

采用双折射晶体实现大功率半导体列阵激光器偏振复合*

韩淋**, 刘媛媛, 王翠鸾, 吴芃, 冯小明, 王晓薇, 刘素平, 马晓宇

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要:根据大功率半导体列阵激光器输出光束的偏振特性, 基于偏振复用的原理, 利用双折射晶体 YVO_4 进行两只大功率半导体列阵激光器的偏振合束研究。利用按照理论计算值生长的双折射晶体和特殊设计的光路系统实现功率复用效率 66%, 经过耦合镜聚焦后得到光斑大小为 $1.25 \text{ mm} \times 0.12 \text{ mm}$, 功率密度为 $2.74 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 。

关键词:双折射晶体; YVO_4 ; 列阵半导体激光器; 偏振复合

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2008)12-1576-04

Polarization multiplexing of high power diode laser arrays by using a birefringent crystal

HAN Lin**, LIU Yuan-yuan, WANG Cui-luan, WU Peng, FENG Xiao-ming,

WANG Xiao-wei, LIU Su-ping, MA Xiao-yu

(Institute of semiconductors, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 10083, China)

Abstract: According to the polarization characteristics of high power diode laser arrays, and the polarization multiplexing theory. The polarization multiplexing of two high power diode laser arrays is performed by using a YVO_4 birefringent crystal. The power efficiency of 66% is achieved. The light spot of $1.25 \text{ mm} \times 0.12 \text{ mm}$ is achieved by focusing lens, and the power density is $2.74 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$.

Key words: birefringent crystal; YVO_4 ; laser diode array; polarization multiplexing

1 引言

大功率半导体激光器以其高转换效率、长寿命、高可靠性、结构紧凑等优点在越来越多的领域获得广泛的关注, 在诸如工业加工领域、作为固体激光器或光纤激光器的泵浦源以及激光医疗中都有重要应用^[1-4]。但是一直以来, 半导体激光器固有的弱点, 光束质量很差, 光亮度低, 限制了其在这些领域内的应用, 进一步提高大功率半导体激光器的光亮度始终是国内外研究的热点^[5]。利用光学手段对大功率半导体激光器进行光束复合就是一种常用的提高光亮度的方法, 常见的非相干多光束复合技术包括: 空间复合、波长复合和偏振复合^[6]。对于偏振复合技术, 利用偏振光束分束器 (polarization beam splitter) 实现光束复合国外早有报道^[7,8], 技术成熟, 国内也有对两个半导体激光器单管器件进行复合的研究^[9], 而利用双折射晶体实现光束复合仅见国外报道过^[10], 这主要是因为利用偏振复合晶体是较为简单、容易实现的方法, 但是国内加工的偏振复合晶体造价高、激光破坏阈值功率较低, 如果在更大光功率应用场合下, 如叠层大功率半导体激光器偏振复合等则不能使用。 YVO_4 晶体是一种目前在国内生长、加工技术比较成熟, 造价低, 在很宽波段具有高光透过率的高双折射晶体, 同时对于波

长不敏感, 这为进一步多波长偏振复合应用提供了可能, 因此利用双折射晶体实现光束偏振复合具有很大发展前景, 本文为在国内首次实现该复合技术。

本文对线列阵大功率半导体激光器的偏振复合技术进行研究, 利用双折射晶体实现两只线列阵半导体激光器复合, 并用耦合聚焦镜对复合后的光束聚焦, 聚焦后的光斑尺寸为 $1.25 \text{ mm} \times 0.12 \text{ mm}$, 功率密度为 $2.74 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 。

2 理论分析

非相干多光束复合即在保证多束光束的光束质量不变的前提下, 将多束光束合为一束, 这样一来, 输出功率提高了数倍, 而光束质量基本不变, 从而得到高亮度光束输出。偏振复合是非相干光束复合技术中的一种, 是指将偏振方向互相垂直的两束线偏振光利用光学手段合为一束。

应变量子阱大功率半导体激光器输出光束具有很高的线偏振度, 这是实现偏振复合的基础。对于压应变量子阱激光器, TE 模的增益总是大于 TM 模的, 这是因为此时的价带的子带顶是重空穴带, 注入空穴大部分占据第 1 重空穴带能级, 而对于第 1 导带到第 1 重空穴带的光跃迁总是有利于 TE 模, 因为相应的动量矩阵元平方值大^[11]。本实验所用压应变大功率

* 收稿日期: 2008-02-23 修订日期: 2008-07-11

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60576041)

** E-mail: hlin@semi.ac.cn

半导体激光器芯片为 TE 模为主输出。

双折射晶体实现偏振复合的原理是:单轴晶体沿光轴方向具有反常折射率 n_e ,沿垂直于光轴方向具有寻常折射率 n_o ,如图 1 所示,在双折射晶体内,自然光波被分解成光矢量互相正交的线偏振光传播。一束部分偏振光以垂直于晶体并与光轴夹角为 θ 方向入射,会分成两束偏振方向互相垂直的线偏振光,一束光沿原方向在晶体中传输(o 光),一束偏离原来方向(e 光),两束光的偏移角为 ρ 。出射后,两束光传输方向平行,并偏移一段距离 d 。因此根据光路可逆原理,如果两束偏振方向互相垂直的线偏振光以互相平行的位置并相距 d 入射,则会在出射面得到合并成一束的部分偏振光,即偏振合束。

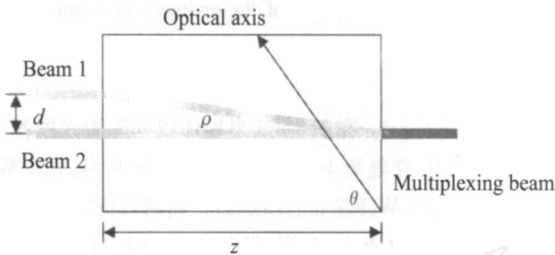


图 1 双折射晶体偏振合束示意图
Fig.1 schematic diagram of polarization multiplexing by a birefringent crystal

双折射晶体的折射率椭圆公式为

$$\frac{1}{n^2(\theta)} = \frac{\cos^2 \theta}{n_o^2} + \frac{\sin^2 \theta}{n_e^2} \tag{1}$$

偏移角为

$$\tan \rho = \frac{n^2(\theta)}{2} \left(\frac{1}{n_o^2} - \frac{1}{n_e^2} \right) \sin 2\theta \tag{2}$$

计算可得,当

$$\tan \theta = \frac{n_e}{n_o} \tag{3}$$

此时, ρ 最大,并有

$$\tan \rho = \frac{n_e^2 - n_o^2}{2n_o n_e} \tag{4}$$

$$\rho = \tan^{-1} \frac{n_e}{n_o} \tag{5}$$

因此,如果设计双折射晶体的光轴方向为与光束传播方向成 $\theta = \tan^{-1} \frac{n_e}{n_o}$ 的方向时,可以得到最大偏移角,即对于一定长度的双折射晶体,一束入射的部分偏振光可以得到两束偏移最大的线偏振光出射。

YVO₄ 晶体是一种高双折射晶体, n_e 与 n_o 相差约 0.2,因此可以得到较大的偏移角,同时 YVO₄ 晶体有良好的温度稳定性,在很大的波长范围内透射率较高(400 ~ 5 000 nm),晶体容易生长、加工,因此我们选择 YVO₄ 晶体加工该双折射偏振合束器。

YVO₄ 晶体的折射率公式为

$$n_o^2 = 3.77834 + 0.069736 / (\lambda^2 - 0.04724) \tag{6}$$

$$0.0108133 \times \lambda^2 \tag{6}$$

$$n_e^2 = 4.59905 + 0.110534 / (\lambda^2 - 0.04813) \tag{7}$$

$$0.0122676 \times \lambda^2 \tag{7}$$

当 $\lambda = 950 \text{ nm}$ 时, $n_o = 1.9622$, $n_e = 2.1719$,根据公式(3),得到 $\theta = 47.9^\circ$,然后根据公式(4),得到 $\rho = 5.8^\circ$ 。

YVO₄ 晶体的设计如图 1 所示,则有

$$\tan \rho = \frac{d}{z}$$

d 表示两束线偏振光的偏移量, z 表示 YVO₄ 晶体的长度,如果 $d = 2 \text{ mm}$,可以计算得到 $z = 19.65 \text{ mm}$ 。我们的实际加工尺寸为 $z = 20 \text{ mm}$,此时 $d = 2.03 \text{ mm}$ 。

3 实验

首先,我们利用 $\lambda/2$ 波片和偏振分束器(PBS 晶体, polarization beam splitter)对 950 nm 列阵半导体激光器进行了偏振特性测量,光路如图 2 所示。列阵半导体激光器首先利用准直透镜对快慢轴发散角准直后,输出的光经过一个 $\lambda/2$ 波片和 PBS 晶体,被功率计接收,列阵半导体激光器输出的部分偏振光由 TE 模和 TM 模两部分组成,它们是振动方向互相垂直的线偏振光。转动 $\lambda/2$ 波片,读取功率计读数最大值和最小值,分别对应一种偏振方向的光的功率大小。半导体激光器的偏振度定义为: $P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$, P 为偏振度, I 为光强。实验测得: $P = 99.05\%$,因此实验所用的列阵半导体激光器具有很高的偏振度,可以认为是线偏振光。

首先,我们利用 $\lambda/2$ 波片和偏振分束器(PBS 晶体, polarization beam splitter)对 950 nm 列阵半导体激光器进行了偏振特性测量,光路如图 2 所示。列阵半导体激光器首先利用准直透镜对快慢轴发散角准直后,输出的光经过一个 $\lambda/2$ 波片和 PBS 晶体,被功率计接收,列阵半导体激光器输出的部分偏振光由 TE 模和 TM 模两部分组成,它们是振动方向互相垂直的线偏振光。转动 $\lambda/2$ 波片,读取功率计读数最大值和最小值,分别对应一种偏振方向的光的功率大小。半导体激光器的偏振度定义为: $P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$, P 为偏振度, I 为光强。实验测得: $P = 99.05\%$,因此实验所用的列阵半导体激光器具有很高的偏振度,可以认为是线偏振光。

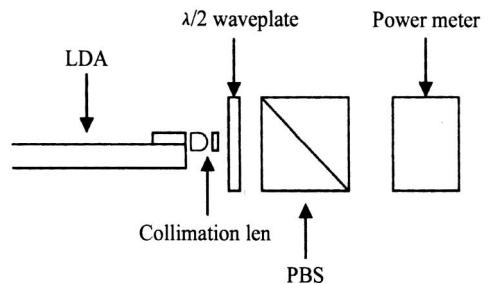


图 2 列阵半导体激光器偏振度测量示意图
Fig.2 schematic diagram of polarization degree measurement for a diode laser array

利用双折射晶体进行偏振合束的光路示意图如图 3 所示, LDA₁ 和 LDA₂ 为两只列阵半导体激光器,输出光束为线偏振光且偏振方向相同, LDA₁ 和 LDA₂ 经过准直透镜准直,准直后的远场快轴发散角为 7 mrad,远场慢轴发散角为 80 mrad。LDA₁ 发出的光经过准直透镜准直后,在分光镜上反射。与 LDA₁ 放置方向垂直的 LDA₂ 发出的光利用准直透镜准直后,先经过 $\lambda/2$ 波片,使偏振方向旋转 90°,然后透射过分光镜,从而 LDA₁ 和 LDA₂ 输出的两条线形光束变成传播方向相同、光束互相平行并相差一定距离的形式,经过精细调节,两束光以垂直于双折射晶体的方向入射进入晶体,在出射面合成为一束光。

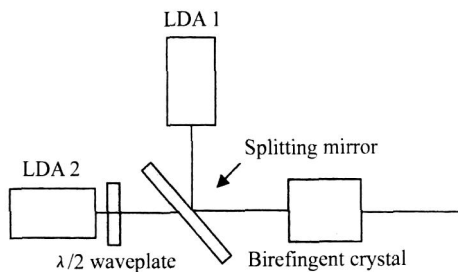


图3 双折射晶体偏振复合光路示意图

Fig. 3 beam path of polarization multiplexing by a birefringent crystal

分光镜是我们自行设计并镀膜的1片光学玻璃,结构如图4所示,在光学玻璃上,一侧镀有高反膜,则在分界线上、下,分别对光束可以实现高透和高反的功能。LDA1发出的光以45°入射到镜的分界线下,光束被反射,LDA2发出的光以45°入射到镜的分界线上,光束透过。输出的光束利用一个凸透镜成像在较远处,得到图5显示的光束,可以看到LDA1和LDA2的各个发光区都一一重叠起来,实现了偏振复合。利用耦合镜聚焦后的光斑如图6所示。

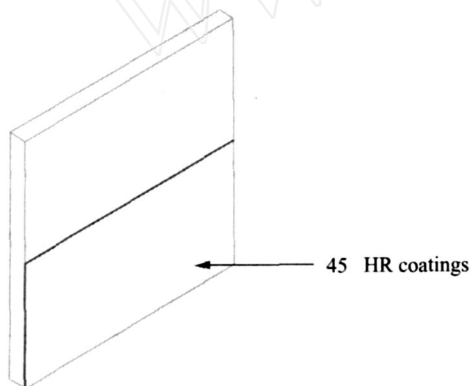


图4 分光镜结构示意图

Fig. 4 schematic diagram of the splitting mirror

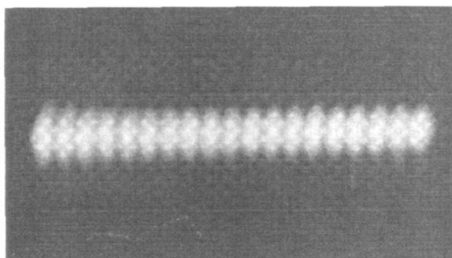


图5 双折射晶体偏振复合光束图

Fig. 5 Polarization multiplexing beam of two diode laser arrays

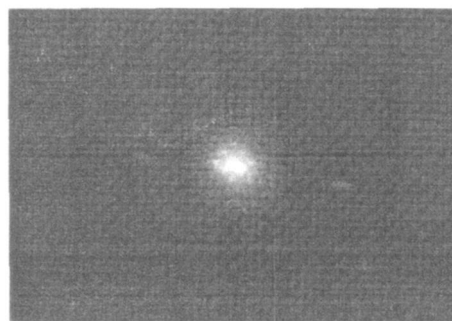


图6 聚焦光斑

Fig. 6 focusing spot of the multiplexing beam

4 结果与分析

我们选用953 nm和963 nm半导体线阵列激光器各1只,均为TE模激射,在电流40 A下,输出功率分别为:32.8 W(953 nm,LDA1)、30.33 W(963 nm,LDA2)。利用双折射晶体进行双光束偏振复合,在电流40 A下,得到输出功率41.6 W,偏振复合系统的复合效率为66%,其中实验测得分光镜的效率为84.4%,双折射晶体的效率为79%。经过耦合聚焦镜后,测得光功率为40.7 W。利用刀口法测量了耦合聚焦镜得到的聚焦光斑快轴方向和慢轴方向的束腰,快轴束腰宽度为119 μm,慢轴为1250 μm,因此得到功率密度为2.74 × 10⁴ W/cm²的聚焦光斑。单个列阵半导体激光器直接用耦合聚焦镜聚焦后的光斑,快轴束腰宽度为104 μm,慢轴为1240 μm,可以看出经过偏振复合之后的光束质量没有明显变化,因此如果进一步提高系统的复合效率就可以提高输出光亮度。

分析实验结果,整个复合系统的效率较低是由以下3方面原因造成的:

1) 分光镜的效率较低。主要原因在于:实验所用的分光镜45°高反射膜的反射率为90%,在光束透射区没有增镀高透膜,所用衬底K9玻璃的固有光透过率为92%,这造成了对LDA1透射率不够高、对LDA2反射率不够高,影响了复合效率,通过优化高反射介质膜参数,在光束透射区增镀高透膜可以提高分光镜的效率。另一方面,根据前面理论计算,可以知道两束光互相平行入射进入双折射晶体时,两束光的距离为2 mm左右,线阵列半导体激光器的输出光束在出光处约为0.8~1 mm,此时两束光已经非常接近,分光镜的高反射区和高透射区的分界线如果不够分明,就会造成LDA1和LDA2的光有一部分互相交错,同时列阵半导体激光器光束的微笑效应会造成远场光束的弯曲,光程越长,这种微笑弯曲会越大,造成在分光镜的高反射区和高透射区的分界线上,光束没有严格平行于此分界线,导致分光镜效率不高,因此分光镜的制作工艺以及半导体激光器的微笑效应改善也能够提高分光镜效率。预计通过上述工艺的改善,分光镜效率可以达到90%以上。

2) 双折射晶体没有镀高透膜,实验中测得YVO₄的光透过率为79%,可以通过镀增透膜的方法提高双折射晶体的复合效率,预计可以达到90%以上。

预计通过对分光镜介质膜层的结构优化、双折射晶体增镀

高透膜,系统的偏振复合效率可以提高到 80%,功率密度可以达到 $3.3 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 。

参考文献:

- [1] Georgiou E, Musset Q, et al. High efficiency and high output pulse energy performance of a diode-pumped Er:Yb:glass 1.54 μm laser[J]. Appl Phys B, 2000, 70(6): 755-762.
- [2] Konno S, Fujikawa S, et al. 80 W CW TEM00 1.064 nm beam generation by use of a laser diode side-pumped Nd:YAG rod laser[J]. Appl Phys Lett, 1997, 70(20): 2650-2651.
- [3] SHI Zhao-hui, NIU Gang, ZHANG Ying, et al. High repetition rate and high power double Nd:YVO₄ all-solid-state TEM00 lasers[J]. Journal of Optoelectronics · Laser(光电子 · 激光), 2006, 17(7): 845-848. (in Chinese)
- [4] KONG Yuan-yuan, ZENG Xiao-dong, AN Yir-ying, et al. Study on the beam shaping of high-power LD bar arrays[J]. Journal of Optoelectronics · Laser(光电子 · 激光), 2006, 17(4): 406-409. (in Chinese)
- [5] Loosen P, Ebert T, Jandeleit J, et al. Packaging high-power diode-laser bars using micro channel copper mounts[M]. IEEE Lasers and Electro Optics Society Annual Meeting, 1998, LEOS 98. IEEE[C]. Orlando, FL: IEEE, 1998, 434-435.
- [6] Roland Diehl (Ed.), High Power Diode Lasers, Springer-Verlag, 2000. 309-310.
- [7] Friedhelm Dorsch, Franz X. Daiminger, Petra Henning, et al. 2 kW cw fiber-coupled diode laser system[A]. Proc SPIE, 3889[C]. 2000, 45-53.
- [8] Treusch H G, Keming Du, Baumann M, et al. Fiber-coupling technique for high-power diode laser arrays[A]. Proc SPIE, 3267[C]. 1998, 98-106.
- [9] MA Xiao-hui, WAN Chur-ning, SHI Quar-lin, et al. Fiber-coupled high power laser diode by polarization multiplexing[J]. Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2007, 34(10): 1343-1346. (in Chinese)
- [10] Alexander Knitsch, Axel Luft, Tobias Gro, et al. Diode laser modules of highest brilliance for materials processing [A]. Proc SPIE, 4651 [C]. 2002, 256-263.
- [11] JIANG Jiar-ping. Semiconductor laser[M]. Beijing: Publishing house of electronics industry, 2000, 217-218. (in Chinese)

作者简介:

韩 淋 (1980 -), 女, 博士研究生, 主要从事大功率半导体激光器波长和偏振复合及光束整形技术研究。