

# 太赫兹量子级联激光器阵列耦合的研究进展

罗佳文, 王雪敏\*, 沈昌乐, 蒋涛, 湛治强, 邹蕊娇, 彭丽萍, 黎维华, 吴卫东

中国工程物理研究院激光聚变研究中心等离子体物理重点实验室, 四川 绵阳 621999

**摘要** 太赫兹量子级联激光器 (THz QCL) 是一种紧凑、相干的固体连续辐射源, 具有重要的潜在应用价值, 是当前国际上研究的热点之一。目前, THz QCL 面临进一步提高输出功率的问题, 而阵列耦合是突破这一瓶颈的有效途径, 因此, 相关研究就显得尤为重要。概述了 THz QCL 的现有阵列耦合结构, 并总结和讨论了 THz QCL 阵列研究现状及其未来可能的发展方向。

**关键词** 激光器; 量子级联激光器; 太赫兹; 阵列; 波导

中图分类号 TN25

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.010004

## Research Progress on Array Coupling of Terahertz Quantum Cascade Lasers

Luo Jiawen, Wang Xuemin\*, Shen Changle, Jiang Tao, Zhan Zhiqiang, Zou Ruijiao, Peng Liping, Li Weihua, Wu Weidong

Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621999, China

**Abstract** Terahertz quantum cascade laser (THz QCL) is a kind of compact and coherent solid continuous wave source with important potential applications, and it is one of the international research hotspots. At present, the research on array coupling is particularly important since it is an effective solution to the problems and difficulties in further increasing output power for THz QCLs. The current structures of THz QCL array coupling are summarized and analyzed. The research status and possible future development directions of THz QCL array are summarized and discussed.

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

**OCIS codes** 140.3580; 140.3325; 140.3290

## 1 引言

频率在  $0.1 \sim 10$  THz ( $10^{12} \text{ s}^{-1}$ ) 的电磁波称为太赫兹 (THz) 波, 相应的波长范围为  $3 \text{ mm} \sim 30 \mu\text{m}^{[1-2]}$ 。太赫兹波的波长在长波段与毫米波段重合, 在短波段可达红外区, 处于宏观电子学向微观光子学过渡的频段<sup>[3]</sup>。

太赫兹科学是近年来兴起的国际前沿研究领域。太赫兹由于具有高透性、低能性及指纹谱性等性质, 在通讯、军事、反恐、医学、安检、航空航天等<sup>[4-6]</sup>领域具有无可替代的作用和地位。但目前太赫兹的研究

尚不成熟, 尤其是实现大功率输出的太赫兹源的短缺成为太赫兹科学技术发展的掣肘。作为一种新型的紧凑、相干的固体辐射源, 太赫兹量子级联激光器 (THz QCL) 急切需要大幅度提升输出功率和实现锁相耦合。因此, THz QCL 耦合的设计与优化成为提高太赫兹输出功率的重点与难点。

量子级联激光器 (QCL) 是一种基于超晶格或耦合多量子阱中电子共振隧穿和子带间跃迁的单极光源, 其辐射频率可通过能带和波函数设计进行调控, 具有响应速度快、体积小、便于集成等优点。1994 年, Bell 实验室成功研制了世界上第一台量子

收稿日期: 2018-07-06; 修回日期: 2018-08-28; 录用日期: 2018-09-14

基金项目: 国家科技部重大仪器专项 (2011YQ130018)

\* E-mail: wangxuemin75@sohu.com

级联激光器,其辐射频率为 75 THz( $4\ \mu\text{m}$ )<sup>[7]</sup>。随后,量子级联激光器发展成为中红外波段的主要半导体激光辐射源,波长覆盖范围为 3~24  $\mu\text{m}$ 。与中红外波段相比,实现波长更长的太赫兹量子级联激光辐射要困难得多,其主要原因包括:

1) 太赫兹波具有较小的光子能量(约 4~20 MeV),即意味着要在间距相当小的子带间实现占有数反转以满足激光辐射的增益要求,这将给有选择性地注入和导出电子造成很大困难。相应地,无论采取隧穿手段还是散射手段都存在一些技术上的困难。

2) 由于自由载流子吸收所造成的辐射损失正比于波长的平方,因此,必须采用波导管技术使掺杂半导体包层与输出光模式的交叠最小化,从而减少辐射损失。

由于存在上述困难,直到 2002 年,量子级联激光器技术才在太赫兹波段取得重大突破。意大利和英国科学家通过设计啁啾超晶格有源区,并采用半绝缘等离子体波导结构,制备出了第一台 THz QCL,这台激光器可在约 10 K 的温度下辐射 4.4 THz 的脉冲太赫兹波,输出功率约为 2 mW,阈值电流密度为几百  $\text{A}/\text{cm}^2$ <sup>[8]</sup>。随后,美国、英国、意大利、中国等的科研团队对 THz QCL 展开了密集研究<sup>[9-13]</sup>,内容涉及有源区的设计、波导管的构造、掺杂效应和磁场调控等环节的物理效应及精密制备技术。研究目标在于扩大太赫兹辐射的频率覆盖范围、提高激光辐射功率及效率、改善波束品质、提高运行温度和降低阈值电流等,以提高 THz QCL 的各项性能并推向实际应用。

经过 2002~2018 年十多年的发展,THz QCL 的性能指标大幅度提高:频率范围覆盖 0.68~5.2 THz(300~57  $\mu\text{m}$  波段)<sup>[14]</sup>;最低阈值电流密度为 30  $\text{mA}/\text{cm}^2$ ;连续波工作模式下的最高激射温度为 129 K<sup>[15]</sup>,最大输出功率达到 230 mW<sup>[16]</sup>;脉冲工作模式下的最高激射温度为 225 K,最大输出功率超过 1 W<sup>[17-18]</sup>。

但是在 THz QCL 实际应用中,受限于严重的大气衰减、光束合成等,急需大幅度提升 THz QCL 的输出功率。目前影响 THz QCL 功率输出的主要因素包括:器件有源区结构和外延材料质量<sup>[19-20]</sup>,以及与之密切相关的电子注入效率、光收集效率、波导损耗、镜面损耗、器件尺寸<sup>[21-23]</sup>等;电注入功率大且光电转换效率低、有源区层间声子散射导致的严重的有源区热积聚<sup>[24-26]</sup>。上述问题极大地影响着 THz QCL 输出功率的提升。从中红外量子级联激

光器的研究来看,阵列化锁相耦合是一条有效的途径。其基本原理是阵列锁相耦合有效地提高了激光器的输出功率,降低了器件热管理的要求。阵列耦合是分立条型激光器的集成,由多个在空间上紧密排列而彼此之间又相互独立的分立条型激光器集成而形成的阵列。在激励状态下,相邻条型激光器的光场相互影响,产生一定程度的耦合作用,导致每个分立器件的工作模式受到扰动,偏离原来工作模式,形成新的阵列工作模式。

因此,对于太赫兹 QCL 而言,阵列耦合是一种行之有效且能大幅度提升输出功率的办法。

## 2 太赫兹 QCL 耦合方式研究现状

### 2.1 中空波导

2008 年,Bowden 等<sup>[27]</sup>研究了内层含聚苯乙烯涂层的银导管对太赫兹的传输特性,发现其耦合效率基本在 78%~84%之间,并且在 2.2 mm 内径的波导里出现了高阶模光束。2011 年,Vitiello 等<sup>[28]</sup>使用准直透镜将频率为 3.2 THz 的波耦合至空心铝制波导中,测得其传输损耗在 2.3~2.7 dB/m 之间,耦合效率达 98%。同年,Vitiello 等<sup>[29]</sup>又将银镀在聚碳酸酯中空波导内壁,测得其对 3.2 THz 波传输的损耗最低为 2.1 dB/m,如图 1 所示。2013 年,Navarro-Cia 等<sup>[30]</sup>研究了中空波导对 0.5~5.5 THz 的传输特性,发现在 2.5~5 THz 频率范围内,中空波导的传输损耗 < 5 dB/m,1.25 m 弯曲处的损耗 < 1 dB/m。但从高频的混合  $\text{HE}_{11}$  模转变到低频率的准  $\text{TM}_{11}$  模时引起的场分布变化,使得在 0.5~1.25 THz 频率范围内,损耗会急剧增加到 75 dB/m,再恢复至 15 dB/m。2014 年,Degl'Innocenti 等<sup>[11]</sup>使用 1.7 mm 内径的铜制中空波导很好地对输出光束进行了整形,并发现波导与 QCL 未对准会导致高阶模式波的产生,2015 年,在 QCL 发光端面上用铜制波导将光耦合至外腔的聚苯乙烯波导,发现其耦合效率为 90%,并观察到了单瓣的  $\text{HE}_{11}$  模<sup>[31]</sup>。此外,Danylov 等<sup>[32]</sup>发现中空波导能够将多模、高度发散的太赫兹光束转变成低阶的  $\text{HE}_{11}$  模,从而与自由空间的高斯光束  $\text{TEM}_{00}$  模相耦合。

中空波导在太赫兹波段的传输具有损耗低、耦合效率高等特点,但其损耗与研究相对成熟的中红外量子级联激光器的中空波导相比,要高出大约一个数量级,后者的传输损耗大致在零点几  $\text{dB}/\text{m}$ <sup>[33-35]</sup>。这种差距的原因在于波导内部空气中的水会对太赫兹有强烈的吸收作用,因此其损耗与

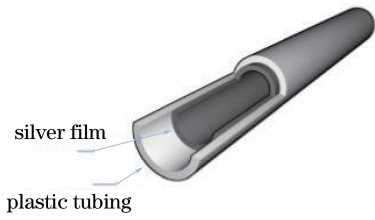


图 1 中空波导<sup>[28]</sup>

Fig. 1 Hollow waveguide<sup>[28]</sup>

波导的内径、长度、介质层等相关,内径越大、长度越长,其损耗也越大<sup>[27]</sup>,因此可以在波导内填充稀有气体或者干燥空气以避免空气中水分对太赫兹波的吸收<sup>[30]</sup>,减小损耗。不同介质对太赫兹的吸收也不同,从而导致损耗不同<sup>[29]</sup>,介质层厚度会影响传输损耗,还会影响传输的模式<sup>[30]</sup>。

### 2.2 锁相阵列

与上述外耦合的波导不同,锁相阵列属于内耦合,是一种将QCL有源区进行排列进而使发射的

光相互叠加从而偏离原有状态的耦合方式。而锁相阵列主要有 4 种耦合方式:漏波耦合<sup>[40]</sup>、Y 型耦合<sup>[41]</sup>、衍射耦合<sup>[42]</sup>、倏逝波耦合<sup>[43]</sup>等,如图 2 所示。2010 年, Kao 等<sup>[44]</sup>报道了一种漏波耦合模式的面发射太赫兹量子级联激光器锁相阵列,获得了紧凑的、半峰全宽约为  $10^\circ$  的单瓣远场光束,并在 3.9 THz 处获得了 1.5 GHz 的可调范围。2012 年, Kao 等<sup>[45]</sup>又报道了一种基于漏波耦合的腔结构三级分布式反馈太赫兹量子级联激光器。该结构包含数个激光腔,腔与腔之间用片状结构相连,实验获得了半峰全宽为  $6 \times 11^\circ$  的单瓣光束模式,并增加了激光器的可用长度,缩小了光束模式,使其更加紧凑。2016 年, Bosco 等<sup>[46]</sup>制造出片状天线阵列的单模低损耗太赫兹 QCL。此阵列的激光脊条镶嵌在苯并环丁烯中,能输出 4.745 THz 的单模连续波,在 10 K 温度下最大功率为 1.8 mW,并获得了低分散的单瓣光束,半峰全宽约为  $30^\circ$ 。

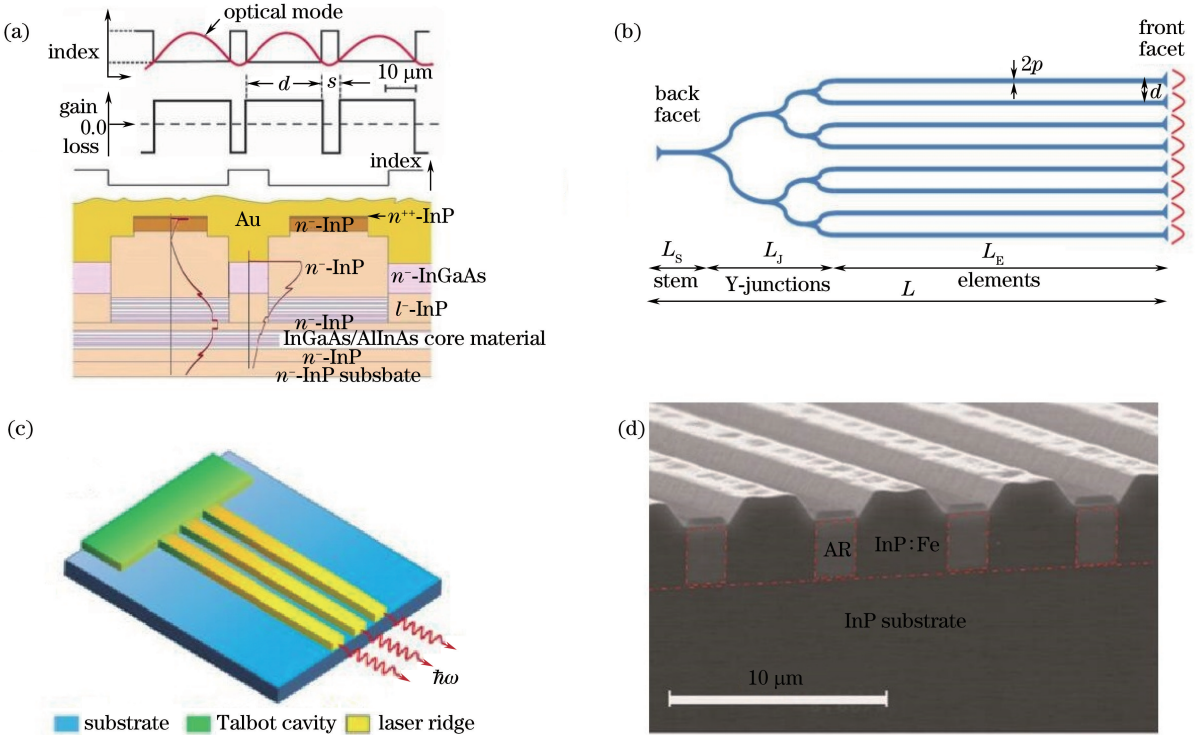


图 2 锁相阵列。(a)漏波耦合<sup>[36]</sup>; (b)Y 型耦合<sup>[37]</sup>; (c)衍射耦合<sup>[38]</sup>; (d)倏逝波耦合<sup>[39]</sup>

Fig. 2 Phase-locked arrays. (a) Leaky-wave coupling<sup>[36]</sup>; (b) Y coupling<sup>[37]</sup>; (c) diffraction-wave coupling<sup>[38]</sup>; (d) evanescent-wave coupling<sup>[39]</sup>

锁相阵列的几种耦合方式各有优缺点,其中漏波耦合能够输出同相模,但形成反波导结构的过程较为繁琐<sup>[36]</sup>,或者需要额外的连接器连接各脊条<sup>[44]</sup>。由于空间烧孔,Y 型耦合会在同相模和异相模之间形成自脉动<sup>[47]</sup>。衍射耦合通常需要一个光

学反馈,如 Talbot 腔,因此,外部的光学反馈会极大影响其耦合性能<sup>[44]</sup>。而倏逝波耦合一般有两个缺点:1) 在垂直方向上倏逝波衰减很快,导致相邻模之间的差别很大;2) 倏逝波耦合更倾向于输出异相模,因此不适合用于单瓣输出<sup>[44]</sup>。

目前国内外关于太赫兹量子级联激光器阵列耦合的研究尚处起步阶段,相关研究成果较少,但中红外量子级联激光器的硫系玻璃波导<sup>[48-50]</sup>以及基于太赫兹时域光谱仪的微孔阵列<sup>[51-52]</sup>、平行板波导<sup>[53-55]</sup>等耦合方式,报道颇多,而性能也各有优劣,对 THz QCL 而言具有较大的参考价值。

从目前研究现状和发展趋势看,THz QCL 锁相阵列如何实现功率提升还面临理论设计和实验技术上的巨大挑战。1) THz QCL 相对中红外 QCL 具有更为复杂的动力学特征。中红外 QCL 的电子跃迁退相干时间和增益恢复时间均远小于腔内光子寿命,两个相应的动力学变量可以从动力学耦合方程中绝热分离,体系的动力学特征描述得以简化,属于第一类激光器。但是,THz QCL 的不同有源区结构的增益恢复时间相差可达到几十 ps,更接近于第二类激光器(只有电子跃迁退相干时间远小于其他特征时间)。因此,体系的动力学行为更加复杂和多样,不能简单地把适合于半导体激光器或中红外 QCL 的典型阵列锁相技术移植到 THz QCL,必须细致研究 THz QCL 的动力学特征,掌握其特征时间的决定因素,尤其是不同有源区结构中增益恢复时间、上能级非辐射跃迁寿命及自发发射寿命的变化规律,从而提高 THz QCL 的输出功率。2) THz QCL 的横向器件尺寸与太赫兹波长接近(百微米量级),器件尺寸以及波导结构对光场模式分布、阵列耦合的影响很大,同时结合器件损耗显著,造成了阵列波导结构和外腔设计的困难。比如,对于外腔互注入耦合方式来说,采用半绝缘等离子体波导时,阵列单元间将同时存在侧面漏波/倏逝波耦合以及衬底内光场的直接耦合,不同耦合机制的强度、相位及损耗将决定器件的光场模式。另外,THz QCL 阵列波导结构的精确控制,也对器件工艺提出了苛刻的要求,特定工艺上需要采用聚焦离子束刻蚀方法。3) 阵列锁相耦合的目标之一是实现大功率输出,在此条件下,器件工作温度上升引起的热声子噪声会对有源区各种退相干机制造成扰动,从而对阈值电流、光学增益等产生影响。目前,对于 THz QCL 的器件工作温度极限仍存在争议,实验上曾报道 THz QCL 的工作温度能够超过两辐射态的能差,相应子带间增益在如此“高温”下“幸存”的机理仍不明确。因此,国内外还没有工作温度上升对于阵列光场耦合参数、稳定锁相、激射谱特征等影响的相关研究报道。

因此,要实现 THz QCL 阵列耦合,突破 THz

QCL 输出功率限制的瓶颈,就需要深入研究 THz QCL 阵列的耦合机制与调控,设计和制备新型的 THz QCL 阵列。

### 3 结束语

对近几十年来 THz QCL 耦合方式进行简要分析和概述。结果表明:对于 THz QCL 而言,其耦合方式的研究尚处于起步阶段,仅有漏波耦合等方面的少量报道。无论采用何种耦合方式,如常见的漏波耦合、Y 型耦合、衍射耦合、倏逝波耦合等,以及微孔阵列、平行板波导等方式,在考虑和设计 THz QCL 阵列耦合方式时,都必须解决 THz QCL 光束发散角很大(通常达到几十度)以及太赫兹波在空气中衰减严重的问题,因为这导致阵列耦合很难达到有效互注入和频率锁定。借鉴半导体激光器阵列在相干耦合的情况下,输出功率可达几百瓦甚至几千瓦的成功结构及外腔互注入方式,充分考虑由于子带寿命为 ps 量级、有源区增益和折射率与电子密度分布规律等与半导体激光器明显不同的特点带来的动力学特征和器件结构差异,有望设计出新的外腔互注入 THz QCL 耦合阵列。进一步,利用 THz QCL 阵列有源区和外腔可为相同结构材料的特点,既保留外腔互注入的优势,又避免 THz QCL 发散角大、太赫兹波在空气中传播损耗严重以及使用准直透镜和外腔镜的问题,有望研制出大功率输出的 THz QCL 耦合阵列。当然,THz QCL 耦合阵列在大功率输出时,升温引起的热声子噪声显著增强了对有源区各种退相干机制的扰动,进而对阈值电流、光学增益等产生影响,这也是 THz QCL 耦合阵列设计需要进一步深入研究的地方。

总之,对于 THz QCL 阵列耦合的设计研究而言,不能简单地将中红外 QCL 以及光整流或光电导太赫兹源的耦合方式直接运用于太赫兹 QCL,而应该深入研究太赫兹 QCL 的动力学特征、耦合机制、器件制备、高效热管理等内容,进而针对性地进行理论设计。

### 参 考 文 献

- [1] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology[J]. Nature Materials, 2002, 1(1): 26-33.
- [2] Siegel P H. Terahertz technology [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 910-928.

- [3] Yao J Q. Introduction of THz-wave and its applications[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2010, 22(6): 703-707.  
姚建铨. 太赫兹技术及其应用[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2010, 22(6): 703-707.
- [4] Yang M W, Ji H B, Tan Z Y, *et al.* Terahertz joint analyzer with imaging and spectrum detection[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(6): 0611004.  
杨旻蔚, 季海兵, 谭智勇, 等. 成像与成谱联动的太赫兹分析检测仪[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0611004.
- [5] Li M Q, Tan Z Y, Qiu F C, *et al.* Fast reflective scanning imaging based on terahertz quantum-cascade laser[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(6): 0611004.  
李孟奇, 谭智勇, 邱付成, 等. 基于太赫兹量子级联激光器的反射式快速扫描成像[J]. 光学学报, 2017, 37(6): 0611004.
- [6] Liu Y, Zhao G Z, Shen Y C. Polarization imaging detection based on the continuous terahertz wave[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(1): 0111001.  
刘影, 赵国忠, 申彦春. 连续太赫兹波偏振成像检测[J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0111001.
- [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: 156-159.
- [9] Scalari G, Ajili L, Faist J. Far-infrared ( $\lambda \simeq 87 \mu\text{m}$ ) bound-to-continuum quantum-cascade lasers operating up to 90 K[J]. Applied Physics Letters, 2003, 82(19): 3165-3167.
- [10] Liu H C, Wächter M, Ban D, *et al.* Effect of doping concentration on the performance of terahertz quantum-cascade lasers[J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(14): 141102.
- [11] Degl'Innocenti R, Shah Y D, Jessop D S, *et al.* Hollow metallic waveguides integrated with terahertz quantum cascade lasers[J]. Optics Express, 2014, 22(20): 24439-24449.
- [12] Han Y J, Li L H, Zhu J, *et al.* Silver-based surface plasmon waveguide for terahertz quantum cascade lasers[J]. Optics Express, 2018, 26(4): 3814-3827.
- [13] 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]. Optics Express, 2018, 26(2): 1942-1953.
- [14] Belkin M A, Capasso F. New frontiers in quantum cascade lasers: high performance room temperature terahertz sources[J]. Physica Scripta, 2015, 90(11): 118002.
- [15] Wienold M, Röben B, Schrottke L, *et al.* High-temperature, continuous-wave operation of terahertz quantum-cascade lasers with metal-metal waveguides and third-order distributed feedback [J]. Optics Express, 2014, 22(3): 3334-3348.
- [16] Wang X M, Shen C L, Jiang T, *et al.* High-power terahertz quantum cascade lasers with  $\sim 0.23 \text{ W}$  in continuous wave mode[J]. AIP Advances, 2016, 6(7): 075210.
- [17] Fatholouloumi S, Dupont E, Chan C W I, *et al.* Terahertz quantum cascade lasers operating up to  $\sim 200 \text{ K}$  with optimized oscillator strength and improved injection tunneling [J]. Optics Express, 2012, 20(4): 3866-3876.
- [18] Li L H, Chen L, Zhu J X, *et al.* Terahertz quantum cascade lasers with  $> 1 \text{ W}$  output powers [J]. Electronics Letters, 2014, 50(4): 309-311.
- [19] Li L H, Zhu J X, Chen L, *et al.* The MBE growth and optimization of high performance terahertz frequency quantum cascade lasers [J]. Optics Express, 2015, 23(3): 2720-2729.
- [20] Sun J N, Sun W J, Zhao L P, *et al.* Study of the factors influencing the properties of AlGaIn/GaN quantum cascade lasers [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0214002.  
孙京南, 孙文军, 赵立萍, 等. 影响 AlGaIn/GaN 量子级联激光器性能的因素研究[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0214002.
- [21] Lee H K, Chung K S, Yu J S, *et al.* Thermal analysis of buried heterostructure quantum cascade lasers for long-wavelength infrared emission using 2D anisotropic heat-dissipation model[J]. Physica Status Solidi (a), 2009, 206(2): 356-362.
- [22] Lee H K, Yu J S. Thermal analysis of short wavelength InGaAs/InAlAs quantum cascade lasers [J]. Solid-State Electronics, 2010, 54(8): 769-776.
- [23] Lee H K, Chung K S, Yu J S. Thermal analysis of InP-based quantum cascade lasers for efficient heat dissipation[J]. Applied Physics B, 2008, 93(4): 779-786.
- [24] Chaparala S C, Xie F, Caneau C, *et al.* Design guidelines for efficient thermal management of mid-infrared quantum cascade lasers [J]. IEEE

- Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2011, 1(12): 1975-1982.
- [25] Pierscinski K, Pierścińska D, Iwińska M, *et al.* Investigation of thermal properties of mid-infrared AlGaAs/GaAs quantum cascade lasers[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 112(4): 043112.
- [26] Krall M, Bachmann D, Deutsch C, *et al.* All-electrical thermal monitoring of terahertz quantum cascade lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(14): 1470-1473.
- [27] Bowden B, Harrington J A, Mitrofanov O. Low-loss modes in hollow metallic terahertz waveguides with dielectric coatings [J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(18): 181104.
- [28] Vitiello M S, Xu J H, Kumar M, *et al.* High efficiency coupling of terahertz micro-ring quantum cascade lasers to the low-loss optical modes of hollow metallic waveguides [J]. Optics Express, 2011, 19(2): 1122-1130.
- [29] Vitiello M S, Xu J H, Beltram F, *et al.* Guiding a terahertz quantum cascade laser into a flexible silver-coated waveguide [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110(6): 063112.
- [30] Navarro-Cia M, Vitiello M S, Bledt C M, *et al.* Terahertz wave transmission in flexible polystyrene-lined hollow metallic waveguides for the 2.5~5 THz band[J]. Optics Express, 2013, 21(20): 23748-23755.
- [31] Wallis R, Degl'Innocenti R, Jessop D S, *et al.* Efficient coupling of double-metal terahertz quantum cascade lasers to flexible dielectric-lined hollow metallic waveguides [J]. Optics Express, 2015, 23(20): 26276-26287.
- [32] Danylov A A, Waldman J, Goyette T M, *et al.* Transformation of the multimode terahertz quantum cascade laser beam into a Gaussian, using a hollow dielectric waveguide [J]. Applied Optics, 2007, 46(22): 5051-5055.
- [33] Patimisco P, Spagnolo V, Vitiello M S, *et al.* Coupling external cavity mid-IR quantum cascade lasers with low loss hollow metallic/dielectric waveguides[J]. Applied Physics B, 2012, 108(2): 255-260.
- [34] Sampaolo A, Patimisco P, Kriesel J M, *et al.* Single mode operation with mid-IR hollow fibers in the range 5.1~10.5  $\mu\text{m}$ [J]. Optics Express, 2015, 23(1): 195-204.
- [35] Patimisco P, Sampaolo A, Giglio M, *et al.* Hollow core waveguide as mid-infrared laser modal beam filter [J]. Journal of Applied Physics, 2015, 118(11): 113102.
- [36] 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.
- [37] Lyakh A, Maulini R, Tsekoun A, *et al.* Continuous wave operation of buried heterostructure 4.6  $\mu\text{m}$  quantum cascade laser Y-junctions and tree arrays [J]. Optics Express, 2014, 22(1): 1203-1208.
- [38] Wang L, Zhang J C, Jia Z W, *et al.* Phase-locked array of quantum cascade lasers with an integrated Talbot cavity [J]. Optics Express, 2016, 24(26): 30275-30281.
- [39] de Naurois G M, Carras M, Simozrag B, *et al.* Coherent quantum cascade laser micro-stripe arrays [J]. AIP Advances, 2011, 1(3): 032165.
- [40] Botez D, Peterson G. Modes of phase-locked diode-laser arrays of closely spaced antiguides [J]. Electronics Letters, 1988, 24(16): 1042-1044.
- [41] Chen K L, Wang S. Single-lobe symmetric coupled laser arrays [J]. Electronics Letters, 1985, 21(8): 347-349.
- [42] Katz J, Margalit S, Yariv A. Diffraction coupled phase-locked semiconductor laser array [J]. Applied Physics Letters, 1983, 42(7): 554-556.
- [43] Ackley D E. Single longitudinal mode operation of high power multiple-stripe injection lasers [J]. Applied Physics Letters, 1983, 42(2): 152-154.
- [44] Kao T Y, Hu Q, Reno J L. Phase-locked arrays of surface-emitting terahertz quantum-cascade lasers [J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(10): 101106.
- [45] 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.
- [46] Bosco L, Bonzon C, Ohtani K, *et al.* A patch-array antenna single-mode low electrical dissipation continuous wave terahertz quantum cascade laser [J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(20): 201103.
- [47] De Freez R K, Bossert D J, Yu N, *et al.* Spectral and picosecond temporal properties of flared guide Y-coupled phase-locked laser arrays [J]. Applied Physics Letters, 1988, 53(24): 2380-2382.

- [48] Ho N, Phillips M C, Qiao H, *et al.* Single-mode low-loss chalcogenide glass waveguides for the mid-infrared [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(12): 1860-1862.
- [49] Tsay C, Toor F, Gmachl C F, *et al.* Chalcogenide glass waveguides integrated with quantum cascade lasers for on-chip mid-IR photonic circuits [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(20): 3324-3326.
- [50] Tsay C, Mujagić E, Madsen C K, *et al.* Mid-infrared characterization of solution-processed  $\text{As}_2\text{S}_3$  chalcogenide glass waveguides [J]. *Optics Express*, 2010, 18(15): 15523-15530.
- [51] Chen H T, Lu H, Azad A K, *et al.* Electronic control of extraordinary terahertz transmission through subwavelength metal hole arrays [J]. *Optics Express*, 2008, 16(11): 7641-7648.
- [52] Miyamaru F, Hangyo M. Finite size effect of transmission property for metal hole arrays in subterahertz region [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(15): 2742-2744.
- [53] Gerhard M, Theuer M, Beigang R. Coupling into tapered metal parallel plate waveguides using a focused terahertz beam [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(4): 041109.
- [54] Kim S H, Lee E S, Ji Y B, *et al.* Improvement of THz coupling using a tapered parallel-plate waveguide [J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 1289-1295.
- [55] Iwaszczuk K, Andryieuski A, Lavrinenko A, *et al.* Terahertz field enhancement to the MV/cm regime in a tapered parallel plate waveguide [J]. *Optics Express*, 2012, 20(8): 8344-8355.