

# 窄光束、高功率、频率可调谐的 THz 量子级联激光器

邬崇朝<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>上海交通大学医疗机器人研究院生物光学研究中心, 上海 200240;

<sup>2</sup>上海交通大学生物医学工程学院, 上海 200240

**摘要** THz 频段的量子级联激光器通过电子在半导体量子阱导带子带间的跃迁发光, 是具有连续波操作特性和电泵浦特性的 THz 源。THz 量子级联激光器具有体积小、重量轻、紧凑且易集成等特点, 是目前发射能量最高的固态 THz 源。对近年来双金属波导型 THz 量子级联激光器在窄光束角、频率可调谐和高功率输出三方面的发展进行综述和介绍。

**关键词** 激光器; 太赫兹; 量子级联激光器; 波导

**中图分类号** TN248.4

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201946.1001002

## Terahertz Quantum Cascade Lasers with Narrow Beam, High Output Power, and Frequency Tunability

Wu Chongzhao<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Center for Biophotonics, Institute of Medical Robotics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

<sup>2</sup>School of Biomedical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

**Abstract** Quantum cascade lasers (QCLs) in terahertz frequency emit terahertz radiation by intersubband optical transitions in conduction band of semiconductor quantum wells. Terahertz QCLs are the terahertz sources which are able to be electrically pumped and operated in continuous-wave. Terahertz quantum cascade lasers are small, light, compact, and easy for integration, and they are the solid-state terahertz sources that have the highest output power. This article will review the recent developments of double-metal terahertz QCLs in terms of narrow beam pattern, frequency tunability, and high output power.

**Key words** lasers; terahertz; quantum cascade lasers; waveguide

**OCIS codes** 140.5965; 040.2235; 230.7370

## 1 引言

THz 频段是频率在 1~10 THz、相应波长范围在 30~300  $\mu\text{m}$  的电磁波段, 介于红外波段和毫米波段之间, 是电磁光谱中亟需深入研究和开发的波段。THz 波可以穿透如塑料、纤维织物和硬纸板等常见的包装材料, 也可以用于对各类化学物质进行光学传感和有效分析。许多分子的振动和转动能级都在 THz 频谱内, 这使得 THz 在生物医学、传感与成像、航空航天、大气污染物监控、安全无损检测和通信等方面具有独特的应用潜力<sup>[1-6]</sup>。

高性能的 THz 源是研究的关键之一。其中, 基于半导体的全固态 THz 量子级联激光器(QCL)是 THz 源的重要组成部分。相较于其他 THz 的产生方式, 它不仅具有连续波操作特性和电泵浦特性, 而且还具有输出功率高、体积较小、紧凑、轻便、易集成等优点, 因此成为 THz 领域的重要研究方向之一。THz 频段的 QCL 通过电子在多层半导体形成的周期性量子阱超晶格结构中的导带子带间跃迁发光, 是目前发射能量最高的固态 THz 源, 也是只有电子参与的单极型半导体激光器。1994 年, 首个 QCL 诞生于美国贝尔实验室<sup>[7]</sup>, 其发射波长位于中红外

收稿日期: 2019-02-22; 修回日期: 2019-05-14; 录用日期: 2019-06-21

基金项目: 上海市科委青年科技英才扬帆计划(19YF1425100)

\* E-mail: czwu@sjtu.edu.cn

约  $4\ \mu\text{m}$  处;2002 年,首个 THz 频段的 QCL 研制成功<sup>[8]</sup>,其发射波长约为  $67\ \mu\text{m}$ ,频率为 4.5 THz。当 THz QCL 处于一定的外加偏压下时,电子从较高能态跃迁到较低能态,辐射出 THz 波段光子,有源区和电子注入区交替,各能量阶梯产生的光子通过级联增益后以 THz 激光的形式辐射出来。因此,THz QCL 的发射波长取决于导带子带之间的能量间隔,可通过能带工程设计发射波长与频率<sup>[9-10]</sup>。目前,THz 频段 QCL 的发射频率可覆盖 1.2~5 THz。THz 频段 QCL 量子阱通过分子束外延生长而成,本文所介绍的 THz 激光有源区结构材料均为基于 GaAs/AlGaAs 的材料体系。

根据波导结构的不同,THz 频段的 QCL 可分为单金属等离子体波导结构和双金属波导结构<sup>[11]</sup>。单金属等离子体波导由上表面金属和一层位于有源区底部的高度掺杂的半导体层组成,此层材料的折射率实部为负数,可以支持表面等离子体模在低光学损耗半导体层的指数衰减分布,并且可以实现高能输出。双金属波导的主要优势包括低光学损耗、高操作温度、高 THz 场限制因子,以及低阈值电流密度,但垂直方向上的亚波长尺度使得基于双金属波导的 THz QCL 发射特性较差,表现为高度发散的光束角以及自由空间的低耦合效率。

THz 频段 QCL 的最高工作温度已大于 200 K,其在便携式制冷机或是便携小巧型杜瓦瓶中工作可实现和保持 THz 频段 QCL 的优势,但如何提高 THz QCL 的光束聚集度、波长可调谐性和输出功率,是 THz 频段 QCL 前沿基础研究的重点,本文将针对这 3 方面进行探讨。

## 2 具有窄光束角的 THz QCL

THz 频段 QCL 的有源区厚度通常只有  $10\ \mu\text{m}$  左右,而 THz 激光的发射波长通常为  $30\sim 300\ \mu\text{m}$ ,因此波导在 THz 激光高度方向上为亚波长尺寸。由于 THz 激光从器件脊端面输出时存在衍射效应,因此基于法布里-珀罗(Fabry-Perot)类型的微谐振腔输出的 THz 光束极为发散,且具有各向发散特性,光束发散度高达  $60^\circ\times 80^\circ$ <sup>[12]</sup>。基于双金属波导的 Fabry-Perot 类型的微谐振腔与自由空间的耦合能力弱,导致其辐射效率较低。为了提高 THz 频段 QCL 光束的准直性,现有的研究工作主要从波导的设计原理与工艺等方面进行改进,或者使用谐振腔外棱镜等进行改进。谐振腔外棱镜耦合器可准直光

束至  $2.6^\circ\times 2.4^\circ$ <sup>[13]</sup>,但这样的外部方法需要额外的、分立的光学器件,如聚四氟乙烯棱镜或硅棱镜耦合器,从而降低了其实用性。采用新型波导来改善 THz 激光光束质量更具优势,但此类方法不仅需要理论创新,还需要高水平的微纳器件工艺和微纳加工流程,对 THz QCL 理论研究和实验创新性都提出了更高的要求。

通过二阶分布式反馈表面发射可实现稳定的 THz QCL 单模输出,以及沿着激光谐振腔长度方向的窄光束输出,在此方向上,光束角的半峰全宽可达  $5^\circ$ ,然而,沿着激光谐振腔宽度方向的光束角仍然发散,光束角的半峰全宽约为  $60^\circ$ <sup>[14]</sup>。通过在出射端对应的衬底平面刻蚀光栅结构,二维的光束角可达  $12^\circ$  左右<sup>[15]</sup>,但因受制于散热问题而无法实现连续波操作。二维的光子晶体结构通过增大表面输出面积和微谐振腔的尺寸实现光束准直,且可实现  $10^\circ$  左右的光束角,但由于增大了器件面积和基底面积,器件无法有效散热,同样无法实现连续波操作<sup>[16]</sup>。基于三阶分布式反馈的 THz QCL 同时实现了窄光束角和连续波操作,但为了满足相位要求,在实验制备波导结构中不得不采用复杂的深刻蚀工艺,这使得有源区的有效材料折射率从为 3.6 降到 3<sup>[17]</sup>。

在 THz QCL 中实现单模操作,可通过在双金属 Fabry-Perot 波导表面形成周期性光栅的分布式反馈来实现[图 1(a)]。通过设计和制备特定的周期,即可形成  $p$ -阶的分布式反馈,其中  $p$  为整数,描述的是分布式反馈周期与 THz QCL 有效半波长间的整数倍关系。有效波长是指在 THz QCL 有源区内传输的波长,等于空气中传输的波长与有源区有效折射率的商。周期波向量、入射波向量和有源区内的衍射波向量间由于动量守恒而形成平衡关系。布拉格模态为产生共振所能激发出的模态。通过对 THz QCL 有源区增益光谱涵盖范围内的设计,光学损耗最低的模态成为激光所能激发出的模态。对于基于分布式反馈的 THz QCL,一阶、二阶分布式反馈已经实现了稳定的 THz 单模输出。分布式反馈结构也可理解为一维的光子晶体结构。但是,传统的一阶、二阶分布式反馈并没有在 THz QCL 的两个发射方向上同时实现准直性输出,如图 1(b)所示。在金属薄膜的两边,即在表面分布式反馈的两侧,存在表面等离子体场的相位失配现象,而且相消干涉使得没有连续的单面表面等离子体场在周围介质中形成,如图 1(c)所示。

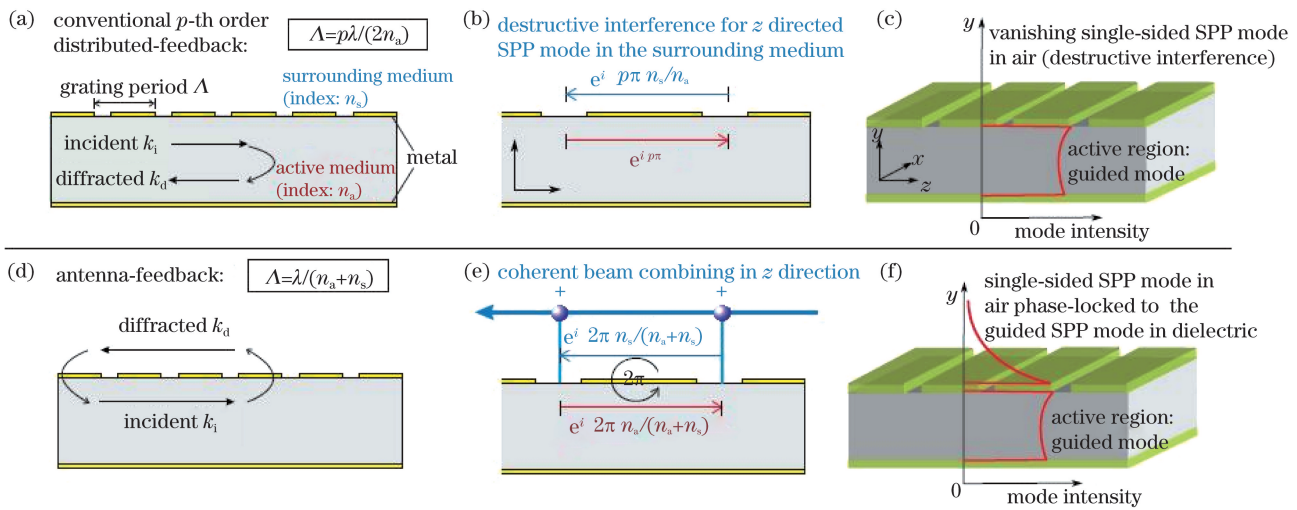


图 1 基于传统  $p$ -阶分布式反馈和天线反馈的 THz QCL 对比。(a)用于 THz 频段 QCL 波导的传统分布式反馈机制原理;(b)传统分布式反馈机制中相邻发射孔径间的表面等离子体 THz 场的相位失配;(c)传统分布式反馈机制中的相消干涉导致没有连续的单面表面等离子体分布于周围介质中;(d)THz 频段 QCL 的天线反馈机制原理;(e)基于天线反馈机制在金属光栅两边实现沿相反方向传播的表面等离子体 THz 场固定的相位信息;(f)天线反馈结构的金属光栅表面介质中大幅构建的单面表面等离子体 THz 场<sup>[18]</sup>

Fig. 1 Comparison of conventional  $p$ -th order DFB and antenna-feedback scheme for THz QCLs. (a) Principle of conventional DFB that can be implemented in the waveguide of THz QCLs; (b) phase mismatch of surface plasma THz fields between adjacent transmission apertures of conventional DFB; (c) discontinuous single-sided plasmas in surrounding medium owing to destructive interference; (d) principle of antenna-feedback scheme for terahertz QCLs; (e) antenna-feedback leads to a fixed surface plasma THz field phase information of counterpropagating plasmas on the either side of metal grating; (f) single-sided surface plasma THz field massively constructed in metal grating with antenna feedback structure<sup>[18]</sup>

相较于传统的分布式反馈方法,新型天线反馈<sup>[18]</sup>通过特定周期的选择可在传播于有源区内的 THz 场和在微谐振腔周围介质中的表面等离子体场间形成强耦合,如图 1(d)所示。得益于天线反馈带来的金属波导层两边 THz 场的锁相效应和激发的金属表面连续的等离子体场,由近圆柱波和等离子体场叠加组成的散射 THz 场在天线反馈的每一个孔径沿着 THz QCL 长度方向相长叠加,通过设计分布式反馈周期和双金属波导的上层金属层光栅,可使金属表面的 THz 等离子体模态与谐振腔体内的 THz 场有效耦合,THz 场在每个布拉格光栅开口的固定相位信息为  $2\pi$  或  $2\pi$  的整数倍,从而形成锁相的 THz 场分布,如图 1 中(e)、(f)所示,从而产生在  $x$  和  $y$  方向上的窄光束。

THz 频段的天线反馈 QCL 的实验制备包括分子束外延生长厚度约  $10\ \mu\text{m}$  的有源区 GaAs/AlGaAs 超晶格结构,平均掺杂浓度为  $5.5 \times 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$ ,以及在有源区上生长厚度为  $0.1\ \mu\text{m}$ 、掺杂浓度为  $5 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$  的高度掺杂 GaAs 层。在生长好的外延材料基础上进行双金属腔波导的工艺制

作,包括铜-铜间热压芯片间键合、衬底材料移除、有效吸收边界的制备,以及厚度为  $25\ \text{nm}/200\ \text{nm}$  的钛/金层分布式反馈制备。采用紫外光刻和湿法蚀刻制作出激光器的脊型波导,湿法腐蚀溶液由  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  按体积比为  $1:8:80$  配制而成,湿法腐蚀时间为  $23\ \text{min}$ 。将基底厚度研磨至  $170\ \mu\text{m}$  左右以提高散热,在下接触层的欧姆接触区蒸镀钛/金层。

THz 激光天线的反馈机理可有效控制 THz 电磁波在激光器中的传播方向,高度聚焦光束,光束角半峰全宽仅为  $4^\circ \times 4^\circ$ <sup>[18]</sup>,实现了极窄的 THz 半导体激光光源光束。基于深刻蚀工艺的三阶分布式反馈加长谐振腔(长度大于  $5\ \text{mm}$ )实现的半峰全宽为  $6^\circ \times 11^\circ$ <sup>[17]</sup>;通过宽发射区域的二维光子晶体结构实现的半峰全宽为  $7^\circ \times 10^\circ$ <sup>[16]</sup>;通过超材料校准器的多模 THz QCL 的半峰全宽为  $12^\circ \times 16^\circ$ <sup>[15]</sup>。光束质量是直接影响 THz QCL 获得实际应用的重要因素之一,兼顾窄光束角与其他性能(如波长可调谐和高功率输出)的研究,是 THz QCL 研究的重点和热点。

### 3 频率可调谐的 THz QCL

在 THz 频段 QCL 的诸多应用中,如生物医学成像与传感等,频率可调谐功能至关重要。分布式反馈可产生稳定的单模输出,但是,用以制备分布式反馈的光刻技术精确度的限制,使得在完全准确和精准频率下实现单模操作极具挑战。发射频率如能在 THz QCL 制备后还可进行连续调谐,将会非常具有吸引力。目前,实现 THz 频段 QCL 频率可调谐的技术包括:1)通过改变温度进行频率调谐的方法<sup>[14]</sup>,此方法简单,但无法实现大范围的频率调谐;2)通过外腔调谐<sup>[19-20]</sup>或者机电的方法<sup>[21-23]</sup>实现大范围频率调节;3)通过纯电学调制耦合谐振腔,独立地电控每个谐振腔,实现 4 GHz 的频率调谐<sup>[24]</sup>;4)通过三阶分布式反馈的静态电介质沉积调谐技术在 10 K 温度下实现 5 GHz 的频率调谐(暂态的固态氮在液氮温度下的沉积可实现 25 GHz 的频率调谐)<sup>[25]</sup>;5)通过改变每根线激光器的电流来改变 THz 波通过激光器的折射率,使耦合激光器的中心频率发生连续频移<sup>[26]</sup>,实现 10 GHz 的频率调谐。前两种方法会产生不连续的频率调谐或不聚焦的 THz 光束角,而且需要极低的操作温度,系统复杂。之前的实现 THz QCL 宽光谱频率调谐(大于 20 GHz)的研究工作<sup>[21-22,25]</sup>,均采用扰动沿激光脊侧向消逝模态的方式,这就使得激光器脊型结构需要制备得非常窄(深度亚波长,宽度小于 10  $\mu\text{m}$ ),大大增加了实验制备的难度和挑战,而且需要干法刻蚀。更为重要的是,这样会降低 THz QCL 的温度特性和输出功率。

近期提出并在实验上实现的微谐振腔外介质的

介电系数通过分布式天线反馈大幅调谐激光发射频率的 THz 激光波长可调机制<sup>[27]</sup>,不仅可运用于 THz QCL,还可广泛应用于其他频率的激光和等离子体激光中,实验上实现的 THz 激光波长可调谐范围达 57 GHz,而且在频率调谐过程中能保持 THz 激光天线反馈的窄光束角特性。具体地,通过等离子增强化学气相沉积(PECVD)将二氧化硅沉积于制备好的 THz QCL 表面,THz 频段的 QCL 用铜焊接在铜块之上,金线连接后用于电学加压,铜块安装在液氮冷却的杜瓦瓶内。图 2 展示了用于测量的 THz QCL 的光学图像、扫描电子显微镜图像,以及氧化物沉积后测得的实验结果。随着沉积二氧化硅的厚度增加,共振频率改变,THz 频段 QCL 的发射波长产生红移,在微谐振腔四周介质中的有效传播介电常数也随之增大。发射光谱通过傅里叶变换红外光谱仪及室温操作下的热电探测器测试得到,分辨率为 0.2  $\text{cm}^{-1}$ 。实验中,THz 频段的 QCL 周期为 25  $\mu\text{m}$ ,宽度为 100  $\mu\text{m}$ ,长度为 1.4 mm,高度为 10  $\mu\text{m}$ 。THz QCL 的操作电流约为 570 mA,电流密度约为 405  $\text{A}/\text{cm}^2$ ,总沉积厚度约为 3700 nm 的二氧化硅实现了连续的、约 57 GHz 发射频率的调谐,沉积厚度可基于 THz QCL 中沉积腔内参考砷化镓表面的沉积厚度实现精确校准。在沉积厚度为 3700 nm 的氧化物后,此激光在 78 K 停止发光。更广的调谐范围可通过沉积更多的氧化物来实现。通过氢氟酸缓冲溶液(HF 与  $\text{NH}_4\text{F}$  的体积比为 12.5:87.5)刻蚀位于激光表面沉积的二氧化硅,THz 激光的发射特性将回到其初始状态的发射波长,表明此后处理调谐技术可实现 THz 激光波长的可逆调

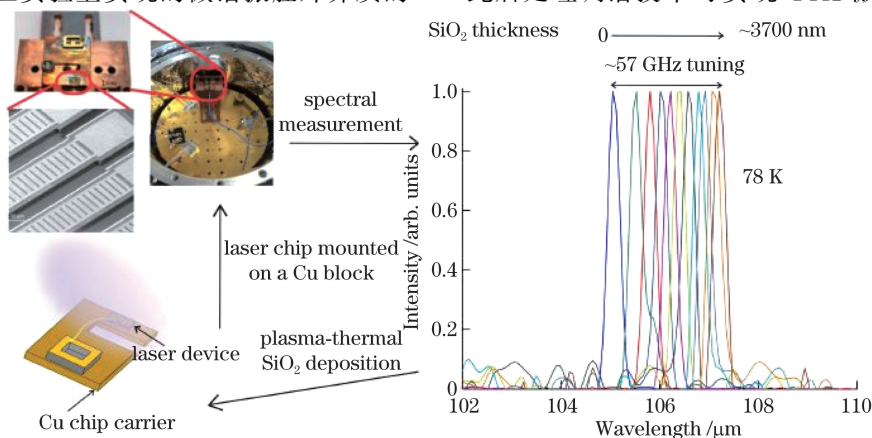


图 2 THz QCL 的光学图像与扫描电子显微镜图像,以及二氧化硅沉积在 THz 量子级联激光器的表面时在 78 K 和脉冲模式激发下的 THz QCL 光谱图<sup>[27]</sup>

Fig. 2 Optical image and scanning electron microscope image of THz QCL, and THz QCL spectrum of pulsed mode at 78 K when silicon-dioxide is deposited on surface of THz QCL.<sup>[27]</sup>

谐。该方法对 THz QCL 的宽度没有限制,可用于宽腔体的 THz 激光中,而且基于常用的湿法刻蚀即可实现激光器脊型波导的制备。

更具有吸引力的是,该技术在频率调谐过程中能保持天线反馈 THz QCL 良好的准直发射的光束角特性,在不同的氧化物沉积厚度下,以及波长连续调谐的过程中,测得的光束角半峰全宽始终在  $7^\circ$  以内,保持了天线反馈 THz QCL 光束的准直性<sup>[28]</sup>。

#### 4 高功率输出的 THz QCL

近 10 年来,在提升双金属波导型单模 THz QCL 输出功率方面涌现出一批具有创新性的研究工作。基于二阶分布式反馈结构的双金属波导 THz QCL 可实现稳定的单模(单波长、单频率)输出,在 5 K 的操作温度下,辐射频率约为 3.37 THz,脉冲模式下输出功率为 12 mW,斜率效率为 60 mW/A<sup>[29]</sup>;在 THz QCL 二阶分布式反馈机制中实现双缝结构,可使脉冲模式下的输出功率增大至 22 mW,斜率效率为 40 mW/A<sup>[30]</sup>,辐射频率约为

3.42 THz;渐变光子异质结结构可激发出二阶分布式反馈的辐射对称模态,在 20 K 的温度下,辐射频率为 3.4 THz,斜率效率为 230 mW/A,脉冲模式下输出功率约为 103 mW(激光器宽度增至 214  $\mu\text{m}$ )<sup>[31]</sup>;同心圆形光栅表面发射二阶结构在 78 K 的操作温度下的辐射频率约为 3.8 THz,输出功率可达 11 mW<sup>[32]</sup>,斜率效率为 15 mW/A;通过天线相互耦合效应可在 62 K 实现 6.5 mW 的输出功率,斜率效率达 450 mW/A<sup>[33]</sup>;三阶分布式反馈 THz 激光在 20 K 温度下实现的斜率效率为 250 mW/A,脉冲模式下的输出功率为 42 mW<sup>[34]</sup>,操作频率为 3.5 THz;三阶分布式反馈 THz 光子线激光结构,在 10 K 温度下可实现良好的连续波操作特性,斜率效率为 230 mW/A,连续波输出功率达 11 mW,操作频率范围为 2.8~3.5 THz<sup>[35]</sup>;量子级联垂直腔面发射结构在 77 K 可实现的输出功率为 830 mW,斜率效率为 380 mW/A<sup>[36]</sup>,操作频率约在 3.3 THz。图 3 按时间顺序展示了近 10 年来双金属波导型单模 THz QCL 一些代表性工作的输出功率。

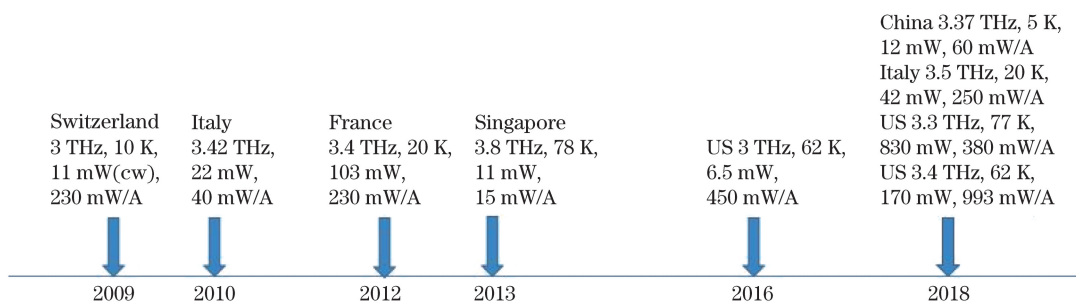


图 3 双金属波导型单模 THz QCL 代表性工作的输出功率

Fig. 3 Output power of representative single-mode THz QCL based on double-metal waveguide

非对称性的二阶与四阶杂交分布式反馈与 THz QCL 的半导体微芯片多量子阱有源区的集成,可大幅提高激光的有效发射场和输出功率<sup>[37]</sup>。为了更好地描述二阶与四阶分布式反馈的原理与特性,以 THz QCL 为验证平台,将传统的二阶分布式反馈与二阶四阶杂交分布式反馈进行对比,有限元电磁分析结果如图 4 所示,包含了二阶分布式反馈与二阶四阶杂交分布式反馈的光子带隙两边各模态的表面辐射损耗与频率信息,以及光子带隙边缘模态的电场分布  $E_x$ 、 $E_z$ 。对于传统的二阶分布式反馈,因为光子带隙低带边缘模态的辐射损耗最低,所以此模态为 THz 激光的激发模态,但此模态的辐射效率低。相比之下,二阶四阶杂交分布式反馈因在二阶分布式反馈的基础上加入了四阶分布式反馈,额外增加发射孔径,从而显著增大了光子带隙低带

边缘模态的表面损耗。与二阶分布式反馈相比,光子带隙高带边缘模态的表面损耗减小,并成为 THz 激光器的激发模态,其表面辐射损耗比传统的二阶分布式反馈的激发态增加了一个数量级,从而大幅增大了 THz QCL 的辐射效率。

图 5(a)展示了几个具有变化尺寸的集成二阶与四阶杂交分布式反馈的 THz 频段 QCL,激光器的长度为 1.5 mm,该长度的选择与分布式反馈的耦合强度有关。二阶与四阶杂交分布式反馈结构制备于 THz 频段 QCL 双金属波导结构的上表面金属。二阶与四阶杂交分布式反馈 THz 频段 QCL 在不同的外加偏压下均能实现稳定的单模输出,发射频率约为 3.39 THz,最大操作温度达 105 K,如图 5(b)所示。图 5(c)是测量得到的远场 THz 辐射图像,展示了激发出的共振对称辐射模态的单瓣辐射中

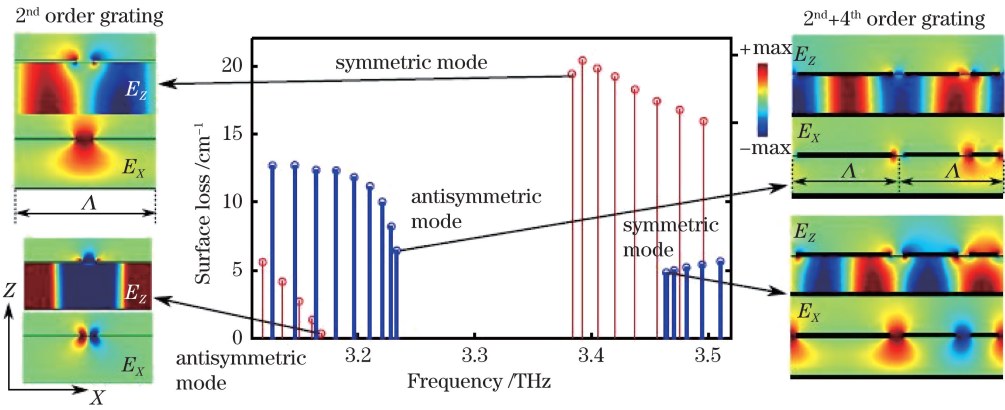


图 4 THz 频段 QCL 二阶四阶杂交分布式反馈与二阶分布式反馈的比较。周期性的分布式反馈在上金属表面制备而成。有限元电磁学建模计算得到的模式光谱, 分布式反馈光栅长度为 1.4 mm, 周期为  $27 \mu\text{m}$ , 开孔长度约  $3 \mu\text{m}$ 。二阶分布式反馈各模式的表面辐射损耗如图中红线所标识, 二阶四阶杂交分布式反馈的各模式表面辐射损耗如图中蓝线所标识。光子带隙低带边缘模态和高带边缘模态的电场分布, 以及  $E_x$  电场在开孔处的相位和幅值信息决定了辐射损耗<sup>[37]</sup>

Fig. 4 Comparison of hybrid second- and fourth-order DFB and second-order DFB for terahertz QCLs. Periodic DFB structure is fabricated on the top metallic layer. Mode-spectrum for a 1.4 mm DFB grating (period is  $27 \mu\text{m}$  and slit-width is  $\sim 3 \mu\text{m}$ ) is computed with finite-element modeling method. Red and blue lines represent surface radiative losses for various resonant modes with second-order DFB and hybrid second- and fourth-order DFB, respectively. Electric field profiles for lower and upper band-edge modes of the photonic bandgap are shown respectively. Radiative loss is effectively determined by the amplitude and phase of the in-plane electric field ( $E_x$ ) in the slits<sup>[37]</sup>

心特性, 光束角的半峰全宽约为  $5^\circ \times 25^\circ$ , 与全波有限元分析得到的远场 THz 辐射图像吻合。传统的二阶分布式反馈 THz 量子级联激光的远场辐射图像为双瓣辐射特性, 这是二阶四阶杂交分布式反馈的优势之一。通过光刻制备得到的二阶四阶杂交分布式反馈的 THz 频段 QCL 周期与激发模态的发射单模光谱频率对应, 如图 5(d) 所示, 所有基于此设计的 THz 频段 QCL 在整个动态响应区间都展示出稳定的单波长输出。传输模态的有效传播折射率约为 3.16, 相对低的有效传播折射率证实了此新型波导设计所激发的模态位于光子带隙的高光谱能带。

二阶四阶杂交分布式反馈的主要优势在于增强了 THz 频段 QCL 的 THz 辐射效率。在 62 K 温度下, 单模 THz 的最高输出功率达  $(170 \pm 3) \text{mW}$ , 如图 5(b) 所示。这是直接从功率计中测得的 THz 功率, 没有经过任何收集效率和光学损耗的修正。此二阶四阶杂交分布式反馈 THz 波段 QCL 的斜率效率为  $(993 \pm 15) \text{mW/A}$  (微量子效率为 71 光子/电子), 实现的 THz QCL 激光的斜率效率和微量子效率均为目前 THz QCL 的最高效率值。相比之下, 在同一片分子束外延芯片上制备而成的具有相同尺寸的基于二阶分布式反馈的 THz 频段 QCL,

在 63 K 下单模 THz 最高输出功率为 50 mW, 斜率效率约为  $80 \text{mW/A}$ , 进一步证实了二阶四阶杂交分布式反馈可有效提高 THz QCL 的辐射效率。若要继续大幅提高 THz QCL 的输出功率, 阵列耦合技术是取得突破的有效途径<sup>[38]</sup>。

## 5 结 论

本文介绍了近期实现具有窄光束角、频率可调谐和高功率输出的 THz 频段 QCL 的研究工作, 并在基本原理、设计方法和实验结果等方面展开讨论。从诞生至今的 17 年里, THz 频段的 QCL 经历了快速和高质量发展, 作为极具发展潜力的、电泵浦的、可连续发射 THz 场的、最亮的固态 THz 源, THz QCL 正朝着更高性能的方向发展, 其中有很多新颖的、极具实际意义的科学问题值得研究和探索。THz 量子级联激光在生物医学、传感与成像等领域具有重要的研究价值和实用价值, 然而, 目前在生物医学医用领域, 无论是基础研究还是应用研究, 都仍缺乏基于 THz QCL 的实质性工作。随着我国科研水平和实力的大幅提升, 国家对太赫兹技术的重视以及一大批优秀卓越的国内科研团队的探索与创新, 今后一定会有越来越多的来自中国的原创研究和开拓性成果涌现。

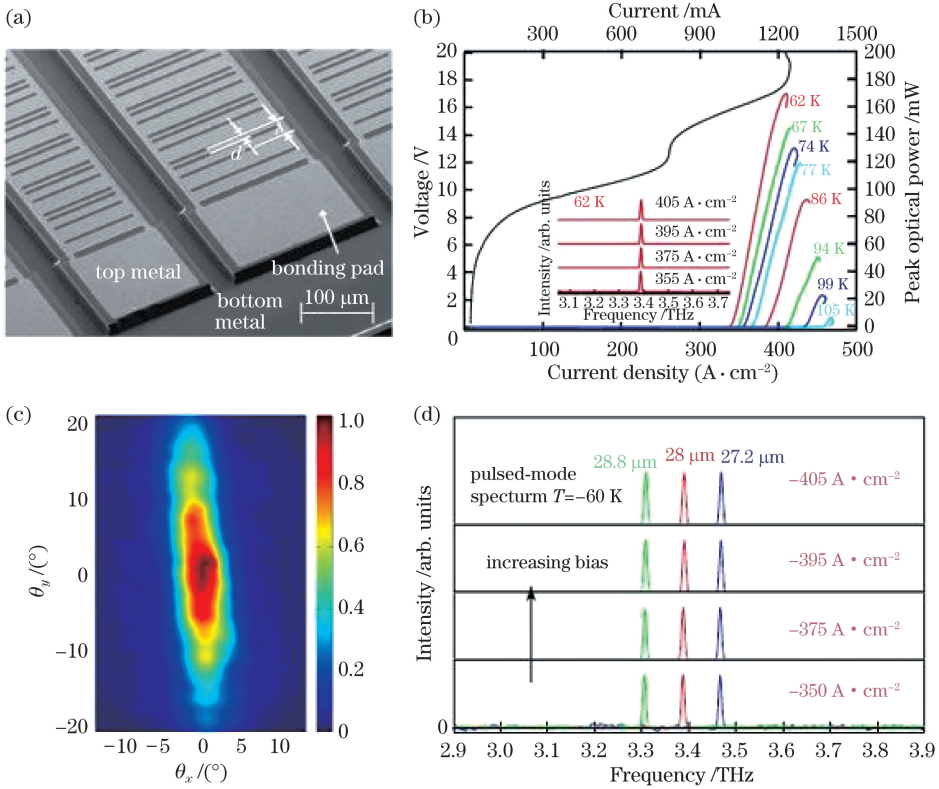


图 5 二阶四阶杂交分布式反馈 THz QCL 的实验结果。(a)制备出的二阶四阶杂交分布式反馈 THz QCL 扫描电子显微镜图像;(b)在 62 K 温度下的电流-电压曲线及在不同操作温度下的光强-电流曲线(脉冲波操作模式),插图为在温度 62 K 时不同电压下的光谱图,THz 量子级联激光器的尺寸为  $10\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m} \times 1.5\ \text{mm}$ ,分布式反馈周期为  $28\ \mu\text{m}$ ;(c)在 62 K 温度下测得的 THz 量子级联激光的 THz 光学强度远场图像,施加的操作电流密度约为  $405\ \text{A}/\text{cm}^2$ ,从 THz QCL 到 THz 信号探测器表面的垂直距离为  $40\ \text{mm}$ , $\theta_x$ 与 $\theta_y$ 分别为沿着 THz 量子级联激光微谐振腔纵向和横向相对于表面垂直发射的角度;(d)三个紧邻的 THz QCL 在施加不同操作电流密度下的光谱图,分布式反馈的周期从右至左分别为  $27.2, 28, 28.8\ \mu\text{m}$ ,电流密度从下至上分别为  $350, 375, 395, 405\ \text{A}/\text{cm}^2$ <sup>[37]</sup>

Fig. 5 Experimental results of hybrid second- and fourth-order DFB THz QCL. (a) Scanning electron microscope image of fabricated THz QCL with hybrid second- and fourth-order DFB; (b) current-voltage ( $I$ - $V$ ) curve at 62 K and light intensity-current ( $L$ - $I$ ) curve at different operating temperatures measured in pulsed mode of operation. Insert is spectrum under different voltage at 62 K. Size of THz QCL is  $10\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m} \times 1.5\ \text{mm}$ , and grating period  $\Lambda$  is  $28\ \mu\text{m}$ ; (c) far-field radiation pattern (optical intensity) measured at 62 K at a distance of  $40\ \text{mm}$  from the QCL in the surface-normal direction with operation current density of  $\sim 405\ \text{A}/\text{cm}^2$ .  $\theta_x$  and  $\theta_y$  are angles with respect to the surface normal along the longitudinal and lateral dimensions of the QCL cavity, respectively. (d) spectra of three different QCLs located neighboring each other on the wafer with different grating periods of  $27.2\ \mu\text{m}$  (blue line),  $28\ \mu\text{m}$  (red line), and  $28.8\ \mu\text{m}$  (green line). Current densities are  $350, 375, 395, \text{ and } 405\ \text{A}/\text{cm}^2$ , respectively<sup>[37]</sup>

## 参 考 文 献

- [1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology [J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.
- [2] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology [J]. Nature Materials, 2002, 1(1): 26-33.
- [3] Zhao J Y, Liu W W, Li S C, *et al.* Clue to a thorough understanding of terahertz pulse generation by femtosecond laser filamentation [J]. Photonics Research, 2018, 6(4): 296-306.
- [4] Wan W J, Li H, Zhou T, *et al.* Homogeneous spectral spanning of terahertz semiconductor lasers with radio frequency modulation [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 44109.
- [5] Wang D B, Zhang J C, Cheng F M, *et al.* Stable single-mode operation of distributed feedback quantum cascade laser by optimized reflectivity facet coatings [J]. Nanoscale Research Letters, 2018, 13: 37.
- [6] Zhou Z T, Zhou T, Zhang S Q, *et al.* Multispectral imaging: multicolor T-ray imaging using

- multispectral metamaterials [J]. *Advanced Science*, 2018, 5(7): 1870044.
- [7] Faist J, Capasso F, Sivco D L, *et al.* Quantum cascade laser [J]. *Science*, 1994, 264(5158): 553-556.
- [8] Köhler R, Tredicucci A, Beltram F, *et al.* Terahertz semiconductor-heterostructure laser [J]. *Nature*, 2002, 417(6885): 156-159.
- [9] Chang J, Li H, Han Y J, *et al.* Material growth and characterization of terahertz quantum-cascade lasers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(10): 7083-7087. 常俊, 黎华, 韩英军, 等. THz 量子级联激光器材料生长及表征 [J]. *物理学报*, 2009, 58(10): 7083-7087.
- [10] Tan Z Y, Cao J C. Terahertz quantum-cascade laser and its beam pattern characterization [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2013, 11(1): 21-25. 谭智勇, 曹俊诚. THz 量子级联激光器及其光束表征技术 [J]. *THz 科学与电子信息学报*, 2013, 11(1): 21-25.
- [11] Williams B S. Terahertz quantum-cascade lasers [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(9): 517-525.
- [12] Adam A J L, Kašalynas I, Hovenier J N, *et al.* Beam patterns of terahertz quantum cascade lasers with subwavelength cavity dimensions [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(15): 151105.
- [13] Wan W J, Li H, Cao J C. Homogeneous spectral broadening of pulsed terahertz quantum cascade lasers by radio frequency modulation [J]. *Optics express*, 2018, 26(2): 980-989.
- [14] Kumar S, Williams B S, Qin Q, *et al.* Surface-emitting distributed feedback terahertz quantum-cascade lasers in metal-metal waveguides [J]. *Optics Express*, 2007, 15(1): 113-128.
- [15] Yu N F, Wang Q J, Kats M A, *et al.* Designer spoof surface plasmon structures collimate terahertz laser beams [J]. *Nature Materials*, 2010, 9(9): 730-735.
- [16] Chassagneux Y, Colombelli R, Mauneult W, *et al.* Electrically pumped photonic-crystal terahertz lasers controlled by boundary conditions [J]. *Nature*, 2009, 457(7226): 174-178.
- [17] Amanti M I, Fischer M, Scaliari G, *et al.* Low-divergence single-mode terahertz quantum cascade laser [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(10): 586-590.
- [18] 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.
- [19] Lee A W M, Williams B S, Kumar S, *et al.* Tunable terahertz quantum cascade lasers with external gratings [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(7): 910-912.
- [20] Xu J H, Hensley J M, Fenner D B, *et al.* Tunable terahertz quantum cascade lasers with an external cavity [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(12): 121104.
- [21] Qin Q, Williams B S, Kumar S, *et al.* Tuning a terahertz wire laser [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(12): 732-737.
- [22] Han N R, de Geofroy A, Burghoff D P, *et al.* Broadband all-electronically tunable MEMS terahertz quantum cascade lasers [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(12): 3480-3483.
- [23] Castellano F, Bianchi V, Li L H, *et al.* Tuning a microcavity-coupled terahertz laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(26): 261108.
- [24] Turčinková D, Amanti M I, Scaliari G, *et al.* Electrically tunable terahertz quantum cascade lasers based on a two-sections interdigitated distributed feedback cavity [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(13): 131107.
- [25] Turčinková D, Amanti M I, Castellano F, *et al.* Continuous tuning of terahertz distributed feedback quantum cascade laser by gas condensation and dielectric deposition [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(18): 181113.
- [26] Khalatpour A, Reno J L, Hu Q. Phase-locked photonic wire lasers by  $\pi$  coupling [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(1): 47-53.
- [27] Wu C Z, Jin Y, Reno J L, *et al.* Large static tuning of narrow-beam terahertz plasmonic lasers operating at 78 K [J]. *APL Photonics*, 2017, 2(2): 026101.
- [28] Jin Y, Wu C Z, Reno J L, *et al.* Terahertz plasmonic lasers with narrow beams and large tunability [J], *Proceedings of SPIE*, 2017, 10123: 1012312.
- [29] Li Y Y, Zhao F Y, Liu J Q, *et al.* Single-mode surface emitting terahertz quantum cascade lasers [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2018, 18(11): 7554-7556.
- [30] Mahler L, Tredicucci A, Beltram F, *et al.* High-power surface emission from terahertz distributed feedback lasers with a dual-slit unit cell [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(19): 191109.
- [31] Xu G Y, Colombelli R, Khanna S P, *et al.* Efficient power extraction in surface-emitting semiconductor lasers using graded photonic heterostructures [J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 952.
- [32] Liang G Z, Liang H K, Zhang Y, *et al.* Single-mode surface-emitting concentric-circular-grating terahertz quantum cascade lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(3): 031119.



- 
- [33] Kao T Y, Reno J L, Hu Q. Phase-locked laser arrays through global antenna mutual coupling [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(8): 541-546.
- [34] Biasco S, Garrasi K, Castellano F, *et al.* Continuous-wave highly-efficient low-divergence terahertz wire lasers [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 1122.
- [35] Amanti M I, Scaliari G, Castellano F, *et al.* Low divergence terahertz photonic-wire laser [J]. *Optics Express*, 2010, 18(6): 6390-6395.
- [36] Curwen C A, Reno J L, Williams B S. Terahertz quantum cascade VECSEL with watt-level output power[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(1): 011104.
- [37] Jin Y, Gao L, Chen J, *et al.* High power surface emitting terahertz laser with hybrid second- and fourth-order Bragg gratings [ J ]. *Nature Communications*, 2018, 9: 1407.
- [38] Luo J W, Wang X M, Shen C L, *et al.* Research progress on array coupling of terahertz quantum cascade lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(1): 010004.
- 罗佳文, 王雪敏, 沈昌乐, 等. THz 量子级联激光器阵列耦合的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(1): 010004.