

1015 nm 半导体激光放大系统的实验研究

陈琳¹ 钟标^{1,2} 夏勇¹ 郑公爵¹ 石艳玲² 印建平¹

¹华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062

²华东师范大学信息科学与技术学院, 上海 200062

摘要 报道了波长为 1015 nm 的大功率单频半导体光放大器的设计与研制, 实验研究了不同注入光功率和不同温度下, 放大器输出光功率与注入电流的依赖关系。结果表明: 当波长为 1015 nm、功率约为 30 mW 的种子光注入到半导体激光放大系统中, 并把该放大器的注入电流增加到 5 A 时, 其输出的激光功率高达 1600 mW, 相应的放大倍数可达 17.3 dB, 且放大器输出功率随温度的降低而增大。此外, 还观测了半导体光放大器输出功率的稳定性, 发现该放大器可长时间保持稳定工作。因此, 该 1015 nm 激光放大系统可用于掺杂稀土离子晶体的激光冷却, 四倍频后还可用于汞原子光钟的实验研究。

关键词 激光光学; 锥形放大器; 光功率放大; 半导体激光器

中图分类号 O432 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.111407

Design and Characteristics of Diode Laser Amplifier System at 1015 nm

Chen Lin¹ Zhong Biao^{1,2} Xia Yong¹ Zheng Gongjue¹ Shi Yanling² Yin Jianping¹

¹State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China

²School of Information Science and Technology, East China Normal University, Shanghai 200062, China

Abstract The large output power semiconductor optical amplifier with single frequency developed. Output optical power of the amplifier relationship with injection of current is experimentally investigated at different seed laser powers and temperatures. The results of experiments show that the out power with injecting current of 5 A can be up to 1600 mW after injecting the seed laser with power of 30 mW at 1015 nm and the amplification factor is up to 17.3 dB. Moreover, the output power of the amplifier becomes larger as temperature decreases. The output power of semiconductor optical amplifier diode system is very stable once the system reaches thermal equilibrium. Therefore, it can be applied to laser cooling crystals doped with rare earth ions, as well as the optical lattice clock of mercury atoms after frequency quadrupling.

Key words laser optics; tapered amplifier; optical power amplification; semiconductor lasers

OCIS codes 140.4480; 140.3280; 140.2020; 140.5960

1 引言

半导体激光二极管自 1962 年诞生以来^[1], 由于具有体积小、重量轻、效率高、可调谐、价格低等特性, 在医学、工业、科研等领域中得到了广泛的应用^[2-5]。单频单模外延腔半导体激光器的出现极大地促进了激光冷却与囚禁、激光光谱学、量子光学、原子分子与光物理等学科的发展。由于半导体激光器受到腔面功率密度的限制, 输出功率为瓦量级时的激光管端面容易引起空间烧孔及丝状发光现象, 导致输出光束质量下降^[6], 因而单频单模的外延腔半导体激光器的输出功率受到限制。为此, 科学家们提出可以利用锥形半导体光放大器来解决这一问题, 实现较高功率和较高质量的单频单模激光的输出^[6-12]。锥形半导体光放大器在行波放大器的基础上发展而来, 可放大单频单模的连续激光, 由于其具有制造成本低、结构简单、转换效率高和运行

收稿日期: 2015-06-24; 收到修改稿日期: 2015-06-28; 网络出版日期: 2015-09-07

基金项目: 国家自然科学基金(10974055)、国家 973 计划(2006CB921604, 2011CB921602)、上海市自然科学基金(14ZR1412000)

作者简介: 陈琳(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事固体材料激光制冷方面的研究。E-mail: chenlin897215@163.com

导师简介: 印建平(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事分子光学与冷分子精密光谱学、固体材料的激光冷却等方面的研究。E-mail: jpyin@phy.ecnu.edu.cn(通信联系人)

稳定等特点,因此,它是一种具有良好发展前景的高功率激光器光源结构。Kintzer等^[12]在1993年设计开发出具有高连续功率和较高光学模式的锥形增益区,并实现锥形半导体光放大器输出最大功率为4.2 W,经过整形和法拉第隔离器后可获得3.5 W高功率、高质量的激光光束。为更好地实验研究掺杂Yb³⁺固体材料激光冷却,提高抽运光功率与制冷效果,本文设计并研制一款最大功率可达2 W,波长1015 nm的单频单模半导体光放大器。

实验采用波长为1015 nm的半导体激光器作为种子光源,输出的种子光注入到半导体锥形放大器(TA)系统进行放大,获得高功率输出。所用的法布里-珀罗(F-P)结构的半导体激光二极管被放置在Littrow结构的激光头中(德国Toptica公司DL100),最大输出功率为178 mW。半导体锥形放大器系统中的光放大芯片采用C-Mount结构的锥形放大器(德国m2k-laser公司m2k-TA-1010-2000)。该芯片前后端面的宽度分别为3 μm和250 μm,增益区长度约为2 mm,该芯片要求种子光的功率处在10~30 mW之间,温度范围为10 ℃~30 ℃,最大注入电流不超过6 A。波长在999~1025 nm之间的激光均可作为种子光。TA最大输出功率可达2000 mW。在实验中,选择波长为1015 nm的种子光注入到TA中,实现种子光功率的放大。当种子光功率约为30 mW、注入电流为5 A时,经过TA放大且通过透镜整形后,最高输出的激光功率可达1600 mW。

2 TA半导体系统的实验方案

图1(a)是所设计的半导体光放大系统装置结构示意图。半导体锥形放大器被固定在黄铜支架中心,其阳极与黄铜支架相连,阴极与电流源的负极相连。整个黄铜底座放置在半导体致冷器(TEC)元件上。两焦距为4.5 mm的准直透镜分别放置于锥形放大器前后端面处。调节两透镜位置,使半导体锥形放大器前后端面处于两透镜焦点上,两准直透镜镜架中心严格对齐,黄铜支架内装有热敏电阻,用于监测支架的温度。实验中采用Thorlabs公司型号为ITC4005的温度电流控制器作为TEC和锥形放大器的供电电源,最大输出电流为5.05 A,电流源通过比例积分(PI)控制系统反馈控制TEC的温度,整个系统的温控精度可达0.001 ℃,能够满足实验过程中精确控制和稳定TA所需的温度要求。图1(b)是半导体锥形放大器的实物图,整个装置被固定在密封盒中,这样即能保证TA能够被精确温控,同时又能减少外界环境对TA的影响。

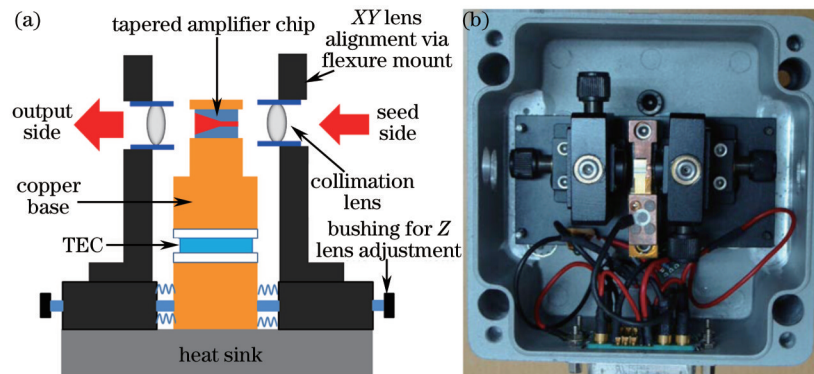


图1 (a) 半导体锥形放大器侧视图; (b) 半导体锥形放大器实物图

Fig.1 (a) Side view of TA diode system; (b) physical map of TA diode system

图2是整个实验系统的光路示意图。系统采用Littrow结构的外延腔半导体激光器来产生单频单模的

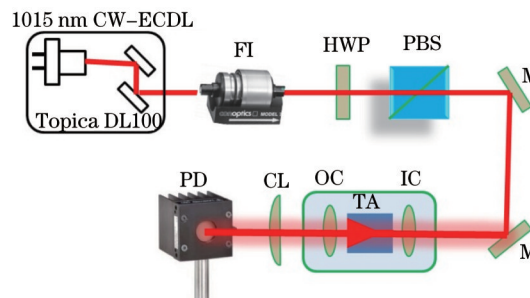


图2 实验装置光路图

Fig.2 Experimental setup

种子光。种子光的中心波长为 1015 nm, 种子光依次经过法拉第光学隔离器(FI), 1/2波片(HWP)和偏振分束器(PBS)后入射至TA芯片的脊面(后端面), 通过调节HWP和PBS确保耦合到TA中的种子光为P偏振光, 与此同时还可以调节入射光功率的大小。当种子光耦合到TA芯片中, 同时把注入电流增加到阈值以上, 便可从TA芯片的锥面(前端面)观测到放大的激光。经TA放大后的激光依次经过焦距为4.5 mm的透镜和焦距为25 mm的柱透镜整形后, 成为平行出射的高斯光束。

3 实验结果与分析

图3显示了锥形放大器荧光光谱和经过注入放大后的激光光谱, 从图中可以看出放大后的激光与种子光相比, 仍保持原来的光谱特性。TA芯片前后端面均镀有增透膜, 在注入电流为1~5 A之间时, TA出射荧光功率的范围是0.8~30 mW, 光谱范围是140 nm, 通过对比自发辐射荧光功率与出射的激光功率, 发现自发辐射荧光功率较小, 可忽略不计。

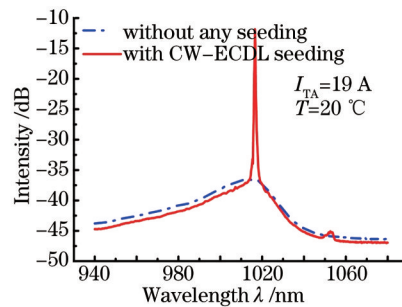


图3 TA光谱曲线

Fig.3 TA optical spectrum with CW-seeding

种子光经过TA耦合放大输出后, TA温度的高低、注入电流大小及种子光功率大小对其输出的光功率有一定的影响。图4是在不同温度、不同功率下的种子光耦合到锥形放大器之后, 其输出的光功率与注入电流的关系。由于TA和它前面的准直透镜都是固定在同一底座上的, 所以它们将会具有相同的热膨胀率。当温度发生变化时, 透镜中心和底座的相对高度几乎保持不变, 因此, 只需要微调光路便可确保种子光与锥形放大器的耦合。由图3中可以看到, 当TA的注入电流小于2 A时, 对种子光几乎没有显著的放大作用, 这表明该TA芯片的阈值电流约为2 A。保持种子光功率不变, 增大TA的注入电流, 同时通过调节控制TEC的反馈电流保持TA的工作温度不变。图4(a)~(c)都分别表明经过TA放大后的激光输出功率随着注入电流的

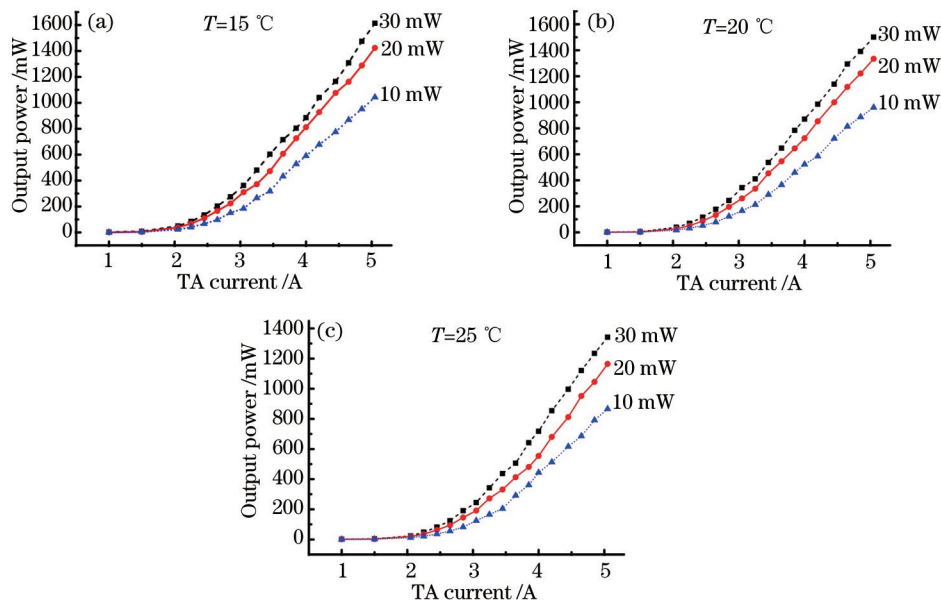


图4 TA在不同注入光功率、不同温度下, 注入电流与输出光功率的关系

Fig.4 Temperature and current dependence of TA amplification by seeding with different power

增加而增加,因为半导体光放大器与半导体激光器一样基于相同的受激发射原理,即半导体激光工作介质中的粒子数反转,所以半导体光放大器与半导体激光器一样具有相同的放大机制^[13]。相比于半导体激光器而言,半导体光放大器需要避免形成反馈,并且要求更高的抽运功率来获得足够的光增益,因此,入射到放大器中的种子光功率需达到一定的阈值才可使得放大器输出更高的功率,此外,还可以从图4中看到当TA的注入电流保持不变时,输出的光功率随着种子光功率的增大而增大。

研究了TA的工作温度对其输出激光功率的影响,实验结果如图4(a)~(c)所示。保持相同种子光功率和注入电流的大小,调节控制TEC的反馈电流改变TA的工作温度,实验结果表明在相同的种子光功率和注入电流条件下,TA的工作温度越低,其对种子光功率的放大倍数越大。由于温度的升高会减小半导体材料禁带的宽度,阈值电流增大,半导体锥形放大器外微分量子效率也会减小,故输出功率也就相应地减小。特别地,当半导体光放大器的温度设定为15℃,注入电流设定为5A,注入光功率为30mW时,TA系统输出功率达1600mW。

一般情况下,热噪声会使锥形放大器的出射功率发生抖动。在设计TA系统时需要充分考虑到这一点,所设计的TA系统可以迅速平稳地达到热平衡。当种子光的功率约为24mW,温度设定为21℃,注入电流为3.5A时,TA运行出射功率随时间的变化关系如图5所示。从图中可以看出在开启TA系统的前几秒中,锥形放大器出射功率最高可达450mW,随后又很快地降低,这主要是由于温度变化产生的热振动对锥形放大器的影响。在3min之后,系统的出射功率趋于稳定,在长达70多分钟持续检测时间内,放大系统输出功率能够一直稳定在350mW。这表明所设计与研制的TA系统在达到稳定运行状态后可以长时间保持稳定工作,为实现共振腔增强型固体材料的激光制冷或汞原子光钟等实验研究提供了可靠的抽运或基频光源^[14-15]。

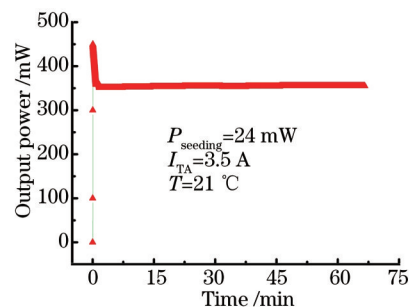


图5 TA输出功率与时间的关系

Fig.5 Output power of TA versus time

4 结 论

设计了一款结构简单、调节方便、输出功率稳定的锥形半导体激光放大系统,其中三维准直调整镜架的设计使得光路变得更易调节。把波长为1015nm,功率为30mW的种子光注入到TA中,同时TA注入电流为5A,温度控制在15℃时,其放大后的激光出射功率可达1600mW,放大倍数高达17.3dB。若注入电流可进一步增加到6A时,则最大激光输出功率可达2000mW。该激光放大系统能长时间保持稳定工作,为实现共振腔增强型掺杂Yb³⁺稀土离子的固体材料激光制冷或汞原子光钟提供了一个廉价、稳定、可靠的大功率抽运光源或基频光源。

参 考 文 献

- Hall R N, Fenner G E, Kingsley J D, *et al.*. Coherent light emission from GaAs junctions[J]. Phys Rev Lett, 1962, 9(9): 366-368.
- Pan Honggang, Yu Jinlong, Wang Wenrui, *et al.*. Semiconductor optical amplifier based self-mode locking laser and phenomenon of dimidiated frequency[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1102006.
潘洪刚, 于晋龙, 王文睿, 等. 基于半导体光放大器的自锁模激光器及重复频率分频现象[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1102006.
- Li Xiushan, Ning Yongqiang, Jia Peng, *et al.*. Rectangular mesa shaped vertical cavity surface emitting laser with shallow surface relief[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1202005.
李秀山, 宁永强, 贾鹏, 等. 浅面浮雕矩形台面垂直腔面发射半导体激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1202005.

- 4 Shang Huaiying, Huo Li, Wu Yuanpeng, *et al.*. Optical coherence imaging system based on a polarization-dependent semiconductor optical amplifier-enabled swept laser[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1102002.
尚怀赢, 霍力, 吴远鹏, 等. 单偏振半导体光放大器扫频光相干成像系统[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1102002.
- 5 Liu Hongli, Qian Jun, Xu Zhen, *et al.*. A frequency tuning and locking system of a deep UV laser for laser cooling of mercury atoms[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0902005.
刘洪力, 钱军, 徐震, 等. 用于汞原子激光冷却的深紫外激光调谐和锁频系统[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0902005.
- 6 Mikulla M. Tapered high-power, high-brightness diode lasers: design and performance[J]. Topics in Applied Physics, 2000, 78: 265-288.
- 7 Liu Yonghong, Han Yanxu, Zhang Chunhong, *et al.*. Semiconductor tapered-amplified laser (TPA) set for Rb cooling system[J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2009, 15(1): 91-94.
刘永宏, 韩燕旭, 张春红, 等. 用于Rb原子冷却系统的半导体激光放大(TPA)装置[J]. 量子光学学报, 2009, 15(1): 91-94.
- 8 Ferrari G, Mewes M O, Schreck F, *et al.*. High-power multiple-frequency narrow-linewidth laser source based on a semiconductor tapered amplifier[J]. Opt Lett, 1999, 24(3): 151-153.
- 9 Xiong Y, Carlsten S M L, Repasky K. Design and characteristics of a tapered amplifier diode system by seeding with continuous-wave and mode-locked external cavity diode laser[J]. Optical Engineering, 2006, 45(12): 124205.
- 10 Kangara J C B, Hachtel A J, Gillette M C, *et al.*. Design and construction of cost-effective tapered amplifier systems for laser cooling and trapping experiments[J]. American Journal of Physics, 2014, 82(8): 805-817.
- 11 Wang X, Erbert G, Wenzel H, *et al.*. High-power, spectrally stabilized, near-diffraction-limited 970 nm laser light source based on truncated-tapered semiconductor optical amplifiers with low confinement factors[J]. Semiconductor Science & Technology, 2011, 27(1): 15010-15019.
- 12 Kintzer E S, Walpole J N, Chinn S R, *et al.*. High-power, strained-layer amplifiers and lasers with tapered gain regions[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1993, 5(6): 605-608.
- 13 Wei Xing. Near Diffraction Limited High Power Semiconductor[D]. Jilin: Changchun University of Science and Technology, 2007: 2-17.
魏星. 近衍射极限高功率锥形半导体激光器[D]. 吉林: 长春理工大学, 2007: 2-17.
- 14 Zhong Biao. Laser Cooling of the Yb³⁺ Doped Fluoride Crystal[D]. Shanghai: East China Normal University, 2014: 83-93.
钟标. 掺Yb³⁺氟化物晶体激光冷却理论与实验研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2014: 83-93.
- 15 Swallows M D, Loftus T H, Griffith W C, *et al.*. Techniques used to search for a permanent electric dipole moment of the ¹⁹⁹Hg atom and the implications for CP violation[J]. Physical Review A, 2013, 87(1): 012102.

栏目编辑: 宋梅梅