

文章编号: 2095-4980(2021)02-0193-08

量子级联激光器的热管理研究进展

张泽涵^{a,b}, 蒋涛^{a,b}, 湛治强^{a,b}, 王雪敏^{*a,b}, 罗佳文^{a,b}, 彭丽萍^{a,b},
樊龙^{a,b}, 肖婷婷^{a,b}, 吴卫东^{a,b}

(中国工程物理研究院 a.等离子体物理重点实验室; b.激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621999)

摘要: 作为目前最重要的中远红外光源, 量子级联激光器(QCL)因独特的性能和频率可拓展至太赫兹(THz)的特点, 成为研究的热点。对于QCL, 影响其输出功率和工作温度的因素较多, 其中高效散热是重要的因素。首先对中红外和太赫兹两种QCL的热管理研究进行了归纳和总结; 讨论和分析了两者之间的相似和不同点, 主要讨论两种激光器固体侧散热的方法, 包括有源区设计、改进工艺、优化器件材料体系等方面; 最后, 对QCL热管理的未来研究趋势进行了分析和预测。该结果对于QCL的性能提升, 特别是输出功率和工作温度的提高, 具有一定的参考意义。

关键词: 量子级联激光器; 热管理; 太赫兹; 中红外

中图分类号: TN248

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019390

The progress of Quantum Cascade Lasers thermal management

ZHANG Zehan^{a,b}, JIANG Tao^{a,b}, ZHAN Zhiqiang^{a,b}, WANG Xuemin^{*a,b}, LUO Jiawen^{a,b}, PENG Liping^{a,b},
FAN Long^{a,b}, XIAO Tingting^{a,b}, WU Weidong^{a,b}

(a.Science and Technology on Plasma Physics Laboratory; b.Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: As the most important mid-infrared source at present, Quantum Cascade Lasers(QCL) has become one of the research hotspots due to its unique performance and frequency that can be extended to terahertz(THz). For QCL, there are many factors affecting their output power and operating temperature, and efficient heat dissipation is an important factor. In this paper, the thermal management research of two kinds of QCL including mid-infrared and terahertz is summarized. Secondly, the similarities and differences between the two are discussed and analyzed. Two methods of heat dissipation on the solid side of lasers are mainly discussed, including active areas design, processes improvement, and the optimization of device material systems. Finally, the future research trends of thermal management of QCL are analyzed and predicted. This result has certain reference significance for the performance improvement of QCL, especially the improvement of output power and working temperature.

Keywords: Quantum Cascade Laser; thermal management; terahertz; mid-infrared

量子级联激光器(QCL)是一种基于量子阱子带间电子跃迁的单极性半导体激光器, 其独特的子带间跃迁机制不同于其他激光器, 波长的“人工剪裁”已成为其显著标签之一。因QCL具有低阈值、高功率以及工作波段范围广等特点, 不仅可作为激光成像雷达的光源, 还在大气污染监测、光电对抗、化学传感、医学无损伤治疗和太赫兹主动成像技术等众多领域中得到广泛应用。从1994年贝尔实验室研制出第一台QCL开始^[1], 科研工作者就不断努力扩展QCL激射波长的范围, 并在进一步开发和理解这项技术方面取得了重大进展。通过近些年的发展, QCL慢慢成为中红外和太赫兹(THz)波段的重要激光光源。

不同于传统半导体激光器, QCL具有体积小、功率高、低阈值电流、宽波长范围, 能够在中远红外以及太

收稿日期: 2019-10-12; 修回日期: 2019-12-15

基金项目: 中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室基金资助项目(2019HEL11); 中国工程物理研究院激光聚变研究中心青年人才基金资助项目(RCFCZ1-2017-20)

作者简介: 张泽涵(1995-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹与中红外量子级联激光器的热管理。email:3362439352@qq.com

*通信作者: 王雪敏 email:wangxuemin75@sina.com

赫兹波段出射, 具有单极性结构以及电子利用效率高等特点。与传统半导体激光器相比, QCL 最大的不同在于它是单极性激光器。QCL 由多层量子阱结构组成, 每个单层的量子阱结构都包括激发区和注入区^[2]。由于量子隧穿效应, 电子会从一组耦合量子阱的注入区隧穿到另一组耦合量子阱的激发区, 同时高能级的电子会到达低能级, 以光的形式释放能量。这样, 下一级同样耦合量子阱结构的注入电子就来自上一级结构所发射出的光子, 形成了 QCL 的级联结构。QCL 有源区是由多周期纳米量级的外延层交叠组成的超晶格结构, 其工作时需要外加偏压才能形成足够的注入电流去激发电子跃迁^[3]。但受限于较低的电光转化效率, 施加的电流将在 QCL 有源区产生大量的焦耳热, 严重影响器件的输出功率和工作温度。由于 QCL 有源区产热量巨大, 且处于中心区域, 热量无法自行耗散, 此时有源区中的载流子会被热激发到更高的能量连续态上, 即所谓的电子泄露; 或是下一级注入区中的电子回填到上一级有源区中的激射下能级上^[4]。这两个因素都会使激射能级间的载流子反转数下降, 使激光器的增益下降, 进而影响器件的正常工作。此外, 由于温度的影响, 各层材料之间热膨胀系数的差别会产生局部应力, 并使材料之间扩散加剧, 这将导致器件退化, 缩短激光器的使用寿命。因此, 热效应对 QCL 性能的影响是 QCL 研究的一个重要方面。

1 温度对 QCL 性能的影响

温度对阈值电流的影响: 当外加电场的电流达到某一特定值时, 半导体激光器内会发生激光振荡, 出光功率会急速向上增加, 此时的电流为阈值电流。温度对阈值电流的影响主要取决于给定激光器的结构和共振腔的品质, 温度越高, 阈值电流越大^[5]。因此对于二极管激光器, 一般都是阈值电流越小越好。当注入电流小于阈值电流时, 输出的光比较微弱, 无法满足激射条件。当注入电流大于阈值电流时, 满足了有源区的谐振条件, 受激辐射会发生输出激光, 自然出光功率急速增强。

温度对电光转化效率的影响: 理论上, 在 QCL 的输运模型下, 注入区的电子依靠隧穿效应到达有源区的高能级状态, 再通过辐射跃迁从高能态到低能态, 然后开始新一轮的循环。但实际情况下, 还会有其他情况出现, 如随着温度上升, 由于热激发, 有源区和注入区低能态的电子会跳转到导带上方的能级中, 下一级注入区的电子跳转到上一级的激发区的低能级中, 或处于激发区的电子跳转到该能级的高激发态中, 这种现象称为电子回填。电子回填会影响有源区粒子反转数, 进而降低电光转化效率。器件温升越大, 上述情况对 QCL 电光转化效率影响越明显。

温度对输出功率的影响: 对于 QCL, 当有源区温度升高很快时, 器件的输出光功率会随之减小; 功率降低, 又会导致 QCL 有源区温度升高, 如此循环往复, 温度升高的幅度越来越剧烈, 数值越来越大, 最后会对激光器的性能和寿命产生严重的影响, 甚至会导致机器损伤或烧毁^[6]。对于同一 QCL, 温度越高, 发光功率越小。功率一定的情况下, 要降低芯片的温度就必须考虑热阻问题。半导体激光器的传热热阻分为固体侧导热热阻和流固界面的对面传热热阻。对于大功率半导体激光器, 减少固体侧导热热阻具有十分重要的意义, 但 J A Skidmore 等^[7]的研究表明, 即使采用硅热沉, 固体侧的导热热阻仅为流体侧对流传热热阻的一半, 所以大功率激光器的关键在于减小对流传热热阻, 强化流体侧传热。传统流体散热方法包括大通道强制对流散热以及空气对流散热等, 随着激光器功率的增大, 新型散热方式, 如微通道散热、热管散热、喷雾冷却等, 为实现大热流密度散热提供了可能的途径。但对于 QCL, 由于功率以及工作环境的不同(太赫兹 QCL 低温下工作, 中红外 QCL 室温下工作), 以及工艺方面的问题, 要加强散热, 主要以减少固体侧热阻为主。提高 QCL 的散热效率通常可从两方面进行: 一方面可通过实施热管理技术提高散热, 从而降低有源区工作温度; 另一方面可对 QCL 有源区结构进行优化。由于 QCL 包括中红外和太赫兹两种类型, 以下分别对这两种器件的热管理进行归纳和总结。

2 中红外 QCL

中红外波段的 QCL 作为一种基于子带跃迁的新型半导体激光器, 自成功研制以来已引起了人们的广泛兴趣, 性能也有了长足的改进。QCL 的出现解决了多年来在此波段上一一直缺乏性能良好的半导体二极管激光器的问题。目前, 在高于室温下脉冲工作以及在热电制冷温度下连续波工作的 QCL 均有报道, 且已经在气体测量分析等方面得到应用。中远红外 QCL 最典型的应用是雷达成像光源, 因 QCL 具有集成化、小型化的特点, 特别适合做约束型空间使用的激光光源。在中红外波段, 很多分子和原子在跃迁时会产生较为强烈的吸收谱线, 基于该特点, 采用 QCL 能够识别出不同物质的特征谱, 因此中远红外 QCL 被用于环境污染物的检测、毒品和爆炸物的排查、无损伤的医疗诊断等领域中^[8]。中红外 QCL 的波长范围为 4~9 μm , 因多个量子阱重复叠加的亚带间跃迁引起了

激光激射。此种单极型、具有级联结构的二极管激光器与传统的 p-n 结型二极管激光器相比，具有其自身的特点：a) 由于其一般具有多达几十级的级联结构，每一级的效率相对仍较低，因此，工作时需注入较高的电流，电流可达数百毫安乃至数安培；b) 其级联结构决定工作时所需的驱动电压较高，一般在十伏量级。在此条件下，QCL 芯片所承受的功率密度很高，在连续波工作模式下，一旦发热量增大，一级一级的级联结构就会依次传递下去，当热量无法扩散时，会在器件内部形成恶性循环。因此，中红外 QCL 常需在脉冲条件下工作，也常需对器件在不同脉冲工作条件，特别是短脉冲和低占空比下进行测量分析。高功率一直是 QCL 的主要优势，如果 QCL 产生的热量不能耗散掉，则其输出功率必然降低，各项性能指标也会随之下降，因此热特性是设计研制中需要重点考虑的问题。

2.1 有源区结构和材料体系

在 1994~2002 年期间，中红外 QCL 的研究取得很大的进展，特别是美国贝尔实验室和 Faist 小组通过对 QCL 的基本物理过程认知，逐步改善了有源区结构。如，束缚态到连续态、耦合四阱量子阱、双生子共振^[9]隧穿的设计思想以及进一步融合调控斜跃迁和垂直跃迁优点的有源区结构成为了中红外 QCL 室温连续工作的基本结构。在材料体系上，中红外 QCL 通常使用 InGaAs/InAlAs，另一种材料体系是 GaAs/AlGaAs^[10]。GaAs 的电子有效质量比 InGaAs 的电子有效质量大很多，光增益比较小，因此一般采用 InP 上的 InGaAs/InAlAs 材料体系。这种材料体系的激光器在散热方面需要进一步优化，在工艺方面也还有很多技术问题需要摸索。2003 年，Paranthoen 等^[11]在 InP 衬底上，以 InGaAs/InAlAs 作为波导层和势垒层，实现了 InAs QCL 室温激射，波长为 1.52 μm 。Razeghi 小组^[12]在 2008 年报道了激射波长为 4.6 μm 的 QCL，室温连续波模式下工作最高功率为 5 W，是迄今为止最高输出功率。中红外 QCL 是由几个至几十个独立结构的发光单元构成，有源区内部的热量由于不能完全耗散，导致产生大量的热，因此需要研究各个单元之间的热串扰行为。中红外 QCL 阵列中热叠加现象，对器件性能和散热产生了重要影响，如果阵列单元之间间距过小，则器件产生的热量会相互叠加，不利于散热。图 1 为 4×1 阵列结构的中红外 QCL 中阵列周期对器件功率的影响，从图中可以看出，阵列周期在 400 μm 时，温度变化趋于平稳，器件的散热性能达到最佳。

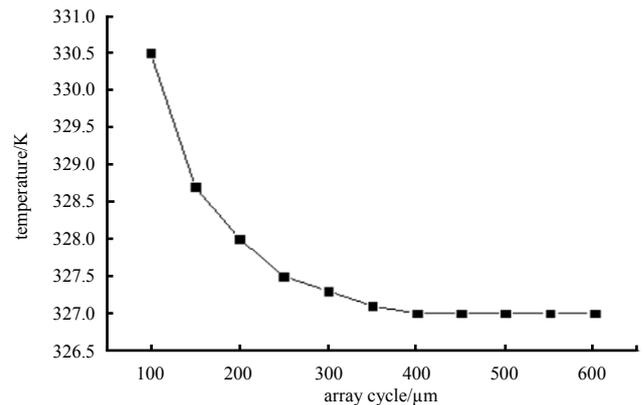


Fig.1 Array cycle and temperature profile

图 1 阵列周期和温度变化曲线图

2.2 器件工艺

2007 年，Evans 等^[13]在室温下对波长为 9 μm 连续波模式下 InGaAs/InAlAs 的 QCL 进行了实验，采用埋置异质结构、倒装方式安装在一个金刚石热沉上。标准脊形波导或双通道波导方式的热量主要在垂直于有源区的方向耗散。与之相比，采用埋置异质结构允许热量从有源区的各个方向散发。通过将器件表层向下安装，产生热量的有源区可以比等效的基板侧装器件更靠近热沉，有效提高了散热。通过以上方法，该 QCL 在室温下产生的波长为 4.7 μm ，输出效率高于 9.3%，高于其他报告中的 4% 的效率，并且在 150 K 下，器件的输出效率为 18%。连续波模式下功率更高，输出功率超过 0.675 W；在低于 200 K 的条件下，输出功率大于 1 W。器件性能提高的原因是提高了分子束外延生长和金属有机化学气相沉积再生长的材料质量，以及采用热优势封装方案，特别是使用高热导率的金刚石衬底。

目前中红外 QCL 采用较多的是 In 焊料的封装结构和采用 AuSn 焊料的封装结构。其中，In 焊料存在工作时易氧化、易发生电热迁移和抗热疲劳性差等缺点^[14-15]。采用 AuSn 焊料将芯片倒装键合在热膨胀系数匹配的次热沉上的封装结构有利于器件的热管理。AuSn 中，Au 组分比在 75%~78% 之间时，测得激光器的热阻较低，能有效提升性能。在对封装结构的研究过程中，人们还提出一种采用双铜—金刚石的“三明治”封装结构，即芯片上下同时安装等厚度的铜—金刚石作为负极和次热沉的优化封装结构。与传统封装结构相比，“三明治”封装结构能够减少芯片的热应力以及降低有源区结温。负极厚度增加，可以通过增加热容的方法降低芯片温度；次热沉厚度越小，器件热阻越小，但器件受到的热应力越大。为改善散热特性，可在热沉与芯片之间添加一层高热导率的石墨烯层，热流扩散效果进一步提升，通过计算发现最大输出功率能够提升 20%^[16]。

2.3 热模拟研究

Zhang 等^[17]在 110 K 的环境下模拟并测量了在电流脉冲驱动下中红外 QCLs 的瞬态热特性。预测值和堆芯温度测量值之间存在良好的相关性。2011 年, Chaparala 小组^[18]通过有限元的数值模拟方法, 对器件进行了详细的数值模拟, 最终确定了散热基板材料以及有源区几何结构对热阻抗的影响。这是因为激光频率随有源区温度的变化而变化, 通过测量激光频率, 可以确定 QCLs 有源区的温度, 从而确定激光二极管的核心与基板底部之间的热阻。在对有限元模型的参数进行研究后, 发现由于芯片的热机械应力以及热阻抗等因素, SiC 是最佳的基板材料, 芯片安装在外延上端的热阻抗比安装在外延下端高出了 30%。进一步研究发现, 热阻随有源区厚度与宽度之比的增大而增大, 因此有源区的组块设计能够有效降低热阻。如将有源区分为 10 个截面, 两个截面之间的 InP 厚度为 $0.5 \mu\text{m}$ 时, 热阻降低了 2.4 倍。在设计有源区时, InP 的厚度增加到 3.6 倍时, 热阻仅增加 30%。图 2 为 QCL 的有限元模型^[18]。

3 太赫兹 QCL

太赫兹 (THz) 技术是最近二十年来迅速发展中的一个新兴研究领域。太赫兹波^[19-20]在电磁波谱中占有一个特殊的位置, 其频率范围为 $0.1\sim 10 \text{ THz}$, 对应的波长范围为 $30 \mu\text{m}\sim 3 \text{ mm}$ 。频域上, 太赫兹处于宏观经典理论向微观量子理论的过渡区, 处于电子学向光子学的过渡区。它的量子能量很低, 信噪比很高, 频率极宽。太赫兹 QCL 是一种重要的相干太赫兹辐射源, 相比于其他的激光器, 具有体积小, 质量轻, 转换效率高, 节电等优点。此外, 半导体激光器的制造工艺与半导体器件和集成电路的生产工艺相兼容, 便于与其他光电子器件集成, 并可大批量生产, 降低生产成本。随着太赫兹 QCL 性能的进一步提高, 其将具有更广泛的应用。如, 可以利用太赫兹 QCL 做成像设备, 与微波相比, 由于太赫兹波的波长短, 具有更高的能量, 穿透能力更强, 成像也更清晰; 太赫兹 QCL 还可用于太赫兹通信, 由于太赫兹波段的频带宽是微波的 1 000 倍, 因此太赫兹通信有很广阔的应用前景。近年来, 太赫兹雷达因其具有信号带宽大、分辨力高的优势, 逐渐成为目标检测和识别的重要设备, 太赫兹雷达观测的行人微多普勒特征可用于行人的检测和识别, 在无人车和智能驾驶领域有广泛的应用前景^[21]。

目前 $1\sim 6 \text{ THz}$ 频率的太赫兹光谱在成像和探测等方面有非常广泛的应用, 但由于 THz QCL 工作条件仍局限于低温环境, 该光谱范围仍缺乏在室温下可操作的高性能半导体光源。近年来, 基于双波长中红外 QCLs 内腔差频^[22] (Difference Frequency Generation, DFG) 产生 THz 源已被证实。这些器件被称为 THz-DFG-QCLs, 其有源区采用双上态设计, 具有巨大的子带间非线性磁化率。利用偏压电流, 在同一激光腔中产生 2 个中红外频率激光, 经 DFG 转换为 THz 频率。这种方法不需要在太赫兹频率保证粒子数反转, 且这些设备可在室温和室温以上运行。世界上第一个 THz QCL 于 2002 年由意大利 Kohler 小组^[23]研究成功, 激光频率为 4.4 THz 。他们在基于啁啾超晶格设计上采用了一种新型表面等离子体波导, 器件脉冲模式下只能在 50 K 下工作, 连续波模式下根本没有激光。实现粒子数反转是激光器获得增益的必要条件, 但在太赫兹频率下实现子带间粒子数反转是困难的, 因为光子能量 $h\nu$ 相对较小 ($10\sim 20 \text{ meV}$), 且不比低温子带宽度 (4 meV) 大。为了实现粒子数反转, 设计了不同的有源区结构, 目前出现的三阱共振声子结构、双声子共振结构、啁啾超晶格结构以及束缚态向连续态跃迁结构等各种设计中, 基于共振声子散射的激光器具有较好的温度特性, 而从束缚态向连续态的跃迁的设计具有最小阈值电流。

在 THz QCL 材料体系方面, 由于材料制备不需要很高的导带偏移, 且 GaAs/AlGaAs 材料体系制备较成熟, 因此采用 GaAs/AlGaAs 材料体系。太赫兹波段的子带间距较窄, 激光器结构相对简单。目前国际上 THz QCL 只能在液氮环境下工作, 功率非常小。经过 10 余年的发展, THz QCL 的性能指标大幅提升, 已实现了辐射频率范

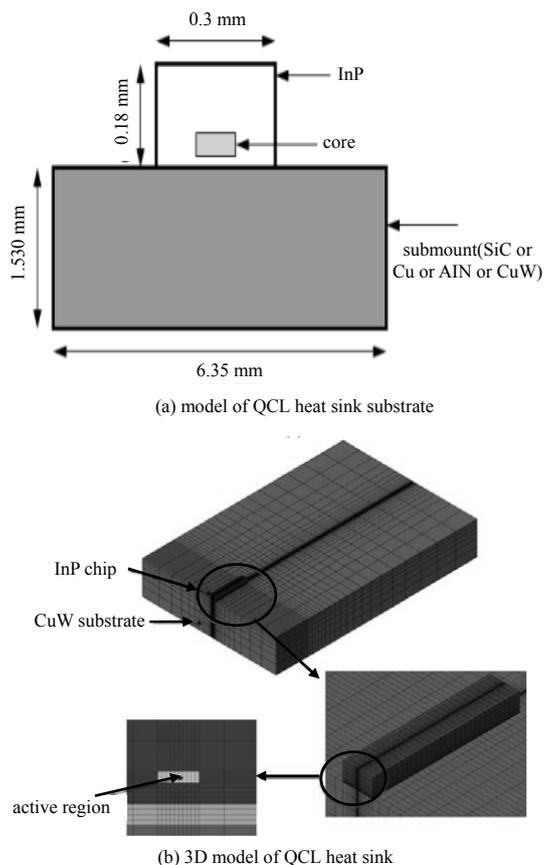


Fig.2 Finite element model of QCL
图 2 QCL 的有限元模型

围 0.68~5.2 THz^[24]，连续波工作模式下最大输出功率为 230 mW；脉冲工作模式下最高激射温度为 250 K^[25]，最大输出功率超过 2.4 W。图 3(a)为 THz QCL 作为频率函数的温度性能，实心 and 空心符号分别指连续波和脉冲操作。三角形为共振声子设计，正方形为散射辅助注射设计，圆形是指束缚于连续介质设计，菱形为基于 GaAs/AlGaAs 以外的材料系统的 THz QCL，不同 THz QCL 设计的描述见文献[26–28]。图 3(b)为 THz QCL 达到最高工作温度的时间线。其中激射频率受 2 个主要因素的相互限制：a) 热电子的光子散射，在较短的波长上占主导地位；b) 寄生电流，在较长的波长上占主导地位。这些因素导致基于这种设计的激光器的最佳频率约为 3~4 THz。

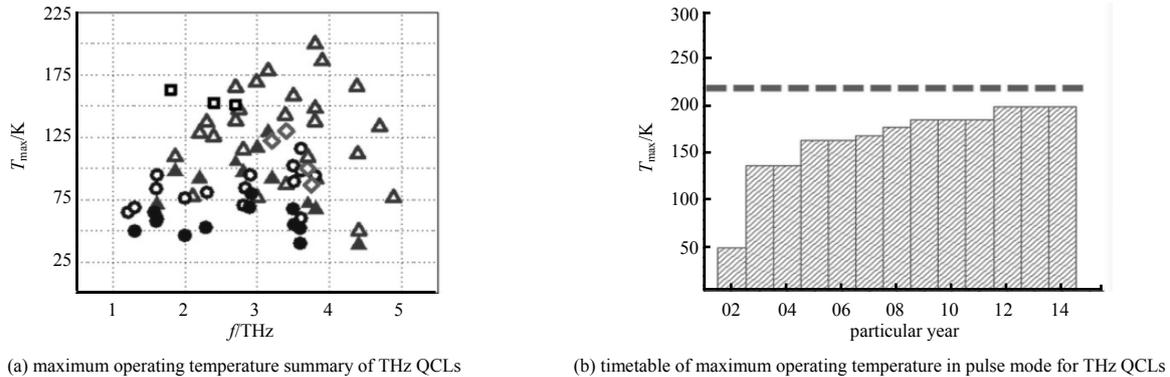


Fig.3 Summary of maximum operating temperature of THz QCL

图 3 THz QCL 最高工作温度汇总

2009 年, Wade 等^[29]通过施加适当的偏压和超过 16 T 的强磁场,在设备上实现了 0.68~3.33 THz 的激射频率,在磁场辅助下,激射频率为 1 THz 时,激射温度达到 215 K;激射频率为 3 THz 时,激射温度达到 225 K。这些结果表明,研究横向量子限制,无论在磁、静电还是结构上,都能够为提升 THz QCL 工作温度提供方法。

同时,要使 THz QCL 的温度性能达到最佳,可以采用双面金属波导,双金属波导在概念上类似于高频电子器件中使用的微带波导。图 4 为双金属波导示意图,图中显示 10 μm 厚有源区的激光模式。底部金属层通过晶圆键合程序引入,脊宽可以从几十微米到数百微米不等。双面金属波导结构在厚度为 10 μm 的 QCL 有源区能够提供近 100% 的激光模式限制,受限于分子束外延和有机金属化合物气相沉积生长系统的能力,铜-铜金属波导提供了截至目前 THz QCLs 的最高工作温度 199.5 K。器件在有源区需要强 THz 激光模式,带来低阈值电流和高工作温度,为缓解这个问题,已研究出许多方法,如创建表面发射装置,通过阻抗匹配和校正 THz 边缘发射机制。THz QCLs 中 THz 辐射的表面提取是通过对顶部金属波导包层进行图形化来产生具有二阶光栅和其他一维光栅结构的脊波导器件实现的,或制作二维光子晶体表面发射激光腔。其中一个很好的提取方案是将硅微透镜连接到前表面来实现从双金属波导边缘的定向外耦合。

目前最高工作温度的 THz QCL 器件采用的就是双面金属波导结构以及共振声子有源区设计。共振声子 THz QCL 设计通过快速的纵光学声子散射来实现下激光能级的电子抽取,抽取效率较高,进而使较大的粒子数反转。但这种结构器件的阈值电流密度很高,产生的焦耳热较大,同时双面金属波导结构限制因子高,阈值增益低,适合高温工作。然而双面金属波导结构的器件光束发散角大,光功率低。对角设计在该装置中能够提高高温下的增益,增加的对角线通过限制寄生漏电流的流动来降低工作电流密度。从数量上讲,对角性的特点是辐射振荡强度较小,是现公布的设计中辐射振荡强度的 1/3。2009 年,黎华等研究的 THz QCL 器件采用气态源分子束外延方法生长了束缚态到连续态跃迁有源区结构以及采用半绝缘等离子体波导结构,在 3% 占空比脉冲工作模式及 10 K 下,器件的阈值电流密度为 275 A/cm²,最大光功率对应的电流密度为 297 A/cm²。器件的激射频率为 3.2 THz,器件的效率得到了提高,并且随着偏压的增大,器件始终处于单激射模式,没有观察到激射频率蓝移现象。为提高连续波工作模式下的最高激射温度,人们将目光转向了通过金属薄片键合和基板制造的金属波导器件。因为器件是自下而上加工,主要散热区在通过激光的脊条正下方键合层的有源区,因此高质量的晶圆键合必不可少。2005 年, Benjamin 等减薄了注入区的厚度,以此获得更高的峰值电流,同时采用了铜-铜热压缩晶片键合方法,提高了脊条的散热能力。与传统 In-Au 键合方式相比,连续波工作模式最高温度得到显著提升。研究人员已经提出大量与 QCLs 热管理相关

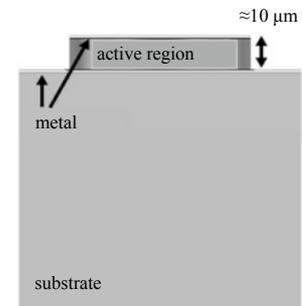


Fig.4 Schematic of double-sided waveguide

图 4 双面波导示意图

的数值模拟和实验工作。如, Li 等^[30]给出了四阱谐振声子 THz QCL 热阻抗的有限元建模和测量结果并得出结论: 缩小脊宽是降低器件温度的最有效方法。脊条较窄, 将导致流过该器件的电流降低, 进而导致焦耳热较低和堆芯温度降低。此外, 还建议使用更薄的 As 衬底来降低热阻。Howard 等^[31]开发了一个综合的 QCL 自洽热模型, 通过减少阶数, 将阈值电流密度增加 2.2 倍, 使堆芯温度降低了 50%。研究还表明, 包层中的电阻发热非常小, 不影响激光二极管的加热。活性区最佳掺杂水平预计在 $5 \times 10^{-10} \sim 2 \times 10^{-11} \text{ cm}^{-2}$ 之间, 测得的最高温度为 118 K。由于低温系统的功率和空间要求, 不适合大多数应用。Lee 等^[32]还分析了采用不同设计的 InGaAs/InAlAs QCLs 的温度分布和热导率。利用二维数值模型建模, 得出结论: 通过加强横向传热, 厚电镀金提供了更有效的散热, 导致 QCLs 热导率的增加。研究还发现, 激光器脊条周围的厚电镀金可以很好地替代 InP 再生长, 以提高散热效果。他们还得出一个重要的结论: 在键合模式中, 采用 InP 接触激光器, $\lambda=9 \mu\text{m}$ 的埋置异质结构激光器在不同结构中表现出最佳的热导率。

目前, 获得较高性能的都是基于 GaAs/AlGaAs 的 THz QCLs 异质结构, 同时大量基于 InGaAs/AlInAs, InGaAs/GaAsSb 和 InGaAs/AlInGaAs 的异质结构(在 InP 基板上生长)被作为 THz QCLs 的替代材料系统。InP 材料体系的峰值增益要比 THz QCL 原有的 GaAs 材料体系大得多, InP 材料具有更好的热导率和波导限制作用。此外, 基于 GaAs/AlGaAs 异质结构的器件具有不同的势垒高度, 最大工作温度在 180~190 K 内, 接近记录温度。最近报道了基于 GaN/AlGaN 异质结构的 THz QCL 在 4 K 的散热器温度下运行的结果。GaN/AlGaN 材料体系有希望将 THz QCL 温度提高到室温, GaN/AlGaN 材料具有良好的耐高温性, 自身存在显著的极化效应, 包括自身极化和压电极化。GaN/AlGaN 为纤锌矿结构氮化物, 自身极化较其他材料高很多。而 GaN/AlGaN 异质结中的压电极化效应 5 倍于 GaAs/AlGaAs 材料系统, 这就导致 GaN/AlGaN 材料自身内部能够产生很大的极化场。GaAs 和 InGaAs 这两种材料的声子能量分别为 36 meV 和 34 meV, 与室温下热激发能(26 meV)相差很小, 导致激光器不易实现室温下的受激辐射。GaN/AlGaN 中含有大量 LO 声子能量(90 MeV), 并且 GaN/AlGaN 材料的量子阱中超快的 LO 声子散射能够迅速减少低激发态能级上的粒子束, 易实现室温下的粒子束反转, 提高激光器的性能。日本报道了在 7 K 下实现了电致发光, 但制备的难度可能会非常大。其中垒层材料的 Al 组分大约为 0.15 时, 对激光器的性能更有利; 当然, 除了 Al 组分, 量子级联结构中的阱宽与垒宽对激光器的性能也有很大的影响, 在寻找 THz QCL 替代材料的道路上, 还有很多困难需要克服。

4 讨论与分析

目前, 高效散热已成为提高 QCL 功率的一大瓶颈, 通过对中红外 QCL 以及 THz QCL 热管理方法的归纳和总结, 可以发现两者的相同点: a) 产热源头是有源区在工作时产生大量焦耳热, 为提高 QCL 功率, 必须保证芯片的散热, 因此, 有源区结构设计非常重要。b) QCL 具有级联机构, 使得热量也按照层级传递, 研究阵列周期对热管理也具有重要意义。c) QCL 的传热热阻如热沉自身热阻、焊料层热阻、绝缘层热阻、各层的接触热阻等对 QCL 功率也有一定影响, 因此要提高材料热导性。另外, 封装工艺对 QCL 散热也有重要影响, 如, 需要在真空条件下用焊料把外延片和热沉焊接在一起, 然后选用合适的退火工艺并且对焊料纯度有着较高的要求。两种器件一般选用热导率较好的 Cu 作为热沉, 在衬底和热沉之间加一散热片。d) 两种激光器也可以通过设计新型热沉结构, 在通道内加入一系列强化换热结构, 优化注入区势垒厚度和掺杂等方法进行有效热管理。通过高压气体将液体工质喷到发热表面进行有效散热的喷雾冷却以及将高速流体冲击到发热面的射流冲击冷却在一些大功率激光器有一定的应用, 但对于中红外以及太赫兹 QCL 却少有研究, 为热管理提供了新的研究方向。

但由于两者的工作原理以及工作环境不同, 中红外 QCL 和 THz QCL 在热管理方面又有所区别。THz QCL 目前面临的主要问题是进一步提高其工作温度, 除了进行有源区设计、选用热导率较好的材料、优化封装方式外, 还可以通过施加适当偏压以及磁场提高激射温度, 选用液氮甚至液氦作为冷却介质提高散热。由于在热导率以及波导限制方面等原因, THz QCL 目前选用较多的是 GaAs 材料体系。对于中红外 QCL, 目前已经实现在室温下高功率输出, 中红外 QCL 通常使用 InP 基板上的 InGaAs/InAlAs 材料体系。中红外 QCL 采用 AuSn 焊料将芯片倒装键合在热膨胀系数匹配的次热沉上的封装结构, 不同于 THz QCL 的 In 焊料, AuSn 在器件工作时不易发生电热迁移并具有更优良的抗热疲劳性。另外, “三明治”封装结构能更好地减少芯片的热应力以及降低有源区结温; 倒装方式在散热上明显优于正装方式, 倒装方式控制有源区温升, 但引入应力较大。

5 总结与展望

本文对近几十年中红外以及 THz QCL 的热管理做了简要分析和概述，很明显两者进行热管理的目的是为了增强器件散热，提高性能。QCL 有源区是产热的主要来源，针对有源区设计的研究也较为成熟，目前中红外 QCL 能够在室温下运行得益于束缚态到连续态、耦合四阱量子阱、双生子共振隧穿的有源区设计；最高工作温度的太赫兹 QCL 采用斜跃迁方式和温度特性较好的双声共振声子散射有源区设计。QCL 的阈值电流随掺杂浓度的提高而增加，随激光器腔长的增加而减小，设计最佳的掺杂浓度可使器件具有最大工作温度。另外，还可以通过分子束外延生长和金属有机化学气相沉积再生长、采用热优势封装方案、研究阵列周期、埋置异质结构、选用高热导率衬底以及散热基板、减薄注入区厚度、缩小脊条宽度等方法对器件进行有效的热管理。对于 THz QCL，目前最高激光温度为 199.5 K，在太赫兹成像以及太赫兹通信方面有较为广阔的应用前景。THz QCL 结构相对简单，目前使用较多的材料体系是在 GaAs 基板上的 GaAs/AlGa 材料体系，不同于中红外 QCL，THz QCLs 可以通过双面金属波导、增加辅助磁场、采用新型如 GaN/AlGaN 的材料系统来提高温度性能。总之，在原有的研究成果基础上，QCL 的热管理还有许多问题需要去解决。未来应该将热管理的重点放在探索新型材料体系对 THz QCL 的影响。

参考文献：

- [1] FAIST J, CAPASSO F, SIVCO D, et al. Quantum cascade laser[J]. *Science*, 1994, 264(5158):553.
- [2] 曹俊诚. 太赫兹量子级联激光器研究进展[J]. *物理*, 2006, 35(8):632-636. (CAO Juncheng. Progress in terahertz quantum cascade lasers[J]. *Physics*, 2006, 35(8):632-636.)
- [3] YIN W, LU Q Y, LIU W F, et al. Porous waveguide facilitated low divergence quantum cascade laser[J]. *Journal of Semiconductors*, 2011, 6(32):751-754.
- [4] 李莹莹. 量子级联激光器的建模与仿真[D]. 上海:复旦大学, 2012. (LI Yingying. Modeling and simulation of quantum cascade lasers[D]. Shanghai, China: Fudan University, 2012.)
- [5] 汪瑜. 半导体激光器热特性分析研究[D]. 长春:长春理工大学, 2009. (WANG Yu. Thermal characteristics of semiconductor laser[D]. Changchun, Jilin, China: Changchun University of Science and Technology, 2009.)
- [6] 朱诚. 中红外半导体激光器的热特性分析[D]. 上海:上海微系统与信息技术研究所, 2006. (ZHU Cheng. Thermal analysis of mid infrared semiconductor lasers[D]. Shanghai, China: Shanghai Institute of Microsystems and Information Technology, 2006.)
- [7] SILVERMAN I, ARENSHTAM A, KIJEL D, et al. High heat flux accelerator targets cooling with liquid-metal jet impingement[J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 2005, 241(1-4):1009-1013.
- [8] 李琦, 王骥, 尚铁梁. 量子级联激光器的发展及其应用[J]. *激光与红外*, 2001, 31(2):73-75. (LI Qi, WANG Qi, SHANG Tieliang. Development and application of quantum cascade lasers[J]. *Laser and Infrared*, 2001, 31(2):73-75.)
- [9] HOFSTETTER D, BECK M, ELLEN T, et al. High-temperature operation of distributed feedback quantum-cascade lasers at 5.3 μm [J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 78(4):396-398.
- [10] FAIST J, HOFSTETTER D, BECK M, et al. Bound-to-continuum and two-phonon resonance, quantum-cascade lasers for high duty cycle, high-temperature operation[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 38(6):533-546.
- [11] PARATHOEN C, PLATZ C, MOUREAU G, et al. Growth and optical characterizations of InAs quantum dots on InP substrate: towards a 1.55 μm quantum dot laser[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2003, 251(1-4):230-235.
- [12] JAE S Y, STEVEN S, MANIJEH R, et al. High-performance continuous-wave operation of $\lambda \sim 4.6 \mu\text{m}$ quantum-cascade lasers above room temperature[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2008, 44(8):747-754.
- [13] EVANS A, DARVISH S R, SLIVKEN S, et al. Buried heterostructure quantum cascade lasers with high continuous-wave wall plug efficiency[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(7):553.
- [14] SCHLEUNING D, GRIFFIN M, JAMES P, et al. Robust hard-solder packaging of conduction cooled laser diode bars[C]// *Conference on High-Power Diode Laser Technology and Applications V*. San Jose, CA, USA: [s.n.], 2007:645604-1-11.
- [15] 袁振邦, 王警卫, 吴迪, 等. 大功率半导体激光器阵列的稳态和瞬态热行为[J]. *中国激光*, 2009, 36(8):1957-1962. (YUAN Zhenbang, WANG Jingwei, WU Di, et al. Static and transient thermal behavior of high power semiconductor lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(8):1957-1962.)
- [16] 陈天奇, 张普, 彭勃, 等. 封装对大功率半导体激光器阵列热应力及 Smile 的影响[J]. *光子学报*, 2018, 47(6):123-133. (CHEN Tianqi, ZHANG Pu, PENG Bo, et al. Effect of package on thermal stress and smile of high power semiconductor laser array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(6):123-133.)

- [17] ZHANG Y G, HE Y J, LI A G. Transient thermal analysis of InAlAs/InGaAs/InP mid-infrared quantum cascade lasers[J]. Chinese Physics Letters, 2003,20(5):678–681.
- [18] 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.
- [19] CAO J C. Interband impact ionization and nonlinear absorption of terahertz radiations in semiconductor heterostructures[J]. Physical Review Letters, 2003,91(23):237401.
- [20] LIU H C, SONG C Y, WASILEWSKI Z R, et al. Coupled electron–phonon modes in optically pumped resonant intersubband lasers[J]. Physical Review Letters, 2003,90(7):077402.
- [21] 毕严先, 杜瑞, 焦栋, 等. 太赫兹雷达的人体微多普勒特征[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(5):760–764. (BI Yanxian, DU Rui, JIAO Dong, et al. Micro Doppler effect of the human body with terahertz radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(5):760–764.)
- [22] BELKIN M A, CAPASSO F, BELYANIN A, et al. Terahertz quantum-cascade-laser source based on intracavity difference-frequency generation[J]. Nature Photonics, 2007,1(5):288–292.
- [23] KOHLER R, TREDICUCCI A, BELTRAM F, et al. Terahertz semiconductor–heterostructure laser[J]. Nature, 2002,417(6885):156–159.
- [24] SILVWEMAN I, YARIN A, REZNIK S, et al. High heat-flux accelerator targets:cooling with liquid metal jet impingement[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 2006,49(17):2782–2792.
- [25] KHALATPOUR A, PAULSEN A K, DEIMERT C, et al. High-power portable terahertz laser systems[J]. Nature Photonics, 2021,15(1):16–20.
- [26] WILLIAMS B S. Terahertz quantum-cascade-lasers[J]. Nature Photonics, 2007,1(9):517–525.
- [27] KUMAR S. Recent progress in terahertz quantum cascade lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011,17(1):38–47.
- [28] KUMAR S, CHAN C, QING H, et al. A 1.8 THz quantum cascade laser operating significantly above the temperature of $h\omega/kB$ [J]. Nature Physics, 2011,7(2):166–171.
- [29] WADE A, FEDOROV G, SMIRNOV D, et al. Magnetic-field-assisted terahertz quantum cascade laser operating up to 225 K[J]. Nature Photonics, 2009,3(1):41–45.
- [30] LI H, CAO J C, HAN Y J, et al. Temperature profile modelling and experimental investigation of thermal resistance of terahertz quantum–cascade lasers[J]. Journal of Physics D–Applied Physics, 2009,42(20):205102.
- [31] HOWARD S S, LIU Z, WASSERMAN D, et al. High-performance quantum cascade lasers:optimized design through waveguide and thermal modeling[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007,13(5):1054–1064.
- [32] LEE H K, CHUNG K S, YI 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, 2010,206(2):356–362.