

文章编号: 2095-4980(2022)04-0297-09

宽谱太赫兹量子级联激光器的自混合特性

葛磊, 杨宁*, 楚卫东, 段素青

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘要: 基于传输矩阵理论及多模速率方程, 研究了宽谱太赫兹量子级联激光器在不同光反馈强度下的自混合动力学特性。研究发现, 在弱反馈下光场自混合对激光器光谱特性影响很小; 反射物位置移动时的自混合信号呈正弦规律变化, 同时自混合信号幅度随反射物位置的变化表现出周期性调制现象。宽谱量子级联激光器在弱反馈下可以应用于测距、成像及光谱测量。在强反馈下, 宽谱激光器光谱受自混合影响显著, 并有新的模式在原自由运行模式附近出现; 但随着反射物移动, 自混合信号波峰个数同弱反馈条件下一致, 可正确描述反射物的移动规律。因此, 强反馈下宽谱量子级联激光器仍可在一定条件下实现微米级的测距和成像技术。这一研究将有助于发展基于宽谱太赫兹量子级联激光器自混合现象的传感器应用。

关键词: 太赫兹; 量子级联激光器; 自混合; 宽谱激光器; 传输矩阵

中图分类号: O433.1

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020703

Self-mixing interference in broadband terahertz quantum cascade lasers

GE Lei, YANG Ning*, CHU Weidong, DUAN Suqing

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

Abstract: Self-mixing interference in broadband terahertz (THz) Quantum Cascade Lasers (QCLs) are studied by the transition matrix theory and rate equations method. Under weak optical feedback strength, with the target moving in uniform motion, the self-mixing signal changes in a sine-like waveform. It is found that the self-mixing signal of the broadband THz QCLs under weak feedback can be applied to range finding, imaging, and spectral measurement. Under strong optical feedback, the spectrum is affected by the optical feedback obviously, while new modes arise near the solitary modes. As a target moves in uniform motion, the self-mixing signal shows the same number of peaks as that in weak feedback case. Therefore, the broadband QCLs under strong feedback cannot be applied to spectral measurement, but it can be applied to realize micron-magnitude range finding and imaging under certain conditions. The study is helpful to the application of THz sensor technology based on self-mixing interference in broadband THz QCLs.

Keywords: terahertz; quantum cascade lasers; self-mixing interference; broadband lasers; transition matrix

太赫兹量子级联激光器 (Terahertz Quantum Cascade Lasers, THz-QCLs) 是太赫兹波段全固态、单极性激光器。与传统半导体激光器相比, QCLs 具有多量子阱周期性级联结构, 电子在有源区单个量子阱周期辐射光子, 从高能级跃迁到低能级并在弛豫区被抽取注入到下一个周期中, 实现了单电子辐射多光子过程^[1-2]。基于有源区以及波导结构设计的不断改进, THz-QCLs 已经成为一种高效率、紧凑型太赫兹源^[3]。由于其高相干、高功率、可设计、可调控等优点受到了广泛的关注和研究, 在 THz 高分辨成像^[4]、气体光谱探测^[5]、频率梳技术^[6]和生物医疗诊断^[7]等领域有着广泛的应用前景。近年来随着 THz-QCLs 性能的改进, 基于 THz-QCLs 的高分辨 THz 成像传感技术获得了快速发展, 其空间分辨力已达微米甚至亚微米级别^[8]。

在基于 THz-QCLs 的成像技术中, 激光自混合干涉成像技术是重要的研究方向之一。自混合干涉指利用激光器出射光束, 经外界物体反射后重新注入到激光腔内, 并对腔内光场产生额外相干调制的技术^[9]。通常把在光反

收稿日期: 2020-12-16; 修回日期: 2021-03-05

*通信作者: 杨宁 email: yang_ning@iapcm.ac.cn

馈下引起的激光器光功率、频率、电压变化作为自混合信号。

通过对自混合信号进行分析,可以得到目标物位移、振动、速度、表面粗糙度等相应信息。THz-QCLs 自混合干涉作为相干测量技术,具有高灵敏、高精度、系统简洁等优势,成为近年来研究热点。由于 QCLs 本身具有极小的线宽增强因子,对外界光反馈显著的稳定性,以及较快的增益恢复时间等特性,使得 QCLs 成为自混合技术中理想的 THz 源。目前,基于 QCLs 自混合干涉的成像技术已成功用于目标物位移探测^[9]、生物组织成像识别^[10]、三维 THz 成像^[11],以及激光器自身频谱和动力学参数测量^[12]等。

基于 THz-QCLs 的自混合干涉技术除在成像上的应用,还有潜力发展为太赫兹光谱测量技术^[13]。光谱测量应用中,在 THz 波段进行检测的生物组织及化学材料通常包括了多个特征频谱,这就要求 THz-QCLs 具有较宽的光谱,并可以在一定波段内调频^[14-15]。随着太赫兹光谱技术需求的增加,宽谱 THz-QCLs 成为近年来 THz-QCLs 研究的重要方向。在已报道实验中,宽谱 THz-QCLs 的频谱宽度可达几百 GHz、甚至 1 THz 以上^[16-17]。虽然宽谱器件的研制已经取得了广泛的进展,但是基于宽谱 THz-QCLs 的自混合干涉成像和光谱技术研究还非常有限。目前,理论计算已证实宽谱 THz-QCLs 自混合干涉技术在光谱传感应用上的可行性^[18];基于宽谱 THz-QCLs 的自混合探测装置已成功应用于气体特征吸收谱的测量^[19]。

尽管宽谱 THz-QCLs 已被证实可以应用于自混合探测,但是目前使用的宽谱 THz-QCLs 谱宽仍然很小,激光模式数目仅有几个,距离真正实现宽谱 THz-QCLs 自混合干涉成像和光谱系统仍有很大距离。对谱宽很宽、模式数很多的宽谱 THz-QCLs 自混合干涉动力学特性的理解还非常有限。

在本文中,利用传输矩阵理论,计算在光反馈下光腔内多个工作模式的阈值增益。然后结合多模动力学方程,通过时间演化方法描述激光腔内模式竞争的动力学过程。通过与单模自混合信号对比,研究了宽谱 THz-QCLs 在不同强度光反馈下自混合干涉信号的变化规律。从理论上探索了宽谱 THz-QCLs 在自混合成像和光谱技术应用中的可能。

1 基本原理

本文采用传输矩阵理论,分别求得光反馈下激光腔内各模式阈值增益和相应的模式寿命后,再结合多模速率方程得到各模式自混合输出功率信号。相比常用于描述单模激光器自混合性质的朗-小林方程(Lang-Kobayshi 方程, L-K 方程),在描述宽谱激光器光腔内模式竞争时,简单地将单模 L-K 方程扩展到多模方程,无法准确描述腔内各模式受到外界光反馈的影响。例如各模式在相同光反馈下不同的阈值增益及模式寿命, L-K 方程中并不直接给出。传输矩阵理论则能准确计算不同模式在相同光反馈下的模式寿命,从而通过结合多模速率方程反映腔内模式竞争行为,并求得输出功率。传输矩阵理论结合多模速率方程的方法已成功用于计算多节激光器腔内模式寿命及功率谱^[20],以及计算法布里-珀罗(Fabry-Perot, FP)腔激光器和分布反馈式 THz-QCLs 的自混合动力学特性^[21-22]。

1.1 传输矩阵理论

如图 1 所示的自混合干涉模型,假设光场 E 只在 z 方向传播,于是光场传播的连续性方程即一维 Helmholtz 方程为:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + k^2 E = 0 \quad (1)$$

式中: $k=k(z)$ 是介质中光波波数。

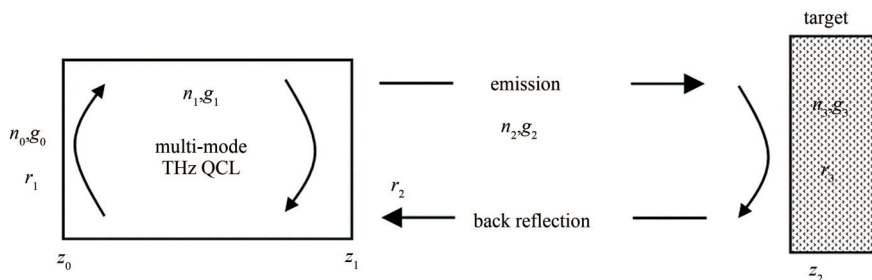


Fig.1 Schematic of a broadband THz-QCL under self-mixing feedback

图 1 宽谱太赫兹量子级联激光器自混合反馈效应示意图

假设光场在 z 方向上的增益和衰减是均匀的，那么光场可以写为正向传播的波包 $F(z)$ 以及反向传播波包 $B(z)$ 的叠加：

$$E_m(z) = F_m \exp(-ik_m z) + B_m \exp(ik_m z) \quad (2)$$

相似的磁场强度 H 写为：

$$H_m(z) = -\frac{k_m c}{\omega} F_m \exp(-ik_m z) + \frac{k_m c}{\omega} B_m \exp(ik_m z) \quad (3)$$

式中：正体 i 表示虚数单位； ω 为光波角频率； c 为真空中的光速； m 表示相同介质的区间； k_m 为波数并与光所处介质的复折射率相关，表示为：

$$k_m = \frac{\omega}{c} (n_m + ig_m) \quad (4)$$

式中： n_m 为相同区域的介质折射率； g_m 为激光传播受到的增益。

根据光传播的连续性条件，在图 1 所示的任何边界处， E 和 H 的正切分量都是连续变化的。将边界条件表示成矩阵形式为：

$$\begin{pmatrix} F_{m+1} \\ B_{m+1} \end{pmatrix} = \mathbf{Q}(z_m) \begin{pmatrix} F_m \\ B_m \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中的传输矩阵 $\mathbf{Q}(z_m)$ 由下式给出^[20]：

$$\mathbf{Q}(z_m) = \begin{pmatrix} \frac{k_{m+1} + k_m}{2k_{m+1}} \exp(i(k_{m+1} - k_m)z_m) & \frac{k_{m+1} - k_m}{2k_{m+1}} \exp(-i(k_{m+1} + k_m)z_m) \\ \frac{k_{m+1} - k_m}{2k_{m+1}} \exp(-i(k_{m+1} + k_m)z_m) & \frac{k_{m+1} + k_m}{2k_{m+1}} \exp(-i(k_{m+1} - k_m)z_m) \end{pmatrix} \quad (6)$$

激光器系统满足自激振荡条件时，系统无外部光场入射，此时光场边界条件为：

$$F_0 = B_3 = 0 \quad (7)$$

结合式(5)和式(6)可以得到光场传输矩阵满足的超越方程：

$$\begin{pmatrix} 0 \\ B_0 \end{pmatrix} = \mathbf{Q}(z_2) \mathbf{Q}(z_1) \mathbf{Q}(z_0) \begin{pmatrix} F_3 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

通过式(8)，可以求得激光自混合干涉系统中所有可能存在的模式并用 l 表示，相应波矢为 $k_{m,l} = \frac{2\pi\nu_l}{c} (n_m + ig_{m,l})$ ，此时复波矢在腔内 ($m=1$) 增益为光腔阈值增益 g_l^{th} ；同时还可得到每个模式对应的 $F(z)$ 及 $B(z)$ 的值。

1.2 多模速率方程

在得到自混合系统中各模式的光场分布后，可求得模式 l 由镜面损耗决定的模式寿命^[20]：

$$\tau_l^{\text{mirror}} = \frac{\int_{z_0}^{z_1} \langle U(z) \rangle dz + \int_{z_1}^{z_1 + L_{\text{ex}}} \langle U(z) \rangle dz}{2 \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_0^2 \left[|B(z_0)|^2 (1 - r_1^2) + |F(z_2)|^2 (1 - r_2^2) \right]} \quad (9)$$

式中：能流密度 $U(z) = 2\epsilon_0 n(z)^2 [|B(z)|^2 + |F(z)|^2]$ ， ϵ_0, μ_0 及 n_0 分别为真空介电常数、真空磁导率和真空折射率； r_1, r_2 为激光器面反射系数，其大小可由界面相邻介质折射率得出； L_{ex} 为激光器端面 z_1 到目标物反射面 z_2 之间的距离。

考虑到激光器中的波导损耗，总的模式寿命 τ_l 为：

$$\frac{1}{\tau_l} = \frac{1}{\tau_l^{\text{w}}} + \frac{1}{\tau_l^{\text{mirror}}} \quad (10)$$

本文中假设波导损耗 τ_l^w 对所有模式的影响均相同, 一般直接写作 τ_l 。求得激光器自混合系统中各模式寿命后, 自混合系统中各模式粒子数随时间演化, 由下面的三能级多模速率方程描述^[23]:

$$\frac{dS_l}{dt} = Zg_l S_l - \frac{\Gamma S_l}{\tau_l} + Z\beta \left(\frac{N_3}{\tau_{32}} + \frac{N_3}{\tau_{31}} \right) \quad (11)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \frac{I_{in}}{q} - \frac{N_3}{\tau_{32}} - \frac{N_3}{\tau_{31}} - \sum_l G_l S_l \quad (12)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{N_3}{\tau_{32}} - \frac{N_2}{\tau_{21}} + \sum_l G_l S_l \quad (13)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{N_3}{\tau_{31}} + \frac{N_2}{\tau_{21}} - \frac{N_1}{\tau_{out}} \quad (14)$$

式中: S_l 是模式 l 的光子数; N_3, N_2, N_1 分别是上辐射态、下辐射态和收集态载流子数; Z 是 QCL 的增益周期数; G_l 是模式 l 的增益; Γ 是限制因子; β 是自发辐射系数; τ_{ij} 是电子在能级 i 和能级 j 间跃迁寿命; I_{in} 是注入电流; q 为电子电荷; τ_{out} 为收集态上电子向下一周期的跃迁寿命; 模式增益 $G_l = G_0(N_3 - N_2)$, 其中 G_0 是微分增益系数。根据式(11)~式(14)可以得到光功率:

$$P_l = h\nu S_l / \tau_0 \quad (15)$$

式中 $\tau_0 = 2Ln_{eff}/c$, 为光在激光腔内往返时间。

2 分析与讨论

文中计算使用的数据由表 1 列出。需要指出的是, 在计算中没有直接使用线宽增强因子这一参数, 这是因为量子级联激光器的线宽增强因子一般较小^[24], 包含线宽增强因子的多模速率方程可以参考文献[25]。

表1 计算所用参数

Table1 Parameters in calculations

parameter	symbol	value
laser length	L	0.3 cm
number of gain stages	Z	100
initial distance from z_1 to z_2	L_{ex}	47 cm
refractive index	n_0, n_2	1
refractive index of active region	n_1	3.6
gain constant	g_0, g_2, g_3	0 cm^{-1}
linewidth enhancement factor	α	$0^{[24]}$
confinement factor	Γ	0.5
spontaneous emission factor	β	$5 \times 10^{-4} \text{ [22]}$
laser waveguide loss	$1/\tau_w$	$1/7.57 \text{ ps}^{-1} \text{ [23]}$
differential gain coefficient	G_0	$1.41 \times 10^4 \text{ s}^{-1} \text{ [22]}$
injection current	I_{in}	300 mA
scattering lifetime from N_3 to N_2	τ_{32}	2.1 ps ^[23]
scattering lifetime from N_3 to N_1	τ_{31}	2.4 ps ^[23]
scattering lifetime from N_2 to N_1	τ_{21}	0.26 ps ^[23]
scattering lifetime from N_1 to next N_3	τ_{out}	0.5 ps ^[23]

首先选择一个固定的反射物位置 $L_{ex} = 47 \text{ cm}$, 研究自混合对宽谱 THz-QCLs 模式寿命和光谱特征的影响。宽谱 THz-QCLs 在不同光反馈强度下, 腔内模式寿命及功率谱如图 2 所示。需要指出的是, 为了研究激光器内模式竞争行为, 在计算中选取 THz-QCLs 在 2.6 THz 附近的 21 个模式, 并对所有模式都采用了相同的微分增益参数。由选取条件可知, 该宽谱 THz-QCLs 的谱宽约为 0.34 THz。自混合光反馈强度通常可由目标物面反射系数表示, 在计算中 $r_3 = (n_3 - n_2)/(n_3 + n_2)$, 其大小通过改变目标物折射率 n_3 控制。基于表 1 中的相关参数, 弱光反馈指目标物反射系数约在 $0 < r_3 \leq 0.01$ 区间内的反射情形; 而中等反馈强度约在 $0.01 < r_3 \leq 0.23$ 区间, 此时式(8)解的个数不因反馈强度增强而改变; 当 $r_3 > 0.23$ 时, 式(8)有新的解出现, 此时的反馈强度称为强光反馈。本文对宽谱 QCLs 受到的光反馈强度的定义, 与传统单模 L-K 方程中光反馈强度的定义一致^[26]。图 2(a)为弱反馈条件下宽谱 THz-QCLs 激光腔内各模式寿命。可以看出, 很弱的激光自混合对宽谱 THz-QCLs 中各模式的寿命影响较弱, 各模式寿命长短与 THz-QCLs 自由运行时基本相同。

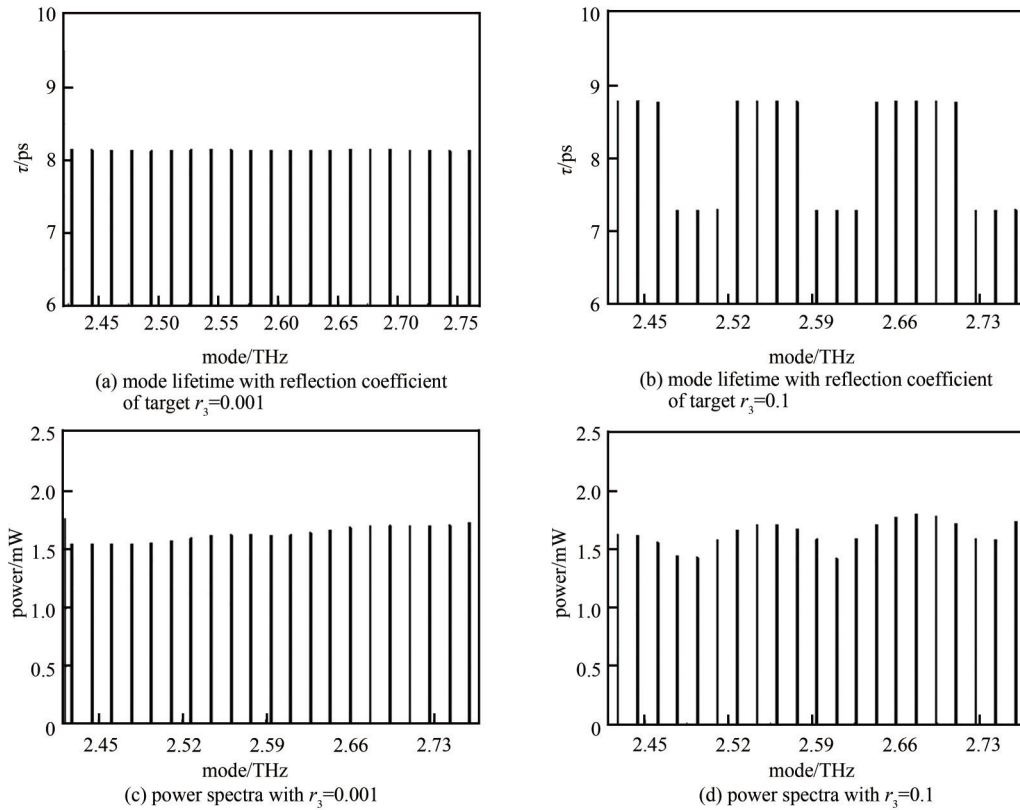


Fig.2 Mode lifetimes and corresponding power spectra of the multimode THz-QCL under self-mixing feedback with a fixed $L_{\text{ex}} = 47$ cm
图2 固定目标物位置 $L_{\text{ex}} = 47$ cm, 宽谱太赫兹量子级联激光器内模式寿命及功率谱

随着光反馈强度从弱反馈增加到中等强度反馈 $r_3 = 0.1$, 各模式寿命如图 2(b) 所示。可以看出, 在中等反馈强度下, 部分模式的寿命增长, 而部分模式的寿命缩短。这表明自混合干涉对不同模式表现出不同的衰减效应。图 2(c) 和图 2(d) 分别是对应于图 2(a) 和 2(b) 的功率谱。在弱反馈下, 图 2(c) 中各模式功率基本相等, 约为 1.5 mW。当反馈强度增加时, 图 2(d) 中的部分模式功率增加到 1.5 mW 以上, 而另一部分则低于自由运行时的模式功率, 减少到 1.5 mW 以下。正是由于各模式寿命在不同反馈强度下有相应的增长和缩短, 从而使得功率谱发生图 2(c) 和图 2(d) 中相应改变。

需要指出的是, 图 2 中描述的自混合信号为固定目标物位置下的信号, 当目标物移动时, 外界光反馈会对各个模式的寿命产生周期性调制作用, 进而影响不同模式的光功率, 但每个位置的光谱变化规律仍如上所述。

令目标物连续移动, 可以得到激光器连续变化的自混合功率信号 $\Delta P = P - P_0$, P 为有自混合干涉的激光器功率, P_0 为激光器自由运行时功率。不考虑光束传播过程中损耗, 单模 THz-QCLs 在弱反馈下的自混合功率信号 ΔP 随目标物移动距离 ΔL_{ex} 的变化规律, 如图 3(a) 所示。从图中观察可知, 单模自混合信号表现出类似正弦信号的变化规律, 每个完整波形对应目标物移动半个波长 $\lambda/2$ 的距离。宽谱 THz-QCLs 在弱反馈下的自混合功率信号如图 3(b) 所示, 在目标物移动和图 3(a) 中相同距离后, 宽谱 THz-QCLs 的自混合信号仍表现出类似的正弦变化规律。同时, 自混合信号波形的峰值个数保持不变。但是, 与图 3(a) 中单模 THz-QCLs 自混合信号振幅保持不变的情形不同, 图 3(b) 中宽谱 THz-QCLs 自混合功率信号振幅随着目标物的移动而发生改变。这说明在相同的弱反馈下, 宽谱 THz-QCLs 的自混合信号有着不同于传统单模器件的变化规律, 主要表现为信号振幅的连续变化。通常, 自混合技术用于位移测量或传感成像时, 通过计算自混合信号峰值个数的变化规律, 可以反映目标物移动规律或者表面形貌特征。由于图 3(b) 中宽谱 THz-QCLs 自混合信号与图 3(a) 中单模 THz-QCLs 自混合信号具有相同的峰值个数, 说明在弱反馈条件下, 宽谱 THz-QCLs 同样可以实现测距传感和成像等自混合探测技术。

为更清晰地显示宽谱 THz-QCLs 自混合信号幅度变化规律, 在计算中增加目标物移动距离为图 3(b) 的 10 倍, 得到如图 3(c) 的自混合信号。从图可以看出, 宽谱 THz-QCLs 自混合信号振幅随目标物移动形成了一个包络, 包络的极值在图中由数字标出。每个相邻极值间均包含了 17 个完整波形, 对应于目标物移动距离 $\Delta L_{\text{ex}} \approx 980 \mu\text{m}$ 。

在研究了弱反馈和中等反馈强度下宽谱 THz-QCLs 的自混合信号后, 继续研究强反馈下的情形。在本文的理论模型中, 激光器内可能存在的模式通过求解式(8)得到。经计算可以发现, 原弱反馈条件下只有单个解的

式(8), 强反馈下会有新的解出现。这意味着激光器内除了 FP 腔模式外, 还会有新的模式因光反馈强度增大而产生。通过计算在两种反馈强度 $r_3=0.3$ 和 $r_3=0.6$ 下, 对出现新模式的现象进行分析。由于新模式功率较小, 为了更明显地描述新出现的模式, 在图 4(a) 和 4(e) 中采用对数坐标。如图 4(a) 所示, 反馈强度为 $r_3=0.3$ 时, 原 FP 腔模式 2.544 0 THz 附近出现了 3 个新的模式。宽谱 THz-QCLs 的这一行为, 类似 L-K 方程描述单模自混合时, 在强反馈下出现多个解的现象^[27]。当反馈强度增加到 $r_3=0.6$, 新出现模式也增加到 7 个, 如图 4(e) 所示。

为进一步对这一现象进行研究, 引入 (ν, g_{th}) 平面来表示新出现的模式^[28]。图 4(b) 和 4(f) 分别为 $r_3=0.3$ 和 $r_3=0.6$ 时, 新模式在 (ν, g_{th}) 平面上的分布, 新模式在图中由黑点标出, QCLs 自由运行时的解 2.544 THz 用叉标出。可以看出在 $r_3=0.3$ 时, 图 4(b) 中新出现模式分散在自由运行模式附近, 并且从这些模式在时间演化后的功率谱图 4(a) 可知, 最终只有 2.543 9 THz 功率最大, 其余模式功率变得很小甚至可忽略。同时从图 4(b) 可知, 模式 2.543 9 THz 在新模式中具有最小的阈值增益, 并且其频率与原自由运行的 FP 腔模式 2.544 0 THz 最为接近。 $r_3=0.6$ 的新模式分布如图 4(f) 所示, 并同 $r_3=0.3$ 的情形表现出了相同的规律。这一行为类似单模 THz-QCLs 用 L-K 方程描述时, QCLs 最终稳定在最小线宽模式的现象^[29]。这与 QCLs 本身极小的线宽增强因子和载流子寿命密切相关。

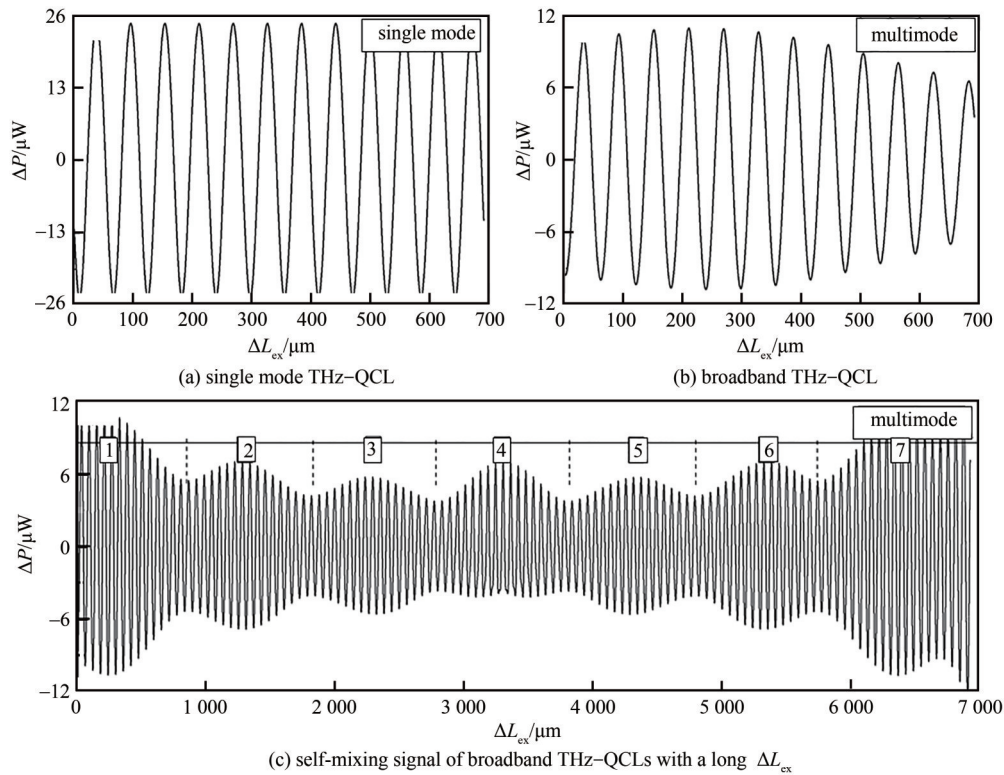


Fig.3 Self-mixing power signal under weak feedback with $r_3=0.001$

图 3 弱反馈 $r_3=0.001$ 下的混合功率信号

同样取目标物距离 $L_{ex}=47$ cm, 在强反馈下 $r_3=0.3$ 和 $r_3=0.6$ 的宽谱 THz-QCLs 功率谱如图 4(c) 和 4(g) 所示。与图 2 中弱反馈情形功率谱对比可以看出, 强反馈下宽谱 QCLs 的部分模式功率变得极小甚至可以忽略。这是因为, 随着光反馈强度增加, 自混合干涉效应下宽谱 THz-QCLs 中部分模式寿命缩短, 甚至可以忽略。对于更强的反馈强度 $r_3=0.6$, 相比图 4(c) 中 $r_3=0.3$ 的情形, 图 4(g) 中经时间演化后存在的模式数量变得更少。这说明随着自混合干涉强度增大, 激光器内原自由运行模式随之减少, 激光器将趋于更少模式工作。目标物连续移动时的自混合信号如图 4(d) 和 4(h) 所示, 与图 3(b) 弱反馈下宽谱 THz-QCLs 自混合信号相比, 图 4 中强反馈下自混合信号不再以完整正弦规律变化。同时图 3(b) 中弱反馈下宽谱 THz-QCLs 自混合信号波幅调制的现象, 在强反馈下消失。如图 4(d) 和 4(h) 所示, 强反馈下宽谱 THz-QCLs 的自混合信号波幅保持不变。但相比于反馈强度为 $r_3=0.3$ 时图 4(d) 所示的自混合波形, 图 4(h) 中所示 $r_3=0.6$ 下自混合信号的波幅更大。这说明在强反馈范围内, 随着光反馈强度的增加, 自混合信号幅值也随之增大。同时, 图 4(d) 和 4(h) 中宽谱 THz-QCLs 自混合信号峰值个数保持不变。这表明宽谱 THz-QCLs 在强反馈条件下自混合信号不能简单地用于光谱测量, 但仍可应用于测距和成像技术。以上现象说明宽谱 THz-QCLs 在强反馈下会趋向于更少模式工作的行为规律。

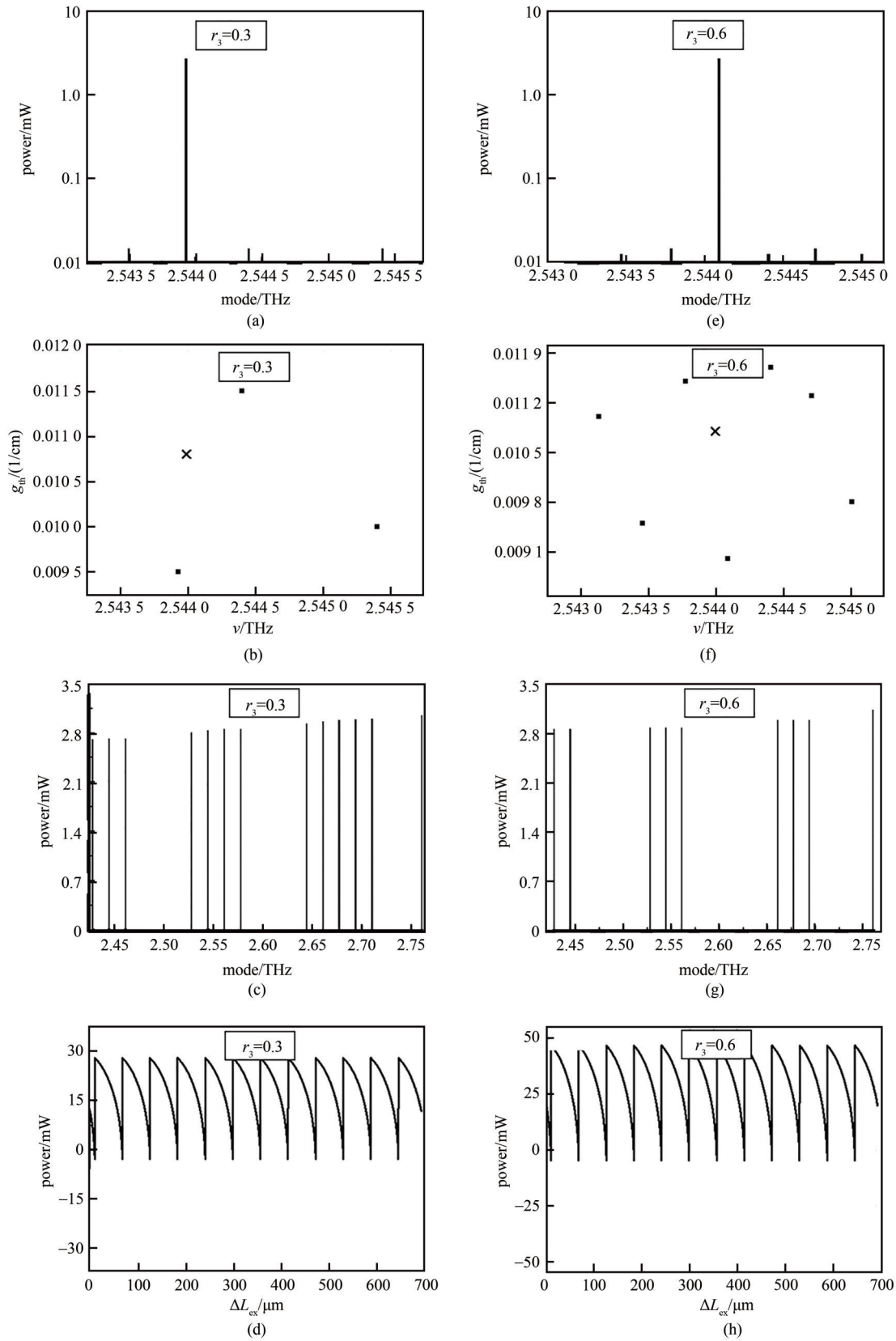


Fig.4 Self-mixing power signal under strong feedback. For feedback strength $r_3=0.3$ and $r_3=0.6$, (a)~(d) and (e)~(h) show respectively the power spectra of new modes in adjacent of 2.544 THz; the new modes mapped in (ν, g_{th}) plane; the power spectra of all modes; the self-mixing power signal
 图4 强反馈下自混合信号(a)~(d),(e)~(h)分别为 $r_3=0.3$ 和 $r_3=0.6$ 时,2.544 THz 模式附近出现新模式功率谱、新模式在 (ν, g_{th}) 平面分布、THz-QCLs 腔内模式功率谱、自混合信号

3 结论

本文基于光腔内传输矩阵理论及激光器多模速率方程模型,对宽谱太赫兹量子级联激光器在不同光反馈强度下的自混合动力学特性进行了理论研究。外界光反馈对宽谱太赫兹量子级联激光器内不同模式寿命及相应功率产生规律性的调制效应,这种效应随着外界光反馈强度的增加而更加显著。反射物移动时,弱反馈下宽谱太赫兹量子级联激光器的自混合信号呈正弦信号规律变化,但信号幅度出现周期性调制特征并形成一个大包络。同时,相邻振幅极值对应的外腔移动距离基本相同。强反馈下宽谱太赫兹量子级联激光器内部分模式寿命及相应功率衰减到可以忽略,同时激光器原自由运行模式附近会有新的模式出现。随着反馈强度增加,可忽略的模式增多,激光器将趋于更少的工作模式。在强反馈下移动反射物得到的自混合信号,其波峰个数同弱反馈条件下保持不变,但信号幅度出现明显的调制现象,仍可正确描述反射物的移动规律。

参考文献:

- [1] FAIST J, CAPASSO F, SIVCO D L, et al. Quantum cascade laser[J]. *Science*, 1994, 264(5158): 553–556.
- [2] 段素青, 楚卫东, 杨宁, 等. 太赫兹量子级联激光器有源区增益分析和设计[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2013, 11(1): 16–20. (DUAN Suqing, CHU Weidong, YANG Ning, et al. Design of the active region gain of the terahertz quantum cascade lasers[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2013, 11(1): 16–20.)
- [3] ZENG Y, QIANG B, WANG Q J. Photonic engineering technology for the development of terahertz quantum cascade lasers[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(3): 1900573.
- [4] HAGELSCHUER T, ROTHBART N, RICHTER H, et al. High-spectral-resolution terahertz imaging with a quantum-cascade laser[J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 13839–13849.
- [5] CHHANTYAL-PUN R, VALAVANIS A, KEELEY J T, et al. Gas spectroscopy with integrated frequency monitoring through self-mixing in a terahertz quantum-cascade laser[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(10): 2225–2228.
- [6] LI H, LI Z, WAN W, et al. Toward compact and real-time terahertz dual-comb spectroscopy employing a self-detection scheme[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(1): 49–56.
- [7] FU Zhanglong, LI Ruizhi, LI Hongyi, et al. Progress in biomedical imaging based on terahertz quantum cascade lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(2): 0207014–1–10.
- [8] RAVARO M, LOCATELLI M, VITI L, et al. Detection of a 2.8 THz quantum cascade laser with a semiconductor nanowire field-effect transistor coupled to a bow-tie antenna[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(8): 083116–1–4.
- [9] VALAVANIS A, DEAN P, LIM Y L, et al. Self-mixing interferometry with terahertz quantum cascade lasers[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 13(1): 37–43.
- [10] LIM Y L, TAIMRE T, BERTLING K, et al. High-contrast coherent terahertz imaging of porcine tissue via swept-frequency feedback interferometry[J]. *Biomedical Optics Express*, 2014, 5(11): 3981–3989.
- [11] DEAN P, VALAVANIS A, KEELEY J, et al. Coherent three-dimensional terahertz imaging through self-mixing in a quantum cascade laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(18): 181112–1–4.
- [12] XU Zhaolong, XIE Yan, WANG Yingxin, et al. Self-mixing interferometry with terahertz quantum cascade lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11): 1114003.
- [13] DEAN P, VALAVANIS A, KEELEY J, et al. Terahertz imaging using quantum cascade lasers—a review of systems and applications[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, 47(37): 374008.
- [14] QI X, KUNDU I, DEAN P, et al. Mode selection and tuning mechanisms in coupled-cavity terahertz quantum cascade lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(4): 1–12.
- [15] KUNDU I, DEAN P, VALAVANIS A, et al. Quasi-continuous frequency tunable terahertz quantum cascade lasers with coupled cavity and integrated photonic lattice[J]. *Optics Express*, 2017, 25(1): 486–496.
- [16] RAVARO M, LOCATELLI M, VITI L, et al. Detection of a 2.8 THz quantum cascade laser with a semiconductor nanowire field-effect transistor coupled to a bow-tie antenna[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(8): 083116–1–4.
- [17] LI L H, GARRASI K, KUNDU I, et al. Broadband heterogeneous terahertz frequency quantum cascade laser[J]. *Electronics Letters*, 2018, 54(21): 1229–1231.
- [18] QI X, AGNEW G, TAIMRE T, et al. Laser feedback interferometry in multi-mode terahertz quantum cascade lasers[J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 14246–14262.
- [19] HAN Y J, PARTINGTON J, CHHANTYAL-PUN R, et al. Broadband terahertz gas spectroscopy through multimode self-mixing in a quantum cascade laser[C]// *Terahertz Emitters, Receivers, and Applications X*. San Diego, Calif., USA: SPIE, 2019: 11124–1–9.

- [20] EBELING K J, COLDREN L A. Analysis of multielement semiconductor lasers[J]. *Journal of Applied Physics*, 1983, 54(6):2962–2969.
- [21] PIERCE I, REES P, SPENCER P S. Multimode dynamics in laser diodes with optical feedback[J]. *Physical Review A*, 2000, 61(5):053801–1–6.
- [22] GE L, YANG N, WANG J, et al. Properties of self-mixing interference in terahertz distributed feedback quantum cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(26):261105–1–5.
- [23] PETITJEAN Y, DESTIC F, MOLLIER J C, et al. Dynamic modeling of terahertz quantum cascade lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2010, 17(1):22–29.
- [24] GREEN R P, XU J H, MAHLER L, et al. Linewidth enhancement factor of terahertz quantum cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(7):071106–1–3.
- [25] SUHARA M, ISLAM S, YAMADA M. Criterion of external feedback sensitivity in index-coupled and gain-coupled DFB semiconductor lasers to be free from excess intensity noise[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1994, 30(1):3–9.
- [26] DONATI S. Developing self-mixing interferometry for instrumentation and measurements[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(3):393–417.
- [27] LEVINE A M, VAN TARTWIJK G H M, LENSTRA D, et al. Diode lasers with optical feedback: stability of the maximum gain mode[J]. *Physical Review A*, 1995, 52(5):R3436–R3439.
- [28] MORK J, TROMBORG B, MARK J. Chaos in semiconductor lasers with optical feedback: theory and experiment[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1992, 28(1):93–108.
- [29] SCHUNK N, PETERMANN K. Numerical analysis of the feedback regimes for a single-mode semiconductor laser with external feedback[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1988, 24(7):1242–1247.

作者简介：

葛 磊(1991–)，男，太原市人，在读博士研究生，主要研究方向为凝聚态理论。email: ci17@gscap.ac.cn.

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。

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及量子点、量子环的电子和激子性质、石墨烯等低维纳米结构的电子学特性等。email: yang_ning@iapcm.ac.cn.

段素青(1963–)，男，山西省朔州市人，博士，研究员，主要研究方向为低维纳米系统的量子输运特性的理论以及材料物性的第一性原理计算等。