

文章编号 : 0258-7025(2001)02-0109-04

LD 抽运内腔倍频 532 nm 微型环形腔 激光器的设计

张存满 赵 洋 李达成

(清华大学精密计量与测试国家重点实验室 北京 100084)

提要 简述了内腔倍频 532 nm 环形激光器的原理。根据实验要求,采用 Nd:YVO₄和 KTP 作为激光晶体和倍频晶体,设计了可调谐的环形腔倍频激光器。实验结果表明,所设计的激光器最大可输出 2 mW 的单纵模绿光,绿光可调谐范围 20 GHz,满足设计要求。

关键词 LD 抽运,环形激光器,内腔倍频,KTP,Nd:YVO₄

中图分类号:TN 248.1 文献标识码:A

LD Pumped Intracavity Doubling 532 nm Ring Laser

ZHANG Cun-man ZHAO Yang LI Da-cheng

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument,
Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract A detail description of LD pumped intracavity-doubling ring laser is presented. The ring laser is pumped by an 808 nm LD which has a fiber-tail with maxim output of 810 mW. Using YVO₄ and KTP as the laser crystal and doubling crystal, a maxim of 2 mW 532 nm TEM₀₀ mode green laser is achieved. Laser frequency can be tuned about 12 GHz by moving one of the cavity mirror with PZT.

Key words LD pumped, ring laser, intracavity doubling, KTP, Nd:YVO₄

1 引 言

LD 抽运的 YVO₄/KTP 内腔倍频 532 nm 激光器在高精度激光器稳频的研究、彩色显示、光谱仪、材料加工以及生物医学等领域中有着广阔的应用前景。随着 LD 技术的成熟与价格的下降,使这一领域的研究得到了快速发展。目前,中小功率内腔倍频的研究主要集中在如何提高倍频转换效率和提高光束质量两个方向。山东大学晶体材料研究所利用 LD 抽运 YVO₄/KTP 内腔倍频的方法,在抽运功率为 604.2 mW 时,获得了 133.6 mW 的单横模绿光输出,光-光转换效率为 22.1%^[1];N. MacKinnon 等采用 0.5 mm 厚的 YVO₄ 和 2 mm KTP 设计的 LD 阵列抽运微片激光器得到了 50 mW 的绿光输出^[2];然而,当要求激光器单纵模输出时,激光器输出功率往往较低,例如 T. Sasaki 等设计的微片激光器在抽运功率

为 620 mW 时,输出的单纵模绿光为 16 mW,转换效率仅为 2.6%^[3]。

限制内腔倍频固体激光器输出质量的另一因素是“绿光噪声”问题^[4],有很多作者已经对此进行过研究,包括腔长与抽运功率的影响^[5],KTP 的长度影响^[6]以及晶体温度的影响^[1]等多方面。解决的方法之一是使谐振腔内的激光单纵模运转,这可以通过采用环形谐振腔与光二极管的组合实现^[7]。这种方法对于高功率激光器是行之有效的,而对于小功率激光器,由于器件引入损耗的影响,实现起来比较困难。

在绝对距离测量中,一般对激光器的功率要求较低(约几毫瓦),而对光束的单模特性要求较高,并且要求激光器的频率能够调谐几个 GHz 的范围;市场上可以购买到的绿光激光器往往不能满足这些要求,尤其是不能满足频率可调谐的要求。因此,我们在分析已有研究成果的基础上,设计了可调谐环形腔倍频激光器,通过调节各腔镜的位置,使腔内两方

向激光增益的差别足以实现单方向运转,获得了单模输出。

2 谐振腔的设计

谐振腔是激光器的一个重要组成部分,适当结构的谐振腔对于激光的产生是必不可少的,其作用在于提供光学正反馈,以便在腔内建立和维持自激振荡。对于谐振腔的要求包括:大的模体积,对抽运功率变化引起的热透镜焦距的变化不敏感,对于机械振动和环境温度变化不灵敏等^[8]。

谐振腔可分为驻波腔和行波腔,其中行波腔具有激光束质量好、噪声低等优点,而且克服了驻波腔出现的空间烧孔效应。根据设计要求,采用了稳定的行波腔结构。

谐振腔的设计一般采用 ABCD 法则。设谐振腔的变换矩阵为 T , $T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$, 则谐振腔稳定的条件为

$$\left| \frac{1}{2}(A + D) \right| < 1 \tag{1}$$

而高斯光束的腰粗可由下式计算

$$w_0^2 = \frac{\lambda B \sqrt{4 - (A + D)^2}}{2\pi(1 - AD)} \tag{2}$$

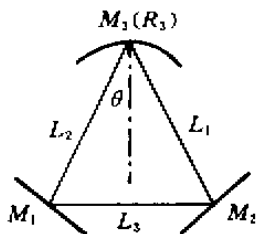


图1 激光器谐振腔的设计
Fig.1 Laser cavity design

对于图1所示的环形腔, M_1, M_2 为平面镜, M_3 为凹面镜, 曲率半径为 R_3 , $L_i (i = 1, 2, 3)$ 表示图示三角形的边长, 则谐振腔的变换矩阵为

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

其中 f_3 为 M_3 的焦距, 取 $L_1 = L_2 = L$, 得到 $A = 1 - \frac{(L + L_3)}{f_3}$, $D = 1 - \frac{L}{f_3}$ 。由稳定性条件得到 $2f_3 > L$

$+ \frac{L_3}{2}$ 。此条件对于子午面内的光线和弧矢面内的光线均需满足, 即 $2f_3 = R_3 \cos\theta > L + L_3/2$, $2f_3 = R_3 \sec\theta > L + L_3/2$, 由此可以确定 R_3 的值。

在激光器设计中, 根据机械结构与谐振腔设计的要求, 采用图1所示的等腰直角三角形的环形腔, 取 $L_3 = 10 \text{ mm}$, $\theta = 45^\circ$, $L_1 = L_2 = L_3/\sqrt{2}$, $w_0 = 80 \mu\text{m}$ 。通过解(2)式, 得到 $f_3 \geq 20.8266$, $R_3 \geq 58.9 \text{ mm}$ 。从加工和稳定性考虑, R_3 取 100 mm , 反算得 $w_0 = 0.095 \text{ mm} (95 \mu\text{m})$ 。谐振腔腔长为 24.2 mm 。

3 LD 抽运倍频环形激光器光路图

所设计的内腔倍频环行激光器如图2所示。Nd:YVO₄与KTP调整后固定为一体(两靠近面 d, e 有很小的间隙), 然后与腔镜 M_1, M_2 及 M_3 安装在可调节相对位置的基座上。 M_1 一面镀 808 nm 增透膜, 另一面镀 1064 nm 高反膜和 808 nm 增透膜, M_2 一面镀 532 nm 增透膜和 1064 nm 高反膜, 另一面镀 532 nm 增透膜, M_3 镀 532 nm 高透膜, Nd:YVO₄ 一面镀 808 nm 和 1064 nm 增透膜, 另一面镀 1064 nm 增透膜, KTP 一面镀 1064 nm 增透膜, 另一面镀 1064 nm 和 532 nm 增透膜。利用微位移器件(PZT)推动 M_3 镜可以实现激光器的调谐。抽运光经光纤入射到激光晶体上, 采用带尾纤的 LD 使抽运源与谐振腔隔离, 消除了其发热影响。当抽运功率大于激光器的阈值功率时, 在环形腔内产生稳定的基频光 (1064 nm) 振荡, 倍频光由 M_2 镜输出。

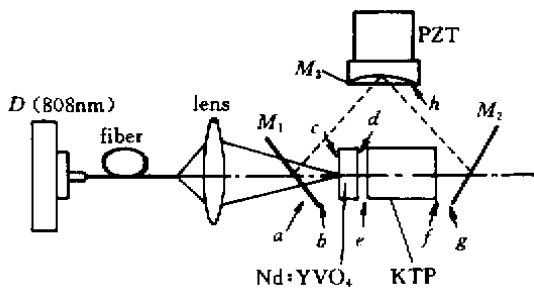


图2 内腔倍频环行腔激光器的结构
Fig.2 Schematic diagram of experimental setup

4 工作物质的选择

主要包括激光晶体、倍频晶体以及抽运系统的选择等方面。

4.1 激光晶体

LD 抽运的固体激光器, 对激光晶体特性的要求

包括吸收带宽,吸收系数大,荧光量子效率高以及荧光谱线宽度 $\Delta\nu_f$ 小,热导率高等。

表 1 为几种晶体参数的比较。可见, $YVO_4:Nd$ 是最优良的激光基质材料之一,其主要特点是:抽运阈值低,斜效率高,激励发射面积大,在抽运波长范围内有相当高的吸收,对抽运波长有大的宽容度,容易实现单模偏振输出。因此,实验中采用 $YVO_4:Nd$ 作为激光工作物质,晶体长度为 1 mm,横截面为 3 mm × 3 mm。

表 1 几种激光晶体的特性比较

Table 1 Comparison of some laser crystals

Laser crystal	Absorption peak wavelength/nm		Laser peak wavelength/ μm
	Wavelength region	Centre wavelength	
YAG:Nd	805 ~ 809	809	1.064 μ . 946
YLF:Nd	795 ~ 805		1.053
$YVO_4:Nd$	800 ~ 820	808.6	1.064 μ . 1.34
YAlO:Nd		810	1.34

4.2 倍频晶体

根据激光倍频原理,倍频晶体必须是不具备中心对称的各向异性晶体,而且对基频光与倍频光均有良好的透过率,并能以一定的方式满足产生倍频作用的相位匹配条件。目前,普遍采用的倍频晶体为 KTP,这是因为 KTP 晶体具有倍频效率高、可以实现 II 类相位匹配等优点。实验中采用 KTP 晶体作为倍频晶体(长 5 mm,横截面为 2 mm × 2 mm)。为了取得最大倍频效率,要求基频光偏振运转,由于 Nd: YVO_4 产生的激光是线偏振光,自然满足了此要求。

4.3 抽运系统

采用 1 W 连续工作的 GaAlAs 单量子阱 LD 作为抽运源。实际应用中,由于 LD 有较大的发散角,要使其发光功率有效地耦合到激光晶体上十分困难(机械结构要求 LD 与激光晶体的距离较大),聚焦系统比较复杂。因此,采用带尾纤的 LD 作为抽运源,这样不仅简化了聚焦系统的设计,而且使 LD 与谐振腔分开,消除了抽运源的热影响。LD 的参数为:输出功率 0.81 W, N. A. = 0.22, 输出孔径 100 μm 。

在固体工作物质的抽运中,为了满足抽运的匹配条件,要求抽运光束为 70 μm 左右的光斑,因此需要将 LD 的光束进行准直与聚焦。实验中采用数值孔径较大的透镜聚焦,透镜焦距 $f' = -6$ mm。另外

由于 LD 的温度调谐率为 0.2 nm/ $^{\circ}C$,而且温度降低波长向短波方向移动,所以需要将其温度控制在 0.2 $^{\circ}C$ 范围内,以保证 LD 的峰值波长与固体工作物质的吸收峰一致。

5 初步实验

在谐振腔调节过程中,可以观察到 TEM_{00} , TEM_{10} , TEM_{20} 等激光振荡模式,仔细调节得到稳定的 TEM_{00} 模。通过调节谐振腔各反射镜的位置,使腔内两方向的激光损耗有差别,从而实现激光束的单方向运转。根据环形腔的分析,在单方向振荡的情况下,输出光束即为单纵模(后续的实验通过扫描干涉仪验证了其模式为单纵模)。

激光器的阈值抽运电流为 $I_{th} = 280$ mA(相应的 LD 输出功率约为 100 mW),最大倍频光输出功率为 2 mW。图 3 为抽运电流与激光输出功率的关系。(a) 为抽运电流与激光器总输出的关系(包括 1064 nm 和 532 nm);(b) 为滤除基频光后 532 nm 的输出。图 3 表明激光器的输出有很强的基频光成分(这与腔镜 M_1, M_2 镜的镀膜不完善有关)。

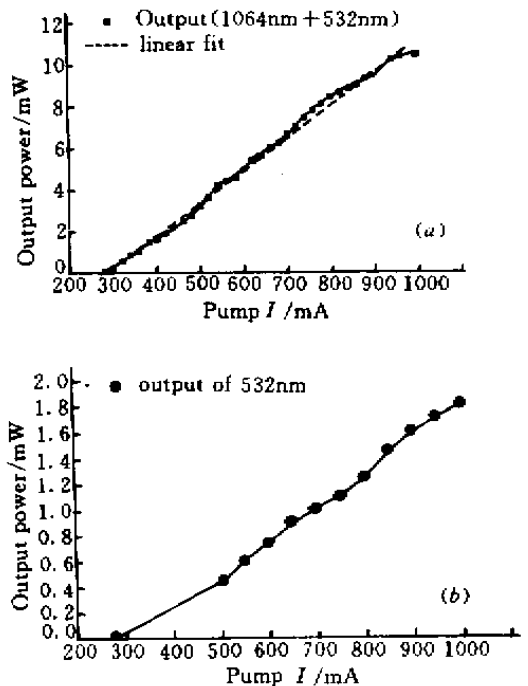


图 3 激光器输出功率与抽运电流的关系
(a) 激光器总输出功率(包括 1064 nm 和 532 nm);
(b) 倍频光输出功率

Fig. 3 Laser output vs pump current
(a) laser output including 1064 nm and 532 nm;
(b) 532 nm laser output

采用自制的 F-P 腔测量激光器的频率调谐范围表明,激光器可以调谐 20 GHz 以上,但由于 F-P 腔精细度的限制,没有对激光器的线宽和调谐的准确值进行测量。

6 结 论

采用带尾纤的 LD 作为抽运源实现了环形激光器的内腔倍频。实验结果表明,所设计的激光器阈值抽运电流为 280 mA,最大可输出 2 mW 的单纵模 532 nm 绿光,激光频率可以调谐 20 GHz,满足了设计要求。由于谐振腔腔镜镀膜不完善引起基频光的损耗较大以及没有对 YVO_4 晶体控温等原因,激光器的倍频效率还很低。

致谢 非常感谢清华大学电子工程系霍玉晶教授对本实验工作的指导和帮助。

参 考 文 献

1 Sheng Deyuan, Wang Changqing, Shao Zongshu *et al.*. Thermal effects of a Nd:YVO₄/KTP diode-laser end-pumped

laser. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1996, **A23**(5) 385 ~ 388 (in Chinese)

2 N. MacKinnon, B. D. Sinclair. A laser diode array pumped, Nd:YVO₄/KTP, composite material microchip laser. *Opt. Comm.*, 1994, **103**(3A):183 ~ 187

3 T. Sasaki, T. Kojima, A. Yokotani *et al.*. Single-longitudinal-mode operation and second-harmonic generation of Nd:YVO₄ microchip lasers. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(21):1665 ~ 1667

4 T. Baer. Large-amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd:YAG lasers. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**(9):1175 ~ 1180

5 Lu Jianren, Mu Xiaodong, Kong Qingyu *et al.*. Study on "Green Problem" of LD-pumped intracavity-doubled Nd:YVO₄/KTP green lasers. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(1) 9 ~ 13 (in Chinese)

6 Y. F. Chen, T. M. Huang, C. L. Wang *et al.*. Theoretical and experimental studies of single-mode operation in diode pumped Nd:YVO₄/KTP green laser: influence of KTP length. *Opt. Comm.*, 1998, **152**(4B) 319 ~ 323

7 K. I. Martin, W. A. Clarkson, D. C. Hanna. 3 W of single-frequency output at 532 nm by intracavity frequency doubling of a diode-bar-pumped Nd:YAG ring laser. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(12) 875 ~ 877

8 Zhou Bingkun. *Laser Principle*. Beijing: National Defence Book Concern, 1980 (in Chinese)