

文章编号: 0258-7025(2004)04-0395-04

列阵半导体激光端面抽运 Nd:YVO₄ 绿光 激光器的研究

王登顺, 李 港, 陈 檬, 宋海平

(北京工业大学北京市激光技术实验室, 北京 100022)

摘要 报道了采用列阵半导体激光端面抽运 Nd:YVO₄ 晶体的 KTP 腔内倍频绿光激光器。采用多柱透镜法, 对列阵半导体激光进行了有效整形, 并利用谐振腔折叠产生的像散, 实现了抽运光与振荡光较好的模式匹配; 由于是直接耦合抽运, 因此保证了半导体抽运光以 π 偏振光入射 Nd:YVO₄ (单轴) 晶体, 实现了半导体抽运光与 Nd:YVO₄ 吸收的偏振匹配。在抽运功率为 9.5 W 时, 得到 520 mW 的稳定绿光输出, 光-光转换效率为 5.5%。

关键词 激光技术; 列阵半导体激光器; 端面抽运; Nd:YVO₄ 晶体

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Study of Green Laser by Intracavity Frequency Doubling of a LD-Array Pumped Nd:YVO₄ Laser

WANG Deng-shun, LI Gang, CHEN Meng, SONG Hai-ping

(Lab of Laser Technology, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China)

Abstract CW stable output of 520 mW at 532 nm has been obtained by intracavity frequency doubling with KTP in a single axis crystal Nd:YVO₄ laser pumped by 9.5 W diode laser array. The optical-optical conversion efficiency is 5.5%. Polarization of LD is matched with polarizing absorption of Nd:YVO₄. The beam of the diode-array-laser is well shaped with cylindrical-lens-array. Good mode-matching is realized by using of cavity's astigmatism.

Key words laser technique; diode laser array; end-pumped; Nd:YVO₄ crystal

半导体激光(LD)抽运的全固化大功率激光器具有效率高、体积小、稳定性好和寿命长等优点,其中全固化大功率绿光激光器,在医疗卫生、潜卫通讯和大屏幕显示等领域有着重要的应用前景。随着半导体激光抽运技术的成熟与价格的下降,这一领域的研究得到了快速发展。

对于半导体激光抽运的全固化大功率绿光激光器,目前主要采用光纤耦合半导体激光端面抽运 Nd:YVO₄(Nd:YAG)/KTP 腔内倍频^[1]或半导体激光侧面抽运 Nd:YAG/KTP 的方法,这两种方法在技术上比较成熟^[2,3]。但是,关于采用大功率列阵半导体激光端面抽运的绿光激光器,尚存在一些问题,例如大功率列阵半导体激光的整形比较困难,很难

实现振荡光与抽运光的模式匹配等。本文采用了扩束系统,并有效利用了折叠腔的像散,得到了较好的模式匹配。

相对于常用的 Nd:YAG 来说, Nd:YVO₄ 晶体具有发射截面大、吸收带宽宽和输出为线偏振光等优点,近年来成为半导体抽运的全固态激光器中常用的激光晶体。考虑到 Nd:YVO₄ 晶体对半导体抽运光有偏振的要求,即 Nd:YVO₄ 与抽运光有一个最佳偏振匹配,且不同偏振光的吸收截面相差较大,如果采用光纤耦合半导体激光端面抽运,很难实现 Nd:YVO₄ 与抽运光的偏振匹配。并且相对列阵半导体激光,光纤耦合的成本要高得多。因此采用列阵半导体端面抽运的全固化大功率激光器有其相当

收稿日期:2002-11-18; 收到修改稿日期:2003-05-14

基金项目:北京市教委科技发展基金(编号:3021001)资助项目。

作者简介:王登顺(1976—),男,山东聊城人,硕士,主要从事固体激光技术方面的研究。E-mail:greatwds@163.com

的开发前景。

1 LD 抽运光的整形及晶体热效应

列阵半导体激光器的输出发散角比较大,经过实际测量得到:一个方向约为 10°,另一个方向约为 60°。因此,对它的整形聚焦必须分为两个方向进行。实验中采用了如图 1 所示的柱透镜列对发散角大的方向进行压缩。压缩后的发散角小于 2°。然后,直接用球透镜进行聚焦。由于两个方向的发

角不同,所以其束腰位置不能重合,会分开一定距离。经过多次实验,得出结论:两个方向上的束腰位置之间的间距大约为 1mm,所以两个方向上聚焦位置的分离在本实验中可以忽略。经过柱透镜列与球透镜的整形聚焦以后,得到了 1.2 mm×2.7 mm 的抽运光斑。

对 Nd:YVO₄ 晶体的热透镜效应,利用稳腔条件进行测量,得出了不同抽运功率下的热焦距数值,如表 1 所示。

表 1 热焦距随抽运功率的变化

Table 1 Thermal focusing length (TFL) as a function of pump power

Pump power /W	5	8	10	15	20	25	30	35
TFL /cm	No result	100	90	75	70	68	65	62

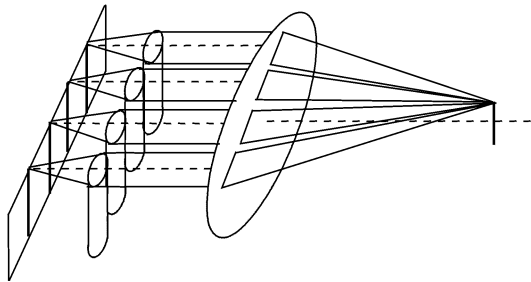


图 1 列阵半导体抽运激光的整形系统装置图
Fig. 1 Schematic of mode-shaping-system of diode-array-laser

利用公式进行计算,热焦距计算公式^[4]为

$$f_r = \frac{\pi K_c \omega_p^2}{P_{ph} (dn/dt)} \left[\frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \right] \quad (1)$$

其中, K_c 为热传导系数; ω_p 为抽运光光斑半径, P_{ph} 为抽运光功率作为热沉积在晶体中的一部分功率。 dn/dt 为折射率随温度的变化率, α 为吸收系数, l 为激光晶体长度。

对于 Nd:YVO₄ 晶体, $K_c = 0.054 \text{ W/cm} \cdot \text{K}$, $dn/dt = (4.7 \pm 0.6) \times 10^{-6} / \text{K}$, $\alpha = 14.8 \text{ cm}^{-1}$ 。经过对抽运功率及光斑半径进行折算后,代入公式进行计算,得到的结果与测得的结果基本吻合,变化趋势一致。测量结果略大于计算结果,总起来说热焦距比较大,这是由于列阵半导体的聚焦光斑大且不对称等特性所致。

在抽运功率小于 10 W 的情况下,热透镜效应基本上可以忽略。但是当抽运功率大于 10 W,或者远大于 10 W 时,列阵半导体激光端面抽运下 Nd:YVO₄ 晶体的热透镜效应是不可以忽略的。并且由于列阵半导体激光端面抽运所形成的等效热透镜具有不对称性,不能用普通的方法进行补偿。在此基础上设计了下面的谐振腔。

2 理论分析

从谐振腔的稳定性条件及光斑计算尺寸公式出发,对谐振腔的稳区与 Nd:YVO₄,KTP 晶体上的光斑尺寸进行了计算。谐振腔如图 2。

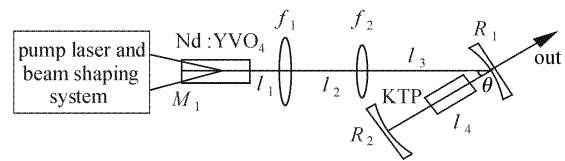


图 2 列阵半导体激光器抽运 Nd:YVO₄/KTP 腔内倍频绿光激光器谐振腔示意图

Fig. 2 Schematic of the diode-array pumped intracavity doubled Nd:YVO₄/KTP laser

该谐振腔子午面与弧矢面的传输矩阵及光斑尺寸计算公式如下(下标 t, s 分别代表子午面和弧矢面)

$$M_t = \begin{bmatrix} A_t & B_t \\ C_t & D_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ f_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ f_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2 & 0 \\ R_1 \cos \theta & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & l_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2 & 0 \\ R_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ f_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ f_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$M_s = \begin{bmatrix} A_s & B_s \\ C_s & D_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2\cos\theta}{R_1} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & l_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2\cos\theta}{R_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

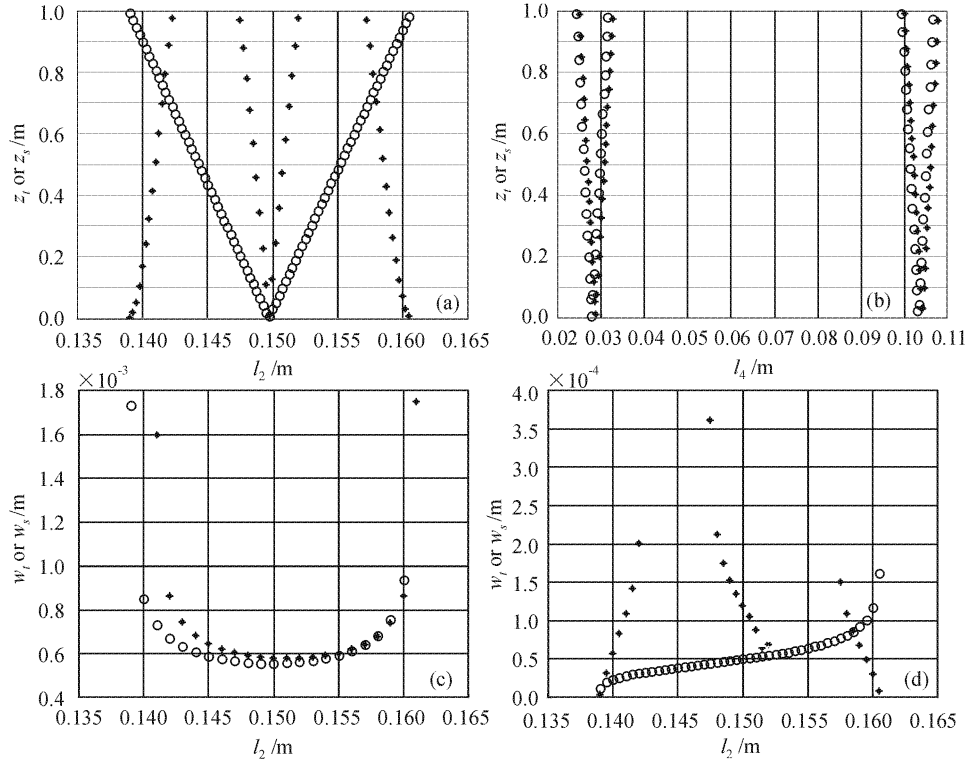


图 3 l_2 和 l_4 对谐振腔稳区和光斑尺寸的影响(○:子午面,+ :弧矢面)

(a) l_2 对稳区的影响;(b) l_4 对稳区的影响;

(c) Nd:YVO₄ 晶体上的光斑随 l_2 的变化曲线;(d) KTP 晶体上的光斑随 l_2 的变化曲线

Fig. 3 Cavity-stable region, spot size at Nd:YVO₄ and KTP as a function of l_2 and l_4

(a) influence of l_2 on cavity-stable region; (b) influence of l_4 on cavity-stable region;

(c) spot size at Nd:YVO₄ vs l_2 ; (d) spot size at KTP vs l_2

$$\left| \frac{A_t + D_t}{2} \right| \leq 1, \quad \left| \frac{A_s + D_s}{2} \right| \leq 1 \quad (4)$$

$$w_t^2 = \frac{\lambda B_t}{\pi} \sqrt{\left| 1 - \left(\frac{A_t + D_t}{2} \right)^2 \right|} \quad (5a)$$

$$w_s^2 = \frac{\lambda B_s}{\pi} \sqrt{\left| 1 - \left(\frac{A_s + D_s}{2} \right)^2 \right|} \quad (5b)$$

利用谐振腔的稳定性条件(4)及腔内光斑计算公式(5),用计算机对 l_2, l_4 进行扫描,可以得到谐振腔的稳区与 Nd:YVO₄,KTP 晶体上的光斑随 l_2, l_4 变化规律,如图 3 所示。

根据图 3(b)可知虽然满足谐振腔稳定性条件的 l_4 有两个范围,但是它们都比较小,都需要精细调节。而且在 $l_4 = 2.5$ cm 附近 R_1 与 R_2 之间距离太

小,无法实现,只能选用 $l_4 = 10$ cm 附近的范围。

由图 3(c)可以看出,当 l_2 为 14.1 cm 时,在 Nd:YVO₄子午面、弧矢面的光斑半径分别为 1.55 mm 和 0.6 mm。而经过整形的半导体抽运光的光斑尺寸为 1.2 mm×2.7 mm,所以基本上实现了振荡光与抽运光较好的模式匹配。此外由图 3(c)也可看到谐振腔已工作在稳区的边缘附近,但是在本实验的抽运功率下得到的结果非常稳定。经分析,原因在于在此抽运功率下虽然测到的热焦距数值非常大,可予以忽略,但是这一轻微的热透镜效应恰恰可以把稳区范围稍稍拉大一点。

总之, l_2 和 l_4 对谐振腔的稳区及晶体上的光斑尺寸影响较大,需要精细调节。由图 3(d),当 l_2 为

14.1 cm 时,子午面、弧矢面的光斑半径均小于 50 μm ,这样可得到较高的倍频效率。

3 实验装置与实验结果

实验装置如图 1 和图 2 所示,采用柱透镜列对列阵半导体抽运光进行了光束整形,并在腔内加入光学系统进行扩束。列阵半导体激光器的参数为:最大输出功率为 40 W,发散角约为 10° 和 60° ,发光面为 $1 \mu\text{m} \times 10 \text{ mm}$,共四条,条间距为 2.4 mm。整形系统中的柱透镜参数:直径为 1.2 mm,长为 13 mm,焦距为 0.9 mm。球透镜焦距为 22 mm。经过准直聚焦以后,得到 $1.2 \text{ mm} \times 2.7 \text{ mm}$ 抽运光斑。

激光晶体采用尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的 Nd:YVO₄,倍频晶体选用 KTP,尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ 。Nd:YVO₄ 与 KTP 采用铜热沉(由电火花切割加工,能够保证热沉与晶体良好接触)进行冷却,铜热沉外接控温的闭循环水冷却(冷却水温度为 16.5°C)。谐振腔参数为: $l_1 = 11 \text{ cm}$, $l_2 = 14.1 \text{ cm}$, $l_3 = 15 \text{ cm}$, $l_4 = 10 \text{ cm}$,KTP 晶体的中心与 R_1 的距离约为 2.5 cm, $f_1 = 10 \text{ cm}$, $f_2 = 4 \text{ cm}$, $R_1 =$

5 cm, $R_2 = 7.5 \text{ cm}$, $\theta = 10^\circ$ 。Nd:YVO₄ 晶体一面镀 808 nm 增透膜,1.064 μm 全反膜,一面镀 1.064 μm 增透膜,凹面镜 R_1 镀 1.064 μm 全反膜,532 nm 增透膜,凹面镜 R_2 镀 1.064 μm 和 532 nm 双全反膜。

α 切割的 Nd:YVO₄ 晶体对 π 偏振抽运光的吸收要比 σ 偏振的强得多^[5], π 偏振主吸收峰的吸收系数约为 σ 偏振的 1.5 倍, π 偏振主吸收峰的半高宽度则为 σ 偏振的 3 倍多。所以,对于输出为线偏振的半导体抽运光,最好让它相对 Nd:YVO₄ 成 π 偏振。这里采用平-平腔(抽运系统、激光晶体即为本实验所采用的实验装置及晶体,腔长为 30 cm),抽运光分别以两种偏振态(π 偏振, σ 偏振)入射 Nd:YVO₄,表 2 是所得到的 1.064 μm 光的输出功率的比较(由于表中结果已经可以确定晶体相对抽运光的偏振方向,故没有测量更大功率的情况)。

让抽运光以 π 偏振光入射 Nd:YVO₄ 晶体,实现振荡光与抽运光的有效匹配;根据对本实验谐振腔稳区的分析精确地调节了 l_2, l_4 两个参数,使激光器稳定工作;调节 KTP 使其满足相位匹配角。当抽运功率为 9.5 W 时,得到 520 mW 的稳定绿光输出,光-光转换效率为 5.5%。

表 2 Nd:YVO₄ 两种偏振光的吸收实验结果比较

Table 2 Comparing of Nd:YVO₄'s absorption for two kinds of polarizing laser

Pump power /W		7.03	8.08	10.06	11.9	13.2	14.4	15.9	17.5	18.7
Output /W	π polarization	0.9	1.1	1.45	1.8	2	2.5	2.8	3.2	3.6
	σ polarization	0.51	0.71	1.35	1.31	1.45	1.6	1.7	1.8	1.7

4 结 论

在对抽运光进行有效整形,并设计出与之有效模式匹配的谐振腔后,采用列阵半导体激光器进行端面抽运的方式是可行的。本实验中,由于还没有彻底解决热透镜效应,所以功率不能进一步提高。经分析认为如果能进一步提高抽运功率,将可以进一步提高效率。另一方面,这种抽运方式在需要满足特殊的抽运光与晶体偏振吸收匹配的情况下,将有很好的应用。实验中,当抽运功率大于 10 W 时,由于晶体的热透镜效应,谐振腔无法稳定工作,且输出有所下降。所以,如果要得到更大功率输出,必须对热透镜效应进行补偿,由于端抽运时晶体热透镜效应具有非对称性,对它的补偿需要采取特殊措施。

参 考 文 献

1 He Jingliang, Hou Wei, Zhang Hengli *et al.*. 8.8 W green laser by intracavity frequency doubling of a LD pumped Nd:YVO₄

laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(6):481~484

何京良,侯 玮,张恒利等. LD 抽运 Nd:YVO₄ 腔内倍频连续波 8.8 W 绿光激光器[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(6):481~484

2 Hu Wentao, Zhou Fuzheng, Li Chuandong *et al.*. Intracavity doubling of a diode side-pumped Nd:YAG laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(7):845~850

胡文涛,周方正,李传东等. 二极管激光侧面抽运腔内倍频 Nd:YAG 板条激光器研究[J]. *光学学报*, 1995, **15**(7):845~850

3 Jiang Dong-sheng, Zhou Shou-huan, Zhao Hong *et al.*. High average power double frequency operation of Nd:YAG rod lasers side pumped by diode arrays [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(4):301~303

姜东升,周寿桓,赵 鸿等. 二极管侧面抽运的高平均功率倍频 Nd:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(4):301~303

4 M. E. Innocenzi, H. T. Yura, C. L. Fincher *et al.*. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(19):1831~1833

5 Wang Junmin, Li Ruining, Guo Ruixiang *et al.*. Laser diode direct-coupling pumped Nd:YVO₄/KTP high-efficiency intracavity frequency-doubling laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(10):1390~1392

王军民,李瑞宁,郭蕊香等. 激光二极管直接耦合抽运的高效率 Nd:YVO₄/KTP 腔内倍频激光器[J]. *光学学报*, 1996, **16**(10):1390~1392