

体布拉格光栅外腔半导体激光器前端面反射率对输出光谱特性的影响

王伟康^{1,2,3}, 张翔^{1,2,3}, 罗薇⁴, 杨国文⁴, 袁孝^{1,2,3*}

¹苏州大学光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006;

²江苏省先进光学制造技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;

³教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;

⁴度亘核芯光电技术(苏州)有限公司, 江苏 苏州 215000

摘要 采用反射式体布拉格光栅(VBG)实现半导体激光锁频是激光技术应用中的关键技术之一,进一步压窄半导体激光的输出光谱线宽、提高外腔效率是研究重点。采用微通道水冷半导体激光模块,利用衍射效率为18%的VBG构建激光外腔,分析了前端面反射率分别为0.02%、0.20%、0.40%时的输出光谱与外腔效率。研究表明,半导体激光前端面反射率的降低能够进一步优化半导体激光器的输出光谱,提高外腔效率,压窄输出光谱线宽,实现大驱动电流范围的激光锁频。对于前端面反射率为0.02%的半导体激光器,激光输出中心波长锁定在779.8 nm处,光谱线宽压缩至0.08 nm,温漂系数为 $6.25 \text{ pm} \cdot \text{C}^{-1}$,电流漂移系数为 $0.9 \text{ pm} \cdot \text{A}^{-1}$,外腔效率达到106%,连续输出功率达到127 W。

关键词 激光器; 波长稳定; 线宽窄化; 外腔反馈; 体布拉格光栅

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230565

1 引言

半导体激光器具有电光转换效率高、功率体积比大、调制性能优异等诸多优势,被广泛应用于工业加工、消费电子等领域^[1-5]。半导体激光器作为间接光源可以泵浦多种类型激光器,但是其输出光谱宽、中心波长随温度漂移等问题限制了实际泵浦效果^[6]。记录在光热敏折变玻璃中的体布拉格光栅作为体衍射元件具有热稳定性好、光谱分辨率高、损伤阈值高等优点,在高功率激光系统中得到了广泛应用^[7-8]。体布拉格光栅(VBG)作为激光外腔,具有衍射带宽窄和热稳定性高的优点,是窄线宽外腔半导体激光器的选择方案^[9-10]。

该方案通常采用快轴准直透镜-慢轴准直透镜-体布拉格光栅(FAC-SAC-VBG)的结构,即半导体激光经过快慢轴准直后,由VBG进行窄带反馈,满足光栅反馈条件的光返回原发光点形成有效谐振^[11-12]。2004年,Venus等^[13]采用该结构成功压缩了半导体激光器的输出光谱线宽(FWHM)并减小了发散角。2021年,Liu等^[10]使用双光束整形结构,获得了峰值信噪比为30 dB、光谱线宽为0.5 nm的激光输出。2022年,Han

等^[14]使用单光束整形结构,获得了光谱线宽为0.138 nm、外腔效率为90.08%、功率为1090 W的激光输出。2023年,王渴等^[15]使用多个单管激光芯片合束,获得了功率为26.3 W、外腔效率为101%、光谱线宽为0.18 nm的蓝光输出。但是,上述这些方法存在系统结构复杂、稳定性差、光学系统效率低等问题。如何进一步压窄半导体激光的输出光谱线宽、提高外腔效率成为研究重点之一。

本文使用快轴准直透镜-体布拉格光栅构成紧凑外腔半导体激光器,区别于传统的外腔结构,这种激光器具有窄线宽和良好的波长稳定性,且成本更低、结构更紧凑、效率更高。基于该结构重点研究了半导体激光器前端面反射率对系统输出特性的影响。实验结果表明,随着半导体激光器前端面反射率的降低,系统输出光束质量得到改善,外腔效率得到提高,光谱线宽得到进一步压窄。对于前端面反射率为0.02%的半导体激光器,光谱线宽被压缩至0.08 nm,外腔效率达到106%。所设计的激光器实现了大驱动电流范围、窄线宽、高效率的激光输出,在泵浦碱金属蒸气激光器等方面具有重要的应用。

收稿日期: 2023-02-24; 修回日期: 2023-03-25; 录用日期: 2023-04-11; 网络首发日期: 2023-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(61775153)、江苏高校优势学科建设工程资助项目

通信作者: *xyuan@suda.edu.cn

2 实验及方法

2.1 实验原理

当半导体激光器处于自由运转状态时,其输出光束质量差,容易受到温度、电流等因素的影响,这限制了半导体激光器在高光谱稳定性和高精度领域中的应用。利用 VBG 的光谱选择特性,通过构建 VBG 外腔

来锁定半导体激光器的输出光谱,实现线宽窄化与波长稳定。

当将激光器的输出波长锁定在布拉格波长处时,布拉格波长反馈必须大于内腔增益。将布拉格波长处的峰值下的模式定义为外腔模式,激光器的自由运转峰值下的模式定义为内腔模式。半导体激光器外腔模的净增益系数可以表示为

$$\Delta g = \left(g_{\text{ext}} - \frac{1}{4L_d} \ln \frac{1}{R_1 R_{\text{eff}}^{\text{max}}} - \alpha_{\text{ext,L}} \right) - \left(g_{\text{in}} - \frac{1}{2L_d} \ln \frac{1}{R_1 R_f} - \alpha_{\text{L}} \right) = \frac{1}{2L_d} \ln \frac{\sqrt{R_1 R_{\text{eff}}^{\text{max}}}}{R_1 R_f} + \Delta g_1 = \frac{1}{L_d} \ln \sqrt{\frac{\sqrt{R_f} + \eta \sqrt{R_g}}{\sqrt{R_1 R_f} (1 + \eta \sqrt{R_g R_f})}} + \Delta g_1 \geq 0 \quad (1)$$

式中: $R_{\text{eff}}^{\text{max}}$ 为外腔最大有效反射率; η 为耦合效率; $\alpha_{\text{ext,L}}$ 和 α_{L} 分别为外腔模和内腔模的腔内损耗; g_{ext} 为布拉格波长处的增益; g_{in} 为材料峰值增益; $\Delta g_1 = g_{\text{ext}} - g_{\text{in}}$; R_f 和 R_1 分别为半导体激光器前端面反射率和后端面反射率; R_g 为光栅衍射效率; L_d 为内腔长度。假设 $\Delta g_1 = -5 \text{ cm}^{-1}$,如图1所示,半导体激光器外腔模的净增益系数随着前端面反射率的减小或光栅衍射效率的增加而增加。通过减小前端面反射率 R_f 和增大光栅衍射效率 R_g 更容易实现半导体激光器的波长锁定。如果要达到高边模抑制比、窄线宽和无内腔模式等,布拉格波长处的净增益必须远大于半导体激光器内腔模增益。当光栅衍射效率一定时,可通过降低端面反射率来实现目标。

的非球面透镜,慢轴方向未作处理。利用 Zemax 软件进行模拟仿真,二极管光源参数与半导体激光芯片一致,非球面透镜参数与 FAC 一致,在距离光源 100 mm 处测得的远场分布如图2所示。FAC 准直后快轴方向的发散半角为 2.23 mrad,光斑尺寸为 0.65 mm,光束指向性变好,能量分布更加集中。VBG 尺寸为 12.00 mm × 1.5 mm × 3.0 mm,峰值衍射效率为 18% ± 3%,空气布拉格波长为 779.80 nm,增透膜反射率为 $R < 0.5\%$ @760~850 nm,衍射带宽为 0.08 nm。

实验装置如图3所示,采用快轴准直透镜-VBG 紧凑结构,FAC 贴近发光面放置,VBG 与 FAC 的间距为 3 mm,VBG 外腔腔长为 4.4 mm。半导体激光器的输出光束经非球面镜准直后直接入射到 VBG 上,经 VBG 反馈耦合进入腔中实现光谱锁定,半导体激光芯片前端面反射率分别为 0.02%、0.20%、0.40%。采用铂温度探头测量半导体激光器的工作温度,采用功率计测量半导体激光器的自由运转功率和 VBG 光谱锁定后的输出功率,采用光纤光谱仪(分辨率优于 0.05 nm)记录激光的输出光谱。

3 分析与讨论

3.1 体布拉格光栅外腔半导体激光器的输出特性

体布拉格光栅外腔半导体激光器输出光谱如图4所示,激光芯片的前端面反射率为 0.2%,虚线为自由运转输出光谱,实线为 VBG 波长锁定后的输出光谱。从图4(a)可以看出,随着抽运电流的增加,自由运转输出光谱出现了明显的红移。在图4(b)中,随着工作温度的升高,自由运转输出光谱同样出现了显著的红移,光谱线宽约为 2.5 nm。这是由于增益介质中的温度随抽运电流和工作温度的增加而增加,有源区有效折射率发生变化,从而光谱红移。采用 VBG 的外腔反馈,半导体激光的输出光谱实现了稳定的窄带输出,其中心波长稳定在 779.8 nm 附近,光谱线宽为 0.1 nm。

然而,激光辐照产生的热膨胀使 VBG 周期发生变化,反馈中心波长发生漂移^[16],导致 VBG 光谱锁定后的

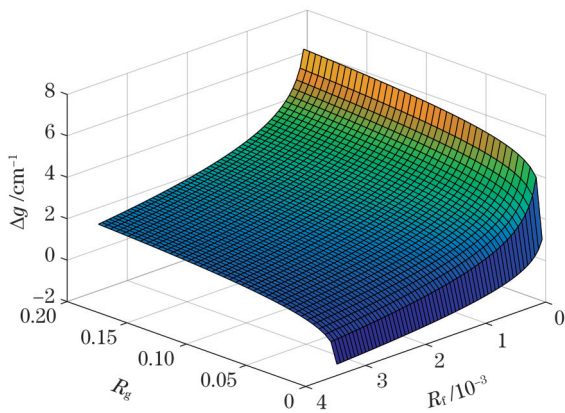


图1 半导体激光器布拉格波长处的净增益系数

Fig. 1 Net gain coefficients at Bragg wavelength of semiconductor lasers

2.2 实验装置

本实验采用微通道水冷(MCC)半导体激光巴条(LD bar),其具有 24 个发光点,发光区宽度为 200 μm,占空比为 50%,腔长为 4 mm。经封装测试,中心波长为 780 nm,阈值电流为 38 A,当驱动电流为 160 A 时激光的连续输出功率可达 140 W,温漂系数为 0.2 nm·°C⁻¹。快轴方向的发散角为 60°,慢轴方向的发散角为 8°。快轴准直镜(FAC)是有效焦距为 0.59 mm

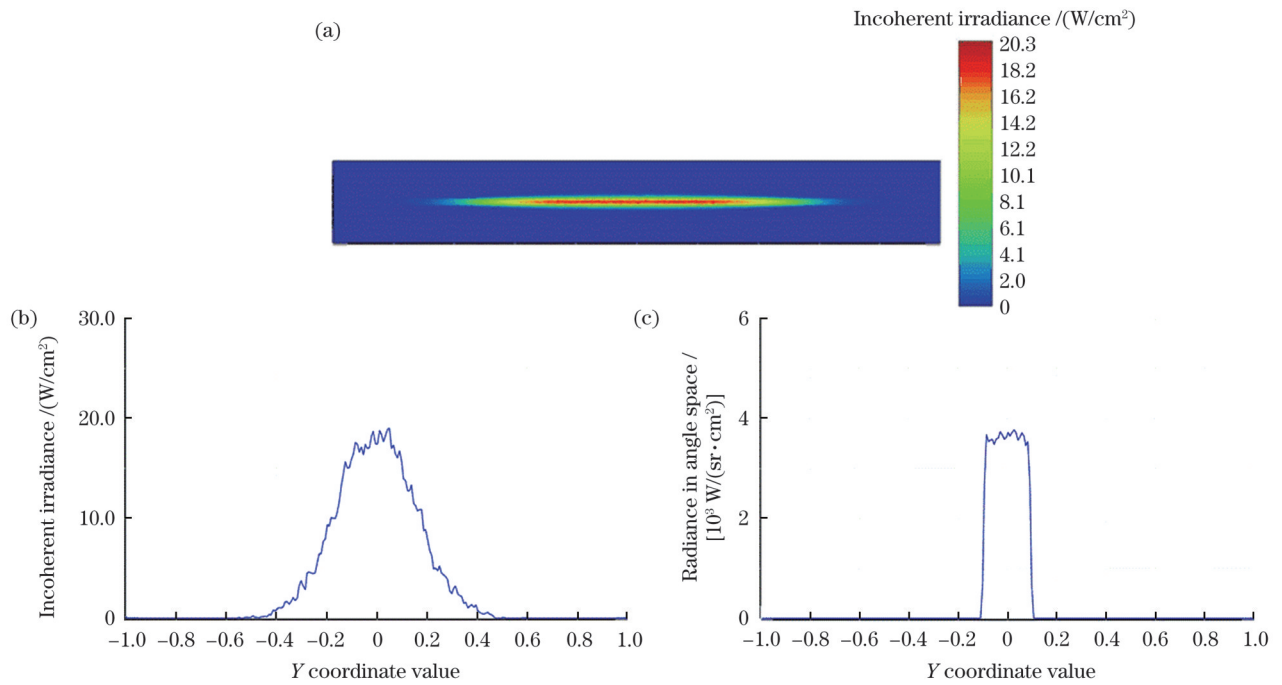


图 2 单芯片准直后的远场分布。(a)光斑能量分布图;(b)快轴方向的光斑尺寸;(c)快轴方向的发散角

Fig. 2 Far field distributions after single-chip collimation. (a) Spot energy distribution; (b) spot size in fast axis direction; (c) divergence angle in fast axis direction

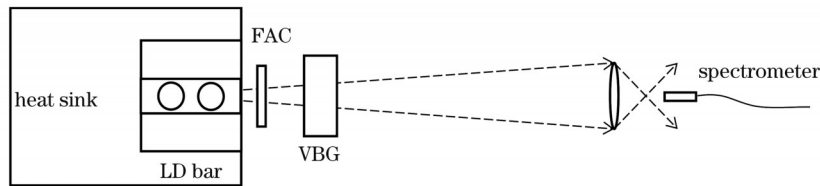


图 3 体布拉格光栅外腔半导体激光器的光谱实验装置示意图

Fig. 3 Schematic of spectral experimental setup of semiconductor laser with VBG external cavity

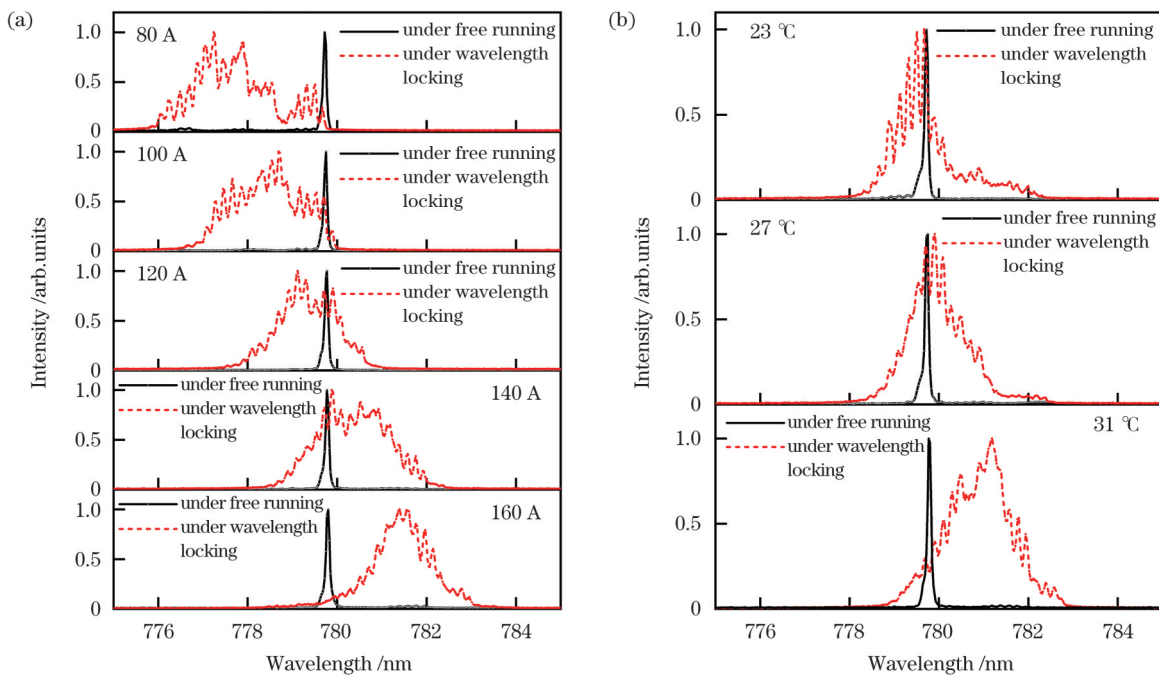


图 4 体布拉格光栅外腔半导体激光器输出光谱。(a)不同抽运电流下的光谱;(b)不同工作温度下的光谱

Fig. 4 Output spectra of semiconductor laser with VBG external cavity. (a) Spectra under different pumping currents; (b) spectra under different operating temperatures

激光中心波长仍会移动,但是波长漂移量大幅度降低。当半导体激光器的工作温度为 31 °C 时,不同抽运电流下峰值波长的变化如图 5(a) 所示。在自由运转模式下,当抽运电流为 80 A 时中心波长为 777.8 nm,当抽运电流增加到 160 A 时中心波长漂移到 781.5 nm,波长的电流漂移系数为 0.046 nm·A⁻¹。经过 VBG 光谱锁定后,当抽运电流从 80 A 增加到 160 A 时,中心波长仅产

生了 0.08 nm 的漂移,中心波长的电流漂移系数减小到 0.9 pm·A⁻¹。图 5(b) 则说明了当抽运电流为 150 A 时,半导体激光器在不同工作温度下峰值波长的变化,峰值波长的温漂系数从 0.2 nm·°C⁻¹ 减小到 6.25 pm·°C⁻¹。经 VBG 光谱锁定后,波长温漂系数降低了 31/32,输出光谱线宽降低了 30.2/31.2,半导体激光器输出光谱的稳定性和单色性都得到了显著提升。

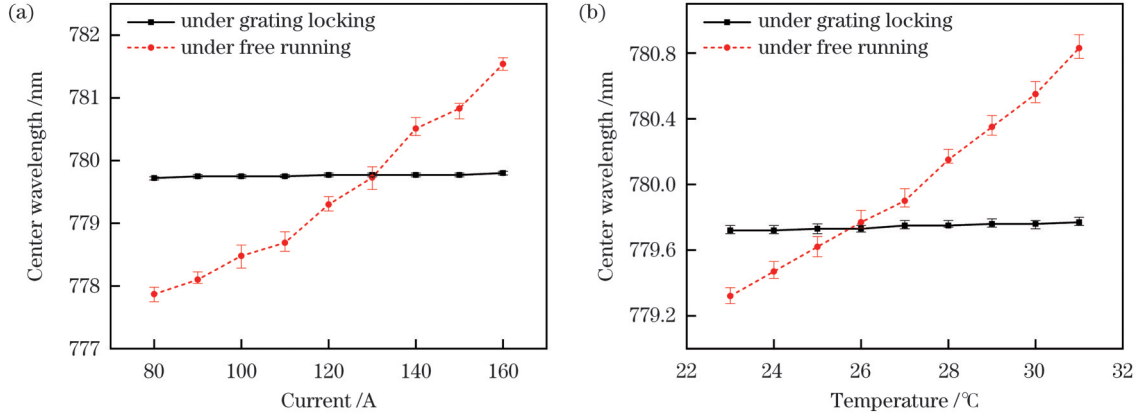


图 5 自由运转和光栅锁定下的光谱稳定性。(a)不同抽运电流下的峰值波长;(b)不同工作温度下的峰值波长
Fig. 5 Spectral stability under free running and grating locking. (a) Peak wavelengths at different pumping currents; (b) peak wavelengths at different operating temperatures

从体布拉格光栅外腔半导体激光器的增益函数可知,降低半导体激光器的前端面反射率可以增加锁定波长处的增益,优化外腔反馈和激光的输出光谱,更有

效地压缩光谱线宽。如图 6 所示,使用前端面反射率分别为 0.02%、0.20%、0.40% 的激光芯片,得到了在不同抽运电流下 VBG 波长锁定后的输出光谱。

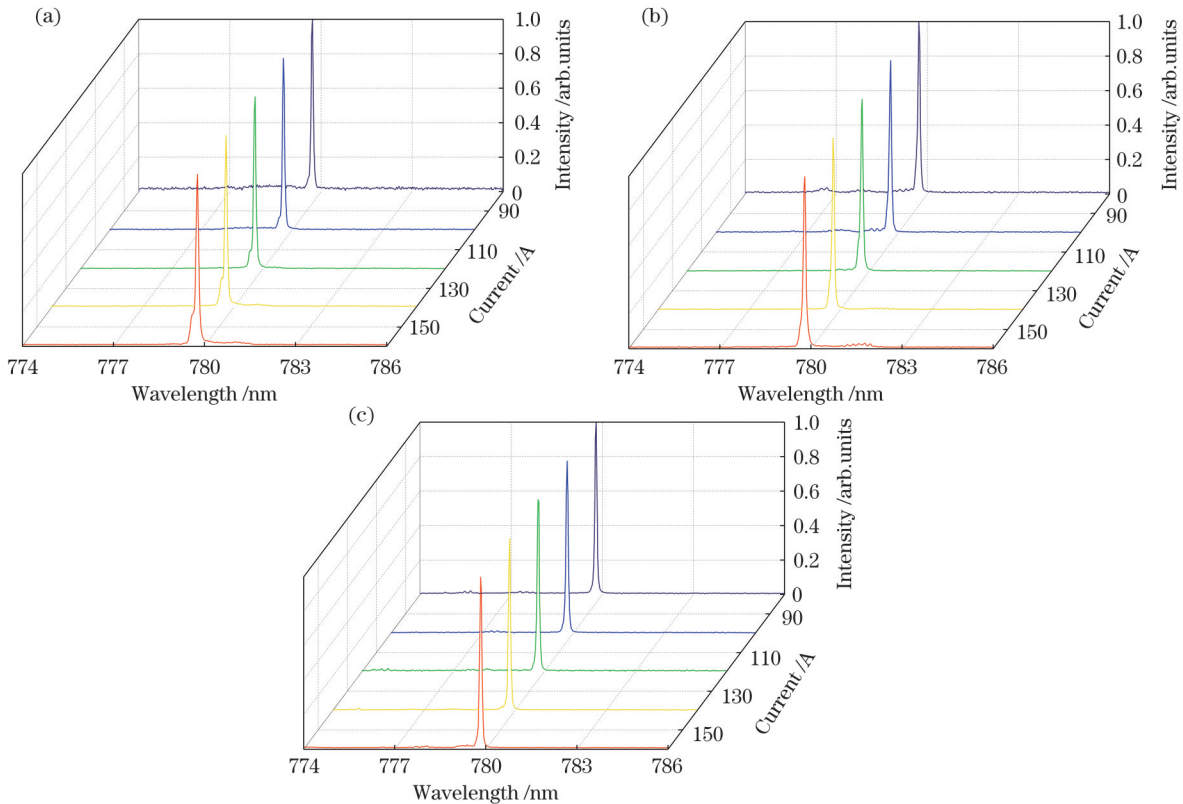


图 6 不同端面反射率下体布拉格光栅外腔半导体激光器的输出光谱。(a) 0.40%; (b) 0.20%; (c) 0.02%
Fig. 6 Output spectra of semiconductor lasers with VBG external cavities under different end face reflectivity values. (a) 0.40%; (b) 0.20%; (c) 0.02%

如图 6(a)、(b)所示,当抽运电流为 80 A 和 100 A 时,端面反射率为 0.20% 和 0.40% 的激光芯片的输出光谱的半峰全宽约为 0.09 nm, $1/e^2$ 能量处的线度约为 0.17 nm。但是随着抽运电流的进一步增加,当端面反射率为 0.40% 时,激光输出光谱的一致性变差,输出光谱底部展宽明显,在 160 A 驱动电流下, $1/e^2$ 能量处的线宽为 0.34 nm。当端面反射率为 0.20% 时,激光输出光谱的一致性同样变差,当抽运电流为 160 A 时, $1/e^2$ 能量处的线宽为 0.3 nm。如图 6(c)所示,对于端面反射率为 0.02% 的激光芯片,抽运电流在 80~160 A 范围内时光谱底部没有明显展宽,当抽运电流为 160 A 时,光谱的半峰全宽为 0.08 nm, $1/e^2$ 能量处的线宽为 0.13 nm。可以观察到,随着端面反射率的下降,锁频光谱底部的展宽得到改善,锁频光谱的质量得到进一步提升。

边模抑制比(SMSR, R_{SMSR})是主模强度和边模强度的最大值之比,是反映纵模性能的重要指标,可以表示为

$$R_{\text{SMSR}} = 10 \times \lg(M_0/M_1), \quad (2)$$

式中: M_0 为主模峰值强度; M_1 为主模峰值强度外的边模最大强度。当抽运电流为 160 A 时,端面反射率为 0.20% 和 0.40% 的激光芯片的主峰强度与次峰强度的比值约为 37:1,即 SMSR 为 15.7 dB。在相同抽运电流下,端面反射率为 0.02% 的激光芯片的 SMSR 增加到 18.0 dB,获得了更好的光谱锁定效果。

对光谱数据进行去噪处理,将其变换为强度(I)和频率(ν)的关系,采用 $\sum I(\nu) \cdot \nu$ 的比值表示内外腔模式占比。考虑到碱金属蒸气激光器对泵浦光谱线宽的要求, (779.80±0.05)nm 波长范围对应外腔模式,其余部分为内腔模式。分析半导体激光器内外腔模式占比与前端面反射率的关系,结果如图 7 所示。在端面反射率为 0.40% 的条件下,当抽运电流从 80 A 增加到 90 A 时,外腔模式占比下降,这主要是因为光谱变化幅度较大,布拉格波长底部展宽。在 90~160 A 抽运电流范围内,外腔模式占比呈现先上升后下降的趋势,抽运电流为 130 A 时达到最大值。这主要是因为随着抽运电流的增加,自由运转中心波长逐渐红移靠近布拉格波长,在 130 A 时与布拉格波长最匹配,获得了最大外腔模式占比 86%,而当抽运电流继续增加时,自

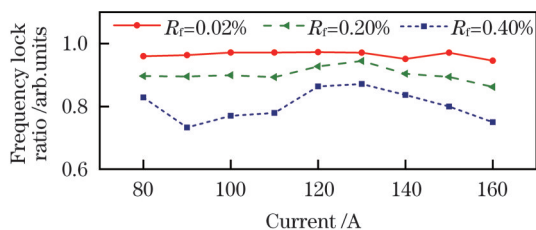


图 7 体布拉格光栅外腔半导体激光器的外腔模式占比

Fig. 7 External cavity mode ratio of semiconductor laser with VBG external cavity

由运转中心波长继续红移,逐渐偏移布拉格波长,外腔模式占比开始下降。对于端面反射率为 0.40% 的激光芯片,在驱动电流范围内,外腔模式占比中位数为 80%,内腔模式的损失在 20% 左右。

在端面反射率为 0.20% 的条件下,当抽运电流为 130 A 时,获得了最大外腔模式占比 94%,但在 80~110 A 以及 140~160 A 抽运电流范围内,外腔模式占比均低于 90%,内腔模式的损失达到 10%。当端面反射率降低到 0.02% 时,外腔模式占比随抽运电流的变化不再明显,在驱动电流范围内,外腔模式占比维持在 97% 左右,内腔模式的损失仅有 3%。可以观察到,随着端面反射率的降低,可以实现更高的外腔模式占比。对于泵浦碱金属蒸气激光器,泵浦光谱线宽以及泵浦中心波长稳定性对泵浦效果的影响很大,高的外腔模式占比以及高稳定性的激光输出对于提高泵浦效果具有重要意义^[17]。

降低半导体激光器前端面反射率会降低自由运转内腔模式的增益,导致半导体激光器外腔的净增益系数变大,从而更有效地抑制内腔模式,获得更窄的输出线宽。表 1 为不同端面反射率半导体激光芯片的线宽窄化数据,在 160 A 抽运电流下测得的光谱线宽分别为 0.08、0.10、0.11 nm,此时半导体激光巴条的输出功率为 127、134、138 W。可以看出:随着端面反射率的降低,输出光谱线宽被进一步压缩。当前端面反射率降低到 0.02% 时,线宽压缩比(自由运转激光器线宽与 VBG 腔锁频线宽的比值)提高到 31.2。由此可见,降低端面反射率不仅可以在大驱动电流范围内提高锁频光谱的质量,还可以获得更窄的光谱线宽。

表 1 不同前端面反射率半导体激光器线宽窄化数据

Table 1 Linewidth narrowing data of semiconductor lasers with different front face reflectivity values

$R_f / \%$	FWHM / nm	Compression ratio
0.02	0.08	31.2
0.20	0.10	25.0
0.40	0.11	22.7

3.2 体布拉格光栅外腔半导体激光器的效率分析

VBG 外腔半导体激光器的功率-电流($P-I$)曲线及外腔效率曲线如图 8 所示,随着半导体激光器前端面反射率的降低,光谱锁定后的输出功率呈下降趋势。当前端面反射率分别为 0.20% 和 0.40% 时,在 160 A 抽运电流下输出功率达到 134 W 和 138 W。当前端面反射率为 0.02% 时,在相同抽运电流下输出功率下降到 127 W。在相同的工作温度和抽运电流下,外腔半导体激光器与自由运转半导体激光器的功率比值为外腔效率。图 8(b)为外腔效率随前端面反射率的变化,当前端面反射率分别为 0.20% 和 0.40% 时,激光器外腔效率为 95% 和 94%,外腔效率变化幅度小,外腔效率相对较低。当前端面反射率为 0.02% 时,在 40~60 A 抽运电

流范围内, VBG 外腔反馈激光器的阈值电流下降, 光谱锁定后的输出功率高于自由运转输出功率, 获得了 150% 以上的外腔效率。在 100~160 A 抽运电流范围

内, 外腔效率为 106%。实验结果表明, 随着半导体激光器端面反射率的降低, 可以获得更高的外腔效率, 但前端面反射率的降低会引起系统输出功率的下降。

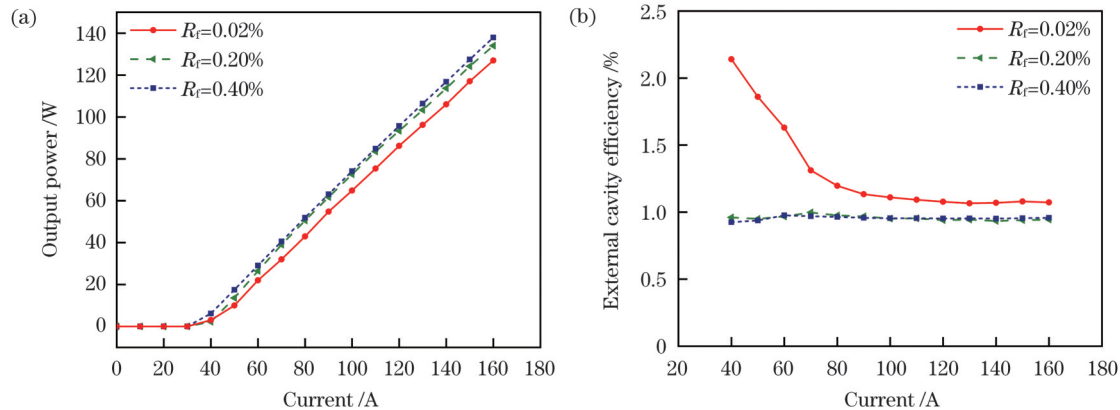


图 8 体布拉格光栅外腔半导体激光器的功率输出特性。(a) P - I 曲线; (b) 外腔效率曲线

Fig. 8 Power output characteristics of semiconductor laser with VBG external cavity. (a) P - I curves; (b) external cavity efficiency curves

对于泵浦碱金属蒸气激光器, 将铷元素加入到缓冲气体中, 吸收光谱宽依然为 0.05 nm 量级。为了获得良好的泵浦效果, 泵浦光谱需要与碱金属蒸气的吸收光谱相匹配, 通常情况下要求泵浦光谱线宽小于 0.1 nm, VBG 外腔半导体激光器外腔模式以外的部分为无效部分^[17]。当端面反射率为 0.02% 时, 输出光谱线宽变窄 (FWHM 为 0.08 nm), 外腔模式占比高, 外腔效率高, 这有助于泵浦碱金属蒸气激光器。

4 结 论

为了进一步压缩半导体激光输出光谱线宽、提高外腔效率, 利用反射式 VBG 作为激光外腔, 采用前端面反射率为 0.02%、0.20%、0.40% 的激光芯片构成 VBG 外腔半导体激光器, 研究了前端面反射率对系统输出特性的影响。

当端面反射率为 0.20%、0.40%、0.02% 时, 半导体激光器中心波长锁定在 780 nm 附近, 获得了与光栅衍射带宽相当的输出线宽 (0.08 nm)。实验结果表明, 前端面反射率的降低有助于得到质量更高的输出光谱, 进而进一步压窄输出线宽, 提高外腔效率。但前端面反射率的降低同时会导致系统输出功率的下降。对于前端面反射率为 0.02% 的半导体激光芯片, 当使用反射式体布拉格光栅时, 输出光谱线宽被压缩至 0.08 nm, 外腔效率达 106%, 连续输出功率达到 127 W, 实现了单巴条百瓦级窄线宽高效率激光输出。研究结果在泵浦高功率铷蒸气激光器方面具有重要的应用价值。

参 考 文 献

[1] 宁永强, 陈泳屹, 张俊, 等. 大功率半导体激光器发展及相关技术概述[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0114001.
Ning Y Q, Chen Y Y, Zhang J, et al. Brief review of development and techniques for high power semiconductor lasers[J]. Acta Optica

Sinica, 2021, 41(1): 0114001.
[2] Crump P, Erbert G, Wenzel H, et al. Efficient high-power laser diodes[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(4): 1501211.
[3] Rotondaro M D, Zhdanov B V, Shaffer M K, et al. Narrowband diode laser pump module for pumping alkali vapors[J]. Optics Express, 2018, 26(8): 9792-9797.
[4] 韩金樑, 张俊, 单肖楠, 等. 基于半导体激光合束技术的高功率加热光源[J]. 光学学报, 2021, 41(22): 2214001.
Han J L, Zhang J, Shan X N, et al. High power heating light source based on semiconductor laser beam combination technology [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(22): 2214001.
[5] 刘泽金, 王红岩, 许晓军. 高能半导体泵浦气体激光器[J]. 中国激光, 2021, 48(4): 0401001.
Liu Z J, Wang H Y, Xu X J. High energy diode pumped gas laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(4): 0401001.
[6] 封建胜, 袁孝, 熊宝星, 等. 用于抽运铯蒸气激光器的半导体激光器波长稳定与线宽窄化研究[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0514001.
Feng J S, Yuan X, Xiong B X, et al. Wavelength stabilization and linewidth narrowing of laser diode for pumping Cs vapor laser[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0514001.
[7] Xiong B X, Gao F, Zhang X, et al. Angular filtering by volume Bragg grating in photothermorefractive glass for nanosecond laser pulse[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(4): 040501.
[8] Chen P, Jin Y X, He D B, et al. Design and fabrication of multiplexed volume Bragg gratings as angle amplifiers in high power beam scanning system[J]. Optics Express, 2018, 26(19): 25336-25346.
[9] Wang S Y, Han J H, An G F, et al. Demonstration of a dual-wavelength alkali laser with a mixed rubidium - cesium vapor cell [J]. Optics Communications, 2020, 458: 124728.
[10] Liu B, Liu H, Zhu P F, et al. High-side mode suppression ratio with a high-stability external-cavity diode laser array at 976 nm in a wide temperature and current range[J]. Optics Communications, 2021, 486: 126792.
[11] 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]. Optics Letters, 2004, 29(16): 1891-1893.
[12] Gourevitch A, Venus G, Smirnov V, et al. Efficient pumping of Rb vapor by high-power volume Bragg diode laser[J]. Optics Letters, 2007, 32(17): 2611-2613.
[13] Venus G, Smirnov V, Glebov L, et al. Spectral stabilization of

- laser diodes by external Bragg resonator[EB/OL]. [2023-03-04]. <https://www.semanticscholar.org/paper/Spectral-stabilization-of-laser-diodes-by-external-Venus-Smirnov/fe6336bc0fb55b1044d77b7087bf71b321de9d81>.
- [14] Han J L, Zhang J, Shan X N, et al. High-power narrow-linewidth 780 nm diode laser based on external cavity feedback technology of volume Bragg grating[J]. *Optik*, 2022, 264: 169455.
- [15] 王渴, 韩金樑, 梁金华, 等. 窄线宽蓝光半导体激光器研究[J]. *中国激光*, 2023, 50(10): 1001004.
- Wang K, Han J L, Liang J H, et al. Research on narrow linewidth blue semiconductor lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(10): 1001004.
- [16] Zhang X, Feng J S, Xiong B X, et al. Diffraction of volume Bragg gratings under high flux laser irradiation[J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 8291-8297.
- [17] Gao J, Zuo D L, Zhao J, et al. Stable 811.53 nm diode laser pump source for optically pumped metastable Ar laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 84: 48-52.

Influence of Front Face Reflectivity on Output Spectral Characteristics of Semiconductor Lasers with Volume Bragg Grating External Cavities

Wang Weikang^{1,2,3}, Zhang Xiang^{1,2,3}, Luo Wei⁴, Yang Guowen⁴, Yuan Xiao^{1,2,3*}

¹*School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China;*

²*Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, Suzhou 215006, Jiangsu, China;*

³*Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, Suzhou 215006, Jiangsu, China;*

⁴*Dogain Optoelectronic Technology (Suzhou) Co.,Ltd., Suzhou 215000, Jiangsu, China*

Abstract

Objective Semiconductor lasers are widely used in industrial processing, consumer electronics, and the military because of their high electro-optical conversion efficiency, large power-to-volume ratio, and long lifetime. One of the most important applications of semiconductor lasers is to pump other types of lasers. Their overall pumping efficiency is significantly higher than that of conventional pumping sources; however, their output spectral linewidth and central wavelength drift with temperature limit the actual pumping effect. One of the key research directions has always been to narrow the output spectral linewidth of semiconductor lasers and improve the efficiency of the external cavity. It is important to adopt effective technical methods to optimize the output spectral characteristics of semiconductor lasers and expand their application in fields of high spectral stability and precision.

Methods This study proposes a compact external-cavity semiconductor laser. Based on this structure, the effects of the facet reflectivity of the semiconductor laser on the output characteristics of the system are studied. First, the effects of the facet reflectivity of the laser and the grating diffraction efficiency on the gain are discussed based on the net gain coefficient formula of the external cavity mode of the semiconductor laser. When the grating diffraction efficiency is maintained at a certain value, a high-contrast output can be achieved by reducing the facet reflectivity. Next, the optimization of the semiconductor laser dispersion characteristics with a fast-axis collimating lens is verified using the ZEMAX optical design software. A volume Bragg grating (VBG) external cavity feedback element is used to effectively compress the output spectral linewidth of the semiconductor laser and achieve a stable wavelength output. Finally, based on the discussion of the output spectra and power-current (*P-I*) curves of semiconductor lasers with different facet reflectivities, the optimization of the system output characteristics by reducing the semiconductor laser facet reflectivity is verified, which helps to pump alkali metal vapor lasers.

Results and Discussions With the external cavity feedback of the VBG, the output spectrum of the semiconductor laser achieves a stable narrow band output (Fig. 4). The central wavelength stabilizes around 779.8 nm with a spectral linewidth of 0.1 nm. After spectral locking, the central wavelength current drift coefficient reduces to 0.9 pm/A at an operating temperature of 31 °C (Fig. 5). The temperature drift coefficient of the central wavelength reduces from 0.2 nm/°C to 6.25 pm/°C for the same pumping current. The stability and monochromaticity of the semiconductor laser output spectrum are significantly improved. For laser chips with 0.20% and 0.40% facet reflectivities, the uniformity of the laser output spectrum deteriorates with an increase in the pumping current (Fig. 6) and their linewidths at $1/e^2$ energy with a 160 A driving current are 0.30 nm and 0.34 nm, respectively. Simultaneously, the external cavity mode ratio is 97% at a 0.02% facet reflectivity of the laser chip (Fig. 7). The laser output power reaches 134 W and 138 W at 0.20% and 0.40% facet reflectivity, respectively, at a pumping current of 160 A, and drops to 127 W for the same pumping current at 0.02% facet reflectivity of the laser chip (Fig. 8). A facet reflectivity of the laser chip of 0.02% achieves an output spectral linewidth of 0.08 nm and an external cavity efficiency of 106% with a 160 A pumping current.

Conclusions To further compress the output spectral linewidth of the semiconductor laser and improve the efficiency of the external cavity, a VBG laser external cavity and laser chips with facet reflectivities of 0.02%, 0.20%, and 0.40% are used. For a semiconductor laser chip with 0.02% facet reflectivity, the output spectral linewidth is compressed to 0.08 nm and the external cavity efficiency reaches 106% with a continuous output power of 127 W, using a reflective VBG. A high-efficiency laser output with a narrow linewidth and 100 watts for a single bar is achieved, which has important application value for pumping high-power rubidium vapor lasers.

Key words lasers; wavelength stabilization; linewidth narrowing; external cavity feedback; volume Bragg grating