

文章编号: 1001-3806(2008)04-0380-03

## 高重复声光调 Q 掠入射激光器的掠入射角度优化

何发红, 黄磊, 巩马理\*, 柳强, 王琦, 闫兴鹏

(清华大学精密仪器系光子与电子技术研究中心, 北京 100084)

**摘要:** 为了实现高重复频率声光调 Q 运转, 通过分析掠入射激光器中的等效抽运光模式, 对掠入射激光器的掠入射角度进行了优化, 获得重复频率大于 2MHz 的声光调 Q TEM<sub>00</sub> 基模的实验输出。理论分析和实验结果表明, 掠入射激光器存在一个优化的掠入射角度可以获得尽量小的抽运光模式横截面积, 有利于激光器获得高增益和实现高重复运转。

**关键词:** 激光技术; 高重复频率; 声光调 Q; 掠入射

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A

## Optimization of grazing-incidence angle in high repetition rate acousto-optical Q-switched grazing-incidence lasers

HE Fa-hong, HUANG Lei, GONG Ma-li, LIU Qiang, WANG Qi, YAN Xing-peng

(Center for Photonics and Electronics, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing, 100084 China)

**Abstract:** The grazing-incidence angle in grazing-incidence lasers was optimized for high repetition rate acousto-optical Q-switch by calculating the equivalent pump mode cross-section area. High repetition rate ( $> 2\text{MHz}$ ) acousto-optically Q-switched TEM<sub>00</sub> output was obtained. It is shown from the results that there is an optimum grazing-incidence angle which is beneficial to high repetition rate operation in grazing-incidence laser.

**Key words:** laser technique; high repetition rate; acousto-optically Q-switched; grazing-incidence

### 引言

二极管抽运的固体激光器在科研、工业和军事应用上都具有非常重要的用途<sup>[1]</sup>。掠入射激光器<sup>[2]</sup>是一种二极管侧面抽运的固体激光器, 它采用强吸收晶体作为增益介质, 利用激光在抽运面上的全反射来优化侧面抽运结构的模式匹配。英国的 DAMZEN 等人使用掠入射激光器获得了 650kHz 的高重复声光调 Q 运转<sup>[3]</sup>。作者开展了使用掠入射激光器获得更高重复频率运转的研究。缩小抽运光模式横截面积可以提高激光器的增益, 有利于实现高重复<sup>[4]</sup>。掠入射激光器中, 抽运光模式受抽运光分布和掠入射角度的影响。因此, 作者仔细计算了掠入射激光器中抽运光的分布和晶体对抽运光的吸收, 考虑掠入射角度的影响计算了等效抽运光模式。根据计算结果得出的优化掠入射角度, 可以获得尽量小的抽运光模式横截面积, 据此设计的高重复激光器声光调 Q 输出的重复频率可以达到 2MHz 以上。

作者简介: 何发红 (1981-), 男, 博士, 现主要从事高光束质量固体激光器的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: gongml@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2007-05-07; 收到修改稿日期: 2007-09-18

### 1 理论模型

掠入射激光器结构如图 1 所示<sup>[5]</sup>。图 1 中的 X-

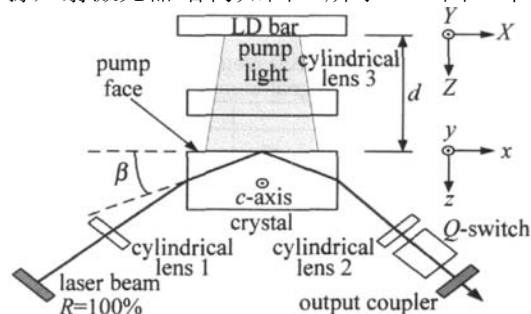


Fig 1 Top view of grazing-incidence laser

Y-Z 坐标系原点取在 LD bar 发光面的中心; x-y-z 坐标系原点取在晶体的抽运面的中心。Y(y) 轴方向为竖直方向。晶体大小为 20mm(x) × 2mm(y) × 5mm(z), 抽运面尺寸为 20mm × 2mm。通过尺寸为 20mm × 5mm 的两个面进行散热。抽运源为 CS 封装的含快轴准直的二极管激光器, 发光部分为 LD bar<sup>[5]</sup>。用 d 表示 LD 和晶体的抽运面之间的距离。抽运光为 TM 偏振。抽运光经过柱面镜 3 (具有 y 方向的焦距, 为 12.7mm) 聚焦之后, 会聚在晶体的抽运面上, 形成一个线状的抽运区域, 然后被晶体吸收, 在晶体内部形成一定深度的增益区域。

激光和抽运面之间的夹角称为掠入射角 (见图 1 中的  $\beta$ )。掠入射激光器在竖直方向的热效应较强<sup>[6]</sup>, 为实现稳定运行, 采用两个腔内的柱面镜 (1 和 2, 竖直方向焦距为 50mm) 和抽运柱面镜 3 配合实现竖直方向的模式匹配<sup>[5]</sup>。因此, 竖直方向抽运光模式尺寸大小可调, 也容易实现基模输出。 $Z(z)$ 轴方向是抽运光的传播方向, 并且和激光束方向存在夹角, 因此水平方向的抽运光模式特性较为复杂。端面抽运激光器中可以通过研究抽运面上的抽运光半径来近似研究抽运光模式<sup>[7-8]</sup>。掠入射激光器中由于掠入射角度的存在, 所以, 需要进行计算才能够得出激光横截面积内抽运光的分布情况。为此, 沿激光光路把晶体内部吸收的抽运功率密度累加起来, 就可在激光的横截面内得到整个吸收抽运功率密度的分布, 把这个分布定义为等效抽运光模式, 可近似地研究抽运光模式。

假设 LD bar 由一定数目的发射椭圆高斯光的发光点组成<sup>[9]</sup>, 每个点的发出的抽运光光束传播特性可以描述如下<sup>[10]</sup>:

$$w_x(Z) = w_{x0}^2 + \theta_x^2 Z^2, w_y(Z) = w_{y0}^2 + \theta_y^2 Z^2 \quad (1)$$

式中,  $w_x(Z)$  和  $w_y(Z)$  是光束的半径,  $w_{x0}$  和  $w_{y0}$  是发光点的光束束腰,  $\theta_x$  和  $\theta_y$  是发散角, 则抽运面上的抽运光强分布为<sup>[9]</sup> (括号后的下标表示坐标系):

$$I_0 = I(x, y, 0)_{xyz} = I(x, y, d)_{xyz} = \sum_i \left\{ \frac{2}{\pi w_x(d) w_y(d)} \frac{P}{n} \times \exp \left[ -2 \frac{(x - X_i)^2}{w_x^2(d)} \right] \times \exp \left[ -2 \frac{y^2}{w_y^2(d)} \right] \right\} \quad (2)$$

式中,  $P$  是 LD bar 的总的输出功率,  $n$  是发光点的数目,  $X_i$  是第  $i$  个发光点的横坐标。其中  $w_y(d) = 0.05\text{mm} \sim 0.15\text{mm}$ , 在实验中使用柱面镜 3 调节其具体大小。

因为晶体为强吸收材料, 所以吸收深度很小, 可以忽略晶体内部抽运光的发散角。当激光器的受激发射截面和提取效率很大时, 抽运光的吸收接近理想吸收<sup>[11-12]</sup>, 因此可以忽略吸收饱和现象。在  $x-y-z$  坐标系中, 晶体内部的吸收功率密度可表示如下<sup>[13]</sup>:

$$P_{\text{abs}}(x, y, z)_{xyz} = \alpha_0 I_0 \exp(-\alpha_0 z) \quad (3)$$

式中,  $\alpha_0$  是小信号吸收系数。

等效抽运光模式的计算方法如图 2 所示。为便于计算, 定义坐标系  $x'-y'-z'$ , 它和  $x-y-z$  坐标系共用一个原点 (抽运面的中心点), 其中  $x'$  轴平行于激光光路。

为简化计算, 把增益区对抽运面进行镜像。计算时, 需要考虑激光光束折叠带来的增益分配问题。如图 2 中的  $D$  点, 当激光沿  $-x$  轴方向传播时, 激光左侧的激光束  $I_1$  将从  $D$  点获得增益, 反射过来的激光  $I_2$  也

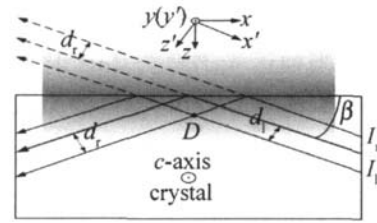


Fig 2 Calculation of equivalent pump mode

会从  $D$  点获得增益, 它们共同使用  $D$  点的反转粒子数。激光在腔内往返振荡, 因此可忽略激光到达该点的时间先后。该点的增益将近似按照经过  $D$  点激光的光强比进行分配。基模激光器中, 该光强比由激光基模高斯分布决定。在高功率下, 为减小热畸变和热致衍射损耗, 运转的激光基模模式半径是抽运模式半径的 0.7 倍 ~ 0.8 倍<sup>[14]</sup>。用  $\eta_m$  表示由基模激光模式决定的分配系数, 则等效抽运模式可以计算如下:

$$P_{\text{p, mode}}(y', z') = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \eta_m(x', y', z') P_{\text{abs}}(x', y', z') dx' \quad (4)$$

式中, 吸收功率密度分布在两个坐标系中的转换由下式决定:

$$P_{\text{abs}}(x', y', z')_{x'y'z'} = P_{\text{abs}}(x' \cos \beta - z' \sin \beta, y', x' \sin \beta + z' \cos \beta)_{xyz} \quad (5)$$

该过程可以采用数值迭代进行计算。根据 (4) 式计算出等效抽运光模式分布以后, 可使用 90/10 刀口法计算出模式半径<sup>[10]</sup>。发现竖直方向计算的等效抽运光模式半径等于抽运面上抽运光分布在竖直方向上的模式半径。水平方向的等效抽运光模式半径  $r_{p, -z}$  则受掠入射角度和吸收系数影响很大, 如图 3 所示 (未

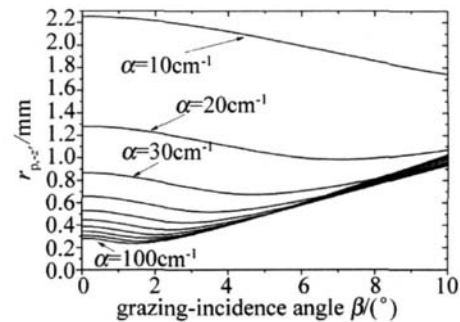


Fig 3 Calculated influence of grazing-incidence angle and small signal absorption coefficient on equivalent pump mode radius in the horizontal direction when  $d = 30\text{mm}$

考虑 0 掠入射角时的侧面抽运情况)。不同的掠入射角度下, 水平方向等效抽运光模式半径是不一样的, 但并非线性变化, 而是存在一个最小值, 定义对应最小值的掠入射角度为参考掠入射角度。当实际的掠入射角度大于参考掠入射角度时, 会增大抽运光的模式尺寸; 当实际的掠入射角度小于参考掠入射角度时, 不仅会增大抽运光的模式尺寸, 还会增大激光器的热效应<sup>[6]</sup>。因此, 激光器工作的掠入射角度小于参考掠入射角度有弊无利, 在一定范围内大于参考掠入射角度

是可以的,取决于实验者在热效应和腔型紧凑性之间的权衡。比如,当抽运光谱宽为  $2\text{nm}$  时,实测掺杂质量分数为  $0.011$  的  $\text{Nd:GdVO}_4$  和掺杂质量分数为  $0.011$  的  $\text{Nd:YVO}_4$  的峰值吸收系数约为  $22\text{cm}^{-1}$  和  $28\text{cm}^{-1}$ 。计算出它们的参考掠入射角度分别是  $6.5^\circ$  和  $5^\circ$ ,如图 4 所示。文献 [5] 和文献 [15] 中使用它们

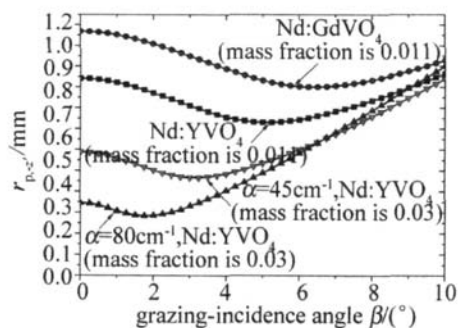


Fig 4 Calculation of optimum grazing-incidence angle

作为掠入射激光器的晶体时实际使用的角度是  $7.5^\circ$ ,也有研究者使用  $6^\circ$  作为掠入射角度<sup>[16]</sup>。不过作者的研究对象是高重频声光调  $Q$  激光器,所以最好工作在参考掠入射角度处。

## 2 实验结果

根据图 3,高吸收系数可以减小水平方向抽运光模式半径,所以作者使用了掺杂质量分数为  $0.03$  的  $\text{Nd:YVO}_4$  晶体作为高重频激光器的激光介质。根据实测掺杂质量分数为  $0.03$  的  $\text{Nd:YVO}_4$  晶体的吸收曲线,当晶体的吸收系数在  $45\text{cm}^{-1} \sim 80\text{cm}^{-1}$  之间浮动,计算出的参考掠入射角度在  $1.75^\circ \sim 3.25^\circ$  之间,如图 4 所示。最终的实验装置同样如图 1 所示。激光器实际工作时吸收系数实测在  $45\text{cm}^{-1} \sim 60\text{cm}^{-1}$  之间,实际使用的掠入射角度是  $2.8^\circ$ 。激光器的短臂腔长为  $62\text{mm}$ ,长臂腔长为  $190\text{mm}$ ,输出镜反射率为  $35\%$ 。在声光调  $Q$  方式下,最终获得了大于  $8\text{W}$  的基模高重频输出,最高重复频率达到了  $2\text{MHz}$  ( $2\text{MHz}$  时的脉冲波形如图 5 所示)。光束质量  $M^2$  因子小于  $1.4$  (使用 Spiricon  $M^2-200$  光束质量分析仪测量)。

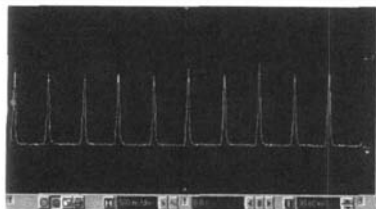


Fig 5 Pulse series at 2MHz

## 3 结论

研制了一个重复频率大于  $2\text{MHz}$  的声光调  $Q$  掠入

射激光器。研制过程中,为了提高增益以获得高重频,对掠入射激光器的掠入射角度进行了优化设计。理论计算了掠入射板条激光器中的等效抽运光模式,再使用  $90/10$  刀口法计算抽运模式尺寸,指出存在一个掠入射角度可以获得尽量小的抽运光模式横截面积。最后使用掺杂质量分数为  $0.03$  的  $\text{Nd:YVO}_4$  晶体时在  $2.8^\circ$  掠入射角度下获得了最佳输出。

## 参考文献

- [1] GUO Y X, GONG M L, XUE H Zh, *et al* Semi-circumferential LD arrays symmetrically pumped solid-state lasers [J]. Laser Technology, 2007, 31 (1): 1-3 (in Chinese).
- [2] BERNARD J E, ALCOCK A J. High-efficiency diode-pumped  $\text{Nd:YVO}_4$  slab laser [J]. Opt Lett, 1993, 18 (12): 968-970.
- [3] DAMZEN M J, TREW M, ROSASE, *et al* Continuous-wave  $\text{Nd:YVO}_4$  grazing-incidence laser with 22.5W output power and 64% conversion efficiency [J]. Opt Commun, 2001, 196: 237-241.
- [4] HE F H, HUANG L, CONG M L, *et al* Stable acousto-optics  $Q$ -switched  $\text{Nd:YVO}_4$  laser at 500kHz [J]. Laser Physics Letters, 2007, 4 (7): 511-514.
- [5] M NASSIAN A, THOMPSON B, DAMZEN M J. Ultrahigh-efficiency  $\text{TEM}_{00}$  diode-side-pumped  $\text{Nd:YVO}_4$  laser [J]. Appl Phys, 2003, B76 (4): 341-343.
- [6] BERMUDEZ G J C, PINTO-ROBLEDO V J, KIR'YANOV A V, *et al* The thermo-lensing effect in a grazing incidence, diode-side-pumped  $\text{Nd:YVO}_4$  laser [J]. Opt Commun, 2002, 210: 75-82.
- [7] HODGSON N, GRISWOLD K, JORDAN W, *et al* High power  $\text{TEM}_{00}$  mode operation of diode-pumped solid state lasers [J]. Proc SPIE, 1999, 4385: 119-131.
- [8] SHI P, LIL, GAN A Sh, *et al* Thermal effect research of  $\text{Nd}^{3+}$  doped laser crystals in end-pumped all-solid-state lasers [J]. Laser Technology, 2004, 28 (2): 177-180 (in Chinese).
- [9] ZEN IL G, CAMPOPANO S, CUTOLO A, *et al* Power semiconductor laser diode arrays characterization [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2003, 39 (2): 203-217.
- [10] HODGSON N, WEBER H. Laser resonators and beam propagation [M]. Berlin: Springer, 2005: 1-794.
- [11] LI Zh G, MOORE N, XIONG Z, *et al* Detailed investigation of thermal effects in longitudinally diode-pumped  $\text{Nd:YVO}_4$  lasers [J]. IEEE J Q E, 2003, 39 (8): 979-986.
- [12] SENNAROGU A. Determination of the stimulated-emission cross section in an end-pumped solid-state laser from laser-induced pump saturation data [J]. Opt Lett, 2001, 26 (8): 500-502.
- [13] KOECHNER W. Solid-state laser engineering [M]. Berlin: Springer, 1999: 388.
- [14] CHEN Y F, HUANG TM, KAO C F, *et al* Optimization in scaling fiber-coupled laser-diode end-pumped lasers to higher power: influence of thermal effect [J]. IEEE J Q E, 1997, 33 (8): 1424-1429.
- [15] M NASSIAN A, THOMPSON B A, SMITH G, *et al* High-power scaling ( $>100\text{W}$ ) of a diode-pumped  $\text{TEM}_{00}$   $\text{Nd:GdVO}_4$  laser system [J]. IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11 (3): 621-625.
- [16] DAMZEN M J, TREW M, ROSAS E, *et al* Continuous-wave  $\text{Nd:YVO}_4$  grazing-incidence laser with 22.5W output power and 64% conversion efficiency [J]. Opt Commun, 2001, 196: 237-241.