2019年9月

文章编号: 1000-7032(2019) 09-1123-07

用于碱金属蒸汽激光器泵浦的窄线宽 780 nm 半导体激光源

田景玉¹²,张 俊^{1*},彭航宇¹,雷宇鑫²,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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 780.0 nm 窄线宽、高功率半导体激光器对于发展 Rb 碱金属蒸汽激光器具有重要意义。为获得好的泵 浦效果,泵浦光谱与碱金属蒸汽的吸收光谱需严格匹配,必须压窄半导体激光输出线宽,且稳定中心波长。 反射式体布拉格光栅(RVBG)外腔反馈是目前实现窄光谱光源的主要方案之一。本文提出了快轴准直镜-光 束变换器-慢轴准直镜-反射式体布拉格光栅(FAC-BTS-SAC-RVBG)的结构,压缩入射到 RVBG 的激光发散 角,提高 RVBG 有效反馈率 相对于常规的"FAC + SAC + RVBG"结构,提升光谱锁定效果。基于"FAC + BTS + SAC + RVBG"结构,研制出 780 nm 窄线宽激光器,连续功率达到 47.2 W,通过对 RVBG 精确温控,可将中心 波长稳定在 780.00 nm。采用单模光纤探测,光谱宽度为 0.064 nm(FWHM),温漂系数为 0.001 2 nm/℃,电 流漂移系数为 0.001 3 nm/A,可用于 Rb 碱金属蒸汽激光器泵浦。

关 键 词: 半导体激光器; 窄线宽; 反射式体布拉格光栅; 半导体激光泵浦碱金属蒸汽激光器 中图分类号: TN248.4 文献标识码: A **DOI**: 10.3788/fgxb20194009.1123

780 nm Diode Laser Source with Narrow Linewidth for Alkali Metal Vapor Laser Pumping

TIAN Jing-yu^{1 2}, ZHANG Jun^{1*}, PENG Hang-yu¹, LEI Yu-xin², WANG Li-jun¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding Author , E-mail: jzh_ciomp@163.com

Abstract: The 780.0 nm narrow linewidth and high power diode laser is of great significance for the development of Rb alkali metal vapor laser. In order to obtain good pumping effect, the absorption spectra of the pump spectrum and the alkali metal vapor must be strictly matched, the output line width of the diode laser must be narrowed, and the central wavelength must be stabilized. External cavity feedback of reflective volume Bragg grating(RVBG) is one of the main schemes to realize narrow spectrum light source at present. The structure of fast axis collimating mirror, beam convertor, slow axis collimating mirror, reflection type body Bragg grating(FAC-BTS-SAC-RVBG) is proposed. The laser divergence angle of incident to RVBG is compressed to improve the effective response rate of RVBG. Compared with the conventional "FAC + SAC + RVBG" structure, the spectral locking effect is improved. Based on the FAC-BTS-SAC-RVBG structure, a narrow linewidth laser at 780 nm was developed, with a continuous power of 50 W. By controlling RVBG temperature,

基金项目:科技部重点研发计划(2018YFB1107303);国家自然科学基金(61574141 61535013);吉林省科技发展计划(20190302042GX);装备 预研领域基金(61404140107);中国科学院前沿科学重点项目(QYZDY-SSW-JSC006)资助

收稿日期: 2019-02-28; 修订日期: 2019-03-25

Supported by National Key R&D Program of China(2018YFB1107303); National Natural Science Foundation of China(NSFC) (61574141,61535013); R&D Program of Jilin Province(20190302042GX); Equipment Advanced Research Fund(61404140107); Key Project in Frontier Science of CAS(QYZDY-SSW-JSC006)

the central wavelength could be stabilized at 780.00 nm. Using single mode optical fiber probe, spectral width is 0.064 nm(FWHM), temperature drift coefficient is 0.001 2 nm/ $^{\circ}$ C, current drift coefficient is 0.001 3 nm/A. The structure can be used for Rb alkali metal vapor laser pump.

Key words: diode laser; narrow linewidth; reflective volume Bragg grating(RVBG); diode laser pumping alkali metal vapor laser(DPAL)

1 引 言

碱金属蒸汽激光器是以碱金属原子饱和蒸汽 作为增益介质、利用其外层价电子能级跃迁实现 激光作用的典型的三能级气体激光器。利用半导 体激光泵浦碱金属蒸汽激光器(DPAL)兼具固体 和气体激光的优势,具有量子效率高、气体介质可 循环流动散热、近红外原子谱线大气透过性好、全 电操作、结构紧凑等特点,可克服大功率气体激光 器体积重量庞大、固体激光器热效应严重、半导体 激光器光束质量较差等问题^[15]。近年来,DPAL 受到越来越多的关注和研究,有望发展成为新一 代高能激光光源,已被明确作为"兆瓦级高能激 光器的首选方案"^[6]。目前高功率半导体激光器 覆盖的波长范围为750~1100 nm,主要针对钾 K (766.3 nm)、铷 Rb(780.0 nm) 和铯 Cs(852.2 nm)蒸汽激光器展开研究^[7]。

为了获得好的泵浦效果,泵浦光谱与碱金属蒸 汽的吸收光谱需严格匹配,即中心波长和谱宽均严 格要求。根据能带跃迁原理,碱金属原子的吸收谱 宽非常窄,为pm量级,即使在充入高压缓冲气体后, 吸收谱宽也仅为数十 GHz(0.05 nm量级);而自由运 转的半导体激光器线宽较宽(通常3~5 nm),且随 温度变化大(~0.3 nm/℃)。因此必须压窄半导体 激光输出线宽,且稳定中心波长。

反射式体布拉格光栅(RVBG)外腔反馈是目 前实现该种光源的主要方案^[8],通常采用"快轴 准直镜-慢轴准直镜-反射式体布拉格光栅(FAC-SAC-RVBG)"的结构,即前腔面镀增透膜的半导 体激光线阵,经快轴准直镜(FAC)和慢轴准直镜 (SAC)准直后,由RVBG反馈,只有满足RVBG光 栅条件并能够返回到原激光单元的光才能形成有 效谐振。2013年,中科院电子所李志永等基于该 方法实现了40W功率0.14 nm 线宽的780 nm 激 光输出^[9]。2014年,德国 Dilas 用15个激光单元 合束实现了在谱宽为0.072 nm 条件下获得600 W 的 780 nm 激光输出,在输出功率为 1 000 W 时 其输出光谱宽度为 0.083 nm^[10]。2016 年 德 国 Dilas 采用 7 个光纤模块实现了 3 000 W 功率 0.06 nm 线宽的 766 nm 激光输出^[11]。但该方法 存在如下问题:(1)激光线阵快慢轴准直后,其慢 轴发散角达数十毫弧度,而 RVBG 的有效接收角 为毫弧度量级,有效反馈率低,对此要求所选 RVBG 的反射率高,造成整体光光转换效率偏低; (2)激光线阵的 Smile 要求高,Smile 直接决定 RVBG 的反馈光是否能返回到激光单元,据分析, 当 Smile 大于 0.5wf(wf 为发光区快轴尺寸)时, 不能形成有效反馈,激光波长锁定困难^[12]。

本文提出"快轴准直镜-光束变换器-慢轴准 直镜-反射式体布拉格光栅(FAC-BTS-SAC-RVBG)"的结构,压缩入射到 RVBG 的激光发散 角 提高 RVBG 的有效反馈率,同时 BTS 将快慢 轴方向进行光束变换,结合外腔反馈可降低对激 光线阵封装的 smile 要求^[13-41]。相对于常规的 "FAC + SAC + RVBG"的方式,光谱锁定效果更 优。基于该方式实现了780 nm 的窄线宽激光器, 输出功率达到 47.2 W,通过对 RVBG 温控,可将 中心波长稳定在780.00 nm。聚焦光谱窄化激 光,采用单模光纤探测,输出光谱宽度为0.064 nm(FWHM),温漂系数为0.001 2 nm/℃,电流漂 移系数为0.001 3 nm/A,光谱稳定性良好,可用 于碱金属蒸汽激光器泵浦。

2 外腔反馈实验设计及结果分析

2.1 "FAC + BTS + SAC + RVBG"结构设计

采用的外腔反馈结构如图 1 所示,由半导体 激光线阵(LDA)、后腔面(Rear facet) 与 RVBG 构 成谐振腔,前腔面镀增透膜(AR coating)的 LDA 输出光束经过快轴准直镜(FAC)、光束整形器 (BTS)和慢轴准直镜(SAC)后,以发散角为毫弧 度量级的光入射到具有一定反射率的反射式体布 拉格光栅(RVBG)上,满足光栅布拉格反射条件 并能够沿着原光路回到 LDA 原发光区的光束能 形成有效起振,不满足反馈条件的光直接输出。 利用 RVBG 的光谱选择特性,外腔激光器能够输 出光谱窄化、中心波长稳定的激光。图 1(a) ZX 面视图为 LDA 快轴出光面,经过 FAC 快轴准直 到毫弧度发散角后,再由 BTS 将每个激光单元旋 转90°,则 ZX 面变成激光束的慢轴面,此时采用 SAC 对慢轴方向进行准直,降低快慢轴方向发散 角至毫弧度量级;图 1(b) ZY 面视图为 LDA 慢轴 出光面,为 19 个激光单元在慢轴方向的排列, FAC 不对该方向光束发散角产生影响,由 BTS 光 束变换后 ZY 面变成激光束的快轴面,为 19 个激 光单元在快轴方向的排列,发散角为毫弧度量级, SAC 不影响该方向的发散角。由分析可知 LDA 快慢轴两个方向的准直都是发生在 ZX 面。





Fig. 1 Schematic setup of external-cavity feedback structure based on "FAC + BTS + SAC + RVBG". (a) ZX surface view. (b) ZY surface view.

2.2 对比实验设计及反馈模拟分析

采用 Zemax 分别对 "FAC + BTS + SAC + RVBG"和 "FAC + SAC + RVBG"两种结构进行反 馈模拟分析。根据腔内谐振过程,不考虑 FAC、 BTS 和 SAC 口径及透过率对反馈光影响前提下, 重点考虑 RVBG 口径筛选、RVBG 角度筛选、激光 芯片 LD 口径筛选和 LD 角度筛选对外腔激光谐 振的影响。输入条件如下:

(1)激光源(LD):选用激光阵列(LDA)中的
一个激光单元进行模拟,前腔面增透(反射率为
0) 炔轴(X)条宽 *d*~1 μm / 慢轴(Y)条宽 *W*~150 μm / 发散角 θ_x×θ_y为 60°×8°;

(2) RVBG: 有效口径为 1.2 mm(X) ×1 mm

(Y),反馈角度为1°±0.5°^[4],假设反射率为100%,激光光轴与反射面垂直;

(3)聚焦镜(Focus): 焦距为 5 mm 的高阶非 球面透镜,减小像差对模拟结果的影响;

(4) FAC + BTS + SAC 结构: FAC 和 BTS 选用 LIMO 公司透镜库 FAC 焦距为 0.365 mm SAC 选 用焦距为 16.7 mm 的柱透镜;

(5) FAC + SAC 结构: FAC 和 SAC 均选用 Ingeneric 公司透镜库,分别为 0.9 mm 焦距的高阶非球 面柱透镜和 2.86 mm 的柱透镜阵列(500 μm 周期);

(6) RVBG 口径筛选(RVBG aperture filter):
 仅允许1.2 mm×1 mm 口径内的光通过,其余光 被吸收;

 (7) RVBG 角度筛选(RVBG divergence filter): 仅允许发散角在 1°±0.5°内的光能够反射
 回腔内 通过定焦透镜结合焦点处的额定光阑口
 径实现;

(8) LD 口径筛选(LD aperture filter): 仅允许
 与 LD 出光口径内的光通过(1 μm × 150 μm),其
 余光被吸收;

(9) LD 接收角度(LD acceptance angle):仅 接收角度在 60°×8°内的反馈光。

输出条件为追迹有效反馈光,是指经过 RVBG有效口径和可反馈角度并进入激光单元口 径和可接收角内的光,追迹后接收屏上的有效反 馈光越多,说明经过外腔反馈后的有效反馈率越 高,有助于提高外腔反馈光谱锁定能力。

图 2 为"FAC + SAC + RVBG"结构模型及其 模拟结果。经过快慢轴准直后的光斑尺寸为 0.9 mm × 0.5 mm 发散角为 1 mrad × 52 mrad ,其光斑 均在 RVBG 的有效口径内,但慢轴方向的发散角 过大(受激光单元周期限制 // 慢轴准直镜焦距小),仅 有 1/3 能够被反馈 再经过 LD 的口径过滤和有效接 收角度后 整体有效反馈率为 21.0%。

图 3 为 "FAC + BTS + SAC + RVBG"结构模型 及其模拟结果。对于 "FAC + BTS + SAC + RVBG" 结构,输出光束经过快轴准直后,由 BTS 进行快 慢轴翻转($X \ n Y$ 方向的光场分布颠倒), 慢轴准 直镜可以选用更大焦距。在该模型中,输出光斑 为 2.3 mm × 0.45 mm 发散角为 9 mrad × 3 mrad 因 此其发散角均在 RVBG 接受角度范围内, 但光斑在 X方向约有 1/2 被截止, 再经过 LD 的口径过滤和有 效接收角度后, 整体有效反馈率为 58.7%。



图 2 "FAC + SAC + RVBG"结构模型及模拟结果。(a) ZX 面视图; (b) ZY 面视图。

Fig. 2 Schematic setup of "FAC + SAC + RVBG" and the simulation results. (a) ZX surface view. (b) ZY surface view.



图 3 "FAC + BTS + SAC + RVBG"结构模型及模拟结果。(a) ZX 面视图; (b) ZY 面视图。

Fig. 3 Schematic setup of "FAC + BTS + SAC + RVBG" and the simulation results. (a) ZX surface view. (b) ZY surface view.

从两个反馈模型反馈结果来看, "FAC + BTS + SAC + RVBG"结构具有更高的有效反馈率,是 "FAC + SAC + RVBG"结构的近3倍。因此,在相 同 RVBG 反馈率条件下,锁定的光谱更加稳定; 对于需要相同反馈率的结构,RVBG 所需反射率 更低,外腔激光器可以实现更高的功率输出。

3 光谱锁定实验及结果分析

试验采用条宽 150 μm、周期 500 μm、19 个激 光单元组成的 780 nm 半导体激光线阵进行光谱 锁定实验,该线阵前腔面镀增透膜(R < 1%), RVBG 选用 PD-LD 公司产品,反馈中心波长在 779.8 nm,有效口径为 1.5 mm×12 mm,厚度为4 mm,衍射效率为 15%,其余元器件与上述模型一 致,分别进行"FAC+SAC+RVBG"和"FAC+BTS+ SAC+RVBG"锁定试验。

图4为单激光线阵在自由运行、"FAC + BTS + SAC + RVBG"和"FAC + SAC + RVBG"3种情况 下的输出光谱 输出激光经聚焦镜耦合,单模光纤 采集分光,由 Ando AQ6317B光纤光谱仪测试。其 中"FAC + BTS + SAC + RVBG"和"FAC + SAC + RVBG"均对波长有锁定效果,但"FAC + SAC + RVBG"结构中的自激射未能被完全压制,存在一 定的自激射情况,相比之下,"FAC + BTS + SAC + RVBG"结构将自激射几乎完全压制,具有更好的 锁定效果。



- 图4 单激光线阵在自由运行、"FAC + BTS + SAC + RVBG"和"FAC + SAC + RVBG"结构的光谱对比。
- Fig. 4 Spectrum comparison of single laser array by free-running, "FAC + BTS + SAC + RVBG" and "FAC + SAC + RVBG".

图 5 为 "FAC + BTS + SAC + RVBG"结构下, 输出激光功率效率曲线。在热沉 25 ℃条件下,采 用 Ophir FL500A 功率探测头测得在 50 A 条件 下,未锁定时功率为 50.5 W,锁定后输出为 47.2 W,电-光转换效率为 50.7%,光-光转换效率为 93.4%。

根据 RVBG 的温度波长漂移特性,温漂系数 为 0.008 nm/℃^[4],通过对 RVBG 进行温度控制, 调节锁定波长至 780 nm,以匹配泵浦波长。在本 实验中 RVBG 采用独立温度控制 ,加热到 48 ℃ , 温度波动 ±0.2 ℃ ,激光器工作电流 50 A 时 25 ℃水冷温度下的激光光谱测试结果如图 6 所示 , 中心波长为 780.000 nm ,光谱宽度(FWHM) 为 0.064 nm。

不改变 RVBG 的温度 50 A 电流驱动下 ,调节



图 5 "FAC + BTS + SAC + RVBG"结构下的输出激光功 率效率曲线

Fig. 5 Output laser power efficiency curve on "FAC + BTS + SAC + RVBG"



- 图 6 RVBG 温度 48 ℃、激光器工作电流 50 A、激光器温度 25 ℃下的激光光谱。
- Fig. 6 Laser spectrum of RVBG temperature at 48 °C , laser working current at 50 A , laser temperature at 25 °C.





Fig. 7 Laser spectra of laser working current at 50 A and different water temperature

水冷温度 ,测试在 15 20 25 ℃下的输出光谱 ,如 图 7 所示。在 15 ℃时峰值波长为 779.988 nm , 在 25 ℃下为 780.000 nm ,对应的温度漂移系数 为 0.001 2 nm/℃。

不改变 RVBG 的温度 在 25 ℃水冷温度下 调







参考文献:

节电流驱动,测试 10,20,30,40,50 A 的输出光 谱,如图 8 所示。在 20 A 时峰值波长为 779.969 nm 在 40 A 时峰值波长为 779.995 nm,对应的电 流漂移系数为 0.001 3 nm/A。

4 结 论

提出了"FAC-BTS-SAC-RVBG"的外腔反馈光 谱锁定结构,通过压缩 RVBG 的入射激光发散 角,提高了 RVBG 的有效反馈率,相对于"FAC-SAC-RVBG"结构,有效压制了自激射,获得了光 谱窄化的激光输出。基于半导体激光线阵,采用 该结构研制出谱宽0.064 nm(FWHM)、中心波长 780.00 nm、功率47.2 W 的窄线宽激光器。下一 步工作主要是进行功率扩展,基于该结构实现功 率百瓦及千瓦高功率窄线宽激光输出,以此为核 心的光源将作为 Rb 蒸汽激光器的泵浦光源。

- [1] PODVYAZNYY A ,VENUS G SMIRNOV V et al. 250 W diode laser for low pressure Rb vapor pumping [C]. Proceedings of SPIE 7583 High-power Diode Laser Technology and Applications VIII San Francisco , California , United States , 2010: 1-6.
- [2] 孙胜明 范杰 徐莉 等. 锥形半导体激光器研究进展 [J]. 中国光学, 2019, 12(1):48-58.
 SUN S M FAN J XU L *et al.*. Progress of tapered semiconductor diode lasers [J]. *Chin. Opt.*, 2019, 12(1):48-58.
 (in Chinese)
- [3] 仇伯仓 胡海 ,汪卫敏 ,等. 12 W 高功率高可靠性 915 nm 半导体激光器设计与制作 [J]. 中国光学 ,2018 ,11(4): 590-603.

QIU B C ,HU H ,WANG W M *et al.*. Design and fabrication of 12 W high power and high reliability 915 nm semiconductor lasers [J]. *Chin. Opt.*, 2018, 11(4):590-603. (in Chinese)

- [4]海一娜 . 部永刚 ,田锟 等. 水平腔面发射半导体激光器研究进展 [J]. 中国光学 , 2017 , 10(2): 194-206.
 HAI Y N ZOU Y G , TIAN K , et al. . Research progress of horizontal cavity surface emitting semiconductor lasers [J]. Chin. Opt. , 2017 , 10(2): 194-206. (in Chinese)
- [5]田锟 鄬永刚 冯晓辉 ,等. 面发射分布反馈半导体激光器 [J]. 中国光学, 2016 9(1):51-64. TIAN K ZOU Y G ,MA X H *et al.*. Surface emitting distributed feedback semiconductor lasers [J]. *Chin. Opt.*, 2016, 9(1):51-64. (in Chinese)
- [6] VOLODIN B L ,DOLGY S V ,MELNIK E D et al. . Wavelength stabilization and spectrum narrowing of high-power multimode laser diodes and arrays by use of volume Bragg gratings [J]. Opt. Lett. , 2004 29(16):1891-1893.
- [7] KISSEL H ,KÖHLER B ,BIESENBACH J. High-power diode laser pumps for alkali lasers (DPALs) [C]. Proceedings of SPIE 8241 High-power Diode Laser Technology and Applications X San Francisco , California , United States , 2012: 1-40.
- [8] PANDEY R MERCHEN D STAPLETON D et al. Narrow-line tunable high-power diode laser pump for DPAL applications [C]. Proceedings of SPIE 8733 ,Laser Technology for Defense and Security IX ,Baltimore ,Maryland ,United States , 2013.
- [9] 李志永 谭荣清 徐程 等. 用于铷蒸气激光泵浦的窄线宽阵列半导体激光器 [J]. 强激光与粒子束,2013 25(4): 875-878.

LIZ Y ,TAN R Q ,XU C ,et al. . Laser doide array with narrow linewidth for rubidium vapor laser pumping [J]. High

Power Laser Part. Beams , 2013 25(4): 875-878. (in Chinese)

- [10] KOENNING T JRWIN D STAPLETON D et al. Narrow line diode laser stacks for DPAL pumping [C]. Proceedings of SPIE 8962, High Energy/Average Power Lasers and Intense Beam Applications VII San Francisco California United States, 2014: 1–7.
- [11] KOENNING T ,MCCORMICK D ,IRWIN D et al. . DPAL pump system exceeding 3 kW at 766 nm and 30 GHz bandwidth
 [C]. Proceedings of SPIE 9733 ,High-Power Diode Laser Technology and Applications X IV ,San Francisco ,California , United States , 2016.
- [12] NEGOITA V C ,LI Y F ,BARNOWSKI T et al. Wavelength stabilization of high power laser systems using volume holographic gratings [C]. Proceedings of SPIE 8965, High-power Diode Laser Technology and Applications VII San Francisco, California ,United States, 2014: 1-11.
- [13] HAAS M ,RAUCH S ,NAGEL S et al. . Beam quality deterioration in dense wavelength beam-combined broad-area diode lasers [J]. IEEE J. Quantum Electron. , 2017 53(3):2600111-1-11.
- [14] 王立军 彭航宇 涨俊. 大功率半导体激光合束进展 [J]. 中国光学, 2015 8(4):517-534.
 WANG L J PENG H Y ZHANG J. Advance on high power diode laser coupling [J]. Chin. Opt., 2015 8(4):517-534.
 (in Chinese)



第9期

田景玉(1988 -),男,辽宁本溪人, 博士研究生,助理研究员,2013 年 于北京科技大学获得硕士学位,主 要从事大功率半导体激光器合束技 术与材料连接技术的研究。 E-mail: tianjingyu@ciomp.ac.cn



张俊(1986 -),男,重庆人,博士,副研 究员,2013年于中国科学院长春光学 精密机械与物理研究所获得博士学 位,主要从事大功率半导体激光器合 束技术的研究。

E-mail: jzh_ciomp@163.com