

文章编号 1004-924X(2009)01-0008-06

808 nm 和 980 nm 半导体激光迭阵波长耦合技术

顾媛媛^{1,2}, 冯广智^{1,2}, 单肖楠^{1,2}, 邓鑫李^{1,2}, 尹红贺¹, 刘云¹, 秦莉¹, 王立军¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:为提高半导体激光器输出光功率,可将多个半导体激光器输出光束耦合成一束激光直接输出或者由光纤耦合输出,以提高半导体激光源的亮度及光束质量。本文采用波长耦合技术进行激光合束,将两种不同波长的半导体激光束通过非相干技术经波长耦合器件耦合输出以实现大功率高效率输出。介绍了非相干耦合技术中波长耦合原理及关键技术,根据波长需要设计了耦合器件,并自行设计光学系统对光束进行扩束聚焦。实验将 808 nm 和 980 nm 两半导体激光迭阵光束通过上述技术进行合束,最终实现了更高功率输出,耦合效率达 70%,光斑大小为 3 mm×3 mm,可满足将半导体激光器直接应用于熔覆、焊接等场合的要求。

关键词:激光技术;半导体激光器;非相干耦合;波长耦合

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A

808 nm and 980 nm high power laser diode stack with wavelength coupling

GU Yuan-yuan^{1,2}, FENG Guang-zhi^{1,2}, SHAN Xiao-nan^{1,2},
DENG Xin-li^{1,2}, YIN Hong-he¹, LIU Yun¹, QIN Li¹, WANG Li-jun¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: High-power laser diodes based on GaAs semiconductor bars are well established as reliable and highly efficient laser sources. As increasing applications of semiconductor lasers in the laser processing, the single laser diode optical power has not satisfied for the actual requirements. In this paper, the improving laser output methods to couple several diode laser beams into one beam or to couple laser beams by an optical fiber to output directly to improve the brightness were researched and the principle and key technique for wavelength coupling in inherent coupling were introduced. The wavelength coupling technology was used to couple two laser beams with wavelength of 808 nm and 980 nm together, the beam splitter cube and optical focusing lens were designed for the experiment. Experimental results show that the overall efficiency is about 70% and spot size about 3 mm×3 mm, which can satisfy the system application requirements for metal cladding and welding directly.

Key words: laser technique; laser diode; incoherent beam coupling; wavelength coupling

收稿日期: 2008-05-14; 修订日期: 2008-07-10.

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目; 吉林省科技厅省长基金资助项目 (20075001); 吉林省与中科院院地合作资助项目 (2007SYHZ0030); 中科院装备预先研究资助项目 (61501060108); 科技部国际合作资金资助项目 (2006DFA12600)

1 引言

大功率半导体激光器由于其在光电转换效率、输出功率、使用寿命等方面的优势,取代闪光灯泵浦固体激光的趋势已经初见端倪,这不仅仅是技术上的巨大进步,更重要的是它还将带来巨大的经济和社会效益。此外,大功率半导体激光在工业加工中的直接应用也日渐成为热点,如在热处理、焊接、切割、打标、涂覆、合金化和表面硬化等方面应用,但这些都要求半导体激光器具有更高的功率密度,在许多材料加工应用中,甚至要求功率密度在数十 kW/cm^2 以上^[1]。

通过改善输出功率和光束质量可得到更大亮度的激光输出,在功率不变的情况下,通过提高光束质量,使光斑变小,可获得较高的功率密度。目前,已研发多种技术对半导体激光器进行光束整形以期提高光束质量,如双平面反射镜法^[2]、阶梯反射镜法^[3]、多棱镜阵列法^[4]、棱镜组折反射整形^[5]、微片棱镜堆法^[6];另一种方法是在光束质量一定的情况下,将多个半导体激光选阵模块的输出光束耦合成一束激光输出,从而成倍增加输出功率密度。光束耦合的方法主要有三种:空间耦合、偏振耦合和波长耦合。本文主要介绍波长耦合技术原理,根据实际半导体激光选阵参数,设计波长耦合器件结构,并采用该技术实现了 808 nm 和 980 nm 半导体激光选阵的高亮度输出,国内尚没有对该技术进行相关报道。

2 基本原理和实验装置

2.1 波长耦合实验原理

半导体激光器的激射波长是最重要的参数之一,主要由材料组分、量子阱宽度、应变等因素决定^[7]。根据量子电子学原理,有源层为四元系化合物($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$),其能带宽度 E_g 与组分 x, y 的关系原则上都可按照佛迦定律求出。器件的激射波长简单计算公式如下^[8]:

$$\lambda = \frac{1.239}{E_g}, \quad (1)$$

$$E_g = xyE_{\text{InAs}} + x(1-y)E_{\text{InP}} + (1-x)yE_{\text{GaAs}} + (1-x)(1-y)E_{\text{GaP}}, \quad (2)$$

式中, λ 为激射波长, E_g 为 PN 结带隙能量, x, y

分别为有源层中 In、As 的含量; E_{InP} 为 InP 间的禁带宽度, E_{GaAs} 为 GaAs 间的禁带宽度, E_{GaP} 为 GaP 间的禁带宽度。由于该组件采用量子阱结构,上述材料计算出的波长参数需进行调整和修正。考虑到量子阱材料的量子尺寸效应,光子能量可表示如下:

$$h\nu = E_g + E_n + E_{\text{hhv}}, \quad (3)$$

式中, E_n 为能量本征值,当阱深为 V_0 时,势阱中载流子的能量本征值应满足以下方程^[9]:

$$\frac{\sqrt{m_w E_n}}{\hbar} L_z = n\pi - 2\arcsin \sqrt{\frac{m_w E_n}{V_0 m_B^* + E(m_w^* - m_B^*)}}, \quad (4)$$

当阱深无穷大时,上式简化为:

$$E_n = \frac{n^2 \pi \hbar^2}{2m^* L_z^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (5)$$

式中: L_z 为势阱宽度, m^* 为载流子有效质量, \hbar 为普朗克常数。

用于材料加工的大功率半导体激光器波长并不单一,受一定范围限制($\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}} \leq 200 \text{ nm}$),这是因为在此范围内金属光学性质不会产生明显改变,另一方面,半导体激光器的发射波长可由量子阱结构进行调整。这样就为大功率半导体激光器提供了另一种高亮度方法:通过选择不同的发射波长并利用波长选择器件将不同激光波长耦合在同一路径中。采用该耦合技术可将 2~5 个选阵模块耦合一起,其亮度实际可提高 1.7~4.7 倍。依据其在泵浦固态激光器中应用,目前,主要使用波长为 808 nm、940 nm、980 nm 的光束进行耦合,其他的波长正处于考察中^[10]。如图 1 所示,不同波长的半导体激光器输出光束经波长选择器件进行合束,波长选择器一面镀有高反射膜,

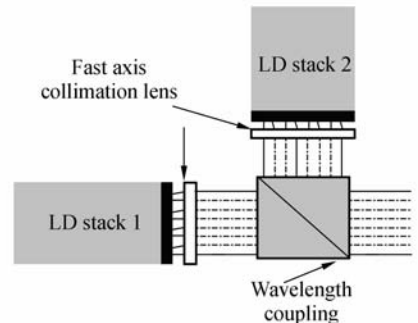


图 1 波长耦合技术原理图

Fig. 1 Principle of wavelength coupling

另一面镀有高透膜,合成光束再与另一波长半导体激光束耦合输出。由于输出光为多个波长的耦合,此技术可应用加工场合,也可用于有多个吸收峰的激光材料的泵浦,例如,掺 Yb 的激光晶体或光纤。

2.2 立方体偏振分光耦合器件

实验用波长耦合器是由两个三角棱镜胶合而成的立方体,如图 2 所示。它由两个等腰直角三

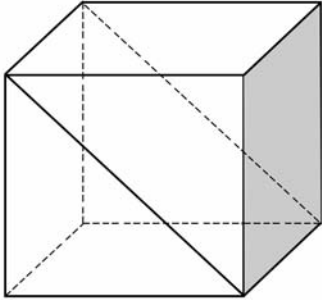


图 2 波长耦合器

Fig. 2 Beam splitter coupling for wavelength

棱柱镜胶合而成,在三角棱镜的斜面上镀分束膜,利用二向分色镜原理逆向使用,使 808 nm 半导体激光以 45° 入射在斜面上实现全透射,而对 980 nm 激光当以 45° 入射在该斜面上时发生全反射,采用 K9 玻璃作为基底,在其上用高低折射率交替的 $\lambda/4$ 的介质膜系,能够得到高反射率。若 n_H 和 n_L 是高低折射率层的折射率,并使介质膜系两边的最外层都是高折射率层,则其等效光纳为:

$$Y = \left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2p} \cdot \frac{n_s^2}{n_s}, \quad (6)$$

式中: Y 为膜层的等效导纳, n_s 为基片的折射率; $(2p+1)$ 为膜系的层数。

在空气中或在自由空间,反射率则为:

$$R = \left[\frac{1 - \left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2p} \left(\frac{n_H^2}{n_s}\right)}{1 + \left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2p} \left(\frac{n_H^2}{n_s}\right)} \right]^2, \quad (7)$$

层数越多,反射率越大。若层数给定奇数,则用高折射率层作最外层,总是得到最大的反射率。如果:

$$\left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2p} \left(\frac{n_H^2}{n_s}\right) \gg 1,$$

$$\text{则: } R \approx 1 - 4 \left(\frac{n_L}{n_H}\right)^{2p} \cdot \frac{n_s}{n_H^2},$$

$$\text{因而: } T = 1 - R \approx 4 \left(\frac{n_L}{n_H}\right)^{2p} \cdot \frac{n_s}{n_H^2}, \quad (8)$$

式中: T 为透过率。这表明,当膜系的反射率很高时,额外加镀两层将使膜系的透射率缩小 $[(n_H/n_L)^2]$ 倍^[11],从而满足 980 nm 激光束经耦合器件时实现 95% 以上的反射。采用类似的方法使 808 nm 实现较高的透射率。

采用由三角柱镜胶合而成的立方体作为波长耦合器,其最大的优点为实验中更易于调节光路,由于实验中涉及到两束激光需要垂直入射到波长耦合器表面,采用立方体形状更易于调节控制光束传播方向并且稳定性好。

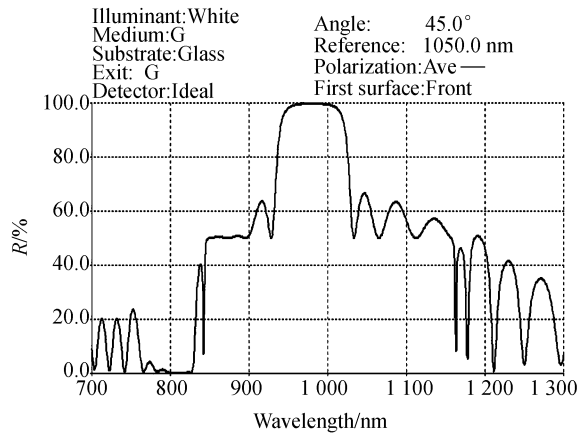


图 3 波长耦合器对 808 nm 和 980 nm 的透过率曲线
Fig. 3 Curve of beam splitter cube for 808 nm and 980 nm

实验中 808 nm 和 980 nm 半导体激光选阵耦合实验所使用的波长耦合器件对 808 nm 半导体激光束的透过率 $> 90\%$, 而对 980 nm 激光器可实现 95% 以上的反射率。图 3 是本文设计使用 808 nm 及 980 nm 半导体激光器波长耦合器件的透过率与波长的关系曲线。

3 实验装置及技术

实验用半导体激光选阵由两层线阵组成,该线阵在垂直于 p-n 结的方向上发光区宽约 $1 \mu\text{m}$, 输出光束的发散角为 38° , 这一方向即所谓“快方向”;在平行于 p-n 结的方向上发光区宽约 10 mm, 发散角约为 10° , 即所谓“慢方向”。由于快轴光斑发散角过大,需首先采用光纤柱透镜对快轴光斑进行准直。多模光纤除去覆盖层可以制成性能良好的柱透镜,根据近轴近似,圆形柱透

镜焦距为:

$$F = (nR) / [2 \times (n - 1)] , \quad (9)$$

式中, n 为柱透镜材料折射率($n > 1$); R 为柱透镜的光学面曲率半径; F 为焦距(距中心点)^[12]。当 $n = 2$ 时,焦点正好位于透镜的光学表面上。石英材料具有较大的折射率($n = 1.8$),对发射光源具有最大的汇集能力(光纤芯与结线平行),因此将石英光纤芯贴装于 LD 发射表面适当距离可以大大压缩其垂直于结平面方向上的光束发射角,实现大功率 LD 输出光束的预准直,如图 4。由于光束的入射角度很大,在入射表面产生菲涅尔反射,一部分光线没有耦合进柱透镜。但是由于半导体激光器发光面与光纤棒之间的距离非常小,一般为几十微米或几百微米,这种损耗表现得不是十分明显,所以耦合效率比较高,可达到 90% 以上。为进一步提高此环节的耦合效率,可以在柱透镜表面蒸镀一层与半导体激光器发出光束波长相匹配的增透膜,减少因发生菲涅尔衍射而引起的能量损耗。

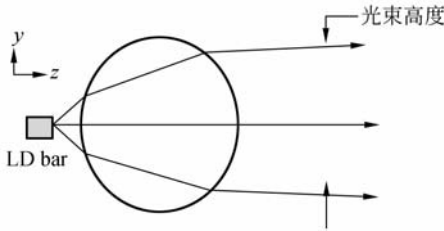


图 4 石英光纤透镜对半导体激光器的准直
Fig. 4 Collimating LD by silica fiber lens

4 实验结果及讨论

本实验中波长耦合技术的装置如图 5 所示。实验采用发射中心波长为 808 nm 和 980 nm 的双 bar 半导体激光选阵,其每 bar 可实现 40 W 连续激光输出,将两束激光中每 bar 分别进行快轴准直,在此利用准直透镜可将快轴发散角降至 0.60,输出光斑均为长条形,输出光束再经波长耦合器进行合束后其效率在 88% 以上,此时耦合光束的输出光束尺寸较大。为获得较小光斑,本文首先采用两平凸柱透镜实现准直扩束,再经非球面透镜进行聚焦输出,光斑大小可达 3 mm × 3 mm,经 CCD 拍摄图像如图 6 所示。经反复测量总体效率可达 70%。

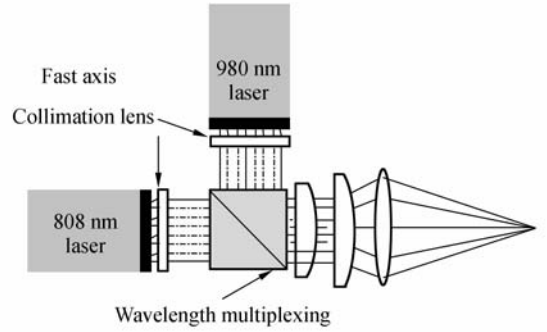


图 5 双波长耦合技术
Fig. 5 Technology of two wavelength coupling



图 6 实验聚焦获得 3 mm × 3 mm 光斑
Fig. 6 Spot size 3 mm × 3 mm after focus lens

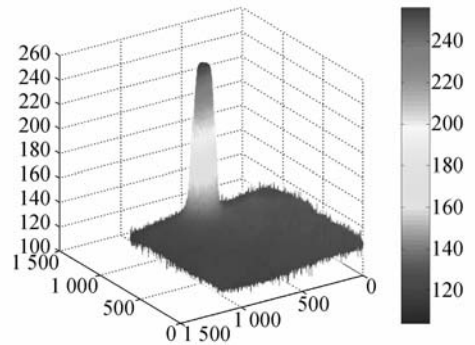


图 7 实验聚焦获得 3 mm × 3 mm 光斑强度及轮廓图
Fig. 7 Profile of spot size after focus lens

图 7 为实验测得光斑强度的轮廓图,由图可以看出,所得光斑平整度高,能量集中,最高能量处近为平顶分布,有利于激光加工直接应用;能量最高处轮廓接近圆形,有较好的外形。分析实验中的能量损失,主要表现在以下几个方面:光束在传播过程中经过各光学器件所造成的损失;使用的聚焦球透镜没有镀增透膜,其透过效率 $<90\%$,而实际上好的光学器件的透过率都可以达到 95% 以上;光学器件位置调节的偏差造成的能量的损失。所以,在实验中应尽可能地使系统紧凑,以减少由于光束发散而引起的能量损失。

另外,实验发现,采用波长耦合技术可以改善输出光斑质量,通过调节两半导体激光束的高度,可使 808 nm 和 980 nm 激光束相间排列以填补

激光器之间空隙或重叠排列以增强光束亮度,通过增加功率可以实现直接半导体激光用于诸如激光焊接熔覆等工业加工中。

5 结 论

首次采用波长耦合技术实现了对迭阵的光束耦合。对 808 nm 和 980 nm 的半导体激光迭阵进行了耦合实验,通过非球面透镜聚焦系统可实现 $3\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 光斑输出,最终效率可达 70% 左右。为进一步使半导体激光能直接应用于工业加工中,还将增加半导体激光迭阵功率来实现更高功率输出,并设计采用有效的光学系统以期得到更小光斑,最终提高激光输出功率密度。

参考文献:

- [1] STEFAN H, LARS L. Fiber coupled diode lasers and beam-shaped high-power stacks [J]. *SPIE*, 1998, 3267: 116-124.
- [2] CLARKSON W A, HANNA D C. Two mirror beam shaping technique for high power diode bars [J]. *Opt. Lett.*, 1996, 21(6): 375-380.
- [3] EHLERS B, DU K, BAUMANN M, *et al.*. Beam shaping and fiber coupling of high-power diode laser arrays [J]. *SPIE*, 1997, 3097: 545-548.
- [4] YAMAGUCHI S. Collimation of emissions from a high-power multistripe laser-diode bar with multi-prism array coupling and focusing to a small spot [J]. *Opt. Lett.*, 1995, 20(8): 898-901.
- [5] WANG P Y, GHEEN A, WANG Z. Beam shaping technology for laser diode arrays [J]. *SPIE*, 2002, 4770: 131-135.
- [6] 石鹏, 李小莉, 张贵芬, 等. 大功率激光二极管的薄片棱镜堆光束整形和光纤耦合输出 [J]. *光学学报*, 2000, 20(11): 1544-1546.
SHI P, LI X L, ZHANG G F, *et al.*. Micro-prism stack beam shaper for high power laser diode array [J]. *Acta Optics Sinica*, 2000, 20(11): 1544-1546. (in Chinese)
- [7] 尧舜, 套格套, 路国光, 等. 68.5 W 连续输出 1 060 nm 波段半导体激光阵列模块 [J]. *光学 精密工程*, 2006, 14(1): 8-11.
YAO SH, TAO G T, LU G G, *et al.*. 1 060 nm wavelength high power diode array module [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 8-11. (in Chinese)
- [8] ONO H, YAMADA M, KANAMORI T, *et al.*. 1.58 μm band gain—flattened erbium-doped fiber amplifiers for WDM transmission systems [J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1999, 17(3): 490-496.
- [9] FLOOD F A. L-band erbium-doped fiber amplifiers [C]. Proc. OFC'00, Baltimore, USA, 2000, WG1.
- [10] FRIEDRICH B. Present technology, industrial applications and future prospects of high power diode lasers [J]. *SPIE*, 2002, 4762: 1-15.
- [11] H. A. 麦克劳德. 光学薄膜技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1974.
MACLEOD H A. *Thin-Film Optical Filters* [M]. Beijing: National Defense Press, 1974. (in Chinese)
- [12] 薄报学, 曲轶. 高功率阵列半导体激光器的光纤耦合输出 [J]. *光电子·激光*, 2001, 12(5): 468-470.
BO B X, QU Y. High-power LD arrays with fiber output coupling [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2001, 12(5): 468-470. (in Chinese)

作者简介:



顾媛媛(1981—),女,山东济宁人,博士研究生,主要从事大功率半导体激光器光束耦合技术方面的研究。E-mail: guyuanciomp@163.com

冯广智(1984—),男,黑龙江伊春人,硕士研究生,主要从事大功率半导体激光器光束耦合技术方面的研究。E-mail: fengguangzhi@yahoo.com.cn

单肖楠(1979—),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事大功率半导体激光封装技术的研究。E-mail: shanxiaon@sina.com

尹红贺(1981—),男,吉林长春人,职工,主要从事大功率

半导体激光光纤耦合技术的研究。E-mail: yinghh5678@sina.com

邓鑫李(1982—),男,山西运城人,硕士研究生,主要从事大功率半导体激光器及其应用方面的研究。E-mail: dengxlcimp@163.com

导师简介:

王立军(1946—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事大功率半导体激光及其应用方面的研究。E-mail: wanglj@ciomp.ac.cn

刘云(1960—),女,吉林长春人,副研究员,主要从事大功率半导体激光列阵技术的研究。E-mail: hx5252@sohu.com

秦莉(1969—),女,黑龙江鹤岗人,副研究员,主要从事大功率垂直腔面发射激光器及应用方面的研究。E-mail: qinl@ciomp.ac.cn

● 下期预告

慢光产生的新机理及其应用

赵勇,赵华玮,张馨元,原博,张硕

(东北大学信息科学与工程学院,辽宁沈阳 110004)

通过对比和研究电磁感应透明、相干布居振荡、受激布里渊散射和光子晶体波导等几种使光速变慢的主要技术,论述了慢光技术在这十年中重要理论和技术上的发展以及这些发展对慢光性能的改善及存在的问题与不足,重点介绍了近几年慢光产生的一些新技术及初步应用,并预测了慢光技术今后的发展趋势及潜在应用。本文的研究发现慢光在光纤传感以及其它领域中将会有越来越重要的应用价值。