半能量被利用,这样进行效率的估算,必然偏低。另外,插入声光器件后,得到调 Q 脉冲动静比接近 50% 的结果,与目前国际上相应的结果 55% 相比^[6],比较理想。但是考虑调 Q 脉冲能量与抽运注入能量的关系,仍然是光效率低,这除了未对环形腔进行单向抑制外,对调 Q 的输出耦合透过率没有进行优化设计,这对整体效率必然产生影响。同时为了保护器件,未注入高的抽运能量,因此也得不到高的输出激光能量。这都是今后工作中需要继续完成的任务。

4 结 论

为了满足相干多普勒测风激光雷达对发射源的

要求,确定了环形腔的结构,便于外加种子注入。理论计算了环形腔腔型参数,采用 LDA 三向侧面抽运的方式, $\text{Tm, Ho} : \text{LuLF}$ 晶体作为激光介质,实现了较高脉冲能量 $2\ \mu\text{m}$ 激光的输出。环形腔自由运转时,抽运注入能量 3.25 J 时,获得输出脉冲能量 114 mJ,光光转换效率 3.5%,系统斜率效率为 8.0%。同时初步进行了调 Q 部分的实验,抽运注入能量 2.75 J 时,得到 35 mJ,脉宽 698 ns 的调 Q 激光,基本得到所需要的长脉宽脉冲激光。若能实现种子注入,令环形腔单向运转,不但可以提高能量转换效率,得到高脉冲能量输出,还将实现对激光纵模的控制,得到单频激光。这将为研制的相干激光雷达提供理想的光源。

参 考 文 献

- Zhao Yuanyuan, Hou Xia, Chen Weibiao. Research and progress of $2\ \mu\text{m}$ all-solid-state laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(6): 20~24
赵媛媛,侯 霞,陈卫标. $2\ \mu\text{m}$ 全固态激光器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(6): 20~24
- Feng Yutong, Meng Junqing, Chen Weibiao. Research development of eye-safe all-solid-state lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(10): 33~38
冯宇彤,孟俊清,陈卫标. 人眼安全全固态激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(10): 33~38
- Wang Zhenguo, Zhang Yunjun, Shao Xiaowei *et al.*. Short-term frequency stability measurement of $2\ \mu\text{m}$ $\text{Tm, Ho} : \text{YLF}$ microchip laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s1): 38~40
王振国,张云军,邵晓巍 等. $2\ \mu\text{m}$ $\text{Tm, Ho} : \text{YLF}$ 微片激光器短期频率稳定度的检测[J]. *中国激光*, 2008, **35**(s1): 38~40
- Ju Youlun, Wang Zhenguo, Wang Lei *et al.*. Short-term frequency instability measurement of $2\ \mu\text{m}$ single longitudinal-mode laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2164~2168
鞠有伦,王振国,王 磊 等. $2\ \mu\text{m}$ 单纵模激光频率短期不稳定度的测量[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2164~2168
- Vikas Sudesh, Kazuhiro Asai. Spectroscopic and diode-pumped-laser properties of $\text{Tm, Ho} : \text{YLF}$; $\text{Tm, Ho} : \text{LuLF}$; and $\text{Tm, Ho} : \text{LuAG}$ crystals: a comparative study[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(9): 1829~1837
- Jirong Yu, Bo C. Trieu, Ed A. Modlin *et al.*. 1 J/pulse Q-switched $2\ \mu\text{m}$ solid-state laser[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(4): 462~464
- Yu Zhandong. Research of $2\ \mu\text{m}$ Tm, Ho Solid Laser [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2001
于占东. $2\ \mu\text{m}$ Tm, Ho 固体激光的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001
- Wang Zhengguo, Ju Youlun, Li Yufeng *et al.*. Injection-locking $2\ \mu\text{m}$ solid-state laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s1): 17~20
王振国,鞠有伦,李玉峰 等. $2\ \mu\text{m}$ 固体激光器的注入锁定[J]. *中国激光*, 2008, **35**(s1): 17~20
- Wu Chunting, Ju Youlun, Wang Zhenguo *et al.*. Laser diode-pumped $\text{Tm, Ho} : \text{YLF}$ single-frequency laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 815~818
吴春婷,鞠有伦,王振国 等. 激光二极管抽运的 $\text{Tm, Ho} : \text{YLF}$ 单模激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 815~818
- Lin Zhifeng, Gao Mingwei, Gao Chunqing. Experimental investigation of laser diode end pump $\text{Tm} : \text{YAG}$ laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 181~185
林志峰,高明伟,高春清. 激光二极管端面抽运 $\text{Tm} : \text{YAG}$ 激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 181~185
- Walter Koehner. Solid-State Laser Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. 225
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 225
- Lu Yaxiong, Yang Yapei, Chen Shufen. Laser Transmission and Transform Technology [M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Publishing House, 1999. 161~164
卢亚雄,杨亚培,陈淑芬. 激光束传输与变换技术[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1999. 161~164
- R. L. Aggarwal, D. J. Ripin, J. R. Ochoa *et al.*. Measurement of thermo-optic properties of $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, YAlO_3 , LiYF_4 , LiLuF_4 , BaY_2F_8 , $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$, and $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ laser crystals in the 80 - 300 K temperature range [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **98**: 103514