

太赫兹量子级联激光器自混合干涉测量技术研究

徐赵龙¹, 解研^{2*}, 王迎新², 赵自然², 楚卫东^{3**}, 冯德军^{1***}

¹山东大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266237;

²清华大学工程物理系, 北京 100084;

³北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088

摘要 太赫兹量子级联激光器(THz-QCL)是用于实现自混合干涉的半导体激光器。利用自混合干涉效应,实验测量了 THz-QCL 频谱、线宽增强因子以及反馈光耦合系数。搭建了 THz-QCL 自混合干涉光路,基于 THz-QCL 驱动电压,获得了具有高信噪比的自混合干涉信号及其随反馈光光程变化的曲线。通过对自混合干涉信号进行解析,准确获得了 THz-QCL 在不同工作电流和温度下的激射频谱,频谱的分辨率反比于反馈光光程的变化。基于自混合干涉信号,分析得到了 THz-QCL 的线宽增强因子以及反馈光耦合系数。所实现的自混合干涉测量技术有望发展为物质的太赫兹频谱识别和测量技术。

关键词 激光器; 太赫兹量子级联激光器; 自混合干涉; 频谱测量; 线宽增强因子

中图分类号 O433.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1114003

Self-Mixing Interferometry with Terahertz Quantum Cascade Lasers

Xu Zhaolong¹, Xie Yan^{2*}, Wang Yingxin², Zhao Ziran², Chu Weidong^{3**}, Feng Dejun^{1***}

¹ School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao, Shandong 266237, China;

² Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

³ Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China

Abstract A terahertz quantum cascade laser (THz-QCL) is a kind of semiconductor laser, which is suitable to realize the self-mixing interference. In this work, an experimental method based on self-mixing interference effect is demonstrated for the measurements of the emission spectrum, linewidth enhancement factor, and feedback optical coupling coefficient of a THz-QCL. We set up the optical path for self-mixing interferometry with THz-QCL to obtain the self-mixing interference signal with high signal-to-noise ratio as well as its variance with feedback optical distance, based on voltage driven by THz-QCL. By analyzing the self-mixing interference signal, the lasing spectra of THz-QCL under different operating currents and temperatures are obtained accurately. The resolution of spectra is inversely proportional to feedback optical distance. In addition, we investigate the linewidth enhancement factor of THz-QCL and the feedback optical coupling coefficient based on the self-mixing interference signal. The self-mixing interferometry demonstrated here is expected to be further developed into one used for terahertz spectral identification and measurement.

Key words lasers; terahertz quantum cascade laser; self-mixing interference; spectrum measurement; linewidth enhancement factor

OCIS codes 140.5965; 120.3180; 300.6495; 120.4530

1 引 言

太赫兹量子级联激光器(THz-QCL)是太赫兹波段的高功率相干源,它是基于复合量子阱结构,依赖输运电子的子带间跃迁实现激射的半导体激光器。相比于其他太赫兹辐射源,THz-QCL 具有功

率高、体积小、波长可设计、相干性好等优点。随着半导体量子阱能带工程和量子设计技术的不断发展,目前 THz-QCL 的频谱已可覆盖 1.2 ~ 5.4 THz^[1]的范围,连续波工作模式下功率输出超过 100 mW^[2],脉冲工作模式下峰值功率超过 2.4 W^[3]。得益于 THz-QCL 的诸多优点,基于

收稿日期: 2020-02-01; 修回日期: 2020-03-12; 录用日期: 2020-03-16

基金项目: 国家自然科学基金 NSAF 联合基金重点项目(U1730246)、国家自然科学基金(61377043)

* E-mail: xie_yan@mail.tsinghua.edu.cn; ** E-mail: chu_weidong@iapcm.ac.cn; *** E-mail: dejunfeng@sdu.edu.cn

THz-QCL 的太赫兹频谱分析与太赫兹成像技术在生物组织成像^[4]、气体成分及浓度检测^[5]、材料检测^[6]等诸多领域中得到广泛研究。

利用激光的相干性开发高灵敏的探测技术一直是激光应用技术的重要研究方向。激光干涉有多种形式,如迈克耳孙干涉、外差干涉、自混合干涉等,本文重点关注自混合干涉。在自混合干涉过程中,激光被目标物反射后,反馈光再注入进激光器的谐振腔,与腔内激光场发生干涉,从而引起激光器频率、功率、相位等激光输出特性发生变化。由于反馈光携带目标物的反射强度、相位等信息,因此可通过反馈光对激光器输出性能的调制来获得这些信息,进而实现对目标物的探测。相比于其他干涉手段,自混合干涉具有光路简单、不需要探测器、灵敏度高等优点,可应用于工业测量与军事技术领域。

自混合干涉要求激光器在光注入下有好的动力学稳定性,这对激光器的动力学特性提出了特殊的要求。很多传统的半导体激光器是可以实现自混合干涉的。研究表明,THz-QCL 有极小的线宽增强因子和皮秒(ps)量级的增益恢复时间,比传统的半导体激光器具有更好的动力学稳定性,因此其在实现自混合干涉方面更具优势。Green 等^[7]首先证明了 THz-QCL 的自混合干涉效应。随后,研究人员开展了系列的 THz-QCL 自混合干涉成像工作^[8-10]。目前,基于 THz-QCL 自混合干涉与近场成像的太赫兹成像横向分辨率已达 78 nm^[11],小于所用激光器波长的千分之一,是太赫兹成像的最高分辨率。

自混合干涉是一种干涉手段,激光的频率是干涉信号中的重要物理量,可直接从干涉信号中解析出,因此自混合干涉可开发成为一种频谱测量手段。然而,由于太赫兹波探测的困难,THz-QCL 的频谱测量并不是一件易事。常规的傅里叶变换光谱仪价格昂贵、体积大且探测时间久,仅适用于实验室测量。其他的如迈克耳孙干涉法^[12]、Martin-Puplett (M-P)干涉法^[13]、非同步光电采样技术^[14]、频率梳法^[15]等,都有光路复杂、测量成本高等缺点。本文基于自混合干涉技术,提出一种简单、准确的 THz-QCL 频谱测量技术。此外,由于自混合干涉涉及到激光器的动力学过程,与激光器动力学相关的内禀参数即线宽增强因子,以及反馈光耦合系数等参数也可以从自混合信号中解析出来,因此本文也研究了从自混合信号中获得 THz-QCL 线宽增强因子、反馈光耦合系数等参数的方法。

2 基本原理与实验设计

2.1 基本原理

实验中使用的 THz-QCL 含有法布里-珀罗(F-P)谐振腔,在图 1 所示的自混合干涉模型中,可利用三镜模型描述光场在谐振腔中、谐振腔外以及被目标物反射后注入谐振腔的动力学过程。在该模型中,激光腔的前、后端面及目标物被简化为三个镜面。激光腔的后端面(M_1)镀有高反射膜,光场在此镜面上只有反射没有透射。激光腔内的光场向右传播,一部分被激光腔前端面(M_2)反射回激光腔内,一部分从 M_2 透射出来,继续向右传播,并被目标物表面(M_3)反射回激光腔内。在此复合谐振腔中,利用 Lang-Kobayashi(L-K)方程^[16]描述光场与增益介质相互作用的动力学过程,并给出光场的幅值和相位,上、下辐射态载流子数目,粒子数反转以及光子数目随时间的演化。当激光器在光反馈情况下形成稳定激射时,自混合效应导致的光在外腔传播过程中的相位变化为

$$2\pi\tau_{\text{ext}}(f_0 - f) = C \sin(2\pi f\tau_{\text{ext}} + \arctan \alpha), \quad (1)$$

式中:光场在外腔中往返一次所需的传播时间 $\tau_{\text{ext}} = 2n_{\text{ext}}L_{\text{ext}}/c$, n_{ext} 是外腔的物质折射率, L_{ext} 是外腔长度, c 是真空光速; f_0 和 f 分别是无光反馈和有光反馈情况下激光器的激射频率; α 是激光器的线宽增强因子; C 是反馈光耦合系数,是一个无量纲的量,用来描述反馈光场与激光腔内光场的耦合,表示为

$$C = \epsilon \frac{\tau_{\text{ext}}}{\tau_L} \sqrt{1 + \alpha^2} \sqrt{\frac{R_3}{R_2}} (1 - R_2), \quad (2)$$

式中: ϵ 是外腔光场耦合效率因子, $|\epsilon| \leq 1$; R_2 是激光腔前端面 M_2 的反射率; R_3 是目标物表面的反射率; $\tau_L = 2nL/c$ 是光场在激光腔内往返一次的传播时间,其中, n 为激光谐振腔增益介质的折射率, L 为激光谐振腔的长度。(1)式是一个超越方程,给出了光反馈条件下的相位响应。

此时,在增益介质中,上、下辐射态的载流子数目及光子数目不随时间变化,因此可以求得在光反馈条件下的粒子数反转变量 ΔN 和激光器的激射功率 P 为

$$\Delta N = -\frac{2C}{N_p G_0 \tau_{\text{ext}} \sqrt{1 + \alpha^2}} \cos(2\pi f\tau_{\text{ext}}), \quad (3)$$

$$P = P_0 \left[1 + \frac{2C\tau_p}{\tau_{\text{ext}} \sqrt{1 + \alpha^2}} \cos(2\pi f\tau_{\text{ext}}) \right], \quad (4)$$

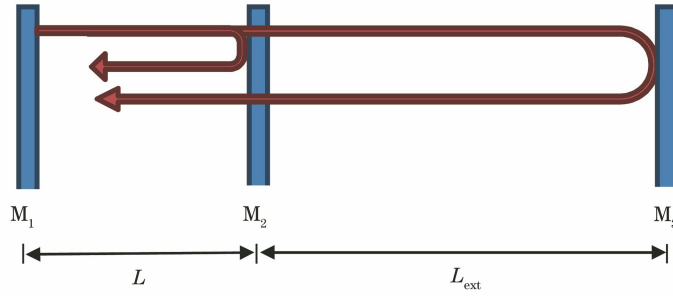


图1 F-P腔中自混合干涉模型示意图

Fig. 1 Schematic of self-mixing interference F-P cavity model

式中： N_p 是 THz-QCL 有源区周期性结构的周期数目； G_0 是单个周期的光增益系数； P_0 是没有光反馈时 THz-QCL 的激光功率； τ_p 为光子寿命。由此可知，因子 $\cos(2\pi f\tau_{\text{ext}})$ 表征了自混合效应引起的变化。然而，相位响应 $2\pi(f_0 - f)\tau_{\text{ext}}$ 不是直接测量量，它的变化可由 QCL 的功率表征。QCL 功

率的测量往往不够灵敏，响应速度也不足够快，还会导致光路复杂。因此，在实际应用中，自混合信号一般不通过测量功率来获得。研究表明，激光器的端电压随着 ΔN 的变化而变化^[17]。因此，可通过测量激光器端电压的变化得到自混合信号，即

$$V_{\text{LFI}} = \frac{\beta C}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \cos [2\pi f_0 \tau_{\text{ext}} - C \sin(2\pi f \tau_{\text{ext}} + \arctan \alpha)], \quad (5)$$

式中： β 是比例系数。比较(3)式和(4)式可知，这种获取自混合信号的方法与测量激光功率变化的方法是相同的。

在反馈光场耦合强度比较弱的情况下，即 $C \ll 1$ 时，(5)式所展示的自混合信号可简化为 $V_{\text{LFI}}(t) = \frac{\beta C}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \cos [2\pi f_0(t) \tau_{\text{ext}}(t)]$ ，表明光场在外腔中传播的时间 $\tau_{\text{ext}}(t)$ 或 THz-QCL 的激光频率 $f_0(t)$ 的变化，会引起自混合信号的变化， t 为时间。这里给出了自混合信号的两种调控手段。在外腔长度变化时，光场在外腔中往返一次的时间为 $\tau_{\text{ext}}(t) = 2n_{\text{ext}} [L_0 + \Delta L_{\text{ext}}(t)] / c$ ，其中， L_0 为 $t=0$ 时的外腔长度， $\Delta L_{\text{ext}}(t)$ 为外腔长度随时间的变化量。当 $\Delta L_{\text{ext}}(t) = \lambda / (2n_{\text{ext}})$ 时， $2\pi f_0 \tau_{\text{ext}}(t)$ 就会改变 2π 。因此，对应于半波长的移动，自混合信号会发生周期变化，呈现所谓的“干涉条纹”。另一种自混合信号调制手段是激光频率随驱动电流的微小变化而发生的线性变化，即 $f_0(t) = \Omega \Delta I(t)$ ，其中 $\Delta I(t)$ 为驱动电流的微小变化量，频率调制系数 Ω 由 THz-QCL 动力学特性决定，自混合信号可在几十毫安的范围内呈现周期性变化。

自混合信号的周期性变化与双光束干涉的明暗条纹均由类似的干涉因子决定，因此可通过光程变化下的空间频率分布来获取光源频谱。在外腔长度

变化时，得到 $V_{\text{LFI}} - \Delta L_{\text{ext}}$ 曲线的傅里叶变换形式，进而得到 THz-QCL 激光频谱。

(5)式含有激光器的内禀参数即线宽增强因子 α 以及反馈光耦合系数 C ，因此可以通过测量自混合信号来解析出 C 和 α 等参数，进而深度研究 QCL 的动力学行为。采用梯度下降算法，寻找包含参数 C 和 α 估计值的理论模型与测量的自混合信号数据的偏差平方和的最小值，就可获得 C 和 α 参数^[18]。以 L-K 方程作为理论模型进行精确求解，将模拟自混合信号与测量数据进行对比，进而迭代优化待求的参数值。

2.2 实验设计

实验装置如图 2 所示，其中 AC 表示交流。实验中 THz-QCL 的 F-P 谐振腔长 2 mm，宽 100 μm ，厚度约为 10 μm 。在热沉温度为 20 K，驱动电流为 0.645 A (高于阈值电流 25 mA) 时，该 QCL 的标称频率为 2.6 THz。将激光器安置在连续流低温恒温器 (Janis ST-100) 的载物台上，恒流源供电，激光器热沉温度被控制为 20 K，在连续激光模式下工作。QCL 放置在直径为 50.8 mm、有效焦距为 76.2 mm 的离轴抛物面反射镜 1 的焦点处。光束经离轴抛物面反射镜 1 准直，入射到直径为 50.8 mm、有效焦距为 50.8 mm 的离轴抛物面反射镜 2 上。在离轴抛物面反射镜 2 的焦平面上放置一平面反射镜，可使

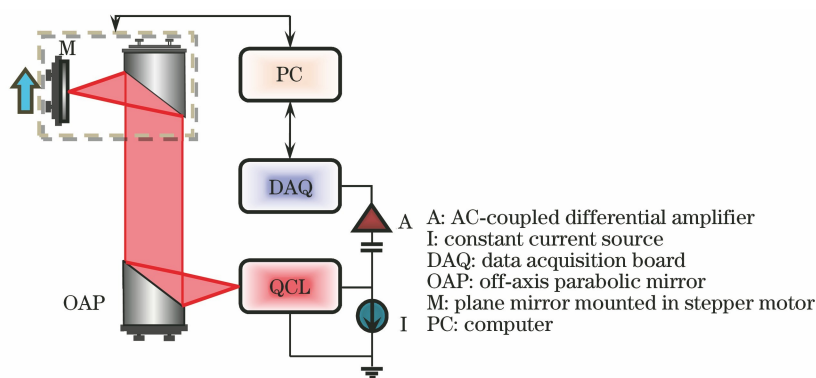


图 2 THz-QCL 自混合干涉光谱测量系统示意图

Fig. 2 Schematic of THz-QCL self-mixing interference spectral analysis system

光束沿原光路返回到激光腔中。离轴抛物面反射镜 2 和平面反射镜安置在平移台 (Thorlabs NRT100) 上,平面反射镜到 QCL 的初始距离 L_0 为 60 cm。

在光反馈条件下,一个由自混合效应引起的呈周期性变化的微弱信号叠加在 THz-QCL 端电压上,利用低噪声交流耦合差分放大器,去掉 THz-QCL 端电压中的直流分量,并放大其交流小信号,之后将其作为输入信号送入数据采集卡 (NI-DAQ USB-6251 BNC)。通过 Labview 程序在计算机、平移台控制器和数据采集卡之间建立实时通信,平移台电机启动时数据采集卡启动采集数据,电机停止时数据采集卡停止采集并保存数据。实验中,设定交流耦合差分放大器的放大倍数是 50;平移台的移动方向为远离 QCL,即光程增加的方向,速度为 $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$;数据采集卡的采样频率为

1000 Hz。

3 结果分析与讨论

3.1 频谱测量

图 3(a)是数据采集卡获取的 THz-QCL 端电压随外腔长度变化的自混合信号。此时,驱动电流 I 为 0.645 A,激光器热沉温度为 20 K。密集的信号放大图如插图所示,可以发现自混合信号以 $\lambda/2$ 为周期振荡,由此估算激光器的激射频率与标称值十分接近。将 $V_{\text{LF1}}-\Delta L_{\text{ext}}$ 曲线进行傅里叶变换,得到 THz-QCL 的激射频谱,如图 3(b)所示,其中 V_{LF1} 经傅里叶变换后为 V'_{LF1} 。频谱显示,该 QCL 在这个工作电流和工作温度下单模激射,频率是 2.6084 THz,与标称值吻合。这说明该 QCL 在阈值附近具有非常好的单模输出特性。

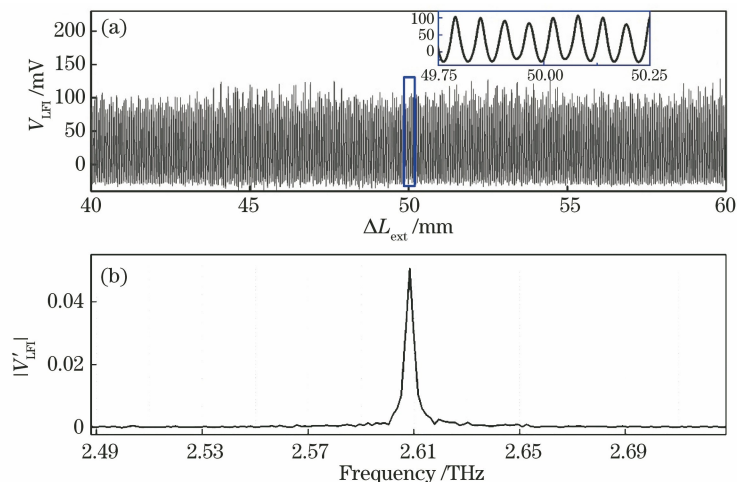


图 3 $I=0.645 \text{ A}$ 时 THz-QCL 的自混合信号及频谱图。(a) 自混合信号;(b) 频谱图

Fig. 3 Self-mixing signal and spectrum of THz-QCL when $I=0.645 \text{ A}$.

(a) Self-mixing signal; (b) spectrogram

与迈克耳孙干涉法测频谱相似,基于自混合干涉的频谱测量精度取决于反馈光程变化的长度

$\Delta L_{\text{total}}: \Delta f = c/2\Delta L_{\text{total}}^{[19]}$,其中 Δf 为有频谱分辨率。图 4 展示了驱动电流为 0.645 A、激光器热沉温

度为 20 K 时,不同 ΔL_{total} 对频谱分辨率的影响。从图中可以看出,随着 ΔL_{total} 的增加,频谱的半峰全宽不断减小,频谱的分辨率逐渐提升。本文使用的平移台满行程为 100 mm,因此测量频谱的最高分辨率达 1.5 GHz。若要得到更高的分辨率,可以选用行程更长的平移台或采用折叠光路的方法增加可变光程的范围。迄今为止,成功实现 THz-QCL 自混合效应的最长外腔长度可达 10 m^[20],这意味着基于自混合干涉的频谱测量分辨率可高达 15 MHz。由此可见,高稳定性、高灵敏、高分辨率的特性使得基于 THz-QCL 的自混合干涉系统在物质频谱检测,特别是气体频谱分析方面具有优势。

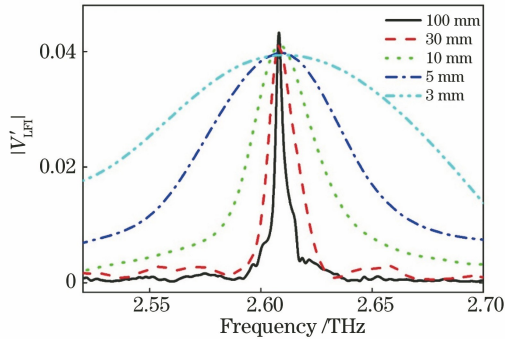


图 4 $I=0.645$ A 时不同 ΔL_{total} 下测量的激光器频谱
Fig. 4 Measured laser spectra under different ΔL_{total} when $I=0.645$ A

作为一种半导体激光器,THz-QCLs 的激光特性敏感地依赖于激光腔内载流子密度的变化。当载流子密度发生变化时,腔内折射率、增益谱、激光频率以及光场振幅都会发生变化,直到系统形成新的稳定状态。驱动电流的变化对载流子密度有直接的影响,这是导致激光特性发生变化的重要因素。本文研究了阈值附近驱动电流变化对激光频谱的影响。图 5 展示了驱动电流以 5 mA 的步长从 0.630 A 变化到 0.655 A 时 THz-QCL 的激光频谱。测量结果表明:在此电流变化范围内,频谱均呈单一频率变化,THz-QCL 是单模输出;驱动电流从 0.630 A 增长到 0.650 A 的过程中,激光频率没有发生变化;然而,当驱动电流增加到 0.655 A 时,激光频率由 2.6084 THz 变为 2.6069 THz,减小了 1.5 GHz。已有的研究^[21]表明:THz-QCL 的频率随着电流的变化呈线性变化,每 mA 的电流变化可以引起频率 MHz 量级的变化,频率随着电流的增加而减小。根据测量结果,可估算实验中使用的 THz-QCL 的频率调制系数 Ω 约为 $-60 \text{ MHz} \cdot \text{mA}^{-1}$,与以往的研究结果基本一致。受频谱测量分辨率的限制,在

0.630~0.650 A 的变化范围内,无法呈现激光频率随电流的线性变化。因此,对 Ω 的估计是比较粗略的。对 Ω 的测量能够使人们了解到在哪个电流范围内 QCL 激光频率可被线性调制,调制的幅度是多少,这是利用扫频技术实现并解析自混合干涉信号的前提条件。

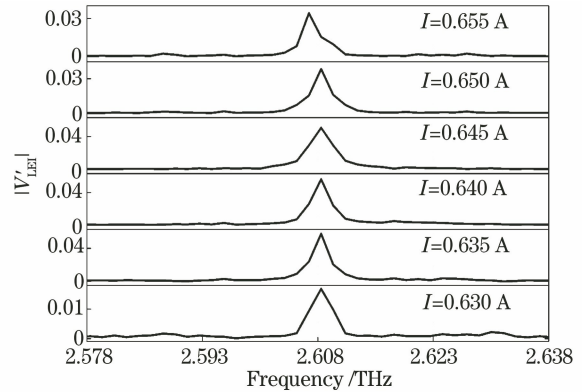


图 5 不同驱动电流下的激光器频谱图

Fig. 5 Laser spectra under different driving currents

继续提升驱动电流,可能会导致 QCL 的增益谱展宽,出现模式竞争的动力学过程,最终形成多纵模激射的情况。在实际测量中,当驱动电流提升至 0.660 A 时,已经观察到了多纵模。图 6 展示了 $I=0.7$ A 时的自混合干涉信号及其相应的频谱。随着外腔长度的变化,自混合干涉信号的幅值发生了较大的变化。在信号幅值较小的区域,如图 6(a)插图所示,出现了多个振荡频率相近的周期信号,表明多个激射模式在外腔中传播。多种模式在同一外腔中传播,会出现干涉相消的情况,导致自混合信号的幅值呈周期性减小。相应的频谱证实了对自混合干涉信号的分析。在图 6(b)中,出现了 6 个比较明显的频率模式,模式间距约为 20 GHz。依据 F-P 腔模式间距理论公式 $\Delta f_{\text{FP}} = c/2nL$,实验使用的 THz-QCL 谐振腔增益介质折射率 $n=3.8$,腔长 $L=2$ mm,可计算模式间距 Δf_{FP} 为 19.7 GHz,与实验结果吻合。

3.2 系统动力学参数测量

在 THz-QCL 自混合干涉系统中,反馈光耦合系数、线宽增强因子等参数可表征激光器的工作状态或用来解析目标物的信息。测量这些参数可以加深对系统动力学特性的了解,也是基于 THz-QCL 自混合干涉效应实现传感测量、频谱分析以及相干成像等技术的关键环节。图 7(a)~(c)分别给出了阈值附近 I 为 0.623,0.645,0.655 A 的自混合干涉信号与理论模拟结果的对比。实验数据中的每一个

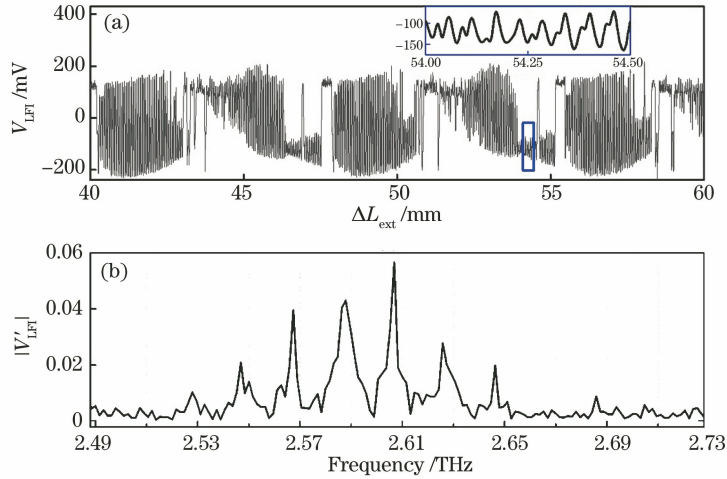


图 6 $I=0.7$ A 时 THz-QCL 端电压的自混合信号及频谱图。
Fig. 6 Self-mixing signal and spectrum of terminal voltage of THz-QCL when $I=0.7$ A.

(a) Self-mixing signal; (b) spectrogram

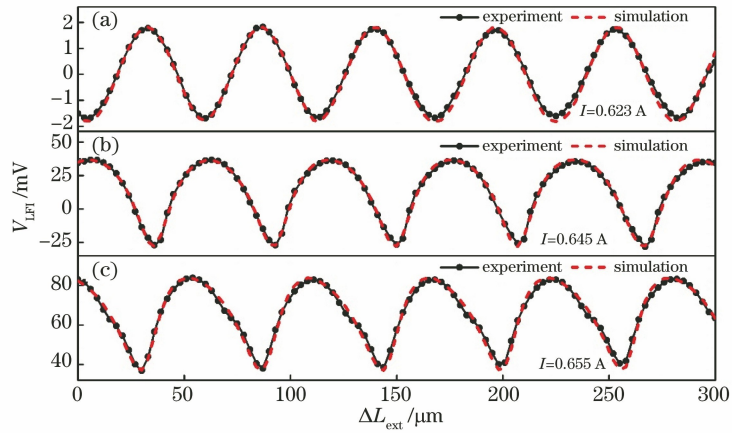


图 7 不同电流下自混合干涉信号与理论仿真的对比。(a) $I=0.623$ A; (b) $I=0.645$ A; (c) $I=0.655$ A
Fig. 7 Comparison of self-mixing interference signals with theoretical simulations under different currents.

(a) $I=0.623$ A; (b) $I=0.645$ A; (c) $I=0.655$ A

信号波形都具有 5 个完整的振荡周期,针对每一个周期进行单独的参数拟合,再对 5 个周期的结果求平均值和标准偏差,给出 C 和 α 的拟合值,如表 1 所示。其中 C 的平均值都小于 1,体系处于弱反馈区域。当 $I=0.623$ A 时,反馈光耦合强度最弱,自混合干涉信号的线形接近正弦曲线。当电流增加到 0.645 A 时,反馈光耦合强度增加,自混合干涉信号形状偏离正弦振荡,振幅正极值附近的线形变宽,负极值附近的线形收窄,表现出较强的非线性光学效应。此时, α 的平均值也有所增加,导致信号曲线倾斜。当电流增加到 0.655 A 时, C 值的变化不大, α 值却有显著变化,同时自混合信号有更大程度的倾斜。研究表明:随着驱动电流的增加,激光器输出功率的提升使反馈光耦合强度有所增加。此外,驱动电流变

化引起的载流子密度和增益的非线性变化,导致 α 因子也发生了改变,与文献^[7]中的结论一致;即使 α 因子随驱动电流发生变化,但是 $|\alpha| < 1$,远小于传统半导体激光器的 α 值(一般为 3~7),这表明 THz-QCL 在反馈光的扰动下,更容易形成稳定激射。

利用 C 和 α 的拟合值,可以估算光反馈作用下 THz-QCL 的激射频率相对于自由运行时的偏移。由(1)式可知, C 越大,自混合效应引起的激射频率的变化就越大。以 $C=0.6195, \alpha=-0.702$ 所表征的反馈耦合光状态为例,将参数代入 L-K 方程,得到 $|f_0 - f|_{\max} = 30$ MHz,即在光反馈条件下,THz-QCL 最大的频率变化只有 f_0 的 0.01%,影响非常微小。由此可知,基于自混合干涉效应的 THz-QCL 光谱测量是非常准确的。

表 1 不同电流下反馈光耦合系数和线宽增强因子的计算结果

Table 1 Calculated results of feedback optical coupling coefficients and linewidth enhancement factors under different driving currents

I/A	C	α
0.623	0.0020 ± 0.0005	-0.092 ± 0.001
0.645	0.5992 ± 0.0194	-0.198 ± 0.045
0.655	0.6195 ± 0.0180	-0.702 ± 0.050

4 结 论

针对 THz-QCL 频谱以及线宽增强因子、反馈光耦合系数的测量,研究了 THz-QCL 自混合干涉测量技术。在深入理解自混合干涉原理的基础上,设计了自混合干涉测量实验,获得了具有高信噪比的自混合干涉信号。通过对自混合信号进行傅里叶变换,准确地获得了 THz-QCL 在不同电流下的激励频谱,探索了 QCL 的激励模式对驱动电流的依赖关系。基于所获得的自混合干涉信号,精确地获得了 QCL 的线宽增强因子、反馈光耦合系数等表征激光器动力学特性的参数,展示了 QCL 不同于传统半导体激光器的动力学稳定性。研究结论揭示 THz-QCL 自混合干涉测量技术具有准确、灵敏、光路简单等优势,这一技术在高分辨太赫兹成像、高灵敏物质分析等新型应用技术领域极富潜力。

参 考 文 献

- [1] Scaliari G, Walther C, Fischer M, et al. THz and sub-THz quantum cascade lasers [J]. *Laser & Photonics Review*, 2009, 3(1/2): 45-66.
- [2] Williams B S, Kumar S, Hu Q, et al. High-power terahertz quantum-cascade lasers [J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(2): 89-91.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [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] Rakić A D, Taimre T, Bertling K, et al. Swept-frequency feedback interferometry using terahertz frequency QCLs: a method for imaging and materials analysis [J]. *Optics Express*, 2013, 21(19): 22194-22205.
- [7] 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.
- [8] Dean P, Leng Lim Y, Valavanis A, et al. Terahertz imaging through self-mixing in a quantum cascade laser [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(13): 2587.
- [9] 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.
- [10] Keeley J, Dean P, Valavanis A, et al. Three-dimensional terahertz imaging using swept-frequency feedback interferometry with a quantum cascade laser [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(6): 994-997.
- [11] Degl'Innocenti R, Wallis R, Wei B B, et al. Terahertz nanoscopy of plasmonic resonances with a quantum cascade laser [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(9): 2150-2157.
- [12] Zuo Z G, Ling F R, Wang P, et al. Hyperfine spectrum measurement of an optically pumped far-infrared laser with a Michelson interferometer [J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(5): 055004.
- [13] Liu W X, Wu D, Wang Y X, et al. Terahertz frequency measurement of far-infrared laser with an improvement of Martin-Puplett interferometer [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2010, 614(2): 313-318.
- [14] Gaal P, Raschke M B, Reimann K, et al. Measuring optical frequencies in the 0-40 THz range with non-synchronized electro-optic sampling [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(10): 577-580.
- [15] Yokoyama S, Nakamura R, Nose M, et al. Terahertz spectrum analyzer based on a terahertz frequency comb [J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 13052-13061.
- [16] Lang R and Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1980, 16(3): 347-355.
- [17] Katz J, Margalit S, Harder C, et al. The intrinsic

- electrical equivalent circuit of a laser diode[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1981, 17(1): 4-7.
- [18] Xi J T, Yu Y G, Chicharo J F, et al. Estimating the parameters of semiconductor lasers based on weak optical feedback self-mixing interferometry[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2005, 41(8): 1058-1064.
- [19] Keeley J, Freeman J, Bertling K, et al. Measurement of the emission spectrum of a semiconductor laser using laser-feedback interferometry[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 7236-7245.
- [20] Valavanis A, Dean P, Lim Y L, et al. Self-mixing interferometry with terahertz quantum cascade lasers [J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(1): 37-43.
- [21] Vitiello M S, Tredicucci A. Tunable emission in THz quantum cascade lasers [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2011, 1(1): 76-84.