

文章编号: 2095-4980(2019)03-0359-05

## 太赫兹量子级联激光器光注入特性

李 源 远, 杨 宁, 楚 卫 东

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

**摘 要:** 基于三能级速率方程, 研究了独立运行、主从注入和相互注入太赫兹量子级联激光器(THz-QCLs)的相对强度噪声和调制特性。在自由运行情况下, THz-QCL的自发辐射噪声在低频时表现出白噪声特性。与传统的半导体激光器不同, 在低频区没有对应于弛豫振荡的共振峰。主从注入可以有效降低THz-QCLs噪声20 dB, 提高THz-QCLs低噪声工作的效率。对于互注入THz-QCLs, 即使在锁相区, 噪声也明显高于自由运行情况。通过应用注入锁定方案, 与直接调制方案相比, 可以大大增加调制带宽。

**关键词:** 太赫兹; 量子级联激光器; 光注入; 相对强度噪声; 调制响应

**中图分类号:** TN212

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201903.0359

## Optical injection characteristics of Terahertz Quantum Cascade Lasers

LI Yuanyuan, YANG Ning, CHU Weidong

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

**Abstract:** Based on the three-level rate equations, the relative intensity noise and modulation characteristics of free-running operation, master-slave injection and optically mutual-injected Terahertz Quantum Cascade Lasers(THz-QCLs) are studied theoretically. In the case of free-running operation, the spontaneous emission noise of THz-QCLs exhibits white noise characteristics at low frequencies. Unlike conventional semiconductor lasers, there is no resonance peak corresponding to relaxation oscillation in the low frequency region. Master-slave injection can effectively reduce the noise of THz-QCLs for nearly 20 dB. It is an effective and practical technology to achieve low noise of THz-QCLs. For optically mutual-injected THz-QCLs, even in the phase-locked region, the noise is significantly higher than that in the case of free operation. In addition, compared with direct modulation scheme, the modulation bandwidth can be greatly increased by using optical injection phase-locking scheme.

**Keywords:** Terahertz; Quantum Cascade Lasers; optical injection; relative intensity noise; modulation response

太赫兹(Terahertz, THz)波是指频率从 0.1~10 THz 的电磁波, 介于微波毫米波和可见光之间。量子级联激光器(QCLs)是中红外和太赫兹波段重要的光源<sup>[1]</sup>。与传统的半导体激光器相比, 半导体异质结量子阱厚度的设计决定了 QCLs 的激射频率。THz-QCLs 在太赫兹成像、光谱、环境监测及高速通信技术等领域具有广阔的应用前景<sup>[2-3]</sup>。THz-QCLs 可以通过设计优化和工艺改进实现高功率输出<sup>[4]</sup>。目前高功率 THz-QCLs 通常是多模工作, 单模 THz-QCLs 的功率仍然较低, 锁相阵列技术是提高单模激光器输出功率和光束质量的有效途径。半导体激光阵列的动力学特性, 如对称破缺<sup>[5]</sup>、稳定性<sup>[6]</sup>和混沌同步<sup>[7]</sup>已有详细的研究。对于 THz-QCLs, Y 型耦合阵列<sup>[8]</sup>、天线耦合阵列<sup>[9]</sup>、锁相面发射阵列<sup>[10]</sup>及环形谐振腔阵列<sup>[11]</sup>等锁相阵列技术取得了很大进展。

光注入是实现半导体激光器锁相阵列的有效途径。互注入半导体激光器的动力学强烈依赖于延迟时间、耦合强度和失谐频率<sup>[12]</sup>。而互注入的 THz-QCLs 阵列相关研究仍然有限。超短的载流子寿命和小线宽增强因子使得 THz-QCLs 阵列在动力学性质上与传统半导体激光器不同。本文将研究光互注入下 THz-QCLs 的动力学基本锁相特性。

收稿日期: 2018-11-23; 修回日期: 2019-03-08

基金项目: NSAF 联合基金资助项目(U1730246); 北京应用物理与计算数学研究所所长青年基金资助项目(ZYSZ1518-16)

作为一种新型的基于子带间跃迁的单极型激光器, THz-QCLs 的动力学现象非常丰富, 且与传统半导体激光器显著不同, 目前的研究仍然有限。本文首先分析互注入 THz-QCLs 的相位锁定范围, 然后对比研究自由运行、主从注入和互注入 THz-QCLs 的自发辐射噪声和频率响应特性, 旨在揭示 THz-QCLs 动力学特性的一般规律及其与半导体激光器的异同。

## 1 理论方法

本文对 THz-QCLs 的相对强度噪声(Relative Intensity Noise, RIN)和调制响应的研究采用小信号分析的方法。单模 THz-QCLs 的 3 能级速率方程为<sup>[12-13]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{dN_3(t)}{dt} = \frac{\eta I}{q} - \frac{N_3(t)}{\tau_{31}} - \frac{N_3(t)}{\tau_{32}} - g[N_3(t) - N_2(t)]S(t) \\ \frac{dN_2(t)}{dt} = \frac{N_3(t)}{\tau_{32}} - \frac{N_2(t)}{\tau_{21}} + g[N_3(t) - N_2(t)]S(t) \\ \frac{dN_1(t)}{dt} = \frac{N_3(t)}{\tau_{31}} + \frac{N_2(t)}{\tau_{21}} - \frac{N_1(t)}{\tau_{out}} \\ \frac{dS(t)}{dt} = Zg[N_3(t) - N_2(t)]S(t) + Z\beta N_3(t)\left(\frac{1}{\tau_{31}} + \frac{1}{\tau_{21}}\right) - \frac{S(t)}{\tau_{ph}} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $N_i$  是第  $i$  能级上的粒子数;  $S$  是腔内光子数;  $\beta, g, Z, q, \tau_{ph}, \tau_{ij}$  分别是自发辐射因子、微分增益、有源区周期数目、电子电量、腔内光子寿命、第  $i$  能级到第  $j$  能级间的散射时间。这里,  $\eta I / q = N_1 / \tau_{out}$  是电流连续性的要求。假定方程的稳态解为  $N_3, N_2, N_1, S$ , 对应的小信号变化为  $n_3(t), n_2(t), n_1(t)$  和  $s(t)$ , 即:

$$\begin{cases} N_i(t) = N_i + n_i(t), i = 1, 2, 3 \\ S(t) = S + s(t) \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1), 可以得到小信号速率方程:

$$\begin{cases} \frac{dn_2(t)}{dt} = -n_3(t)\left(\frac{1}{\tau_{31}} + \frac{1}{\tau_{32}}\right) - g[n_3(t) - n_2(t)]S - g[N_3 - N_2]s(t) + F_3(t) \\ \frac{dn_2(t)}{dt} = \frac{n_3(t)}{\tau_{32}} - \frac{n_2(t)}{\tau_{21}} + g[n_3(t) - n_2(t)]S + g[N_3 - N_2]s(t) + F_2(t) \\ \frac{dn_1(t)}{dt} = \frac{n_3(t)}{\tau_{31}} + \frac{n_2(t)}{\tau_{21}} + F_1(t) \\ \frac{ds(t)}{dt} = Zg[n_3(t) - n_2(t)]S + Zg[N_3 - N_2]s(t) + Z\beta n_3(t)\left(\frac{1}{\tau_{31}} + \frac{1}{\tau_{21}}\right) - \frac{s(t)}{\tau_{ph}} + F_S(t) \end{cases} \quad (3)$$

方程右端的  $F_i (i = 1, 2, 3, S)$  分别是各能级载流子和光子数对应的郎之万(Langevin)噪声源。将方程(3)变换到频域, 方程组自然线性化, 可以解析得到  $s(\omega)$  的表达式, 进而得到单位带宽的相对强度噪声:

$$\frac{RIN(\omega)}{\Delta f} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \frac{|s(\omega)|^2}{\langle S(t) \rangle^2} \quad (4)$$

在 THz-QCLs 中, 自发辐射噪声非常重要。而由光子与载流子之间的相互作用, 载流子的非辐射损耗和载流子的涨落引起的噪声往往不会显著影响系统的动力学行为。它们对总噪声的贡献远小于自发辐射的贡献, 这里主要讨论 THz-QCLs 的自发辐射噪声。

除了自由运行 THz-QCLs, 还考虑主从注入和相互注入的情况。对于主从注入, 方程(1)中的光子数时间演化方程应该修改为<sup>[14]</sup>:

$$\frac{dE(t)}{dt} = \frac{1}{2} \left\{ Zg[N_3(t) - N_2(t)] - \frac{1}{\tau_{ph}} \right\} (1 + i\alpha) E(t) + k_{inj} E_{inj} - i\Delta\omega E(t) + E_{sp} \quad (5)$$

式中:  $E(t)$  是按  $S = |E|^2$  归一化的光电场;  $\Delta\omega$  是主从激光器频率失谐;  $k_{inj}$  是主从激光器的耦合系数;  $\alpha$  是线

宽增强因子； $E_{sp}$  是噪声项。

对于 2 个 THz-QCLs 互相注入的情形，光场的时间演化方程也应修改为：

$$\begin{cases} \frac{d\epsilon_A(t)}{dt} = i\Omega_{A0}\epsilon_A(t) + \frac{1}{2}(1+i\alpha)\left[Zg(N_{A,3}-N_{A,2})-\frac{1}{\tau_{ph}}\right]\epsilon_A(s) + \frac{\kappa}{\tau_{ph}}e^{-iC_p}\epsilon_B(t-\tau_{ext}) + X_A(t) \\ \frac{d\epsilon_B(t)}{dt} = i\Omega_{B0}\epsilon_B(t) + \frac{1}{2}(1+i\alpha)\left[Zg(N_{B,3}-N_{B,2})-\frac{1}{\tau_{ph}}\right]\epsilon_B(s) + \frac{\kappa}{\tau_{ph}}e^{-iC_p}\epsilon_A(t-\tau_{ext}) + X_B(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中： $\Omega_{A/B0}$  是激光器 A/B 单独自由运行的频率； $\epsilon_A, \epsilon_B$  是 2 个激光器的电场； $N_{B,3}, N_{B,2}, N_{A,3}, N_{A,2}$  是 2 个激光器各能级粒子数； $\kappa$  是互注入耦合强度； $C_p$  是互注入耦合相位； $\tau_{ext}$  是耦合延迟时间； $X_{A/B}$  是 2 个激光器的噪声源，计算中用实部和虚部都是随机高斯分布的随机数进行数值模拟。

## 2 模拟结果

对互注入的 THz-QCLs，稳定的相位锁定对耦合强度  $\kappa$  和线宽因子  $\alpha$  的要求是：

$$\Delta f = -\frac{4\pi\kappa}{\tau_{ph}}\sqrt{1+\alpha^2}\cos(\omega_L\theta+C_{ph}+\arctan\alpha)\sin(\phi_L) \quad (7)$$

式中： $\omega_L$  是相位锁定 THz-QCLs 的角频率； $\phi_L$  是锁定相位。根据三角函数的有界性，相位锁定允许的最大失谐频率为：

$$|\Delta f|_{max} = \frac{4\pi\kappa}{\tau_{ph}}\sqrt{1+\alpha^2} \quad (8)$$

固定线宽因子  $\alpha$ ， $\tau_{ph} = 5.77$  ps，锁定范围和  $\kappa$  的关系如图 1 所示，阴影部分是锁定范围。

过强的耦合强度下互注入 THz-QCLs 不能稳定锁定，在传统的半导体激光器阵列中强耦合会导致输出功率剧烈振荡，甚至混沌，相比之下互注入 THz-QCLs 在模拟中表现出更加稳定的性质。

在不同条件下计算的 THz-QCLs 的 RIN 如图 2(a)所示。THz-QCLs 的 RIN 谱在低于 1 GHz 的低频区域近似与频率无关，表现为白噪声特性。由于 THz-QCLs 中的电子寿命远小于光子寿命，弛豫振荡是过阻尼的。因此，THz-QCL 的 RIN 谱没有对应于弛豫振荡的特征峰。与之不同的是，传统半导体激光器的 RIN 谱表现出弛豫振荡。在图 2(a)中，可以看到主从注入比自由运行的 THz-QCLs 降低了近 20 dB 的噪声，而相位锁定的互注入 THz-QCLs 使 RIN 增加近 50 dB。频率失谐过大的 2 个 THz-QCLs 则不能稳定锁定在同一频率上，图 2(a)也画出了这种情况下的 RIN 曲线，此时低频性质和相位锁定时一致，互注入对 2 个激光器的影响等价于相互加以失谐频率的调制。

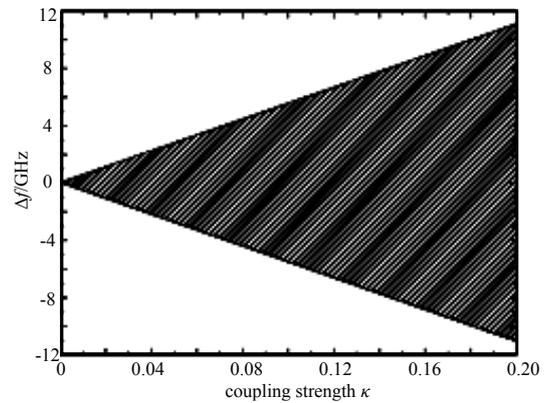


Fig.1 Phase-locking regime of mutual injection THz-QCLs  
图 1 互注入 THz-QCLs 的锁定范围

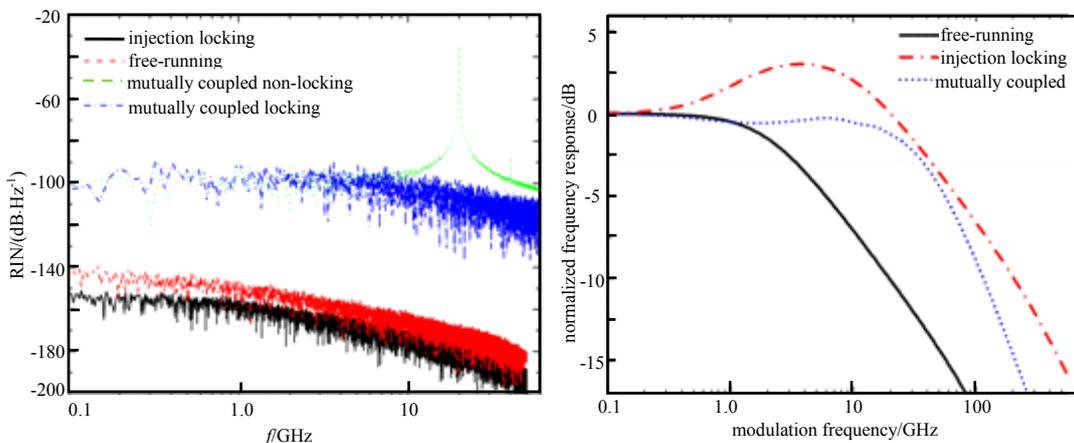


Fig.2 (a) Simulation results of relative intensity noise spectrum (b) modulation properties under different conditions  
图 2 (a) 相对强度噪声谱模拟结果 (b) 不同锁定条件下 THz-QCLs 的调制响应性质

相应地,自由运行 THz-QCLs 的归一化调制响应如图 2(b)所示。3 dB 带宽定义为调制响应幅度是其零频值一半时的频率,如图 2(b)中的蓝虚线表示。对于主从注入的情况,在 4 GHz 频率附近发现峰值<sup>[15]</sup>。而相互注入 THz-QCLs 不存在这种现象。主从和互注入都使激光器 3 dB 带宽增加了近 20 GHz。类似于 RIN, THz-QCLs 的调制响应中没有弛豫振荡的特征峰。结果表明,与半导体激光器相比,THz-QCLs 可以获得更高的调制带宽,光注入 THz-QCLs 更适合高频应用。

### 3 结论

本文通过理论分析和数值仿真,研究了 THz-QCLs 互注入阵列的基本锁相规律,对比研究了自由运行、主从注入、互注入 THz-QCLs 的噪声和调制响应性质。在低频下 THz-QCLs 均表现为白噪声,RIN 谱没有弛豫振荡的特征峰。主从注入有助于降低自发辐射噪声,而互注入阵列虽然是提高光功率和光束质量的有效方法,但会增加噪声水平。此外,数值模拟发现,光注入有助于增大调制带宽,有助于 THz-QCLs 在高频的应用,这些结果有助于深入理解光注入下 THz-QCLs 的动力学性质,并为发展 THz-QCLs 阵列提供理论支持。

#### 参考文献:

- [1] CAPASSO Federico,GMACHL Claire,SIVCO Deborah L,et al. Quantum cascade lasers[J]. *Science*, 1994,264(5158):553–556. DOI: 10.1126/science.264.5158.553.
- [2] RAZEGHI M,LU Q Y,Bandyopadhyay N,et al. Quantum cascade lasers: from tool to product[J]. *Optics Express*, 2015, 23(7): 8462–8475. DOI:10.1364/OE.23.008462.
- [3] BARTALINI S,CANCIO P,GIUSFREDDI G,et al. Frequency-comb-referenced quantum-cascade laser at 4.4  $\mu\text{m}$ [J]. *Optics Letters*, 2007,32(8):988–990. DOI:10.1364/OL.32.000988.
- [4] 谭智勇,曹俊诚. 太赫兹量子级联激光器及其光束表征技术[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2013,11(1):21–25. (TAN Zhiyong,CAO Juncheng. Terahertz Quantum-Cascade Laser and its beam pattern characterization[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2013,11(1):21–25.)
- [5] QI X,GARANOVICH I,SUKHORUKOV A,et al. Polychromatic solitons and symmetry breaking in curved waveguide arrays[J]. *Optics Letters*, 2010,35(9):1371–1373. DOI:10.1364/OL.35.001371.
- [6] ZHAO S,WANG Z,WANG Z. Scalability and stability of a coherent fiber laser array using fiber couplers[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010,27(27):1131–1138. DOI:10.1364/JOSAB.27.001131.
- [7] JUNGES L,GAVRIELIDES A,GALLAS J. Synchronization properties of two mutually delay-coupled semiconductor lasers[J]. *Journal of the Optical Society of America B Optical Physics*, 2016,33(7):C65. DOI:10.1364/JOSAB.33.000C65.
- [8] MARSHALL O P,CHAKRABORTY S,KHAIRUZZAMAN M,et al. Reversible mode switching in y coupled terahertz lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2013,102(11):156–159. DOI:10.1063/1.4796039.
- [9] KAO T Y,RENO J L,HU Q. Phase-locked laser arrays through global antenna mutual coupling[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(8):541–546. DOI:10.1038/nphoton.2016.104.
- [10] 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):2124. DOI:10.1063/1.3358134.
- [11] HALIOUA Y,XU G,MOUMDI S,et al. Phase-locked arrays of surface-emitting graded-photon-heterostructure terahertz semiconductor lasers[J]. *Optics Express*, 2015,23(5):6915–6923. DOI:10.1364/OE.23.006915.
- [12] XIE Y,LI Y,WANG J,et al. Power amplification and coherent combination techniques for terahertz quantum cascade lasers[M]. London:IntechOpen, 2017. DOI:10.5772/65350.
- [13] SIMOS H,BOGRIS A,SYVRIDIS D,et al. Intensity noise properties of mid-infrared injection locked quantum cascade lasers: I modeling[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2014,50(2):98–105. DOI:10.1109/JQE.2013.2295434.
- [14] SHEIKHEY M,GOUDARZI M,YADIPOUR R,et al. Analytical investigation of relative intensity noise properties of injection-locked mid-IR quantum cascade lasers[J]. *Journal of the Optical Society of America B Optical Physics*, 2016,33(11):D57. DOI:10.1364/JOSAB.33.000D57.
- [15] MENG B,WANG Q. Theoretical investigation of injection-locked high modulation bandwidth quantum cascade lasers[J]. *Optics Express*, 2012,20(2):1450–1464. DOI: 10.1364/OE.20.001450.

## 作者简介：



李源远(1987-), 男, 河南省平顶山市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为凝聚态理论.email:liyuanxyz@126.com.

杨宁(1980-), 男, 北京市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为量子级联激光器、微纳光电器件设计和理论研究、拓扑绝缘体纳米结构的光电特性研究等.

楚卫东(1969-), 男, 山东省菏泽市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为中远红外量子级联激光器、探测器设计、激光自混合干涉技术.

---

## 2019 年亚洲电磁学国际会议 (Asian Electromagnetics Conference, ASIAEM 2019) 9 月 15~20 日, 2019 中国·西安

亚洲电磁学国际会议 (Asian Electromagnetics Conference, ASIAEM 2019) 将于 2019 年 9 月 15 日-20 日在西安召开, 由西安交通大学主办。西安交通大学电气工程学院谢彦召教授担任大会主席, 技术委员会由美国 William Radasky 博士任主席, 中国 E3OE 实验室石立华教授、韩国仁荷大学 Chang-Su Huh 教授任副主席。

ASIAEM 2019 致力于为高功率电磁学及相关领域的学者和研究生提供一个学术交流与建立友谊的平台, 分享和了解国际最新科技信息和科研成果, 共同探讨电磁脉冲、窄带和宽带高功率微波、雷电及其防护、基础设施电磁安全、生物电磁效应等相关领域的发展。ASIAEM 2019 会议得到 SUMMA 基金委技术支持。国内多家重点实验室为协办单位或赞助单位。

会议主要议题但不限于:

- 1) Sources, Antennas and Facilities (both wideband and narrowband);
- 2) Applications of Coupling to Structures and Cables;
- 3) Measurement Techniques;
- 4) IEMI Threats, Effects and Protection;
- 5) System-level Protection and Testing;
- 6) Lightning EM Effects;
- 7) Numerical Models and Modeling;
- 8) Bio-effects and Medical Applications of EM Fields;
- 9) Antenna Design, Radiation and Propagation;
- 10) Radar Systems (Signal Processing and Security) Aspects;
- 11) Target Detection, Discrimination and Imaging;
- 12) Landmine and IED Detections;
- 13) Electromagnetic Transients in UHV/EHV Transmission Lines and Substations;
- 14) Design of Protective Devices and Test Methods;
- 15) Evaluation of HEMP/IEMI Impacts on Critical Infrastructure;
- 16) Explosive Devices Effects and Protection for HPEM;
- 17) Statistical Methods in HPEM;
- 18) HPEM Standards.

除了上述主题之外, 目前会议正在征集国内外学者设立 Special Sessions, 鼓励新兴和交叉领域, 截止日期为 2019 年 1 月 31 日。会议论文要求 1-3 页, 截止日期为 2019 年 4 月 10 日。

会议设立杰出青年科学家奖、优秀论文奖和优秀学生论文奖三大奖项。会议同时举办仪器设备展。欢迎参与。

会议网站: <http://www.asiaem.org>

会议邮箱: [asiaem2019@xjtu.edu.cn](mailto:asiaem2019@xjtu.edu.cn)

更多详情请登录网站: <http://www.iaeej.com>