

文章编号: 0258-7025(2010)10-2441-04

激光二极管端面抽运高偏振比 Nd : YVO₄ 晶体 微片绿光激光器

林海峰¹ 陈建林² 熊飞兵¹

(¹ 厦门理工学院数理系, 福建 厦门 361024; ² 福建华科光电有限公司研发部, 福建 福州 350014)

摘要 报道了一种激光二极管(LD)抽运高偏振比腔内倍频全固态微片激光器,采用两光轴正交的 Nd : YVO₄ 激光晶体作为增益介质,消除单块 Nd : YVO₄ 晶体对输出绿光的退偏作用,获得高偏振度的绿光输出,同时各晶体之间采用光学胶合的方法,实现了微片绿光激光器。在 1.8 W 抽运功率下,获得了偏振比为 110 : 1,功率为 336 mW 的绿光输出,光-光转换效率为 18.7%。该激光器结构简单、体积小、成本低,适合于大批量生产。

关键词 激光器;绿光微片激光器;高偏振比;光轴正交 Nd : YVO₄ 晶体;光学胶合

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103710.2441

A Laser Diode-Pumped Nd : YVO₄ Crystal Micro-Chip Green Laser with High Polarization Ratio

Lin Haifeng¹ Chen Jianlin² Xiong Feibing¹

(¹ Department of Mathematics and Physics, Xiamen University of Technology, Xiamen, Fujian 361024, China)
(² Research Department of CASIX Ltd., Fuzhou, Fujian 350014, China)

Abstract A laser diode (LD)-pumped high polarization state intracavity frequency doubling all-solid green laser is reported. By using two optical axis orthogonal Nd : YVO₄ crystals to act as laser gain medium, eliminating the depolarization effect of single Nd : YVO₄ crystal, the high polarization green laser is obtained. And with optical contact between each crystal, the micro-chip green laser is realized. With the injection pump power of 1.8 W, 336 mW TEM₀₀ green laser at 532 nm is achieved, the light-light conversion efficiency is up to 18.7%, and the polarization rate is 110 : 1. This laser has the advantages of being simple and easily attainable at a low cost, and it is suitable for batch production.

Key words lasers; micro-chip green laser; high polarization ratio; optical axis orthogonal Nd : YVO₄ crystal; optical contact

1 引 言

与其他激光器相比较,激光二极管(LD)抽运的全固态激光器具有效率高、寿命长、结构紧凑、稳定性好等优点^[1~3],在激光显示、激光加工、数据存贮、医疗卫生、激光测量等领域有着重要的应用,因此,LD 抽运全固态激光器成为国际上近年来的研究热点^[4~8]。

目前 LD 抽运绿光激光器通常采用 Nd : YVO₄/KTP 直腔结构,该激光器输出的绿光偏振度

很差,偏振比约为 1.5 : 1。为了获得高偏振比的激光输出,人们做了大量的研究,现已有用 V 型激光谐振腔^[9]、腔内放置偏振元件^[10]、刻有光栅的激光腔镜^[11]等技术实现了高偏振度的激光输出,前两种结构腔内损耗大,而且难于调节,也不利于器件的微型化,后一种结构简单,易于实现微型化,但由于光栅衍射效应,激光效率比较低,而且激光腔镜的制作难度也较大。

本文从激光器结构、倍频原理等方面出发,进行

收稿日期: 2010-01-18; 收到修改稿日期: 2010-03-27

基金项目: 福建省教育厅科技项目基金(JA09225)资助课题。

作者简介: 林海峰(1976—),男,工程师,主要从事激光晶体及全固体化蓝绿光固体激光器方面的研究。

E-mail: hflin@xmut.edu.cn

了深入的理论分析,认为导致普通结构的激光器输出偏振度低的主要原因在于 Nd:YVO₄ 对于绿光的退偏作用。为此,在不变更 LD 端面抽运直腔 Nd:YVO₄/KTP 晶体绿光激光器结构的基础上,提出了用两个光轴互相垂直的 Nd:YVO₄ 晶体作为激光增益介质,获得了偏振比为 110:1 的绿光输出,同时发现输出绿光的稳定性也有明显的改善,该结构的激光器具有很高的实用价值。

2 理论分析

如图 1 所示,在 LD 抽运的 Nd:YVO₄/KTP 绿光激光器中,采用通光方向长度为 1 mm, Nd³⁺ 掺杂原子数分数为 3%, c 轴向切割的 Nd:YVO₄ 晶体作为工作介质,由于采用抽运光偏振方向平行于 Nd:YVO₄ 晶体的 c 轴方向,即相对于 Nd:YVO₄ 晶体呈 π 偏振的抽运光, Nd³⁺ 离子的跃迁具有很强的偏振性, π 方向的发射截面是 σ 方向发射截面的 4.2 倍,因此, Nd:YVO₄ 晶体产生的基频光 (1.064 μm) 是 π 方向线偏振光,具有良好的偏振特性,实验数据也表明, Nd:YVO₄ 输出的基频红外激光具有良好的线偏振特性。同时,也发现普通结构的 Nd:YVO₄/KTP 激光器输出绿光的偏振度很低,一般小于 2:1。从理论分析,引起输出绿光偏振度低的主要因素有以下几点。

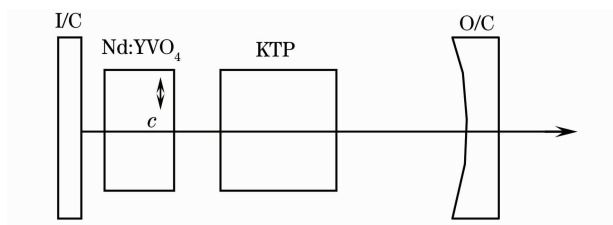


图 1 直腔 Nd:YVO₄/KTP 绿光激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Nd:YVO₄/KTP green laser

2.1 KTP 晶体的影响

对于 KTP 晶体,通过计算表明,当使用 II 类相位匹配, $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 23.5^\circ$ 时,倍频效率最高。对于 Nd:YVO₄ 输出的基频光, KTP 晶体相当于一波片,对基频光起退偏的作用,根据角相位匹配原理可

知,基频光的偏振度和入射角只能影响倍频效率,从而影响输出倍频光的功率,而不能降低它的偏振度,不管入射到 KTP 上的基频光处于何种偏振态,它总可分解为垂直于光轴的 o 光和平行于光轴的 e 光,二者合成产生沿光轴方向振动的线偏振的倍频 e 光,二者所占比例的大小(也就是基频光的偏振度)只对倍频效率有影响,而对绿光偏振态没有影响,可见, KTP 对绿光偏振态是没有直接影响的。

2.2 Nd:YVO₄ 晶体的退偏作用

在如图 1 所示激光器的基本结构中,输出透镜对 1.064 μm 的基频光是全反的,对 0.532 μm 的绿光是增透的。当被输出镜反射回去的基频光再次通过 KTP 晶体时,又经过一次倍频,形成反向的 e 偏振的倍频绿光,该方向的绿光经过 Nd:YVO₄ 晶体时,被分解为平行于晶体光轴和垂直于晶体光轴的两个分量,由于在这两个方向 Nd:YVO₄ 晶体对绿光折射率不同,因而绿光退偏,变成椭圆偏振光,这就是 Nd:YVO₄ 晶体对绿光的退偏作用,绿光被抽运端透镜反射再次通过 Nd:YVO₄ 晶体时,绿光的偏振度再次降低,这样,原来是线偏振的倍频绿光就变成了椭圆偏振光。

当然,可能还有一些其他因素影响输出绿光的偏振度,比如晶体的质量、噪声等因素,导致输出绿光偏振度的降低。基于以上分析得出,引起普通 Nd:YVO₄/KTP 激光器输出绿光偏振度低的主要原因在于 Nd:YVO₄ 晶体的退偏作用。

2.3 光轴正交 Nd:YVO₄ 晶体的消除绿光退偏作用

对于 532 nm 绿光而言,当绿光经过 Nd:YVO₄ 晶体时,被分解为平行于晶体光轴和垂直于晶体光轴的两个分量,由于在这两个方向 Nd:YVO₄ 晶体对绿光折射率不同,因此发生退偏。绿光来回经过两块光轴正交 Nd:YVO₄ 晶体的琼斯矩阵形式为^[12]

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix},$$

式中

$$\begin{aligned} m_{11} &= \exp[i(\delta_1 + \delta_2)] \cos^2 \psi + \exp[-i(\delta_2 - \delta_1)] \sin^2 \psi, \\ m_{22} &= \exp[-i(\delta_1 + \delta_2)] \cos^2 \psi + \exp[i(\delta_2 - \delta_1)] \sin^2 \psi, \\ m_{12} &= m_{21} = i \sin(2\psi) \sin(\delta_2), \end{aligned}$$

式中 δ_1, δ_2 分别是绿光经过第 1, 2 块 Nd:YVO₄ 晶体

后产生的相位延迟, ψ 是晶体快轴与 x 轴的夹角。绿光

经过第 1 块 Nd:YVO₄ 晶体时被分解成 o, e 光, 由于第 2 块 Nd:YVO₄ 晶体光轴与第 1 块相互垂直, 因此原来在第 1 块晶体中的 o, e 光分别变成 e, o 光, 在两块晶体中所产生的相位差相同, 即 $\delta_1 = -\delta_2$, 因此, 由两块 Nd:YVO₄ 晶体产生的相位差可以抵消, 从而消除单块 Nd:YVO₄ 晶体的退偏作用。

3 实验方案

3.1 验证 Nd:YVO₄ 晶体对绿光退偏的影响

用半导体致冷器对 Nd:YVO₄ 晶体进行温控, 用

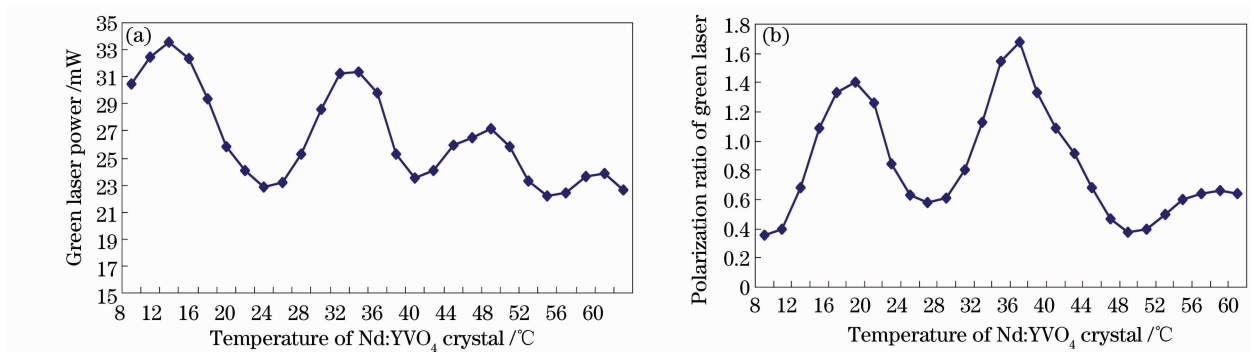


图 2 Nd:YVO₄ 晶体对输出绿光偏振态的影响。(a)绿光输出功率随 Nd:YVO₄ 晶体温度的变化曲线,(b)输出绿光偏振比随 Nd:YVO₄ 晶体温度的变化曲线

Fig. 2 Effects of Nd:YVO₄ crystal on green laser polarization. (a) relationship of output green light power and

Nd:YVO₄ crystal temperature, (b) relationship of polarization ratio of green light and Nd:YVO₄ crystal temperature

3.2 光轴正交 Nd:YVO₄ 晶体实现高偏振度绿光输出

实验装置如图 3 所示, 采用 LD 端面直接抽运的平行平面腔内倍频结构。采用端面抽运方式, 经耦合系统后入射到晶体内的抽运光有 90% 被吸收。2 W 的 LD 由 Coherent 公司提供, 中心波长为 809 nm, 采用两块尺寸为 3 mm×3 mm×1 mm, Nd³⁺ 掺杂原子数分数为 3% 的 Nd:YVO₄ 晶体, 使其光轴相互垂直地光学胶合在一起, 靠近 LD 一侧的晶体端面镀 808 nm 增透

膜, 1064 nm 和 532 nm 高反膜; KTP 倍频晶体尺寸为 3 mm×3 mm×2 mm, KTP 晶体以 II 类相位匹配的方式切割, 其一面镀 1064 nm 高反膜 (反射率 $R > 99.8\%$), 532 nm 高透 (透射率 $T > 95\%$), 作为谐振腔的输出镜。为了提高激光输出功率和器件的稳定性, Nd:YVO₄ 晶体和 KTP 晶体之间也采用光学胶合, 而且对激光腔整体温控, 温度控制在 $(25.0 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ 。激光输出功率使用 Newport 公司的 2832c 功率计测量。旋转格兰棱镜测量激光的消光比。

膜, 1064 nm 和 532 nm 高反膜; KTP 倍频晶体尺寸为 3 mm×3 mm×2 mm, KTP 晶体以 II 类相位匹配的方式切割, 其一面镀 1064 nm 高反膜 (反射率 $R > 99.8\%$), 532 nm 高透 (透射率 $T > 95\%$), 作为谐振腔的输出镜。为了提高激光输出功率和器件的稳定性, Nd:YVO₄ 晶体和 KTP 晶体之间也采用光学胶合, 而且对激光腔整体温控, 温度控制在 $(25.0 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ 。激光输出功率使用 Newport 公司的 2832c 功率计测量。旋转格兰棱镜测量激光的消光比。

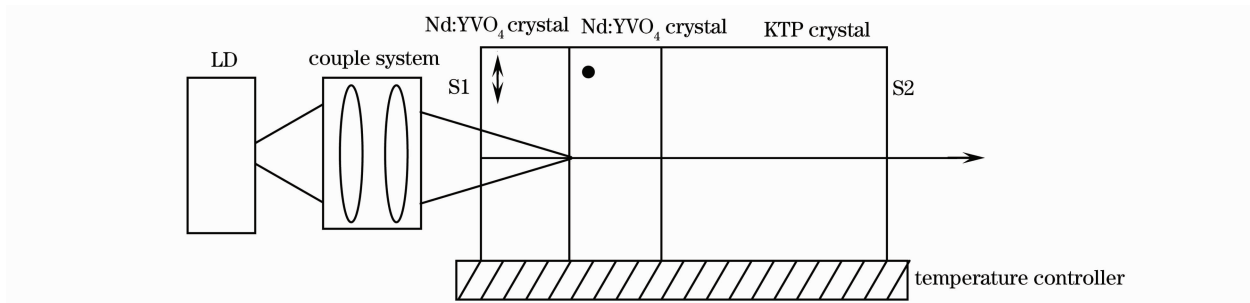


图 3 高偏振度绿光激光器实验装置图

Fig. 3 Schematic diagram of high polarization ratio green laser

通过控制 LD 的温度, 使其发射波长与 Nd:YVO₄ 晶体的中心吸收波长 808 nm 一致。在不同抽运功率

下, 绿光输出功率变化情况如图 4 所示, 激光阈值约为 200 mW, 在抽运功率为 1.8 W 时, 绿光输出功率为

336 mW,其光-光转换效率为 18.7%,由于 Nd:YVO₄ 晶体对抽运光的饱和吸收,随着抽运光的继续增大,绿光输出功率反而略有下降。同时,旋转格兰棱镜,分别测量通过棱镜后绿光的最大功率值和最小功率值,得出绿光的偏振比为 110:1,比普通 Nd:YVO₄/KTP 激光器输出绿光的偏振比提高了近 100 倍。

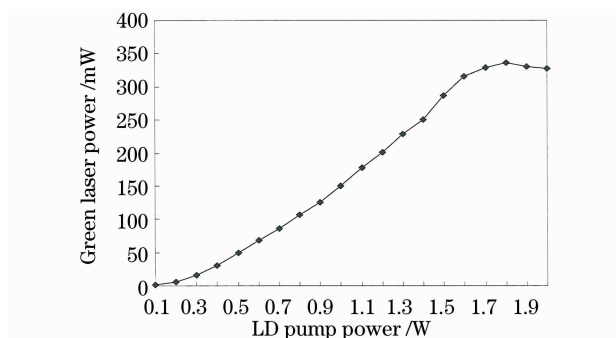


图 4 输出绿光功率随 LD 抽运功率的变化曲线

Fig. 4 Relationship of green laser output power and pump power

4 结 论

在保持直腔结构,且几乎不改变激光器的制作工艺下,使用两光轴相互垂直的 Nd:YVO₄ 晶体作为激光介质,消除单块 Nd:YVO₄ 晶体对绿光的退偏作用,有效地提高了输出绿光的偏振度,其偏振比为 110:1;同时,在 1.8 W 抽运功率时,输出绿光功率为 336 mW,光-光转换效率为 18.7%。该方法是一种简单而有效的提高激光器偏振度的方法,在实际生产制造激光器上有一定的实用价值。

参 考 文 献

- David G. Matthews, Richard S. Conroy, Bruce D. Sinclair. Blue microchip laser fabricated from Nd:YAG and KnBO₃[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(3): 198~200
- P. Zeller, P. Peuser. Efficient multi-watt continuous-wave laser operation on the ⁴F_{3/2}-⁴I_{9/2} transitions of Nd:YVO₄ and Nd:YAG [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1): 34~36
- Li Yimin, Tan Huiming, Fu Xihong *et al.*. Characteristics of intracavity-frequency-doubled Nd³⁺:GdVO₄/LBO deep blue 456 nm laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1308~1312
李义民,檀慧明,付喜宏等. 腔内倍频 Nd³⁺:GdVO₄/LBO 深蓝 456 nm 激光器的工作特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1308~1312
- V. Gaebler, B. N. Liu, H. J. Eichler. Efficient blue CW Nd:YAG microchip laser with two intracavity frequency doublers[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(18): 1343~1345
- Chang Dongxia, Liu Xia, Wang Yu *et al.*. All-solid-state CW intracavity frequency-doubled and frequency-stabilized Nd:YVO₄/LBO red laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 323~327
常冬霞,刘侠,王宇等. 连续波 Nd:YVO₄/LBO 稳频倍频红光全固态激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 323~327
- Louis McDonagh, Richard Wallenstein. Low-noise 62 W CW intracavity-doubled TEM₀₀ Nd:YVO₄ green laser pumped at 888 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(7): 802~804
- Zhang Juncheng, Wang Jiexian, Su Peilin *et al.*. Theoretical and experimental study of LD pumped Nd:YVO₄ yellow laser with sum-frequency generation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2365~2369
张峻诚,王加贤,苏培林等. 激光二极管抽运 Nd:YVO₄ 和频黄光激光器的理论及实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2365~2369
- P. K. Mukhopadhyay, S. K. Sharma, K. Ranganathan *et al.*. Efficient and high-power intracavity frequency doubled diode-side-pumped Nd:YAG/KTP continuous wave (CW) green laser[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **259**(2): 805~811
- Tang Xiaohui, Chen Xianfeng, Hu Qiquan *et al.*. A way to increase polarization ratio of LD pumped green laser[J]. *Laser & Infrared*, 2009, **39**(9): 931~933
汤晓晖,陈险峰,胡企铨等. 提高 LD 端泵绿光激光器偏振比的方法[J]. *激光与红外*, 2009, **39**(9): 931~933
- J. F. Bisson, O. Parriaux, J. C. Pommier *et al.*. A polarization-stabilized microchip laser using a resonant grating mirror[J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **85**(4): 519~524
- Y. Kozawa, K. Yonezawa, S. Sato. Radially polarized laser beam from a Nd:YAG laser cavity with a c-cut YVO₄ crystal[J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **88**(1): 43~46
- Dehua Li, Changhong Zhu, Volker Gaebler *et al.*. Theoretical and experimental studies of noise suppression for intracavity frequency doubled lasers with phase matching type I or II [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **189**(4-6): 357~364
- Shi Hongsheng, Zhang Ge, Shen Hongyuan. Measurement of principal refractive indices and the thermal refractive index coefficients of yttrium vanadate[J]. *J. Synthetic Crystals*, 2001, **30**(1): 85~88
史宏声,张戈,沈鸿元. 钒酸钇晶体折射率与折射率温度系数的测定[J]. *人工晶体学报*, 2001, **30**(1): 85~88