

太赫兹闪耀光栅的激光自混合干涉表征技术研究

赵雅男^{1,2}, 万文坚^{1,2}, 邵棣祥¹, 曹俊诚^{1,2*}, 韩英军^{1,2*}

(1. 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;
2. 中国科学院大学 材料与光电研究中心, 北京 100049)

摘要: 本文报道了一种工作于利特罗条件下的反射式闪耀光栅的设计制作及其表征与测试方法。光栅采用锯齿状结构, 通过机械刻划工艺进行加工。其结构参数的表征与性能测试采用太赫兹量子级联激光器结合自混合干涉效应的方法, 获得了光栅常数与闪耀角的非接触式测量, 分别为 84.89 μm 和 24.9°, 并在太赫兹波段内展现出 0.117 rad/THz 的角分辨率和 71% 的最高反射效率, 测试结果与理论设计基本吻合。该方法通过反馈信号直接解析光栅参数, 在测量速度上有较大提升, 为光栅的实时动态表征提供了新的途径。

关键词: 电子科学与技术; 反射式闪耀光栅; 自混合效应; 太赫兹量子级联激光器
中图分类号: TN2 **文献标识码:** A

Research on laser self-mixing interference characterization technology of terahertz blazed grating

ZHAO Ya-Nan^{1,2}, WAN Wen-Jian^{1,2}, SHAO Di-Xiang¹, CAO Jun-Cheng^{1,2*}, HAN Ying-Jun^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Materials for Integrated Circuits, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;
2. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This study presents the design, fabrication, characterization, and testing methodology of a reflective blazed grating operating in the Littrow configuration. The grating, fabricated via mechanical ruling with a sawtooth profile, was characterized using a terahertz quantum cascade laser combined with self-mixing interferometry. Non-contact measurements yielded a grating constant of 84.89 μm and a blaze angle of 24.9°, with performance metrics including an angular resolution of 0.117 rad/THz and a peak diffraction efficiency of 71% within the terahertz band, consistent with theoretical predictions. By directly resolving grating parameters through laser feedback signals, this method significantly improved the measurement speed compared to conventional approaches, demonstrating the potential for real-time dynamic characterization of grating devices.

Key words: electronic science and technology, reflective blazed grating, self-mixing effect, terahertz quantum cascade lasers

引言

太赫兹 (Terahertz, THz) 波段 (0.1~10 THz) 因其独特的穿透性、低光子能量和指纹光谱特性, 在光谱分析、安全成像^[1]、无损检测^[2]及通信^[3]等领域展现出广阔的应用前景。闪耀光栅是一种重要的

光学衍射元件, 在太赫兹系统中往往作为分光元件。作为 THz 频段波长选择与色散调控的核心元件, 闪耀光栅通过周期性结构对入射 THz 波进行衍射调制, 其性能直接决定了光谱仪的分辨率、信噪比及工作带宽。但是, 由于 THz 波的波长较长, 远大

收稿日期: 2025-05-22, 修回日期: 2025-07-04

Received date: 2025-05-22, Revised date: 2025-07-04

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFB3210303); 国家自然科学基金 (12333012, 62435020, 62035014, 62275258)

Foundation items: Supported by the National Key R&D Program of China (2023YFB3210303), the National Natural Science Foundation of China (12333012, 62435020, 62035014, 62275258)

作者简介 (Biography): 赵雅男 (2000—), 女, 天津人, 硕士研究生, 主要研究领域为高分辨率太赫兹光谱技术。E-mail: zyn_lgd@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: yjhan@mail.sim.ac.cn, jccao@mail.sim.ac.cn

于可见光和红外波段,为了使光栅的周期与波长相匹配,通常要求周期在几十到数百微米量级。因此,对这种大周期结构的元件表征提出了挑战。传统闪耀光栅的结构表征技术(如光学显微镜、AFM^[4]、SEM)均用于表征光栅的表面形貌及刻槽结构,但是该技术存在测量分辨率低、测量速度慢、对光栅表面要求高等限制。同时,由于在1~10 THz 频率范围内缺少高效紧凑的辐射源,该波段内闪耀光栅的设计与加工较少。近年来,太赫兹量子级联激光器(THz QCL)作为一种新型半导体激光器^[5-6],是一种基于电泵浦的在子带内跃迁的单极性器件,采用多量子阱级联结构的设计,光子通过导带内电子的能级跃迁过程得以产生,并弛豫到下一周期继续进行。凭借小尺寸、高输出功率^[7]、窄线宽^[8]以及频率可调谐等优势,使THz QCL在光谱分析、成像以及传感等领域中得到广泛应用。基于激光相干性的高灵敏度探测技术是激光应用领域的重要发展方向,其中自混合干涉技术作为一种关键的干涉手段^[9],通过外部物体(如光栅、反射镜)反射的反馈光重新耦合回激光腔,与腔内原始激光叠加。该反馈光可调制激光器输出特性(功率、电压等),产生周期性振荡信号,从而避免使用昂贵复杂的外部探测器。因此,本文基于夫琅禾费衍射原理,对太赫兹波段反射式闪耀光栅进行仿真设计,并提出一种基于自混合效应与THz QCL结合的闪耀光栅表征新方法。该方法利用THz QCL同时作为光源和探测器,将自混合效应引入闪耀光栅的表征过程,实现了光栅结构参数与性能参数的同步测量分析。

1 光栅设计、仿真与加工

光栅由周期性排列的狭缝构成,其出射光强分布受单缝衍射与多缝干涉共同调制。传统光栅结构中,单缝衍射主极大与多光束干涉零级主极大位置重叠^[10],导致能量集中于中央零级峰,分光效率受限。为突破这一瓶颈,Anderson和Wood提出了“闪耀光栅”(Blazed Grating)的概念。通过设计非对称三角形结构(锯齿状)的光栅槽形,使光能量在特定衍射级次方向上产生显著增强,即此时的光谱强度最大,该现象即为“闪耀效应”(Blaze Effect)。该结构可将能量高效集中于选定衍射方向,大幅提升分光效率。其结构如图1所示,其中 d 为光栅常数, θ_b 为闪耀角度。闪耀光栅的入射方式一般有两种,即沿刻槽面入射和沿闪耀面入射,沿刻槽面入射的方式也称为 Littrow 配置。在这种配置下,入射到闪

耀光栅刻槽面上的光会沿着相同的路径反射,即反射角等于入射角。在闪耀光栅中,光栅公式修正为:

$$d[\sin(\alpha) \pm \sin(\beta)] = m\lambda \quad , \quad (1)$$

其中, α 为入射角, β 为反射角, m 为阶数, λ 为入射光波长。对于工作在 Littrow 配置下的光栅, β 等于 α 等于 θ_b ,这种条件下的光栅方程变为:

$$2d \sin \theta_b = m\lambda \quad , \quad (2)$$

修正后的闪耀光栅衍射光强方程为^[11]:

$$I = I_0 * \sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{\pi}\right) \left\{ \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} \sin c \left[N \left(\frac{\Delta\phi}{2\pi} - m \right) \right] \right\}^2, m = 1, 2, 3, \dots \quad , \quad (3)$$

其中, I_0 为初始光强, N 为缝数,通过公式(3)可以看出,闪耀光栅的衍射光强由单缝衍射和多缝干涉共同决定。

由于2~5 THz 频段缺乏高效反射式闪耀光栅,本研究基于 Littrow 配置开展太赫兹闪耀光栅参数化仿真,重点分析槽形结构、周期参数及入射角对反射效率与分光特性的影响,证明其在太赫兹光谱系统的分光能力。以入射中心波长为 $71.43 \mu\text{m}$ (4.2 THz)、闪耀角为 25° 下的一阶级次的光作为基本条件,通过公式(2)计算获得光栅常数为 $84.51 \mu\text{m}$ 。

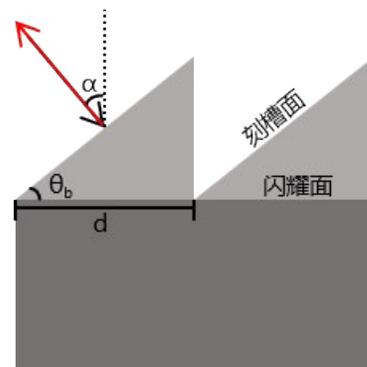


图1 闪耀光栅结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the blazed grating

在光栅仿真研究中,基于公式(3)采用MATLAB开展了数值计算,重点分析光栅缝数 N 对反射强度随入射角变化规律的影响。光栅缝数作为核心参数,显著制约光栅分辨率、衍射效率及色散能力等关键性能指标。不同频段的电磁波对光栅的要求各异,在太赫兹频段,由于其较长的波长特性,所需的光栅周期较大,因此对应的刻线密度较低;而在可见光或近红外频段,则往往需要更高的刻线密度以满足应用需求。图2(a~d)展示了在4.2 THz

下,四种不同光栅缝数下衍射强度的变化情况。实验结果显示,随着光栅缝数 N 的增加,衍射曲线的分辨率得到了提升,具体表现为峰值更加尖锐,这使光栅能够更精确地区分不同波长的光。光栅的分辨能力 R 与光栅缝数 N 成正比关系,仿真结果与理论预测相符。此外,随着 N 的增加,衍射峰变得更加集中。值得注意的是,在4.2 THz频率下,衍射强度的最大值出现在入射角为 25° 时,且这一最大值不受 N 变化的影响,表明光栅缝数 N 的改变并不影响衍射角的位置。结合实际加工尺寸与实验应用,在保证足够分辨率和色散能力的前提下,选用 $N=600$ 进行后续仿真,该参数配置适用于目标频段内的实验应用,确保了衍射效率和光学性能的优化平衡。图2(e)展示了在 $N=600$ 时不同频率下光栅衍射强度随入射角度变化的关系。从图中可以观察到,每个频率对应的峰值衍射角在空间上是明确区分的,且各频率下的衍射曲线互不重叠。这表明在选定的参数条件下,闪耀光栅展现出了频率选择性。具体来说,通过调整入射角度,可以在空间中分离出不同的频率成分,从而实现对特定频率的选择和分辨。这一特性对于需要高频率分辨率的应用场景

尤为重要,例如在光谱分析以及信号处理等领域。通过精心设计入射角度,利用闪耀光栅的空间色散能力,可以有效分离或选择所需的频率成分,提高系统的整体性能和效率。

在确定的光栅结构参数条件下,对不同入射角度下衍射强度随频率变化的关系进行进一步研究,图3(a)展示了最佳入射角度与频率之间的关系。分析显示,随着频率的增加,对应最大衍射强度的最佳入射角度呈现出减小的趋势,二者之间存在线性负相关的关系。插图计算了在2~5 THz的范围内,不同频率的强度随入射角度的变化,每个特定角度下的衍射强度均在某一频率处达到峰值,并且各峰值对应的频率位置明确区分,未出现相邻谱线重叠的现象,满足瑞利判据^[12],这表明可以通过精确控制入射角来实现对特定频率的选择。此外,图3(b)展示了当入射角设置为 25° 时,4.2 THz频率达到最大衍射强度的情况。从图中可以观察到,在该条件下,与中心峰值频率相距一个侧模间隔处的衍射强度差大约为13.5 dB。这一结果表明,在该参数配置下光栅不仅能够有效地将特定频率的光集中到特定阶次上,同时还能显著抑制相邻频率成分

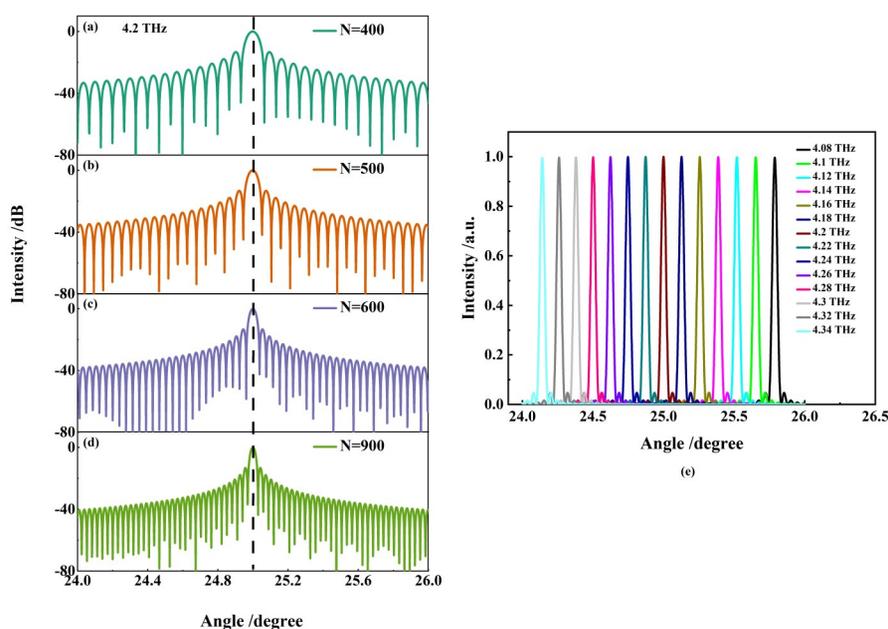


图2 闪耀光栅中强度随光栅缝数和入射角度的变化关系:在光栅缝数为(a)400;(b)500;(c)600和(d)900时的光栅衍射强度(对数表示)随入射角度的变化;(e) $N=600$ 时,不同入射频率下的光栅衍射强度随入射角度的变化,其中每一条曲线代表一个频率

Fig. 2 The variation of intensity with the number of grating slits and the incident angle in blazed grating: the diffraction intensity (logarithmic representation) of the grating with the angle of incidence at the number of grating slits (a) 400; (b) 500; (c) 600 and (d) 900; (e) diffraction intensity with the incident angle at different incident frequencies at $N=600$, where each curve represents a frequency

的干扰,显示出良好的频率分辨能力。

完成光栅结构及性能参数分析后,对反射式闪耀光栅进行制备。选用具有平面度良好、热膨胀系数低和光学均匀性高的K9玻璃作为基底材料,并在加工前彻底清洁基材表面。采用高硬度金刚石刀具,经精细抛光至特定形状与角度,确保刻划精度。基板固定于高精度雕刻机上,利用光学对准系统及精密位移传感器精确定位。刻划过程中,依据预设的光栅常数驱动金刚石工具(刀具压力为1.2 N,刻划速度为20 m/s),在严格控制温度、湿度和振动的环境下,缓慢切割形成等距平行凹槽。刻划完成后,使用高纯度有机溶剂和去离子水清洗光栅,去除残留碎屑和油渍,确保成品质量。光栅的具体尺寸为50 mm × 50 mm × 15 mm。传统方法对光栅的表征主要是针对光栅的表面微观形貌进行测量。光学显微镜法只能初步评估光栅的外观质量,利用扫描电子显微镜(SEM)^[13]或原子力显微镜(AFM)可以看到表面状态和三维图像,但是这些方法可能影响到原始表面状态,并且THz波长较长,这些纳米级别精度的测量不适于THz光栅。针对光栅衍射性能的测量,往往需要专门的仪器或复杂的设备,应用范围有限。

2 基于自混合技术的实验表征与分析

近年来激光干涉技术在高精度测量中应用广泛。自混合技术是一种基于激光器内部反馈机制的干涉测量方法,在自混合干涉技术中,激光器发出的光被外部目标反射回激光器中,再注入光与腔

内的光场发生混合,从而改变激光器的输出特性,如功率、电压、频率等。因此通过监测激光器两端的电压可以提取目标信息。自混合技术具有较高的灵敏度,可以检测到亚纳米级别的位移变化。相比于其他干涉测量技术,自混合干涉系统更加紧凑,且不需要复杂的外部探测器。在THz波段,THz QCL具有窄线宽、输出功率高、频率调谐宽、结构紧凑便携和易于集成等优点,已成为众多领域的关键器件。基于自混合效应的THz QCL技术已在多个领域有广泛应用,例如成像^[14-15]、材料分析^[16-17]和气体传感^[18-19]等。因此,针对目前光栅检测技术的不足,本文提出一种利用自混合效应与THz QCL结合的方法来表征反射式闪耀光栅。

在基于自混合干涉技术的实验系统中,可以利用Lang-Kobayashi方程^[20]描述光场与激光器腔内增益介质相互作用的动力学过程。当激光器在光反馈情况下稳定激射时,自混合效应导致的光在外腔传播后重新注入腔内带来的电压扰动 $V_{SM}(t)$ 可以表示为:

$$V_{SM}(t) = \frac{\beta C}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \cos [2\pi f_0(t)\tau_{ext}(t)], (C \ll 1), \quad (4)$$

其中, C 是反馈光耦合系数, α 是线宽增强因子, $\tau_{ext}(t)$ 是外腔中传播的时间, $f_0(t)$ 是THz QCL激射频率。该公式在反馈光耦合强度比较弱($C \ll 1$)的情况下适用。随着外腔长度的变化,光在外腔中的往返时间也会随之改变,自混合信号会发生周期性变化,产生类似的“干涉条纹”。

实验中采用的THz QCL是利用分子束外延

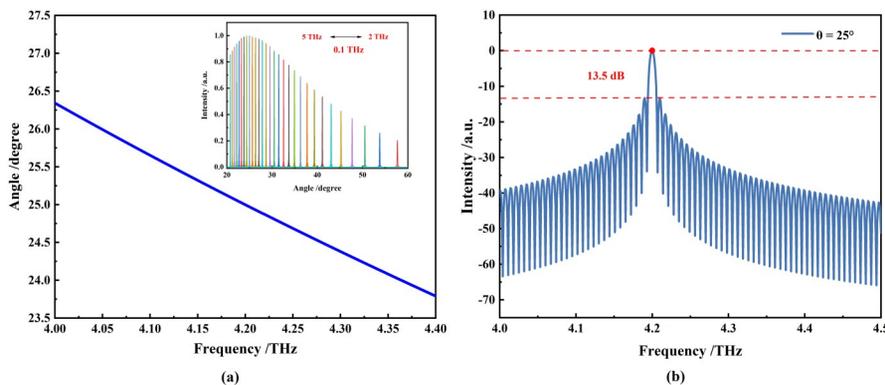


图3 闪耀光栅中入射角度和强度随频率的变化关系:(a)闪耀光栅在不同入射角度下与频率之间的关系,插图为2~5 THz范围内强度随入射角的变化;(b)入射角为25°时,不同频率之间的衍射强度差

Fig. 3 The relationship between the incident angle and the intensity with frequency in a blazed grating: (a) the relationship between the frequency and the incident angle of the blazed grating, the inset shows the intensity as a function of the angle of incidence in the range of 2-5 THz; (b) the diffraction intensity difference between different frequencies as the angle of incidence was 25°

(MBE)技术生长在半绝缘 GaAs (100)衬底上的 $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{GaAs}$ 材料体系,有源区基于束缚态到连续态和共振声子结合的混合设计,波导采用单等离子体波导脊结构进行加工^[21]。对该激光器的光学性能进行表征,首先是其强度-电流-电压(*LIV*)曲线。从图4(a)可以看出,在10~45 K的温度变化范围内,THz QCL的发光阈值电流约在0.6 A,最大输出功率约为1 mW。在THz QCL中,工作温度与驱动电流的协同效应显著影响器件性能:当器件在较高温度下承受高电流时,焦耳热积累,引发载流子非辐射复合增强和带间隧穿效应加剧,最终使输出功率下降。此外,当电流接近1 A时出现的负微分电阻(NDR)现象,导致*I-V*曲线出现负斜率区域,进一步抑制有效辐射跃迁并降低输出功率。基于对器件热管理及NDR效应的综合考量,本文选择20 K作为实验工作温度,以优化散热性能并抑制非线性输运行为对输出功率的负面影响。其次,通过傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)对THz QCL在不同驱动电流下的发射光谱进行表征(如图4(b)所示)。当驱动电流为0.7 A时,器件呈现单模输出特性;随着电流的增加,器件输出从单模向宽谱多模过渡,且发射频率呈现向高频方向偏移的趋势,光谱范围在4.11~4.36 THz之间。电流对频率的调谐精度约为2.3 MHz/mA。通过对器件的*LIV*特性和发射光谱的表征,能够更系统地揭示光栅的衍射效率与色散特性,为光栅性能优化提供多维度的实验依据。

自混合技术的光栅表征实验装置如图5所示,核心组件包括THz QCL、离轴抛物镜(OAP)、高精度

线性位移台,精密旋转台和数据采集卡(DAQ)。THz QCL发射的辐射经2英寸的OAP准直后,以平行光入射至固定于线性位移台上的旋转台所载的光栅表面,光栅偏振方向与激光输出严格匹配。旋转台的核心作用在于精确调控照射到光栅表面的入射角。这套配置使得驱动位移台以1 μm 步长、200 mm行程沿光轴扫描。由运动控制器生成电子触发脉冲,与DAQ严格同步采集每个位移点因自混合效应产生的时域干涉信号(表征激光腔内电压扰动)。这种设计不仅提高了光程的有效长度,还增强了系统的分辨率和灵敏度。对固定角度下采集到的时域信号通过插值处理位移-幅值数据,利用快速傅里叶变换(FFT)计算其单边振幅谱,并结合光程差校准输出太赫兹频域振幅谱。同时,重复10组测量以减小噪声的影响,继而以预设角度步进调整旋转台,重复位移扫描与FFT分析流程,获取多入射角下的光谱数据。该实验装置不仅能解析光栅的强度分布特征,还可以同步提取其光谱信息,实现光栅元件多参数的联合表征。

利用该装置测量在特定光栅入射角下THz QCL端电压随外腔长度变化的自混合时域信号,如图6(a)所示。电流为0.95 A,温度为20 K,光栅入射角为24.13°,将密集的信号局部放大可以发现自混合信号呈现周期振荡。将强度为 $-\Delta L_{\text{ext}}$ 的曲线进行快速傅里叶变换,得到使用光栅后的THz QCL频谱图,如图6(b)所示。该QCL在特定入射角度下只有三个模式被返回,从宽谱多模发射变为窄带发射,且最强反馈强度为4.25289 THz。通过改变THz

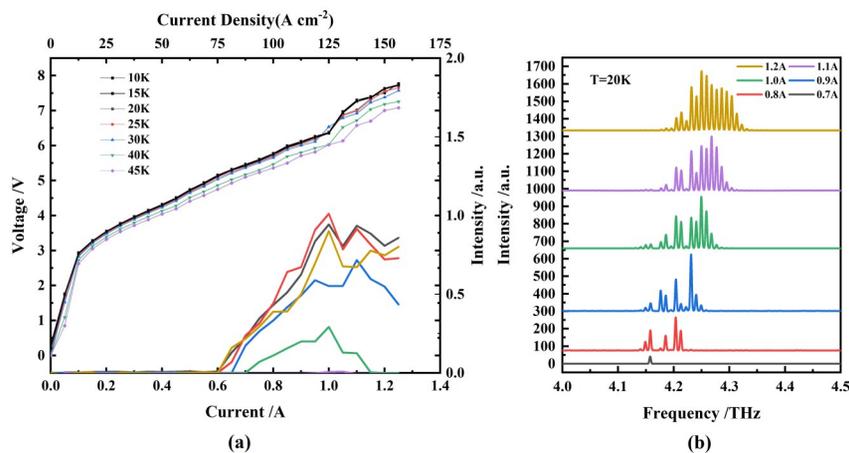


图4 THz QCL的光学性能表征:(a)连续电流下THz QCL在不同温度下的*LIV*特性曲线;(b)温度为20 K时利用FTIR测量的THz QCL在不同电流下的发射光谱图

Fig. 4 Optical characterization of THz QCL: (a) *LIV* characteristic curves of THz QCL at different temperatures under continuous current; (b) emission spectra of THz QCL at different currents measured by FTIR at 20 K

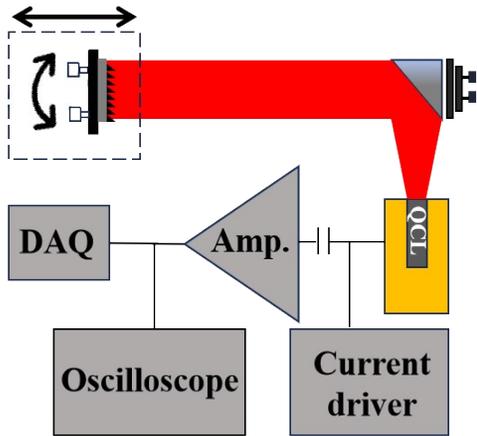


图5 基于自混合技术的光栅表征实验装置图

Fig. 5 Experimental setup diagram of grating characterization based on self-mixing technology

QCL的工作电流,其激射频率出现了向高频移动的趋势,并且在其他电流条件下同样观察到类似的现象。值得注意的是,本研究中采用的THz QCL激射频率在4.2 THz附近,因此仅对该光栅在该频率范围内的响应特性进行了测量。

为探究光栅入射角与频率响应的关联性,本研究对不同频率的模式强度随入射角的变化进行了测量。首先对该闪耀光栅的光栅常数和闪耀角进行了实验测量。在图7(a)中定量展示了达到峰值光谱强度的入射角与对应频率之间的关系,结果表明光栅入射角随频率增加呈下降趋势,这与上一节图3(a)中的理论模拟趋势一致。基于公式(2)对数据点进行拟合,通过曲线(红色)的斜率计算($d = \frac{m\lambda}{2 \sin \theta}$),可以得到光栅常数为84.89 μm ,将实验测

量的 d 值代入公式(2),可以得到闪耀角为 24.9° ,两者的相对误差为0.4%,均处于制造误差范围内(2%)。这一结果与理论设计值吻合,证明了自混合干涉技术在光栅参数表征中的高精度特性。其次,对不同频率的模式强度均采用归一化强度进行处理分析,即通过将各频率的衍射强度谱线除以对应入射角度下的最大强度值获得。实验结果如图7(a)插图所示,可以清晰看到四个不同频率的归一化强度峰值对应的入射角度在空间上呈现显著分离(角度分布范围 $\Delta\theta = 0.8^\circ$),这一现象直观验证了闪耀光栅的多频分光能力。基于实验数据的深入分析,本研究进一步量化了闪耀光栅的角分辨率性能。通过定义角分辨率(即单位频率间隔对应的最小可区分角度变化),结合图7(a)中相邻频率的峰值角度差,计算得出该光栅的角分辨能力为0.117 rad/THz,验证了实验系统的有效性与光栅设计的合理性。

针对光栅的反射效率特性,图7(b)定量表征了反射效率随频率的变化规律。实验数据显示,通过对比光栅使用前后的模式强度,在4.298 69 THz处测得最大衍射效率为0.71,而在4.23207 THz处最低效率为0.58,以上数据验证了该光栅在太赫兹波段的有效反射特性。其中,测量到的较低反射效率可能由该频率条件下光栅与光源之间的耦合效率不足所致。反射效率的测量值与理论值(0.853)之间的误差可能是由于表面粗糙度和镀膜特性的影响,刻槽边缘毛刺或底部不平整会显著增加散射损耗,同时THz波段金属趋肤深度增大,若镀层厚度不足也会导致部分光场渗入基底而被吸收。本实验中所有数据点经重复测量和统计分析,标准偏差稳

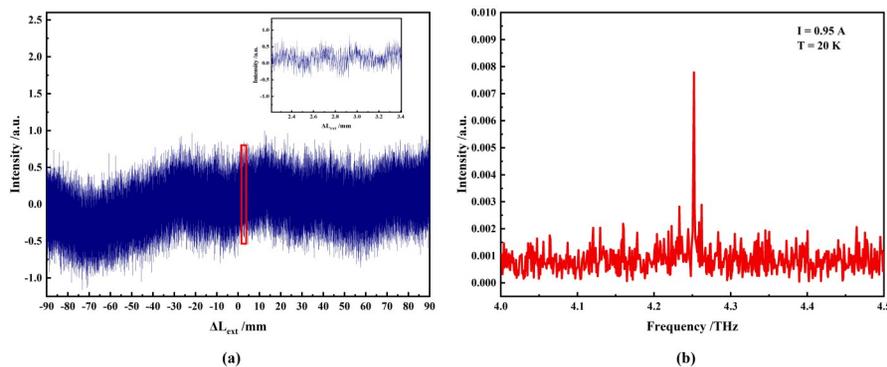


图6 基于自混合效应的闪耀光栅表征结果: $I=0.95\text{ A}$ 时,(a)加入光栅后THz QCL的自混合干涉时域信号;(b)频谱图

Fig. 6 Characterization results of blazed grating based on self-mixing effect: $I=0.95\text{ A}$, (a) the self-mixing interference time-domain signal of THz QCL with grating; (b) spectrogram

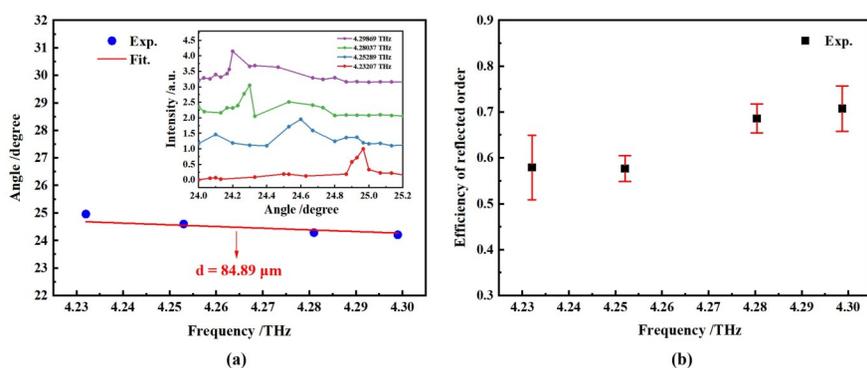


图7 闪耀光栅的结构参数和反射效率测量:(a)光栅结构参数测量,其中蓝色圆点为实验数据,红色曲线为理论仿真数据,插图为不同频率在不同入射角度下的归一化模式强度;(b)太赫兹波段内闪耀光栅的反射效率,其中黑色矩形为实验测量数据,红色符号为标准方差

Fig. 7 Structural parameters and reflection efficiency measurements of blazed grating: (a) measurement of grating structural parameters, where the blue dots represent experimental data and the red curve represents theoretical simulation data, the inset shows the normalized mode intensities of different frequencies at different angles of incidence; (b) the reflection efficiency of the grating in the terahertz band, where the black squares are experimental measurement data and the red symbols are the standard deviations

定在0.04范围内。上述结果不仅证实了基于自混合干涉技术的无接触式光栅表征方法的有效性,同时精确解析了光栅的关键性能参数。结合较高的角分辨率与反射效率,证明该光栅在太赫兹光谱仪系统中具有重要应用潜力。

基于自混合技术的光栅表征技术虽具备高灵敏度与无外置探测器的优势,但在实际应用上面临一些限制,包括:(1)光栅的测试频率范围会受到多模THz QCL激光范围的限制,导致光栅的工作带宽依赖于辐射源的工作范围;(2)环境振动引发位移台或旋转台微动,造成光路偏移与反馈失准;(3)多模THz QCL的温度敏感性和输出功率不稳定可能会增加测量的复杂性;(4)光栅表面污染物会影响反馈光,导致信号衰减与相位噪声,这需要在光栅时严格避免触碰表面并控制操作距离。未来可以通过在多模器件的稳定性提升和工作带宽的扩展、振动补偿与光栅表面设计抗污染镀层来进行系统优化。

3 结语

本研究提出了一种基于自混合干涉技术与THz QCL结合的闪耀光栅设计与表征方法。通过夫朗禾衍射理论建模与实验验证,实现了光栅常数与闪耀角等核心参数的精确测量,系统地验证了该方法的可靠性。进一步地,针对闪耀光栅的结构参数,深入分析了其性能特性,包括角分辨率和频率的反射效率,充分验证了光栅在太赫兹波段的多频

分光能力。研究表明,基于自混合干涉技术的测量方法具有显著优势:其一,通过直接利用激光器内部反馈信号,无需额外探测器即可实现光栅参数的高精度提取,大幅简化了光路结构与系统成本;其二,在测量精度与速度上均优于传统接触式表征方法,为光栅性能评估提供了高效技术手段。该工作不仅为太赫兹波段光学元件的设计与优化提供了新思路,在光谱分析、通信系统及成像等领域亦展现出应用价值。

References

- [1] Liu H B, Zhong H, Karpowicz N, et al. Terahertz spectroscopy and imaging for defense and security applications [J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(8): 1514-1527.
- [2] Sharif V, Saberi H, Pakarzadeh H. Designing a terahertz optical sensor based on helically twisted photonic crystal fiber for toxic gas sensing [J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 2268.
- [3] Kleine-Ostmann T, Nagatsuma T. A review on terahertz communications research [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2011, 32(2): 143-171.
- [4] Ou Q, Xue S, Ma W, et al. Natural van der Waals canalization lens for non-destructive nanoelectronic circuit imaging and inspection [J]. Advanced Materials, 2025: 2504526.
- [5] Kohler R, Tredicucci A, Beltram F, et al. Terahertz semiconductor heterostructure laser [J]. Nature, 2002, 417: 156-159.
- [6] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology [J]. Nature photonics, 2007, 1(2): 97-105.
- [7] 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.
- [8] Green R P, Xu J H, Mahler L, et al. Linewidth enhance-

- ment factor of terahertz quantum cascade lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(7): 417.
- [9] Palma F. Theoretical analysis of the time transient of the THz self-mixing rectification voltage in a semiconductor barrier[J]. *Electronics*, 2023, 12(6): 14.
- [10] Liu Q, Wu J, Chen M. Fabrication of blazed grating by native substrate grating mask [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(9): 091706.
- [11] Zhang F G, Yu H L. The principle of the glitter grating and its applications [J]. *Journal of Chongqing University of Arts and Sciences: Natural Science Edition*, 2008, 27(1): 48-51.
(张发国, 喻洪麟. 闪耀光栅原理及其应用[J]. 重庆文理学院学报: 自然科学版), 2008, 27(1): 48-51.
- [12] Rayleigh L. On the dynamical theory of gratings [J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1907, 79(532): 399-416.
- [13] Yasin F S, Harvey T R, Chess J J, et al. Path-separated electron interferometry in a scanning transmission electron microscope [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2018, 51(20): 205104.
- [14] Dean P, Valavanis A, Keeley J, et al. Terahertz imaging using quantum cascade lasers—a review of systems and applications [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2014, 47(37): 374008.
- [15] Kundu U, Torniaainen J, Bertling K, et al. Detecting genetic variation in plants by mapping cell water dynamics with terahertz laser feedback interferometry [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2024, 14(5): 665-674.
- [16] Mezzapesa F P, Columbo L L, Brambilla M, et al. Imaging of free carriers in semiconductors via optical feedback in terahertz quantum cascade lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(4): 495-497.
- [17] Holstein J, North N K, Horbury M D, et al. 8×8 Patch-Antenna-Coupled TeraFET detector array for terahertz quantum-cascade-laser applications [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2024, 14(6): 1-9.
- [18] Han Y J, Partington J, Chhantyal-Pun R, et al. Gas spectroscopy through multimode self-mixing in a double-metal terahertz quantum cascade laser [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(24): 5933-5936.
- [19] Kuenning N M, Minesi N Q, Honaker B A, et al. THz rotational absorption spectroscopy of the hydroxyl radical at high temperatures using a quantum-cascade laser [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2024, 40(1-4): 105480.
- [20] Lang R, Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1980, 16(3): 347-355.
- [21] Wan W J, Li H, Zhou T, et al. Homogeneous spectral spanning of terahertz semiconductor lasers with radio frequency modulation [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 44109.