

文章编号: 0258-7025(2007)11-1472-04

多单元半导体激光器的高亮度光纤耦合输出

高 欣, 薄报学, 张 晶, 王玉霞, 李 辉, 曲 轶

(长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要 设计并研制了一种多单元半导体激光器的高亮度光纤耦合输出模块。激光器芯片采用分子束外延(MBE)方法生长的宽波导、双量子阱结构 AlGaAs/GaAs 激光器外延材料, 激光器模块采用 4 只准直的单条形大功率半导体激光器, 器件腔长为 2 mm, 发光区宽度为 100 μm , 单条形器件的连续输出功率为 5.0 W, 每两只单条形器件的准直输出光束经过空间合束后再通过偏振合束, 实现了多单元器件输出的高光束质量功率合成, 采用简单的平凸透镜实现了合束光束与 100 μm 芯径、数值孔径(NA)0.22 石英光纤的高效耦合, 耦合效率高达 79%, 输出功率达 10.17 W, 光纤端面功率密度达 $1.0 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 。

关键词 激光技术; 半导体激光器; 光纤耦合; 空间合束; 偏振合束

中图分类号 TN 248.4 **文献标识码** A

High Brightness Operation of Fiber Coupling Multiplex Diode Lasers

GAO Xin, BO Bao-xue, ZHANG Jing, WANG Yu-xia, LI Hui, QU Yi

(State Key Laboratory on High Power Semiconductor Lasers,

Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract A high brightness fiber coupling laser module with multiplex diode lasers (LDs) has been designed and fabricated. The diode laser chips has been fabricated with AlGaAs/GaAs material with broad waveguide and double quantum wells structure by molecular beam epitaxy (MBE), and the module contains 4 collimated single broad area stripe diode lasers which can reach to continuous wave (CW) 5 W output power with emission width of 100 μm and cavity length of 2 mm. Output combination with high beam quality has been obtained by first space beam combination of each two devices and consequent polarization beam combination, and the combined four-beam output has been coupled into a 100 μm -core quartz fiber with numerical aperture (NA) 0.22 by a simple flat-convex lens. Finally, a 10.17 W output power from the fiber with a high power density of $1.0 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ is achieved, and the total coupling efficiency is as high as 79%.

Key words laser technique; diode laser; fiber coupling; space beam combination; polarization beam combination

1 引 言

从 20 世纪 80 年代开始, 随着量子阱结构半导体激光器技术的迅速发展, 应用于固体激光器抽运、材料处理、医疗等方面的近红外(780~1000 nm)的高功率半导体激光器得到了快速发展^[1~3], 由于光纤耦合大功率半导体激光器极大地改善了器件本身光束对称性差、光斑不均匀等不利因素, 因而成为器件制造的关键技术之一。为了实现光纤耦合半导体激光器的大功率、高亮度输出, 已经发展了多种激光

合束与整形技术^[4~6]。以线阵半导体激光器作为基本光源模块进行光纤耦合具有结构紧凑、装配简单的优点。美国 Apollo Instruments 公司采用错位棱镜片堆进行线阵激光器对称化变换, 研制的 F14-XXX-1 光纤耦合半导体激光器功率密度达到 $1.5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$, 亮度达到 $1 \text{ MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$, 为国际上亮度最高的 10 W 量级光纤耦合半导体激光器, 该公司制造的多线阵光纤耦合半导体激光器最大输出功率可达 500 W (600 μm , 数值孔径(NA)为

收稿日期: 2006-09-21; 收到修改稿日期: 2007-04-05

基金项目: 国家自然科学基金(60474026, 60477010)资助项目。

作者简介: 高 欣(1965—), 女, 吉林人, 研究员, 目前从事大功率半导体激光器制备技术研究。

E-mail: bbx@public.cc.jl.cn

0.22)。德国 Limo 公司采用 45° 倾斜柱透镜阵列实现线阵半导体激光器的光束对称化变换, 加工难度大, 用该项技术制成的耦合用光学模块售价昂贵, 该公司目前已经能够提供最大功率 400 W ($600 \mu\text{m}$, 数值孔径为 0.22) 的光纤耦合输出半导体激光器。采用多单元半导体激光器经过叠层合束、偏振合束同样可以实现高亮度、高功率的激光输出, 具有工艺难度低、可靠性好、驱动简单的优点。美国 Boston Laser Inc. 研制的多芯片合成 808 nm 波长, $105 \mu\text{m}$ 芯径光纤耦合二极管激光器, 输出功率达 8 W, 其研制的多芯片合成 808 nm 波长, $200 \mu\text{m}$ 芯径光纤耦合二极管激光器, 输出功率达 40 W。

本文在研制大功率单条形半导体激光器的基础上, 设计并研制了一种 4 单元半导体激光器合束的高亮度光纤耦合输出激光器模块, 实现了器件的高效率光纤耦合输出。

2 结构与实验制备

2.1 耦合结构设计

图 1 为耦合激光器的光路结构原理图。两对快轴准直(发散角小于 5 mrad)的 $100 \mu\text{m}$ 宽条形半导体激光器分别经过光束叠层实现空间合束, 叠层周期为 1 mm, 其光束参数积(BPP)约为 $10 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ (BPP_\perp) \times $18 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ (BPP_\parallel)。空间合束后的两光束再经过偏振分束器进行偏振合束, 光束参数积不变, 仍约为 $10 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ (BPP_\perp) \times $18 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ (BPP_\parallel), 其最大光束参数积为 $\sqrt{(\text{BPP}_\parallel)^2 + (\text{BPP}_\perp)^2} \approx 20.6 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。该光束参数积优于芯径为 $100 \mu\text{m}$, 数值孔径为 0.22 的光束参数积 $44 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 。

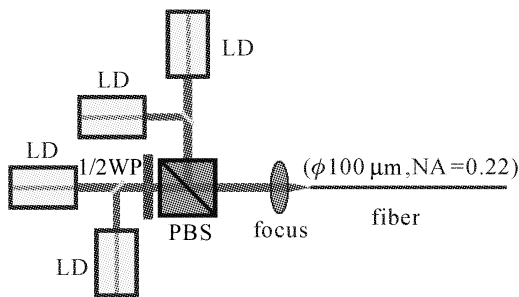


图 1 4 单元半导体激光器的光纤耦合设计
Fig. 1 Design of fiber coupling for four-LDs

2.2 单元宽条形半导体激光器的制备

为了最大程度地提高半导体激光器的光纤耦合效率, 耦合系统首先应该考虑采用具有较小快轴方

向光束发散角(垂直结平面方向)的单元宽条形激光器。激光器的快轴光束发散角由激光器外延材料的波导结构决定。为此, 设计并制作了宽波导、双量子阱大功率半导体激光器的外延结构, 垂直光束发散角设计为 33° 。激光器结构采用 V80H MBE 进行生长, 选用偏向 $\langle 111 \rangle_A$ 约 2° 的 (100) 取向 Si 掺杂 n 型 GaAs 衬底, 衬底腐蚀坑密度 (EPD) 小于 200 cm^{-2} 。具体的激光器材料外延结构包括: 300 nm n^+ -GaAs 缓冲层 (Si 掺杂粒子数浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), 150 nm 厚线性渐变 N-Al_{0.1~0.45}Ga_{0.9~0.55}As 过渡层 (Si 掺杂粒子数浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), $0.6 \mu\text{m}$ 厚 N-Al_{0.45}Ga_{0.55}As 外限制层 (Si 掺杂粒子数浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), $0.6 \mu\text{m}$ 厚 N-Al_{0.45}Ga_{0.55}As 外限制层 (Si 掺杂粒子数浓度为 $1.0 \times 10^{18} \sim 0.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), $0.5 \mu\text{m}$ 厚内波导层 Al_{0.35}Ga_{0.65}As (非故意掺杂), 有源区包括 2 个 7 nm 厚非故意掺杂 Al_{0.07}Ga_{0.93}As 量子阱层和 3 个 12 nm 厚的 Al_{0.30}Ga_{0.70}As 垒层, $0.5 \mu\text{m}$ 厚 Al_{0.35}Ga_{0.65}As 内波导层 (非故意掺杂), $0.6 \mu\text{m}$ 厚 P-Al_{0.45}Ga_{0.55}As 外限制层 (Be 掺杂粒子数浓度为 $0.5 \times 10^{18} \sim 1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), $0.6 \mu\text{m}$ 厚 P-Al_{0.45}Ga_{0.55}As 外限制层 (Be 掺杂粒子数浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), 100 nm 厚线性渐变 P-Al_{0.45~0.1}Ga_{0.55~0.9}As 过渡层 (Be 掺杂粒子数浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), 100 nm 厚 p^+ -GaAs 层 (Be 掺杂粒子数浓度为 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$), 15 nm 厚 p^+ -GaAs 欧姆接触层 (Be 掺杂, $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)。宽条形半导体激光器的发光区宽度设计为 $100 \mu\text{m}$, 腔长为 2 mm , 并采用了非注入区窗口技术改善激光器腔面光学灾变

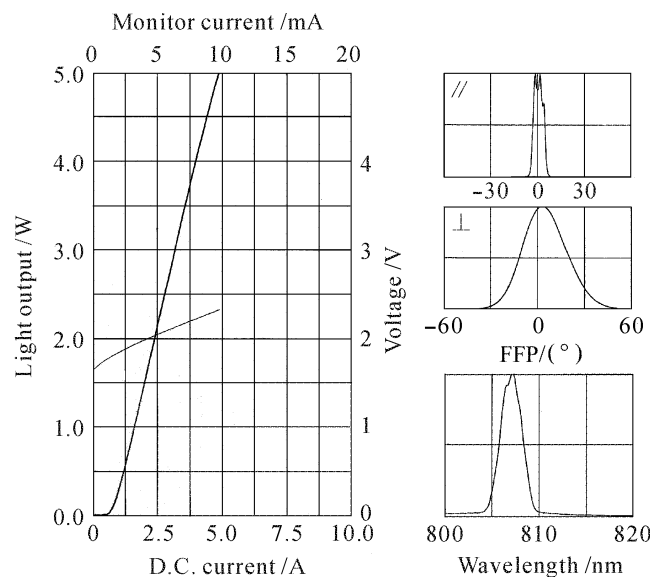


图 2 单元宽条形半导体激光器的典型输出特性
Fig. 2 Typical output curve of single broad area stripe diode lasers

(COD)特性。芯片经腔面镀膜及散热封装后进行输出功率、光谱特性的测量。获得单元激光器的基本参数(见图 2)为:阈值0.6~0.7 A,斜率效率1.1~1.2 W/A,输出功率 4~5 W,远场光束发散角(FFP)的两个参数水平光束发散角为 6°~8°(半峰全宽处),垂直光束发散角为 34°(半峰全宽处)。

2.3 单元宽条形半导体激光器的光束准直

为了实现叠层法激光束的空间合束,单元宽条形半导体激光器的输出光束必须进行准直,实验中试验了光纤柱透镜方法及非球面柱透镜方法。

根据近轴近似,圆柱微透镜的焦距 F (距中心点)与半径 R 的关系为

$$F = \{n/[2(n-1)]\}R, \quad (1)$$

式中 n 为微透镜材料折射率。由(1)式可以看出, n 越大, R 越小,透镜的会聚能力越强。对于芯径 100 μm 的石英光纤,其折射率约为 1.5, $R = 50 \mu\text{m}$,则光纤柱透镜的焦距 F 为 75 μm ,焦点距光纤表面的距离约为 25 μm 。经过精密光学调整,可以将半导体激光器的输出光压缩为一准平行线光源,蒸镀增透膜的光纤透镜的功率传输效率约为 95% 左右。由于快轴方向存在较大的发散角,光线不能满足近轴近似,使得该方法的准直效果受到明显限制,准直后的光束发散角一般在 35 mrad 以上。

为了减少光纤柱透镜准直对光束质量的损失,采用了短焦距的非球面柱透镜(德国 LIMO FAC850 EFL 0.91 mm),获得了较为满意的准直效果。准直后的光束发散角一般在 5 mrad 以下,功率传输效率约为 98% 以上。

2.4 准直光束的合束

光束空间合束的原理是利用光学方法将不同光源发出的低能量光束合并成同一方向输出的高能量光束。

合束后光束空间位置相叠加的合束方式为空间合束,其原理示意图如图 3(a)所示。实验中,将两支经过非球面柱透镜准直的宽面积条形单元半导体激光器的出射光束呈 90° 垂直放置,且控制光束高度相差 1 mm,其中一束光束经过 45° 反射镜面的反射与另一光束实现空间位置叠加。空间合束的效率主要受到反射镜的反射率和有效反射截面的影响。

反向使用偏振分束器(PBS)可使两束偏振方向正交的低能量光束合成为同一方向输出、空间位置相重合的高能量光束,该合束方式为偏振合束,其实验原理如图 3(b)所示。实验上,空间合束后的两束光源的其中一束光首先经过 1/2 波片(1/2WP)使

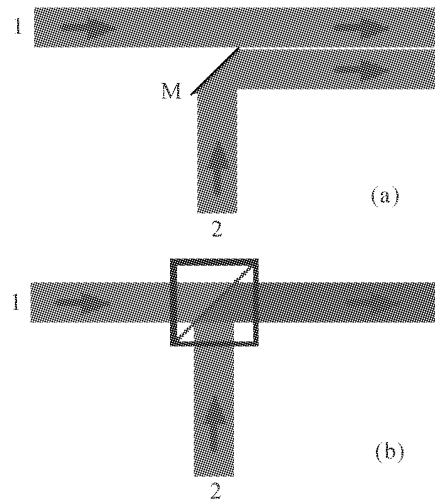


图 3 合束原理图

(a) 空间合束;(b) 偏振合束

Fig. 3 Principle setup for beam combination by (a) space stacking and (b) polarization stacking

偏振方向旋转 90°,然后两束光以正交方向进入偏振分束器,其中一束光透射,一束光反射,使两束光空间位置叠合在一起。偏振合束的效率主要受到激光器的偏振度、偏振合束器的透射与反射特性的影响。实验上采用 CASIX 的 10 mm × 10 mm × 10 mm 偏振分束器(BPS0101),其 P 偏振透射率 $T_p \geq 95\%$,S 偏振反射率 $R_s \geq 99\%$ 。

2.5 合束光束的会聚与光纤耦合

会聚光学系统的质量直接影响会聚光斑的大小,进而影响光纤耦合效率及耦合光纤的芯径。由于设计的合束后光束参数积相对 100 μm 芯径,0.22 数值孔径的光纤参数尚有较大的盈余度,因此设计了普通的平凸球透镜会聚方案,并用 ZEMAX 光学设计软件进行了系统分析。结果表明,采用焦距 $F = 6.5 \text{ mm}$ 的平凸球透镜可以满足合束光束与光纤的耦合要求。光纤输出端采用标准的 SMA905 接口,金属化石英光纤以高温焊料(Au/Sn)固定装入

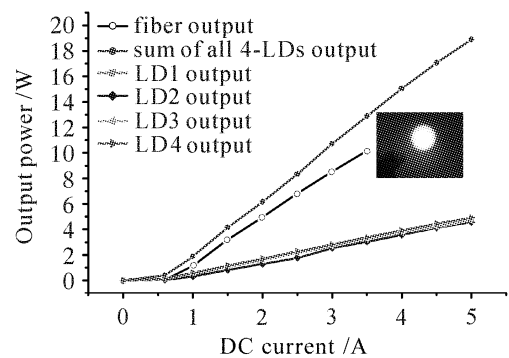


图 4 4 单元条形半导体激光器的光纤耦合输出特性
Fig. 4 Power output of 4-LDs by single fiber coupling

SMA905 光纤连接器,使之具有较强的可靠性和热散发能力,光纤端面经平磨抛光并镀增透膜 ($T \geq 99\%$)后有助于减少光纤的端面反射损耗。最后,金属化的光纤入射端经过 x, y, z 三维方向的精密调整,监控状态下固定于耦合激光器的金属管壳上。经比较测试,整个系统总的传输效率约为 79%,耦合激光器在 3.5 A 驱动电流下的光纤输出功率达 10.17 W(如图 4 所示)。如果采用非球面会聚光学系统将有可能实现 50 μm 芯径光纤的更高亮度耦合输出。

3 结 论

设计并研制了低发散角 808 nm 波长, 100 μm 宽, 5 W 输出功率的单条形大功率、高亮度半导体激光器。分别采用空间合束与偏振合束方法对 4 支准直单条形半导体激光器进行了合束实验,采用普通平凸球透镜对合束光束进行了会聚与耦合实验,实现了 4 单元半导体激光器与 100 μm 芯径, 0.22 数值孔径输出光纤间的高效耦合,耦合效率达到 79%, SMA905 输出端功率达到 10.17 W, 石英光纤端面

的功率密度达到 $1.0 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 。

参 考 文 献

- 1 Zhang Xinlu, Ju Youlun, Wang Yuezhu. Laser-diode-pumped acoustooptic Q-switched Tm, Ho:YLF laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8):1072~1076
张新陆,鞠有伦,王月珠. 激光二极管抽运 Tm, Ho:YLF 晶体声光调 Q 激光器[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8):1072~1076
- 2 Gao Xin, Zhang Jing, Li Hui *et al.*. Fabrication on high power, high efficiency linear array diode lasers by pulse anodic oxidation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8):1013~1016
高 欣,张 晶,李 辉等. 高功率、高效率线阵半导体激光器的阳极氧化制备方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8):1013~1016
- 3 Dong Xue, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. A 110-W fiber laser with homemade double-clad fiber [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(6):345~347
- 4 Gao Mingwei, Gao Chunqing, He Xiaoyan *et al.*. Study of twisted beam symmetrization from laser diode bar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(5):604~608
高明伟,高春清,何晓燕等. 半导体激光器线阵光束扭转对称化的实验研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(5):604~608
- 5 Bernd Köhler, Jens Biesenbach, Thomas Brand *et al.*. High-brightness high-power kW-system with tapered diode laser bars [C]. *SPIE*, 2005, **5711**:73~84
- 6 H.-G. Treusch, Keming Du, M. Baumann *et al.*. Fiber-coupling technique for high-power diode laser arrays [C]. *SPIE*, 1998, **3267**:98~106