

文章编号: 2095-4980(2025)08-0825-11

太赫兹量子级联激光器电子输运研究进展

刘诚旭^{a,b}, 湛治强^{a,b}, 王雪敏^a, 陈风伟^{a,b}, 蒋涛^{a,b}, 樊龙^{a,b}, 彭丽萍^{a,b}, 舒琳^{a,b}, 吴卫东^{a,b}

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

摘要: 太赫兹(THz)量子级联激光器(QCL)是基于子带间电子跃迁的半导体器件, 具有体积小、轻便、易集成、频率可调和能量转换效率高的特点, 是目前研究的热点之一。目前THz QCL还没有出现满足需求的高性能器件, 电子输运是突破这一瓶颈的重要途径。本文针对THz QCL电子输运方面的研究进展进行了梳理, 首先, 讨论了各种散射对THz QCL性能的影响; 其次, 介绍了通过有源区优化设计提高QCL工作温度的方法; 最后, 对THz QCL电子输运方面的研究进行了展望。该结果对THz QCL性能提升以及应用具有一定的参考意义。

关键词: 量子级联激光器(QCL); 太赫兹; 电子散射; 势垒高度

中图分类号: TN248.4

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2024363

Progress in electron transport of Quantum Cascade Lasers

LIU Chengxu^{a,b}, ZHAN Zhiqiang^{a,b}, WANG Xuemin^a, CHEN Fengwei^{a,b}, JIANG Tao^{a,b}, FAN Long^{a,b},
PENG Liping^{a,b}, SHU Lin^{a,b}, WU Weidong^{a,b}(a.Laser Fusion Research Center; b.Key Laboratory of Science and Technology on Plasma Physics,
China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Terahertz(THz) Quantum Cascade Lasers(QCLs) are semiconductor devices based on intersubband electron leaps, which are characterized by small size, lightweight, easy integration, tunable frequency and high energy conversion efficiency, and have become one of the hotspots of current research. At present, THz QCLs have not appeared high-performance devices, and electron transport, as the most basic and fundamental starting point of THz QCLs, is an important way to break through this bottleneck. In this paper, the research progress in electron transport for THz QCLs is sorted out. Firstly, the influence of various scattering on the performance of THz QCLs is discussed. Secondly, the method to improve the operating temperature of QCLs through the optimized design of active region is also introduced. Finally, the research on electron transport of THz QCLs is outlooked. This work shows certain reference significance for improving the performance and application of THz QCLs.

Keywords: Quantum Cascade Lasers(QCLs); Terahertz; electron scattering; barrier width

量子级联激光器(QCL)是一种半导体激光器, 包含了中红外量子级联激光器和太赫兹量子级联激光器两大类。其工作原理基于量子阱中子带间的电子跃迁, 与材料本身的带隙宽度无关。光子的能量与量子阱的高度密切相关^[1], 通过调节量子阱的高度, 可以调节激光的输出波长^[2-3]。QCL有源区由多层量子阱组成, 每层量子阱又分为注入区和增益区。基于量子隧穿效应, 电子在跃迁过程中从一个注入区到下一个周期的有源区, 从高能级到低能级, 同时释放光子。这个过程仅涉及电子参与, 使QCL具有单极性且输出激光为单向偏振。随着量子阱的尺寸调整, 电子能级之间的能量间隔亦随之改变, QCL与传统的半导体子带间跃迁激光器有显著的不同, 主要体现在其独特的态密度分布和电荷输运的单一特性上。

2002年, 世界上第1个THz QCL^[4]由意大利和英国科学家制备出, 经过20年的发展, THz QCL在化学和生物

收稿日期: 2024-07-21; 修回日期: 2024-09-10

引用格式: 刘诚旭, 湛治强, 王雪敏, 等. 太赫兹量子级联激光器电子输运研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23(8): 825-835. DOI: 10.11805/TKYDA2024363.

Citation format: LIU Chengxu, ZHAN Zhiqiang, WANG Xuemin, et al. Progress in electron transport of quantum cascade lasers[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025, 23(8): 825-835. DOI: 10.11805/TKYDA2024363.

传感、成像和光谱分析、THz 成像等^[5]应用中具有优势：锁相技术的快速发展使激光的频率更加稳定^[6]；子带间跃迁寿命短，光学非线性效应强；利用电子的超快输运特性，可实现 THz QCL 的主动锁模^[7]；通过中红外 QCL 腔体内的差频能够实现室温 THz 激光辐射等。太赫兹源也有望作为载波满足日益增长的高速、大容量无线通信需求^[8]，这些重要而多样化的应用促进了 THz QCL 的发展^[9]。在没有磁场辅助的情况下，THz QCL 最低激光频率为 1.2 THz^[10]，最高工作温度为 261 K^[11]，最高输出光功率为 2.4 W^[12]，单模连续可调谐的范围达到 650 GHz^[13]。

目前影响 THz QCL 性能提升的主要原因有：器件本身的有源区结构设计^[14-16]以及与之相关的电子注入效率、波导损耗、声子散射导致的积热^[17-18]、热声子影响、电注入功率过大且光电转换效率较低等^[19-20]。依据以往设计 QCL 的经验，电子输运是提高 THz QCL 性能的一条有效途径。THz QCL 电子输运涉及多个方面且结构复杂，但与传统的激光器不同，THz QCL 是基于子带间跃迁的单极器件，只需考虑电子在不同子带间的跃迁辐射光子，空穴运输不需考虑。研究 THz QCL 子带间各种散射及温度、掺杂层、势垒高度等对电子输运的影响，是提升 THz QCL 工作温度和功率的有效方法。

本文主要对子带间各种散射及温度、掺杂层、势垒高度等因素对 THz QCL 性能的影响进行总结，并简述了 4 种器件模拟方法的优缺点。目前国内外 QCL 电子输运方面的研究仍不足，了解其中散射机制可以更全面地为激光器的进一步发展提供思路。

1 4 种模拟方法

经过近 20 年的发展，THz QCL 目前还没有出现满足需求的高性能器件，因此迫切需要研究实现室温操作 THz QCL 物理的方法^[21-22]。QCL 的载流子输运和激光过程由一些不可观测的量子力学现象的复杂组合产生，在 QCL 的开发中，复杂的仿真模型对于设计有源区结构和实验数据(如电流密度和光学增益等)的分析是不可或缺的。到目前为止，已提出 4 种不同类型的器件模拟方法，可根据其子带载流子密度计算进行分类：速率方程法^[23-24]、密度矩阵(Density Matrix, DM)法^[25-26]、蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)法^[27-28]和非平衡格林函数(Non-Equilibrium Green's Function, NEGF)法^[29-30]。

速率方程法^[31]仅考虑载流子沿晶体生长方向的一维行为，基于半经典电子输运模型描述 QCL 结构性质。其过程简化，算法容易实现且计算时间短，但结果的准确性不高。密度矩阵法能够模拟退相干效应影响^[32]，其主要优点是适当考虑了通过量子势垒和退相干过程的电子共振隧穿，但密度矩阵法依赖基于费米黄金规则和热化子带的散射机制中的一些近似。MC 法具有较高的模拟精确度，并且能够实时计算在各种散射机制下不同子带之间的散射率^[33]。MC 法建模依赖完善的材料参数和结构规范，可减少甚至完全避免唯参数的需要。其仿真过程较为直观，仿真代码编写相对简便，能够灵活用于不同结构的研究，且可以很容易地解释建模的结果。基于第一原理的 NEGF 方法^[34]被认为是最准确的，其独特优点是能够捕获由于相关性而导致的色散增益和增益线宽减小等效应，但这种方法需要非常庞大的计算，且结果需要更多的理论解释。因此，需根据特定的研究和开发目的选择合适的方法。

此外，选择载波散射机制计算子带之间的载波跃迁率也很重要。THz QCL 研究通常考虑 6 种散射机制：电子-纵向光学(Longitudinal Optical, LO)声子散射、声学-声子散射、电子-电子散射、电离杂质散射、界面粗糙度(Interface Roughness, IFR, 公式中以 R_{IF} 表示)散射和合金无序散射。电子-LO 声子散射和界面粗糙度散射在 6 种散射中影响最大，而声学-声子散射和合金无序散射在 GaAs 材料系统中可忽略不计^[35]。

2 子带间各种散射及温度对 QCL 的影响

THz QCL 中发生的关键弹性散射包括电离杂质散射^[36-39]、界面粗糙度散射^[40-44]和合金无序散射^[45]。电子-LO 声子散射是主要的非弹性散射^[46-47]，电子-电子散射在一些 THz QCL 中也被认为是重要的^[48-50]非弹性散射。图 1 为这些散射机制^[44]。

除以上散射外，由于 THz QCL 有源区的势垒较厚，退相干效应也会影响电子的输运过程，因此 THz QCL 的有源区设计需进行有效的电子输运模拟。

2.1 电离杂质散射

近年来，对 QCL 弹性散射的研究逐步深入。2009 年，Nelander 等^[47]研究了 QCL 中电离杂质散射对光学线宽的温度依赖性影响，并比较了 RPA-3、RPA-3-intra、RPA-1、各向同性模型和 RPA- ∞ 模型的散射强度，如图 2 所示。研究发现电离杂质散射对光学线宽有较大的影响，且随着温度的升高而显著增加。

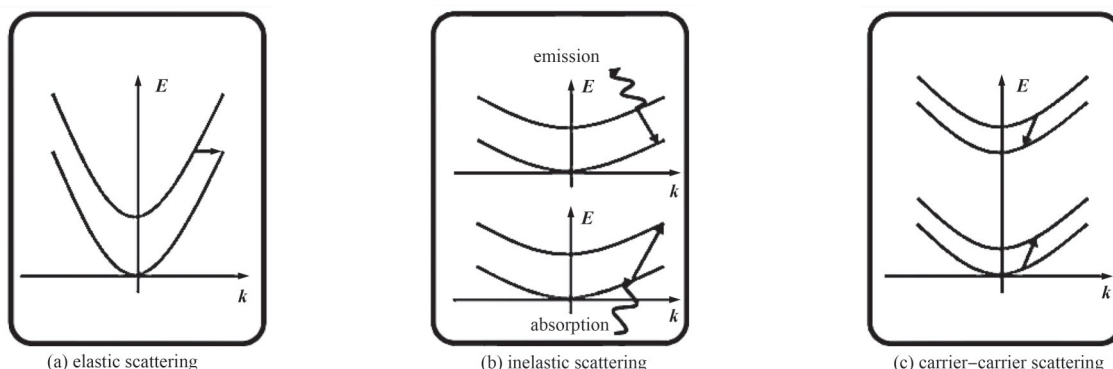


Fig.1 The scattering process in THz-QCL

图 1 THz-QCL 中的散射过程

2015 年, Grange 等^[36]利用格林函数计算了共振声子 THz QCL 的输运和增益特性, 如图 3 所示。其中, 图 3(a)为 THz QCL 的导带图, 图 3(b)为电流密度和掺杂密度, 其中, 黑色方块表示完整的计算结果, 蓝色三角形表示不考虑平均场的计算结果, 红色圆圈表示不考虑平均场且假设掺杂密度均匀分布的计算结果。从图 3 可知, 电离杂质散射是造成输运和增益特性中非线性效应的原因。对于常见的掺杂浓度, 电流密度对杂质散射强度为弱敏感, 但计算得到的增益对杂质散射强度非常敏感, 这种差异归因于带电杂质的长程耦合对强动量的依赖性, 而小动量杂质散射被证明是共振隧穿过程的非相干影响。

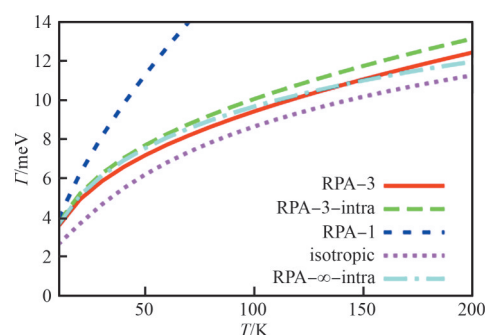


Fig.2 The intensity of impurity scattering in different models

图 2 不同模型的杂质散射强度

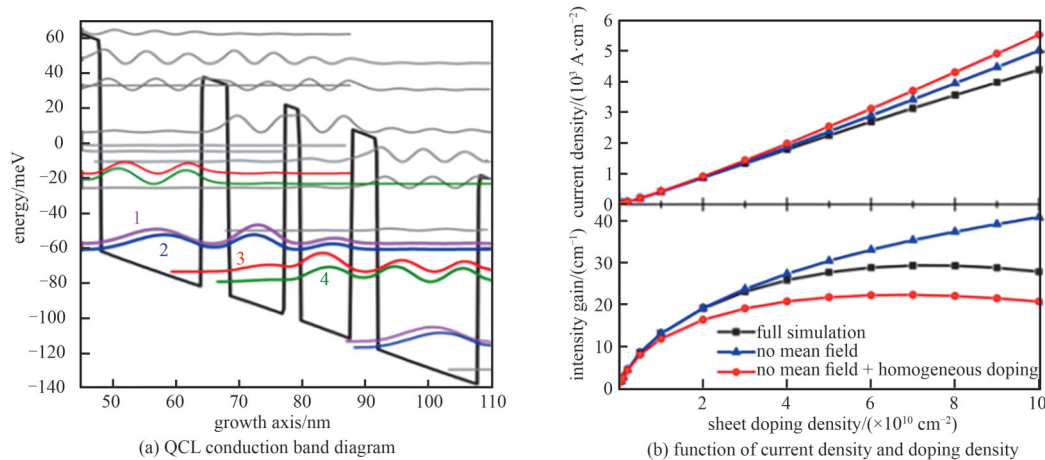


Fig.3 Transport and gain characteristics of resonant phonon THz QCL

图 3 共振声子 THz QCL 的输运和增益特性

2.2 界面粗糙度散射

QCL 已成为光谱应用的重要红外辐射源^[38], 由大量专门设计的半导体层组成。由于这些层的界面不是完全完美的, 因此横向平移不变性被打破, 界面粗糙度(IFR)散射不可避免。一些研究集中在其与上激光能级寿命的相关性^[51-53], 这是激光性能的关键因素。此外, 界面粗糙度还与 QCL 中隧穿的加宽有关^[52]。

2015 年, Franckić 等^[43]研究了界面粗糙度对中红外和太赫兹量子级联激光器运行的影响。研究人员通过模拟和计算, 探讨了不同界面粗糙度分布函数对 QCL 的影响, 并比较了不同分布函数的效果。研究中首先提出了两种常见的界面粗糙度分布函数: 指数分布和高斯分布。然后使用这两种分布函数模拟中红外 QCL 以及具有隧穿注入的 THz QCL 的性能。

图 4(a)为采用 DM 和 NEGF 两种模拟方案 and 不同粗糙度分布下基于 InGaAs/InAlGaAs 的中红外 QCL 电流场特

征,从图中可以看出,指数分布 1 的电流密度比指数分布 2 和高斯分布更高,这归因于较高能级的电子寿命较短,有利于载流子通过器件转移。图 4(b)为基于 GaAs/AlGaAs 的 THz QCL 电流场特性,其中虚线表示补偿损失所需的增益,红叉表示两种结构中的实验阈值数据。从图中可以看出,高斯分布的增益最高,指数分布 2 的值略低,指数分布 1 的增益相对较低。这也可直接归因于上激光态电子的寿命,这是反转的核心。

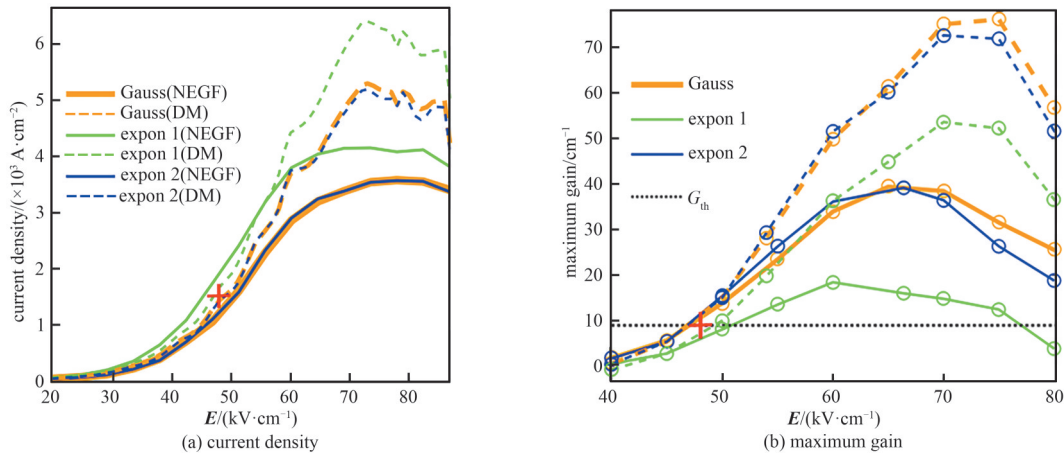


Fig.4 The influence of IFR on the operation of mid-infrared and THz QCL

图 4 IFR 对中红外和太赫兹量子级联激光器运行的影响

通过比较模拟结果发现,增加界面粗糙度散射会增加电流并降低增益。选择合适的界面粗糙度分布函数对于准确预测和优化 QCL 的性能至关重要。

2019 年, Cheng 等^[44]研究了界面粗糙度散射对 GaN 基 THz QCL 的主要影响,如图 5 所示。通过数值模拟,研究人员发现界面粗糙度散射对 THz QCL 的性能有显著影响。界面粗糙散射增加了电子的输运,从而降低了激光器的辐射散射,提高了峰值增益。从图中可以看出,当 $R_{if}=0.5 \text{ nm}$ 时,最大光学增益降至 47.9 cm^{-1} ; $R_{if}=0.75 \text{ nm}$ 时,光学增益消失。随着 IFR 的增加,其在电子散射中的作用增加,从而增加电流密度并减少器件中的谐振隧道和辐射散射过程。之前基于 GaAs 的 THz QCL 的研究中^[54-55]已强调了在外延过程中考虑 IFR 并将其保持小于 0.5 nm ,以便制造 GaN 基 THz QCL 时能够提供正光学增益的重要性。界面粗糙度散射被认为是光学增益下降的主要因素,其在制造过程中的精确控制至关重要。

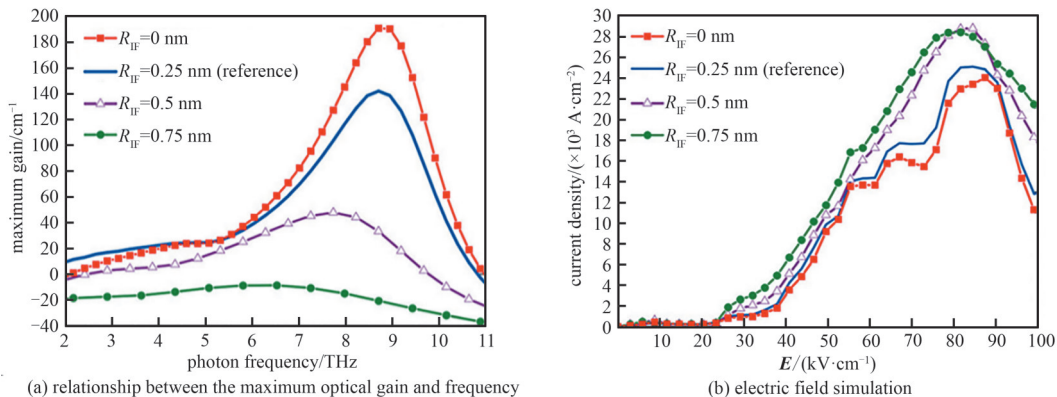


Fig.5 The main influence of different IFR on THz QCL based on GaN

图 5 不同界面粗糙度散射对 GaN 基 THz QCL 的主要影响

2.3 电子-声子散射

2003 年, Callebaut 等^[56]使用 MC 模拟电子-电子(e-e)散射和电子-声子(e-p)散射研究 THz QCL 的输运特性,但这两种散射机制本身似乎不足以解释观察到的电流密度;此外,不充分的散射产生的增益比实验推断的增益更大,表明存在不可忽略的散射机制,而当时计算并未考虑到这一机制。随后, Callebaut 等^[57]研究了电子-离子(e-i)散射对 THz QCL 输运特性的影响,主要结果如图 6 所示,在不存在大寄生电流通道时,模拟的 $I-U$ 曲线符合偏置电压大于 55 mV/module 测量值;包含电子-离子散射也会导致更大的总体反转和增益(见图 6(c)和(d))。Bonno 等建立了多子带系统中的电子-电子散射理论模型,并利用该模型进行 QCL 的 MC 模拟,证实了电子-电

子散射所起的主要作用, 在 3.4 THz 处可以实现粒子数反转, 但限制了 1 THz 附近的潜在性能, 而且这种电子-电子非辐射散射机制可能会严重阻碍在较长波长下发射的 QCL 的设计。

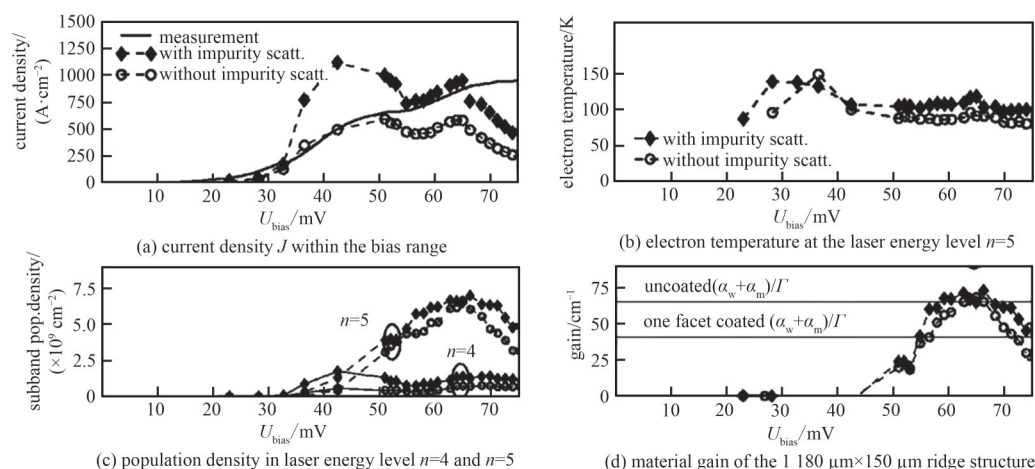


Fig.6 MC simulation results

图 6 MC 模拟结果

2012 年, 中国科学院曹俊诚报道使用 MC 方法^[58]研究了温度对束缚连续态 THz QCL 中电子输运的影响, 其中包括电子-电子散射和电子-LO 声子散射; 探究载流子输运路径和机制对器件温度性能的影响, 特别是与激光能级有关的传输路径和机制。图 7(a) 为激光子上部电子的净散射率。在 25 K 时, 电子-电子散射为主导机制。热激活的电子-LO 声子散射将电子传输回注入水平, 导致注入效率下降。随着温度的升高, 电子-LO 声子介导的非辐射跃迁从激光的上层子带向下层子带明显增强。这种强泄漏路径使上激光能级寿命快速下降, 导致了粒子数反转。

图 7(b) 为与低激光子带相关的电子传输。在 25 K 时, 注入子带的载流子主要通过电子-电子散射从子带注入, 当温度升高至 100 K 时, 电子-LO 声子散射发生作用。在低温下, 电子-电子散射为主要机制。随着温度升高至 100 K, 抽取子带中的电子获得了足够的动能填充于较低的激光子带中, 电子-LO 声子散射对低激光子带衰减的影响增强, 并将克服电子-电子散射的影响。

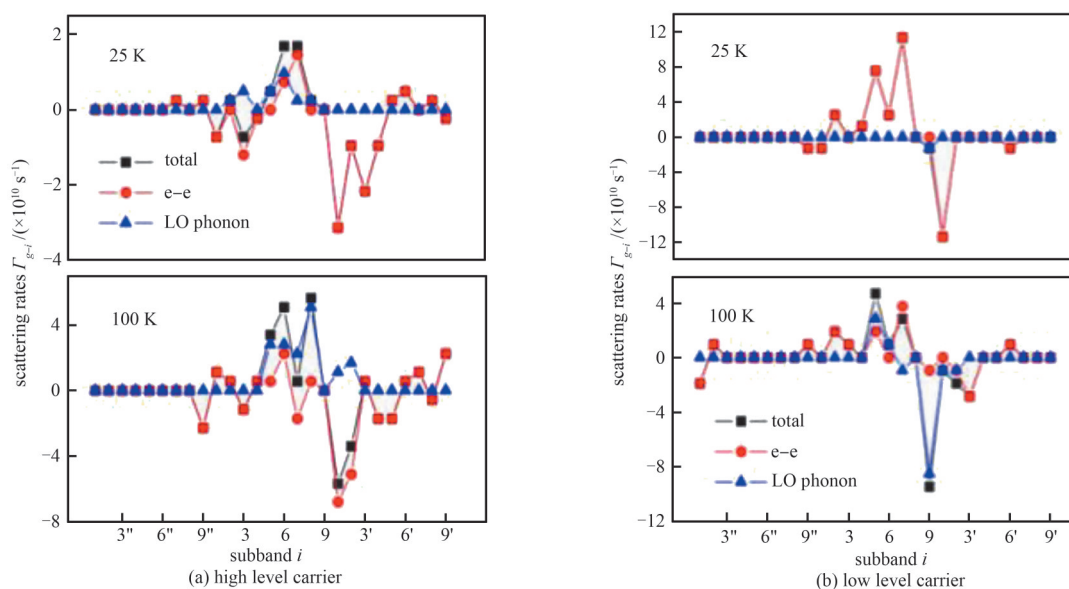


Fig.7 Effect of temperature on carrier transport path and scattering mechanism

图 7 温度对载流子输运路径和散射机制的影响

通过近些年 THz QCL 的发展可以看出, 研究各种散射对于理解器件的电子结构、能带结构和输运性质非常重要。在 THz QCL 中, 电离杂质散射可以影响电子的迁移率和载流子浓度, 从而影响器件的性能。通过设计新

型结构, 控制电离杂质的类型、浓度和分布, 可以调节材料的电子结构和能带结构, 从而实现特定的性能要求。界面粗糙散射对于进一步优化和改进 THz QCL 非常有帮助, 界面粗糙度散射的研究可以通过模拟和实验进行。在了解界面粗糙度散射对器件的影响后可采取相应的措施减小其影响, 提高器件的性能。电子-声子散射可以帮助更好地理解散射过程和能带结构的相互作用, 从而指导设计和优化高性能的 THz QCL。在了解各种散射对 QCL 设计的影响后, 对于理解材料的性质、优化器件性能、设计新型结构以及改进制备和加工技术都具有重要的帮助。

2.4 子带间电子温度对 QCL 影响

2019 年, 中国工程物理研究院陈鹏等^[59]报道了 QCL 的子带电子温度研究。采用一种基于粒子群优化算法的方法获取 QCL 活性区导带的电子温度, 从而获得了室温、低温和各种外部电场下的精确子带电子温度; 此外, 还讨论了 QCL 运行中子带电子温度的变化和分布, 获得了激光增益和 $I-U$ 曲线。这些实验结果表明考虑子带电子温度可以提高对 QCL 的理解。

电子温度和各个子带电子温度的变化是精确定各子带电子分布的关键。仿真中提供了 QCL 有源区中每个子带的电子温度。图 8(a) 中的黑线为 QCL 的每个子带在 80 K 时的电子温度, 红色虚线为 QCL 的每个子带在 300 K 时的电子温度, 当外部电场增加时, QCL 的电子温度升高。但在 QCL 开始辐射后, 上部的激光光子带温度不管在低温还是室温下都会下降, 因为热能通过转化为光辐射而释放出来。图 8(b) 显示, 在低温下, 子带 A2 的电子温度低于 A3, 而在室温下则相反。这表明, 在低温条件下, 电子更容易通过电子-声子散射释放能量, 从激光光子带 A3 到 A2 的跃迁效率也高于室温, 这也是 QCL 在低温下阈值电流通常小于室温下阈值电流的原因。

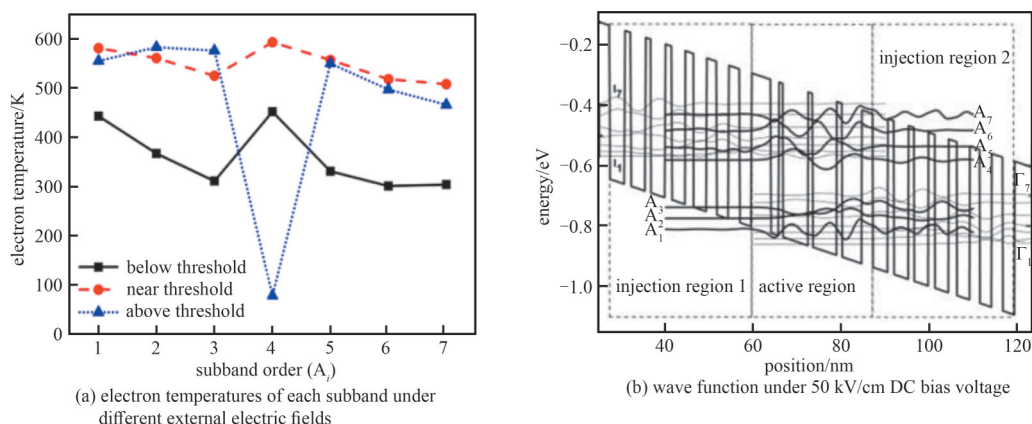


Fig.8 Subband electron temperature after electric field application and wave function under 50 kV/cm DC bias voltage
图 8 加电场后的子带电子温度和 50 kV/cm 直流偏压下的波函数

通过比较低温和室温下每个子带与 QCL 的电子温度, 确认了每个子带的电子分布和状态, 晶格温度对上激光光子带的电子分布影响不大, 其主要影响下激光光子带 A1 和子带 A2 的电子温度, 通过比较不同外电场下各子带的电子温度, 可以改变电子分布, 特别是改变激光光子带中的电子分布。此外, 可以根据每个子带的电子温度计算 QCL 的增益和 $I-U$ 曲线。最后, 通过将仿真结果与实验结果进行比较发现, 考虑每个子带的电子温度可以得到更准确的仿真结果, 该方法有助于更准确地研究 QCL 的特性。

在理解子带电子温度对量子级联激光器性能的影响后, 可进一步研究子带电子温度对 QCL 的输出功率、波长和谱线宽度等性能指标的影响。通过调节子带电子温度, 可以优化 QCL 的性能, 提高其应用潜力。研究子带电子温度与晶格温度之间的关系, 探索它们之间的相互作用和影响, 有助于更好地理解 QCL 的热特性, 并为优化 QCL 的设计提供指导。此外, 还可以探索更准确和更可靠的测量子带电子温度的方法。目前, 测量子带电子温度的实验方法还比较有限, 发展新的测量技术可以提高对 QCL 性能的理解和研究。

3 有源区势垒高度、掺杂层等对 QCL 的影响

2008 年, LI 等^[60]利用蒙特卡罗方法, 研究了注入区势垒高度对共振声子 THz QCL 性能的影响, 将提取区势垒高度从 48 Å 变化到 33 Å, 计算结果显示, 随着注入区势垒高度的减小, 阈值电流密度从 436 A/cm² 增加到 1 054 A/cm², 而峰值增益则呈现显著的变化。这些发现与实验研究结果相吻合。模拟结果如图 9 所示, 对于峰值增益和最佳温度性能, 最佳提取势垒高度为 36 Å。注入势垒高度对器件阈值电流的影响也得到了研究, 与隧穿

层的结果相反, 注入区势垒越厚, 阈值电流密度越小, 但过厚的注入区势垒会降低电子的注入和收集效率, 从而降低粒子数反转和增益。

2012 年, S Fathololoumi 等^[53]通过优化振荡子强度, 提高了量子级联激光器的增益, 增强了性能。通过改进注入隧道效应, 提高了激光器的温度性能, 使其能够在更高的温度下工作, 最终成功地设计出在 199.5 K 下工作的 THz QCL, 这是当时温度性能最好的设计之一。隧穿势垒高度的选择采用简化的密度矩阵模型确定, 该模型收敛的隧穿耦合强度比之前探索的更高, 且在设计电场下, 跨注入和提取势垒的状态几乎完美对齐。在 8 K 时, 器件的阈值电流密度为 1 kA/cm², 峰值输出功率为 38 MW, 激光频率随偏压的增加从 2.6 THz 蓝移至 2.85 THz。波长蓝移至 3.22 THz, 接近最大工作温度 199.5 K。图 10 为在 12.2 kV/cm 的偏压下, 优化后的 THz QCL 导带图。

2021 年, A Khalatpour 等^[61]通过改变有源区势垒高度, 抑制载流子泄漏, 探索高度增加对 QCL 工作温度的影响。当时的普遍结论是, 较厚的阻挡层会引起合金散射和界面粗糙度散射, 这对器件性能以及散热是有害的, 因此大多避免使用较高的 Al 组成的势垒层。之后, 发现高势垒层在升温以后会出现以往忽略的载流子泄漏通道。A Khalatpour 等通过精心设计, 减少这种通道, 发现 Al 成分为 30% 的器件还保持理想的非线性电流-电压特性。但之前的 THz QCL 在室温下显示为几乎线性的电流-电压特性, 表明许多泄漏通道被激活。为解决这个问题, 研究团队设计了一种新的方案, 即采用更高的注入势垒和辐射势垒阻止热泄漏通道。通过增加注入势垒的高度, 可以阻止电子在势垒之间的泄漏。图 11(a)~(b)为器件的电学和光学特性, 表明 QCL 在 250 K 仍可以激射; 而且在 QCL 中, 阈值电流 J_{th} 在高温下成指数增长, 表明电子泄漏通道被激活, 且图 11(a)的插图和图 11(b)的 J - U 曲线也显示了室温的负差电阻。两个特征结合表明, 在最高温度下没有很多的电子泄漏。同时, 通过增加辐射势垒的高度, 可以进一步减少到副通道的泄漏, 但会减小振荡强度从而降低增益。此外, 研究团队还通过优化量子阱的高度减少电子与光子之间的相互作用, 降低热泄漏的可能。最终通过优化 QCL 的结构设计, 解决了热泄漏和其他副通道导致的性能下降问题, 实现了 QCL 在高温下稳定工作。

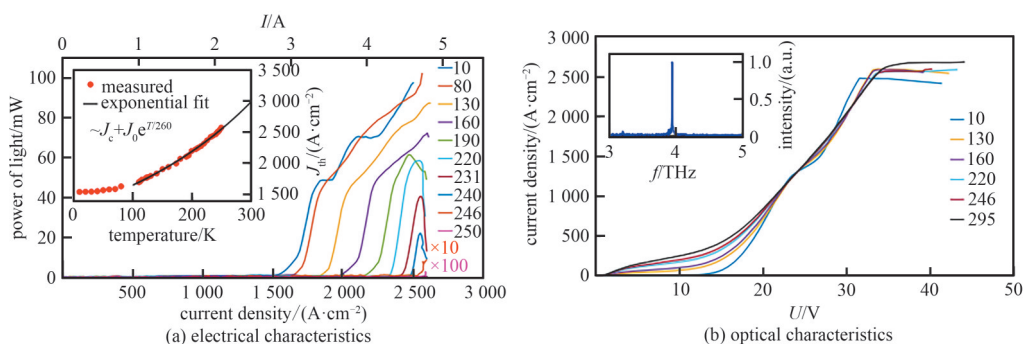


Fig.11 Electrical and optical properties of devices

图 11 器件的电学和光学特性

2023 年, 该团队通过优化设计和生长条件以及改变注入区的组成和结构进一步提高 QCL 的工作温度^[6]。图 12(a)为 2 个方案的导带图, 通过将 2 个注入区的能带结构进行优化, 可减少电子和空穴之间的散射, 提高增益。此外, 通过调整注入层的高度和掺杂浓度, 可进一步提高增益。

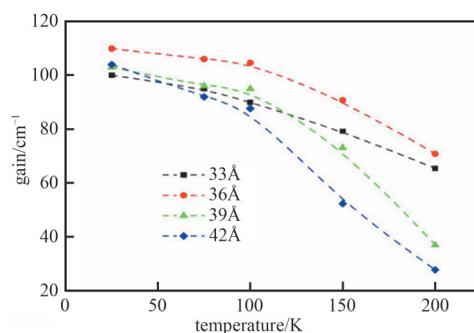


Fig.9 The variation of calculated gain with temperature for different extraction barrier widths

图 9 不同提取势垒高度的增益随温度的变化

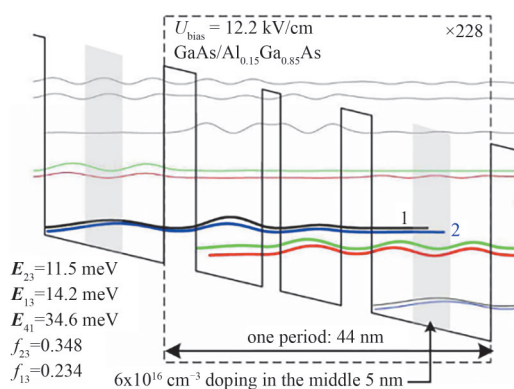


Fig.10 Conduction band diagram of optimized THz QCL under bias voltage of 12.2 kV/cm

图 10 12.2 kV/cm 的偏压下, 优化后的 THz QCL 的导带图

两阱可以实现更高的增益和更低的阈值电流,但在高温下存在注入区的泄漏问题。为此,提出三阱方案,如图 12(b)所示。通过增加注入区的数量,减少泄漏,从而提高工作温度。尽管这种设计方案需要更高的掺杂浓度和更长的周期长度,但模拟结果显示,通过减少注入层的高度和增加掺杂浓度,可以实现在室温下工作。然而实验结果表明,这种设计方案存在寿命限制和热泄漏问题。为此,研究人员进一步优化了生长条件,以减少界面缺陷,并提出减少注入层高度的方法提高增益。通过这些改进,成功地将 THz QCL 的最高工作温度提高到 261 K,这是迄今为止三层注入层方案的最高工作温度。

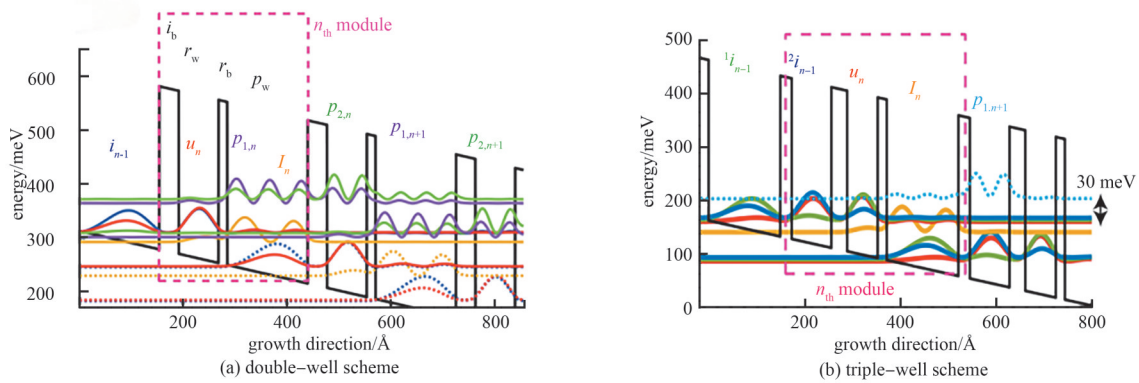


Fig.12 Band diagrams of different schemes

图 12 不同方案的导带图

2024 年, Novak Stanojević 等^[62]研究了背景掺杂、界面扩散和势垒高度对 THz QCL 生长过程中的输运特性影响。图 13 为背景掺杂对 QCL 的影响,从图中可以发现, n 型背景掺杂会增加电流密度,降低材料增益,其中束缚态向连续态跃迁(Bound-to-Continuum, BTC)设计对 n 型背景掺杂最为敏感,其次是复合设计和电子-LO 声子设计。而 p 型背景掺杂会减小电流密度,增加材料增益。其中, BTC 设计和复合设计对界面扩散的敏感性高于电子-LO 声子设计, BTC 设计对 p 型背景掺杂的敏感性最高。界面扩散会扩大注入势垒底部,降低共振隧穿效应,从而降低注入电流。势垒高度会导致 QCL 的材料增益和电流密度发生显著变化,有些结构甚至无法正常工作;电子-LO 声子设计和混合设计对层厚波动的敏感性更高,而 BTC 设计对能带能量的偏移敏感度低,可承受更多的高度变化仍能正常工作。研究还分析了最新的 261 K 高温电子-LO 声子结构^[5],发现相对于低势垒的 200 K 电子-LO 声子结构, 261 K 结构对界面扩散更为敏感;此外研究还探讨了其他材料系统中可能出现的背景掺杂和生长波动的影响。该团队对高温 THz QCL 的性能限制和增益相关效应进行了深入研究,为进一步优化和改进 THz QCL 的设计提供了重要的参考。目前关于 THz QCL 电子输运相关的研究尚在起步阶段,相关成熟的研究结果较少,从目前的研究以及发展看,对于 THz QCL 电子输运的研究进一步加深和提高器件的各方面性能还存在比较大的挑战。

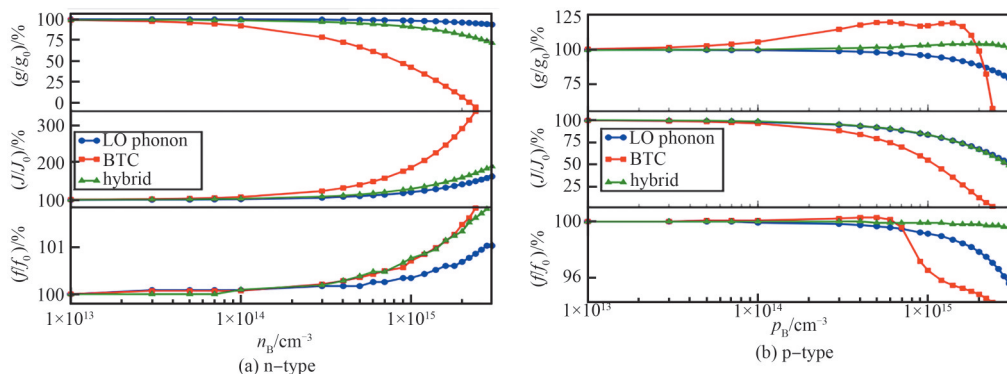


Fig.13 The influence of background doping on QCL

图 13 背景掺杂对 QCL 的影响

从有源区势垒高度、掺杂层等对 THz QCL 影响可以看出,注入区势垒高度对共振声子 THz QCL 性能有显著影响,减小注入区势垒高度可以增加器件的电流密度,从而提高性能。但过薄的提取区屏障会导致电子隧穿效应减弱,降低了能级的去激发效率,从而降低了器件的性能。未来的研究可进一步探索其他参数对 THz QCL 性能的影响,如注入区势垒材料的选择、结构设计的优化等。此外,可通过实验验证模拟结果,并进一步优化器

件的性能。这些研究将有助于推动 THz QCL 技术的发展和應用。其次, 可进一步探索生长效应对 THz QCL 性能的影响, 并提出更有效的设计减小这些影响。这需要更深入地研究器件的电子输运机制和光电特性, 以便更好地理解和控制器件的工作原理, 进一步优化 THz QCL 的设计, 提高其效率和稳定性, 满足实际应用需求。可以探索新的材料和技术, 以实现更高的振子强度和更低的波导损耗, 进一步推动 THz QCL 的发展, 拓展其在通信、成像和传感等领域的应用。

4 展望和总结

通过 THz QCL 的研究进展可以看出, 近 20 年来, THz QCL 作为重要的 THz 辐射源, 始终朝着更高性能的方向发展, 在激射频率拓宽、工作温度提高和输出功率提升等方面已取得了显著成果, 在应用方面也实现了光束整形、出光效率提升、谱控制、频率调谐等突破。但目前 THz QCL 还没有出现满足需求的高性能器件, 从最根本、最基础的电子输运方向出发是突破这一关键的基础。THz QCL 涉及的多个散射机制对激光器的性能和工作温度都有重要影响, 了解和控制这些散射机制对于优化量子级联激光器的设计和性能提升具有重要意义, 进一步的研究可以帮助我们更全面地理解这些散射机制对激光器性能的影响, 并为激光器的进一步发展提供指导。另外, 通过优化设计和生长条件, 改变注入层的组成和结构, 以及减少界面缺陷、优化注入层厚度和增加掺杂浓度等方法, 成功提高了 THz QCL 的最高工作温度, 并解决了热泄漏和其他副通道导致的性能下降的问题, 实现了 THz QCL 在高温下稳定工作; 不同的有源区结构, 如四阱有源区和三阱有源区结构, 在低频率激射和高工作温度方面具有优势, 可以根据具体需求选择合适的有源区结构。这些研究结果对于优化 THz QCL 的设计和性能提升具有重要意义。

总之, 随着应用的需求, 制备出性能符合需求的 THz QCL 是必然趋势。未来的研究可继续深入探索 THz QCL 电子输运的机制和影响因素, 从而进行针对性的理论设计以进一步提高 THz QCL 的性能以及扩大实际应用范围。

参考文献:

- [1] GMACHL C, CAPASSO F, SIVCO D L, et al. Recent progress in quantum cascade lasers and applications[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2001, 64(11):1533. DOI:10.1088/0034-4885/64/11/204.
- [2] FIGUEIREDO P, SUTTINGER M, GO R, et al. Progress in high-power continuous-wave quantum cascade lasers[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(31):H15-H23. DOI:10.1364/AO.56.000H15.
- [3] 刘莹, 蒋涛, 杨奇, 等. 中红外可调谐量子级联激光器研究进展[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2024, 22(1):87-95. (LIU Ying, JIANG Tao, YANG Qi, et al. Research progress on mid infrared tunable quantum cascade lasers[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2024, 22(1):87-95.) DOI:10.11805/TKYDA2021386.
- [4] KÖHLER R, TREDICUCCI A, BELTRAM F, et al. Terahertz semiconductor-heterostructure laser[J]. *Nature*, 2002, 417(6885):156-159. DOI:10.1038/417156a.
- [5] VIJAYRAGHAVAN K, JIANG Y, JANG M, et al. Broadly tunable terahertz generation in mid-infrared quantum cascade lasers[J]. *Nature Communications*, 2013, 4(1):2021-1-7. DOI:10.1038/ncomms3021.
- [6] FREEMAN J R, PONNAMPALAM L, SHAMS H, et al. Injection locking of a terahertz quantum cascade laser to a telecommunications wavelength frequency comb[J]. *Optica*, 2017, 4(9):1059-1064. DOI:10.1364/optica.4.001059.
- [7] WANG F, NONG H, FOBBE T, et al. Short terahertz pulse generation from a dispersion compensated mode locked semiconductor laser[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(4):1700013. DOI:10.1002/lpor.201770042.
- [8] KUMAR S, CHAN C W I, HU Q, et al. Operation of a 1.8-THz quantum-cascade laser above 160 K[C]// *Conference on Lasers and Electro-Optics*. San Jose, California United States: Optica Publishing Group, 2010: CThU1. DOI:10.1063/5.0144705.
- [9] WILLIAMS B S. Terahertz quantum-cascade lasers[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(9):517-525. DOI:10.1038/NPHOTON.2007.166.
- [10] WALTHER C, FISCHER M, SCALARI G, et al. Quantum cascade lasers operating from 1.2 to 1.6 THz[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(13):131122. DOI:10.1063/1.2793177.
- [11] KHALATPOUR A, TAM M C, ADDAMANE S J, et al. Enhanced operating temperature in terahertz quantum cascade lasers based on direct phonon depopulation[J]. *Applied Physics Letters*, 2023, 122(16):161101. DOI:10.1063/5.0144705.
- [12] LI L H, CHEN L, FREEMAN J R, et al. Multi-Watt high-power THz frequency quantum cascade lasers[J]. *Electronics Letters*, 2017, 53(12):799-800. DOI:10.1049/EL.2017.0662.
- [13] CURWEN C A, RENO J L, WILLIAMS B S. Broadband continuous single-mode tuning of a short-cavity quantum-cascade VECSEL[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(12):855-859. DOI:10.1038/s41566-019-0518-z.

- [14] 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):180–184. (SUN Jingnan,SUN Wenjun,ZHAO Liping,et al. Study of the factors influencing the properties of AlGaIn/GaN quantum cascade lasers [J]. Acta Optica Sinica, 2012,32(2):180–184). DOI:10.3788/AOS201232.0214002.
- [15] 陈贵楚,范广涵. Al组分对 AlGaIn/GaN 量子级联激光器性能的影响[J]. 发光学报, 2009,30(4):473–476. (CHEN Guichu,FAN Guanghan. Effect of Al composition on the properties of GaN-based quantum cascade laser[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2009,30(4):473–476). DOI:CNKI:SUN:FGXB.0.2009–04–016.
- [16] 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. DOI:10.1364/oe.23.002720.
- [17] 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. DOI:10.1002/pssa.200824314.
- [18] EE H K,YU J S. Thermal analysis of short wavelength InGaAs/InAlAs quantum cascade lasers[J]. Solid-State Electronics, 2010, 54(8):769–776. DOI:10.1016/j.sse.2010.03.015.
- [19] PIERŚCIŃSKI 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. DOI:10.1063/1.4746791.
- [20] 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. DOI:10.1109/lpt.2014.2326043.
- [21] BELKIN M A,WANG Q J,PFLUGL C,et al. High-temperature operation of terahertz quantum cascade laser sources[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009,15(3):952–967. DOI:10.1109/jstqe.2009.2013183.
- [22] VITIELLO M S,SCALARI G,WILLIAMS B,et al. Quantum cascade lasers:20 years of challenges[J]. Optics Express, 2015,23(4): 5167–5182.) DOI:10.1364/oe.23.005167.
- [23] DUPONT E,FATHOLOLOUMI S,WASILEWSKI Z R,et al. A phonon scattering assisted injection and extraction based terahertz quantum cascade laser[J]. Journal of Applied Physics, 2012,111(7):073111. DOI:10.1063/1.3702571.
- [24] RAZAVIPOUR S G,DUPONT E,FATHOLOLOUMI S,et al. An indirectly pumped terahertz quantum cascade laser with low injection coupling strength operating above 150 K[J]. Journal of Applied Physics, 2013,113(20):203107.) DOI:10.1063/1.4807580.
- [25] DINH T V,VALAVANIS A,LEVER L J M,et al. Extended density-matrix model applied to silicon-based terahertz quantum cascade lasers[J]. Physical Review B, 2012,85(23):235427. DOI:10.1103/physrevb.85.235427.
- [26] PAN A,BURNETT B A,CHUI C O,et al. Density matrix modeling of quantum cascade lasers without an artificially localized basis:a generalized scattering approach[J]. Physical Review B, 2017,96(8):085308. DOI:10.1103/physrevb.96.085308.
- [27] CALLEBAUT H,KUMAR S,WILLIAMS B S,et al. Analysis of transport properties of tetrahertz quantum cascade lasers[J]. Applied Physics Letters, 2003,83(2):207–209. DOI:10.1063/1.1590749.
- [28] JIRAUSCHEK C,LUGLI P. Monte-Carlo-based spectral gain analysis for terahertz quantum cascade lasers[J]. Journal of Applied Physics, 2009,105(12):123102. DOI:10.1063/1.3147943.
- [29] LEE S C,WACKER A. Nonequilibrium Green's function theory for transport and gain properties of quantum cascade structures[J]. Physical Review B, 2002,66(24):245314. DOI:10.1103/physrevb.66.245314.
- [30] LIU T,KUBIS T,JIE WANG Q,et al. Design of three-well indirect pumping terahertz quantum cascade lasers for high optical gain based on nonequilibrium Green's function analysis[J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(12): 122110. DOI: 10.1063/1.3697674.
- [31] INDJIN D,HARRISON P,KELSALL R W,et al. Self-consistent scattering theory of transport and output characteristics of quantum cascade lasers[J]. Journal of Applied Physics, 2002,91(11):9019–9026. DOI:10.1063/1.1474613.
- [32] DUPONT E,FATHOLOLOUMI S,LIU H C. Simplified density-matrix model applied to three-well terahertz quantum cascade lasers[J]. Physical Review B, 2010,81(20):205311. DOI:10.1103/physrevb.81.205311.
- [33] JACOBONI C,REGGIANI L. The Monte Carlo method for the solution of charge transport in semiconductors with applications to covalent materials[J]. Reviews of Modern Physics, 1983,55(3):645. DOI:10.1103/revmodphys.55.645.
- [34] LEE S C,WACKER A. Nonequilibrium Green's function theory for transport and gain properties of quantum cascade structures[J]. Physical Review B, 2002,66(24):245314. DOI:10.1103/physrevb.66.245314.
- [35] FLORES Y V,ALBO A. Impact of interface roughness scattering on the performance of GaAs/Al_xGa_{1-x}As terahertz quantum cascade lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2017,53(3):1–8. DOI:10.1109/jqe.2017.2732404.
- [36] GRANGE T. Contrasting influence of charged impurities on transport and gain in terahertz quantum cascade lasers[J]. Physical Review B, 2015,92(24):241306. DOI:10.1103/physrevb.92.241306.

- [37] CALLEBAUT H, KUMAR S, WILLIAMS B S, et al. Importance of electron-impurity scattering for electron transport in terahertz quantum-cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(5): 645-647. DOI:10.1063/1.1644337.
- [38] NELANDER R, WACKER A. Temperature dependence and screening models in quantum cascade structures[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 6(6): 063115. DOI:10.1063/1.3226072.
- [39] LYU J T, CAO J C. Coulomb scattering in the Monte Carlo simulation of terahertz quantum-cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(21): 211115. DOI:10.1063/1.2397028.
- [40] SCHNABEL R F, ZIMMERMANN R, BIMBERG D, et al. Influence of exciton localization on recombination line shapes: $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ quantum wells as a model[J]. *Physical Review B*, 1992, 46(15): 9873. DOI:10.1103/physrevb.46.9873.
- [41] ROBLIN P, POTTER R C, FATHIMULLA A. Interface roughness scattering in $\text{AlAs}/\text{InGaAs}$ resonant tunneling diodes with an InAs subwell[J]. *Journal of Applied Physics*, 1996, 79(5): 2502-2508. DOI:10.1063/1.361104.
- [42] NAG B R. Interface roughness scattering limited mobility in AlAs/GaAs , $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$ and $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}/\text{GaAs}$ quantum wells[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2003, 19(2): 162. DOI:10.1088/0268-1242/19/2/006.
- [43] FRANCKIÉ M, WINGE D O, WOLF J, et al. Impact of interface roughness distributions on the operation of quantum cascade lasers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 5201-5212. DOI:10.1364/oe.23.005201.
- [44] CHENG J, QUACH P, WANG D, et al. Dominant influence of interface roughness scattering on the performance of GaN terahertz quantum cascade lasers[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2019(14): 1-7. DOI:10.1186/s11671-019-3043-6.
- [45] JIRAUSCHEK C, KUBIS T. Modeling techniques for quantum cascade lasers[J]. *Applied Physics Reviews*, 2014, 1(1): 011307. DOI:10.1063/1.4863665.
- [46] HESS K. *Advanced theory of semiconductor devices*[M]. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1999.
- [47] NELANDER R, WACKER A. Temperature degradation of the gain transition in terahertz quantum cascade lasers: the role of acoustic phonon scattering[J]. *Physica Status Solidi C*, 2009, 6(2): 579-582. DOI:10.1002/pssc.200880318.
- [48] HARRISON P, VALAVANIS A. *Quantum wells, wires and dots: theoretical and computational physics of semiconductor nanostructures*[M]. New York, USA: John Wiley & Sons, 2016.
- [49] EE S C, GALBRAITH I. Intersubband and intrasubband electronic scattering rates in semiconductor quantum wells[J]. *Physical Review B*, 1999, 59(24): 15796. DOI:10.1103/physrevb.59.15796.
- [50] BRUUS H, FLENSBERG K. *Many-body quantum theory in condensed matter physics: an introduction*[M]. Oxford, USA: Oxford University Press, 2004.
- [51] WILLIAMS B S, CALLEBAUT H, KUMAR S, et al. 3.4 THz quantum cascade laser based on longitudinal-optical-phonon scattering for depopulation[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(7): 1015-1017. DOI:10.1063/1.1554479.
- [52] CURL R F, CAPASSO F, GMACHL C, et al. Quantum cascade lasers in chemical physics[J]. *Chemical Physics Letters*, 2010, 487(1-3): 1-18. DOI:10.1016/j.cplett.2009.12.073.
- [53] FATHOLOLOUMI S, DUPONT E, CHAN C W I, et al. Terahertz quantum cascade lasers operating up to 200 K with optimized oscillator strength and improved injection tunneling[J]. *Optics express*, 2012, 20(4): 3866-3876. DOI:10.1364/oe.20.003866.
- [54] KHURGIN J B, DIKMELIK Y, LIU P Q, et al. Role of interface roughness in the transport and lasing characteristics of quantum-cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(9): 091101. DOI:10.1063/1.3093819.
- [55] KRIVAS K A, WINGE D O, FRANCKIÉ M, et al. Influence of interface roughness in quantum cascade lasers[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 118(11): 114501. DOI:10.1063/1.4930572.
- [56] CALLEBAUT H, KUMAR S, WILLIAMS B S, et al. Analysis of transport properties of terahertz quantum cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(2): 207-209. DOI:10.1063/1.1590749.
- [57] CALLEBAUT H, HU Q. Importance of coherence for electron transport in terahertz quantum cascade lasers[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98(10): 104505. DOI:10.1063/1.2136420.
- [58] HAN Y J, CAO J C. Temperature dependence of electron transport on a bound-to-continuum terahertz quantum cascade laser[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2011, 27(1): 015002. DOI:10.1088/0268-1242/27/1/015002.
- [59] CHEN Peng, SUN Yuankun, ZHU Liguang, et al. Investigation of subband electron temperatures of quantum cascade lasers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(1): 1-10. DOI:10.1109/jphot.2019.2896081.
- [60] LI H, CAO J C, LYU J T, et al. Monte Carlo simulation of extraction barrier width effects on terahertz quantum cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(22): 221105. DOI:10.1063/1.2939435.
- [61] KHALATPOUR A, PAULSEN A K, DEIMERT C, et al. High-power portable terahertz laser systems[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(1): 16-20. DOI:10.1038/s41566-020-00707-5.