

量子级联激光器非线性动态特性研究进展

冯伟¹, 毛雨¹, 孟悦¹, 任天亮¹, 王长^{2,3*}, 曹俊诚^{2,3*}

- (1. 江苏大学 物理与电子工程学院, 江苏 镇江 212013;
2. 中国科学院 上海微系统与信息技术研究所 集成电路材料全国重点实验室, 上海 200050;
3. 中国科学院大学 材料与光电研究中心, 北京 100049)

摘要:量子级联激光器(Quantum Cascade Laser, QCL)是依赖电子在量子阱子带间跃迁辐射出光子而发生激射的极型半导体激光器。大量的理论与实验研究已经证明轻微的外部扰动(如光反馈、光注入)或内部足够强的非线性模式耦合能够引起半导体激光器的非线性输出。QCL作为新型半导体器件,具有腔内强度高、子带间光学非线性强以及电子弛豫时间快等特点,激发了学者研究其非线性动力学的兴趣。本文详细综述了QCL的非线性动态特性研究进展情况,探究了QCL非线性动力学性质的产生机理,总结了QCL非线性特性的应用场景。

关键词:量子级联激光器; 半导体激光器; 外部扰动; 非线性动力学
中图分类号: O43 **文献标识码:** A

Progress in the study of nonlinear dynamic characteristics based on quantum cascade lasers

FENG Wei¹, MAO Yu¹, MENG Yue¹, RENG Tian-Liang¹, WANG Chang^{2,3*}, CAO Jun-Cheng^{2,3*}

- (1. School of Physics and Electronic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;
2. National Key Laboratory of Materials for Integrated Circuits, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;
3. Center of Material Science and Optoelectronic Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Quantum Cascade Laser (QCL) is a unipolar semiconductor laser that relies on the excitation of photons radiated by electrons leaping between subbands of quantum wells. Numerous theoretical and experimental studies have demonstrated that slight external perturbations (optical feedback, optical injection) or sufficiently strong internal nonlinear mode couplings can induce nonlinear output of semiconductor lasers. QCL, as a new type of semiconductor device, is characterized by high intracavity strength, strong inter-subband optical nonlinearity and fast electron relaxation time, which has stimulated the interest in studying its nonlinear dynamics. In this paper, we review in detail the progress of the study of nonlinear dynamical characterization in QCL, explore the mechanism of the generation of nonlinear dynamical properties of QCL, and summarize the applications of nonlinear properties of QCL.

Key words: quantum cascade lasers, semiconductor lasers, external perturbations, nonlinear dynamics

引言

关于非线性问题的认识可追溯到1673年Huygens对单摆的研究。1913年,Poincaré提出用几何方法解决动力学系统问题,并且预测非线性系统中

存在对初始条件的敏感依赖性。同时,Lyapunov用代数方法系统探讨了非线性动力学的稳定性问题,两者开拓了非线性科学的新研究方法。1963年,Lorenz研究了大气流动的模式,指出由三个变量描

收稿日期:2023-02-21,修回日期:2023-08-22

Received date:2023-02-21, Revised date:2023-08-22

基金项目:国家自然科学基金(12333012,61972813,61975225),上海市科学技术委员会(21DZ1101102)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (12333012, 61972813, 61975225); Science and Technology Commission of Shanghai Municipal (21DZ1101102)

作者简介(Biography):冯伟(1984-),女(汉族),江苏南通人,教授,博士学位,主要研究领域为太赫兹物理与器件. E-mail: wfeng@ujs.edu.cn

*通讯作者(Corresponding authors): E-mail: cwang@mail.sim.ac.cn; jccao@mail.sim.ac.cn

述的非线性系统可以表现出包括混沌运动等的复杂动力学行为。现代混沌研究便始于Lorenz对大气流动的非线性系统复杂动力学的研究。对于激光领域研究人员来说,一个关键事件是1975年哈肯证明激光动力学方程与Lorenz方程同构。这一观察刺激了对各种激光系统中混沌路径的重要实验和理论分析^[1-3]。激光器系统通常由三个变量表征:场、物质极化和粒子数反转。因此,激光器本身构成了典型的非线性系统。

量子级联激光器(Quantum Cascade Laser, QCL)是一种单极型半导体激光器,根据能带工程设计,可以工作于中红外和太赫兹波段,是重要的中红外和太赫兹激光光源^[4]。由于它具有超快的子带间跃迁和较好的波长可调谐性,对高速自由空间通信和光探测极具吸引力^[5-8],其皮秒量级的载流子寿命与传统半导体激光器的纳秒量级的载流子寿命形成鲜明的对比。由于载流子寿命相对于光子寿命较大,导致QCL没有弛豫振荡,因此与大多数有弛豫振荡的半导体激光器相比,其动力学模型能够得到简化^[9]。目前已有大量实验和理论证明轻微的外部扰动(光反馈^[10]、注入^[11]或调制^[12])足以引起常规半导体激光器的非线性输出。QCL作为新型半导体激光器,发展还不够成熟,对其动力学特性的实验研究相对有限,但理论的探索已经开始。关于QCL动力学特性的理论研究大多基于速率方程,对QCL进行建模是预测其性能的关键步骤。最近20年的研究工作证明,QCL的输出行为也会受到外部扰动的影响,产生非线性输出,包括稳定性、周期振荡、自脉冲^[13]、极端脉冲^[14]、低频波动(LFF)^[15]和非周期混沌。同时,子带间跃迁偶极矩很大,耦合高内腔强度可以产生1 THz量级的拉比频率,使得由光谱和空间烧孔产生的非线性效应在QCL中普遍存在^[16]。因此,QCL为研究非线性动力学提供了良好的平台。本文重点介绍了QCL内腔不稳定性以及光反馈、光注入、电流调制这些外部参量对QCL非线性动态行为的影响,提出使用饱和吸收体对QCL非线性行为进行调控的思路,展望了QCL非线性调控特性的应用。

1 QCL内腔不稳定性

即使没有引入额外的光电调制、注入或反馈,足够强的非线性模式耦合也可能导致QCL的不稳定性。20世纪60年代,Risken等预测了可能破坏单模激光器稳定性的基本相干机制,被称为Risken-

Nummedal-Graham-Haken(RNGH)不稳定性^[17-18]。当激光器中的增益恢复时间比腔往返时间长时,由可饱和吸收体引起的不稳定性通常会导致锁模。当增益恢复时间比腔往返时间短时,可饱和吸收体触发RNGH不稳定性。RNGH不稳定性和空间烧孔效应都是决定激光器动力学行为的关键因素。

Wang等^[19]和Gordon等^[20]先后观察到了多个纵模不稳定性,包括不同类型QCL中的RNGH不稳定性。2007年,Wang等^[19]报道了在QCL中观察到的相干多模不稳定性,与RNGH不稳定性相同,都是由拉比振荡驱动。但观察到的不稳定性阈值明显低于RNGH不稳定性,RNGH不稳定性通常会产生一个中心模和两个边带被拉比频率隔开的光谱,而在该实验的激光光谱中,只观察到两个峰值,其原因是激光中的可饱和吸收非线性。如图1所示,图1(a)显示了室温下连续波工作的激光器的光谱,激光光谱为接近阈值的单模,随着泵浦电流的增加而展宽,分裂成两个分离的峰。图1(b)显示了两个峰值的加权中心之间的差异随着输出功率的平方根函数线性增加。

2008年,Gordon等^[20]对多模QCL进行了研究。在理论上用麦克斯韦-布洛赫方程组分析了环形激光腔和法布里-珀罗(FP)腔中相干现象和空间烧孔的相互作用,模型中还添加了一个可饱和吸收体。结果表明,可饱和吸收体能够降低RNGH阈值。在实验部分对QCL中多模行为的温度依赖性进行了研究,发现在较高温度下,多模行为往往受RNGH不稳定性的控制;在较低温度下,则受空间烧孔效应的控制。出现这一现象的原因是,在较高温度下,热载流子注入超晶格中填充了更多的态,从而在基态和激发态之间产生额外的准共振吸收跃迁,这导致了激光辐射的额外饱和和吸收。2009年,Yu等^[16]报道了QCL中横模之间的非线性耦合同样普遍存在,能引起强烈的相位相干效应,并用四波混频相互作用加以解释。

2012年,Bai等^[21]研究了FP腔中红外QCL的相位和振幅不稳定性。相位不稳定性表现为单模性,振幅不稳定性表现为多模RNGH不稳定性。在不同泵浦强度下,腔中存在群速度色散和饱和吸收体时的振幅和相位不稳定性。2016年,Vukovic等^[22]分析了在FP腔QCL中,由拉比振荡引起的多模不稳定性。与之前的研究不同,该研究包含了介质极化光栅(相干光栅)及其因载流子扩散引起的弛豫,证

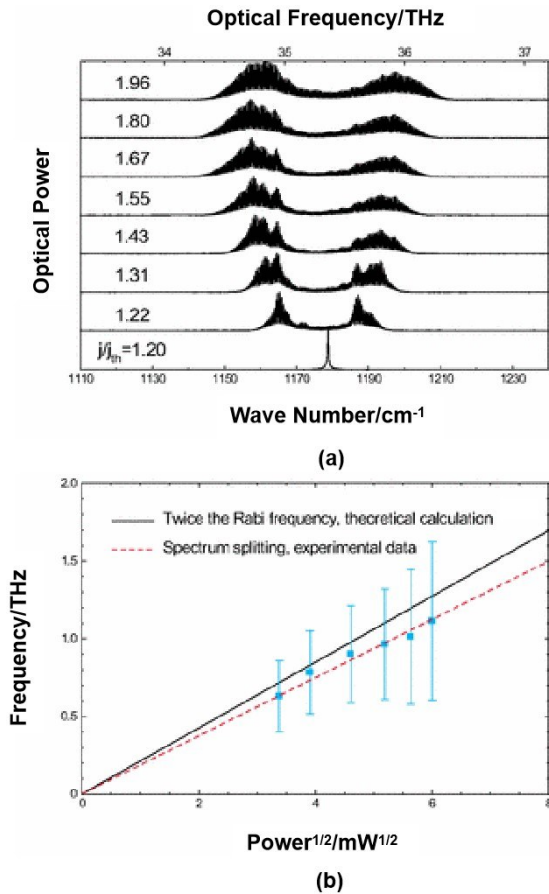


图1 (a) 在300 K下,用3 μm 宽的埋藏式异质结构激光器在8.47 μm 处发射,获得了高于阈值的光学光谱与泵浦比($\frac{j}{j_{th}}$)。对于 $1 < \frac{j}{j_{th}} < 1.2$,光谱与 $\frac{j}{j_{th}} = 1.2$ 相同,(b)光谱分裂和两倍拉比频率 $\frac{\Omega_{Rabi}}{2\pi}$ 与单个激光面收集的输出功率的平方根相比。虚线是数据的最小平方线性拟合^[19]

Fig. 1 (a) Optical spectra vs. pumping ratio (j/j_{th}) above threshold obtained in cw at 300 K with a 3- μm -wide buried heterostructure laser emitting at 8.47 μm . For $1 < j/j_{th} < 1.2$ the spectra are identical to $j/j_{th} = 1.2$, (b) spectral splitting and twice the Rabi frequency $\frac{\Omega_{Rabi}}{2\pi}$ vs. square root of output power collected from a single laser facet. The dashed line is a least-square linear fit of the data^[19]

明了在没有内置可饱和吸收体的情况下,低阈值多模 RNGH 不稳定性是可能的,这一结论得到了 Lyapunov 稳定性分析和基于行波速率方程模型的数值模拟的支持。近期,Vukovic等^[23]通过对 QCL 输出波形的分岔分析和重现期密度熵的研究,对 RNGH 不稳定性提供了新的见解。Gagica等^[24]以微腔 QCL 为例,从理论上研究了 RNGH 不稳定性阈值的磁场依赖性,证明了达到宽带多模 RNGH 自脉冲

所需的泵浦电流强度随磁场强度而降低,而拉比振荡频率和总光谱宽度保持不变。该方法有助于实现高功率宽带 QCL 发射,可应用于 QCL 频率梳的产生。

2 外部参量对 QCL 非线性输出的影响

2.1 外部光反馈

外部光反馈是半导体激光器产生非线性输出的典型调控模型之一。在 QCL 的激光腔前面放置一个外镜,激光从外镜反射并反馈到激光腔。根据反馈光的强度,可以观察到不同的非线性输出,其输出强烈依赖反馈光的强度^[25]。在常规光反馈半导体激光器中,动态输出行为由弛豫振荡频率和外腔谐振频率共同决定^[26-27]。由于 QCL 没有弛豫振荡,这大大简化了对光反馈下 QCL 动力学的研究。

2013年,Mezzapeas等^[28]首次从理论和实验两方面研究了光反馈下 QCL 的动力学。他们利用 Lang-Kobayashi 模型理论得到 QCL 的超快电子弛豫时间以及可忽略的线宽增强因子将导致 QCL 在光反馈下不会发生动力学不稳定性。近期,Qi等^[29]通过数值模拟 QCL 输出功率的时间演化特性表明,尽管 THz QCL 的线宽增强因子较小,但对光反馈下 THz QCL 的非线性输出起到了不可或缺的作用。随着线宽增强因子的值变大,THz QCL 的输出从周期振荡变为混沌振荡。

2018年,Spitz等^[30]通过理论和实验证明了温度对光反馈下 MIR QCL 的非线性动力学特性的影响。图 2(a)为 77 K 光反馈下 QCL 的实验时间轨迹,图 2(b)为 QCL 上能级载流子寿命随温度演化图。结果显示,在液氮温度(77 K)时,LFF 状态高度保持,降低温度使 QCL 对光反馈更加敏感。而通常只有在泵浦接近阈值时,才能在 QCL 中观察到 LFF。其原因为,当 QCL 从室温(290 K)降低到 77 K 时,上激光能级载流子寿命增加了 100%,通过增加载流子和光子寿命比,使激光失稳能在较低的反馈比下发生。这项工作对于控制子带间动力学以及开发安全大气传输线和光学对抗具有重要意义。

2020年,Spitz等^[14,31]报道了 MIR QCL 中的极端脉冲现象。极端脉冲(也包括 Rogue 波^[31])描述的是振幅远高于相邻事件振幅的随机孤立事件。图 3 所示为极端脉冲的时间序列图。这类极端脉冲可以通过添加小振幅周期调制来触发,在脉冲激励的情况下具有最高的成功率。了解此类极端脉冲的起因以及如何控制这类脉冲对使用中频 QCL 开发安

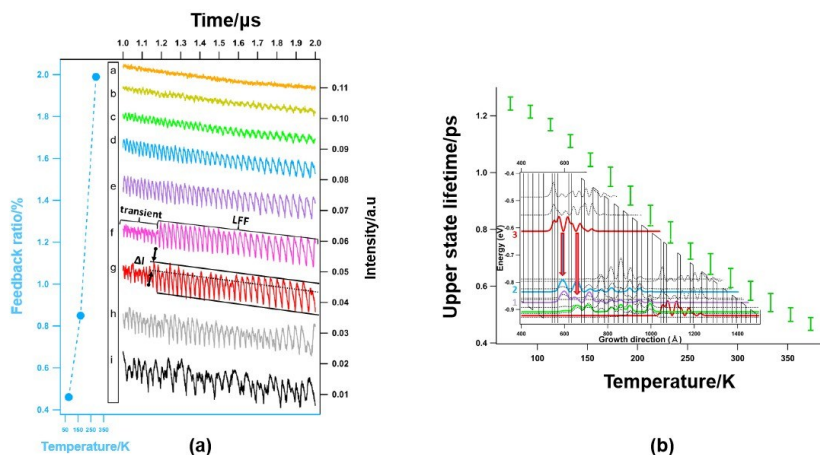


图2 (a) 77 K光反馈下QCL的时间演化,偏振器允许实现0到0.089之间的反馈比 f 的值,a) $f=0$,b) $f=0.0003$,c) $f=0.0008$,d) $f=0.0046$,e) $f=0.0141$,f) $f=0.0213$,g) $f=0.0298$,h) $f=0.0393$,i) $f=0.089$,左侧显示了在三种温度下出现LFF所需的关键反馈:290 K、170 K和77 K,蓝色虚线是为读者提供视觉指导,(b) QCL上能级载流子寿命随温度演化图^[30]
Fig. 2 (a) Experimental time traces of the QCL under the optical feedback at 77 K. The polarizer allows achieving the value of feedback ratio f between 0 and 0.089, a) $f=0$, b) $f=0.0003$, c) $f=0.0008$, d) $f=0.0046$, e) $f=0.0141$, f) $f=0.0213$, g) $f=0.0298$, h) $f=0.0393$, i) $f=0.089$, (b) simulation of the upper state lifetime evolution with temperature for the QCL under study^[30]

全信息传输至关重要,这些突发脉冲产生的额外能量可用于提高中红外遥感或对抗系统的效率。QCL中通过光反馈触发极端事件的能力将为光学神经元系统应用铺平了道路。此外,极端脉冲也可用于中断现代和未来自由空间光传输线的数据传输链路。

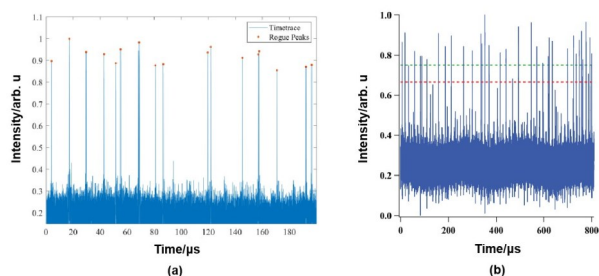


图3 极端脉冲的时间序列图^[14,31]
Fig. 3 Time series of extreme pulses^[14,31]

近期,Wang等^[32]报道了倾斜光反馈下FP腔QCL中的非线性动力学性质。通过调整反射镜的倾斜角度观察到周期振荡、准周期振荡和低频波动三种非线性运动状态,并且这种类型的动力学状态不会在端面正出射的光反馈中发生。他们还证明了较弱的反馈强度或较低的泵电流会导致较少的脉冲振荡发生,其归因于倾斜光反馈和光热动力学的组合效应。这些动态可能会刺激中红外范围的

潜在应用。Qi等^[13]报道了光反馈下THz QCL中的自脉动现象,提出了使用自脉动现象进行THz成像。该方案具有自检测的独特优势,无需外部检测器,仅在单个固定电流下工作。因此,该成像模式可以在高温下工作。

目前,关于光反馈下激光动力学的研究大多集中在MIR QCL上。为了充分发挥太赫兹源的应用潜力,对于THz QCL的非线性动力学研究是有必要的。尚未解决的关键问题之一是双光反馈下THz QCL的输出性能。我们课题组通过数值模拟,计算了双光反馈下THz QCL的动态特性。图4所示为固定其中一个外腔的长度和反馈强度,改变另一个外腔的长度和反馈强度的时间序列以及所对应的傅里叶频谱。其傅里叶频谱的最高峰为外腔振荡的基频。结果表明,双光反馈下,外腔振荡基频与两个外腔长度比和反馈强度比有关。而在单光反馈下,外腔振荡基频仅与外腔长度有关。该研究为进一步研究THz QCL的非线性特性提供新的见解,并将促进THz QCL在保密通信方面的应用。

理论和实验都表明QCL对光反馈很敏感,但它们比带间激光二极管更具抵抗力。根据反馈比的不同,MIR QCL会出现五种反馈状态^[33],这类似于B类半导体激光器中的情况。然而,稳定和混沌行为之间的转变是通过外腔频率的振荡发生的,而不涉及弛豫振荡,这类似于A类气体激光器中观察到的

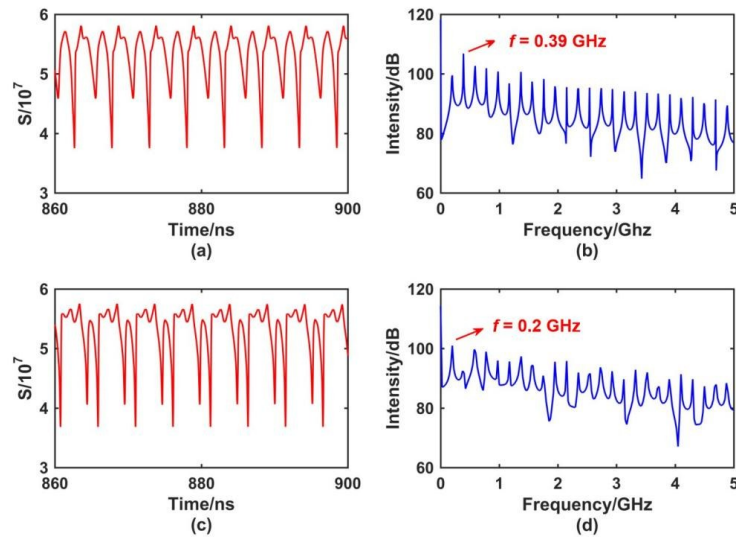


图4 固定其中一个外腔长度为0.75 m,反馈强度为0.22,(a)另一外腔的长度为0.45 m,反馈强度为0.022的时间序列,(b)与(a)对应的傅里叶频谱,(c)另一外腔的长度为0.6 m,反馈强度为0.022的时间序列,(d)与(c)对应的傅里叶频谱

Fig. 4 Fix one of the external cavities with the length 0.75 m and the feedback strength 0.22, (a) another external cavity with the length 0.45 m and the feedback strength 0.022, (b) Fourier spectrum corresponding to (a), (c) another external cavity with the length 0.6 m and the feedback strength 0.022, (d) Fourier spectrum corresponding to (c)

混沌路径。该主题未来的工作应集中于光反馈对QCL结构的影响。根据以往在带间激光器上的实验,激光器对光反馈的响应随器件参数而显著变化,例如QCL的设计、波长、尺寸等,以及研究光反馈对QCL线宽和调制响应的影响。这些研究将有助于更好地理解光反馈,以及QCL本身,并最终设计出光反馈QCL。

2.2 光注入

光注入也能对半导体激光器的稳定性产生影响。在大频率失谐或强注入的情况下,注入的激光通过不同的分岔机制失稳为混沌^[34]。注入锁定QCL的独特性在于没有不稳定锁定区,这与半导体激光器形成对比,其原因是QCL具有超短的载流子寿命^[35]。光注入QCL较易在大范围获得单周期(P1)振荡,P1振荡是当激光从稳定区穿过Hopf分岔时,产生无阻尼的自持振荡^[36]。P1极限环目前已广泛用于微波信号的生成和处理^[37],适用于光纤无线网络、光探测和测距系统^[38]。

Taubman等^[39]首次研究了分布反馈(Distributed FeedBack,DFB)QCL注入锁定机理。通过逐渐增加主激光器功率,他们观察到从激光器锁定范围增加,在3%的注入比下,可实现最大锁定范围为 ± 500 MHz。2013年,Wang等^[40]和Erneux等^[41]分别对光注入锁定QCL的分岔图和调制响应进行了理论分析。结果表明,随着线宽增强因子值的增加,稳定

锁定区变宽。同时,该动力系统中存在双稳态和不稳定锁定区。图5所示为光注入下QCL的分岔图,使用“Matcont”^[42]研究了主鞍节点(Saddle Node,SN)和Hopf分岔。

近期,Zhao等^[36]在光注入QCL的系统中未发现存在混沌的证据,但可产生可调谐频率梳。当光注入工作在Hopf分岔附近时,由于频率拉动效应和四波混频效应,P1振荡产生密集的光频梳。这种方法实现的频率梳可以用于气体分子的高分辨率窄吸收线检测。Wang等^[43]从理论上研究了光注入QCL的频率噪声(Frequency Noise, FN)特性。光注入能完全抑制低频FN,且抑制带宽随注入比增大而增大。

所有这些研究都得出,光注入QCL中无混沌现象可归因于其超快载流子寿命导致的小线宽加宽因子。在锁定范围内,预期会产生窄线宽、噪声降低或调制带宽增加的现象。然而,由于锁定范围相对较窄,应仔细选择主QCL和从QCL。此外,在极低的偏置电流下,一些P1振荡出现在正失谐的锁定范围之外。由于这些振荡发生在失谐频率处,光注入QCL可以用作可调谐光子振荡器,进一步的研究将确定光注入下QCL中是否存在对失谐频率不敏感的微波振荡点^[44-45]。目前在量子点激光器中已经找到对失谐频率灵敏度低的P1振荡,这些特殊的操作点可以稳定微波频率,防止失谐频率的波动^[46]。

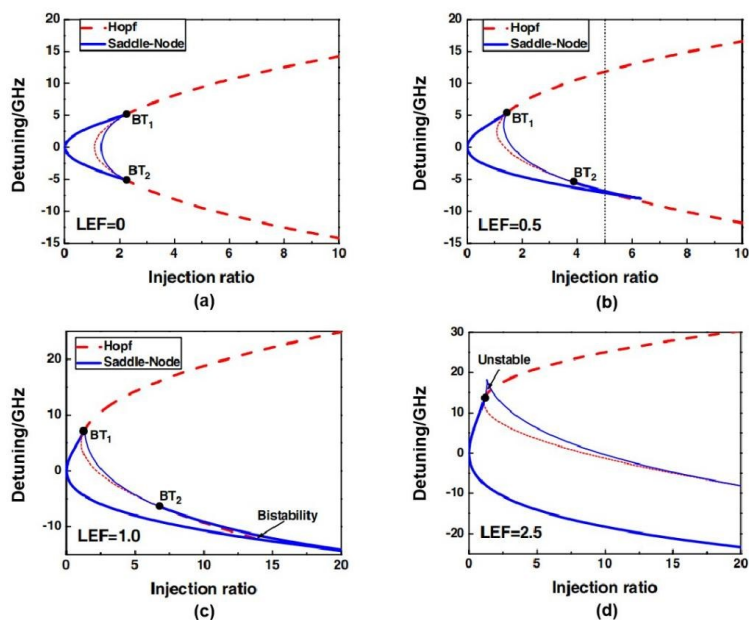


图5 线宽增强因子(LEF)值为0、0.5、1.0和2.5时,注入锁定QCL的局部分岔图。实线是鞍节点(SN)分叉,虚线是霍普夫分叉。超临界分叉用粗线表示,亚临界分叉用细线表示。稳定的锁定系统是由超临界分叉限定的。所研究的激光器工作在分岔图的稳定锁定区域,LEF为0.5,其中垂直虚线表示注入比为5.0^[40]

Fig. 5 Local bifurcation diagram of an injection-locked QC laser for linewidth enhancement factor (LEF) values of 0, 0.5, 1.0, and 2.5. The solid line is the saddle node (SN) bifurcation and the dashed line is the Hopf bifurcation. The supercritical bifurcation is denoted by the thick lines while the subcritical bifurcation by the thin lines. The stable locking regime is bounded by the supercritical bifurcations. The investigated laser is operating in the stable locked region of the bifurcation diagram with an LEF of 0.5, where the vertical dotted line indicates an injection ratio of 5.0^[40]

2.3 电流调制

半导体激光器的独特之处在于泵浦电流的直接调制。注入电流本身为QCL引入了额外的自由度,导致输出的不稳定性跟混沌。注入电流的调制将会导致相位调制,因为激光振荡频率为注入电流的函数。注入电流的调制引起了载流子密度的扰动,然后载流子密度的变化引起光子数和相位的变化。因此,QCL作为一个耦合的非线性系统其本质就是存在不稳定性。

在QCL的非线性动力学研究中,通常把电流调制和光反馈相结合。应用外部光反馈和电流调制可以使LFF的峰值和频率同步,即夹带现象^[47]。Spitz等^[48]对MIR QCL注入电流进行正弦波调制和方波调制。如图6所示,(a)和(b)为正弦波调制的时间序列和RF频谱,(c)和(d)为方波调制的时间序列和RF频谱。正弦波调制频率越高,LFF的峰值数量越少;调制振幅越低,LFF的峰值数量也越少。射频频谱的峰值间隔为外部调制频率,这项工作对在中红外领域开发紧凑型安全高速通信系统至关重要。该研究结果可重点应用于机载通信、星载通信

(如卫星之间的传输或太空漫游车之间的传输)以及偏远地区或受灾地区的最后一英里连接。

Chen等^[25]发现除了增大反馈强度,增加偏置电流也可以在一定程度上改善混沌带宽。当偏置电流增加到阈值电流的3倍时,混沌的标准带宽可以高达43 GHz。注入电流增大将导致载流子的多级跃迁更加活跃,从而反馈光的扰动将在激光器内部引起更多的非线性效应,使混沌带宽更高。

Spitz等^[49]研究了在强外光反馈下FP腔QCL的动态特性。在加入周期性电流扰动时,观察到了多种非线性动力学现象,丰富了对单模QCL中夹带现象的研究,从而优化了基于中红外QCL的保密通信。这项工作推进了研究复杂QCL结构在光反馈作用下的行为。

2.4 基于饱和吸收体的QCL动态特性研究

激光谐振腔中光学损耗的调制也会导致动力学不稳定性,通常通过将增益部分与作为可饱和吸收体的反向偏置部分相结合来实现的。可饱和吸收体是实现超快脉冲的关键器件,是一种非线性光学器件。可饱和吸收体在调Q和锁模技术中起着至

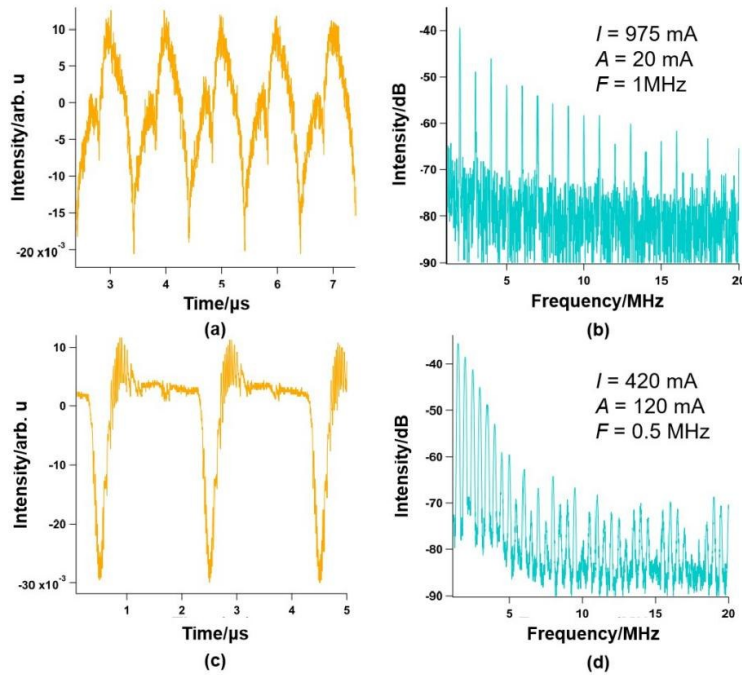


图6 (a) 正弦波信号调制的时间序列, (b) 与(a)对应的RF频谱, (c) 方波信号调制的时间序列, (d) 与(c)对应的RF频谱。I: 连续泵电流, A: 调制振幅, F: 调制的频率^[48]

Fig. 6 (a) Time series under sine wave signal modulation, (b) RF spectrum under sine wave signal modulation, (c) time series under square wave signal modulation, (d) RF spectrum under square wave signal modulation. I: continuous pump current, A: peak-to-peak amplitude of the modulation, F: frequency of the modulation^[48]

关重要的作用,由它所构成的被动调Q和被动锁模激光器具有结构简单、激光状态稳定、成本低等优点。激光器中的调Q和锁模技术是产生超短脉冲的主要方式。因此,可饱和吸收体的发展可等同于激光器本身的发展。

目前关于使用可饱和吸收体调制损耗导致QCL输出非线性动力学的研究较少,对于在QCL中集成可饱和吸收体的研究工作还处于探索阶段。QCL锁模是一个备受关注的研究领域。由于QCL的子带间跃迁弛豫时间较短(在太赫兹范围内为数十皮秒,在中红外范围内为1皮秒),导致被动锁模难以实现^[50]。目前,QCL中的主动锁模已得到证明,可以使用偏置电压的射频调制^[51]和直接相位同步方法^[52]。然而,产生单周期脉冲需要由响应时间短、饱和阈值低的可饱和吸收体来实现被动锁模,这就需要开发合适的可饱和吸收体。由于石墨烯快速的载流子动力学^[53],以及在宽带光谱范围^[54]内用相对低功率的入射辐射饱和吸收的可能性,石墨烯成为对QCL进行被动锁模来产生超短太赫兹脉冲的潜在候选材料。这种材料为获得高性能的太赫兹可饱和吸收体提供了有利的平台,将为基于石墨烯被动锁模的太赫兹激光器铺平道路。

2015年,Bianco等^[55]研究了生长在碳化硅表面的涡轮层状多层石墨烯作为可饱和吸收体,在2.9 THz长脉冲下的饱和吸收特性。采用Z-扫描方法,观察到光致透明度提高了10%。2017年,Bianchi等^[56]报道了利用液相剥离法得到的单层和多层石墨烯薄膜来制备太赫兹可饱和吸收体。用3.5 THz频点的QCL进行的Z-扫描测量显示,光致透明度为80%,几乎比迄今报道的THz频率下的透明度调制大一个数量级。

3 结语

QCL的混沌输出特性为人们提供了新型激光源,可以有效地用于光学对抗等领域。对于中红外频段的加密通信应用,MIR QCL的混沌输出可以提供随机比特生成或使用混沌调制进行信息加密的安全通信,并为信息传输提供同步混沌。THz QCL拥有更快的载流子寿命和更低的线宽增强因子,导致其动力学行为不同于中红外QCL中观察到的动力学状态。目前对于THz QCL非线性动力学的研究还不多,我们还需进一步探索与突破,更好地理解这些激光器各种参数范围内不稳定性的相互作用,实现对QCL输出特性的调控,并运用于合适的

场合。QCL非线性动力学研究仍在进一步发展中,我们可以期待其在基础物理和实际应用方面取得丰硕成果。

References

- [1] Rhodes W T. Semiconductor laser [M]. Springer Series in Optical Sciences, 2007.
- [2] SUN Qi, XU Jian. On the development history of nonlinear dynamics [C]. Proceedings of the Third National Symposium on the History and Methodology of Mechanics. Chinese Society of Mechanics. 2007: 183–188.(孙琪,徐鉴.浅谈非线性动力学的发展史[C].) 第三届全国力学史与方法论学术研讨会论文集.中国力学学会, 2007:183–188.
- [3] Sciamanna M, Shore K A. Physics and applications of laser diode chaos [J]. *Nature photonics*, 2015, **9**(3): 151–162.
- [4] Kohler R, Tredicucci A, Beltram F, et al. THz Quantum Cascade Laser [C]. IEEE Tenth International Conference on Terahertz Electronics. UK, 2002: 1–6.
- [5] Capasso F, Paiella R, Martini R, et al. Quantum cascade lasers: Ultrahigh-speed operation, optical wireless communication, narrow linewidth, and far-infrared emission [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, **38**(6): 511–532.
- [6] Zhou W, Lu Q Y, Wu D H, et al. High-power, continuous-wave, phase-locked quantum cascade laser arrays emitting at 8 m [J]. *Optics Express*, 2019, **27**(11): 15776–15785.
- [7] Lu Q Y, Razeghi M, Slivken S, et al. High power frequency comb based on mid-infrared quantum cascade laser at $\lambda \sim 9 \mu\text{m}$ [J]. *Applied physics letters*, 2015, **106**, 051105.
- [8] Razeghi M, Zhou W, Slivken S, et al. Recent progress of quantum cascade laser research from 3 to $12 \mu\text{m}$ at the Center for Quantum Devices [J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(31): H30–H44.
- [9] Mezzapesa F P, Columbo L L, Brambilla M, et al. Intrinsic stability of quantum cascade lasers against optical feedback [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(11): 13748–13757.
- [10] Porte X, Brunner D, Fischer I, et al. Nonlinear Dynamics of a Single-Mode Semiconductor Laser with Long Delayed Optical Feedback: A Modern Experimental Characterization Approach [C]//Photonics. MDPI, 2022, **9**(1): 47.
- [11] Wiczorek S, Krauskopf B, Simpson T B, et al. The dynamical complexity of optically injected semiconductor lasers [J]. *Physics Reports*, 2005, **416**(1–2): 1–128.
- [12] Sciamanna M, Valle A, P Mégret, et al. Nonlinear polarization dynamics of current-modulated vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Physical Review E*, 2003, **4986**: 273–284.
- [13] Qi X, Bertling K, Taimre T, et al. Terahertz imaging with self-pulsations in quantum cascade lasers under optical feedback [J]. *APL Photonics*, 2021, **6**(9): 091301.
- [14] Spitz O, Herdt A, Wu J, et al. Peculiarities and predictions of rogue waves in mid-infrared quantum cascade lasers under conventional optical feedback [C]//Quantum Sensing and Nano Electronics and Photonics XVII. SPIE, 2020, **11288**: 69–75.
- [15] Spitz O, Wu J G, Herdt A, et al. Investigation of Chaotic and Spiking Dynamics in Mid-Infrared Quantum Cascade Lasers Operating Continuous-Waves and Under Current Modulation [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, **25**(6): 1200311.
- [16] Yu N, Diehl L, Cubukcu E, et al. Coherent Coupling of Multiple Transverse Modes in Quantum Cascade Lasers [J]. *Physical Review Letters*, 2009, **102**(1): 013901.
- [17] Risken H, Nummedal K. Self-Pulsing in Lasers [J]. *Journal of Applied Physics*, 1968, **39**(10): 4662–4672.
- [18] Graham R, Haken H. Quantum theory of light propagation in a fluctuating laser-active medium [J]. *Zeitschrift für Physik A Hadrons and nuclei*, 1968, **213**(5): 420–450.
- [19] Wang C Y, Diehl L, Gordon A, et al. Coherent instabilities in a semiconductor laser with fast gain recovery [J]. *American Physical Society*, 2007, **75**: 031802.
- [20] Gordon A, Wang C Y, Diehl L, et al. Multimode regimes in quantum cascade lasers [J]. *American Physical Society*, 2008, **77**: 053904.
- [21] Bai J. Phase Instability and Amplitude Instability of Quantum-Cascade Lasers With Fabry-Perot Cavity [J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2012, **11**: 292–297.
- [22] Vukovic N, Radovanovic J, Milanovic V, et al. Multimode RNGH instabilities of Fabry-Perot cavity QCLs: impact of diffusion [J]. *Optical and quantum electronics*, 2016, **48**: 254.
- [23] Vukovic N, Radovanovic J, Milanovic V, et al. Numerical study of Risken - Nummedal - Graham - Haken instability in mid-infrared Fabry - Pérot quantum cascade lasers [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, **52**: 91.
- [24] Gajić A, Radovanović J, Vuković N, et al. Theoretical approach to quantum cascade micro-laser broadband multimode emission in strong magnetic fields [J]. *Physics Letters A*, 2021, **387**: 127007.
- [25] Chen C, Jia Z, Lyu Y, et al. Broadband laser chaos generation using a quantum cascade laser with optical feedback [J]. *Optics Letters*, 2021, **46**(19): 5039–5042.
- [26] Donati S, Horng R. The Diagram of Feedback Regimes Revisited [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, **19**(4): 1500309.
- [27] Erneux T, Gavrielides A, Sciamanna M. Stable microwave oscillations due to external-cavity-mode beating in laser diodes subject to optical feedback [J]. *Physical Review A*, 2002, **66**: 033809.
- [28] Mezzapesa F P, Columbo L L, Brambilla M, et al. Intrinsic stability of quantum cascade lasers against optical feedback [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(11): 13748–13757.
- [29] Qi X, Bertling K, Taimre T, et al. Observation of optical feedback dynamics in single-mode terahertz quantum cascade lasers: Transient instabilities [J]. *Physical Review A*, 2021, **103**(3): 033504.
- [30] Spitz O, Wu J, Carras M, et al. Low-frequency fluctuations of a mid-infrared quantum cascade laser operating at cryogenic temperatures [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, **15**(11): 116201.
- [31] Spitz O, Wu J, Herdt A, et al. Extreme events in quantum cascade lasers [J]. *Advanced Photonics*, 2020, **2**(6): 12.
- [32] Wang X G, Zhao B B, Deng Y, et al. Nonlinear dynamics of a quantum cascade laser with tilted optical feedback

- [J]. *Physical Review A*, 2021, **103**(2): 023528.
- [33] Jumpertz L, Carras M, Schires K, *et al.* Regimes of external optical feedback in 5.6 μm distributed feedback mid-infrared quantum cascade lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **105**(13):553–158.
- [34] Wiczorek S, Krauskopf B, Simpson T B, *et al.* The dynamical complexity of optically injected semiconductor lasers [J]. *Physics Reports*, 2012, **416**(1–2):1–128.
- [35] Meng B, Wang Q J. Theoretical investigation of injection-locked high modulation bandwidth quantum cascade lasers [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(2):1450–1464.
- [36] Zhao B B, Kovanis V N, Wang C. Tunable Frequency Comb Generation Using Quantum Cascade Lasers Subject to Optical Injection [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, **25**(6):1900207.
- [37] Hsieh K L, Hung Y H, Hwang S K, *et al.* Radio-over-fiber DSB-to-SSB conversion using semiconductor lasers at stable locking dynamics [J]. *Optics Express*, 2016, **24**(9): 9854–9868.
- [38] Zhuang J P, Li X Z, Li S S, *et al.* Frequency-modulated microwave generation with feedback stabilization using an optically injected semiconductor laser [J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(24): 5764–5767.
- [39] Taubman M S, Myers T L, Cannon B D, *et al.* Stabilization, injection and control of quantum cascade lasers, and their application to chemical sensing in the infrared [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2004, **60**(14): 3457–3468.
- [40] Wang C, Grillot F, Kovanis V I, *et al.* Modulation properties of optically injection-locked quantum cascade lasers [J]. *Optics letters*, 2013, **38**(11): 1975–1977.
- [41] Erneux T, Kovanis V, Gavrielides A. Nonlinear dynamics of an injected quantum cascade laser [J]. *Physical Review E*, 2013, **88**(3): 032907.
- [42] Dhooge A, Govaerts W, Kuznetsov Y A. MATCONT: a MATLAB package for numerical bifurcation analysis of ODEs [J]. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 2003, **29**(2): 141–164.
- [43] Wang X G, Zhao B B, Grillot F, *et al.* Frequency noise suppression of optical injection-locked quantum cascade lasers [J]. *Optics Express*, 2018, **26**(12): 15167–15176.
- [44] Simpson T B, Liu J M, AlMulla M, *et al.* Limit-cycle dynamics with reduced sensitivity to perturbations [J]. *Physical review letters*, 2014, **112**(2): 023901.
- [45] AlMulla M, Liu J M. Stable periodic dynamics of reduced sensitivity to perturbations in optically injected semiconductor lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, **21**(6): 601–608.
- [46] Wang C, Raghunathan R, Schires K, *et al.* Optically injected InAs/GaAs quantum dot laser for tunable photonic microwave generation [J]. *Optics letters*, 2016, **41**(6): 1153–1156.
- [47] Tiana-Alsina J, Quintero-Quiroz C, Panozzo M, *et al.* Experimental study of modulation waveforms for entraining the spikes emitted by a semiconductor laser with optical feedback [J]. *Optics express*, 2018, **26**(7): 9298–9309.
- [48] Spitz O, Wu J G, Herdt A, *et al.* Investigation of Chaotic and Spiking Dynamics in Mid-Infrared Quantum Cascade Lasers Operating Continuous-Waves and Under Current Modulation [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, **25**(6):1200311.
- [49] Spitz O, Durupt L, Grillot F. Competition between Entrainment Phenomenon and Chaos in a Quantum-Cascade Laser under Strong Optical Reinjection [C]//*Photonics*. MDPI, 2022, **9**(1): 29.
- [50] Paiella R. Terahertz quantum cascade lasers: Going ultrafast [J]. *Nature Photonics*, 2011, **5**(5): 253.
- [51] Barbieri S, Ravaro M, Gellie P, *et al.* Coherent sampling of active mode-locked terahertz quantum cascade lasers and frequency synthesis [J]. *Nature Photonics*, 2011, **5**(5): 306–313.
- [52] Maysonnave J, Maussang K, Freeman J R, *et al.* Mode-locking of a terahertz laser by direct phase synchronization [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(19): 20855–20862.
- [53] Dawlaty J M, Shivaraman S, Chandrashekar M, *et al.* Measurement of Ultrafast Carrier Dynamics in Epitaxial Graphene [J]. *Appl. phys. lett.*, 2008, **92**(4):197.
- [54] Strait J, Dawlaty J, Shivaraman S, *et al.* Ultrafast Optical-Pump Terahertz-Probe Spectroscopy of the Carrier Relaxation and Recombination Dynamics in Epitaxial Graphene [J]. *Nano Letters*, 2008, **8**(12):4248.
- [55] Bianco F, Miseikis V, Convertino D, *et al.* THz saturable absorption in turbostratic multilayer graphene on silicon carbide [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(9):11632.
- [56] Bianchi V, Carey T, Viti L, *et al.* Terahertz saturable absorbers from liquid phase exfoliation of graphite [J]. *Nature Communication*, 2017, **8**:15763.