

1.3 W 单频、宽调谐锥形半导体激光放大系统

李钱^{1,2}, 万敏¹, 鲁燕华^{1*}, 许夏飞¹, 任怀瑾¹, 谭昊¹

¹中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;

²中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088

摘要 报道了最大输出功率为 1.3 W, 波长为 910~930 nm 的单频、可调谐锥形半导体激光放大系统, 研究了锥形半导体放大系统输出功率随注入电流和种子光功率的变化。功率为 13.6 mW、波长为 920 nm 的单频种子光经隔离器和聚焦透镜后, 功率减小为 12.4 mW; 入射到注入电流为 4 A 的锥形放大器中时, 输出激光的功率可达 1300 mW, 增益达到 20.21 dB, 线宽为 660 fm。当种子光功率从 0 增大到 13.6 mW 时, 放大功率随之增大。该系统获得的激光可以用于四倍频后窄线宽连续可调谐中(深)紫外激光的研究。

关键词 激光光学; 半导体激光器; 锥形半导体放大器; 光功率放大; 单频可调谐激光

中图分类号 O432

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.121401

1.3 W Single-Frequency Tapered Semiconductor Laser Amplification System with Wide Tuning Range

Li Qian^{1,2}, Wan Min¹, Lu Yanhua^{1*}, Xu Xiafei¹, Ren Huaijin¹, Tan Hao¹

¹Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

²Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

Abstract The single-frequency tunable tapered semiconductor laser amplification system with maximum output power of 1.3 W and wavelength of 910-930 nm is reported, and variations in the output power of tapered semiconductor amplifier with the injection current and seeding power are experimentally investigated. Through the isolator and focusing lens, the 13.6 mW single-frequency seeding light at 920 nm decreases to a power of 12.4 mW. The output power of the amplifier with injection current of 4 A can reach 1300 mW, the gain is up to 20.21 dB, and the linewidth is 660 fm. Moreover, when the seeding power increases from 0 to 13.6 mW, the amplification power increases accordingly. The laser obtained by this system can be used to study the narrow linewidth continuously tunable medium (deep) ultraviolet laser after quadrupling.

Key words laser optics; semiconductor laser; tapered semiconductor amplifier; optical power amplification; single-frequency tunable laser

OCIS codes 140.4480; 140.3280; 140.2020; 140.5960

1 引言

半导体激光二极管自 20 世纪 70 年代诞生以来,以其体积小、重量轻、效率高、价格低等特点受到了普遍关注^[1]。由于其发出激光的波长取决于增益介质的量子阱特性,克服了固体激光基频光波长只有有限几种选择的限制,通过非线性晶体倍频,可以获得窄线宽连续可调谐中(深)紫外激光^[2]。但由于

单频单模半导体激光器的输出功率还是受限,国外出现了各种采用锥形半导体放大器放大种子光的结构。锥形半导体放大器是一种带有锥形增益区的脊形波导半导体激光器,脊形波导区通过前端单模边发射腔实现选模,提供模式质量较好的单模低功率激光;锥形增益区作为功率放大器,实现功率放大的同时保证了原有的激射模式。相较于普通的半导体激光器,激光从锥形端面射出,出光面积大,可有效

收稿日期: 2018-05-24; 修回日期: 2018-06-07; 录用日期: 2018-06-14

基金项目: 中国工程物理研究院院长基金(201501023)

* E-mail: luyanhua@caep.cn

减小激光功率密度,从而降低与光学烧孔相关的非线性效应,减少了由光能量引起的光学灾变,避免了复杂的冷却技术^[3-4]。国内外有不少单模种子光注入锥形放大器(TA)的相关报道^[5-11]。1992年, Mehuys等^[5]将25 mW的单频连续种子光(865 nm)注入锥形放大器中,当放大器的注入电流为3 A时,输出激光功率放大到2 W;2006年, Maiwald等^[8]在种子光功率为40 mW,波长为976 nm,锥形放大器注入电流为6.5 A时,获得了3.6 W的放大功率输出。刘永宏等^[9]在2009年研制了780 nm波长锥形半导体激光放大装置,种子源功率25 mW,经放大输出功率达到600 mW;2015年,陈琳等^[10]设计研制了1015 nm波长大功率单频锥形半导体放大器,30 mW的种子光注入到放大系统中,输出功率达到1600 mW,增益为17.3 dB;2017年,彭瑜等^[11]基于Littrow结构外腔半导体激光器,将波长为1064 nm、功率为17 mW的激光注入到锥形放大器中进行光功率放大,使用零膨胀系数材料制成超稳腔实现激光的线宽压窄,最终获得功率为290 mW、线宽为10 kHz的激光输出。

本文设计并研制了单频、波长可调谐、窄线宽、高增益的锥形半导体激光放大装置。种子源出射的激光经隔离器和聚焦透镜,功率有些许损耗,输入到TA的输入功率减小至12.4 mW,选择波长为920 nm的种子光,当放大器注入电流为4 A时,经放大后最后输出的单频激光功率可达1.3 W,线宽为660 fm。由于锥形放大器最大增益波长在920 nm附近,改变种子源中心波长后放大功率有所下降,当种子源中心波长在911.25~928.74 nm范围内调谐时,仍可获得大于976 mW的放大激光输出。

2 实验装置与设计

实验装置如图1所示,实验中采用的种子源是北京瓦科光电科技有限公司生产的910 nm Littrow结构可调谐外腔半导体激光器(ECDL),输出波长范围为910~930 nm,最大功率为13.6 mW,通过调节种子源内光栅的倾角,可以改变种子源的输出波

长。使用德国DILAS公司DHP-I结构的主振荡功率放大(MOPA)锥形放大器,放大器的最大增益波长在920 nm附近,注入电流不超过4 A。装置中隔离器的作用是保证激光的单向运行,防止放大器中的激光反向运行影响种子源的稳定性。由于锥形放大器的前端面尺寸非常小,为了使注入激光更好地耦合进放大器中,在隔离器与放大器之间设置了一个焦距为4.51 mm的非球面透镜,采用六维调整架夹持,从六个方向不断调整透镜的位置和倾斜度,使注入激光和放大器中激光的模式达到较好的匹配。

采用M²-200光束质量分析仪对种子源的光束质量和光斑大小进行测量,快轴和慢轴方向的光束质量因子分别为1.235和1.6725;束腰半径分别为1.39 mm和2.21 mm。种子光在放大器前端面位置处将会聚焦成一个很小的光斑。采用Zemax软件计算得到三个不同焦距的非球面透镜对种子光束聚焦后的光斑半径,又由于放大器前端面垂直和水平方向的尺寸为1.4 μm×3 μm,通过MATLAB软件仿真,可以计算得到种子光进入放大器中的理论耦合效率,结果见表1。从表1可以看出,使用焦距为3.1 mm的透镜,理论耦合效率为95.89%,耦合效果最佳。但由于聚焦后的光斑尺寸过小,用于实验系统中大大增加了调节难度,故实验中最终采用焦距为4.51 mm的透镜。

表1 不同焦距透镜聚焦后的光斑半径和理论耦合效率
Table 1 Spot radius and theoretical coupling efficiency after focusing with different focal-length lenses

Focal length of lens /mm	3.10	4.51	5.50	
Spot radius /μm	Fast axis	0.812	1.174	1.428
	Slow axis	0.699	1.029	1.220
Coupling efficiency /%	95.89	80.35	70.52	

3 实验结果与分析

图2所示为采用日本YOKOGAWA公司AQ6370D光谱分析仪对920 nm种子光放大前后光谱的测量结果。种子光波长为920.03 nm,TA注入电流为4 A时放大激光的波长为920.04 nm。采用更高精度的光波长计对放大前后激光的线宽进行测量,结果分别为700 fm和660 fm。若改变TA两端电流,使其从0.6 A增加到4 A,放大激光的线宽依然可以保持在640~800 fm之间,如图3所示。由于ECDL种子源腔长 L 约为22 mm,线宽(233.9 MHz)远小于纵模间隔 $c/(2nL)$ (其中 c 为真空中的光速, n 为介质折射率),因而从种子源出

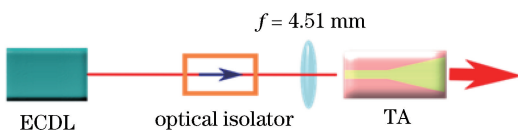


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

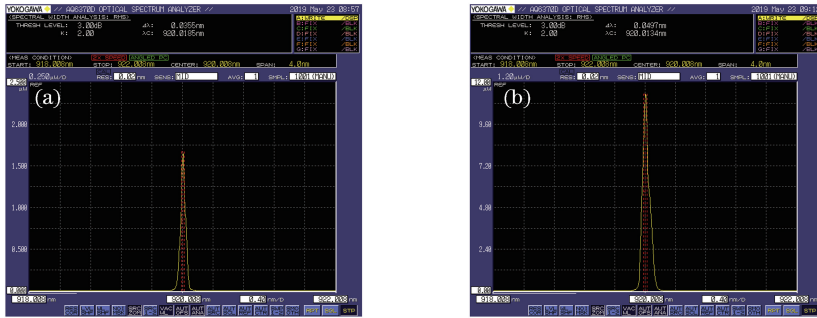


图 2 920 nm 种子光(a)放大前和(b)放大后的激光光谱

Fig. 2 Spectra of the seeding light at 920 nm (a) before and (b) after amplification

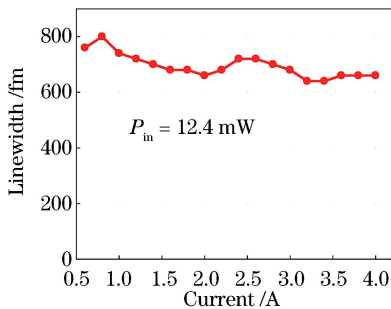


图 3 放大激光的线宽随 TA 注入电流的变化

Fig. 3 Relationship between linewidth of amplified laser and TA injection current

射的是单频单模激光。通过比较可以看出,放大后的激光仍保持原有的光谱特性,锥形放大器并没有改变激光原有的激光模式,实现激光功率放大的同时保证了激光单频、可调谐、窄线宽等特性。

种子光经 TA 实现功率放大可能会受到放大器注入电流和种子源功率的影响。图 4 为 TA 自发辐射荧光功率以及波长为 920.03 nm 的激光经放大后输出功率随 TA 注入电流的变化曲线。从图 4 可以看出,当无种子光注入时,输出荧光功率随注入电流的增大而增大,最大功率为 144 mW。当注入种子

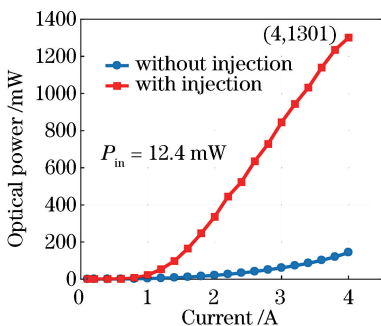


图 4 TA 荧光功率和激光放大功率随注入电流的变化

Fig. 4 Variation in fluorescent power and output power of TA with the injection current

光,TA 两端电流小于 1 A 时,TA 对种子光几乎没有放大作用,表明放大器的阈值电流约为 1 A;注入电流大于 1 A 时,放大器的输出功率随着电流的增大而增大,这是因为锥形半导体放大器的受激发射原理和半导体激光器相同,电流越大,实现非平衡载流子的反转粒子数越多,电子与空穴复合时产生的激光功率也就越高^[12]。当注入电流为 4 A 时,输出激光放大功率为 1300 mW,增益达到 20.21 dB,有无种子光注入的输出激光光谱如图 5 所示,各波长光存在模式竞争,当 920 nm 的种子光入射到放大器时,由于增益大于损耗,形成激光振荡,而其他波长光受到抑制,荧光功率整体有所下降。

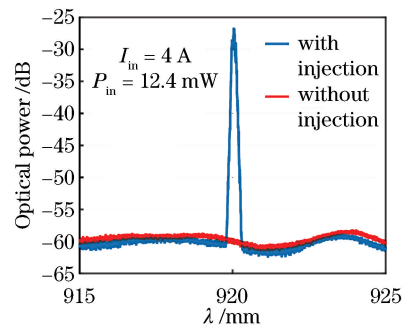


图 5 有无种子光注入的输出激光光谱

Fig. 5 Output laser spectra with or without seed injection

种子源激光波长为 920.03 nm,放大器注入电流为 3 A 时,输出激光功率和种子光功率间的关系如图 6 所示。可以看出,种子光功率从 0 增加到 13.6 mW 时,输出功率随之增大。

种子源的可调谐范围为 910~930 nm。图 7 所示为波长分别为 911.25, 913.89, 917.03, 920.03, 923.06, 925.84, 928.74 nm 的种子光入射到放大器中,输出功率随放大器注入电流的变化曲线。可以看出,锥形放大器没有改变激光原有的激光模式,最后的输出激光也是可调谐的。锥形放大器增益中心波长在 920 nm 附近,920.03 nm 激光经放大后达到

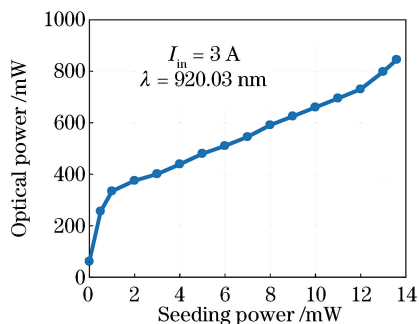


图6 输出激光功率和种子光功率的关系

Fig. 6 Relationship between the output power of TA and the seeding power

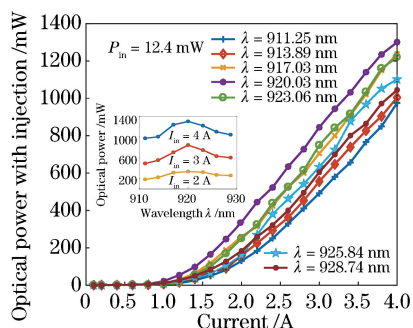


图7 不同波长时输出功率随放大器注入电流的变化

Fig. 7 Relationship between the output power of TA and injection current at different wavelengths

最佳放大效果,放大功率随着注入电流的增加而增大。923.06 nm 和 917.03 nm 的激光放大后随注入电流的变化趋势大致相同,但都比中心波长小。波长与中心波长偏离程度越大,放大效果越弱。

4 结 论

功率为 13.6 mW、波长为 910~930 nm 的单频种子光注入到锥形放大器中,得到了一系列输出功率为 976 mW 以上的可调谐、窄线宽、单频激光,并保持激光原有的激射模式。当 TA 注入电流为 4 A 时,波长为 920 nm、功率为 13.6 mW 的种子光通过 TA 后,放大功率可达 1300 mW,增益达到 20.21 dB,线宽为 660 fm。增加放大器注入电流,放大功率随之增大,线宽保持在 640~800 fm 范围内。当工作电流为 3 A、波长为 920 nm 的种子光功率从 0 增加到 13.6 mW 时,输出功率随种子光功率的增大而增大,进一步提高种子源功率有望得到更大的放大功率。

参 考 文 献

[1] Hall R N, Fenner G E, Kingsley J D, *et al.*

Coherent light emission from GaAs junctions [J]. Physical Review Letters, 1962, 9(9): 366-368.

[2] Nguyen H K, Hu M H, Nishiyama N, *et al.* 107-mW low-noise green-light emission by frequency doubling of a reliable 1060-nm DFB semiconductor laser diode[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(5): 682-684.[3] Adamiec P, Sumpf B, Feise D, *et al.* Twin-contact 645-nm tapered laser with 500-mW output power[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(4): 236-238.[4] Michel N, Odriozola H, Kwok C H, *et al.* High modulation efficiency and high power 1060 nm tapered lasers with separate contacts[J]. Electronics Letters, 2009, 45(2): 103-104.[5] Mehuys D, Welch D F, Goldberg L. 2.0 W CW, diffraction-limited tapered amplifier with diode injection [J]. Electronics Letters, 1992, 28(21): 1944-1946.[6] Ferrari G, Mewes M O, Schreck F, *et al.* High-power multiple-frequency narrow-linewidth laser source based on a semiconductor tapered amplifier [J]. Optics Letters, 1999, 24(3): 151-153.[7] Xiong Y H, Murphy S, Carlsten J L, *et al.* 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.[8] Maiwald M, Schwertfeger S, Güther R, *et al.* 600 mW optical output power at 488 nm by use of a high-power hybrid laser diode system and a periodically poled MgO: LiNbO₃ bulk crystal [J]. Optics Letters, 2006, 31(6): 802-804.[9] Liu Y H, Han Y X, Zhang C H, *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.

[10] Chen L, Zhong B, Xia Y, *et al.* Design and characteristics of diode laser amplifier system at 1015 nm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 111407.

陈琳,钟标,夏勇,等.1015 nm 半导体激光放大系统的实验研究[J].激光与光电子学进展,2015,52(11):111407.

[11] Peng Y, Shi Q P, Huo H, *et al.* Realization of

narrow linewidth property based on ultra-stable cavity in precision optics teaching [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(8): 081402.

彭瑜, 施清平, 霍虎, 等. 精密光学教学中基于超稳腔实现窄线宽性能的方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(8): 081402.

[12] Fang Z J, Cai H W, Chen G T, *et al.* Technology

and application of single frequency semiconductor laser[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2015: 10-21.

方祖捷, 蔡海文, 陈高庭, 等. 单频半导体激光器——原理、技术和应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2015: 10-21.