

中远红外量子级联激光器研究进展(特邀)

赵 越^{1,2}, 张锦川¹, 刘传威^{1,2}, 王利军^{1,2}, 刘俊岐^{1,2}, 刘峰奇^{1,2}

(1. 中国科学院半导体材料科学重点实验室, 北京 100083;
2. 中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 101408)

摘要: 量子级联激光器具有效率高、体积小、功耗低、波长可大范围选取的特点, 已经被广泛应用于定向红外对抗系统、自由空间光通信和痕量气体传感等领域。回顾了量子级联激光器近 20 年的进展。首先总结了量子级联激光器的总体发展历程和发光原理; 接着介绍了主要用于定向红外对抗的大功率量子级联激光器的几种典型有源区结构设计, 然后讨论了气体传感用的单模分布反馈量子级联激光器; 接着又论述了单片集成高亮度量子级联激光器相干阵列的研究情况; 此外, 还介绍了自由空间通信用的量子级联激光器的发展情况; 最后, 描述了近些年才出现中远红外量子级联激光器光频梳的研究进展。

关键词: 量子级联激光器; 定向红外对抗; 自由空间通信; 相位锁定阵列; 光频梳
中图分类号: TN212 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1003001

Progress in mid-and far-infrared quantum cascade laser(*invited*)

Zhao Yue^{1,2}, Zhang Jinchuan¹, Liu Chuanwei^{1,2}, Wang Lijun^{1,2}, Liu Junqi^{1,2}, Liu Fengqi^{1,2}

(1. Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

2. College of Materials Science and Opto-electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

Abstract: Quantum cascade laser (QCL) has been widely applied in directed infrared countermeasures (DIRCM) system, free space optical communication (FSOC) and gas sensing since it has advantages of high efficiency, compact volume, low electrical consumption and wide wavelength tunability. In this paper, the progress in QCLs made over the last 20 years was reviewed. The principle of emission and overview of QCL was demonstrated in the introduction. The design of active region for high output power QCL aiming at DIRCM was described in the first part. In the second part, the progress in distributed-feedback QCLs for gas sensing was introduced. In the third part, the research of high brightness QCL phase locked arrays was demonstrated. In the fourth part, the high speed QCL for FSOC was discussed. Finally, a new device, QCL frequency comb was introduced for its crucial influence on mid-infrared frequency comb.

Key words: quantum cascade laser; directed infrared countermeasure;
free space optical communication; phase locked arrays; frequency comb

收稿日期: 2018-08-05; 修订日期: 2018-09-03

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405303, 2016YFB0402303); 国家自然科学基金(61790583, 61435014, 61574136, 61627822, 61774146)

作者简介: 赵越(1993-), 男, 博士生, 主要从事高性能量子级联激光器及应用方面的研究。Email: zhaoyue@semi.ac.cn

导师简介: 张锦川(1982-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事高性能量子级联激光器器件及系统方面的研究。

Email: zhangjinchuan@semi.ac.cn

0 引言

中远红外波段(3~30 μm)包括两个低吸收的大气窗口(3~5 μm 和 8~14 μm),这一波长范围的米氏散射效应相对较弱,光在这一波段的单次无中继传输距离可以超过 10km^[1]。此外,大量分子的基频振动和振-转动能量对应于中远红外波段的光子能量,大部分物质在中远红外波段均有“指纹”吸收峰。因此,中远红外激光光源在直接红外对抗、痕量气体检测、自由空间通信等方面都具有重要的应用需求。

中远红外波段激光的光子能量约为0.04~0.4 eV,远小于依靠导带电子和价带空穴通过带间跃迁复合发光常规半导体激光器的带隙,因此常规半导体激光器(导带到价带的光跃迁)很难实现中远红外波段的激光输出。基于中红外非线性晶体的光参量振荡激光器(OPO)具有体积大、电光转化效率低的特点,因此其应用也受到很大限制。1994年,中红外量子级联激光器的发明为中远红外波段激光光源稀缺问题的解决提供一种新的有效途径^[2]。

二十多年来,量子级联激光器的性能已经发生了翻天覆地的变化。1994年,第一支量子级联激光器诞生于美国 Bell 实验室,其激射波长为 4.2 μm ,仅能脉冲工作在液氮温度^[2]。1996年,量子级联激光器第一次实现了室温脉冲工作^[3],2002年,第一次实现室温连续工作^[4]。1997年,诞生了第一支分布反馈量子级联激光器^[5],并在 2004年实现室温连续工作^[6]。2000年首次采用应变补偿技术制备出 4 μm 以下室温工作的量子级联激光器^[7]。2011年,实现迄今为止的最高室温连续功率 5.1 W^[8]。2012年,首次使用量子级联激光器产生了光学频率梳^[9]。2013年,脊型面发射量子级联激光器首次实现室温连续工作^[10]。

基于中红外波段高穿透性和各种分子的指纹吸收特性,量子级联激光器已经被广泛地应用在定向红外对抗系统、自由空间光通信和痕量气体传感等领域。用于定向红外对抗的量子级联激光器通常需要较大的输出功率和较小的发散角以便长距离传输后致眩、致盲导弹导引头。而痕量气体传感通常需要量子级联激光器具有窄线宽和宽带可调谐的特点。为了实现高的数据传输速率,自由空间通信用量子级联激光器通常需要可以被高速调制。文中主要综述近些年来量子级联激光器的重要研究进展。

1 量子级联激光器的原理

量子级联激光器是一种基于半导体耦合量子阱子带间电子跃迁辐射发光的单极型光源^[11]。导带内量子阱的限制作用会在阱之间形成一系列分立的子带能级,包括发射激光的上下能级和电子注入的抽取能级。导带内的量子阱一般由两种不同带隙的半导体材料交替外延生长构成,如图 1 所示。图 1(a)是

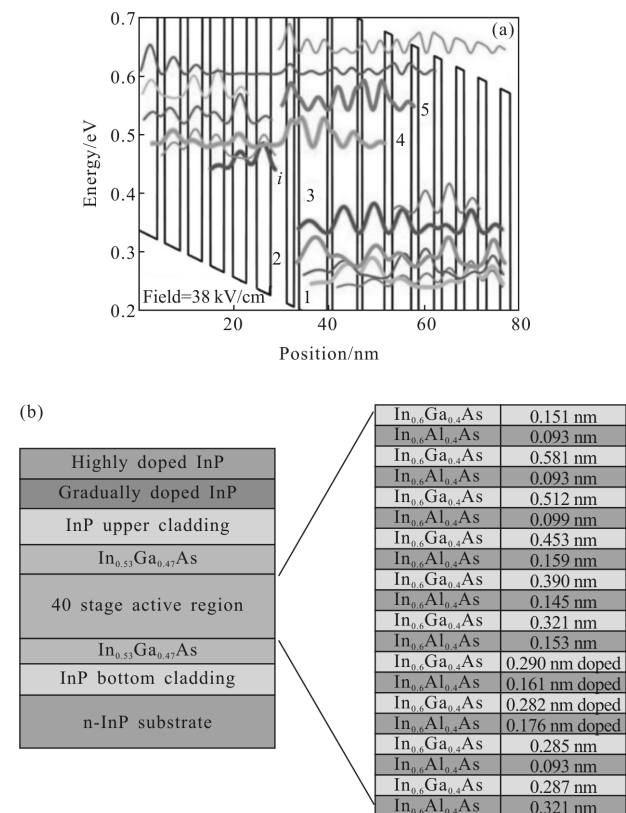


图 1 (a) 量子级联激光器的能带结构,其中 4 为上能级,3 为下能级,1、2、*i* 和一系列微带是抽取和注入能级,5 是寄生能级;(b) 左侧为量子级联激光器结构示意图,右侧为有源区一个周期的结构,一般由不同带隙的 InGaAs 和 InAlAs 构成

Fig.1 (a) Band structures of QCLs, 4 is the upper level, 3 is lower level, 1, 2, *i* are the extraction and injection levels, 5 is parasite level; (b) the left is the entire structure of QCLs, the right is one stage of active region of QCL, consisting of InGaAs and InAlAs with different band gap

一个量子级联激光器的能带结构其中 4 为上能级,3 为下能级,电子从 4~3 的跃迁产生激光,1、2、*i* 和一系列微带是抽取和注入能级,5 是寄生能级;图 1 (b)

左图为量子级联激光器器件自上而下的全结构,右图为有源区一个周期的构成,InGaAs 为阱,InAlAs 为垒,交替构成多量子阱结构。这种结构的激光器优势在于激光波长不受材料自身带隙宽度的约束,可以通过调整有源区 InGaAs/InAlAs 阱垒厚度和组份对激光波长进行控制,实现自由设计剪裁,其激光波长可覆盖从中远红外到太赫兹波段(2.65~300 μm)。

2 大功率量子级联激光器

大功率量子级联激光器在红外对抗和遥感领域有着重要的应用需求,装备有红外对抗系统的飞机能对来犯的红外制导弹进行有效干扰。据美国媒体报道,Northrop Grumman 与 Daylight 合作开发的基于量子级联激光器的直接红外对抗系统已经完成了测试,美国军方已经签订采购合同。目前,能够实现瓦级输出功率的量子级联激光器典型有源区结构主要有双声子共振、浅阱高垒结构和非共振抽取结构,最近,一种低级数有源区的结构也实现瓦级高功率输出。目前国际上报道的各个波长的高功率量子级联激光器的室温连续输出功率如图 2 所示^[12]。

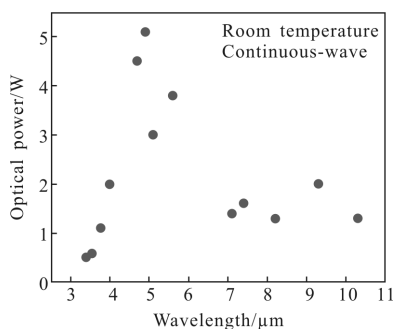


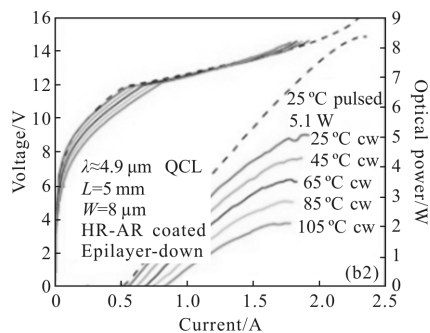
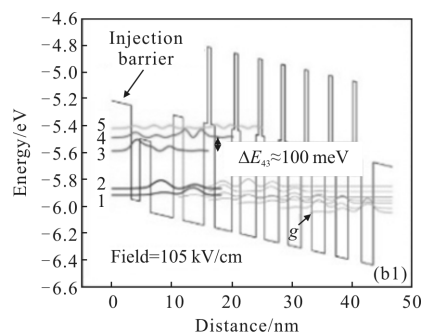
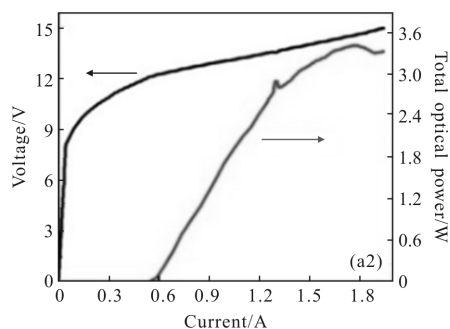
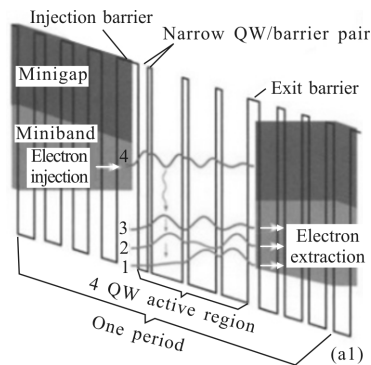
图 2 目前世界上各波长量子级联激光器室温连续工作输出的最高功率

Fig.2 Record output power of single QCL at room temperature continuous wave operation changes as a function of wavelength

2.1 双声子共振设计

双声子共振是量子级联激光器有源区设计最经典的方法之一。双声子共振有源区的典型能带结构如图 3(a)所示^[4],所谓双声子共振,是指电子从下能级抽取的过程,是通过释放出两个纵光学声子的能量,图 3(a)中 E_{32} 和 E_{21} 之间为两个声子能量, E_{43} 为辐射跃迁。双声子共振结构设计是首先突破瓦级输出功

率的量子级联激光器有源区结构^[13],其激光波长为 4.6 μm ,室温连续波输出功率为 1.3 W,另外首次实现了室温连续工作模式下超过 10%的转化效率^[14],已经报道过的最高输出功率高达 3.5 W^[15]。脉冲工作模式下,宽脊器件有着高达 120 W 的输出功率^[16]。



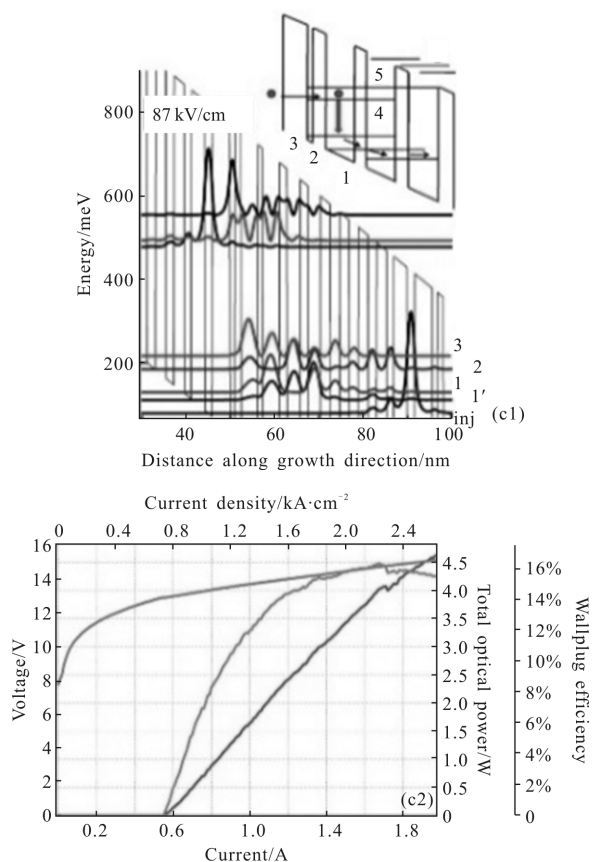


图 3 (a) 双声子共振有源区设计^[4,15]、(b) 浅阱设计^[8,17]和 (c) 非共振抽取设计^[18,20]的能带图和最高功率室温连续工作的功率-电流-电压关系

Fig.3 Band diagram and $P-I-V$ curves with highest power and working at room temperature of (a) double-phonon resonance active area design^[4,15]; (b) shallow-well design^[8,17] and (c) nonresonance-extraction design^[18,20]

2.2 浅阱有源区设计

为了提高量子级联激光器的特征温度，西北大学的量子器件中心研究小组设计出一种使用多种组份的浅阱高垒有源区结构，如图 3(b)所示^[17]。该结构通过使用五种不同组份的 InGaAs 和 InAlAs 来调节有源区结构中阱和垒的高低，这种设计能够极大地减少载流子泄漏从而提高注入效率。使用该结构制备出来的器件具有高的电流密度特征温度 T_0 和斜率效率特征温度 T_1 ，其 T_0 和 T_1 分别为 383 K 和 645 K。初步设计器件室温连续波输出功率为 3 W，激射波长约为 $5.0 \mu\text{m}$ 。优化后这种浅阱的有源区结构设计制备出了目前世界最高输出功率的单管基横模量子级联激光器^[9]，其激射波长为 $4.9 \mu\text{m}$ ，室温连续波输出功率为 5.1 W，脉冲工作模式下电光转化效率高达 27%。

2.3 非共振抽取设计

由于严格的共振条件的存在，双声子共振结构的设计灵活性相对较低。2009 年，A. Lyakh 等人提出一种非共振抽取的有源区设计方案^[18-19]，略去了双声子共振条件，增加了跃迁的能量间隔，引入了新的终态下能级，如图 3(c)所示。这种设计会极大地降低载流子热逃逸效应。室温连续波工作模式下，波长 $4.6 \mu\text{m}$ 激光器的输出功率达到 3 W，光电转化效率为 12.7%，阈值电流密度为 0.87 kA/cm^2 。通过优化波导结构，该结构制备的基横模工作器件的最大输出功率达到 4.5 W，激射波长 $4.7 \mu\text{m}$ ^[20]。在长波红外，使用非共振抽取设计制备的量子级联激光器的输出功率高达 2 W，激射波长为 $9 \mu\text{m}$ ^[21]。

2.4 其他大功率量子级联激光器有源区设计

量子级联激光器有源区设计的主要目标是增加载流子的注入效率，降低非辐射跃迁和热回填。2011 年报道了一种五阱三声子共振结构的设计方法^[22]， $7.1 \mu\text{m}$ 波长器件实现了 19% 转化效率，其室温连续波输出功率高达 1.4 W，在无冷工作模式下，输出功率达 1.2 W。最近，A. Lyakh 等人通过优化设计提出一种双阱有源区设计结构，实现了室温脉冲 28% 的高转化效率的量子级联激光器^[23]。使用这种结构制备的 15 周期有源区的器件，室温连续输出功率高达 4 W，激射波长为 $4.9 \mu\text{m}$ ^[12]。此外，美国林肯实验室的研究小组最近报道了一种 MOCVD 生长的长波量子级联激光器，波长 $9.3 \mu\text{m}$ 的器件，室温连续波输出功率达到 1.3 W。

3 分布反馈单模量子级联激光器

中远红外波段的光子能量对应大量分子的基频振动和振-转动能量，因此有大部分物质的“指纹”吸收峰，涵盖了影响生态环境和气候变化的许多有害气体和物质 (CO、CO₂、CH₄、NO、SO₂ 等) 及一些爆炸物及毒气等。在痕量气体检测方面，量子级联激光器有着传统检测方法无可比拟的优势，以量子级联激光器作为光源的气体检测装置具有探测灵敏度高、响应速度快、气体选择性灵活、排它性强的优点。量子级联激光器在气体传感、爆炸物检测领域应用通常需要高边模抑制比的单模性能和低的电功耗。分部反馈光栅被广泛地应用在单模量子级联激光器的制备中，使用一级光栅可以制备高性能边发射器件，

而采用二级光栅可以制备衬底出光的面发射器件。

自从实现室温连续激光以来,分布反馈量子级联激光器经历了飞速发展,4.7 μm 波长的器件最高输出功率已经达到 2.4 W^[24]。国际上已经报道了一系列低阈值低功耗的单模量子级联激光器,许多器件在阈值附近的功耗小于 1 W,这些器件在气体传感等领域将发挥重要的应用价值。笔者所在课题小组在低功耗单模量子级联激光器的研究领域拥有着丰硕的成果,已经制备了 4.25、4.76、4.9、5.2、7.2 μm 等多个波长的低功耗高性能器件;单模器件的室温连续最高输出功率达到了 1.2 W,器件阈值电流密度为 1.13 kA/cm²,光电转化效率达到 6%,边模抑制比高达 30 dB^[25];2012 年首次报道了波长 4.6 μm 无冷工作的分布反馈量子级联激光器,腔长 1.5 mm 的器件的有着当时国际最低的 2.3 W 阈值功耗^[26]。在 1.5 μm 通信波段,具有宽波长调谐特性的采样光栅被广泛的使用。2013 年,课题组首次将采样光栅技术应用到量子级联激光器上,制备出了波长 4.8 μm 的单管采样光栅器件,其输出功率达到 0.63 W,边模抑制比达到 25 dB^[27]。此外,西北大学的研究小组通过集成双驱采样光栅,制备出了 114 nm 的宽带可调谐单模量子级联激光器,其激光波长在 4.8 μm 附近,边模抑制比达到 24 dB^[28]。

2007 年, Lyakh 等人将出光口制作在衬底面上,采用倒焊工艺,制备了 5.1 μm 衬底出光面发射器件^[29],这种衬底出光制作方法在后来的面发射量子级联激光器器件中被广泛应用。2013 年,课题组首次报道了室温连续工作的脊型面发射量子级联激光器,器件激光波长为 4.6 μm,边模抑制近 30 dB,远场发散角为 0.17°×18.7°,阈值电流密度仅为 0.85 kA/cm²,工作温度超过 70 °C,器件结构示意图如图 4 所示^[10]。2014 年,通过在衬底上引入纳米多孔结构,制备除了发散角仅为 2.9°×0.12°的超低发散角器件,器件远场发散角和结构示意图如图 5 所示^[30]。2015 年,通过在衬底上制作表面等离子体亚波长金属光栅,笔者制备出了发散角为 0.13°×3.9°的超低发散角面发射量子级联激光器,其远场图和器件结构示意图如图 5 所示^[10]。2017 年,课题组又制备出了波长 4.97 μm 的高功率面发射量子级联激光器,其室温连续输出功率达到 248 mW,发散角为 0.14°×16°^[31]。

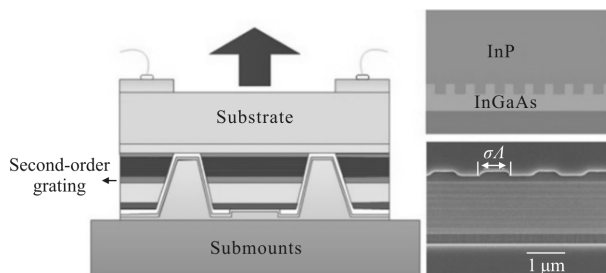


图 4 面发射量子级联激光器的结构图^[10]
Fig.4 Structure of surface emitting QCL^[10]

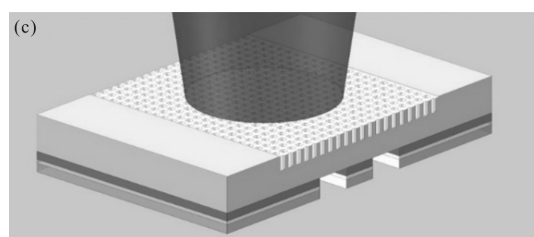
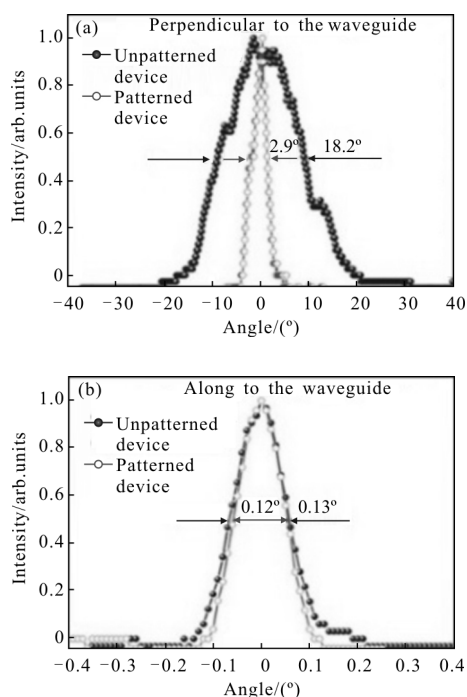


图 5 (a)和(b)纳米孔阵列面发射量子级联激光器的远场^[30];
(c)器件示意图
Fig.5 (a) and (b) the far-field patterns of the surface emitting QCL with nanopore array; (c) the sketch of the device

4 量子级联激光器单片集成相位锁定阵列

增大脊宽从而增加增益区的面积是提高量子级联激光器功率最直接的方法,但是简单地加宽脊宽会导致光束质量的恶化,产生多瓣横模激光的现

象^[16,32]。同相模式工作的相位锁定阵列(也称相干阵列)是实现单瓣远场基横模工作的最有效的手段之一。相位锁定阵列是指激光器的不同激射单元之间形成耦合,并保持一定的相位关系。从 20 世纪 80 年代开始,相位锁定阵列技术就已经被近红外半导体激光器广泛地使用^[33]。相互耦合是形成相位锁定阵列的必要条件,常见的耦合形式有:倏逝波耦合、漏模耦合、树状耦合和衍射耦合^[33]。

相位锁定阵列技术在量子级联激光器上的首次使用是以倏逝波耦合的方式出现的,遗憾的是起初并没有能实现同相模式的激射。笔者所在课题组通过耦合脊阵列的方法制备的器件是目前唯一能实现同相工作的倏逝波耦合相位锁定阵列,其远场发散角半高宽约为 5.7° ,室温脉冲输出功率高达 4 W,并且通过增加阵列单元的数量,将输出功率提高到了 40 W。威斯康辛大学麦迪逊分校的研究小组通过在阵列单元之间引入高折射率的半绝缘 InGaAs 材料,制备了漏模耦合相位锁定阵列,其激射波长为 $8.4 \mu\text{m}$,在整个电流动态范围内都能保持衍射极限发散角的单瓣远场工作^[34]。树状相位锁定阵列量子级联激光器是目前唯一报道的能实现连续波工作的器件^[35]。由于波长较短,衍射耦合相位锁定阵列在近红外波段应用时通常需要集成一个外部 Talbot 腔^[36]。由于中红外波段的波长较长,Talbot 腔的距离相应变短,课题组在量子级联激光器阵列的一端集成 Talbot 腔,通过精确控制 Talbot 腔的长度,实现了同相模式的激射^[37]。器件结构示意图和扫描电镜照片如图 6(a)~(c)所示,图 6(d)为同相模式工作的器件,其 Talbot 腔长为四分之一 Talbot 距离,器件能够实现同相模式工作;图 6(e)为二分之一 Talbot 距离的器件,表现为反相模式工作。此外,量子级联激光器阵列的在中间引入一段 Talbot 滤模器制备了一种内腔衍射耦合相位锁定阵列^[38]。器件结构示意图和扫描电镜照片如图 7 所示,7 单元和 11 单元的阵列均能实现同相模式工作。

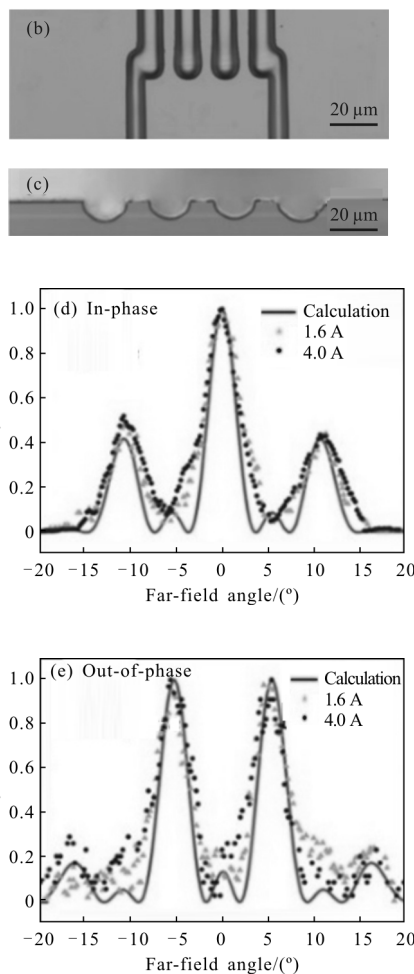
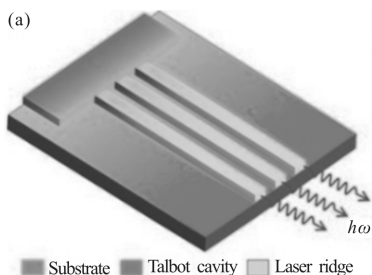
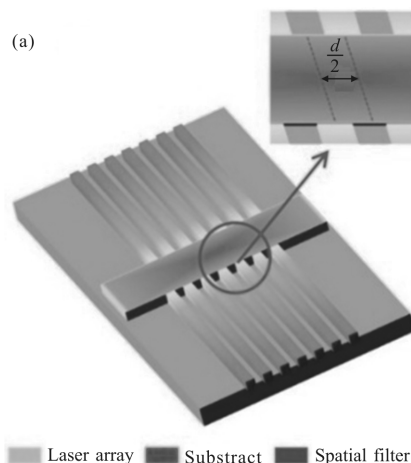


图 6 (a)集成 Talbot 腔的量子级联激光器阵列示意图;(b)和 (c)是器件正面和腔面的扫描电镜照片;(d)同相模式远场;(e)反相模式远场^[37]

Fig.6 (a) Sketch of the Talbot cavity QCL array; (b) and (c) device photograph of SEM from top and front cavity facet respectively; (d) in-phase operation far-field; (e) out-of-phase operation far-field^[37]



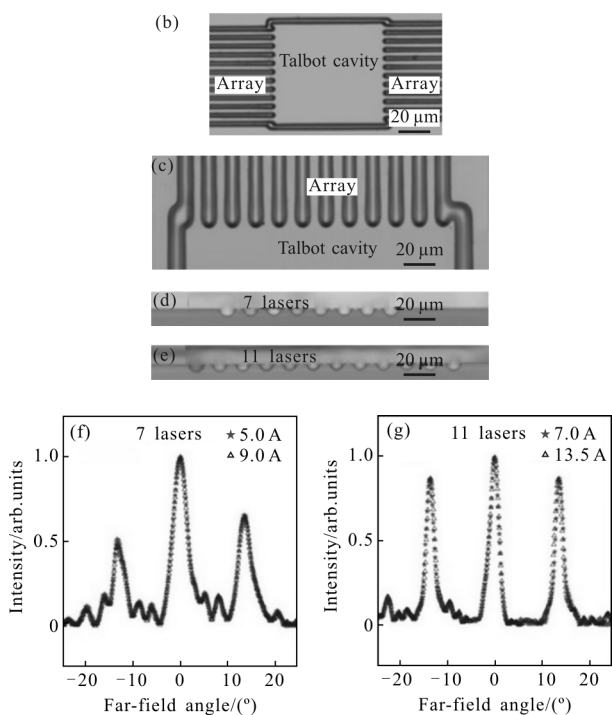


图 7 (a)集成 Talbot 内腔滤模器的量子级联激光器阵列示意图; (b)、(c)、(d)和(e)是器件正面和腔面的扫描电镜照片; (f)和(g)为 7 单元阵列和 11 单元阵列的远场,均为同相模式工作^[38]

Fig.7 (a) Sketch of QCL array integrated with an intra Talbot filter; (b), (c), (d) and (e) device front face and cavity face photograph of SEM; (f) far-field pattern of a 7 elements device; (g) far-field pattern of a 11 elements device^[38]

除了这几种常见结构基横模量子级联激光器阵列之外,光子晶体分布反馈、斜腔结构和主振荡放大量子级联激光器均实现了单瓣远场的激光,其中斜腔量子级联激光器能保证单瓣基横模工作的同时,脉冲峰值输出功率达到 203 W^[39]。Alpes 公司报道了一种通过增益引导的方法制备的宽脊器件也是实现了单瓣远场基横模工作,其脉冲输出功率达到了 23 W^[40]。

5 高速量子级联激光器与自由空间通信

量子级联激光器纵光学声子辅助散射引起的上能级电子寿命的恢复时间在皮秒量级,这使得其具有着极高的理论响应频率,可以达到 100 GHz。此外,由于该寿命远小于光子在谐振腔中的数十皮秒的往返时间,不同于传统半导体带间跃迁的高速半导体激光器,量子级联激光器不会产生粒子数反转

动力学和溅射场动力学间的共振现象,全频段内部存在弛豫共振峰^[41]。

最早进行高速量子级联激光器研究的是贝尔实验室的 Roberto Paiella 等人,2001 年,他们首次报道了响应频率达到 10 GHz 的 8 μm 量子级联激光器,器件尺寸为 1.25 mm×4.5 μm,采用 Ge₂Se₃ 作为绝缘层以减小寄生,工作温度为 20 K 和 80 K^[41]。2013 年 A.Calvar 等人对 QCL 进行了创新性的设计,采用微带线与激光波导组合的方法,发明出一种将激光器有源区嵌入微带线中的新型高速量子级联激光器,该器件脊宽为 7~8 μm,工作温度为液氮温度 77 K,激光波长为 9 μm,器件响应频率高达 15 GHz^[42]。2016 年,瑞士 J. Faist 小组对室温连续 QCL 的频率响应进行了详细测试分析,激光器器件采用半绝缘 InP 作为绝缘层,整体器件制备为共面波导结构,如图 1、图 6 所示,芯片尺寸为 3 μm×2 mm 和 4 μm×1 mm 两种,激光器激光波长 4.5 μm,最大-3 dB 带宽为 6.6 GHz,有效响应带宽 26.5 GHz^[43]。另外,该小组首次在实验上测得量子级联激光器的单边带调制效应。不仅限于中远红外量子级联激光器,THz 量子级联激光器的高速性能也进行过细致研究。

早在 2001 年,就已经有很多机构开展了利用量子级联激光器的进行自由空间通信系统的研究工作。S. Blaser 等人使用快速室温 MCT 探测器作为接收机,实现了 350 m、330 MHz 的信号传输,10 m 的传输距离的信号传输速率为 115 kbps^[44]。R. Martini 小组对中红外量子级联激光器(8.1 μm)的频率响应进行了实验分析,同时进行了数据的传输实验。实验中所采用的激光器腔长为 1.25 mm,脊宽为 4.5 μm,激光器工作在 300 mA 的直流电流下,信号产生器产生频率为 0.1~10 GHz,发射功率为 0 dBm(1 mW)的信号叠加到激光器上,信号传输 1 m 后进入探测器被探测。实验得到,激光器的频率响应在 7 GHz 附近都比较平坦,响应良好。数据传输实验中,采用 31 阶非归零(NRZ)伪随机二进制序列(PRBS)进行数字调制,数据传输速率为 2.5 Gbit/s。在对 20 K,300 mA 和 85 K,250 mA 工作的激光器进行调制后,均获得清晰的眼图,证明了数据传输的可靠性^[45]。课题组使用一个分部反馈量子级联激光器实现了 40 MHz 电视信号的传输,测试显示传输信号基本没有损失,通信系统的原理图和实际数据传输图如图 8 所示^[46]。最

近, X.Pang 等人采用信道均衡技术, 报道了室温 3 GHz 的高速量子级联激光器的自由空间通信, 测试显示具有清晰的眼图^[47]。美国国家航空航天局(NASA)对量子级联激光器自由空间通信系统 10 km 通信进行了链路评估^[40], 评估显示, 经过 10 km 链路损耗后, 系统仍然保留 3 dB 的安全余量, 十分适合恶劣环境下的自由空间通信^[48]。

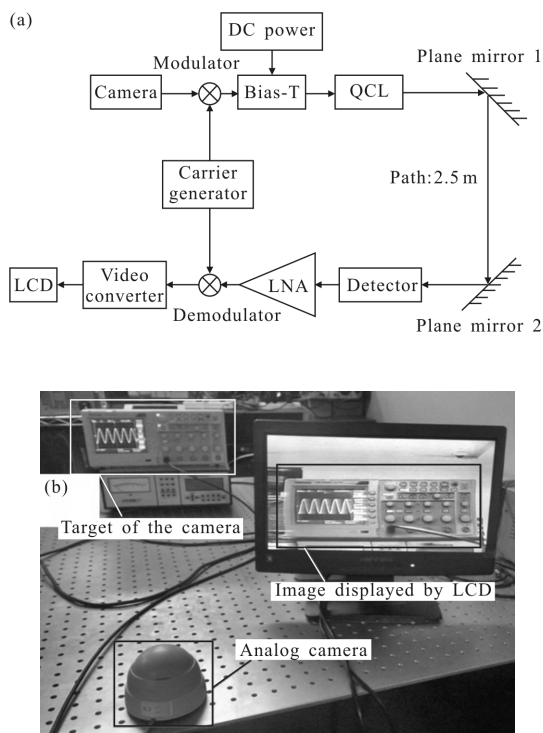


图 8 (a)量子级联激光器自由空间通信系统示意图;(b)使用量子级联激光器自由空间通信系统传输的视频信号^[46]

Fig.8 (a) Schematic of the free space optical communication with a QCL; (b) video signals transmission with QCL optical communication system^[46]

6 量子级联激光器光频梳

光频梳诞生于 2002 年, 指的是由相干光源产生的一系列间隔相等且具备确定相位关系的光谱模式, 由于其等模式间隔的结构形似梳齿, 顾名为光频梳。严格的频率间隔特性使得光频梳其成为了频域测量的“尺子”。光频梳在精确计时、光谱学以及频率合成领域将产生巨大的影响, 同时还将被广泛地应用于天文学、分子传感、测距、光学采样以及低噪声微波产生。这项具有划时代意义的发明在 2005 年被授予了诺贝尔奖。中远红外波段的光频梳技术在环

境监测如同位素检测、医疗、爆炸物监测等领域有重要的应用需求。产生中远红外光频梳的方法有: 近红外下转换法、掺铥光参量振荡光纤激光器直接产生法和高 Q 值微环集成 Si 波导法。一个共同的缺点是这些产生光频梳的方法都需要多种不同的光学元件集成。

2012 年, Faist 等人利用宽带量子级联激光器有源区自身的三阶非线性效应和四波混频技术首次实现了量子级联激光器光频梳, 图 9 显示了量子级联激光器光频梳的原理图和梳齿细节图^[9]。与其他中红外光频梳的产生方法相比, 量子级联激光器光频梳不需要使用其他外部光学元件便可产生宽带的光频梳光谱, 在便携性和实现容易度上有着极大的优势。目前国际上从事中长波红外量子级联激光器光频梳的小组有 ETHZ 的小组和美国西北大学的小组。2014 年瑞士的研究小组利用两个量子级联激光器光频梳产生的双梳光谱研究了 GaAs 标准具的宽带高精度吸收光谱^[49]。2015 年又报道了片上集成产生双光梳光谱的梳量子级联激光器光频梳, 并且实现了室温连续 1 W 的输出功率, 这为双光梳系统的实现迈出巨大的一步^[50-51]。

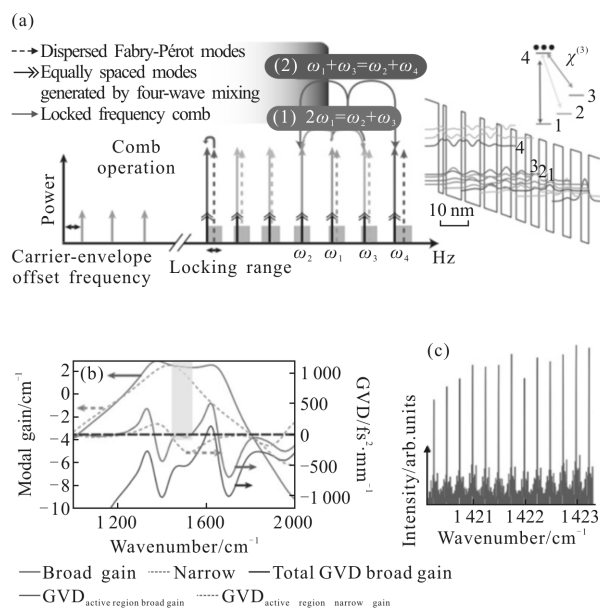


图 9 量子级联激光器光频梳^[9]

Fig.9 QCL frequency comb^[9]

7 总结与展望

由于在过去 20 多年的快速发展, 量子级联激光

器正在变成最重要的中远红外光源。量子级联激光器的优势在高功率器件、低功耗单模器件、高速可调器件以及宽带光频梳器件等领域体现的淋漓尽致。在不远的未来,量子级联激光器将在红外对抗、气体传感和自由空间通信扮演越来越重要的角色。

参考文献:

- [1] Corrigan P, Martini R, Whittaker E A, et al. Quantum cascade lasers and the Kruse model in free space optical communication[J]. *Optics Express*, 2009, 17(6): 4355-4359.
- [2] Faist J, Capasso F, Sivco D L, et al. Quantum cascade laser [J]. *Science*, 1994, 264(5158): 553-556.
- [3] Faist J, Capasso F, Sirtori C, et al. Room temperature mid-infrared quantum cascade lasers[J]. *Electronics Letters*, 1996, 32(6): 560-561.
- [4] 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.
- [5] Faist J, Gmachl C, Capasso F, et al, Distributed feedback quantum cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 1997, 70 (20): 2670-2672.
- [6] Blaser S, Yarekha D, Hvozdar L, et al. Room-temperature, continuous-wave, single-mode quantum-cascade lasers at 5: 4 m [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86: 1-3.
- [7] Liu F Q, Zhang Y Z, Zhang Q S, et al. High-performance strain-compensated InGaAs/InAlAs quantum cascade lasers[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2000, 15(12): L44.
- [8] Bai Y, Bandyopadhyay N, Tsao S, et al. Room temperature quantum cascade lasers with 27% wall plug efficiency [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(18): 181102.
- [9] Hugi A, Villares G, Blaser S, et al. Mid-infrared frequency comb based on a quantum cascade laser [J]. *Nature*, 2012, 492(7428): 229-233.
- [10] Yao D Y, Zhang J C, Liu F Q, et al. Surface emitting quantum cascade lasers operating in continuous-wave mode above 70 °C at $\lambda \approx 4.6 \mu\text{m}$ [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(4): 041121.
- [11] Faist J. Quantum Cascade Lasers [M]. Oxford: OUP Oxford, 2013.
- [12] Lyakh A, Patel C K N, Tsvd E, et al. Progress in high-power continuous-wave quantum cascade lasers [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(31): H15.
- [13] Bai Y, Darvish S, 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.
- [14] 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.
- [15] Razeghi M, Slivken S, Bai Y, et al. High power quantum cascade lasers [J]. *New Journal of Physics*, 2009, 11(12): 125017.
- [16] Bai Y, Slivken S, Darvish S R, et al. High power broad area quantum cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95 (22): 221104.
- [17] Bai Y, Bandyopadhyay N, Tsao S, et al. Highly temperature insensitive quantum cascade lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(25): 251104.
- [18] 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.
- [19] Lyakh A, Pfluügl 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.
- [20] 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.
- [21] Lyakh A, Maulini R, Tsekoun A, et al. Multiwatt long wavelength quantum cascade lasers based on high strain composition with 70% injection efficiency [J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 24272-24279.
- [22] Maulini R, Lyakh A, Tsekoun A, et al. $\lambda \sim 7.1 \mu\text{m}$ quantum cascade lasers with 19% wall-plug efficiency at room temperature[J]. *Optics Express*, 2011, 19(18): 17203-17211.
- [23] Lyakh A, Suttinger M, Go R, et al. 5.6 μm quantum cascade lasers based on a two-material active region composition with a room temperature wall-plug efficiency exceeding 28% [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(12): 121109.
- [24] Lu Q Y, Bai Y, Bandyopadhyay N, et al. 2.4 W room temperature continuous wave operation of distributed feedback quantum cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(18): 181106.
- [25] Liu Yinghui, Zhang Jinchuan, Jiang Jianmin, et al. Development of surface grating distributed feedback quantum cascade laser for high output power and low threshold

- current density [J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, 32(2): 024202.
- [26] Zhang J, Liu F, Tan S, et al. High-performance uncooled distributed-feedback quantum cascade laser without lateral regrowth[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(11): 112105.
- [27] Zhang J, Liu F, Yao D, et al. High power buried sampled grating distributed feedback quantum cascade lasers [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(15): 153101.
- [28] Slivken S, Bandyopadhyay N, Tsao S, et al. Sampled grating, distributed feedback quantum cascade lasers with broad tunability and continuous operation at room temperature[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(26): 261112.
- [29] Lyakh A, Zory P, D' Souza M, et al. Substrate-emitting, distributed feedback quantum cascade lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(18): 181116.
- [30] Zhang J C, Yao D Y, Zhuo N, et al. Directional collimation of substrate emitting quantum cascade laser by nanopores arrays [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(5): 052109.
- [31] Cheng F M, Zhang J C, Jia Z W, et al. High power substrate-emitting quantum cascade laser with a symmetric mode [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(22): 1994–1997.
- [32] Zhao Y, Yan F, Zhang J, et al. Broad area quantum cascade lasers operating in pulsed mode above 100 °C $\lambda \sim 4.7 \mu\text{m}$ [J]. *Journal of Semiconductors*, 2017, 38(7): 74–77.
- [33] Botez D, Scifres D R. Diode Laser Arrays Vol. 14 [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [34] Kirch J D, Chang C C, Boyle C, et al. 5.5 W near-diffraction-limited power from resonant leaky-wave coupled phase-locked arrays of quantum cascade lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(6): 061113.
- [35] Lyakh A, Maulini R, Tsekoun A, et al. Continuous wave operation of buried heterostructure 4.6 μm quantum cascade laser Y-junctions and tree arrays [J]. *Optics Express*, 2014, 22(1): 1203–1208.
- [36] Leger J R. Lateral mode control of an AlGaAs laser array in a Talbot cavity [J]. *Applied Physics Letters*, 1989, 55(4): 334–336.
- [37] Wang L, Zhang J, Jia Z, et al. Phase-locked array of quantum cascade lasers with an integrated Talbot cavity [J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): 30275–30281.
- [38] Jia Z, Wang L, Zhang J, et al. Phase-locked array of quantum cascade lasers with an intracavity spatial filter [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(6): 061108.
- [39] Heydari D, Bai Y, Bandyopadhyay N, et al. High brightness angled cavity quantum cascade lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(9): 941.
- [40] Sergachev I, Maulini R, Bismuto A, et al. Gain-guided broad area quantum cascade lasers emitting 23.5 W peak power at room temperature [J]. *Optics Express*, 2016, 24(17): 19063–19071.
- [41] Paiella R, Martini R, Capasso F, et al. High-frequency modulation without the relaxation oscillation resonance in quantum cascade lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 79(16): 2526–2528.
- [42] Calvar A, Amanti M, Renaudat St-Jean M, et al. High frequency modulation of mid-infrared quantum cascade lasers embedded into microstrip line [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(18): 181114.
- [43] Hinkov B, Hugi A, Beck M, et al. Rf-modulation of mid-infrared distributed feedback quantum cascade lasers [J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 3294–3312.
- [44] Blaser S, Hofstetter D, Beck M, et al. Free-space optical data link using Peltier-cooled quantum cascade laser [J]. *Electronics Letters*, 2001, 37(12): 778–780.
- [45] Martini R, Paiella R, Gmachl C, et al. High-speed digital data transmission using mid-infrared quantum cascade lasers [J]. *Electronics Letters*, 2001, 37(21): 1290–1292.
- [46] Liu C W, Zhai S Q, Zhang J C, et al. Free-space communication based on quantum cascade laser [J]. *Journal of Semiconductors*, 2015, 36(9): 094009.
- [47] Pang X, Ozolins O, Schatz R, et al. Gigabit free-space multi-level signal transmission with a mid-infrared quantum cascade laser operating at room temperature [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(18): 3646–3649.
- [48] Luzhanskiy E, Choa F S, Merritt S, et al. Low size, weight and power concept for mid-wave infrared optical communication transceivers based on Quantum Cascade Lasers.GSFC -E -DAA -TN27691 [R/OL]. [2015 -11 -20]. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20150021900>, 2015.
- [49] Villares G, Hugi A, Blaser S, et al. Dual-comb spectroscopy based on quantum-cascade-laser frequency combs [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5192.
- [50] Villares G, Wolf J, Kazakov D, et al. On-chip dual-comb based on quantum cascade laser frequency combs [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(25): 251104.
- [51] Jouy P, Wolf J M, Bidaux Y, et al. Dual comb operation of $\lambda \sim 8.2 \mu\text{m}$ quantum cascade laser frequency comb with 1 W optical power [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(14): 141102.