

太赫兹量子级联激光器中的光电调控: 综述

黄嘉豪^{1,2}, 徐刚毅^{1,3*}

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 国科大杭州高等研究院, 物理与光电工程学院, 浙江 杭州 310024)

摘要: 太赫兹量子级联激光器作为目前产生太赫兹激光的最有效手段之一, 如何提升其性能表现一直是科学界所关注的重点。本篇综述将从光电调控的角度, 阐述目前太赫兹量子级联激光器的性能进展。从激光器有源区设计原理开始, 介绍几种新的有源区设计, 再从谐振腔的角度介绍一系列新的结构, 并展示他们对于功率和光束质量的提升。最后, 阐述了太赫兹量子级联激光器在偏振调控和频率调谐的最新进展。

关键词: 太赫兹; 量子级联激光器; 激光功率; 光束质量; 偏振调控; 频率调谐

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

Photonic and electric control in terahertz quantum cascade lasers: Review

HUANG Jia-Hao^{1,2}, XU Gang-Yi^{1,3*}

- (1. Key laboratory of Infrared imaging materials and detectors, Shanghai Institute of technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, China)

Abstract: As one of the most effective methods to generate terahertz laser, how to improve the performance of terahertz quantum cascade laser has been the focus of the scientific community. In this review, the current performance of terahertz quantum cascade lasers is described from the perspective of photonic and electric control. Starting from the principle of active region design of laser, several new active region designs are introduced, and then a series of new structures are introduced from the perspective of resonator, and their improvement on power and beam quality is shown. Finally, we describe the recent progress in polarization regulation and frequency tuning of terahertz quantum cascade lasers.

Key words: Terahertz, quantum cascade lasers, laser power, beam quality, polarization control, tuning

引言

频率为 0.3 THz 到 10 THz 的电磁波频段通常被称为太赫兹波, 是红外和微波的过渡区间, 但却因为较难高效地产生、调控、探测太赫兹波, 使得这一波段被称为“THz Gap”。直到 2002 年, Köhler 等人成功制造出了太赫兹量子级联激光器(Terahertz

quantum-cascade-laser, THz-QCL), 在填补“太赫兹带隙”的道路上迈出了重要的一步^[1]。这个来源于中红外波段的器件自被应用于太赫兹波段以来, 就因其优异的性能而备受瞩目。太赫兹 QCL 具有非常广阔的应用前景, 包括破坏性成像^[2-6]、光谱传感^[7-9]、高速无线通讯传输^[10-12]、外差接收器^[13-15]、直

收稿日期: 2021-12-31, 修回日期: 2022-01-20

Received date: 2021-12-31, Revised date: 2022-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(61734006, 61974151); 上海市自然科学基金:(20ZR1466200, 21ZR1474000)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China(61734006, 61974151); the Natural Science Foundation of Shanghai (20ZR1466200, 21ZR1474000).

作者简介(Biography): 黄嘉豪(1998-), 男, 江苏江阴人, 硕士生, 主要研究领域为太赫兹量子级联激光器的设计和制造等, E-mail: huangjiahao20@mails.ucas.ac.cn

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: gangyi.xu@mail.sitp.ac.cn

接热辐射成像^[16]。特别是在2014年,太赫兹QCL作为德国天体太赫兹频率接收器(German Receiver for Astronomy at Terahertz frequencies, GREAT)项目的平流层红外天文台(Stratospheric Observatory For Infrared Astronomy, SOFIA)上的外差接收器的本机振荡器,在三次观测飞行中都成功运行,验证了太赫兹QCL的应用可靠性^[17]。目前,对太赫兹QCL的光电调控技术已经实现许多突破性进展,如最高工作温度、脉冲/连续模式峰值输出功率、偏振调控、频率调谐等方面。本篇综述就将从这几个方面出发,介绍近年来太赫兹QCL领域的研究进展,加深我们对于太赫兹QCL发展现状的认知。

1 太赫兹QCL有源区设计

QCL有源区是通过多量子阱的能级、散射率、波函数等方面的设计来产生粒子数反转,给所需频率提供增益。有源区通常由分子束外延(Molecular-Beam Epitaxy, MBE)技术生长的GaAs/Al_xGa_{1-x}As材料系统构成,形成多量子阱结构。为了得到太赫兹频段的跃迁能量 $h\nu$,需要设计合理的电子子能带结构^[18]。

最初QCL采用的是啁啾超晶格(Chirped Superlattice, CSL)设计,其辐射产生于上子带最低能态到下子带最高能态的跃迁。该结构中电子倾向于在子带内散射而非子带间,因而大量聚集在子带底部,子带顶部占据数较少,从而使子带底部的上辐射态和子带顶部的下辐射态之间形成粒子数反转,产生增益。同时,能态密度理论说明了只有带边态之间的跃迁才能产生光子,也就是设计好的上下辐射态之间,从另一个角度解释了粒子数反转的产生机理。

在CSL的基础上诞生了束缚-连续体模型(Bound-To-Continuum, BTC)。BTC的区别在于将上辐射态从上子带底部的带边态变为了束缚在子带隙中的缺陷态^[19-20]。将上能态设计为缺陷态后显著减少了非辐射跃迁,增加了上辐射态寿命,同时也提高了系统在实空间的对角化程度。由于缺陷态独立地束缚在带隙中,BTC设计可以增强上辐射态与注入态的耦合强度,使得注入过程的准确性更高。缺点在于BTC的振子强度比CSL略低,但整体上取得了更高的工作温度和输出功率。

以上两种结构为代表的QCL设计都将注入和提取能级设计在下辐射态以下一个纵模光学声子(LO-phonon)的能量(约为36 meV),从而通过发射

LO声子将下辐射态的电子散射到注入能级。但是由于太赫兹波段波长较长、能量较低,很难做到准确地只将下辐射态的电子散射掉,因此无法避免地导致上辐射态的电子也被散射掉^[21-22]。为了避开这个问题,声子谐振(Resonant-Phonon, RP)模型应运而生。在RP设计中,下辐射态处于和相邻量子阱中激发态的宽隧穿共振中,波函数在数个量子阱中传播,与注入态有较大的空间重叠,产生亚皮秒LO声子散射。而上能态依然是局域化的,与注入态波函数的空间重叠极小,抑制了散射的产生,获得了相对较长的寿命(皮秒级)。由于RP设计没有利用子能带,因此RP的振子强度相对于BTC更低,但是由于RP的模块长度一般为BTC的一半,产生了更高的增益密度,一定程度上补偿了振子强度的减弱。一种混合结构的设计也已诞生,即由声子辅助的BTC设计,声子发射过程和光子发射过程交替发生,因此被称为交错(Interlaced)结构。

QCL诞生初期,最高工作温度(T_{max})仅有几十K,需要使用液氮制冷才能工作。随后几年内这个数值被迅速地推高,超过了77 K,在液氮制冷环境下也能提供百毫瓦级的激光输出。对于QCL的最高工作温度,存在一个经验公式 $T_{max} = \hbar\omega/k_B$,其中 $\hbar\omega$ 为光子能量, k_B 为玻尔兹曼常数。由于太赫兹波能量较小,因此按照这个经验公式太赫兹QCL的最高工作温度始终较低。为了突破这个经验公式,对现有的QCL有源区设计又有了许多改进。在2012年,S. Fathololoumi等人展示了一种最高温度达到199.5 K的太赫兹QCL设计^[23]。他们在三量子阱共振声子设计的基础上,利用简化密度矩阵模型,计算优化了量子阱各层的厚度,将注入态和提取态完美对齐,达到更高的量子隧穿耦合强度,最终获得了高达0.58的振子强度。在换用了双铜金属层波导并移除顶部 n^+ 传导层后,最终在199.5 K时依然能产生3.22 THz的太赫兹激光,对应于 $T_{max} \approx 1.28\hbar\omega/k_B$ 。

近些年的一些进展已经让我们看到了实现热电制冷,乃至室温下工作的希望。在2020年,Al Khalatpour等人实现了最高工作温度达到250 K、工作频率为4 THz的便携式太赫兹QCL^[24]。他们敏锐地意识到高壁垒情况下辐射态以上的高能态泄露是影响高温下性能的重要原因,将优化的重点放在了形成更加纯净的 n 能级系统上,并利用一种双量子阱的直接声子设计,成功实现了250 K的最高工

作温度。他们利用单个商用热电制冷机,在 235 K 下实现了脉冲模式(占空比为 1%)工作,整个设备体积较小,实现了便携性,使得太赫兹 QCL 不再局限于实验室环境。在换装了三级热电制冷机后,降温至 210 K 后激光器的平均输出功率足以使 320×240 太赫兹焦平面阵列相机实现 32 帧平均成像,使便携式太赫兹相机成为可能,进一步拓宽了太赫兹成像技术的应用前景。

2 功率与光束质量

目前双金属波导已经成为太赫兹 QCL 设计的主流,原因是相对于半绝缘表面激元(Semi-Insulating Surface-Plasmon, SI-SP)波导,双金属波导具有更高的工作温度^[25-27]。相对的,由于双金属波导的亚波长结构,其输出功率和光束质量都有所下

降^[28]。因此,如何通过对激光谐振腔的设计以改善双金属波导的输出性能成为了一个重要课题。这一节中将介绍一系列新结构,并展示他们是如何改善太赫兹 QCL 的输出性能。

2.1 三阶 DFB

2009 年 Amanti 等人提出了利用三阶分布反馈(Distributed Feedback, DFB)光栅来调制太赫兹 QCL^[29]。三阶 DFB 光栅对应光衍射矢量 $G = 2\beta/3$ 的光栅结构,其中 β 为介质中的模式传播常数。此时,如果有效折射率 $n_{eff} = 3$,那么第一和第二衍射模式将会符合水平方向的自由空间传播模式,而第三衍射模式将会提供反馈。双金属波导的有效折射率通常为 3.56,但可以利用光栅模式耦合来补偿有效折射率的差距。实际制备的三阶 DFB 太赫兹 QCL 与同时期的表面发射结构相比峰值功率翻了 7

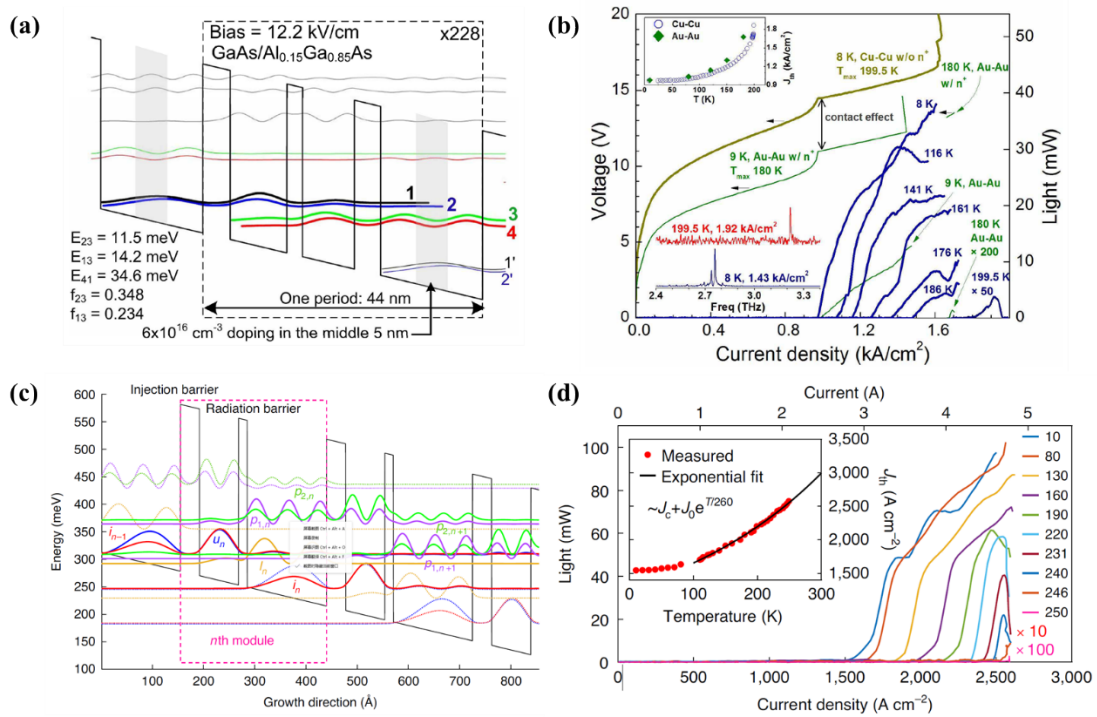


图1 (a)经过优化后的三量子阱模块结构在设计工作电压下的导带图和电子波函数的模平方,(b)分别使用金和铜制的双金属波导在不同温度下工作的L-I-V曲线,其中的上插图分别为两种波导阈值电流密度随温度的变化,下插图分别为铜波导在8K和199.5K时的光谱,图片引用自文献[23],(c)双量子阱模块结构的子带波函数结构图,(d)不同温度下器件的L-I曲线,插图分别为不同温度下的阈值电流密度,图片引用自文献[24]

Fig. 1 (a) The band conductance diagram and the modulus square of the electron wave function of the optimized three-quantum-well module structure under the designed working voltage, (b) L-I-V curves of metal-metal waveguides made of gold and copper operating at different temperatures respectively. The upper illustration shows the change of threshold current density of the two waveguides as a function of temperature, and the lower illustration shows the spectrum of the copper waveguide at 8 K and 199.5 K. The pictures are quoted from Ref. [23], (c) the subband wave function structure diagram of the double quantum well module structure, (d) the L-I curve of the device at different temperatures, and the figure shows the threshold current density at different temperatures. The pictures are quoted from Ref. [24]

倍,达到了 15 mW,斜率效率也从 40 mW/A 提升到了 130 mW/A,其远场为单瓣窄光束,发散角约为 10° ,显著地提升了光束质量。

2017 年 Ali Khalatpour 等人在天线耦合三阶 DFB 的基础上,在每个周期中加入了一个周期性的反射结构,抑制了反向模式,补偿了正向模式,最终实现了激光器的单向发射^[30]。相比改进前,输出功率提升了 1.8 倍,电光转换效率(Wall-Plug Efficiency, WPE)从 0.57% 提升到了约 1%,远场发散角较小,为 $15^\circ \times 25^\circ$ 。2019 年, Ali Khalatpour 等人又基于天线耦合三阶 DFB 提出了一种 π 耦合的相位锁定激光器^[31]。 π 耦合的想法来源于化学中的 π 共轭,通过将两个激光器近距离放置形成一个强耦合达到锁相,使其在不同工作偏压下依然单模工作。通过调整两个激光器偏置电压的差,实现了出射频率的电驱动连续调谐,一对激光器的调谐范围约为 10 GHz。通过设计好的激光器阵列,整个阵列最终能够实现超过 100 GHz 的连续调谐。

2018 年, Simone Biasco 等人提出了一种反馈结构和光提取结构分离的新设计^[32]。他们制作了一种正弦结构的边缘提供反馈、中心刻蚀空气孔列提取激光的波导结构,通过这种分离式的设计,实现反馈和提取性能的单独控制。通过参数优化,在脉冲模式下实现了 250 mW/A 的斜率效率,并且具有良好的连续流(Continuous Wave, CW)工作性能,在 CW 模式下也具有 100 mW/A 的斜率效率和 0.23% 的 WPE,发散角小于 10° 。

2.2 梯度光子异质结

为了提高表面发射(Surface-Emitting)结构的出射功率,2012 年,徐刚毅等人提出了梯度光子异质结(Graded Photonic Heterostructure, GPH)结构,极大地提升了太赫兹 QCL 的出射效率,功率比当时典型的 DFB 激光器高 4 倍,斜率效率高了一个数量级^[33]。对表面发射激光器来说,反对称的非辐射模对应的损耗较小,因此,激光器优先激发低辐射损耗的反对称模式,而不是高辐射损耗的对称模式。GPH 设计中光栅的周期从中心向两侧逐渐减小,在实空间中对对称模形成一个势阱,而对非对称模形成一个势垒,使对称模分布在激光器的中心,反对称模处于激光器边缘。通过在激光器边界上设置吸收边,极大地提升非辐射模的损耗,但对辐射模几乎没有影响,使高辐射损耗的对称模优先激发。引入 GPH 结构之后,20 K 脉冲模式下激光器功率达到了 50

mW,斜率效率达到 230 mW/A,远超同期其他结构,且远场为很好的单瓣,证明了其优秀的光束质量。2014 年,徐刚毅等人进一步优化了 GPH 结构,不再改变周期,而是改变金属栅格相对于光栅周期的宽度占比(Filling-Factor),类似地使其从中心开始向两侧递减^[34]。结构优化之后,实空间中的势阱更加狭窄,而势垒更加宽大,使非辐射模式和高阶辐射模更难激发,进一步增强了 GPH 激光器的单模性能,在整个动态范围内都实现了单模工作,并在 15 K 下实现了 20~25 mW 的连续模式输出。

2.3 MOPA

主振子功率放大器(Master-Oscillator Power-Amplifier, MOPA)结构是一种被广泛应用于近红外二极管激光器和中红外量子级联激光器中的激光器结构^[35-39],能够实现良好的单模性能和几乎达到衍射极限的远场分布。但为了抑制 PA 部分的自激激光,需要在器件的出射面上覆盖增透层(Anti-Reflection, AR)。对于太赫兹波段,一直缺少对应的增透层材料,限制了 MOPA 结构在太赫兹波段的应用。2016 年,朱欢等人的工作设计了一种新的结构替代了增透层,成功将 MOPA 结构引入了太赫兹激光器中^[40]。他们采用了一种称为光栅耦合器(Grating Coupler)的结构^[41],通过设计好的表面光栅结构使激光频率处于能带中群速度最高的部分,实现了降低反射率同时增强光提取效率的功能,替代了传统 MOPA 器件的 AR 结构。最终实现了单片集成的 THz-MOPA-QCL,其中 MO 部分是双金属波导的一阶 DFB 激光器,PA 部分使用和 MO 相同的有源区材料,二者之间不直接相连,存在一个空气间隔,使二者可以分别泵浦;PA 部分末端为 GC 结构,以提取激光模式到自由空间,边缘处覆盖有吸收边以进一步抑制反射率。最终, MOPA 结构实现了显著的性能提高,PA 部分实现了 5 倍左右的放大效率,相对于相同有源区材料的二阶 DFB 激光器出射功率为两倍,并实现了很好的单模性能。

2018 年,朱欢等人又优化了 THz-MOPA-QCL 设计,进一步提升了性能^[42]。MO 部分光栅设计优化是为了中心 π 相移光栅,使其工作在缺陷态,改变了光场分布,使边界处场强相对于中心占比从 5.5% 提升到了 38%,显著提升了激光效率。为了减少 PA 部分的增益饱和效应影响,将原本的直条结构改进为锥形结构,具有一个 9° 的倾斜角,并增加了长度,使太赫兹波分布在更大的有源区范围内。

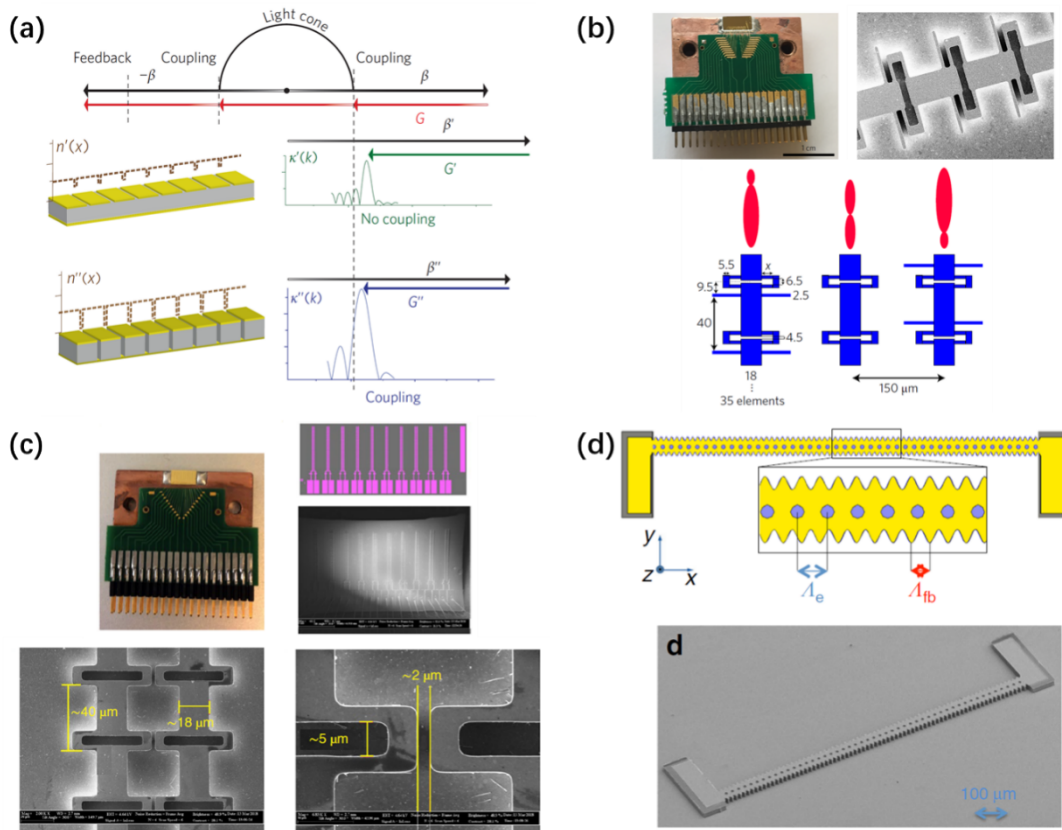


图2 (a)第一行:三阶DFB出射原理;第二行:浅刻蚀光栅 k 空间波矢量图,无法满足出射条件;第三行:深刻蚀光栅 k 空间波矢量图,满足条件可以出射,图片引用自文献[29],(b)定向三阶DFB激光器示意图,左上为器件照片,右上为单个器件的SEM图像,下方为单元结构参数,图片引用自文献[30],(c) π -相位锁定的三阶DFB激光器示意图,左上为器件照片,右上为一个十对激光器模具的设计图和实际器件SEM照片;左下为一对 π -相位锁定的激光器三个单元的SEM图像,右下为两个激光器天线相邻处SEM照片,图片引用自文献[31],(d)正弦反馈光栅和辐射孔阵列分离的DFB激光器,上图为分离结构设计图,下图为实际器件SEM照片,图片引用自文献[32]

Fig. 2 (a) Upper: principle of Third-order DFB; middle: k space wave vector diagram of shallow-etched grating, which cannot meet the emission conditions; lower: k space wave vector diagram of deep etching grating, which can be emitted when the conditions are met. The picture is quoted from Ref. [29], (b) the schematic diagram of directional third-order DFB laser. The upper left is the photo of the device, the upper right is the SEM image of a single device, and the lower part is the unit structural parameters. The picture is quoted from Ref. [30], (c) the schematic diagram of third-order DFB laser with π -phase locking. The device photo is on the upper left, and the design drawing of a ten-pair laser mold and SEM photo of the actual device are on the upper right. The SEM images of three units of a pair of π -phase locked lasers are shown in the lower left, and the SEM images of the adjacent positions of two laser antennas are shown in the lower right. The picture is quoted from Ref. [31], (d) DFB laser separated by sinusoidal feedback grating and radiation hole array. The above is the design of separation structure, and the following is the SEM photo of the actual device. The picture is quoted from Ref. [32]

在GC部分,为了抑制水平边界与太赫兹波的空间重叠造成的寄生反射,将GC部分的宽度从 $150\ \mu\text{m}$ 增加到了 $600\ \mu\text{m}$,使得反射率低于 0.1% ,并增大了出射面积,获得了更好的光束质量。最终实现了 $20\ \text{K}$ 下 $136\ \text{mW}$ 的峰值功率,是类似规格二阶DFB激光器的36倍,远场为单瓣,发散角仅有 $18^\circ \times 16^\circ$ 。2020年,朱海卿和朱欢等人提出了一种基于载流子速率方程的模型来分析增益饱和,以及THz-MO-

PA-QCL输出功率与材料、结构参数的关系^[43]。按照模型优化的结构制作的器件验证了模型的可靠性,且又进一步提升了性能, $77\ \text{K}$ 时脉冲模式下峰值功率达到了 $153\ \text{mW}$,发散角更缩小到 $6^\circ \times 16^\circ$ 。

2.4 垂直腔面发射激光器

Lehigh大学的Jin Yuan等人将注意放在了垂直腔面发射激光器上,并获得了优异的性能表现。2018年,他们展示了一种混合了二阶和四阶布拉格

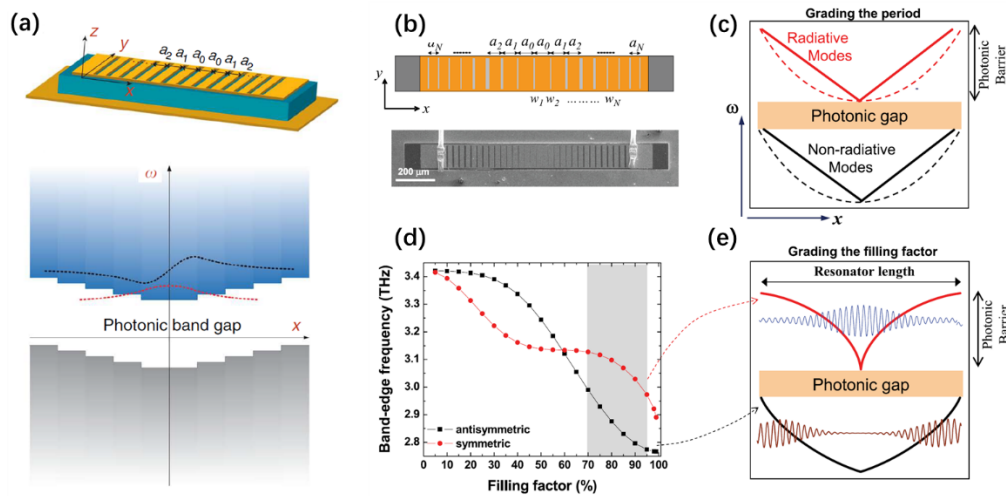


图3 (a)中上图展示了GPH激光器中向两侧递减的光栅周期结构,下图则表现了对应实空间光子能带的变化以及势阱的出现,图片引用自文献[33],(b)光栅周期渐变GPH(上)和填充率渐变GPH(下)设计的区别,(c)光栅周期渐变GPH的光子能带图,(d)随着填充率变化,两边界态本征频率的变化,(e)对应光子能带图的变化,图片引用自文献[34]

Fig. 3 (a) The upper shows the grating periodic structure decreasing to both sides in the GPH laser, while the bottom figure shows the corresponding photon band diagram in real space. A potential well has been formed. The pictures are quoted from Ref. [33], (b) the difference between grating period gradient GPH (top) and filling rate gradient GPH (bottom), (c) the photon band diagram of grating period gradient GPH, (d) the change of the intrinsic frequency of the two boundary states with the change of filling rate, (e) the change of the corresponding photon band diagram. The pictures are quoted from Ref. [34]

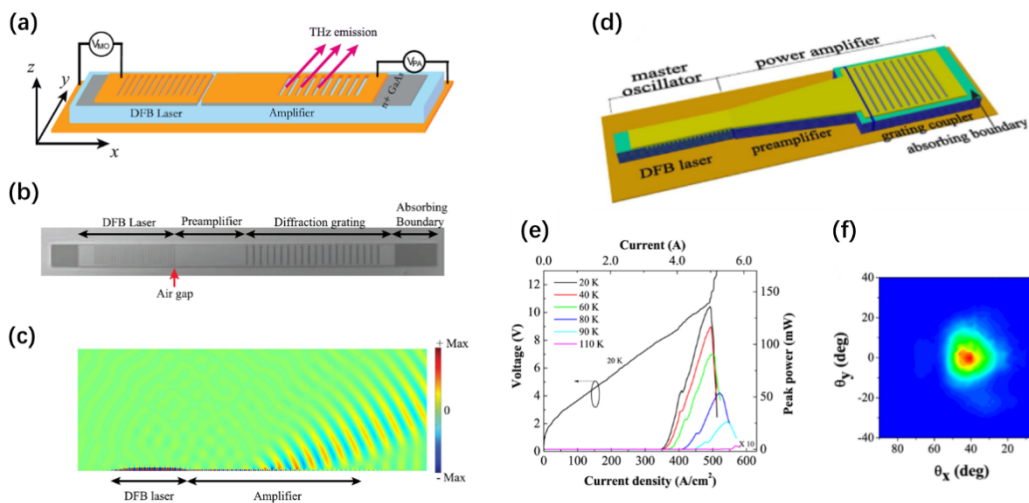


图4 (a)太赫兹MOPA器件设计原理图,(b)实际器件的SEM照片,(c)模拟计算得到的腔内激光模式和出射场分布,图片引用自文献[40]。(d)结构优化后的太赫兹MOPA的设计原理图,(e)不同温度下激光器的L-I-V曲线,(f)激光器的远场分布图像,图片引用自文献[42]

Fig. 4 (a) The schematic diagram of the Terahertz MOPA device, (b) the SEM photo of the actual device, (c) the cavity laser mode and emission field distribution obtained by simulation. The pictures are quoted from Ref. [40], (d) the schematic diagram of the optimized Terahertz MOPA, (e) the L-I-V curve of the laser at different temperatures, (f) the far-field distribution image of the laser. The pictures are quoted from Ref. [42]

光栅的表面发射太赫兹激光器^[44]。通过在一个标准的二阶DFB的周期中加入一个四阶DFB结构,相当于在每个周期内引入了一个反向偶极子,使原本二阶DFB模式的极值点位置发生了一点偏移,降低

了对称模式的辐射损耗,增加了非对称模式的损耗,使两个模式都有可能激发。无论哪个模式相对于原本的二阶DFB辐射效率都有增强。通过将四阶光栅周期设为二阶光栅的3/8,成功选择激发了对

称的上带边模式,最终实现了 170 mW 的峰值输出,斜率效率达到了破纪录的 993 mW/A,微量子效率达到了 71 光子/电子,全动态范围内实现了单模工作和单瓣远场,估计达到了理论功率上限的 1/3。

2020年, Jin Yuan 等人更是突破性地实现了 2W 峰值功率的相位锁定太赫兹等离子激光器阵列^[45]。通过将数个较短的法布里-珀罗(Fabry - Perot, FP)腔在纵向的相干组合形成阵列,再调整阵列的周期,使得其和平行金属板腔内的共振表面等离子激元(Surface Plasmon Polariton, SPP)具有一个明确的相位关系,从而在腔外产生单侧传播的杂化 SPP 模式。随后通过在 FP 腔金属层上刻蚀辐射孔增强腔外杂化 SPP 波,最终实现了 FP 腔阵列的锁相。该阵列的辐射点既包括金属层上的辐射孔,也包括 FP 腔的两个端面,在锁相情况下这些点的 E_x 场相位相

同,实现了激光模式的垂直表面出射。最终在 58 K 单模工作情况下达到了 2.03 W 的峰值输出功率,是当时的单模太赫兹 QCL 的最高输出功率,而斜率效率达到了 1.57 W/A, WPE 高达 2.3%。这种杂化 SPP 波纵向耦合的方法不仅不同于一般半导体激光器的横向耦合,而且实现了很好的单模性能和光束质量(发散角仅为 $3.2^\circ \times 11.5^\circ$),为未来的太赫兹 QCL 设计提供了一条新颖的道路。

3 偏振调控

如今,随着技术的需要,光的偏振调制逐渐成为学术界的焦点。激光的偏振特性在光谱学、传感、偏振成像等领域有着重要作用,然而传统的太赫兹偏振调制一般都是空间光调制,需要外部光学器件,比如双折射晶体^[46]、超材料偏振转换器^[87-49]

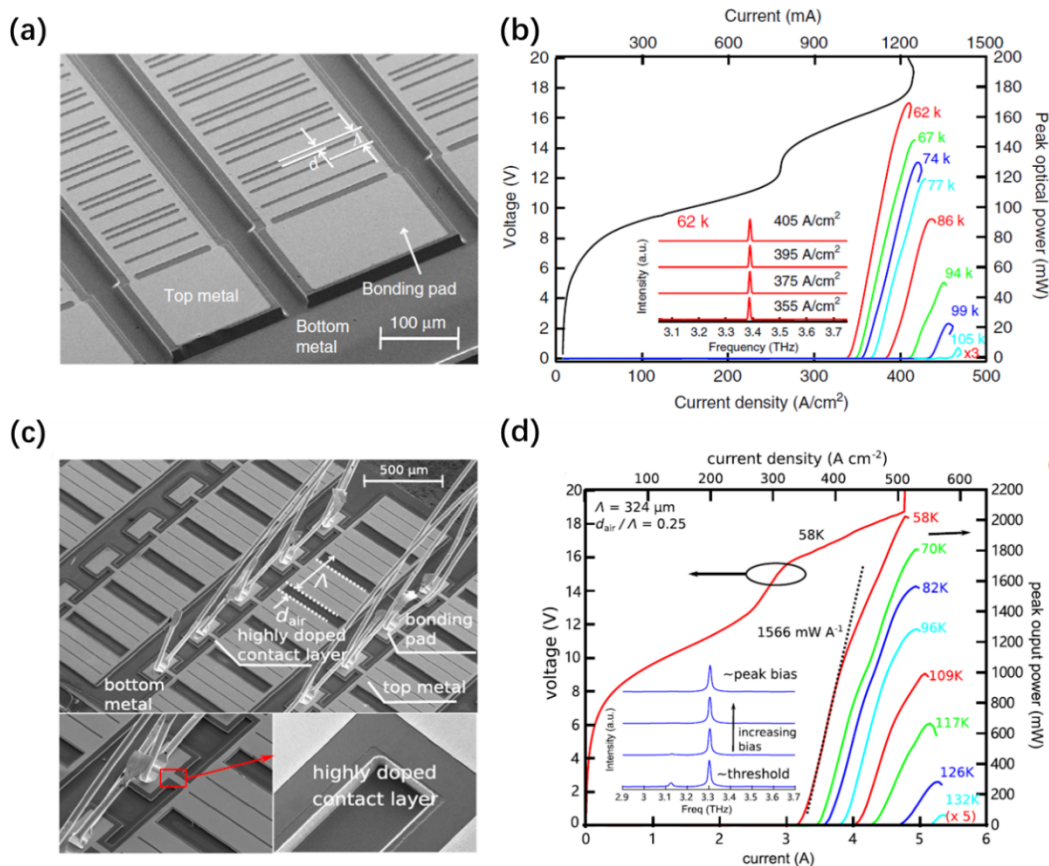


图5 (a)制造的一系列二阶-四阶混合DFB激光器的SEM照片,(b)激光器在不同温度下的L-I-V曲线,插图为62 k不同电流密度下激光器的频谱,图片引用自文献[44],(c)制造的QCL阵列SEM照片,(d)该阵列在不同温度下的L-I-V曲线,插图为从电流密度从阈值到峰值时的器件光谱,图片引用自文献[45]

Fig. 5 (a) The SEM photo of the second-order and fourth-order hybrid DFB lasers, (b) the L-I-V curves of the lasers at different temperatures. The illustration shows the spectrum of the lasers at different current densities at 62 K. The picture is quoted from Ref. [44], (c) the SEM photo of QCL cavities array, (d) the L-I-V curve of the array at different temperatures, and the illustration is the device spectrum from the threshold current density to the peak current density. The picture is quoted from Ref. [45]

等,导致器件具有较大的体积。为了满足集成光学所需要的小型化、集成化的要求,需要能够单片实现的光偏振调制方法。近年来,一种被称为“鱼骨型”的阵列结构提供了一种可行的单片太赫兹激光偏振调制的手段。

这种结构来源于一种耦合光栅。2013年, Lin Jiao 等人的工作说明了一种定向耦合结构,能将入射偏振光耦合成表面等离子激元(SPPs)波,具有偏振不变的总转换效率,并保留入射偏振信息^[50]。他们利用了偏振敏感的窄光栅(只有垂直反向偏振耦合)组成了两条阵列,形成了相互正交的两个基,因此任意偏振方向的入射光都能被分解到这两个基上从而被耦合成SPP波,使总耦合效率与偏振无关。调整了阵列参数后,这两条阵列实现了左右圆偏振光的分离,即左旋和右旋圆偏振光耦合成SPP波后沿相反方向传播。实际制造的器件验证了SPP波方向的手性依赖,证明了该耦合光栅对于入射光偏振的分解。2014年, Patrick Rauter 等人将这种正交光栅阵列应用到了太赫兹QCL脊激光器上,实现了太赫兹圆偏振光的表面发射^[51]。通过在太赫兹QCL的双金属波导金属面上设置一系列斜向的光栅阵列形成五阶光栅,在实验中成功观察到了沿垂直于光栅伸展方向偏振的太赫兹激光,证明了该结构可用于集成激光偏振调制。随后,进一步应用正交光栅阵列,最终观测到了最高86%圆偏振度的偏振激光出射。由于腔内驻波模式对于正交的两组孔洞的耦合效率不同导致了圆偏振度的降低,又优化了一种横向耦合结构,使相邻的两组阵列中两种模式的耦合效率相近,最终实现了圆偏振度98%的偏振激光出射,为太赫兹激光的集成偏振调制指明了方向。

2017年, Xu LuYao 将这种正交阵列中的光栅替代为了天线,制成超表面结构并实现了电控可调的太赫兹偏振出射^[52]。偏振敏感超表面由两个正交的、QCL有源区材料构成的面发射天线交错阵列构成,每种阵列对应与之垂直的线偏振态。通过对于两种阵列的分别泵浦,可以单独调控某种偏振态的幅值,从而实现电控的偏振调控。实验中,他们利用超表面和输出耦合反射器建立了一个量子级联垂直外腔面发射激光器(QC-VECSEL),实现了偏振角相差 80° 的两线偏振态之间的电控动态切换,并始终保持了单模、窄光束(发散角 $3^\circ \times 3^\circ$)、高功率的工作模式。2017年, Liang Guozhen 等人展示了通

过两个锁相的正交天线阵列实现连续的偏振调谐^[53]。将QCL有源区材料制作的两个正交线偏振天线阵列在垂直方向设置一定距离,形成 $\pi/2$ 的相移,再分别通过锥形波导与两个太赫兹QCL耦合。两个直条QCL再通过一个半跑道型有源波导耦合(其间并不直接电相连)并形成锁相。两个QCL可分别泵浦,从而调控不同线偏振态的分量。两天线阵列垂直出射激光,由于 $\pi/2$ 的相差,当幅值相同时可形成圆偏振光。实验中成功观察到随着泵浦电流差逐渐减小,出射光由线偏振光过渡到圆偏振光,并达到了99%的圆偏振度,充分说明了该器件的偏振电调控能力。

2020年,朱海卿等人将这种“鱼骨型”阵列应用到了先前的MOPA器件上^[54]。通过将原本MOPA器件的PA部分的GC光栅结构改为了“鱼骨型”光栅,实现了对出射光的偏振调制。先引入单向光栅阵列后,成功实现了线偏振度97.5%的偏振光出射,并保留了MOPA器件的优异性,即良好的单模工作和出射功率。随后将正交光栅阵列引入PA部分,优化后实现了圆偏振度99.3%的偏振光出射,同时峰值出射功率达到了8.3 mW,较小的单瓣远场分布,圆偏振度较为均匀,达成了工作频率和偏振态可设计、高光束质量的单片太赫兹偏振QCL设计目标。

4 频率调谐

由于传感以及光谱学应用的需求,缺少大范围调谐的激光器也成为了限制太赫兹QCL应用的一个重要因素。传统激光器的调谐方法有些类似于调整弦乐的音高,可通过调整弦的长度和张力改变音高,对应于改变激光模式的 k_z 和折射率 n 。通常对折射率的连续变化很难超过1%,因此,主要的调谐方式是改变 k_z ,一般是通过可变的外腔结构提供可调谐的频率反馈。然而对于太赫兹激光器来说,由于双金属波导的亚波长结构,使腔内外的激光模式匹配度很低,很难将外腔的模式反射回增益介质内。为了克服这个困难,需要一些新的调谐方法以应用到太赫兹激光器上。

2010年, Lukas Mahler 等人的工作就展示了一种通过二阶DFB激光器和可动金属放射镜构成外腔结构的调谐方法^[55]。经过他们的模型计算发现,当外腔模式本征频率与DFB的下带边模式相同时,由于其模式对称性允许垂直出射,二者会产生强烈的耦合,激光模式由单纯的DFB模式变为外腔模式

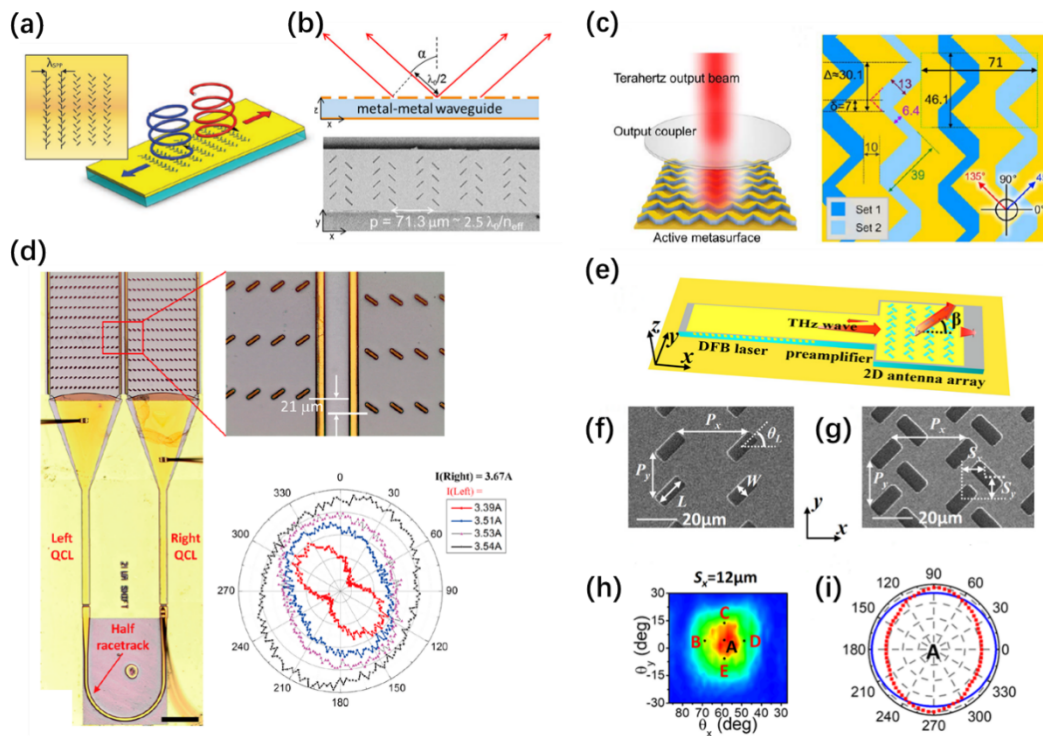


图6 (a)“鱼骨型”耦合光栅的示意图,图片引用自文献[50],(b)中上图为描述利用“鱼骨型”光栅阵列实现激光偏振输出的截面图,下图为制造器件的SEM照片,图片引用自文献[51],(c)量子级联垂直外腔面发射激光器设计原理图和有源区超表面结构示意图,图片引用自文献[52],(d)单片动态可调偏振态半导体激光器的结构示意图,和不同泵浦条件下出射光的偏振态,图片引用自文献[53],(e)引入“鱼骨型”光栅的MOPA结构示意图,(f)和(g)单向和正交光栅器件的光栅部分SEM照片,(h)正交光栅器件的远场分布,(i)(h)中A点处即远场中心处的理论(蓝色)和实际测量(红色)功率与偏振片角度关系,图片引用自文献[54]

Fig. 6 (a) The schematic diagram of the "fishbone" grating. The picture is quoted from Ref. [50], (b) The upper describes the cross section of laser polarization output using a "fishbone" grating array, and the lower is the SEM photo of the manufactured device. The picture is quoted from Ref. [51], (c) the schematic diagram and active region supersurface structure diagram for quantum cascade vertical external-cavity surface-emitting laser. The picture is quoted from Ref. [52], (d) the schematic diagram of the monolithic dynamic tunable polarization semiconductor laser and the polarization state of the emitted light under different pumping conditions. The picture is quoted from Ref. [53], (e) the "fishbone" grating MOPA structure diagram, (f) and (g) one-way and orthogonal grating device SEM photos respectively, (h) the far-field distribution of orthogonal grating device, (i) the far field distribution at A point in (h) in the center (in blue) and the theory of actual measurement (red) power relationship with polaroid Angle. The picture is quoted from Ref. [54]

和DFB模式的混合,能级发生劈裂,在交点两侧分别发生红移和蓝移。通过电驱动装置移动金属反射镜,改变外腔本征频率,使器件工作频率扫过强耦合区,实现连续调谐。模拟中能实现120 GHz的连续调谐,但由于耦合模式的高损耗,模式阈值过高,且被非辐射模式占用了增益,导致在调谐幅度较大的部分无法激射,限制了该方案的调谐范围,最终只实现了20 GHz的连续调谐。

2009年,Qin Qi等人灵活地运用了双金属波导的亚波长特性,通过横向的耦合实现了连续调谐^[56]。对于色散关系 $k_x^2 + k_z^2 = \omega^2 \mu \epsilon$,通过横向模式

影响 k_z ,从而改变模式频率。他们制造了一个一侧为正弦波形状的双金属波导,形成一阶DFB单模激光器,然后在另一侧的直条边放置了一个平行的活塞结构。不同材料的活塞对频率的影响不同,硅活塞可以将腔内的场耦合到外部,产生红移;金属活塞可以增强腔的限制因子,产生蓝移。通过调整活塞和腔的距离,可以控制频移的幅度,最后实现了137 GHz的连续调谐范围。

之后几年,连续调谐的工作都没有很大进展,直到近几年才开始有突破。2019年,Christopher A. Curwen等人研发的基于量子级联垂直外腔表面发

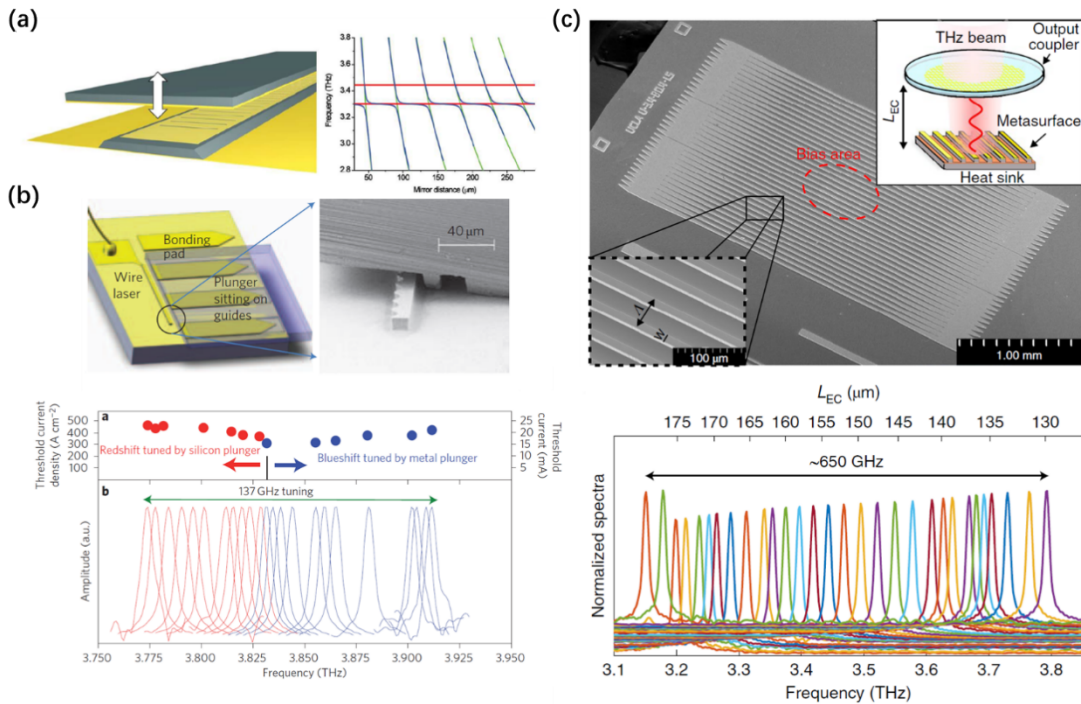


图7 (a)左图为二阶DFB激光器和金属反射镜构成的外腔结构图,右图为DFB腔内模式(红色)、外腔模式(绿色)和复合系统(蓝色)的本征频率随反射镜距离变化的函数图像,图片引用自文献[55],(b)正弦反馈光栅激光器和活塞结构的示意图,活塞放置在波导平直侧。下图为通过两种活塞调整距离实现的激光频率调谐范围,图片引用自文献[56],(c)为可频率调谐的量子级联垂直外腔表面发射激光器结构示意图及其超表面结构SEM照片;下图为不同外腔长度 L_{EC} 下器件的输出频率,展示了整个器件的调谐范围,图片引用自文献[57]

Fig. 7 (a) The external cavity structure of the second-order DFB laser and the metal mirror is shown on the left, and the intrinsic frequencies of the DFB in-cavity mode (red), the outer cavity mode (green) and the composite system (blue) vary as a function of the distance between the mirror and the cavity. The picture is quoted from Ref. [55], (b) the schematic diagram of the sinusoidal feedback grating laser and the plunger structure, which is placed on the straight side of the waveguide. The following figure shows the laser frequency tuning range achieved by adjusting the distance between the cavity and plunger. The picture is quoted from Ref. [56], (c) the schematic diagram of the structure and SEM photo of the metasurface structure of a frequency-tunable quantum cascade vertical external-cavity surface-emitting laser; the following figure shows the output frequencies of devices with different external cavity lengths L_{EC} , showing the tuning range of the entire device. The picture is quoted from Ref. [57]

射激光器(QC-VECSEL)结构,实现了大范围的连续调谐^[57]。作为外腔激光器的增益来源,超表面结构由一组周期性排列的量子级联脊激光器构成,面积达到 $1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$ 。平行于超表面上方 L_{EC} 处放置一个外耦合器形成外腔激光器。在增益范围内,通过调整 L_{EC} ,对于2阶模理论上可以实现880 GHz的连续调谐。最终,器件在保持单模工作的情况下对于4阶模实现了~650 GHz的连续调谐,并具有一致的、较小的($\sim 15^\circ$)圆形远场光斑。当 L_{EC} 缩小到工作在二阶模范围时,虽然达到了~880 GHz的连续调谐,但是产生了高阶光束,特别是在 L_{EC} 较小时出现了多模情况,严重影响了光束质量,限制了该方案调谐范围的进一步提升。

5 总结与展望

在太赫兹QCL诞生的20年后,在多个性能表现上已经实现了技术突破:1. 通过优化有源区设计,实现了250 K的最高工作温度,进入了热电制冷的工作范围,实现了小型化和便携化;2. 瓦量级(2.03 W)的峰值输出,高达1.57 W/A的斜率效率和2.3%的WPE,验证了双金属波导在输出效率上的优化可能性,以及太赫兹QCL有足够的功率满足各类场景应用;3. 可控的偏振态,实现了定向的线偏振、不同角度线偏振之间动态切换、线偏振与圆偏振连续切换,并成功引入到了现有的谐振腔结构中,在不损失性能的同时实现了偏振出射;4. 通过超表面和外腔激光器实现了~650 GHz的连续调谐,有助于太赫

兹 QCL 在光谱学等方面的应用。未来,对于有源区结构的进一步优化以及材料生长技术的进步,或许能够实现太赫兹 QCL 的室温下工作。近年来,许多新颖的概念也逐渐被引入到太赫兹 QCL 中,如拓扑光子学^[58-59]、PT 对称性^[60]、光频梳^[61-65]等,进一步拓展了太赫兹 QCL 的应用前景。相信随着新技术的不断延伸,最终能够实现太赫兹 QCL 在社会各个领域的广泛应用。

References

- [1] Köhler R, Tredicucci A, Beltram F, et al, Terahertz semiconductor-heterostructure laser [J], *Nature*, 2002, **417**: 156 - 159.
- [2] Chan W L, Deibel J, Mittleman D M, et al, Imaging with terahertz radiation [J], *Rep. Progr. Phys*, 2007, **70**: 1325 - 1379.
- [3] Kim S M, Hatami F, Harris, J S, et al, Biomedical terahertz imaging with a quantum cascade laser [J], *Appl. Phys. Lett*, 2006, **88**: 81 - 83.
- [4] Nguyen K L, Johns M L, Gladden L F, et al, Three-dimensional imaging with a terahertz quantum cascade laser [J], *Opt. Express*, 2006, **14**: 2123 - 2129.
- [5] Lee Alan W M, Qin Q, Kumar S, et al, Real-time terahertz imaging over a standoff distance (>25 meters) [J], *Appl. Phys. Lett*, 2006, **89**: 4 - 7.
- [6] Hu Q, Terahertz quantum cascade lasers and video-rate THz imaging [J], *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol*, 2009, **2**: 120 - 130.
- [7] Mittleman D M, Jacobsen R H, Neelamani R, et al, Gas sensing using terahertz time-domain spectroscopy [J], *Appl. Phys. B Lasers Opt*, 1998, **67**: 379 - 390.
- [8] Federici J F, Schulkin B, Huang F, et al, THz imaging and sensing for security applications—Explosives, weapons and drugs. Semicond [J], *Sci. Technol*, 2005, **20**: S266 - S280.
- [9] Ren Y, Hovenier J N, Higgins R, et al, High-resolution heterodyne spectroscopy using a tunable quantum cascade laser around 3.5 THz [J], *Appl. Phys. Lett*, 2011, **98**: 231109.
- [10] Koenig S, Lopez-Diaz D, Antes J, et al, Wireless sub-THz communication system with high data rate [J], *Nature Photon*, 2013, **7**: 977 - 981.
- [11] Kleine-Ostmann T, Nagatsuma T, A review on terahertz communications research [J], *Infrared. Millim. THz Waves*, 2011, **32**: 143 - 171.
- [12] Chen Z, Tan Z Y, Ha Y J, et al, Wireless communication demonstration at 4.1 THz using quantum cascade laser and quantum well photodetector [J], *Electron. Lett*, 2011, **47**: 1002 - 1004.
- [13] Ren Y, Hovenier J N, Higgins R, et al, Terahertz heterodyne spectrometer using a quantum cascade laser [J], *Appl. Phys. Lett*, 2010, **97**: 10 - 13.
- [14] Kloosterman J L, Hayton D J, Ren Y, et al, Hot electron bolometer heterodyne receiver with a 4.7-THz quantum cascade laser as a local oscillator [J], *Appl. Phys. Lett*, 2013, **102**: 011123.
- [15] Hayton D J, Kloosterman J L, Ren Y, et al, A 4.7 THz heterodyne receiver for a balloon borne telescope [C], *Proc. SPIE*, 2014, **9153**: 91531R.
- [16] Nguyen DT, Simoens F, Ouvrier-Bufferet J L, et al, Broadband THz Uncooled Antenna-Coupled Microbolometer Array—Electromagnetic Design, Simulations and Measurements [J], *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol*, 2012, **2**: 299-305.
- [17] Richter H, Wienold M, Schrottke L, et al, 4.7-THz Local Oscillator for the GREAT Heterodyne Spectrometer on SOFIA [J], *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol*, 2015, **5**: 539-545.
- [18] Williams B S, Terahertz quantum-cascade lasers [J], *Nature Photon*, 2007, **1**: 517-525.
- [19] Faist J, Beck M, Aellen T, et al, Quantum-cascade lasers based on a bound-to-continuum transition [J], *Appl. Phys. Lett*, 2001, **78**: 147 - 149.
- [20] Scalari G, Ajili L, Faist J, et al, Far-infrared ($\lambda 87 \mu\text{m}$) bound-to-continuum quantum-cascade lasers operating up to 90 K [J], *Appl. Phys. Lett*, 2003, **82**: 3165 - 3167.
- [21] Xu B, Hu Q, Melloch M R, Electrically pumped tunable terahertz emitter based on intersubband transition [J], *Appl. Phys. Lett*, 1997, **71**: 440 - 442.
- [22] Williams B S, Xu B, Hu Q, et al, Narrow-linewidth terahertz intersubband emission from three-level systems [J], *Appl. Phys. Lett*, 1999, **75**: 2927 - 2929.
- [23] Fatholouloumi S, Dupont E, Chan C W I, et al, Terahertz quantum cascade lasers operating up to similar to 200 K with optimized oscillator strength and improved injection tunneling [J], *Opt. Express*, 2012, **20**: 3866-3876.
- [24] Khalatpour Ali, Paulsen A K, Deimert C, et al, High-power portable terahertz laser systems [J], *Nature Photon*, 2020, **15**: 16.
- [25] Williams B S, Kumar S, Hu Q, et al, Operation of terahertz quantum-cascade lasers at 164 K in pulsed mode and at 117 K in continuous-wave mode [J], *Opt. Express*, 2005, **13**: 3331 - 3339.
- [26] Williams B S, Kumar S, Hu Q, et al, High-power terahertz quantum cascade lasers [J], *Electron. Lett*, 2006, **42**: 89 - 91.
- [27] Scalari G, Hoyler N, Giovannini M, et al, Terahertz bound-to-continuum quantum cascade lasers based on optical-phonon scattering extraction [J], *Appl. Phys. Lett*, 2005, **86**: 181101.
- [28] Kohen S, Williams B S, Hu Q, Electromagnetic modeling of terahertz quantum cascade laser waveguides and resonators [J], *Appl. Phys*, 2005, **97**: 053106.
- [29] Amanti M I, Fischer M, Scalari G, et al, Low-divergence single-mode terahertz quantum cascade laser [J], *Nature Photon*, 2009, **3**: 586-590.
- [30] Khalatpour Ali, Reno J L, Kherani N P, et al, Unidirectional photonic wire laser [J], *Nature Photon*, 2017, **11**: 555.
- [31] Khalatpour Ali, Reno J L, Hu Q, et al, Phase-locked photonic wire lasers by π coupling [J], *Nature Photon*, 2019, **13**: 47.
- [32] Biasco S, Garrasi K, Castellano F, et al, Continuous-wave highly-efficient low-divergence terahertz wire lasers [J], *Nat. Commun*, 2018, **9**: 1122.

- [33] Xu G Y, Colombelli R, Khanna S, et al, Efficient power extraction in surface-emitting semiconductor lasers using graded photonic heterostructures [J], *Nat. Commun.*, 2012, **3**: 952.
- [34] Xu G Y, Li L H, Isaac N, et al, Surface-emitting terahertz quantum cascade lasers with continuous-wave power in the tens of milliwatt range [J], *Appl. Phys. Lett.*, 2014, **104**: 091112.
- [35] Wenzel H, Schwertfeger S, Klehr A, et al, High peak power optical pulses generated with a monolithic master-oscillator power amplifier [J], *Opt. Lett.*, 2012, **37**: 1826.
- [36] O'Brien, Welch D F, Parke R, et al, Operating characteristics of a high-power monolithically integrated flared amplifier master oscillator power amplifier [J], *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**: 2052.
- [37] Troccoli M, Gmachl C, Capasso F, et al, Mid-infrared ($\lambda \approx 7.4 \mu\text{m}$) quantum cascade laser amplifier for high power single-mode emission and improved beam quality [J], *Appl. Phys. Lett.*, **2002**, **80**: 4103.
- [38] Rauter P, Menzel S, Goyal A K, et al, Master-oscillator power-amplifier quantum cascade laser array [J], *Appl. Phys. Lett.*, 2012, **101**: 261117.
- [39] Hinkov B, Beck M, Gini E, et al, Quantum cascade laser in a master oscillator power amplifier configuration with Watt-level optical output power [J], *Opt. Express*, 2013, **21**: 19180.
- [40] Zhu H, Wang F F, Yan Q, et al, Terahertz master-oscillator power-amplifier quantum cascade lasers [J], *Appl. Phys. Lett.*, 2016, **109**: 231105.
- [41] Yu C R, Zhu H, Wang F F, et al, Highly efficient power extraction in terahertz quantum cascade laser via a grating coupler [J], *Appl. Phys. Lett.*, 2018, **113**: 121114.
- [42] Zhu H, Zhu H Q, Wang F F, et al, Terahertz master-oscillator power-amplifier quantum cascade laser with a grating coupler of extremely low reflectivity [J], *Opt. Express*, 2018, **26**: 1942–1953.
- [43] Zhu H Q, Zhu H, Yu C R, et al, Modeling and improving the output power of terahertz master-oscillator power-amplifier quantum cascade lasers [J], *Opt. Express*, 2020, **28**: 23239–23250.
- [44] Jin Y, Gao L, Chen J, et al, High power surface emitting terahertz laser with hybrid second- and fourth-order Bragg gratings [J], *Nat. Commun.*, 2018, **9**: 1407.
- [45] Jin Y, Reno J L, Kumar S, et al, Phase-locked terahertz plasmonic laser array with 2W output power in a single spectral mode [J], *Optica*, **2020**, **7**: 708–715.
- [46] Zhou R J, Ibarra-Escamilla B, Haus J W, et al, Fiber laser generating switchable radially and azimuthally polarized beams with 140mW output power at 1.6 μm wavelength [J], *Appl. Phys. Lett.*, **2009**, **95**: 191111.
- [47] Grady N K, Heyes J E, Chowdhury D R, et al, Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction [J], *Science*, 2013, **340**: 1304 – 1307.
- [48] Cheng Y Z, Withayachumnankul W, Upadhyay A, et al, Ultrabroadband reflective polarization convertor for terahertz waves [J], *Appl. Phys. Lett.*, 2014, **105**: 181111.
- [49] Fan R H, Zhou Y, Ren X P, et al, Freely tunable broadband polarization rotator for terahertz waves [J], *Adv. Mater.*, 2015, **27**: 1201 – 1206.
- [50] Lin J, Mueller J P B, Wang Q, et al, Polarization-controlled tunable directional coupling of surface plasmon polaritons [J], *Science*, 2013, **340**: 331 – 334.
- [51] Rauter P, Lin J, Genevet P, et al, Electrically pumped semiconductor laser with monolithic control of circular polarization [J], *PNAS*, 2014, **111**: E5623–E5632.
- [52] Xu L Y, Chen D G, Curwen C A, et al, Metasurface quantum-cascade laser with electrically switchable polarization [J], *Optica*, 2017, **4**: 468–475.
- [53] Liang G Z, Zeng Y Q, Hu X N, et al, Monolithic Semiconductor Lasers with Dynamically Tunable Linear-to-Circular Polarization [J], *ACS Photonics*, 2017, **4**: 517–524.
- [54] Zhu H Q, Zhu H, Wang K, et al, Terahertz master-oscillator power-amplifier quantum Cascade laser with controllable polarization [J], *Appl. Phys. Lett.*, 2020, **117**: 021103.
- [55] Mahler L, Tredicucci A, Beltram F, et al, Tuning a distributed feedback laser with a coupled microcavity [J], *Opt. Express*, 2010, **18**: 19185–19191.
- [56] Qin Q, Williams B S, Kumar S, et al, Tuning a terahertz wire laser [J], *Nature Photon.*, 2009, **3**: 732–737.
- [57] Curwen C A, Reno J L, Williams B S, et al, Broadband continuous single-mode tuning of a short-cavity quantum-cascade VECSEL [J], *Nature Photon.*, 2019, **13**: 855.
- [58] Mittal S, Waks E, Quantum cascade laser lives on the edge [J], *Nature*, 2020, **578**: 219–220.
- [59] Yang Y H, Yamagami Y, Yu X B, et al, Terahertz topological photonics for on-chip communication [J], *Nature Photon.*, 2020, **14**: 446.
- [60] Brandstetter M, Lierz M, Deutsch C, et al, Reversing the pump dependence of a laser at an exceptional point [J], *Nat. Commun.*, 2014, **5**: 4034.
- [61] Yang Y, Burghoff D, Hayton D J, et al, Terahertz multi-heterodyne spectroscopy using laser frequency combs [J], *Optica*, 2016, **3**: 499–502.
- [62] Rosch M, Scalari G, Villares G, et al, On-chip, self-detected terahertz dual-comb source [J], *Appl. Phys. Lett.*, 2016, **108**: 171104.
- [63] Zhao Y R, Li Z P, Zhou K, et al, Active Stabilization of Terahertz Semiconductor Dual-Comb Laser Sources Employing a Phase Locking Technique [J], *Laser Photonics Rev.*, 2021, **15**: 2000498.
- [64] Li H, Yan M, Wan W J, et al, Graphene-Coupled Terahertz Semiconductor Lasers for Enhanced Passive Frequency Comb Operation [J], *Adv. Sci.*, 2019, **6**: 1900460.
- [65] Li H, Li Z P, Wan W J, et al, Toward Compact and Real-Time Terahertz Dual-Comb Spectroscopy Employing a Self-Detection Scheme [J], *ACS Photonics*, 2020, **7**: 49–56.