编辑推荐·综述

量子级联激光器及其多波段应用研究综述

苏浩男[1], 刘景春[1], 耿玮辰[1], 谷娜飞[1], 郭丽君[1,*], 冯　源[1,2,*]

(1. 长春理工大学 物理学院, 长春 130022; 2. 长春理工大学 高功率半导体激光国家重点实验室, 长春 130022)

摘要: 量子级联激光器(quantum cascade laser, QCL)基于子带跃迁机制, 具有宽波长调谐范围和高功率效率, 是中远红外(3~25 μm)至太赫兹(1~6 THz)波段的核心光源, 在痕量气体检测、生物医学成像及通信领域展现出不可替代的优势。本文系统综述 QCL 的物理机制、发展历程及材料结构突破, 重点聚焦多波段器件的设计进展: 分析子带间跃迁与级联效应的调控机制; 详细阐述双声子共振、束缚-连续跃迁等有源区设计策略, 并通过单/双有源区的光学与热学仿真揭示, 双有源区插入 InP 间隔层可显著提升散热性能; 在此基础上总结高功率(>1 W)、高效率(>15%)器件的实现路径, 并归纳多波段应用成果, 包括中红外气体传感(检测限达 10^{-9} 级)与太赫兹成像(分辨率达 200 μm)的系统进展。基于上述研究, 提出未来技术挑战主要集中于中远红外波段的热管理优化、太赫兹室温连续工作及功率提升等方向。

关键词: 量子级联激光器; 器件结构设计; 热管理仿真; 多波段应用

中图分类号: TN256　　**文献标志码:** A

DOI: 10.3724/jfmd.2508048　　CSTR: 32180.14.jfmd.2508048

A review of quantum cascade lasers and their research in multi-band applications

SU Haonan[1], LIU Jingchun[1], GENG Weichen[1], GU Nafei[1], GUO Lijun[1,*], FENG Yuan[1,2,*]

(1. School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The quantum cascade laser (QCL), based on the subband transition mechanism, exhibits wide wavelength tunability and high-power efficiency. It serves as a core light source in the mid- and far-infrared (3-25 μm) to terahertz (1-6 THz) spectral bands, offering irreplaceable advantages in trace gas detection, biomedical imaging, and communication. This paper provides a systematic review of the physical mechanisms, historical development, and material structure advancements of QCLs, with a focus on the design progress of multi-band devices. Initially, the regulation mechanisms of interband transitions

收稿日期: 2025−08−03;　　**修订日期:** 2025−09−30

基金项目: 吉林省基础研究项目(No. KYC-JH-XM-2023-077); 国家自然科学基金(No. NSFC-62275030)

作者简介: 苏浩男(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为导波光学(E-mail: 2462075908@qq.com)

通信作者: 郭丽君(1978—), 女, 副教授, 研究方向为集成光学光器件及光学传感器(E-mail: guolijun0915@163.com)

冯　源(1976—), 女, 副研究员, 研究方向为半导体光电子材料与器件(E-mail: fengyuan_1224@163.com)

and cascade effects are analyzed. Subsequently, design strategies for the active region, such as double phonon resonance and bound-to-continuum transitions, are described in detail. Optical and thermal simulations of single and double active regions reveal that the insertion of an InP spacer layer in dual active regions can significantly enhance heat dissipation performance. Based on these findings, the pathways to achieving high-power (>1 W) and high-efficiency (>15%) devices are summarized, along with multi-band application results. These include advancements in mid-infrared gas sensing systems (with detection limits reaching 10^{-12} levels) and terahertz imaging (resolution of 200 μm). The review concludes by identifying future technical challenges, which include optimizing thermal management for continuous operation in the mid- to far-infrared bands, achieving room-temperature operation in the terahertz range, and improving power output.

Key words: quantum cascade laser; device structure design; thermal management simulation; multi-band application

0 引言

传统半导体激光器(如 GaAs、InP 基二极管激光器)基于半导体材料的带间跃迁机制,其发光特性受限于材料的本征能带结构。这种依赖导带与价带电子-空穴对复合发光的物理机制,使得发射波长严格受制于材料的禁带宽度(E_g)。尽管通过能带工程(如Ⅱ-Ⅵ族材料、量子点结构)或非线性频率转换技术(如光参量振荡器)可在一定程度上拓展工作波段,但这些方法普遍存在 3 大技术瓶颈:(1)量子效率较低(通常<10%);(2)系统复杂度高(需多级光学组件);(3)成本效益比差。这些固有缺陷导致传统方案难以满足大气环境监测、痕量气体检测、红外对抗等关键应用对中远红外(3~25 μm)及太赫兹波段(1~6 THz)高性能相干光源的迫切需求,同时也无法适应高密度集成、低能耗通信的发展趋势[1]。

量子级联激光器(quantum cascade laser, QCL)的出现彻底改变了这一技术格局。作为一种基于量子阱导带内子带跃迁的单极型激光器,QCL 通过分子束外延(molecular beam epitaxy, MBE)或金属有机化学气相沉积(metal-organic chemical vapor deposition, MOCVD)技术,可精确调控量子阱的能级结构,从而在理论上实现从太赫兹到中红外波段对激光器的按需设计[2]。在性能方面,QCL 在中远红外波段可实现瓦级连续输出(电光转换效率>20%),其量子效率远超同波段其他技术;在环境适应性方面,QCL 通过能带工程设计已实现室温连续工作(部分 THz-QCL 仍需低温优化)[3];在光谱特性方面,QCL 结合分布反馈光栅(distributed feedback grating, DFB)或外腔(external cavity, EC)结构,线宽可窄至 1 MHz 以下;在集成潜力方面,QCL 基于成熟的Ⅲ-Ⅴ族半导体工艺,具备芯片级集成、低功耗(<5 W)和小型化(<10 cm^3)的显著优势[4-5]。表 1 展示了 QCL 与传统激光器性能对比的优势。

QCL 凭借其独特性能优势,已实现从实验室研发到产业化应用的重要跨越,在多个关键领域展现出不可替代的技术价值。在环境监测领域,QCL 系统可实现 10^{-9} 级痕量气体(如 CH_4、N_2O 等)的高灵敏度与多组分检测[7];在国防安全方面,其高功率输出和快速调谐特性为红外对抗与精确制导提供了新一代光源解决方案[8];在生物医学领域,基于 QCL 的非侵入式呼吸分析技术(通过检测 CO、NH_3 等疾病标志物)为疾病诊断开辟了新途径;同时,在前沿科学研究中,QCL 驱动的高分辨率分子光谱学和太赫兹成像系统正推动材料科学与生命科学等领域取得突破性进展。这些应用成果充分体现了 QCL 作为中远红外波段核心光源的战略价值[9-10]。Market Research Future[11] 预测,2025—2035 年全球 QCL 市场将以 11.62% 的复合年增长率扩张,这充分印证了其技术价值和应用潜力。

本文将从量子工程原理出发,系统分析单/双有源区结构的性能差异(结合光学仿真数据),梳理关键波段的技术突破,并探讨产业化进程中面临的技术挑战与创新路径。

表 1　QCL 与传统激光器性能的对比

Table 1　Performance comparison between QCL and conventional lasers

对比维度	QCL	传统半导体激光器(GaAs/InP基)	QCL的技术优势
工作原理	量子阱导带内子带跃迁(单极型)	导带-价带间复合发光(双极型)	突破材料带隙限制
波长范围	中远红外(3~25 μm)至太赫兹(1~6 THz)	可见光-近红外(0.4~2.0 μm)	覆盖范围包括大气窗口[1]
功率效率	在中红外波段连续输出>1 W, 功率效率在10%~25%	在中红外波段功率效率较低	波段覆盖广, 中红外波段效率更高[3]
温度特性	中红外: 室温连续工作; 太赫兹: 工作温度由液氮制冷显著提升	中红外器件普遍需热电制冷	环境适应性更强[3]
集成性能	单片多波长集成	多波长需外置合束器	微型化系统优势
典型指标	气体检测限达到10^{-9}	气体检测限达到10^{-6}	检测灵敏度提升[6]
制造成本	单片外延成本高, 但系统集成成本低	器件成本低, 但中红外系统成本极高	全生命周期成本优势
主流应用	痕量气体检测(10^{-9}级)、太赫兹医学 成像、红外对抗	光纤通信、 激光打印	特殊波段不可替代性

1　QCL 发展历程

1.1　关键技术突破

QCL 是一种基于量子阱子带间电子跃迁的半导体激光器, 其工作原理与传统二极管激光器存在本质差异。决定 QCL 光子能量的是量子阱厚度, 而非材料本征带隙, 这一特性使其波长设计具有高度灵活性。其物理思想可追溯至 1971 年: Kazarinov 等[12] 提出, 在偏置电压下, 电子从量子阱基态隧穿至相邻阱激发态并辐射光子, 随后经非辐射弛豫返回基态, 通过周期性级联实现光放大[13]。

1994 年, 美国贝尔实验室 Faist 等[14] 首次通过实验验证了该理论。他们采用 MBE 技术制备出以 InGaAs/InAlAs 为有源区的 InP 基 QCL(图 1), 通过导带子带间跃迁实现了 4.2 μm 激射, 标志着半导体激光新领域的诞生。

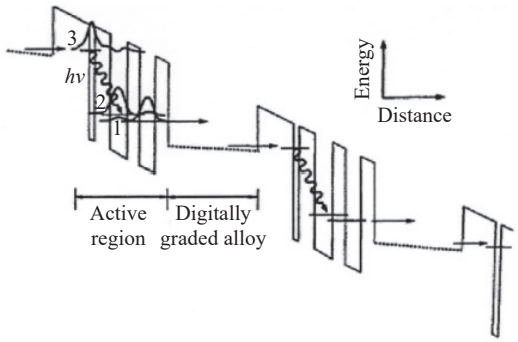

图 1　世界上首个 QCL 能带示意图[14]

Fig. 1　Schematic diagram of the world's first QCL band [14]

1.2　关键技术演进里程碑

室温连续工作突破: 2002 年, 西北大学 Beck 等[15] 基于双声子共振有源区设计, 实现了首台室温连续工作的 QCL(发射波长 λ = 9.1 μm, 输出功率 P = 17 mW)。美国 Pranalytica Inc.公司的 Lyakh 等[16] 基于掩埋异质结构, 开发了一款输出波长为 4.6 μm 的 QCL 芯片, 在室温连续工作条件下, 实现了 1.6 W 的最大输出功率, 其电光转换效率和阈值电流密度分别高达 8.8% 和 1.05 kA·cm^{-2}。Lyakh 等[17] 进一步研制出一种发射波长为 4.7 μm 的锥形 QCL, 在连续工作模式下实现了超过 4.5 W 的输出功率。Lu 等[18] 报道的 QCL 实现了高达 16.6% 的室温电光转换效率和 5.1 W 的连续输出功率, 并具备 3.8~8.3 μm 的宽光谱单模发射能力, 展现出卓越的综合性能。

功率与效率优化: 2009 年, 西北大学 Bai 等[19]、Razeghi[20] 通过增加有源区周期(30 级→40 级)降低波导损耗, 制备出激射波长为 4.8 μm 和 10 μm 的器件, 其中 4.8 μm 激光器室温连续输出功率达 3.4 W, 电光转换效率为 15.5%。同年, 中国科学院半导体研究所 Liu 等[21] 利用固态源 MBE 技术, 在国内首次实现了室温连续工作 QCL, 并优化了输出功率。

2024 年，北京遥测技术研究所张盛楠等[22]制备了输出波长为 8.4 μm 的 QCL，其室温脉冲峰值功率为 10 W，最高电光转换效率达 21.1%，处于国内长波红外 QCL 领先水平。

中红外波段进展：2020 年，中国科学院半导体研究所 Wang 等[23]报道了一款长波 QCL，该器件以 InGaAs/InAlAs 为有源区结构，输出波长达 7.7 μm，并在 7.16~8.16 μm 范围内具有可调谐性，在室温下实现了 1.17 W 的输出光功率，电光转换效率达 9.08%。2022 年，庞磊等[24]采用 MOCVD 外延生长了 4.6 μm QCL，其有源区采用改进型双声子共振结构（$In_{0.669}Ga_{0.331}As/In_{0.362}Al_{0.638}As$ 量子阱/垒，界面增厚补偿），室温输出功率达 364 mW（图 2）。崔广州等[25]通过优化 MOCVD 波导掺杂浓度，实现了 10.13 μm 长波 QCL 室温工作，验证了 MOCVD 在长波器件中的应用潜力。

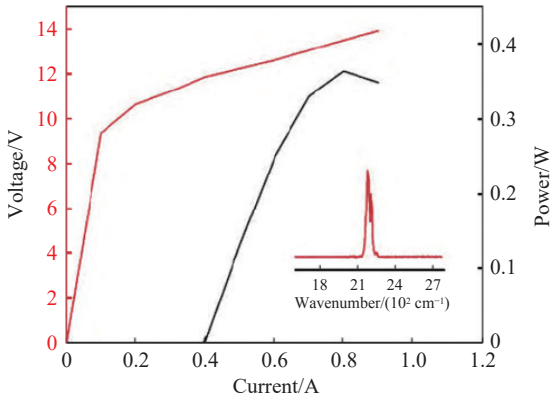

图 2　室温连续模式下的功率-电流-电压特性曲线与光谱图[24]

Fig. 2 Power-current-voltage characteristic curve and spectra under room temperature continuous mode[24]

光束质量的进展：半导体激光器直接输出的光束通常具有较大的发散角。蔡军等[26]利用二维光束质量分析仪测量了输出激光的近场与远场分布（图 3），测得近场 x 和 y 方向的发散角分别为 4 mrad 和 6 mrad，远场焦斑分布均匀。中国科学院半导体研究所邹华翊等[27]采用偏振合束技术实现了共光斑输出，连续输出功率达 6.04 W，偏振合束效率为 96.5%。北京信息科技大学王锐等[28]针对 4.6 μm QCL 设计了 1×16 分束器结构，进一步提升了激光器的输出功率。

太赫兹技术的拓展：2002 年首台太赫兹 QCL 问世[29]。目前，基于 AlGaAs/GaAs 等材料已实现

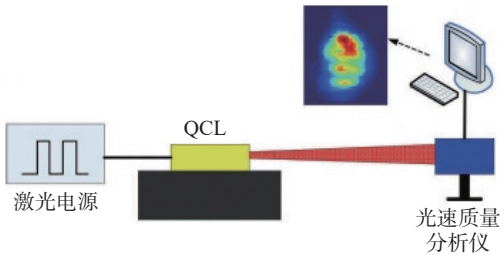

图 3　QCL 光束质量测试实验示意图[26]

Fig. 3 Schematic diagram of the QCL beam quality test experiment[26]

多个工作频率的 THz-QCL。Li 等优化了光频梳技术[30]，Zhang 等[31]推进了激光合束研究，这些进展均推动了 THz-QCL 向实用化方向发展。

自 1994 年问世以来，QCL 技术发展迅速，研究团队数量持续增加，其应用范围已从实验室扩展至民用与军用领域。

2　QCL 的原理与结构设计

2.1　QCL 的原理

QCL 的有源区（active region）是其最核心且设计最为精密的部分，直接决定了激光的波长、效率、阈值电流和输出功率等关键性能。有源区并非由单一材料层构成，而是由多个周期性排列的量子阱和势垒组成的复杂异质结构，通过能带工程设计实现电子在特定子能级间的受激辐射。此外，通过稳定的高能级电子注入和低能级电子抽取，可实现粒子数反转。QCL 的增益区由多个周期（通常为 10~50 个周期）的有源区/注入区组成。激光上能级的电子通过受激辐射跃迁至激光下能级并发射一个光子，随后电子通过注入区隧穿至下一个周期，继续参与受激辐射过程（图 4），形成“级联”效应[32]。

2.2　QCL 的有源区设计

提升 QCL 输出功率的研究主要集中于有源区结构优化。目前，已开发出多种创新设计方案，包括双声子共振、单声子共振、非共振抽取以及束缚-连续跃迁等结构[33-35]。

双声子共振结构：该结构通过释放两个纵向光学（longitudinal optical, LO）声子的能量，实现电子从低能级的抽运（图 5(a)）。其中，E_{32} 和 E_{21}（E_3–

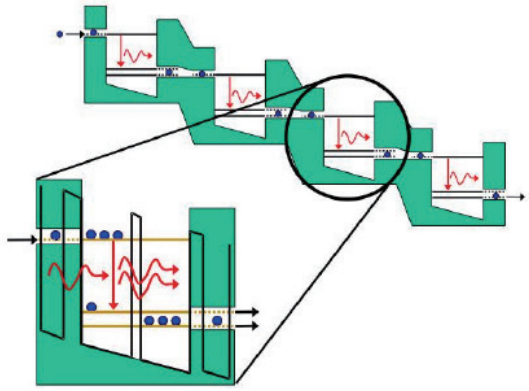

图 4　量子级联效应示意图[32]

Fig. 4　Schematic diagram of the quantum cascade effect[32]

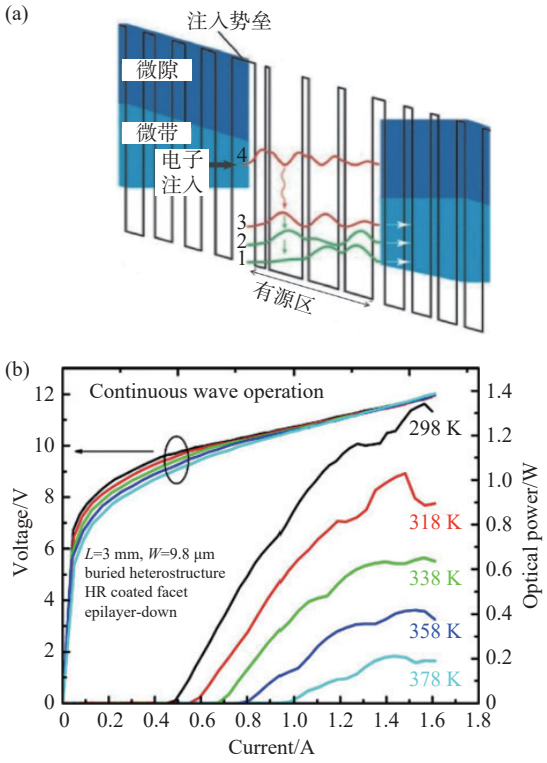

图 5　(a)四阱耦合双声子共振有源区结构能带示意图; (b)输出特性示意图[36-37]

Fig. 5　(a) Energy band diagram of the active region structure of four-well coupled two-phonon resonance; (b) schematic diagram of output characteristics[36-37]

E_2=E_2−E_1=30 meV)对应两个 LO 声子能量, E_{43} 为辐射跃迁(E_4−E_3=135 meV)。有源区由 4 个 InGaAs 量子阱组成, 能级 1、2 和 3 为 3 个耦合的低能级, 且在能级 E_3 与 E_2 之间以及能级 E_2 与 E_1 之间均具有一个 LO 声子的能量。双声子共振的关键在于显著缩短了注入区电子的子带内散射寿命, 从而高效激发电子。相比之下, 上激射态则保持了更长的子带内散射寿命, 涵盖电子的发射与吸收过程。此外, 能级 E_4 到 E_3 采用垂直跃迁设计, 第一个薄 InGaAs 阱的设计减少了注入基态与低激射态波函数(1、2、3)的重叠, 提高了注入效率。美国西北大学 Bai 等[36] 采用气态源 MBE 技术制造了激射波长为 4.6 μm 的四阱双声子共振耦合 QCL, 实现了室温下的连续波运转。图 5(b) 展示了该激光器在 298 K 温度下约 1.3 W 的大功率输出[36-37]。

单声子共振结构: 电子从较低能级抽运的过程通过释放一个 LO 声子能量实现, 产生较短的内子带电子散射寿命, 使电子在注入区被有效激发(图 6)[38-39]。由于电子在能级 E_3 到 E_2 之间的跃迁发生在同一量子阱内, 其波函交叠数显著。这种垂直跃迁方式能够有效规避异质结界面粗糙度的影响, 进而收窄光增益谱线宽并降低器件的阈值电流密度。美国 Bell 实验室依此设计了双阱耦合单声子共振结构[39]。

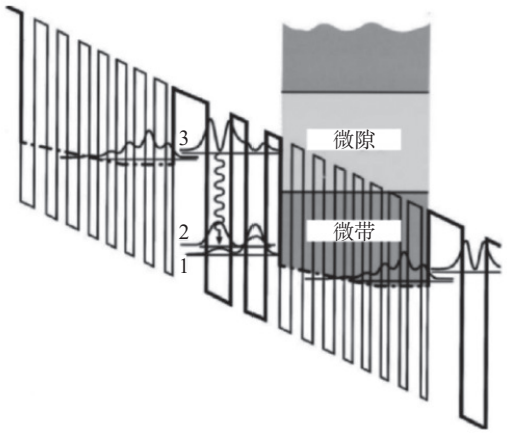

图 6　双阱耦合单声子共振与垂直跃迁结构的导带能量图[38-39]

Fig. 6　Energy band diagram of the conduction band for the double-well coupled monophonic resonance and vertical transition structure[38-39]

非共振抽取有源区结构: 2009 年, Lyakh 等[40] 研发了一种新型非共振抽取有源区结构的 QCL, 如图 7 所示。该器件通过 MBE 技术制备, 基于非共振抽取设计实现了 4.6 μm 波长的 QCL, 有效抑制了载流子热逃逸, 室温连续波输出功率达 3 W, 电光转换效率为 12.7%。

束缚-连续跃迁有源区结构: 2001 年, 瑞士联邦理工学院 Faist 等[41] 开发了一种束缚-连续跃迁有源区结构的 QCL, 其有源区与注入区无明显界限

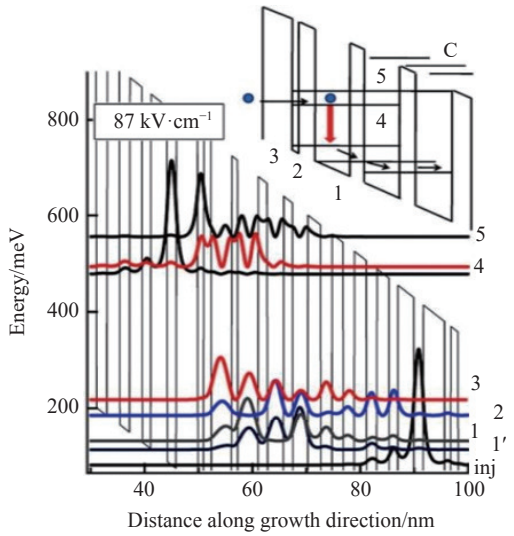

图 7　非共振抽取有源区结构的导带能带图[40]

Fig. 7　Energy band diagram of the conduction band for the non-resonant extraction active region structure[40]

(图 8)。为提高电子注入效率,该有源区采用中间宽、边缘窄的超晶格微带设计,电子波函数在靠近注入区时达到最强,并在有源区内逐渐减弱。束缚-连续跃迁有源区结构的核心能量循环机制为:电子在完成 $E_2 \rightarrow E_1$ 能级跃迁并发光后,迅速散射至超晶格微带Ⅲ。该微带作为快速通道,将电子高效输运至后续周期的注入区,从而实现高效的电子循环利用。

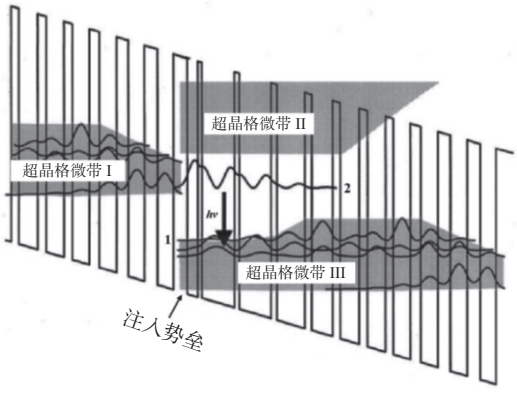

图 8　束缚-连续跃迁有源区结构的导带能带图[41]

Fig. 8 Conductive band energy band diagram of the bound-continuous transition active zone structure[41]

有源区级数和外延结构(epitaxial structure)设计与生长质量均对器件性能产生重要影响。有源区设计决定光增益和电子输运特性,而激光波导设计则主要影响模式约束和光损耗。此外,波导结构的制备工艺对模式约束和光损耗具有关键作用[42-43],核心在于优化波导材料的厚度和掺杂浓度等参数,以增强对有源区光场的限制并降低波导损耗,最终在有效约束光模式、最小化损耗以及最大化有源区散热之间实现最佳平衡。

2022 年,中国科学院半导体研究所孙永强等[44]通过优化 MOCVD 生长条件,成功制备了高界面质量的双声子共振结构材料,实现了室温连续波输出功率高达 1.21 W 的 4.6 μm QCL,并分析了基于 30 级和 40 级有源区材料制备的器件性能,探讨了不同级数对器件性能的影响。2024 年,四川大学王渝沛等[45]报道了一种基于双有源区结构的 4.7 μm 中波红外 QCL,在 9.5 μm 脊宽下实现了室温连续基横模工作。通过优化外延层设计,在有源区中心插入 InP 间隔层,成功制备了不影响最大输出功率的宽脊宽基横模 QCL。插入 InP 显著提升了器件的散热性能,有效补偿了插入 InP 间隔层导致的材料质量下降所带来的负面影响,从而维持了器件的连续输出性能。本团队对单/双有源区结构的光场分布进行了仿真模拟,结果如图 9 所示。通过表 2 与图 10 的热学仿真对比可以发现,当有源区中间插入 InP 后,器件的输出性能未显著下降,散热效果更佳,从而确保了输出性能。

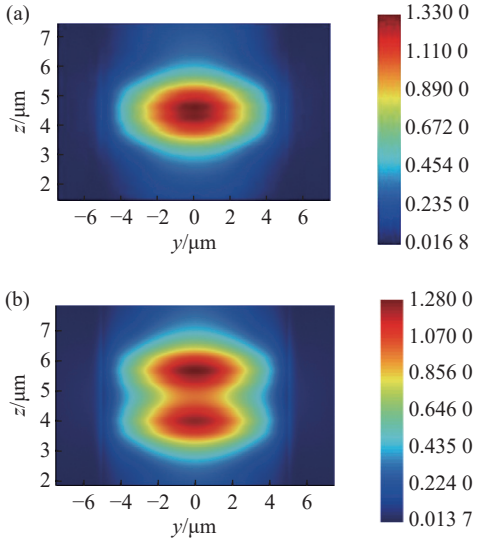

图 9　(a)单有源区与(b)双有源区的光学仿真结果示意图

Fig. 9 Schematic diagram of optical simulation results for (a) single active region and (b) dual active region

在 THz 波段,QCL 的有源区结构对器件性能具有重要影响,其有源区主要包括 4 种结构:束缚

表 2　单/双有源区的光场与热场仿真结果对比[45]

Table 2 Comparison of light field and thermal field simulation results for single/dual active regions[45]

结构	光场仿真结果	热场仿真结果
单有源区	光场主要分布在有源区内	热量集中在有源区, 最高为443 K
双有源区	光场主要分布在有源区内	热量集中在有源区, 最高为363 K

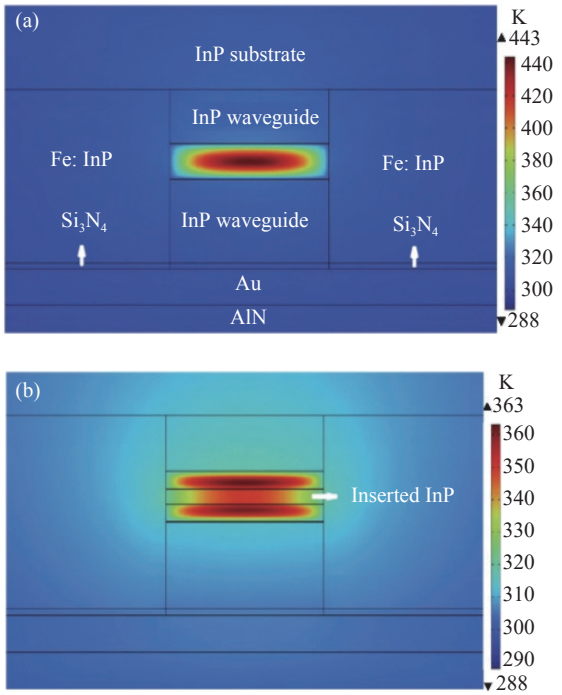

图 10　(a)单有源区与(b)双有源区的热学仿真结果示意图[45]

Fig. 10 Schematic diagram of thermal simulation results for (a) single active region and (b) dual active region[45]

态到连续态结构、共振声子结构、复合结构以及抽运控制型结构。

束缚态到连续态结构: 如图 11 所示, 能级 2 为激光上能级, 束缚态位于两个微带之间, 能级 1 为激光下能级。电子从能级 2 跃迁至能级 1 并发射光子后, 迅速弛豫至微带底部, 随后通过隧穿效应注入到下一周期的激光上能级, 从而开启新一轮的激光发射循环。采用该结构的器件具有更低的功耗和更优的温度特性。

共振声子结构: 如图 12 所示, 电子从激光上能级受激辐射跃迁至下能级后, 通过共振声子散射机制迅速弛豫至基态(注入区)。这一快速排空过程有效维持了上、下能级间的粒子数反转, 是激光持续产生的关键。此外, 下激光能级与基态能级的能量差约等于 LO 声子能量。采用该结构的器件可实现较大的增益, 且对改善器件的温度特性具有显著优势。

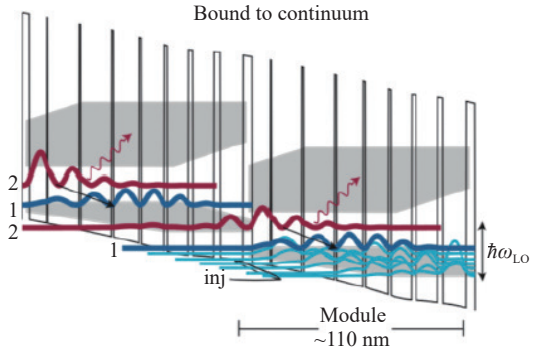

图 11　束缚态到连续态结构的有源区示意图[46]

Fig. 11 Schematic diagram of the active region in a bound-to-continuous-state structure[46]

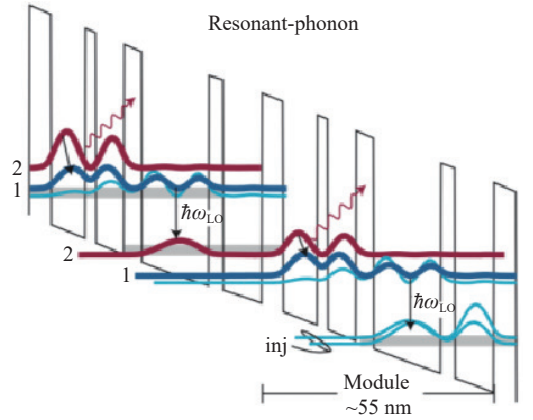

图 12　共振声子结构的有源区示意图[46]

Fig. 12 Schematic diagram of the active region of resonant phonon structure[46]

复合结构: 复合结构结合了束缚态到连续态结构与共振声子结构的优势(图 13), 通过将注入能级与微带底部能隙设置为等于 LO 声子能量, 形成一个共振声子散射通道。该设计充分利用声子发射的高跃迁速率, 使电子能够快速被抽运出注入区, 显著提升了整体抽运效率。该结构优化了器件的综合性能, 适用于连续工作模式。

抽运控制型结构: 如图 14 所示, 通过将注入能级 3 设置在与激光上能级 2 相隔一个光学声子能量的位置, 构建一条高效的声子辅助弛豫路径。该设计显著降低了电子注入对共振隧穿条件的敏感性, 提升了器件在不同工作温度下的性能与稳定性。

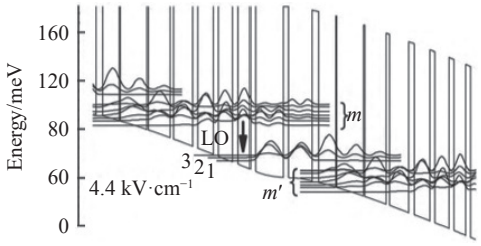

图 13　THz-QCL 的复合结构有源区示意图[47]

Fig. 13 Schematic diagram of the active region in composite structure of a THz-QCL[47]

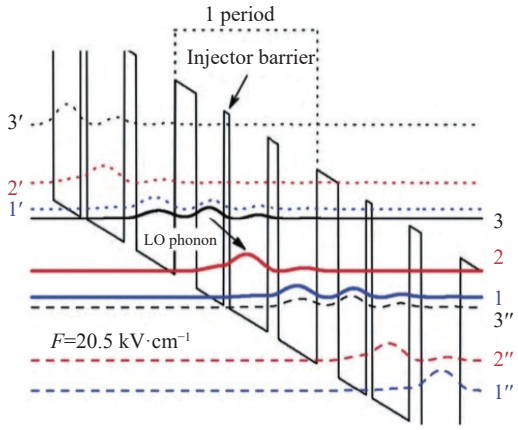

图 14　抽运控制型结构的有源区示意图[48]

Fig. 14 Schematic diagram of the active area of pumping control structure[48]

2.3　QCL 的波导结构设计

在 8~12 μm 长波红外区域，QCL 已实现室温连续工作，电光转换效率可达 5%~15%[49-52]。然而，长波 QCL 的电光转换效率仍偏低，大部分输入电能转化为热能，导致热积累，引发载流子再分布并加剧热载流子逃逸，最终导致器件性能下降。为解决这一问题，可在波导外延结构设计中采用图 15 所示的双沟道外延结构，不仅能够实现 QCL 的单模输出，还可显著改善散热性能，在较大截面尺寸下仍能维持单模运行，同时有效降低制造成本。在器件制备过程中，可通过刻蚀技术形成脊型波导结构，降低非脊区域的等效折射率，从而有效抑制高阶横模的产生，并将基模能量集中约束在有源区核心。该双沟道设计实现了多重优势：减小有源区有效面积、降低阈值电流与内部损耗、提升器件温度稳定性及光传输效率。最终，器件寿命得以延长，应用潜力显著提升。

北京信息科技大学林青华等[53]利用双沟道结构并电镀金（图 16）对器件的散热效果进行了模拟。

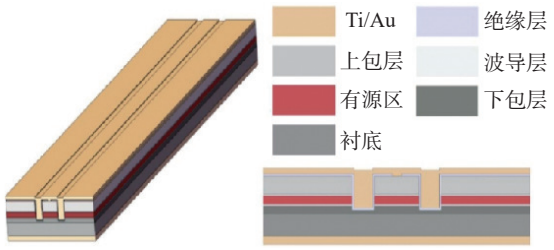

图 15　单模 QCL 双沟道脊型波导结构示意图

Fig. 15 Schematic diagram of a single-mode QCL dual-channel ridge waveguide structure

从图 17 的热模拟结果可以看出，该结构显著提升了器件的散热性能，尤其是倒焊结构效果更优。林青华等[53]还报道了一种掺铁掩埋异质结结构，如图 18 所示，利用金刚石底座的掩埋异质结倒焊结构实现了散热。结合表 3 的对比数据可以看出，采用金刚石底座的器件能够进一步提升散热效果。

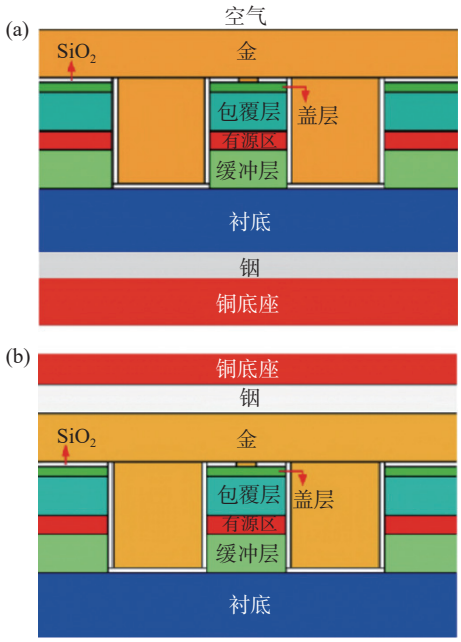

图 16　(a)正焊与(b)倒焊的电镀金双沟道脊器件示意图[53]

Fig. 16 Schematic diagram of gold-plated dual-channel ridge devices with (a) positive welding and (b) inverted welding[53]

与中红外 QCL 不同，THz-QCL 的波导结构不再采用低折射率包层。为更好地将光限制在有源区内，THz-QCL 采用两种波导结构：半绝缘衬底-表面等离子体（semi-insulating substrate-plasma, SISP）波导（图 19）和金属-金属（metal-to-metal, MM）波导（图 20）[54]。在 SISP 波导中，顶部金属层与底部等离子体层构成双面金属波导，将太赫兹光场紧密限制在腔内。关键优化在于采用半绝缘 GaAs 衬底结

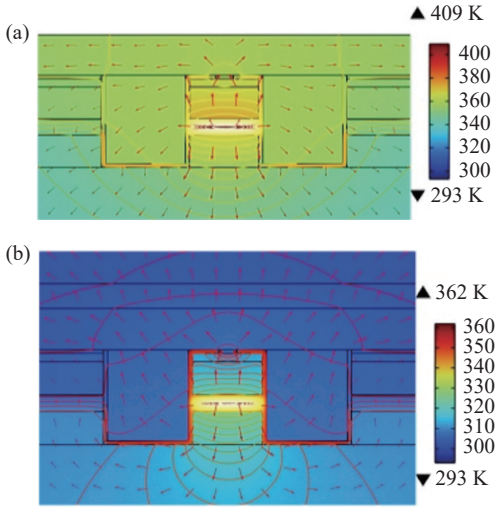

图 17 (a)正焊与(b)倒焊的电镀金双沟道脊器件的温度及热通量分布示意图[53]

Fig. 17 Schematic diagram of temperature and heat flux distribution for gold-plated dual-channel ridge devices with (a) positive welding and (b) inverted welding[53]

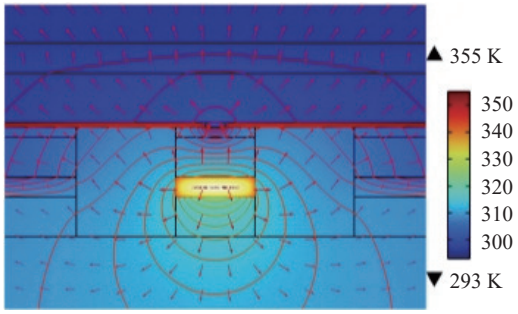

图 18 使用金刚石底座的掩埋异质结倒焊器件示意图[53]

Fig. 18 Schematic diagram of a buried heterojunction inverted welded device utilizing a diamond base[53]

表 3 不同结构的电镀金双沟道脊器件最高温度对比[53]

Table 3 Comparison of the maximum temperature of gold-plated double-channel ridge devices with different structures[53]

结构	最高温度/K
正焊电镀金双沟道	409
倒焊电镀金双沟道	362
金刚石底座的掩埋异质结倒焊	355

合一层薄重掺杂层来替代传统体重掺杂衬底, 有效隔离光场的模式分布(尤其是倏逝场尾部)与高损耗的重掺杂区域, 显著抑制自由载流子吸收, 从而降低波导传播损耗。MM 波导通过上下金属层将有源区夹在中间, 与 SISP 波导系相比, 其模式折射率大幅提升, 可将太赫兹光场更紧密地约束在有源

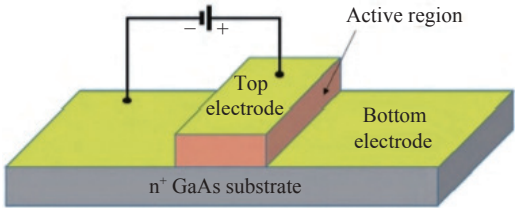

图 19 SISP 波导结构示意图[54]

Fig. 19 Schematic diagram of SISP waveguide structure[54]

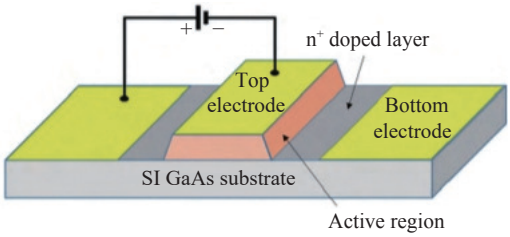

图 20 MM 波导结构示意图[54]

Fig. 20 Schematic diagram of MM waveguide structure[54]

增益区内, 显著增大了光模限制因子。两种波导各有优劣: MM 波导的限制因子较高, 但工艺复杂; SISP 波导工艺简单、辐射效率高、光束质量好。

3 多波段 QCL 的应用进展

3.1 中红外波段: 从实验室检测到现场监测的革命

中红外波段作为重要的“分子指纹”区域, 基于该波段的 QCL 技术已实现了从基础研究到产业化的跨越式发展。根据波长特性, 其应用主要集中在两个大气窗口。

(1)3~5 μm 波段高精度多组分检测

在中红外波段的 3~5 μm 范围内, 可检测 CO_2、NO_2、N_2O 等气体含量。Maisons 等[55] 选用发射中心波长为 4.46 μm 的 QCL 探测 N_2O 和 CO_2 含量。在激光扫描平均时间为 1 s、气压为 5 kPa 的条件下, N_2O 最低检测限约 3.5×10^{-11}。Liu 等[56] 开发了一种紧凑型多气体传感器, 通过分色镜耦合双波长 QCL(1.653 μm/4.56 μm), 实现了 CO、N_2O、CH_4 的同步检测(检测限达 10^{-9} 级)。Tao 等[6] 采用开放式光路设计(图 21), 将 N_2O/CO 检测限提升至亚 10^{-9} 级(1.5×10^{-10}/3.6×10^{-10}), 为大气环境实时监测提供了新范式。

(2)7~14 μm 波段: 从实验室到工业级解决方案

在 7~14 μm 波段, 可实现 O_3、CH_4 等气体含量的

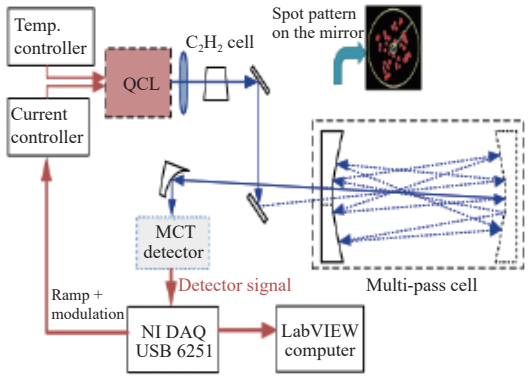

图 21　N_2O 气体含量检测系统结构框图[6]

Fig. 21 Block diagram illustrating the structure of N_2O gas content detection system[6]

检测。Namjou 等[57] 首次验证了 DFB-QCL(7.8 μm)用于 CH_4/N_2O 检测，灵敏度达 5×10^{-5}；Jiménez 等[58] 开发了一种脉冲式 DFB-QCL(9.6 μm)，实现了 O_3 的差分吸收检测(2.5×10^{-5})。据估算，采用绝对吸收和差分吸收方法可探测到的最低臭氧体积分数为 1.4×10^{-5} 和 2.5×10^{-5}。此外，Siciliani de Cumis 等[59] 将 EC-QCL 与石英增强光声光谱(quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy, QEPAS)技术相结合(图 22)。该系统具备宽谱(7.6~8.3 μm)调谐能力，激光输出通过单模空心光波导传输至 QEPAS 探测模块，完成了对 H_2S 的高选择性检测。吉林大学李春光[60] 团队通过优化 16 m 反射光程，使 7.5 μm QCL 系统兼具高灵敏度与强抗干扰能力，为工业现场监测应用提供了重要支持。

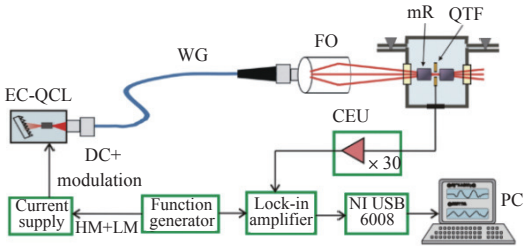

图 22　H_2S 气体探测系统原理示意图[59]

Fig. 22 Schematic diagram of H_2S gas detection system[59]

3.2　太赫兹波段：从基础研究走向实用化的突破

(1)性能提升的里程碑

Tredicucci 等[29] 于 2002 年实现了 4.4 THz 的激射，脉冲模式下 8 K 温度时的峰值功率为 2.5 mW，最高工作温度达 50 K；在低频端，Wade 等[61] 通过磁场调控实现了 0.68 THz 的激射频率；在高频端，Li 等[62] 突破了 5.6 THz 的高频激射，单模连续激射的最高频率达 5.1 THz[63](图 23)。

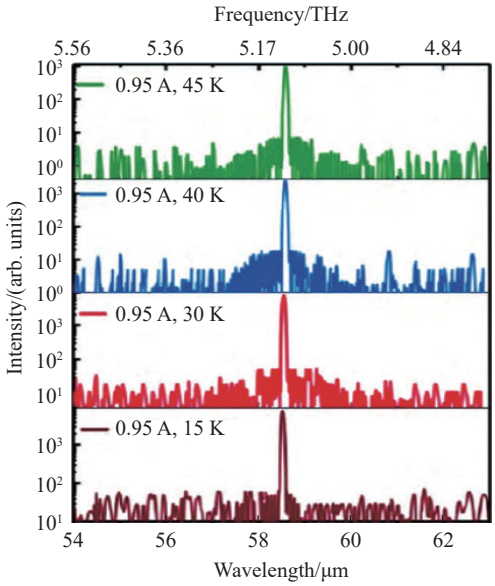

图 23　高频单模器件的激光光谱图[63]

Fig. 23 Laser spectra of high-frequency single-mode devices[63]

在输出功率方面，Brandstetter 等[64] 通过键合对称结构器件，首次突破了瓦级功率输出；2017 年，Li 等[65] 将多模激光器的最高功率进一步提升至 2.4 W。Jin 等[66] 采用短腔纵向耦合结构，实现了如图 24 所示的最高 2.03 W 的单模脉冲输出，每个电子对应产生 115 个光子的微分量子效率，显著提升了器件的发光效率。THz-QCL 可通过调整腔长等参数实现频率调节，Curwen 等[67] 和 Xu 等[68] 利用集成超表面材料的垂直腔面与短外腔设计，实现了

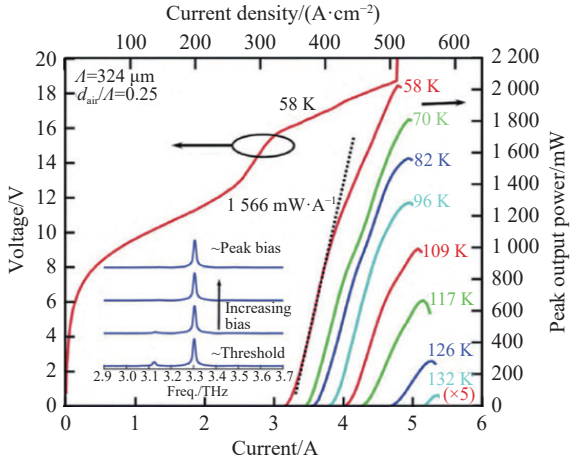

图 24　单模大功率器件的功率-电流-电压关系曲线[66]

Fig. 24 Power-current-voltage relationship curve for single-mode high-power devices[66]

以 3.47 THz 为中心、覆盖 650 GHz(最大 880 GHz)的连续宽谱单模调谐, 如图 25 所示, 相对带宽达 25%。在工作温度方面, THz-QCL 的工作条件从最初的液氮低温提升至目前可在 261 K 下实现功率输出, 显著降低了器件能耗并提高了输出效率[69]。

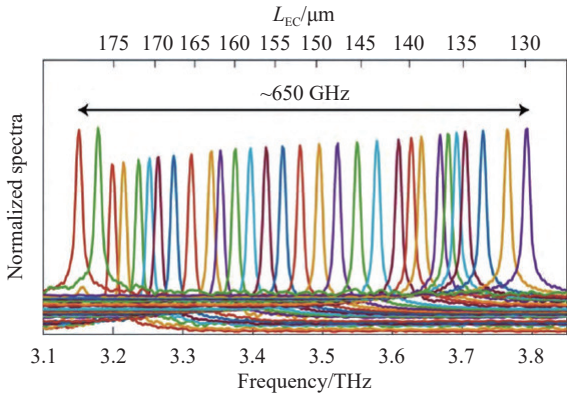

图 25 激光器的单模可调谐光谱范围示意图[67]

Fig. 25 Schematic diagram of single-mode tunable spectral range of the laser[67]

除工作温度外, 光束准直性对 THz-QCL 输出效果同样具有重要影响。通过增加光栅结构可有效改善 THz-QCL 的发散角。研究[70]表明, 渐变光子异质结构与同心圆光栅相结合时, 圆形对称结构能够显著减小光束的发散角, 并实现稳定单模工作。Kao 等[71]设计制备了一种三阶分布反馈 THz-QCL, 通过增加光栅数量显著提升光束质量, 光束发散角的半高全宽仅为 6°×11°。此外, Wu 等[72]通过空气与有源区内表面等离激元(surface plasmon polarition)波的相互耦合, 激发分布式反馈模式, 进一步将光束发散角减小至 4°×4°。

(2) 应用创新方向

目前, THz-QCL 的主要应用仍集中于气体光谱分析, 相关研究以光谱方法学的探索为主。在光谱分析方面, Ren 等[73−74]通过外差技术实现了双面金属波导法布里-珀罗腔 THz-QCL 与超导热电子混频器的协同工作(图 26), 并完成了对甲醇的高精度光谱测量(图 27), 实现了 4.1 GHz 的连续调谐, 为动态光谱分析奠定了重要基础。

在生物成像领域, Darmo 等[75]利用 THz-QCL 对小鼠脑部进行成像, 实现了 0.25 mm 的分辨率。Amanti 等[76]开发了一种质量为 15 kg 的便携式系统(图 28), 以三级分布反馈 THz-QCL 为辐射源, 实现了 200 μm 的分辨率, 成像速度和分辨率显著提升。

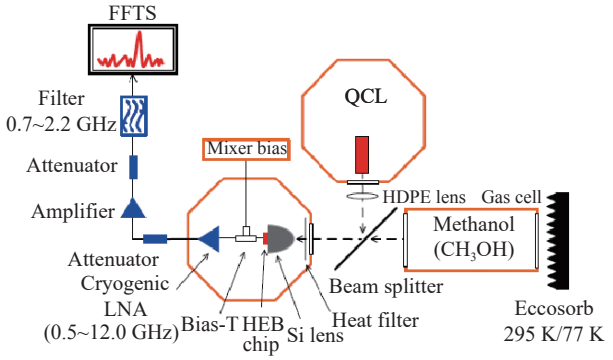

图 26 气体外差测量装置示意图[73]

Fig. 26 Schematic diagram of gas heterodyne measuring device[73]

Tan 等[77]使用 THz-QCL 作为光源, 在反射成像模式下对微细金属结构和隐藏金属叶片进行成像, 分辨率达 0.33 mm, 验证了该技术在无损检测和安全筛查中的应用潜力。为进一步提高分辨率, Siciliani de Cumis 等[78]采用一种空间滤波技术, 在 THz-QCL 系统中引入光阑, 滤除了光束中的高阶模, 显著改善了输出光束质量, 最终实现了 70 μm 的高分辨率。

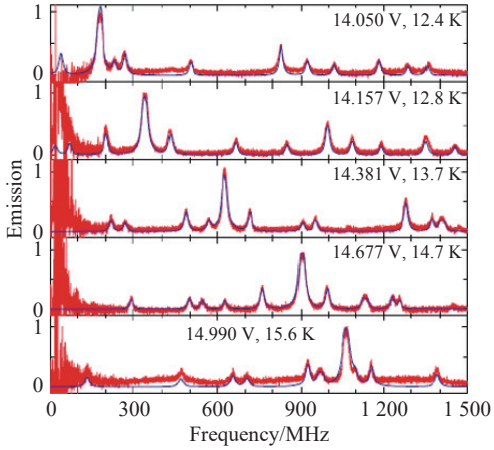

图 27 不同 THz-QCL 输出频率下测量的甲醇光谱图[74]

Fig. 27 Spectral diagram of methanol measured at different THz-QCL output frequencies[74]

3.3 技术挑战与未来趋势

QCL 技术目前面临两大关键技术挑战: 在中红外波段, 大功率器件的热管理问题亟待解决, 特别是金刚石散热基板集成等新型散热方案仍需进一步优化; 在太赫兹波段, 室温连续工作需求与高功率输出之间的热管理矛盾尤为突出, 需通过新型有源区设计和能带工程创新加以克服。展望未来五年, QCL 技术的发展将聚焦于三大战略方向: 首

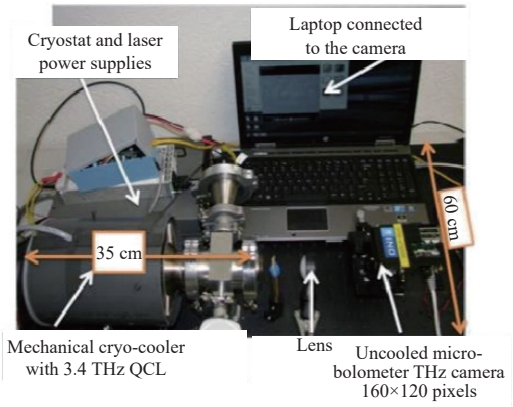

图 28　太赫兹成像系统示意图[76]

Fig. 28　Schematic diagram of a terahertz imaging system[76]

先，多波段集成芯片技术将实现从单一功能向多功能系统的跨越，通过单片集成不同波长的 QCL 有源区，构建紧凑型多光谱光源；其次，人工智能驱动的智能光谱系统将深度融合机器学习算法与 QCL 光谱技术，实现实时自适应光谱分析与物质识别；最后，面向医疗诊断的微型化设备（如可集成于内窥镜的微型 QCL 探头）将推动精准医疗的发展，为早期疾病诊断提供新型光学工具。这些技术突破将推动 QCL 从专业实验室走向更广泛的应用场景，涵盖工业过程监控、环境实时监测和个性化医疗等领域。

4　结论与展望

QCL 凭借独特的子带间跃迁机制，已成为中远红外至太赫兹波段不可替代的相干光源。本文系统回顾了其发展历程，并重点剖析了通过有源区结构创新（如双声子共振、束缚-连续跃迁等设计）实现高性能器件的技术路径。采用双有源区插入 InP 间隔层与双沟道金刚石散热基板等热管理方案，将最高工作温度从单有源区的 443 K 降低至 355 K，有效解决了制约性能的关键热管理难题。QCL 在多波段应用方面也取得了显著进展：中红外气体传感可实现多组分 10^{-9} 级高灵敏度检测；太赫兹成像系统的分辨率提升至 200 μm 水平，展现出巨大的应用潜力。然而，当前技术仍面临热管理与室温太赫兹激射等核心挑战，未来研究需聚焦于热管理与功率性能的持续优化。随着这些技术的突破，QCL 将从专业实验室加速渗透至工业过程监控、环境实时监测等更广阔的应用场景，其全球市场规模预计将持续扩张，充分彰显这一技术平台的巨大价值与潜力。

参考文献：

[1] Zhou W J, Lu Q Y, Wu D H, et al. High-power, continuous-wave, phase-locked quantum cascade laser arrays emitting at 8 μm[J]. Optics Express, 2019, 27(11): 15776-15785.

[2] Razeghi M, Lu Q Y, Bandyopadhyay N, et al. Quantum cascade lasers: from tool to product[J]. Optics Express, 2015, 23(7): 8462-8475.

[3] Razeghi M, Zhou W J, Slivken S, et al. Recent progress of quantum cascade laser research from 3 to 12 μm at the center for quantum devices[J]. Applied Optics, 2017, 56(31): H30-H44.

[4] 黄彦, 张宇露, 高志强, 等. 用于痕量气体检测的宽调谐外腔量子级联激光器研究 [J]. 遥测遥控, 2019, 40(1): 20-27.
Huang Yan, Zhang Yulu, Gao Zhiqiang, et al. Research on widely tunable external cavity quantum cascade lasers for trace gas detection[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2019, 40(1): 20-27.

[5] 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 Yulu, Huang Yan, Gao Zhiqiang, 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.

[6] Tao L, Sun K, Khan M A, et al. Compact and portable open-path sensor for simultaneous measurements of atmospheric N2O and CO using a quantum cascade laser[J]. Optics Express, 2012, 20(27): 28106-28118.

[7] 谢兆明, 朱卫东, 顾潮春, 等. 国产中红外量子级联激光多组分气体分析仪的研制进展 [J]. 分析测试技术与仪器, 2025, 31(1): 69-76.
Xie Zhaoming, Zhu Weidong, Gu Chaochun, et al. Development progress of domestic mid-infrared quantum cascade laser multi-component gas analyzer[J]. Analysis and Testing Technology and Instruments, 2025, 31(1): 69-76.

[8] Abramov P I, Kuznetsov E V, Skvortsov L A. Prospects of using quantum-cascade lasers in optoelectronic countermeasure systems: review[J]. Journal of Optical Technology, 2017, 84(5): 331-341.

[9] Abramov P I, Budarin A S, Kuznetsov E V, et al. Quantum-cascade lasers in atmospheric optical communication lines: challenges and prospects (review)[J]. Journal of Applied Spectroscopy, 2020, 87(4): 579-600.

[10] Khalatpour A, Paulsen A K, Deimert C, et al. High-power portable terahertz laser systems[J]. Nature Photonics, 2021, 15(1): 16-20.

[11] Market Research Future. Quantum cascade laser market[EB/OL]. [2025-07-15]. https://www.marketresearchfuture.com/reports/quantum-cascade-laser-market-34639#.

[12] Kazarinov R K, Suris R A. Possible amplification of electromagnetic waves in a semiconductor with a superlattice[J]. Soviet Physics Semiconductors, 1971, 5(4): 707-709.

[13] Gmachl C, Capasso F, Sivco D L, et al. Recent progress in quantum cascade lasers and applications[J]. Reports on Progress in Physics, 2001, 64(11): 1533-1601.

[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] Lyakh A, Pflügl C, Diehl L, et al. 1.6 W high wall plug efficiency, continuous-wave room temperature quantum cascade laser emitting at 4.6 μm[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(11): 111110.

[17] Lyakh A, Maulini R, Tsekoun A, et al. Tapered 4.7 μm quantum cascade lasers with highly strained active region composition delivering over 4.5 watts of continuous wave optical power[J]. Optics Express, 2012, 20(4): 4382-4388.

[18] Lu Q Y, Slivken S, Wu D H, et al. High power continuous wave operation of single mode quantum cascade lasers up to 5 W spanning λ~3.8-8.3 μm[J]. Optics Express, 2020, 28(10): 15181-15188.

[19] Bai Y, Slivken S, Darvish S R, et al. Room temperature continuous wave operation of quantum cascade lasers with 12.5% wall plug efficiency[J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(2): 021103.

[20] Razeghi M, Slivken S, Bai Y, et al. High power quantum cascade lasers[J]. New Journal of Physics, 2009, 11(12): 125017.

[21] Liu Fengqi, Li Lu, Wang Lijun, et al. Solid source MBE growth of quantum cascade lasers[J]. Applied Physics A: Materials Science & Processing, 2009, 97(3): 527-532.

[22] 张盛楠, 杨超, 张宇露, 等. 8.4 μm 室温脉冲量子级联激光器设计及制备 [J]. 光电子·激光, 2025, 36(6): 576-581.
Zhang Shengnan, Yang Chao, Zhang Yulu, et al. Design and fabrication of 8.4 μm pulsed quantum cascade lasers operating at room temperature[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2025, 36(6): 576-581.

[23] Wang Huan, Zhang Jinchuan, Cheng Fengmin, et al. Watt-level, high wall plug efficiency, continuous-wave room temperature quantum cascade laser emitting at 7.7 μm[J]. Optics Express, 2020, 28(26): 40155-40163.

[24] 庞磊, 程洋, 赵武, 等. 基于 MOCVD 生长的 4.6 μm 中红外量子级联激光器 [J]. 红外与激光工程, 2022, 51(6): 189-194.
Pang Lei, Cheng Yang, Zhao Wu, et al. Mid-infrared quantum cascade laser grown by MOCVD at 4.6 μm[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(6): 189-194.

[25] 崔广州, 孙永强, 郭凯, 等. 金属有机化学气相沉积生长的高性能长波红外量子级联激光器 (特邀)[J]. 中国激光, 2025, 52(5): 118-124.
Cui Guangzhou, Sun Yongqiang, Guo Kai, et al. High-performance long-wave infrared quantum cascade laser grown by metal-organic chemical vapor deposition technology (invited)[J]. Chinese Journal of Lasers, 2025, 52(5): 118-124.

[26] 蔡军, 李森森. 量子级联激光器光束质量分析及测量 [J]. 光电技术应用, 2018, 33(3): 13-16.
Cai Jun, Li Sensen. Analysis and measurement of beam quality of quantum cascade laser[J]. Electro-Optic Technology Application, 2018, 33(3): 13-16.

[27] 邹华翊, 牛山, 马源浩, 等. 大功率量子级联激光器的偏振合束研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(21): 306-311.
Zou Huayi, Niu Shan, Ma Yuanhao, et al. Study on polarization beam combination of high-power quantum cascade laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2025, 62(21): 306-311.

[28] 王锐, 张东亮, 张程程, 等. 中红外量子级联激光器 1×16 锁相阵列设计 [J]. 红外与激光工程, 2024, 53(5): 54-64.
Wang Rui, Zhang Dongliang, Zhang Chengcheng, et al. Design of 1×16 phase-locked array of quantum cascade laser in mid-infrared band[J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(5): 54-64.

[29] Köhler R, Tredicucci A, Beltram F, et al. Terahertz semiconductor-heterostructure laser[J]. Nature, 2002, 417(6885): 156-159.

[30] Li Ziping, Wan Wenjian, Zhou Kang, et al. On-chip dual-comb source based on terahertz quantum cascade lasers under microwave double injection[J]. Physical Review Applied, 2019, 12(4): 044068.

[31] Zhang Jun, Peng Hangyu, Wang Jingbo, et al. Dense spectral beam combining of quantum cascade lasers by multiplexing a

pair of blazed gratings[J]. Optics Express, 2022, 30(2): 966-971.

[32] Faist J. Quantum devices[M]. Oxford: Oxford Scholarship Online, 2013: 114-116.

[33] 杨超, 高志强, 张宇露, 等. 中远红外高功率量子级联激光技术研究进展[J]. 遥测遥控, 2022, 43(4): 126-146.
Yang Chao, Gao Zhiqiang, Zhang Yulu, et al. Recent progress of mid-and-far infrared high power quantum cascade laser technology[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(4): 126-146.

[34] 赵越, 张锦川, 刘传威, 等. 中远红外量子级联激光器研究进展 (特邀)[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 8-17.
Zhao Yue, Zhang Jinchuan, Liu Chuanwei, et al. Progress in mid-and far-infrared quantum cascade laser (invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(10): 8-17.

[35] 彭英才, 赵新为, 尚勇. 中红外量子级联激光器的研究进展[J]. 微纳电子技术, 2007, 9: 845-852.
Peng Yingcai, Zhao Xinwei, Shang Yong. Progress of the mid-infrared quantum-cascade lasers[J]. Micronanoelectronic Technology, 2007, 9: 845-852.

[36] Bai Y, Darvish S R, Slivken S, et al. Room temperature continuous wave operation of quantum cascade lasers with watt-level optical power[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(10): 101105.

[37] Hofstetter D, Beck M, Aellen T, et al. High-temperature operation of distributed feedback quantum-cascade lasers at 5.3 μm[J]. Applied Physics Letters, 2001, 78(4): 396-398.

[38] Faist J, Capasso F, Sirtori C, et al. Continuous wave operation of a vertical transition quantum cascade laser above T=80 K[J]. Applied Physics Letters, 1995, 67(21): 3057-3059.

[39] Faist J, Capasso F, Sirtori C, et al. Vertical transition quantum cascade laser with Bragg confined excited state[J]. Applied Physics Letters, 1995, 66(5): 538-540.

[40] Lyakh A, Maulini R, Tsekoun A, et al. 3 W continuous-wave room temperature single-facet emission from quantum cascade lasers based on nonresonant extraction design approach[J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(14): 141113.

[41] Faist J, Beck M, Aellen T, et al. Quantum-cascade lasers based on a bound-to-continuum transition[J]. Applied Physics Letters, 2001, 78(2): 147-149.

[42] Huang X, Chiu Y, Charles W O, et al. Ridge-width dependence of the threshold of long wavelength ($\lambda \approx 14$ μm) quantum cascade lasers with sloped and vertical sidewalls[J]. Optics Express, 2012, 20(3): 2539-2547.

[43] Bewley W, Canedy C, Kim C S, et al. Ridge-width dependence of midinfrared interband cascade laser characteristics[J]. Optical Engineering, 2010, 49(11): 111116.

[44] 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 Yongqiang, Fei Teng, Li Kun, et al. MOCVD-based mid-wave infrared quantum cascade lasers with watt level power[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(22): 2214002.

[45] 王渝沛, 章宇航, 罗晓玥, 等. 双有源区结构 4.7 μm 中波红外量子级联激光器[J]. 中国光学 (中英文), 2024, 17(5): 1042-1049.
Wang Yupei, Zhang Yuhang, Luo Xiaoyue, et al. 4.7 μm mid-wave infrared quantum cascade laser with double active region structure[J]. Chinese Optics, 2024, 17(5): 1042-1049.

[46] Williams B S. Terahertz quantum-cascade lasers[J]. Nature Photonics, 2007, 1(9): 517-525.

[47] Wienold M, Schrottke L, Giehler M, et al. Low-voltage terahertz quantum-cascade lasers based on LO-phonon-assisted interminiband transitions[J]. Electronics Letters, 2009, 45(20): 1030-1031.

[48] Han Y J, Li L H, Grier A, et al. Extraction-controlled terahertz frequency quantum cascade lasers with a diagonal LO-phonon extraction and injection stage[J]. Optics Express, 2016, 24(25): 28583-28593.

[49] Wang F, Slivken S, Wu D H, et al. Room temperature quantum cascade lasers with 22% wall plug efficiency in continuous-wave operation[J]. Optics Express, 2020, 28(12): 17532-17538.

[50] Fei Teng, Zhai Shenqiang, Zhang Jinchuan, et al. High power λ~8.5 μm quantum cascade laser grown by MOCVD operating continuous-wave up to 408 K[J]. Journal of Semiconductors, 2021, 42(11): 112301.

[51] Oresick K M, Kirch J D, Mawst L J, et al. Highly efficient ~8 μm-emitting, step-taper active-region quantum cascade lasers[J]. AIP Advances, 2021, 11(2): 025004.

[52] Sun Yongqiang, Yin Ran, Zhang Jinchuan, et al. High-performance quantum cascade lasers at $\lambda \sim 9$ μm grown by MOCVD[J]. Optics Express, 2022, 30(21): 37272-37280.

[53] 林青华, 张东亮, 王锐, 等. 量子级联激光器热仿真与分析[J]. 半导体光电, 2024, 45(1): 84-89.
Lin Qinghua, Zhang Dongliang, Wang Rui, et al. Thermal simulation and analysis of quantum cascade laser[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(1): 84-89.

[54] 曹俊诚, 韩英军. 太赫兹量子级联激光器与量子阱探测器研究进展 (特邀)[J]. 中国激光, 2024, 51(1): 377-392.
Cao Juncheng, Han Yingjun. Recent progress in terahertz

quantum cascade lasers and quantum well detectors (invited)[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(1): 377-392.

[55] Maisons G, Carbajo P G, Carras M, et al. Optical-feedback cavity-enhanced absorption spectroscopy with a quantum cascade laser[J]. Optics Letters, 2010, 35(21): 3607-3609.

[56] Liu Ningwu, Xu Linguang, Zhou Sheng, et al. Simultaneous detection of multiple atmospheric components using an NIR and MIR laser hybrid gas sensing system[J]. ACS Sensors, 2020, 5(11): 3607-3616.

[57] Namjou K, Cai S, Whittaker E A, et al. Sensitive absorption spectroscopy with a room-temperature distributed-feedback quantum-cascade laser[J]. Optics Letters, 1998, 23(3): 219-221.

[58] Jiménez R, Taslakov M, Jeanneret F, et al. Ozone detection by differential absorption spectroscopy at ambient pressure with a 9.6 μm pulsed quantum-cascade laser[J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 2004, 78(2): 249-256.

[59] Siciliani de Cumis M, Viciani S, Borri S, et al. Widely-tunable mid-infrared fiber-coupled quartz-enhanced photoacoustic sensor for environmental monitoring[J]. Optics Express, 2014, 22(23): 28222-28231.

[60] 李春光. 基于中红外半导体激光器的气体检测系统的研制[D]. 吉林: 吉林大学, 2016.
Li Chunguang. Research and development of gas detection system based on mid-infrared semiconductor lasers[D]. Jilin: Jilin University, 2016.

[61] Wade A, Fedorov G, Smirnov D, et al. Magnetic-field-assisted terahertz quantum cascade laser operating up to 225 K[J]. Nature Photonics, 2009, 3(1): 41-45.

[62] Li L, Kundu I, Dean P, et al. High-power GaAs/AlGaAs quantum cascade lasers with emission in the frequency range 4.7-5.6 THz[C]//Proceedings of the 2016 International Quantum Cascade Lasers School and Workshop (IQCLSW). Cambridge: [s. n.], 2016.

[63] Li Weijiang, Ma Yu, Xu Yunfei, et al. Continuous-wave single-mode quantum cascade laser at 5.1 THz based on graded sampled grating design[J]. Photonics Research, 2022, 10(12): 2686-2692.

[64] Brandstetter M, Deutsch C, Krall M, et al. High power terahertz quantum cascade lasers with symmetric wafer bonded active regions[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(17): 171113.

[65] Li L H, Chen L, Freeman J R, et al. Multi-Watt high-power THz frequency quantum cascade lasers[J]. Electronics Letters, 2017, 53(12): 799-800.

[66] Jin Y, Reno J L, Kumar S. Phase-locked terahertz plasmonic laser array with 2 W output power in a single spectral mode[J]. Optica, 2020, 7(6): 708-715.

[67] Curwen C A, Reno J L, Williams B S. Broadband continuous single-mode tuning of a short-cavity quantum-cascade VECSEL[J]. Nature Photonics, 2019, 13(12): 855-859.

[68] Xu L, Curwen C A, Hon P W C, et al. Metasurface external cavity laser[J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(22): 221105.

[69] Khalatpour A, Tam M C, Addamane S J, et al. Enhanced operating temperature in terahertz quantum cascade lasers based on direct phonon depopulation[J]. Applied Physics Letters, 2023, 122(16): 161101.

[70] Liang Guozhen, Liang Houkun, Zhang Yin, et al. Low divergence single-mode surface-emitting concentric-circular-grating terahertz quantum cascade lasers[J]. Optics Express, 2013, 21(26): 31872-31882.

[71] Kao T Y, Hu Q, Reno J L. Perfectly phase-matched third-order distributed feedback terahertz quantum-cascade lasers[J]. Optics Letters, 2012, 37(11): 2070-2072.

[72] Wu C Z, Khanal S, Reno J L, et al. Terahertz plasmonic laser radiating in an ultra-narrow beam[J]. Optica, 2016, 3(7): 734-740.

[73] Ren Y, Hovenier J N, Higgins R, et al. Terahertz heterodyne spectrometer using a quantum cascade laser[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(16): 161105.

[74] Ren Y, Hovenier J N, Higgins R, et al. High-resolution heterodyne spectroscopy using a tunable quantum cascade laser around 3.5 THz[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(23): 231109.

[75] Darmo J, Tamosiunas V, Fasching G, et al. Imaging with a terahertz quantum cascade laser[J]. Optics Express, 2004, 12(9): 1879-1884.

[76] Amanti M I, Scalari G, Beck M, et al. Stand-alone system for high-resolution, real-time terahertz imaging[J]. Optics Express, 2012, 20(3): 2772-2778.

[77] Tan Zhiyong, Gu Li, Xu Tianhong, et al. Real-time reflection imaging with terahertz camera and quantum-cascade laser[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(7): 070401.

[78] Siciliani de Cumis U, Xu J H, Masini L, et al. Terahertz confocal microscopy with a quantum cascade laser source[J]. Optics Express, 2012, 20(20): 21924-21931.