

太赫兹量子级联激光器中有源区上激发态电子向高能级泄漏的研究

李金锋 万婷 王腾飞 周文辉 莘杰 陈长水

Electrons leakage from upper laser level to high energy levels in active regions of terahertz quantum cascade lasers

Li Jin-Feng Wan Ting Wang Teng-Fei Zhou Wen-Hui Xin Jie Chen Chang-Shui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 021101 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20181882

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181882>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

太赫兹量子级联激光器频率梳的色散

Group velocity dispersion analysis of terahertz quantum cascade laser frequency comb

物理学报. 2019, 68(10): 109501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190217>

近800 nm波长张应变GaAsP/AlGaAs量子阱激光器有源区的设计

Design of active region for GaAsP/AlGaAs tensile strain quantum well laser diodes near 800 nm wavelength

物理学报. 2018, 67(6): 067801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171816>

三阶分布反馈太赫兹量子级联激光器的远场分布特性

Far-field analysis of third-order distributed feedback terahertz quantum cascade lasers

物理学报. 2017, 66(9): 099501 <https://doi.org/10.7498/aps.66.099501>

有源光纤中稀土离子激光上能级寿命测量的研究

Upper-laser-level lifetime measurement of rear earth dopant in active fiber

物理学报. 2019, 68(22): 224202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190616>

基于单个量子级联激光器的大气多组分测量方法

Detection of atmospheric multi-component based on a single quantum cascade laser

物理学报. 2017, 66(9): 094203 <https://doi.org/10.7498/aps.66.094203>

太赫兹量子级联激光器中有源区上激发态电子向高能级泄漏的研究*

李金锋¹⁾ 万婷¹⁾ 王腾飞¹⁾ 周文辉¹⁾ 莘杰¹⁾ 陈长水^{1)2)†}

1) (华南师范大学信息光电子科技学院, 广东省微纳光子功能材料与器件重点实验室, 广州市特种光纤光子器件与应用重点实验室, 广州 510006)

2) (江门珠西激光智能科技有限公司, 江门 529000)

(2018年10月22日收到; 2018年11月21日收到修改稿)

利用热力学统计理论和激光器输出特性理论, 建立了太赫兹量子级联激光器 (THz QCL) 有源区中上激发态电子往更高能级电子态泄漏的计算模型, 以输出功率度量电子泄漏程度研究分析了晶格温度和量子阱势垒高度对电子泄漏的影响. 数值仿真结果表明, 晶格温度上升会加剧电子泄漏, 并且电子从上激发态泄漏到束缚态的数量大于泄漏到阱外连续态, 同时温度的上升也会降低激光输出功率. 增加量子阱势垒高度能抑制电子泄漏, 并且有源区量子阱结构中存在着一个最优量子阱势垒高度. THz QCL 经过最优量子阱势垒高度优化后, 工作温度得到提升, 其输出功率相比于以往的结果也有所提高. 研究结果对优化 THz QCL 有源区结构、抑制电子泄漏和改善激光器输出特性有指导作用.

关键词: 太赫兹, 量子级联激光器, 电子泄漏, 有源区

PACS: 11.10.St, 42.50.-p, 42.55.-f, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.68.20181882

1 引言

太赫兹 (terahertz, THz) 波是指频率为 0.1—10 THz 的电磁波, 具有安全性、宽带性、指纹谱特性和穿透性等特点, 被广泛应用于医学、通信和雷达等领域^[1-6]. 太赫兹量子级联激光器 (terahertz quantum cascade laser, THz QCL) 是一种有效获得 THz 波的半导体激光器^[7-10], 其利用半导体异质结在外加电压的情况下, 具有量子态级联的效果, 进而声子辅助电子共振使得电子从上一级到达下一级, 外部注入的单个电子可以发射出多个光子. 然而, 存在一部分电子在运输过程中会偏离运输路径, 直接降低激光器系统的粒子数反转, 使得激光器输出功率受限, 这部分电子被称为泄漏电子. 为了更好地提高激光器输出效率, 有必要对电

子泄漏进行研究.

电子泄漏主要分为三个方式: 一是电子从上激发态通过长纵声子散射到低能态; 二是电子从下激发态散射到高能束缚态和连续态; 三是电子从上激发态散射到高能束缚态和连续态. 在 THz QCL 中, 处于上激发态的电子向下激发态跃迁发光占据主导, 因此电子从上激发态通过长纵声子散射到低能态相对较小; 电子下激发态与高能束缚态和连续态的耦合强度低, 因此电子从下激发态散射到高能束缚态和连续态跃迁概率低; 而第三种泄漏方式中上激发态的电子是由上一周期的基态注入, 该状态下电子具有较高的不稳定性, 当温度升高时, 电子向更高能级泄漏概率大, 因此在高温的环境下, 电子从上激发态散射到高能束缚态和连续态是电子泄漏的主要途径. 目前, 大多数研究者都是通过间

* 广东省自然科学基金 (批准号: 2015A030313383) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: cschen@aiofm.ac.cn

接测量来解释电子泄漏^[11–16], 通过建立理论模型来分析的研究较少.

本文利用热力学理论结合激光器输出特性, 建立电子从上激发态散射到高能束缚态和连续态的电子泄漏计算模型, 重点研究该模型中晶格温度和量子阱势垒高度对电子泄漏的影响, 进而找到抑制电子泄漏的有效措施来提高激光器输出功率.

2 理论模型

本节利用如图 1 所示的 THz QCL 能级结构^[17]研究电子从上激发态泄漏到高能束缚态和阱外连续态的泄漏方式. 图中 1, 2, 3, 4 分别表示基态、3 态的孪生态、下激发态、上激发态, 5 和 6 表示近邻束缚态和次近邻束缚态, 7 表示阱外连续态, 1' 表示上一周期的基态, 4'' 表示下一周期的上激发态. 该能级结构由 GaAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As 材料系统建造的量子阱形成, 发射的激光频率 $\nu \approx E_{ph}/h \approx 3.9$ THz, h 为普朗克常量, $E_{ph} = 15.6$ meV 为光子能量; 有源区材料的声子能量 $E_{LO} = 36.8$ meV; 能级参数 $E_{47} = 130$ meV, $E_{46} = 95$ meV, $E_{45} = 39$ meV 分别表示 7 态与 4 态、6 态与 4 态、5 态与 4 态之间的能量差; J_{45} , J_{46} , J_{47} 分别表示电子从 4 能态泄漏到 5, 6, 7 能态的泄漏电流密度. 该激光器系统是通过优化振子强度, 并采用斜跃迁形式发光, 能形成更大的粒子数反转, 具有一定的典型性. 在 THz 波的产生过程中, 电子从上一周期的 1' 态弛豫到达 4 态, 然后从 4 态跃迁到 3 态发射出 THz 光子, 接着 3 态和 2 态上的电子通过声子辅助共振到达 1 态, 随后进入下一级的 4'' 态. 在此

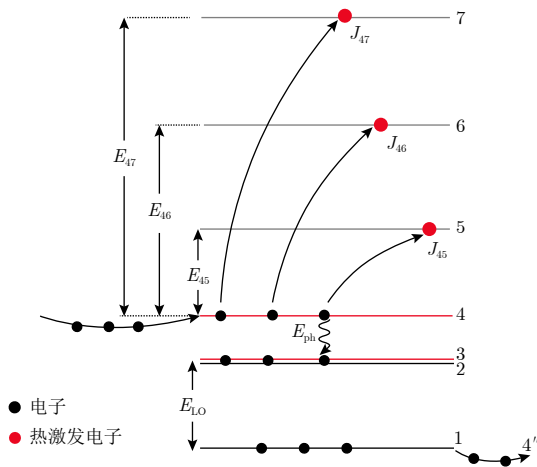


图 1 THz QCL 级联的能级结构

Fig. 1. Energy level structure of a single THz QCL cascade.

过程中, 4 态上的电子泄漏到 5 态、6 态和 7 态造成电子泄漏, 导致电子利用率降低, 不利于激光器的粒子数反转, 进而影响激光器输出功率. 我们用激光器的输出功率值衡量电子泄漏程度, 半导体激光器输出功率 P_{out} 可以描述为^[18]

$$P_{out} = \frac{1}{2} \frac{h\nu}{q} \cdot \frac{\alpha_m}{\alpha_m + \alpha_w} A\eta(J - J_{th}), \quad (1)$$

式中 $h\nu$ 为发射光子的能量; q 为电子电荷; α_m 和 α_w 分别为镜面损失和波导损失; A 为接触面积; η 为内量子效应; J 和 J_{th} 分别为注入电流密度和阈值电流密度.

THz QCL 发射的光子能量通常在 2—40 meV 之间^[19], 这远比中红外 QCL 要小, 这种结构上的差异使得 THz QCL 中 4 态波函数与 5 态、6 态和 7 态的波函数耦合更强, 4 态上的电子不稳定性更大, 造成 4 态上的电子向更高能级泄漏成为主要的泄漏部分. 在激光的阈值条件下, 我们主要分析电子从 4 态泄漏到 5 态、6 态和 7 态的泄漏模型, (1) 式改为

$$P_{out} = \frac{1}{2} \frac{h\nu}{q} \cdot \frac{\alpha_m}{\alpha_m + \alpha_w} A(J - J_{esc}). \quad (2)$$

式中 J_{esc} 为总泄漏电流密度, 由 4 态电子泄漏到 5 态、6 态和 7 态的泄漏电流密度 J_{45} , J_{46} , J_{47} 相加得到, 即 $J_{esc} = J_{45} + J_{46} + J_{47}$. 在没有电子泄漏且电子势能完全转化为光能的情况下, 激光器的最大输出功率为 $P_{max} = h\nu\alpha_m AJ / [2q(\alpha_m + \alpha_w)]$. 为了更加清晰地看出电子泄漏对激光器输出功率的影响, 将 (2) 式进行归一化:

$$\frac{P_{out}}{P_{max}} = \frac{J - J_{esc}}{J} = 1 - \frac{J_{esc}}{J} = 1 - \frac{J_{45} + J_{46} + J_{47}}{J}. \quad (3)$$

由 (3) 式可知, 归一化的输出功率与泄漏电流密度 J_{45} , J_{46} , J_{47} 有关, 接下来将对这三个参数进行分析. 先对 4 态上的电子泄漏到 5 态和 6 态对应的泄漏电流密度 J_{45} , J_{46} 进行分析. 设 j 为高能束缚态 ($j = 4, 5$), 当温度升高时, 4 态上的电子能吸收足够的能量跃迁到子带 j , 在有限的能量空间 $[E, E + dE]$ 中, 这种散射机制形成的电流密度可以表示为

$$dJ_{4j}(E, T_L, T_{e,4}) = \frac{q}{\tau_{4j}(E, T_L)} D^{2D} f_e^{FD}(E, T_{e,4}), \quad (4)$$

式中 $1/\tau_{4j}(E, T_L)$ 为电子从 4 态散射到子带 j 的散射时间; D^{2D} 为电子的二维面密度; f_e^{FD} 为 4 态上电子的费米狄拉克分布统计; $T_{e,4}$ 为 4 态上的电子

温度; T_L 为晶格温度. 假设晶格温度等于测量温度 T_L 和 $T_{e,4}$ 的关系有 $T_{e,4} = T_L + \alpha_{E-L}J$, 其中 α_{E-L} 为电子-晶格耦合常数^[20,21]. 对 (4) 式积分可得

$$J_{45} = \frac{qn_4}{\tau_{45}} \exp \left[-\frac{E_{45} - E_{LO}(1 - T_{e,4}/T_L)}{k_B T_{e,4}} \right], \quad (5)$$

$$J_{46} = \frac{qn_4}{\tau_{46}} \exp \left[-\frac{E_{46} - E_{LO}(1 - T_{e,4}/T_L)}{k_B T_{e,4}} \right]. \quad (6)$$

式中 n_4 为 4 态上的电子浓度; τ_{45} , τ_{46} 分别为 4 态上电子泄漏到 5 态和 6 态的时间; k_B 为玻尔兹曼常数.

接下来对 4 态上的电子泄漏到 7 态对应的泄漏通电流密度 J_{47} 进行分析. 由电子在能态上占据的时间与泄漏到该能态的电流密度之间的相互关系得

$$J_{47} = \frac{qn_4}{\tau_{47}}, \quad (7)$$

$$\frac{P_{out}}{P_{max}} = 1 - \frac{\sum_{j=5,6} \frac{qn_4}{\tau_{4j}} \exp \left[-\frac{E_{4j} - E_{LO}(1 - T_{e,4}/T_L)}{k_B T_{e,4}} \right] + \frac{q\pi(k_B T_{e,4})^2 m^* T_c}{h^3} \exp[-E_{47}/(k_B T_{e,4})]}{J}. \quad (10)$$

由 (10) 式可知, 激光器的输出功率与晶格温度和量子阱势垒高度密切相关, 在接下来的工作中将详细讨论这两个参数对激光器输出功率的影响. 在激光系统中, 7 态位于量子阱口, 为激光器系统最高的势能态, 我们用 7 态与 4 态之间的能量差 E_{47} 作为量子阱势垒参数, 并在第 3 节中对参数 E_{47} 最优值进行讨论与分析.

3 结果与讨论

本节将依据第 2 节建立的理论模型研究晶格温度和量子阱势垒高度对 THz QCL 电子泄漏的影响. 选取的仿真分析参数如下: 激光器发射频率为 3.9 THz, 最高运行温度为 186 K, 限制因子 $T_c = 0.86$ ^[23], 电子-晶格耦合常数 $\alpha_{E-L} \approx 30 \text{ K}\cdot\text{cm}^2/\text{kA}$ ^[20,21], 散射时间 $\tau_{45} = \tau_{46} \approx 1 \text{ ps}$ ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$), 注入电流密度 $J = 1000 \text{ A/cm}^2$ ^[17,24], 电子浓度等于掺杂浓度 $n_i \approx 3 \times 10^{10} / \text{cm}^3$ ^[17].

经过第 2 节的研究可发现, 晶格温度是影响电子泄漏的一个重要参数, 为解释电子泄漏的内在机制, 首先分析泄漏电流密度和晶格温度 T_L 的关系, 其关系曲线如图 2 所示. 由图 2 可知, 在 186 K 的晶格温度下, 电子从 4 态泄漏到 5 态、6 态和 7 态

式中 τ_{47} 为电子从 4 态散射到 7 态的时间. 电子的电荷 q 乘以 4 态上的电子浓度 n_4 等于 4 态上的电荷浓度, $1/\tau_{47}$ 表示电子从 4 态跃迁到 7 态的概率, 因此 (7) 式的物理意义为 4 态上的电子泄漏到 7 态对应的泄漏电流密度. 它是一个与温度有关的函数, 该函数关系可由热激发模型得到^[22]

$$\frac{1}{\tau_{47}} = \frac{k_B T_{e,4} N_{47}}{4\hbar n_4}, \quad (8)$$

其中 $N_{47} \approx [m^* T_c k_B T_{e,4} / (\pi \hbar^2)] \exp[-E_{47}/(k_B T_{e,4})]$ 表示电子从 4 态散射到 7 态的电子数, 其中 $\hbar = h/(2\pi)$, m^* 为电子的有效质量, T_c 为电子泄漏到连续态总的限制因子^[23]. 结合 (7) 式和 (8) 式可得

$$J_{47} = \frac{q\pi(k_B T_{e,4})^2 m^* T_c}{h^3} \exp[-E_{47}/(k_B T_{e,4})]. \quad (9)$$

将 (5) 式, (6) 式和 (9) 式代入 (3) 式可以得到电子泄漏模型下的归一化输出功率表达式

的总泄漏电流密度为 810 A/cm^2 , 模拟数值与文献报道的实验值吻合^[17,24]. 从图 2 还可以看出, 当晶格温度从 80 K 增加到 200 K 时, 电子泄漏随着温度的增加而不断增大, 且在晶格温度增加的过程中电子主要是从 4 态泄漏到 5 态, 还可以看出电子从 4 态泄漏到 5 态和 7 态对温度的变化比较敏感, 而泄漏到 6 态的数目相对较少. 出现该现象的原因是 4 态和 5 态之间的能级差等于 39 meV, 该能级差与 THz QCL 有源区选用的 GaAs 材料的辅助

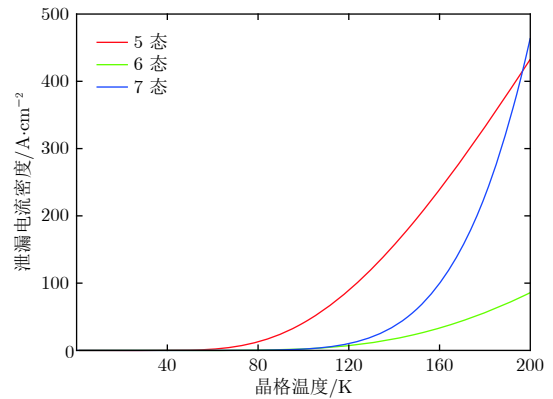


图 2 泄漏电流密度与晶格温度的关系

Fig. 2. Relationship between leakage current density and temperature.

共振声子能量接近, 在这种环境下, 4 态上的电子容易吸收一个声子的能量而跃迁到 5 态^[25]. 由能级结构可知, 6 态处于较高能级, 在量子阱中能级越高, 量子阱对电子所施加的势能就越低, 因此电子被该能态束缚的概率就越低, 当电子向量子阱上部泄漏时, 泄漏到量子阱较高束缚态的概率相对较低, 出现了电子泄漏到 6 态的数量少的现象.

然后研究在不同的泄漏通道下, 晶格温度 T_L 的变化对输出功率 P_{out}/P_{max} 的影响, 结果如图 3 所示, 红色、绿色和蓝色曲线分别表示 4 态电子泄漏到 5, 6 态 (束缚态), 7 态 (连续态) 以及 5, 6, 7 (束缚态以及连续态) 态对输出功率的影响. 在考虑不同的泄漏情况下, 只把 J_{45} , J_{46} 表达式代入 (3) 式, 不考虑 J_{47} 值影响, 便可得到 4 态电子泄漏到 5, 6 态对功率的影响; 同理, 只将 J_{47} 表达式代入 (3) 式, 不考虑 J_{45} 与 J_{46} 值的影响, 可得到 4 态电子泄漏到 7 态对功率的影响; 将 J_{45} , J_{46} 与 J_{47} 同时代入 (3) 式, 可得到 4 态电子泄漏到 5, 6, 7 态对功率的影响. 从图 3 可以看出, 随着晶格温度的升高, 归一化输出功率将不断降低, 而且电子从 4 态泄漏到 5, 6 态对输出功率的影响要比泄漏到 7 态显著, 由此也可反映出晶格温度的升高将加剧电子泄漏. 另外, 处于 5, 6 态和 7 态的电子不是稳定状态的电子, 随着晶格温度的增加, 电子热运动加剧, 5, 6, 7 态的电子有一部分继续向更高能级跃迁或是逃离有源区, 在这些过程中, 电子因运动与晶格产生碰撞, 致使晶格温度升高, 进一步恶化系统的温度特性和输出功率特性.

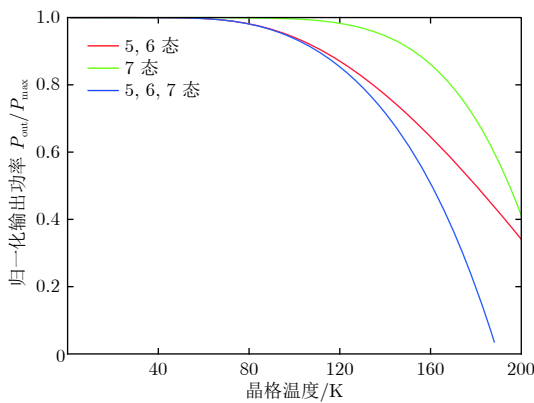


图 3 归一化输出功率与晶格温度的关系

Fig. 3. Relationship between normalized output power and lattice temperature.

最后研究量子阱势垒高度参数 E_{47} 对电子泄漏的影响. 图 4 模拟了不同晶格温度条件下输出功率随势垒参数 E_{47} 的变化关系. 由仿真结果可知,

在 186 K 温度附近, E_{47} 最优值为 130 meV, 该值与报道的原始结构值吻合^[17,24], 进一步证明了本文计算模型的正确性. 从图 4 还得出, 在势垒高度较小的情况下, 归一化输出功率也相对较小; 当势垒在某一区间内增加时, 归一化输出功率呈现线性递增; 当势垒高度增加到某一临界值时, 归一化输出功率趋于稳定. 这是因为势垒高度过低时, 电子受到的束缚力低, 电子泄漏的数目多, 造成输出功率相对较低. 当势垒在某一区间内增加, 归一化输出功率呈现线性递增, 这说明电子泄漏得到了抑制, 电子的利用率得到提高, 因此输出功率上升. 通过解量子阱有源区中的薛定谔方程, 可以得到能级的解, 薛定谔方程为

$$-\frac{\hbar^2}{2} \cdot \frac{d}{dz} \cdot \frac{1}{m^*(z)} \cdot \frac{d}{dz} \psi + qF(z)\psi + V(z)\psi = E\psi, \quad (11)$$

式中 E 为能态的解; ψ 为对应能态的波函数; $m^*(z)$ 为有效质量, z 为量子阱生长方向; $V(z)$ 为量子阱势能参数; $F(z)$ 为施加的电压参数. 当施加电压不变时, 量子阱势垒高度增加后, 通过数值求解薛定谔方程发现量子阱中的束缚态数目增多, 而从图 3 讨论的结果可知, 电子从 4 态泄漏到 5, 6 态 (阱内束缚态) 对激光器造成的负面影响比电子从 4 态泄漏到 7 态要大. 因此, 需要计算出一个最优的量子阱势垒高度, 该值应满足量子阱中的束缚态数目少、此时的势垒高度能有效地对电子泄漏进行抑制. 由图 4 可知, 当势垒高度增加到一定值时, 归一化输出功率趋于稳定值, 定义当有激光输出时, 归一化输出功率首次到达这个稳定值时对应的势垒参数即为所求. 对文献^[17]报道的 THz QCL 进行势垒高度的优化, 如图 4 所示, 将晶格温度设

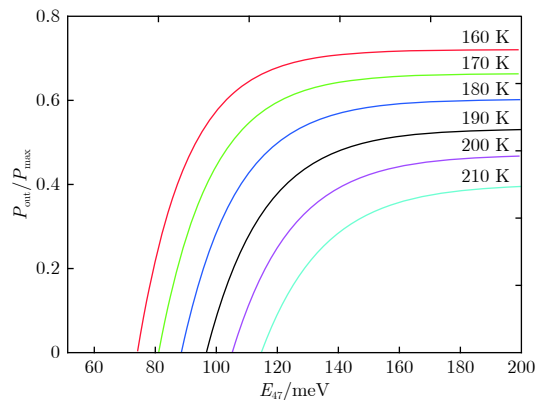


图 4 归一化输出功率与势垒高度参数的关系

Fig. 4. Relationship between normalized output power and barrier height parameters.

置在 210 K 下, 模拟得出了对应的最优阱高参数 $E_{47} = 185$ meV, 同时用 (2) 式模拟得出该条件下的输出功率值为 8 mW, 优化后取得的效果与最高 186 K 操作温度下实验报道的输出功率 5 mW 相比有所改善.

4 结 论

利用热力学统计理论和激光输出特性理论, 建立了 THz QCL 有源区中上激发态电子往更高能级电子态泄漏的计算模型, 以输出功率来衡量电子泄漏程度, 研究了晶格温度和量子阱势垒高度对电子泄漏的影响. 研究发现, 晶格温度上升, 电子从上激发态泄漏到近邻束缚态和连续态的数量增加相对较多, 泄漏到次近邻束缚态的数量相对较小. 同时, 电子泄漏导致电子向外部散发热量, 进一步加剧温度升高, 形成温度-电子泄漏的恶性循环, 相应地, THz QCL 的输出功率会因温度的升高而降低, 影响 THz QCL 的正常运行. 适当增加量子阱势垒高度能够有效地抑制电子泄漏, 进而改善输出功率. 本文对 THz QCL 系统进行有源区势垒优化, 当量子阱势垒高度提高到 185 meV 时, 升高温度至 210 K 能得到 THz QCL 激光输出功率为 8 mW, 改善了以往在最高 186 K 操作温度下得到的输出功率. 这些研究结果对研究 THz QCL 的电子泄漏温度特性和 THz QCL 有源区结构优化设计提供理论依据.

参考文献

- [1] Sun Y W, Zhong J L, Zuo J, Zhang C L, Dan G 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 169701 (in Chinese) [孙怡雯, 钟俊兰, 左剑, 张存林, 但果 2015 物理学报 **64** 169701]
- [2] Yardimci N T, Lu H, Jarrahi M 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 191103
- [3] Wang S, Wang F Z 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 160502 (in Chinese) [王珊, 王辅忠 2018 物理学报 **67** 160502]
- [4] Bing P B, Yao J Q, Xu D G, Xu X Y, Li Z Y 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 124209
- [5] Zhang Z Z, Li H, Cao J C 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 090702 (in Chinese) [张真真 黎华 曹俊诚 2018 物理学报 **67** 090702]
- [6] Zhang Z Z, Fu Z L, Guo X G, Cao J C 2018 *Chin. Phys. B* **27** 030701
- [7] Köhler R, Tredicucci A, Beltram F, Beere H E, Linfield E H, Davies A G, Ritchie D A, Iotti R C, Rossi F 2002 *Nature* **417** 156
- [8] Ravaro M, Gellie P, Santarelli G, Manquest C, Filloux P, Sirtori C, Jean-Francois, Ferrari G, Khanna S P, Linfield E H 2013 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **19** 8501011
- [9] Fatholouloumi S, Dupont E, Chan C, Wasilewski Z, Laframboise S, Ban D, Matyas A, Jirauschek C, Hu Q, Liu H C 2012 *Opt. Express* **20** 3866
- [10] Li L, Liu F Q, Shao Y, Liu J Q, Wang Z G 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 1577
- [11] Albo A, Hu Q 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 241101
- [12] Albo A, Hu Q, Reno J L 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 081102
- [13] Krüger O, Kreuzmann S, Prasai D, Wienold M, Sharma R, Pittro W, Weixelbaum L, John W, Biermann K, Schrottke L 2013 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **25** 1570
- [14] Lin T T, Wang L, Wang K, Grange T, Hirayama H 2018 *Appl. Phys. Express* **11** 112702
- [15] Monastyrskiy G, Elagin M, Klinkmüller M, Aleksandrova A, Kurlov S, Flores Y V, Kischkat J, Semtsiv M P, Masselink W T 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 134509
- [16] Flores Y V, Semtsiv M P, Elagin M, Monastyrskiy G, Kurlov S, Aleksandrova A, Kischkat J, Masselink W T 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 134506
- [17] Kumar S, Hu Q, Reno J L 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 131105
- [18] Albo A, Hu Q 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 131108
- [19] Kumar S, Chan C W I, Hu Q, Reno J L 2011 *Nature Phys.* **7** 166
- [20] Harrison P, Indjin D, Kelsall R W 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 6921
- [21] Spagnolo V, Scamarcio G, Page H, Sirtori C 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 3690
- [22] Schneider H, Klitzing K V 1988 *Phys. Rev. B* **38** 6160
- [23] Faist J 2013 *Quantum Cascade Lasers* (Oxford: Oxford University Press) pp72–73
- [24] Bhattacharya I, Chan C W I, Hu Q 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 011108
- [25] Botez D, Chang C C, Mawst L J 2016 *J. Phys. D* **49** 043001

Electrons leakage from upper laser level to high energy levels in active regions of terahertz quantum cascade lasers*

Li Jin-Feng¹⁾ Wan Ting¹⁾ Wang Teng-Fei¹⁾ Zhou Wen-Hui¹⁾
Xin Jie¹⁾ Chen Chang-Shui^{1)2)†}

1) (*Guangdong Provincial Key Laboratory of Nanophotonic Functional Materials and Devices, Guangzhou Key*

Laboratory for Special Fiber Photonic Devices, School of Information Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

2) (*Jiangmen Zhuxi Laser and Smart Co. Ltd., Jiangmen 529000, China*)

(Received 22 October 2018; revised manuscript received 21 November 2018)

Abstract

Terahertz quantum cascade laser is a semiconductor laser that effectively obtains terahertz waves. It uses the semiconductor heterojunction to have a quantum cascade effect under an applied voltage, and then the phonon assists the electron resonance from the upper stage to the next stage, so that a single electron injected externally can emit multiple photons. However, some electrons will deviate from the transport path during transportation and these electrons are called leakage electrons. Electron leakage comes from three ways. The first way is the scattering of electrons from the upper laser level through the long longitudinal phonon to the low energy level; the second way is the scattering of electrons from the lower laser level to the high energy bound level and the continuous level; and the third way is the scattering of electrons from the upper laser level to high energy bound levels and continuous levels. These leakage electrons directly reduce the number of population inversions in the laser system, making the laser output power limited. At present, most of researchers explain the electron leakage through indirect measurements, and there are few studies in which the electron leakage is analyzed by establishing theoretical models. In this paper, the electron leakage model in THz QCL is established by using thermodynamic statistical theory and laser output characteristic theory. The degree of electron leakage is measured by output power. The influence of lattice temperature and quantum well barrier height on electron leakage are studied. It is found that when the lattice temperature rises and the electrons in the upper laser state leak to higher energy levels, the number of electrons leaking to the adjacent bound state and the continuous state increases, and the number of electrons leaking to the next near-bound level is relatively small. In the case of electron leakage, the utilization of electrons becomes lowered, and the laser output power is also lowered. The study also shows that an appropriate increase in the height of the quantum barrier can suppress the leakage of electrons. Using the established theoretical model to optimize the quantum well barrier height of the previously reported laser system, an 8 mW terahertz quantum cascade laser (THz QCL) laser output at 210 K is obtained. Compared with the reported experimental results, the temperature and output power are improved. These results provide a theoretical basis for studying the electron leakage temperature characteristics of THz QCL and also optimally designing the THz QCL active region structure.

Keywords: terahertz, quantum cascade laser, electron leakage, active region

PACS: 11.10.St, 42.50.-p, 42.55.-f, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.68.20181882

* Project supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (Grant No. 2015A030313383).

† Corresponding author. E-mail: cschen@aiofm.ac.cn