

光学学报

基于双增益芯片合束的超宽带可调谐中红外激光器

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²

¹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, 海南省院士团队创新中心, 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 设计了一种基于双增益芯片合束的超宽带可调谐中红外激光器, 该激光器以 Littrow 结构为基础, 采用中心波长分别为 4.0 μm 和 4.6 μm 的两个量子级联增益芯片提供光增益, 通过 4.2 μm 低通高反分束片合束后, 将增益光入射到 300 lines/mm 的闪耀光栅形成光反馈, 两个量子级联增益芯片通过交替互补的工作方式实现了 3~5 μm 的超宽谱调谐。在 25 $^{\circ}\text{C}$ 温控和 303 mA 注入电流下, 该激光器在 34.54 $^{\circ}$ ~46.50 $^{\circ}$ 的闪耀光栅旋转角度下工作, 波长调谐范围为 3779~4836 nm (包括 179 nm 波长调谐空白区间), 最大输出光功率为 14.12 mW, 边模抑制比为 20 dB。该激光器具有结构紧凑、调谐范围超宽的优点, 可为研制便携式模块化的中红外激光器提供参考。

关键词 激光器; 量子级联激光器; 闪耀光栅; 可调谐; Littrow

中图分类号 TN248.4 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS222096

1 引言

中红外激光通常是指波长在 3~25 μm 范围的激光, 与其他波段的激光相比, 该波段激光可以与分子产生明确且相对强烈的共振, 由于可以在中红外范围内获得强烈而独特的吸收特性, 有助于确定检测分子, 因此中红外波段在分子光谱学界被称为“指纹”区域^[1]。中红外技术是分子光谱分析的有力工具, 而量子级联激光器 (QCL) 就是其中优异的激光光源。中红外波段是许多气体分子的振动转动光谱区, 除气体分子传感外^[2], 基于中红外激光的高穿透性, QCL 也可以应用在定向红外对抗系统^[3]、自由空间光通信^[4]等领域。本文研究的基于双量子级联增益芯片合束的超宽带可调谐中红外激光器可在 3~5 μm 波段的气体分子传感、自由空间光通信、差频太赫兹产生^[5]等领域发挥作用。H₂S、SO₂、CO₂、CO 等典型的气体分子在 3~5 μm 波段具有较强的吸收作用, 且该波段处于大气窗口下, 几乎没有受到水吸收的影响^[6], 外腔量子级联激光器 (EC-QCL) 可以调节发射波长的能力, 使得同时识别和检测复合气体中的不同分子成为可能^[7-10]。

2 基本原理

2.1 QCL 发光原理

QCL 是一种基于半导体子能带间电子跃迁辐射发光的单极型器件^[11]。激光器的核心是一种超晶格结构, 由两种半导体材料交替外延生长数百层构成, 本文研究的 3~5 μm 中红外波段激光器使用以 InP 为衬底, InGaAs、AlGaAs 分别为势阱和势垒的半导体材料。激光器的核心包含多级结构, 每一级都包括电子跃迁辐射光子的有源区和抽运电子的注入区, QCL 的能带示意图^[12]如图 1 所示, 能级 3 是受激跃迁的高子能级, 能级 2 是低子能级, 当电子由能级 3 跃迁到能级 2 时会伴随光子的辐射, 电子处于能级 2 时会共振弛豫到基态能级并伴随光学声子的发射, 基态的电子又通过隧穿效应跃迁到下一个激发区形成阶梯级联的结构, 这种单电子注入、多光子输出的方式与普通的量子阱激光器截然不同。由于 QCL 激光发射频率是由子能带能量差决定的, 通过改变外延层的厚度, 可以获得不同的发射能量, 因此可以获得从中红外到太赫兹波段的激光^[13]。当 QCL 在光栅调谐的外腔中工作时, 单模激光器的输出波长可以调谐数百个波数, 具有宽调谐、小

收稿日期: 2022-12-05; 修回日期: 2023-01-07; 录用日期: 2023-02-09; 网络首发日期: 2023-02-19

基金项目: 海南省院士创新平台专项 (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

体积、高光电转换效率等优点,这使得 QCL 成为中红外光谱的理想选择^[14]。

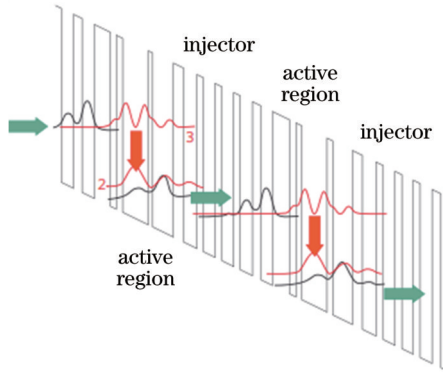


图 1 QCL 的能带示意图

Fig. 1 Energy band diagram of QCL

2.2 EC-QCL 工作原理

本实验中,基于双增益芯片合束的超宽带可调谐中红外激光器共有 2 组光路,其中每组光路均由 QCL 增益芯片、准直透镜、闪耀光栅和反射镜组成,如图 2 所示。QCL 增益芯片从一侧腔面发出的光束经过透镜准直后,以特定的角度入射到闪耀光栅,一级衍射光

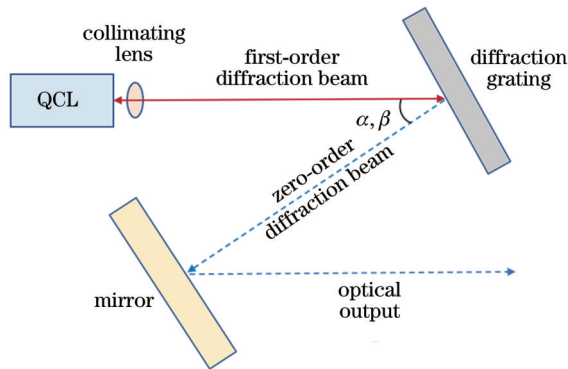


图 2 Littrow 结构的 EC-QCL 示意图

Fig. 2 Schematic of EC-QCL with Littrow structure

反射回增益芯片内部形成振荡,输出激光为光栅零级衍射光,经过反射镜改变光路射出。Littrow 结构的外腔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,通过旋转光栅,能够实现激光器的可调谐。

闪耀光栅对于入射光的衍射特性可表示为

$$\Lambda(\sin \alpha \pm \sin \beta) = k\lambda, \quad (1)$$

式中: Λ 为光栅常数; k 为衍射级次; λ 为波长; α 为入射角; β 为衍射角。由于一级衍射光原路返回芯片有源区,因此衍射角 β 等于入射角 α ,光栅方程可表示为

$$2\Lambda \sin \alpha = \lambda. \quad (2)$$

3 实验装置

图 3 为实验装置示意图,实验中使用的 QCL 增益芯片 1 为 $4.0 \mu\text{m}$ 波段, QCL 增益芯片 2 为 $4.6 \mu\text{m}$ 波段,实验过程中增益芯片的工作温度保持在 25°C , QCL 增益芯片已与半导体制冷器(TEC)、准直镜集成,两种波段的出射光经由 $4.2 \mu\text{m}$ 低通高反分束片入射到闪耀光栅。激光器外腔采用 Littrow 结构,选用光栅常数为 300 lines/mm 的闪耀光栅作为波长选择元件,衍射效率如图 4 所示。闪耀光栅对于线偏振方向非常敏感:当线偏振电场方向与光栅刻线方向平行时, $4.0 \mu\text{m}$ 波段和 $4.6 \mu\text{m}$ 波段 QCL 增益芯片在闪耀光栅下的衍射效率分别为 28% 和 19% ;当线偏振电场方向以垂直光栅刻线方向入射时,此时光栅的衍射效率分别为 82% 和 81% 。衍射效率越高,谐振腔内振荡光功率越高,输出线宽越窄,故实验采用衍射效率更高的线偏振方向入射(面内入射),以最大限度地提高边模抑制比(SMSR)。将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。光栅和反射镜平行放置在旋转台上,通过调节俯仰角和光栅角度使得反馈光回到激光器有源区,以达到选择激光波长的目的。采用直径为 15 mm 、厚度为 2 mm 的 $4.2 \mu\text{m}$ 低通高反分束片将两个 QCL 增益芯片的输出

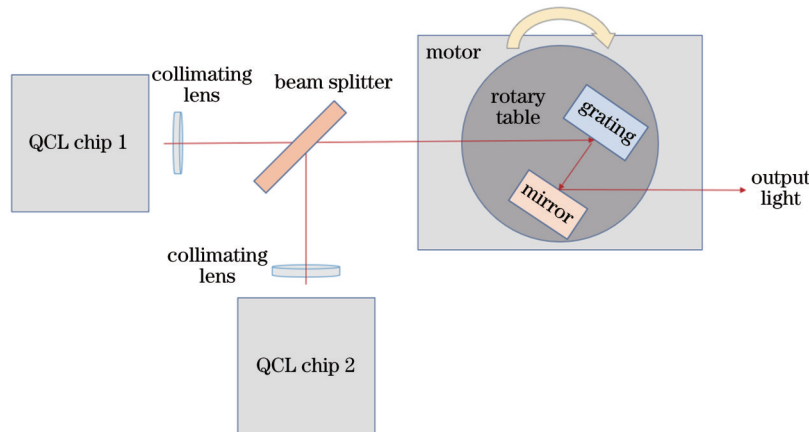


图 3 超宽带可调谐外腔中红外激光器结构示意图(QCL chip 1 为 $4.0 \mu\text{m}$ 波段增益芯片, QCL chip 2 为 $4.6 \mu\text{m}$ 波段增益芯片)

Fig. 3 Structure diagram of ultra-broad tunable external cavity mid-infrared laser (QCL chip 1 is a $4.0 \mu\text{m}$ waveband gain chip and QCL chip 2 is a $4.6 \mu\text{m}$ waveband gain chip)

光束合成为共口径单一光束,并入射到共用的闪耀光栅。利用两个 QCL 增益芯片的波长调谐空白区间作为分束片的低通高反过渡区:当闪耀光栅旋转角度为 $34.54^\circ \sim 37.69^\circ$ 时, $4.0 \mu\text{m}$ 波段 QCL 增益芯片工作且与光栅形成强反馈;当闪耀光栅旋转角度为 $39.67^\circ \sim 46.50^\circ$ 时, $4.6 \mu\text{m}$ 波段 QCL 增益芯片工作。得益于两个增益芯片交替互补的工作方式,激光器系统在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 可以实现超宽调谐范围。

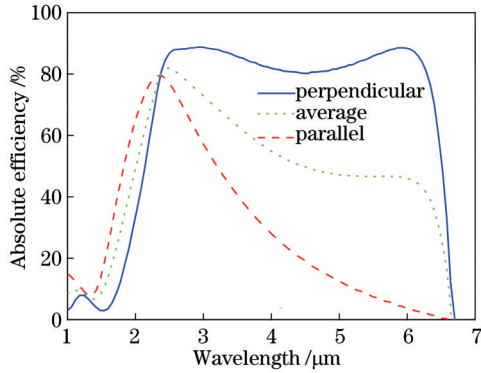


图4 闪耀光栅的衍射效率(光栅型号为 GR1325-30035, 尺寸为 $12.5 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 9.5 \text{ mm}$, 设计波长为 $3.5 \mu\text{m}$, 光栅常数为 300 lines/mm , 闪耀角为 26.5°)

Fig. 4 Diffraction efficiency of blazed grating (grating model is GR1325-30035, the size is $12.5 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 9.5 \text{ mm}$, the design wavelength is $3.5 \mu\text{m}$, the grating constant is 300 lines/mm , and the blazed angle is 26.5°)

4 测试结果与分析

4.1 光谱特性

采用分辨率约为 2 nm 的傅里叶变换红外光谱仪

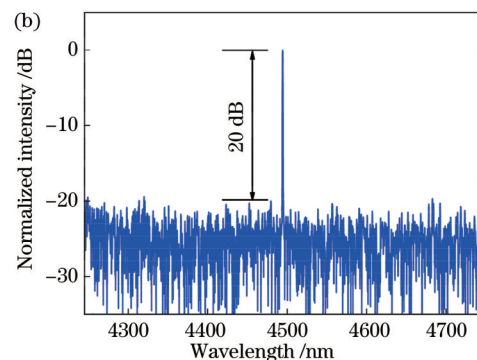
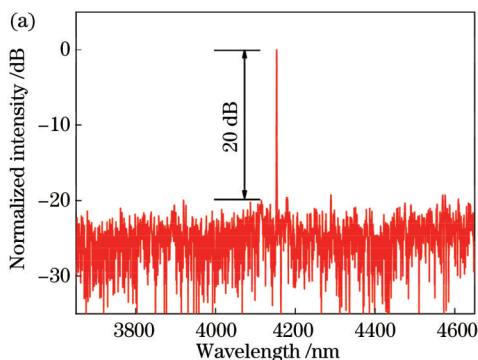


图6 不同波段 EC-QCL 的边模抑制比。(a) $4.0 \mu\text{m}$; (b) $4.6 \mu\text{m}$

Fig. 6 Side-mode suppression ratio of EC-QCL under different wave bands. (a) $4.0 \mu\text{m}$; (b) $4.6 \mu\text{m}$

4.2 光功率表征

使用灵敏型热释电功率计测得中红外激光器的功率电流曲线如图7所示,功率计灵敏度为 $10 \mu\text{W}$, 量程为 3 W 。测试条件为 25°C 温控下以激光器的中心波长输出,功率计探头紧贴激光器模块出光口。当 $4.0 \mu\text{m}$ 波段 EC-QCL 以 $3.95 \mu\text{m}$ 波长工作时,在

表征激光器的光谱特性,测试得到的归一化光谱如图5所示。在工作温度为 25°C , 电流为 303 mA , 采用 300 lines/mm 闪耀光栅的工作条件下:当光栅角度为 $34.54^\circ \sim 37.69^\circ$ 时 $4.0 \mu\text{m}$ 波段 QCL 增益芯片激射,调谐范围为 297 nm ($3779 \sim 4076 \text{ nm}$);当光栅角度为 $39.67^\circ \sim 46.50^\circ$ 时, $4.6 \mu\text{m}$ 波段的 QCL 增益芯片激射,调谐范围为 581 nm ($4255 \sim 4836 \text{ nm}$)。 $4.2 \mu\text{m}$ 低通高反分束片利用波长调谐的空白区间,低通高反过渡区间约为 200 nm , 以保证两个 QCL 增益芯片的正常工作。激光器的边模抑制比如图6所示,在驱动电流为 303 mA 的条件下, $4.0 \mu\text{m}$ 和 $4.6 \mu\text{m}$ 波段 EC-QCL 都获得了 20 dB 的最大边模抑制比,平均边模抑制比大于 14 dB 。在进一步提高散热能力后,通过增强激光器的输出光功率可以获得更好的边模抑制比。

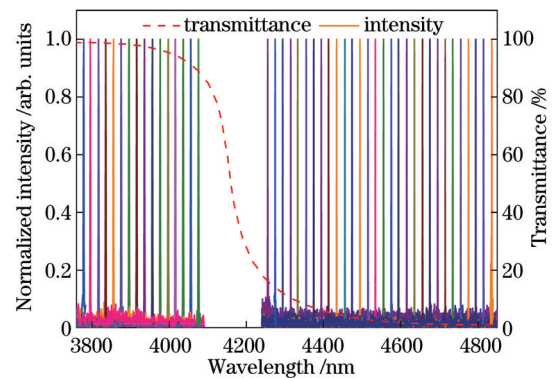


图5 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 超宽可调谐光谱,其中虚线为分束片透过率曲线,实线为归一化强度谱线

Fig. 5 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ ultra-wide wavelength tuning spectra. The dotted line is the splitter transmittance curve and the solid lines are normalized intensity

303 mA 下最大输出功率为 5.24 mW , 阈值电流为 188 mA ;当 $4.6 \mu\text{m}$ 波段 EC-QCL 以 $4.59 \mu\text{m}$ 波长工作时,在 303 mA 下达到最大功率 14.12 mW , 阈值电流为 166 mA 。激光器的功率随波长调谐变化的曲线如图8所示,由于使用功率计在自由空间测量,因此测量结果有一定的波动。

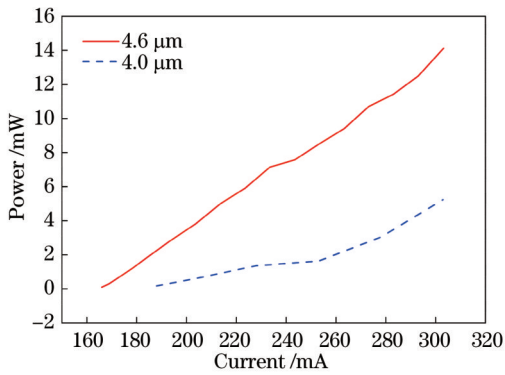


图 7 两种波段激光器的功率曲线

Fig. 7 Power curves of two waveband lasers

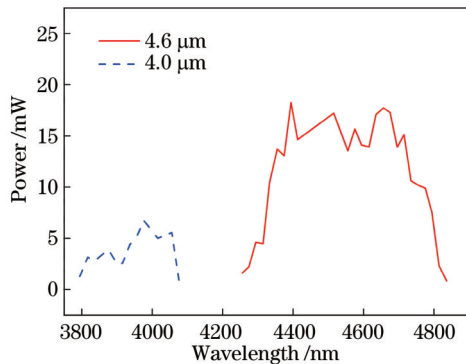
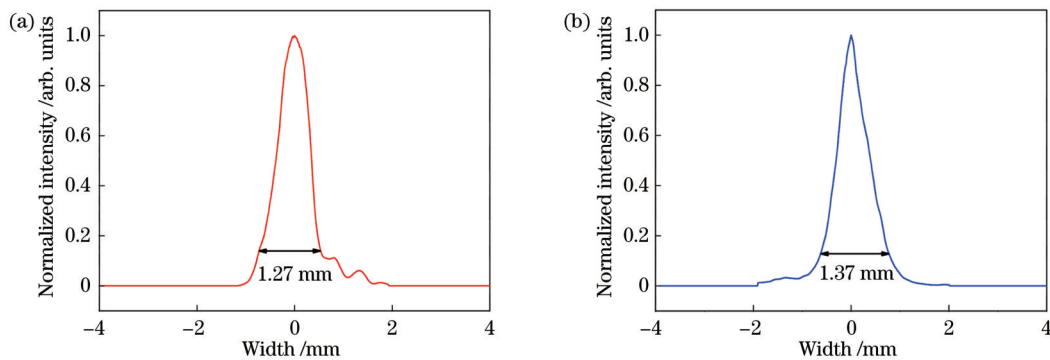


图 8 激光器功率随波长调谐变化曲线

Fig. 8 Curves of laser power changing with wavelength

4.3 光斑表征

研究激光器系统单模激射时,使用的光斑分析仪传感器感光面积为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,光斑在光斑分析仪中表征为基模光斑,形貌如图 9 所示。光斑分析仪距离激光器出射口 20 cm 处,取 $1/e^2$ 处的光斑,测得 x 轴方向的光斑直径为 1.27 mm, y 轴方向的光斑直径为 1.37 mm,如图 10 所示。通过 40 cm 和 60 cm 处的

图 10 光斑形貌在 x 、 y 方向的强度表征(已标出 $1/e^2$ 处的光斑尺寸)。(a) x 方向;(b) y 方向Fig. 10 Intensity characterization of spot shape in x and y directions (spot size at $1/e^2$ has been marked). (a) x direction; (b) y direction

5 结 论

基于 Littrow 结构设计了一种双增益芯片合束的

光斑直径测量激光器的发散角,在 $1/e^2$ 光斑轮廓标准下,输出激光在 x 方向的发散角为 1.6295 mrad, y 方向的发散角为 5.2199 mrad。

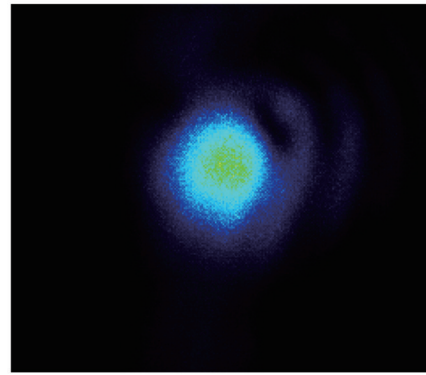


图 9 光斑分析仪在 20 cm 处测得的光斑形貌

Fig. 9 Spot shape obtained by spot analyzer at 20 cm

4.4 结果分析

所搭建激光器系统在 300 lines/mm 光栅下的性能参数如表 1 所示,在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 温控和 303 mA 注入电流下,激光器系统在 $34.54^\circ \sim 46.50^\circ$ 的闪耀光栅旋转角度下工作,调谐范围为 3779~4836 nm (包括 179 nm 波长调谐空白区间)。当波长范围为 3779~4076 nm 时 4.0 μm QCL 增益芯片工作,阈值电流为 188 mA,中心波长处最大输出功率 5.24 mW;当波长范围为 4255~4836 nm 时,4.6 μm QCL 增益芯片工作,阈值电流为 166 mA,中心波长处最大输出功率为 14.12 mW。该激光器在气体分子传感领域有显著优势,且 3~5 μm 波段大气窗口中几乎没有受到水吸收的影响,而 H_2S 、 SO_2 、 CO_2 、 CO 等气体分子在该波段具有较强的吸收作用^[15],这有利于实现痕量微量水平的气体识别和浓度检测,超宽波长调谐范围的能力也使得同时识别和检测复合气体中的不同分子成为可能。

超宽带可调谐中红外激光器,该激光器由 4.0 μm 和 4.6 μm 波段 QCL 增益芯片提供光增益,通过 4.2 μm 低通高反分束片将泵浦光入射到 300 lines/mm 的闪耀

表 1 激光器系统在 300 lines/mm 光栅下的性能参数
Table 1 Performance parameters of laser system under 300 lines/mm grating

Wavelength tuning range /nm	Spectral width /nm	Incident angle of grating /($^{\circ}$)	Maximum output power /mW	SMSR /dB
3779-4076	297	34.54 - 37.69	5.24	20
4255-4836	581	39.67 - 46.50	14.12	20

光栅形成光反馈。实验结果表明:4.0 μm 波段 QCL 增益芯片激射时的光栅旋转角度为 34.54 $^{\circ}$ ~37.69 $^{\circ}$, 中心波长处获得了 5.24 mW 的最高功率,具有 297 nm 的光谱调谐范围;4.6 μm 波段 QCL 增益芯片激射时的闪耀光栅角度为 39.67 $^{\circ}$ ~46.50 $^{\circ}$, 中心波长处获得了 14.12 mW 的最高功率,具有 581 nm 的光谱调谐范围。通过 4.2 μm 低通高反分束片组合增益芯片后,该激光器的总调谐范围为 3779~4836 nm(包含 179 nm 调谐空白区间),最大边模抑制比达到 20 dB,在具有超宽波长调谐范围的同时输出基模光束。该超宽带可调谐中红外激光器可在 3~5 μm 波段的气体分子传感、自由空间光通信、差频太赫兹产生等领域发挥重要作用。

参 考 文 献

- [1] Hugi A, Maulini R, Faist J. External cavity quantum cascade laser[J]. Semiconductor Science and Technology, 2010, 25(8): 083001.
- [2] 魏敏, 刘建国, 阚瑞峰, 等. 基于量子级联激光器的温室气体测量方法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1230003.
Wei M, Liu J G, Kan R F, et al. Study on detection of greenhouse gases based on quantum cascade laser[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1230003.
- [3] 李森森, 闫秀生. 激光对抗系统中的中红外激光源及其关键技术[J]. 光电技术应用, 2018, 33(5): 19-23.
Li S S, Yan X S. Research on mid-infrared laser source in laser countermeasure system and key technology[J]. Electro-Optic Technology Application, 2018, 33(5): 19-23.
- [4] 王喆, 汪井源, 徐智勇, 等. 远红外自由空间光通信技术[J]. 军事通信技术, 2014, 35(4): 37-42.
Wang Z, Wang J Y, Xu Z Y, et al. Long wavelength infrared free-space optical communication technology[J]. Journal of Military Communications Technology, 2014, 35(4): 37-42.
- [5] 柴路, 牛跃, 栗岩峰, 等. 差频可调谐太赫兹技术的新进展[J]. 物理学报, 2016, 65(7): 070702.
Chai L, Niu Y, Li Y F, et al. Recent progress of tunable terahertz sources based on difference frequency generation[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(7): 070702.
- [6] Riedi S. Broadband mid-infrared quantum cascade lasers for spectroscopic applications in external cavity[EB/OL]. [2022-10-09]. <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/129070>.
- [7] Heinrich R, Popescu A, Strzoda R, et al. High resolution quantitative multi-species hydrocarbon gas sensing with a cw external cavity quantum cascade laser based spectrometer in the 6-11 μm range[J]. Journal of Applied Physics, 2019, 125(13): 134501.
- [8] Liu N W, Zhou S, Zhang L, et al. Standoff detection of VOCs using external cavity quantum cascade laser spectroscopy[J]. Laser Physics Letters, 2018, 15(8): 085701.
- [9] Wei Q H, Li B C, Wang J, et al. Impact of residual water vapor on the simultaneous measurements of trace CH_4 and N_2O in air with cavity ring-down spectroscopy[J]. Atmosphere, 2021, 12(2): 221.
- [10] 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 、 N_2O 、 H_2O)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 , N_2O , and H_2O) based on single quantum cascaded laser[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(4): 0430002.
- [11] 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.
- [12] Yao Y, Hoffman A J, Gmachl C F. Mid-infrared quantum cascade lasers[J]. Nature Photonics, 2012, 6(7): 432-439.
- [13] 李爱珍. 单极型量子级联激光器的发明及其进展[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2213-2220.
Li A Z. The invention and advancement on unipolar quantum cascade lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(9): 2213-2220.
- [14] Masselink W T, Semtsiv M P. Quantum-cascade lasers with emission wavelength 3-5 μm [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7836: 78360U.
- [15] Willer U, Saraji M, Khorsandi A, et al. Near- and mid-infrared laser monitoring of industrial processes, environment and security applications[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2006, 44(7): 699-710.

An Ultra-Broad Tunable Mid-Infrared Laser Based on Beam Combination of Dual Gain Chips

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 Academician Team Innovation Center, Hainan 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 Lasers for the waveband of 3–5 μm are important in the recognition and detection of gas molecules, free space optical communication, and different frequency generation of terahertz (THz). The typical pollutants and greenhouse gases such as H_2S , SO_2 , CO_2 , and CO have strong absorption baseband in the waveband of 3–5 μm , so the development of lasers in this waveband is necessary.

Methods In order to cover the waveband of 3–5 μm , the wavebands of 4.0 μm and 4.6 μm for two QCL gain chips are utilized as the gain medium. On the basis of the Littrow structure, the output beams of the two QCL gain chips are combined into one beam with a common aperture by using a low-pass and high-reflection beam splitter of 4.2 μm ; the blazed grating of 300 lines/mm is used as the wavelength selector, the first-order diffraction light is fed back to the core of the gain chip to form an external cavity resonance, and the zero-order diffraction beam of the grating is used as the output light. By finely adjusting the position and the angle of the grating, the feedback light is returned to the core of the laser, and the laser wavelength is determined. The wavelength tuning gap of two QCL gain chips is used as the transition zone of the low-pass and high-reflection beam splitter, and the ultra-broad tuning range of the laser system can be achieved in the waveband of 3–5 μm .

Results and Discussions Under temperature of 25 °C and injection current of 303 mA, the laser system operates from 3779 nm to 4836 nm (including a wavelength tuning gap of 179 nm) (Fig. 5) with a rotation angle of 34.54°–46.50° for blazed grating tuning. The maximum output power is 14.12 mW (Fig. 7), and the SMSR is 20 dB (Fig. 6). In the wavelength range of 3779–4076 nm, the QCL gain chip of 4.0 μm operates with a threshold current of 188 mA and maximum output power of 5.24 mW (Fig. 7), while in the wavelength range of 4255–4836 nm, the QCL gain chip of 4.6 μm operates with a threshold current of 166 mA and maximum output power is 14.12 mW. In the waveband of 3–5 μm , there is almost no water absorption, and gas molecules such as H_2S , SO_2 , CO_2 , and CO have strong absorption bands. In addition, the ability of the laser to have an ultra-broad wavelength tuning range makes it possible to simultaneously identify and detect these different molecules in the gas mixture.

Conclusions In this paper, an ultra-broad tunable mid-infrared laser based on a beam combination of dual gain chips is designed. The laser system is built with QCL gain chips of 4.0 μm and 4.6 μm , a low-pass high-reflection beam splitter of 4.2 μm , and a blazed grating of 300 lines/mm. The experimental results show that the blazed grating angle for the QCL gain chip of 4.0 μm is 34.54°–37.69°, the maximum optical power is 5.24 mW, and the spectral tuning range is 297 nm. The blazed grating angle for the QCL gain chip of 4.6 μm is 39.67°–46.50°, the maximum optical power is 14.12 mW, and the spectral tuning range is 581 nm. The total tuning range of the laser is 3779–4836 nm (including a tuning gap of 179 nm), and the SMSR is 20 dB. The ultra-broad tunable mid-infrared laser can be used in gas molecule sensing, free space optical communication, and different frequency generation of THz in the waveband of 3–5 μm .

Key words lasers; quantum cascade lasers; blazed grating; tunable; Littrow