

4 μm 波段宽谱可调谐外腔量子级联激光器马宇航¹, 吴昊^{2*}, 李再金^{1**}, 张建伟², 张星², 陈超², 宁永强², 曲轶¹, 彭航宇², 秦莉², 王立军²¹海南师范大学物理与电子工程学院海南省激光技术与光电功能材料重点实验室, 海南海口 571158;²中国科学院长春光学精密机械与物理研究所发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033

摘要 3~5 μm 中红外波段激光在气体分子传感、空间光通信、差频太赫兹产生等领域中有广阔的应用前景。研究了一种 4 μm 波段宽谱可调谐外腔量子级联激光器, 设计了一种以 Littrow 结构为基础的紧凑便携可调谐激光器模块。在激光器模块中采用同一个量子级联增益芯片, 分别使用刻线密度为 450 line/mm 和 300 line/mm 的闪耀光栅组建了不同的外腔。当采用刻线密度为 450 line/mm 的闪耀光栅时, 注入电流 303 mA 下的输出光功率为 7.30 mW, 具有 380 nm 的调谐范围 (3774~4154 nm), 边模抑制比为 20 dB, 出现高阶模式激射现象; 当采用刻线密度为 300 line/mm 的闪耀光栅时, 303 mA 注入电流下的输出功率为 5.24 mW, 调谐范围为 297 nm (3779~4076 nm), 边模抑制比为 20 dB, 出现基模激射现象。由此可见, 采用不同的外腔配置, 可以分别获得满足高精度波长调谐和高光束质量要求的激光器性能。

关键词 激光器; 量子级联激光器; 闪耀光栅; 波长调谐; Littrow 结构

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221370

1 引言

中红外波段是分子的振动转动光谱区, 其中 3~5 μm 更是重要的大气窗口, 这使得该波段具有广阔的应用前景。中红外波段外腔量子级联激光器 (EC-QCL) 宽调谐的工作特性使其可广泛应用于气体分子传感^[1-2]、差频太赫兹产生、自由空间光通信等领域。中红外波段有众多可选用的激光光源, 如 IV-VI 族铅盐激光器、色心激光器、光学参量振荡器 (OPO)、差频产生 (DFG) 中红外光源^[3] 和量子级联激光器 (QCL)。其中, 基于铅盐半导体材料的铅盐激光器具有窄线宽和高灵敏度, 但制冷要求高, 调谐范围窄, 且存在跳模; 色心激光器是以色心晶体为增益介质的固体激光器, 它能产生高光功率但制冷要求高; OPO 基于非线性频率变换, 具有宽调谐范围, 但线宽较大; 基于 DFG 的中红外激光光源可在室温下连续工作, 线宽窄, 调谐范围大, 但光电转换效率不佳, 使得激光器的光输出功率较低。EC-QCL 具有调谐范围宽、体积小、重量轻、光电转化效率高等优势^[4], 因此在许多领域中表现出巨大的应用潜力。

近年来, 4 μm 波段的 QCL 从材料外延生长到器件结构都取得了长足的进步^[5-9], 但国内外该波段 EC-

QCL 的研究成果依旧较少。2022 年, Bayrakli^[10] 报道了一种使用光电双泵浦的 EC-QCL, 光谱调谐范围为 4450~4800 nm, 边模抑制比 (SMSR) 大于 20 dB。同年, Bayrakli^[11] 报道了一种使用声光移频器 (AOFS) 的超快可调谐 EC-QCL, 光谱调谐范围为 4330~4870 nm, SMSR 大于 20 dB。采用外腔结构提高 QCL 的光输出性能是研究的重点, 本文以 Littrow 结构为基础开发了紧凑便携式的 4 μm 宽谱可调谐 EC-QCL 模块。实验表明, 采用不同的闪耀光栅配置, 激光器的调谐精度、调谐范围和光斑特性差异使得其可以在不同领域中发挥作用。

2 基本原理

2.1 QCL 发光原理

QCL 是一种基于半导体异质结构中子带间跃迁的单极激光器, 其导带能量图如图 1 所示^[12]。通过优化设计势阱和势垒厚度可以调整 QCL 的发射波长, 因此使用相同材料体系的 QCL 出射波长可以覆盖非常宽的中红外范围^[13], InGaAs/AlInAs/InP 材料体系可以在中红外波段 (3.5~16.0 μm) 实现宽光谱激光输出。自 1994 年 QCL 首次被演示以来^[14], 这些器件的性能有了巨大的提升, 2002 年研究者首次利用 QCL 在

收稿日期: 2022-10-27; 修回日期: 2022-12-03; 录用日期: 2022-12-22; 网络首发日期: 2023-01-06

基金项目: 海南省院士创新平台专项项目 (YSPTZX202034)、海南省自然科学基金 (622RC671, 120MS031)、吉林省科技厅重点研发项目 (20210201032GX, 20220201063GX, 20220201066GX)、国家自然科学基金 (62174046, 62064004, 61964007, 61864002, 61874119)、海南省高等学校科学研究项目 (Hnky2020-24)

通信作者: *hwu@ciomp.ac.cn; **lizaijin@126.com

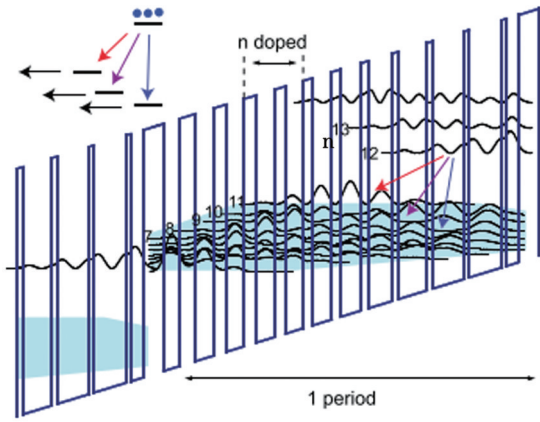


图 1 QCL 的导带示意图^[12]

Fig. 1 Schematic of conduction band of QCL^[12]

室温下进行了连续波操作^[15]。相比于传统的半导体激光器, QCL 在产生光子时并不需要空穴, 导带内子带之间的电子跃迁产生光子, 子带间隙不同, 输出不同的波长^[16]。电子在一个有源区量子阱中完成子带间跃迁后, 位于跃迁下能级的电子通过弛豫区注入到下一个有源区量子阱中的上能级, 再次进行跃迁, 依此类推形成阶梯式级联^[17]。由于半导体固有的宽增益谱特性, 激光器通常会多模式工作, 输出多个波长, 进而线宽展宽。构建外腔是实现激光器窄线宽输出的重要方法^[18], 外部谐振腔选择器使得激光器的输出线宽远小于激光器自身的工作线宽, 并且可以有效抑制温度和注入电流波动对激光器性能的劣化影响。

2.2 EC-QCL 工作原理

基于 Littrow 结构的 EC-QCL 由 QCL 增益芯片、准直透镜和闪耀光栅组成, 如图 2 所示。QCL 增益芯片从一侧腔面发射光束, 经过透镜准直后, 该光束以特定的角度入射到闪耀光栅, 一级衍射光沿原光路返回增益芯片内部, 输出激光从光栅零级衍射方向出射。Littrow 结构是最为常见的延展腔, 其光路搭建简单, 光输出性能良好, 同时输出光的波长受到光栅角度的影响, 通过旋转闪耀光栅, 能够实现激光器的可调谐^[19]。光栅参数对外腔激光器性能的影响主要在于不同的光栅周期导致波长调谐精度差异(相同电机步进条件下)、激光器线宽差异; 光栅参数对激光器输出功

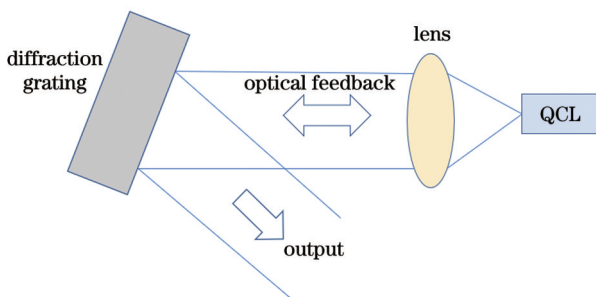


图 2 Littrow 结构的 EC-QCL 示意图

Fig. 2 Schematic of EC-QCL with Littrow structure

率的影响主要在于光栅一阶衍射效率越高, 腔内振荡功率越高, 在相同的 QCL 增益芯片驱动电流下, 腔外输出功率越小; 而闪耀光栅与增益芯片的距离(腔长)一般只对光谱线宽有一定的影响, 而对激光器输出功率和调谐范围不会产生直接影响, 但准直镜的调整水平带来的光反馈变化会产生间接影响。

闪耀光栅的衍射特性为

$$d(\sin \theta \pm \sin \gamma) = k\lambda, \quad (1)$$

式中: d 为光栅常数; k 为衍射级次; λ 为波长; θ 为入射角; γ 为衍射角。由于一级衍射光原路返回芯片有源区, 因此入射角等于衍射角, 光栅方程为

$$2d \sin \theta = \lambda. \quad (2)$$

特定波长光栅的最佳入射角度为

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2d}\right). \quad (3)$$

当使用光栅改变衍射光波长时, 入射角由 θ 变为 $\theta + \Delta\theta$, 相应的返回有源区的一级衍射光波长变为 $\lambda + \Delta\lambda$ 。波长随光栅角度的变化率为

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta\theta} = 2d \cos \theta. \quad (4)$$

由式(4)可知, 光栅常数 d 越小, θ 越大, 波长的变化率越小。

3 实验装置

图 3 所示为 EC-QCL 结构示意图, 该结构使用的 QCL 增益芯片的中心波长为 $4 \mu\text{m}$, 工作过程中增益芯片的温度保持在 25°C 左右, QCL 增益芯片已与半导体制冷器(TEC)、偶次非球面透镜集成。激光器采用 Littrow 结构, 光栅外腔的长度为 5 cm , 选用刻线密度为 450 line/mm 和 300 line/mm 的闪耀光栅作为反馈元件, 不同方向偏振电场入射下闪耀光栅的衍射效率随波长的变化如图 4 所示, 两种光栅在 $4 \mu\text{m}$ 波段均有较高的衍射效率。闪耀光栅对偏振方向非常敏感, 当偏振电场方向与光栅刻线方向平行时, 两种光栅的衍射效率约为 5% 和 28% ; 当偏振电场方向与光栅刻线方向垂直时, 两种光栅的衍射效率约为 85% 和 82% 。

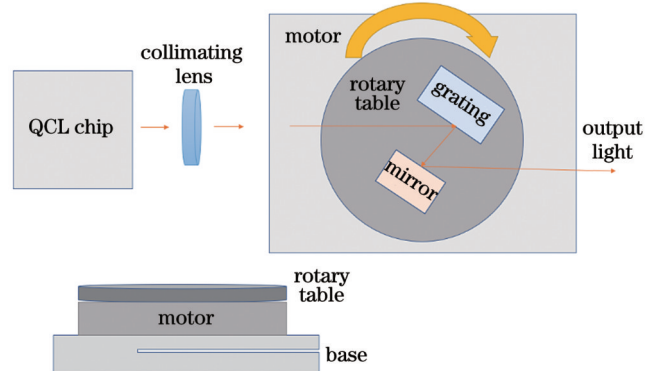


图 3 EC-QCL 结构示意图

Fig. 3 Structural diagrams of EC-QCL

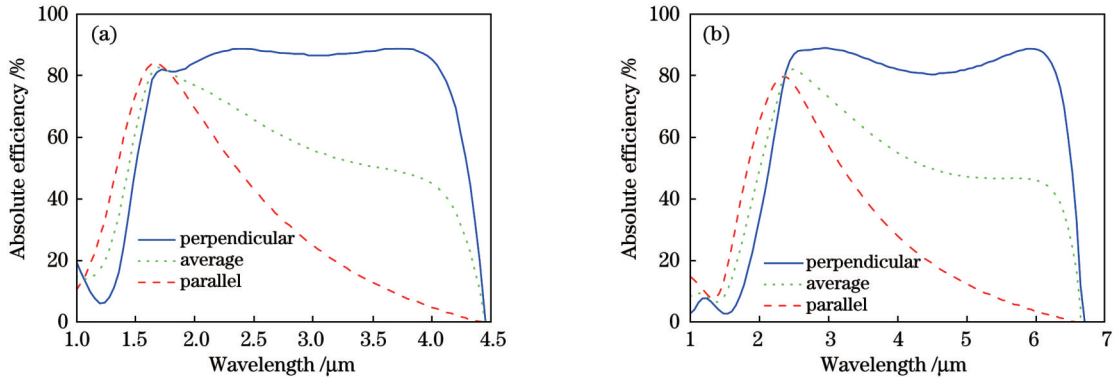


图 4 不同方向偏振电场入射下闪耀光栅的衍射效率随波长的变化。(a)刻线密度为 450 line/mm 的光栅;(b)刻线密度为 300 line/mm 的光栅

Fig. 4 Relationship between diffraction efficiency of blazed grating and wavelength under different incident polarized electric-field directions. (a) Grating with groove spacing of 450 line/mm; (b) grating with groove spacing of 300 line/mm

衍射效率越高,谐振腔内的振荡光功率越高,输出线宽越窄,故采用衍射效率更高的面内入射,以最大程度提高 SMSR。以光栅的零级衍射光作为输出光,一级衍射光反馈回增益芯片有源区形成外腔谐振。将闪耀光栅和反射镜平行放置于旋转台上,调节光栅的旋转角度和俯仰角度,使得反馈光回到激光器的有源区,激光器外腔起到选择激光波长的作用。

4 测试结果与分析

4.1 光谱特性

采用傅里叶变换红外光谱仪表征激光器的光谱特性,分辨率约为 2 nm。归一化的 EC-QCL 调谐特性如图 5 所示,在温度 25 °C、电流 303 mA 的工作条件下,当采用刻线密度为 450 line/mm 的闪耀光栅时 EC-QCL 的调谐范围为 380 nm (3774~4154 nm),光栅旋转角度为 11.06°;当采用刻线密度为 300 line/mm 的闪耀光栅时 EC-QCL 的调谐范围为 297 nm (3779~4076 nm),光栅旋转角度为 3.15°。当采用刻线密度为 450 line/mm 的闪耀光栅时,激光器高阶横模激励引起的输出光功率更高,激光器可在更宽的角度内激励,故波长调谐范围更宽。由式(4)可知,相对于刻线密度为

300 line/mm 的闪耀光栅,刻线密度为 450 line/mm 的闪耀光栅的光栅周期 d 更小,角度 θ 更大,因此波长随角度的变化率更低,色散能力更强,这使得电机每个步进的波长调谐更加精细。除此之外,光栅的色分辨本领正比于光斑覆盖的光栅周期数量^[20],在相同的入射光斑尺寸条件下,450 line/mm 光栅相比于 300 line/mm 光栅,光斑覆盖的光栅周期数量多了 50%,因此满足光栅方程的一阶衍射光自身的线宽更窄,反馈给 QCL 增益芯片后,外腔激光器的输出光谱线宽也会更窄。激光器的 SMSR 如图 6 所示,受制于 QCL 增益芯片的温控系统,最高驱动电流约为 303 mA,此时采用 450 line/mm 和 300 line/mm 闪耀光栅都获得了 20 dB 的 SMSR。SMSR 的影响因素非常多,包括 QCL 增益芯片的本征光增益能力、前后腔面膜的反射率、驱动电流水平及准直镜和闪耀光栅在内的 Littrow 外腔光学反馈综合调整水平等,甚至受测试过程中光谱仪输入光纤的耦合水平影响,当光纤耦合效率降低时,光谱纵模功率降低,而激光器噪声早已淹没在光谱仪的本征噪声中,这会造成 SMSR 严重下降。本文激光器 SMSR 为 20 dB,已经达到了实用化的水平,在改善 QCL 增益芯片的散热能力后,通过增加驱动电流来

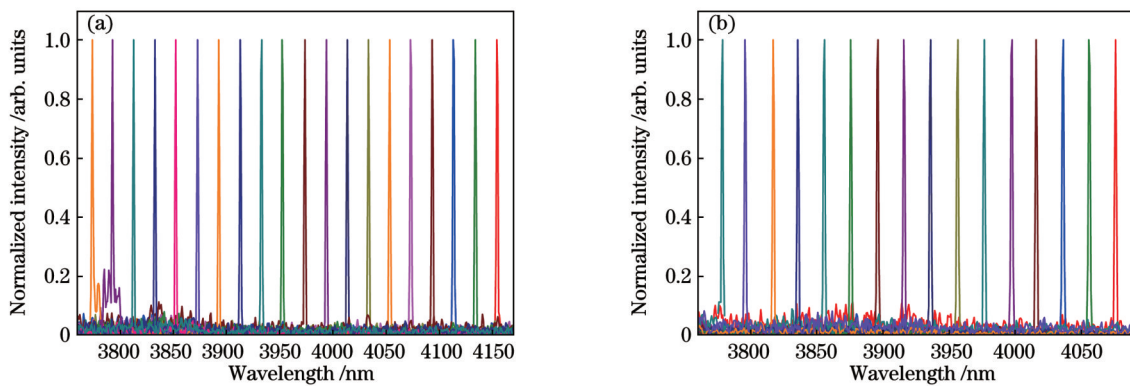


图 5 EC-QCL 在不同光栅下的调谐特性。(a)刻线密度为 450 line/mm 的光栅;(b)刻线密度为 300 line/mm 的光栅

Fig. 5 Tuning characteristics of EC-QCL under different gratings. (a) Grating with groove spacing of 450 line/mm; (b) grating with groove spacing of 300 line/mm

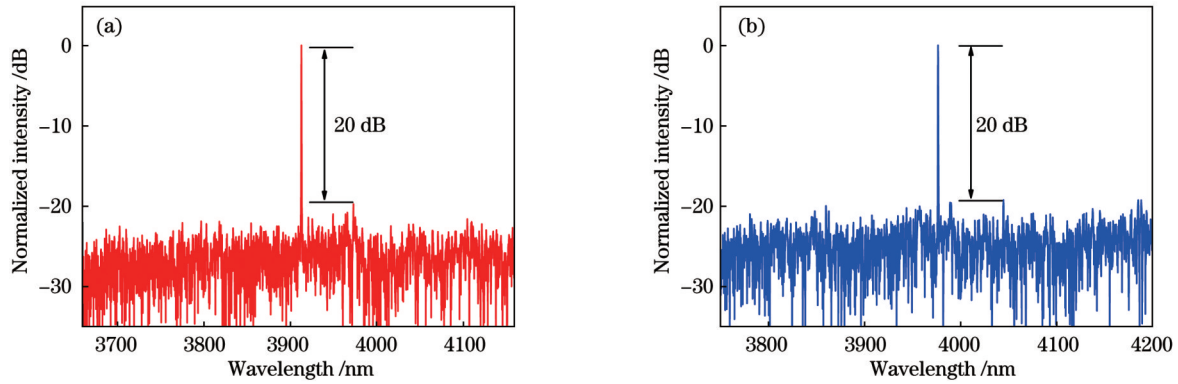


图 6 EC-QCL 在不同光栅条件下的边模抑制比。(a)刻线密度为 450 line/mm 的光栅;(b)刻线密度为 300 line/mm 的光栅

Fig. 6 SMSR of EC-QCL under different gratings. (a) Grating with groove spacing of 450 line/mm; (b) grating with groove spacing of 300 line/mm

提高输出光功率,可以获得更好的 SMSR。根据以上特性分析,当采用更高刻线密度的闪耀光栅时,EC-QCL 具有更精细的光谱调谐精度,更适用于光谱学等需要高精度波长调谐的应用领域。

4.2 光斑特性

采用中红外光斑分析仪对空间光束进行分析,分别在工作距离 20 cm 和 40 cm 处采集光斑形貌,结果如图 7 所示。在使用 300 line/mm 闪耀光栅时 EC-QCL 为基模激励,高阶模式得到很好的抑制,在使用 450 line/mm 闪耀光栅时可以看到较明显的高阶模式激励。受光斑分析仪传感器面积的限制,只能单屏显

示基模光斑和单侧高阶模式光斑,如图 7(c)、(d)所示,其中圆圈标示了基模光斑位置,高阶模式光斑以基模光斑为中心呈对称分布。EC-QCL 的精细装调是实现更高光功率的基模输出为调整目标的,此时在 450 line/mm 闪耀光栅配置下就会出现明显的高阶模式。研究还发现,微调闪耀光栅位置可以抑制高阶模式亮度,但是基模亮度并没有得到提升,此时输出总光功率明显下降。根据以上特性分析可知,EC-QCL 在采用 300 line/mm 闪耀光栅配置时,激光器是基模激励,更适用于空间光通信等对光束质量要求很高的应用领域。

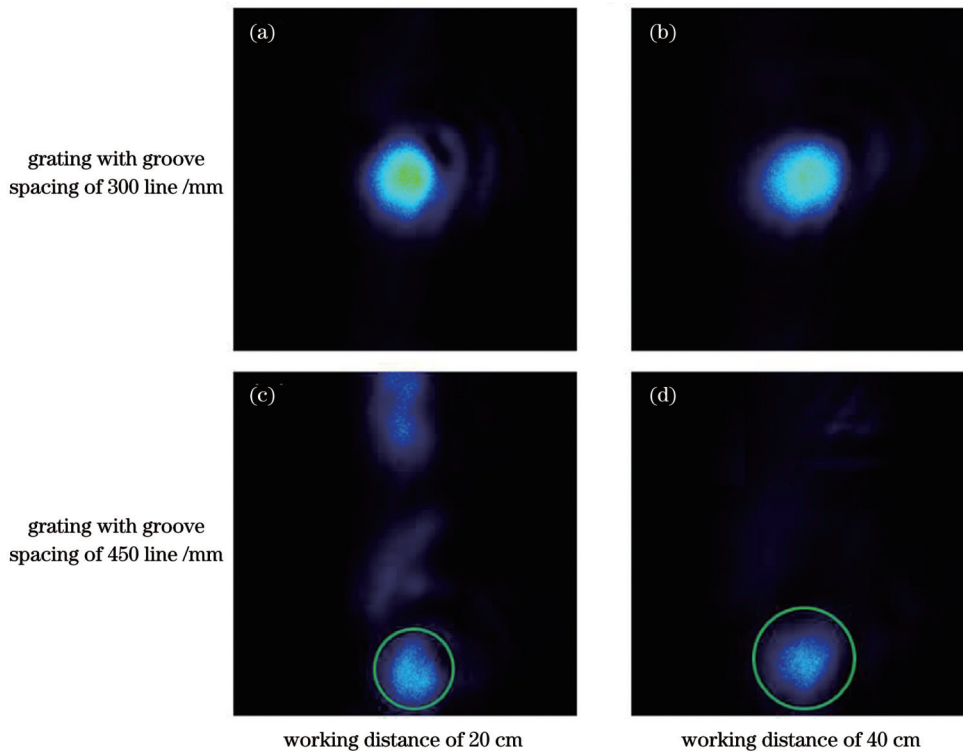


图 7 不同闪耀光栅下不同工作距离处采集的光斑形貌

Fig. 7 Spot images captured at different working distances using different blazed gratings

4.3 光功率表征

使用灵敏型热释电功率计测得的 EC-QCL 功率

曲线如图 8 所示,测试条件为激光波长为 4 μm,功率计探头紧贴激光器模块出光口。当使用 450 line/mm 闪

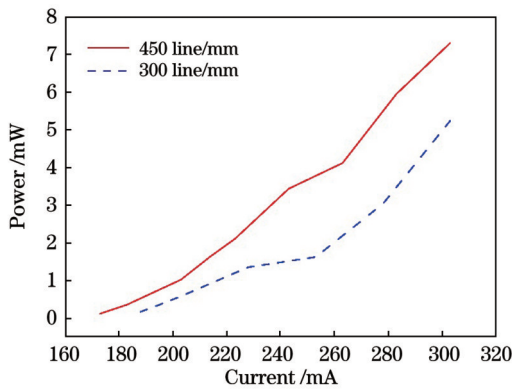


图 8 不同闪耀光栅下激光器的功率曲线

Fig. 8 Power curves of lasers under different blazed gratings

闪耀光栅时, 阈值电流为 173 mA, 在 303 mA 下的输出最大功率为 7.30 mW; 当使用 300 line/mm 闪耀光栅时, 阈值电流为 188 mA, 在 303 mA 下达到最大功率 5.24 mW。对比图 7 可见, 采用 300 line/mm 闪耀光栅时激光器为基模激励, 所测光功率仅包含基模光功率;

表 1 不同闪耀光栅下的激光器性能参数

Table 1 Laser performance parameters under different blazed gratings

Grating	Wavelength /nm	Tunable range /nm	Output power /mW	SMSR /dB	Laser output mode
Grating with groove spacing of 450 line/mm	3774–4154	380	7.30	20	Multimode
Grating with groove spacing of 300 line/mm	3779–4076	297	5.24	20	Fundamental mode

5 结 论

基于 Littrow 结构研制了便携式宽谱可调谐 EC-QCL, 该激光器以闪耀光栅作为选模反馈元件, 选取了两种不同的闪耀光栅进行对照。结果显示, 在使用 450 line/mm 闪耀光栅时, 激光器是多模激励, 获得了 7.30 mW 的最高功率, 光谱调谐范围为 3774~4154 nm, 调谐宽度达到 380 nm, 光栅旋转角度为 11.06°, SMSR 为 20 dB, 该激光器具有更高的功率和更宽、更精细的光谱调谐范围; 在使用 300 line/mm 闪耀光栅时, 激光器是基模激励, 最高功率为 5.24 mW, 光谱调谐范围为 3779~4076 nm, 调谐宽度达到 297 nm, 光栅旋转角度为 3.15°, SMSR 为 20 dB, 该激光器光束质量更高。由此可见, 在光谱应用等要求高光谱调谐精度的应用领域, 采用 450 line/mm 闪耀光栅配置时获得的激光器性能更合适; 在空间光通信等要求高光束质量的应用场景, 采用 300 line/mm 闪耀光栅配置时获得的激光器性能更合适。总之, 通过不同的外腔配置, EC-QCL 可以实现侧重点不同的性能指标, 满足不同应用场景下的使用需求, 在气体分子传感、差频太赫兹产生、自由空间光通信等领域中发挥作用。

采用 450 line/mm 闪耀光栅时激光器为多模激励, 所测光功率是基模与高阶模光功率之和, 因此采用 450 line/mm 闪耀光栅时测试光功率更高。由图 7 可见, 采用 300 line/mm 闪耀光栅时基模光亮度更高(测试中 QCL 增益芯片的驱动电流和温度设置相同, 光斑分析仪采用相同衰减片), 因此光束质量更好。

4.4 结果分析

由上文的光谱特性、光斑特性和功率表征, 可以得到两种闪耀光栅下的激光器性能参数, 结果如表 1 所示。在采用 450 line/mm 闪耀光栅时, 激光器是多模激励, 获得了 7.30 mW 的最高功率, 具有 380 nm 的光谱调谐范围, 对应的光栅旋转角度范围为 11.06°, 该配置下激光器有更高的功率和更宽、更精细的光谱调谐特性, 更适用于光谱学等需要高精度波长调谐的应用领域。在采用 300 line/mm 闪耀光栅时, 激光器是基模激励, 最高功率为 5.24 mW, 光谱调谐范围为 297 nm, 对应的光栅旋转角度范围为 3.15°, 该配置下激光器更适用于空间光通信等对光束质量要求较高的应用领域。

参 考 文 献

- [1] 张乐文, 孙鹏帅, 刘旭, 等. 基于单一量子级联激光器的大气多组分气体(CO、N₂O、H₂O)同时测量方法[J]. 光学学报, 2022, 42(4): 0430002.
Zhang L W, Sun P S, Liu X, et al. Simultaneous measurement of atmospheric multi-component (CO, N₂O, and H₂O) based on single quantum cascaded laser[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(4): 0430002.
- [2] 李振涵, 俞跃, 郭瑞. 脉冲和连续光量子级联激光器在一氧化氮检测中的性能对比[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(23): 2330001.
Li Z H, Yu Y, Guo R. Performance comparison of pulsed and continuous quantum cascade lasers in nitric oxide detection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(23): 2330001
- [3] 李晓芹, 蒋建, 王执山, 等. 光纤型宽带可调连续波差频产生中红外激光器[J]. 光学学报, 2007, 27(10): 1807-1811.
Li X Q, Jiang J, Wang Z S, et al. Widely tunable continuous-wave mid-IR difference-frequency generation source with fiber laser and amplifier[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(10): 1807-1811.
- [4] 刘峰奇, 张锦川, 刘俊岐, 等. 量子级联激光器研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0701007.
Liu F Q, Zhang J C, Liu J Q, et al. Progress in quantum cascade lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0701007.
- [5] Masselink W T, Semtsiv M P. Quantum-cascade lasers with emission wavelength 3–5 μm[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7836: 78360U.
- [6] Revin D G, Commin J P, Zhang S Y, et al. InP-based midinfrared quantum cascade lasers for wavelengths below 4 μm[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(5):

- 1417-1425.
- [7] Zhao Y, Yan F L, Zhang J C, et al. Broad area quantum cascade lasers operating in pulsed mode above 100 °C at $\lambda \sim 4.7 \mu\text{m}$ [J]. *Journal of Semiconductors*, 2017, 38(7): 78-81.
- [8] Münzhuber F, Speer R G. Pulse shaping by incoherent beam combining of several Watt-level QCL modules at 4.0 μm [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10797: 107970M.
- [9] Nataraj A, Gianella M, Prokhorov I, et al. Quantum cascade laser absorption spectroscopy of clumped $^{12}\text{C}^{18}\text{O}_2$ [EB/OL]. [2022-08-09]. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU21/EGU21-12407.html>.
- [10] Bayrakli I. Optically and electrically pumped grating-coupled external cavity quantum cascade laser[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2022, 54(3): 169.
- [11] Bayrakli I. External cavity quantum cascade lasers without anti-reflection coating with intracavity and extracavity acoustic-optic frequency shifter for fast standoff detection[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 148: 107747.
- [12] Hugi A, Maulini R, Faist J. External cavity quantum cascade laser[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2010, 25(8): 083001.
- [13] 孙永强, 费腾, 黎昆, 等. MOCVD生长的瓦级中波红外高功率量子级联激光器[J]. *光学学报*, 2022, 42(22): 2214002.
Sun Y Q, Fei T, Li K, et al. MOCVD-based mid-wave infrared quantum cascade lasers with watt level power[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(22): 2214002.
- [14] Faist J, Capasso F, Sivco D L, et al. Quantum cascade laser[J]. *Science*, 1994, 264(5158): 553-556.
- [15] Beck M, Hofstetter D, Aellen T, et al. Continuous wave operation of a mid-infrared semiconductor laser at room temperature [J]. *Science*, 2002, 295(5553): 301-305.
- [16] 李爱珍. 单极型量子级联激光器的发明及其进展(邀请论文)[J]. *中国激光*, 2010, 37(9): 2213-2220.
Li A Z. The invention and advancement on unipolar quantum cascade lasers (invited paper)[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(9): 2213-2220.
- [17] 张宇露, 黄彦, 高志强, 等. 11.4 μm 外腔宽调谐量子级联激光器研究[J]. *遥测遥控*, 2020, 41(4): 34-39, 61.
Zhang Y L, Huang Y, Gao Z Q, et al. Research on broadly tuning external cavity quantum cascade laser of 11.4 μm [J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2020, 41(4): 34-39, 61.
- [18] 王延. Littrow结构近红外外腔半导体激光器的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2020.
Wang Y. Study on the near-infrared external cavity semiconductor laser of Littrow configuration[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [19] 刘野, 刘宇, 肖辉东, 等. 638 nm光栅外腔窄线宽半导体激光器[J]. *中国光学*, 2020, 13(6): 1249-1256.
Liu Y, Liu Y, Xiao H D, et al. 638 nm narrow linewidth diode laser with a grating external cavity[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1249-1256.
- [20] 赵凯华, 钟锡华. 光学下册[M]. 北京: 北京大学出版社, 1984: 18-22.
Zhao K H, Zhong X H. *Optical volume II*[M]. Beijing: Peking University Press, 1984: 18-22.

4 μm Waveband Widely Tunable External Cavity Quantum Cascade Laser

Ma Yuhang¹, Wu Hao^{2*}, Li Zaijin^{1**}, Zhang Jianwei², Zhang Xing², Chen Chao²,
Ning Yongqiang², Qu Yi¹, Peng Hangyu², Qin Li², Wang Lijun²

¹Hainan Key Laboratory of Laser Technology and Optoelectronic Functional Materials, College of Physics and Electronic Engineering, Hainan Normal University, Haikou 571158, Hainan, China;

²State Key Laboratory of Luminescence and Application, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China

Abstract

Objective The mid-infrared waveband is the vibrational and rotational spectral region of molecules, of which 3–5 μm is the most important atmospheric window, making it an increasingly popular research topic. The wide-tuning characteristics of the external cavity quantum cascade laser in the mid-infrared waveband make it widely used in gas molecule sensing, difference-frequency THz generation, free-space optical communication, and other fields. We design a tunable quantum cascade laser with a 4- μm wavelength to realize these applications. The laser can achieve different light emission performances by replacing blazed grating, making it suitable for different conditions.

Methods The experiment in this study is performed with the Littrow structure as the main body and quantum cascade gain chip with a central wavelength of 4 μm . During the experiment, the working temperature of the gain chip is kept at 25 °C, and the quantum cascade laser gain chip is integrated with the thermoelectric cooler and even aspherical lens. Blazed gratings with groove spacings of 450 line/mm and 300 line/mm are selected as the feedback elements, and the zero-order diffraction light of the grating is selected as the output light; the first-order diffraction light is fed back to the active region of the gain chip to form an external cavity resonance. The feedback light is returned to the laser active region and the laser wavelength is selected by adjusting the grating pitch angle and rotation angle.

Results and Discussions Based on the above results, the laser maximum power and spectral tuning range are 7.30 mW (Fig. 8) and 380 nm and the grating rotational angle is 11.06° when 450 line/mm gratings are used. With this configuration, the laser has a higher power value and wider spectral tuning characteristics, which is more suitable for applications requiring narrow linewidth and high-precision wavelength tuning, such as spectroscopy. When a 300 line/mm blazed grating is used, the highest power is 5.24 mW (Fig. 8), spectral tuning range is 297 nm (Fig. 5), and the rotation angle of the grating is 3.15°. This configuration is more suitable for

space optical communication and other applications requiring high beam quality. The laser side-mode suppression ratio (SMSR) in both configurations is 20 dB (Fig. 6), which is suitable for practical use.

Conclusions In this study, a widely tunable external cavity quantum cascade laser based on the Littrow structure is developed. A blazed grating is used as the feedback element for mode selection, and two gratings with different grating constants are selected for comparison. Experimental comparisons show that when a 450 line/mm blazed grating is used, a maximum power value of 7.30 W, tuning range of 3774–4154 nm, tuning width of 380 nm, and grating rotation angle of 11.06° are obtained. The laser has a higher power value and a wider spectral tuning range. When a 300 line/mm blazed grating is used, the laser beam quality is improved, with a maximum power value of 5.24 mW, tuning range of 3779–4154 nm, tuning width of 297 nm, and grating rotation angle of 3.15°. The 300 line/mm blazed grating configuration is more suitable for high beam quality applications, such as space optical communication. The performance of the laser obtained by using the 450 line/mm blazed grating configuration is more suitable for spectral applications requiring narrow linewidth and high-precision spectral tuning. An external cavity quantum cascade laser can achieve different performance indices by using different external cavity configurations and meet the use requirements of different application scenarios. It plays an important role in molecular gas sensing, difference-frequency terahertz generation, free-space optical communication, and other fields.

Key words lasers; quantum cascade laser; blazed grating; wavelength tuning; Littrow structure