

引用格式: LIU Han, LI Ziping, MA Xuhong, et al. Radio Frequency Transmission in Terahertz Quantum Cascade Laser Frequency Combs[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(1):0114002

刘涵, 李子平, 马旭红, 等. 太赫兹量子级联激光器光频梳射频传输[J]. 光子学报, 2023, 52(1):0114002

太赫兹量子级联激光器光频梳射频传输

刘涵^{1,2}, 李子平¹, 马旭红^{1,2}, 吴澍民^{1,2}, 廖小瑜^{1,2}, 管玟^{1,3}, 周康^{1,2},
赵逸然^{1,2}, 曹俊诚^{1,2}, 黎华^{1,2}

(1 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 中国科学院太赫兹固态技术重点实验室, 上海 200050)

(2 中国科学院大学 材料与光电研究中心, 北京 100049)

(3 上海科技大学 信息科学与技术学院, 上海 201210)

摘要:针对太赫兹量子级联激光器光频梳射频信号提取与传输存在的阻抗不匹配问题,设计并提出了一种输入阻抗为 20 Ω 、输出阻抗为 50 Ω 的渐变微带线结构,研究了该结构的准 TEM 模电场分布,并根据 S 参数建立了相应的 LC 等效电路模型分析其物理机理。实验中,将渐变微带线结构应用于太赫兹量子级联激光器光频梳射频信号提取与测试,以验证渐变微带线传输射频信号效果,成功测量得到太赫兹量子级联激光器重复频率,其线宽为 3.7 kHz,信噪比达到 60 dB,在注入电流为 700~900 mA 范围内重复频率表现为稳定的单模信号,测量得到的最大保持和幅度艾伦方差结果同样表现出重复频率的稳定性。实验结果表明,所设计的渐变微带线具有良好的阻抗匹配效果,能够实现对太赫兹量子级联激光器光频梳射频信号稳定的提取和传输。

关键词:太赫兹;量子级联激光器;光频梳;阻抗匹配;渐变微带线

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235201.0114002

0 引言

太赫兹 (Terahertz, THz) 波是指介于毫米波与红外光之间,频率范围为 100 GHz~10 THz、波长范围为 3 mm~30 μm 的电磁波,在医疗诊断、光谱成像、天线通信等领域具有广阔的发展前景。THz 量子级联激光器 (Quantum Cascade Laser, QCL) 是一种半导体电泵浦辐射源,具有高功率、低成本、易集成等优点,是 1~5 THz 频率范围内最高效的 THz 辐射源之一。THz QCL 作为一种全固态、电泵浦的半导体器件,是实现 THz 光频梳的理想载体^[1-2]。

光频梳是指频域分布表现为一系列高度稳定且等间距分布的频率线,在时域上表现为严格的周期性包络函数曲线^[3-4]。光频梳的每条频率线都可以用载波包络偏移频率 f_{ceo} 和 n 倍的重复频率 f_{rep} 严格唯一地表征。THz QCL 产生的光频梳由于具有高稳定性、高精度、高输出功率等优点,可应用于绝对校准、分子指纹识别等领域。但一般由于产生机制及工艺限制,THz QCL 光频梳不能完全发挥优势,常用主动调制、被动调制、群速度色散调控等方法提高性能,其中射频注入是主动调制的常用手段^[5]。射频注入调制可以提高激光器的频率稳定性和模式相干性,对于激光器携带信息、光通信应用等方面具有极其重要的意义。

目前对于激光器光频梳射频注入调制技术的研究主要聚焦在 QCL 器件结构及工艺的优化研究、提高注入射频功率以增加光频梳光谱梳齿、提高频率稳定性等方面。BARBIERI S 等基于工作在 2.8 THz 的双面金属波导结构的 QCL,通过上转移技术将频率梳搬移到 1.57 μm ,并注入 20 dBm 射频功率达到最多 12 根光

基金项目:国家自然科学基金 (Nos.61875220, 61927813, 62035005, 61991430, 62105351), 中国科学院“从 0 到 1”原始创新项目 (No. ZDBS-LY-JSC009), 国家优秀青年科学基金 (No. 62022084), 上海市优秀学术带头人计划 (No.20XD1424700), 上海市青年拔尖人才开发计划

第一作者:刘涵, liuhan@mail.sim.ac.cn

通讯作者:黎华, hua.li@mail.sim.ac.cn

收稿日期:2022-06-08; **录用日期:**2022-07-24

<http://www.photon.ac.cn>

频梳^[6]。GELLIE P等使用射频源直接调制偏置电流,实现对往返频率高达35 GHz的两种波导结构的锁定,锁定范围达到200 MHz以上^[7]。GU L等对3 THz范围的THz QCL进行不同频率和射频功率注入,观察到激光在15.5 GHz往返频率处调制,且不同注入射频频率及功率条件下,拍频信号出现单模向多模的演变^[8]。WAN W等设计出6 mm长腔结构的THz QCL,测量得到激光器拍频信号中心频率约为6.2 GHz,注入900 mA以上电流的情况下,拍频信号表现为稳定的单模信号,调整输入驱动电流,QCL发射谱均匀展宽,且提高了幅度的稳定性^[9]。LIZ等提出一种双截面耦合腔几何结构的THz QCL,这种创新型结构降低了短腔截面的器件电容,提高了射频调制效率,短腔注入射频信号条件下,激光在二次谐波处调制,产生的边带频率间隔与被注入的射频信号频率相同,为THz QCL主动锁模提供了新的方法^[10]。现有研究仅采用针对器件结构本身及注入射频信号进行调控两种方式进行性能优化,忽略了QCL结构射频注入相关的阻抗匹配问题。因此设计射频传输超宽带阻抗匹配单元在改善THz QCL光频梳的射频传输、最优化QCL系统性能等方面是十分必要的。

本文针对THz QCL光频梳射频传输阻抗不匹配问题探讨了一种渐变微带线结构的设计与优化方法,并利用等效电路模型对设计结构物理机理进行解释,实验中将渐变微带线应用于THz QCL光频梳射频信号提取测试,以验证设计结构的可行性。

1 器件结构与模拟

1.1 材料结构与参量优化

根据实验室经验得到,常用的射频传输线特征阻抗为 50Ω ,而采用的激光器端口特征阻抗则为 20Ω ^[8]。激光器光频梳的稳定相互作用在射频频段表现为单模拍频信号,其中心频率为6.2 GHz。考虑成本及实验室常用要求,从传统的微带线结构出发进行设计,微带线结构包括上层金属结构,中间介质层及底层接地金属板。确定微带线材料为传输性能优异的金(Au),其厚度固定为 $1 \mu\text{m}$,介质衬底材料为氮化铝(AlN),其介电常数 $\epsilon_r=8.8$ F/m,从微带线设计角度考虑,已知微带线特性阻抗 Z_0 ,等效介电常数为 ϵ_{eff} ,特性阻抗与等效介电常数可表征为

$$\begin{cases} Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \ln\left(\frac{8h}{w_0} + \frac{w_0}{4h}\right) & w_0 < h \\ Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}} \left[\frac{w_0}{h} + 1.393 + 0.667 \ln\left(\frac{w_0}{h} + 1.444\right) \right]}} & w_0 > h \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\sqrt{1 + 12 \frac{h}{w_0}} + 0.04 \left(1 - \frac{2}{h}\right)^2 \right] & w_0 < h \\ \epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{w_0}}} & w_0 > h \end{cases} \quad (2)$$

式中, w_0 为微带线端面宽度, h 为微带线介质衬底厚度,微带线的特性阻抗是端面宽度 w_0 、衬底厚度及介电常数的函数,从而可以确定设计时需要考虑的参量^[11]。此外,由于器件结构设计在实际集成化应用中受到尺寸限制,微带线长度 l 不可能完全等于 $1/4\lambda$, l 一定程度上决定微带线的端面相位关系,因此对于微带线结构性能也有一定影响。考虑多节阻抗变换器,其分立节数为无限多节时,可最终视为渐变阻抗微带线,根据理论公式得到与性能相关的参数进行电磁仿真设计。

采用有限元法对渐变微带线结构进行电磁仿真,同时增大剖分网格提高仿真精度。设计的渐变微带线结构如图1所示,分别显示了设计渐变微带线的侧视图、正视图和俯视图。正视图中标记了需要考虑的参量,微带线的介质衬底厚度 h ;俯视图上标注了微带线的长度 l ,介质衬底的宽度 w_{sub} ,连接 20Ω 入射端端面宽度 w_{in} 、连接 50Ω 出射端端面宽度 w_{out} ,同时标注了通孔位置。根据理论基础对渐变微带线标注的参量分别进行了优化设计。优化结果采用S参数表征,S参数是一种在表现射频特性时,在高频信号激励下描述电阻

的电气行为的工具,通过反映电阻对入射信号散射功率的大小表述电阻特性。优化设计过程及结果如图2所示,所选择优化顺序根据经验仿真过程得到,每次优化过程被优化参量及最终优化参数由表1列出,其中参数优化过程6、7得到的S参数结果与参数优化过程5相同,因此在图2(a)中被省略,优化得到的最终参数同时受到实际工艺要求的限制。通过参数优化得到,传输系数 S_{21} 增大,最终达到 -0.1209 dB,反射系数 S_{11} 减小,最终达到 -17.5133 dB,器件性能得到明显提升。

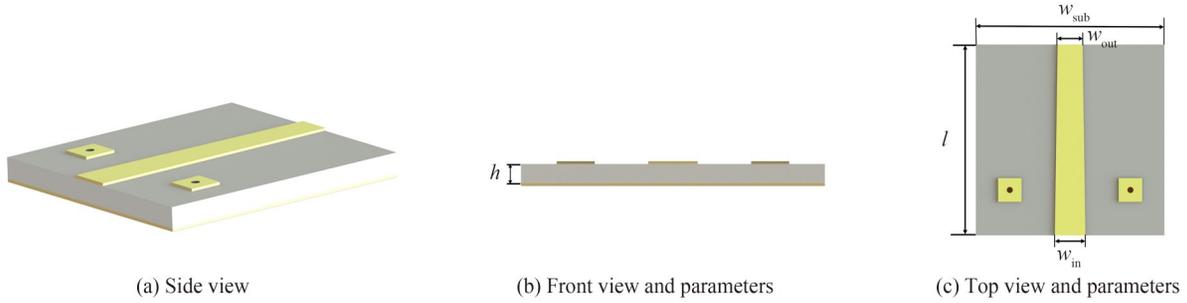


图1 渐变微带线结构及参量

Fig.1 Structure of the tapered microstrip line and parameters

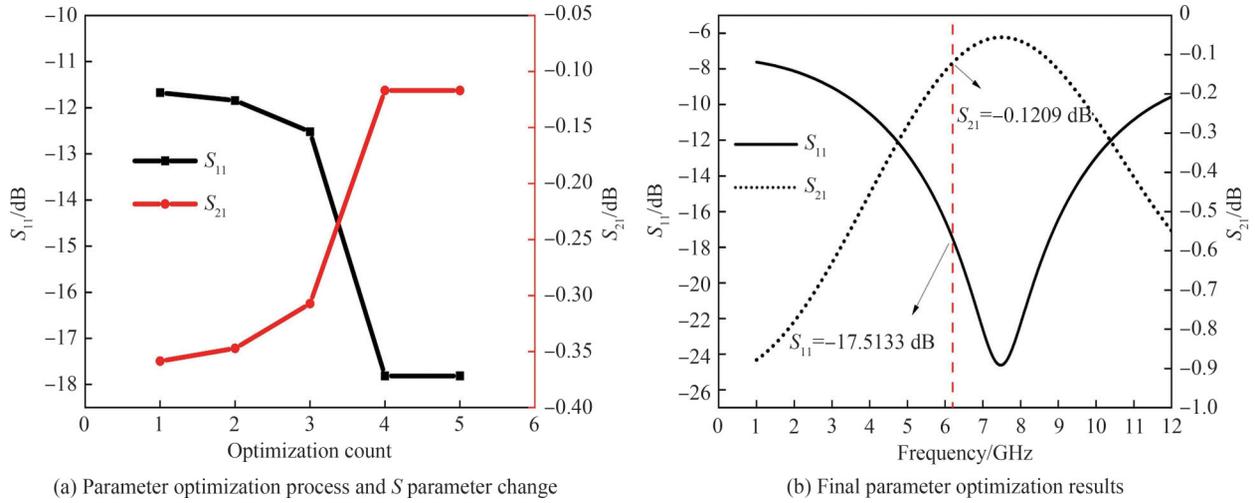


图2 参数优化过程与结果

Fig.2 Parameter optimization process and results

表1 参数优化过程

Table 1 Parameter optimization process

Optimum process	Parameters	Optimized result
1	Microstrip line length l	4 mm
2	Medium substrate thickness h	240 μm
3	Incident end face width w_{in}	650 μm
4	Exit end face width w_{out}	530 μm
5	Width of medium substrate w_{sub}	4 mm
6	Distance between through hole and edge	700 μm
7	Microstrip line (Au) thickness	1 μm

1.2 器件工艺及场分布

工艺加工层面,Au材料与介质层不能很好地贴附,因此工艺上需考虑镀层。采用钛(Ti)镀层加工工艺及铜(Cu)金属外镀Au两种工艺方式,分别得到的电磁仿真结果如图3,通过S参数曲线表征并与原有仿真结构得到的S参数进行对比。对比仿真结果得到,采用Ti镀层加工工艺会大大降低器件性能,其传输系数

S_{21} 在6.2 GHz降低到-14 dB,反射系数 S_{11} 改变了中心频率值;与之相反,Cu金属外镀工艺方式可以最大程度地保留器件性能,为最终选择的加工工艺方式。

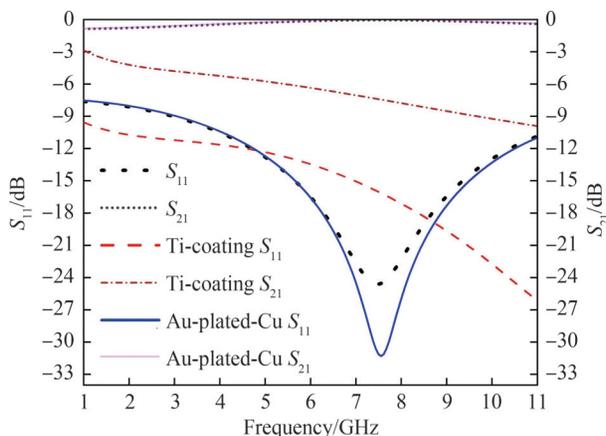


图3 用Ti镀层加工工艺及Cu金属外镀Au加工工艺方式得到的S参数与原有仿真得到的S参数的结果比较

Fig.3 The S parameter obtained by processing technology of Ti coating and Au plating on Cu metal were compared with the simulated S parameter

为了进一步分析物理机理,对器件结构电场进行仿真^[12],得到的电场分布如图4所示。图4(a)显示了电场分布的俯视图,图4(b)显示了在 $l=0$ mm处连接QCL的20 Ω 输入端、 $l=2$ mm的中间截面及 $l=4$ mm处连接射频传输线的50 Ω 输出端口的电场分布情况。根据电场分布显示,射频信号在渐变微带线中周期性传播,从定义的0 mm入射端口输入后,经过2 mm中间截面及4 mm输出端口时,器件表现出电场损耗不明显的特征,同时观察到在微带线边缘分布的电场信号最强,表现出一定的趋肤效应,这与传统微带线传输一致。由于微带线的渐变形态,电磁波的损耗也得到一定的控制,由此得到的器件结构有效,且性能和尺寸都满足实验需求。

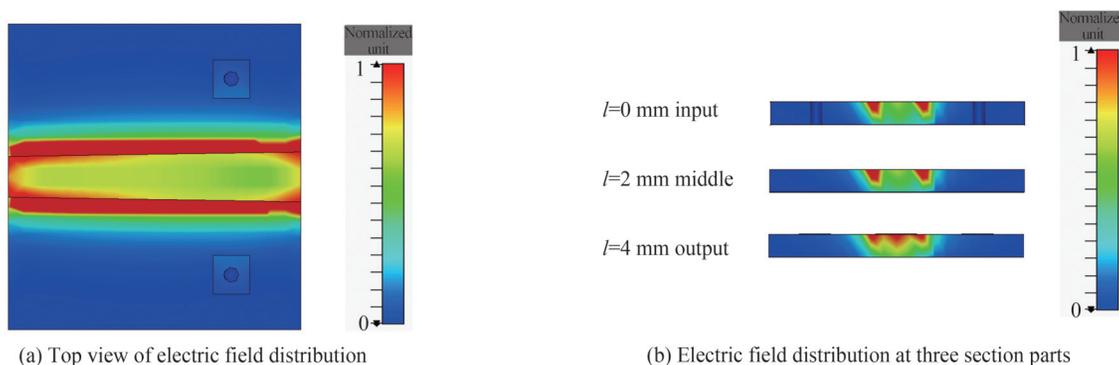


图4 渐变微带线电场分布
Fig.4 Electric field distribution diagram of gradient microstrip line

1.3 等效电路模型

根据电场分布进一步考虑,已知微带线工作模式为准TEM模。从电场角度分析,电场完全束缚在微带线表面,在横向上形成强耦合,这种强耦合可以等效为一个电容 C_1 。从电流角度分析,电流在微带线中的分布可引入电感 L_1 ,最终电路结构可等效为LC并联谐振电路。如图5(a)所示,基于矩阵法软件进行电路拟合优化,最终得到的电路参数为 $L_1=516.355\ 077$ pH, $C_1=516.357\ 66$ fF。电路拟合优化得到的仿真结果与模型仿真结果比较,如图5(b)所示,在6.2 GHz附近,与仿真结果得到的 $S_{s21}=-0.103\ 2$ dB, $S_{s11}=-17.487$ dB相比,电路拟合优化结构得到的 $S_{c21}=-0.102$ dB, $S_{c11}=-16.326$ dB,传输系数与反射系数基本吻合且在允许的参数变化范围内,二者趋势基本一致。由此可知,用LC电路模型很好地反映了器件性能,进一步解释了所设计的渐变微带线的物理机理。

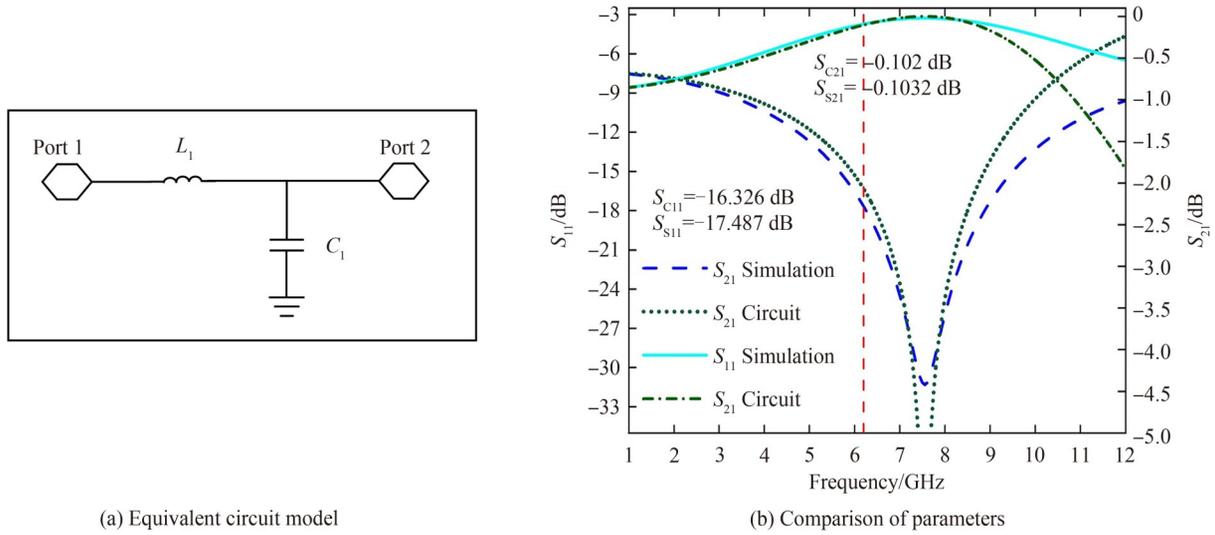


图5 等效电路模型及等效电路与仿真模型的S参数对比
 Fig.5 Equivalent circuit model and comparison of S parameters between equivalent circuit and simulation model

2 实验方法与结果

仿真得到设计的渐变阻抗微带线经过S参数及场路表征都表现出很好的传输效果。为了验证仿真结果的可靠性,展示对THz QCL-渐变微带线封装结构的实验结果,进一步反映渐变微带线的射频传输性能。采用的THz QCL是基于3.9 THz的单面等离子体波导结构^[13],这种波导结构具有远场光斑质量好,波导损耗小的优点。该THz QCL器件尺寸长6 mm,宽150 μm。实验过程中整个实验装置工作在液氮低温系统中,以避免振动噪声的梳子操作,同时整个系统工作在真空干燥条件下,以保证THz QCL良好的性能效果。图6显示了在连续波(Continuous Wave, CW)模式下,不同温度时测量得到的QCL的光电流-电压(L-I-V)特性^[14-15]。实验对THz QCL本身的器件性能进行了表征,其中,THz QCL的阈值电流为650 mA,即在电流最小为650 mA时开始发光。分别测量了THz QCL工作在20 K、25 K、30 K、40 K散热温度条件下的光功率,最低温度由实验室提供的THz QCL连续工作最低温度条件得到,而在40 K以上的散热温度下,THz QCL几乎不发光,这是由THz QCL本身工作在低温条件下的性质决定的。根据实验结果得到,在20 K工作温度下,该THz QCL最大功率可以达到0.75 mW。

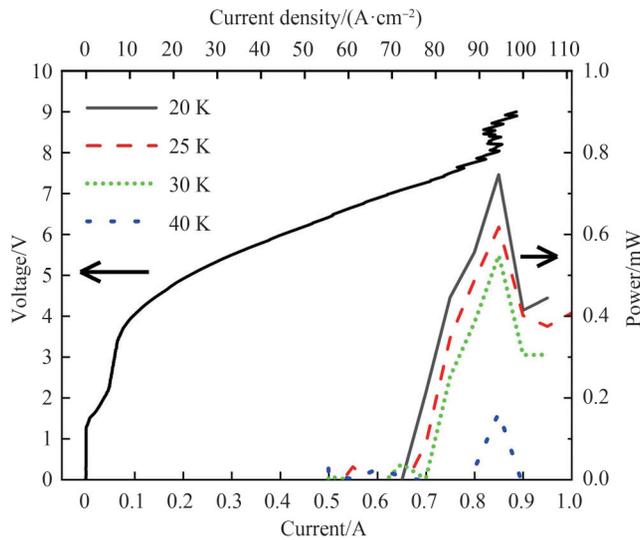


图6 QCL在连续波模式下的光电流-电压特性
 Fig.6 Measured light-current-voltage characteristics in continuous wave mode of the QCL

将 THz QCL 与渐变微带线封装加工,并通过测量拍频信号研究渐变微带线传输射频信号的性能。图 7 展示了测量 QCL 拍频信号的实验装置^[16]。在 THz QCL 中,多模激光器工作时,光频梳的相邻模式之间相互作用,在射频波段产生拍频信号(beat note),被广泛应用于表征 QCL 光频梳重复频率的稳定性及模式之间的相干性。此外,模间拍频信号一般在射频波段,可以直接被频谱分析仪测量得到,为射频注入频率提供重要的依据。实验装置中,利用电驱动对 THz QCL 持续供电,供电电压由 THz QCL 工作性质决定。激光器既作为发光光源,同时本身作为探测器得到拍频信号,拍频信号经过渐变微带线进行阻抗变换后,信号传输到 Bias-T,以滤除直流信号,减少直流信号对测量结果的影响,再经过放大器,通过频谱分析仪实时检测得到,从而评估激光频率梳的梳状特性。

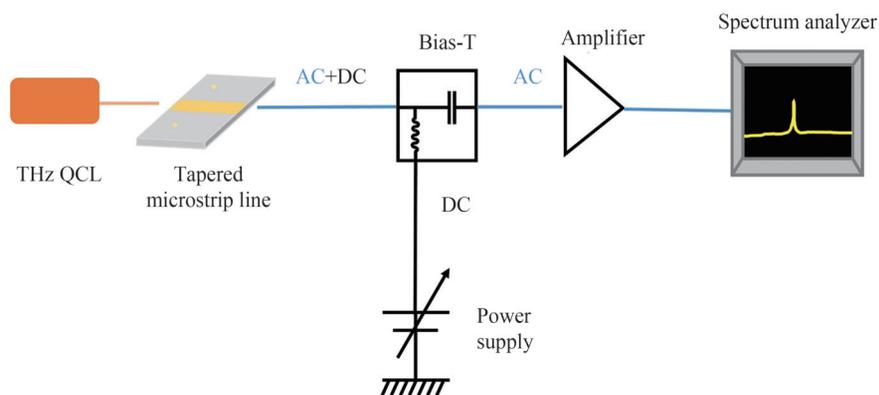


图 7 实验装置

Fig.7 Schematic diagram of experimental set-up

根据测量结果可知在散热温度为 20 K 条件下 THz QCL 工作性能最好,因此后续实验都在散热温度保持在 20 K 条件下进行。首先实验测得拍频信号在不同电流条件下的动态变化(mapping)对拍频信号进行表征^[17],其中分辨率带宽(Resolution Bandwidth, RBW)及视频带宽(Video Bandwidth, VBW)是需要关注的设定值。RBW 是两个不同频率信号能够被清楚分辨出来的最低频宽差异,选取适当的 RBW 不仅有助于信号的测量,也可以避免失真。VBW 表示频谱仪的显示带宽,在要求观测信号更精细时一般需要减少 VBW,动态变化测试保持 RBW 为 100 kHz,VBW 为 10 kHz。图 8(a)绘制了拍频信号的动态变化,以分析拍频信号的频域特性。图中横轴表示 THz QCL 的驱动电流,驱动电流范围为 700~900 mA,在此电流范围内,THz QCL 在发光的同时,可以保证器件正常工作,更高电流条件下器件可能烧坏。纵轴表示测得的拍频信号频率,同时根据颜色深度表征了拍频信号的强度。根据测量结果分析,在允许一定误差及实验不稳定因素的

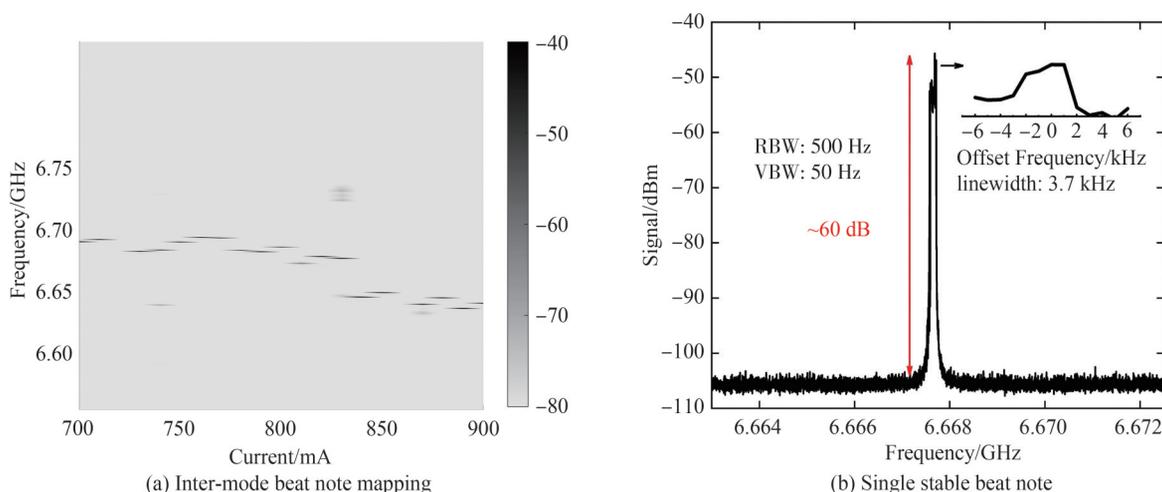


图 8 用 100 kHz 的 RBW、10 kHz 的 VBW 测量的拍频信号映射及电流为 790 mA、温度为 20 K 条件下的稳定拍频信号
Fig.8 Intermode beat note mapping of laser measured with RBW of 100 kHz and VRW of 10 kHz and stable beat note of current at 790 mA and temperature at 20K

条件下,实验测得的拍频信号基本为单一窄模形式,且存在稳定的频移趋势,具体表现为随着驱动电流增大,拍频信号向低频方向移动,说明激光器发光得到的光频梳在 THz 波段为稳定的梳状结构,且具有较强的模式相干性。图 8(b)展示了在 RBW 500 Hz,VBW 50 Hz,驱动电流为 790 mA,散热温度为 20 K 条件下测得的稳定拍频信号。根据图片结果可以更直观地观察到拍频信号的单一窄模形式,且该拍频信号信噪比可达 60 dB,拍频信号 3 dB 线宽为 3.7 kHz。与实验室现有的微带线封装激光器拍频信号性能测试结果^[14]相比,拍频信号信噪比提升了 10 dB,3 dB 线宽从 394 kHz 降低到 3.7 kHz。根据测试结果可知,经过阻抗变换后,测量得到的射频信号的稳定性得到了提高,同时信号的信噪比存在一定程度的提升。

为了进一步评估测得拍频信号的稳定性,验证渐变阻抗微带线在传输激光器拍频信号的优势,对拍频信号进行了一系列稳定性测试^[18]。通过频谱仪对拍频信号进行了最大保持(Max-hold)测量,最大保持测量是通过测量一段时间内信号频移变化情况表现信号的稳定性,拍频信号在不稳定条件下会出现在一段频段之间摆动的情況,频移变化越小,则表明信号越稳定。如图 9(a)、(b)是在散热温度稳定在 20 K, RBW 为 2 kHz,VBW 为 500 Hz 时的最大保持测量结果,横轴频域坐标均是相对频率中心值偏移处理后的结果。其中,图 9(a)是在最大保持时间为 30 s 时的测量结果,得到拍频信号变化的带宽为 110 kHz,表明拍频信号在 30 s 内频率波动范围为 110 kHz,根据测试结果可以得出,射频信号经过渐变微带线阻抗变换后再进行测量,能够表现为单一窄模信号。图 9(b)是在最大保持时间为 2 min 时的测量结果,拍频信号频率偏移范围为 480 kHz,表明测得的拍频信号具有较强的稳定性。由于实验测量过程中同时会受到外界扰动及温度波动的影响,可以预测实际拍频信号表现出的变化带宽可以更窄。同时对拍频信号的幅度艾伦方差(Allan deviation of amplitudes)进行了实验测试,幅度艾伦方差是通过测量噪声抖动程度表现信号随时间变化的稳定性,是对

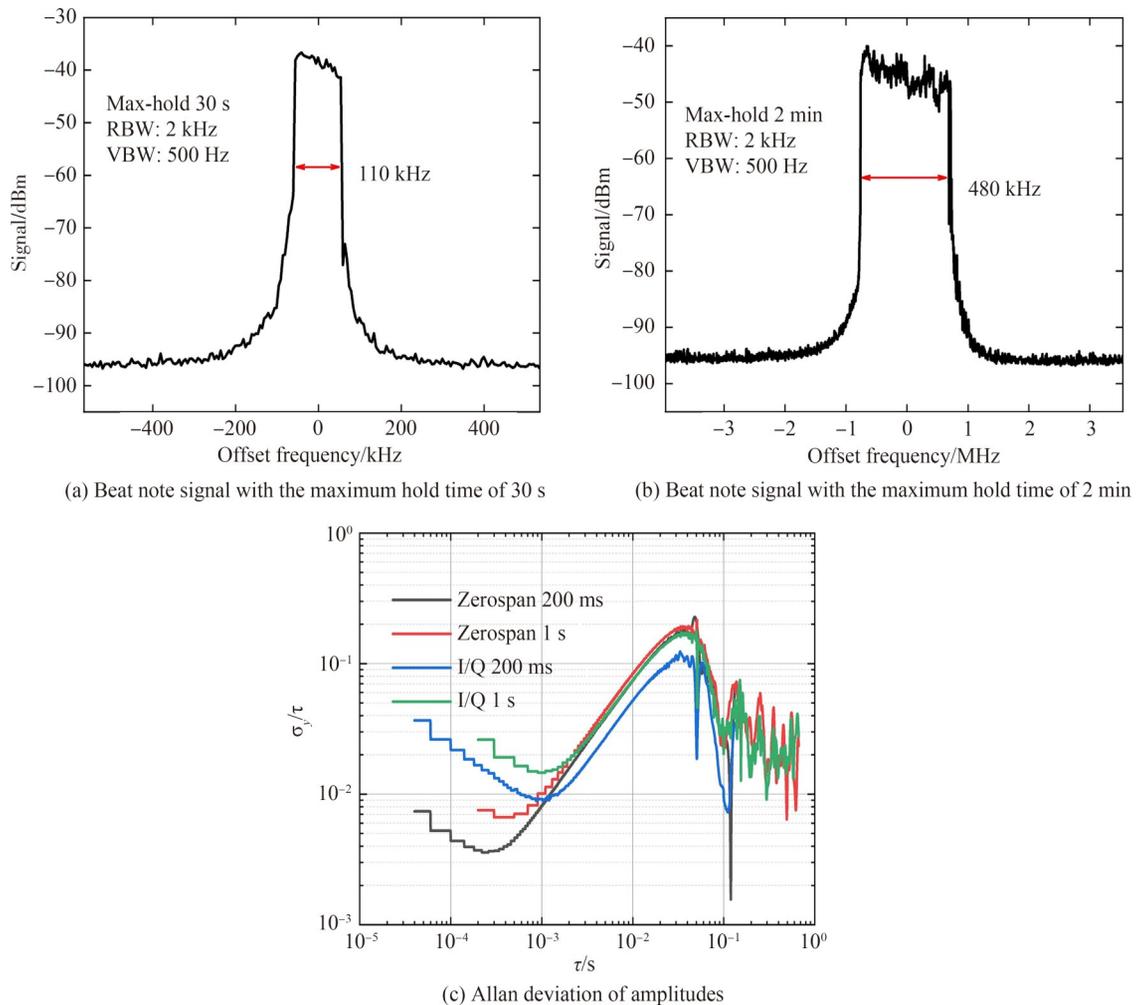


图9 拍频信号的稳定性测试
Fig.9 Stability test of beat note signal

拍频信号稳定性的另一种常用的表征方式。实验中分别采用零频率扫宽(zero span)测量及正交通道(I/Q)测量方法,两种测量方法在理论上可以得到相同的幅度艾伦方差测量结果,根据测量结果的一致性可以进一步验证幅度艾伦方差测量结果的准确性。两种不同测量方法下测得时间间隔为200 ms及1 s的幅度艾伦方差结果,经过数据处理得到图9(c)所示结果,二者结果具有一致性,表明测量得到的结果是准确的。测量得到不同时间间隔的幅度艾伦方差值基本在 $10^{-1}\sim 10^{-2}$ 之间,实验结果与现有微带线封装激光器结构拍频信号测试结果相比,同样具有一定优势,表现了信号的稳定性,进一步验证了阻抗变换对测得射频信号稳定性提升的作用。

3 结论

结合理论和设计得到了阻抗变换的渐变微带线,利用电场和电路仿真分别对渐变微带线进行了验证和物理机理的阐述,并利用实验深入研究了渐变微带线的阻抗变换对THz QCL光频梳重复频率的影响,以验证渐变微带线的作用。根据理论及仿真结果可知,设计得到的渐变阻抗微带线符合用于THz QCL与射频传输线之间的阻抗过渡要求,能够保持良好的传输特性。实验结果表明,运用渐变阻抗微带线测得的THz QCL光频梳的拍频信号,不仅能够提高信号的信噪比,增强拍频信号强度,同时也提高了拍频信号的稳定性。渐变阻抗微带线可以有效传输拍频信号,反映THz QCL激光器光频梳的梳状结构,设计的渐变微带线可对THz QCL光频梳的射频传输研究发挥作用。本工作可为后续的THz QCL光频梳及双光梳的射频调制及锁模的研究提供理论和实验依据。

参考文献

- [1] NAASUMA T, DUCOURNAU G, RNAUDC. Advances in terahertz communications accelerated by photonics [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(6):371-379.
- [2] ABRAMOV P I, BUDARIN A S, KUZNETSOV E V, et al. Quantum-cascade lasers in atmospheric optical communication lines: challenges and prospects (review)[J]. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2020, 87(4):579-600.
- [3] UDEM T. Optical frequency metrology[J]. *Nature*, 2016, 416(6877):233-237.
- [4] LIAO Xiaoyu, CAO Juncheng, LI Hua. Research progress of terahertz semiconductor optical frequency combs[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(18): 189501.
廖小瑜, 曹俊诚, 黎华. 太赫兹半导体激光光频梳研究进展[J]. *物理学报*, 2020, 69(18):189501.
- [5] LEE S H, KANG J M, CHOI I H, et al. Linearization of DFB laser diode by external light-injected cross-gain modulation for radio-over-fiber link[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(14):1545-1547.
- [6] BARBIERI S, MAINEULT W, DHILLON S S, et al. 13 GHz direct modulation of terahertz quantum cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(14):143510.
- [7] GELLIE P, BARBIERI S, LAMPIN J F, et al. Injection-locking of terahertz quantum cascade lasers up to 35 GHz via RF amplitude modulation[J]. *Optics Express*, 2010, 18(20):20799-20816.
- [8] GU L, WAN W, ZHU Y, et al. High frequency modulation and injection locking of terahertz quantum cascade lasers[J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(6):065706.
- [9] WAN W, LI H, ZHOU T, et al. Homogeneous spectral spanning of terahertz semiconductor lasers with radio frequency modulation[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7:44109.
- [10] LI Z, LI H. Sideband generation of coupled-cavity terahertz semiconductor lasers under active radio frequency modulation [J]. *Optics Express*, 2018, 26(25):32675-32690.
- [11] DAVID M. *Microwave engineering* [M]. ZHANG Zhaoyi, ZHOU Lezhu, WU Deming, transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.
DAVID M. 微波工程[M]. 张肇仪, 周乐柱, 吴德明, 译. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [12] LI T, LI D, QIN P, et al. A novel miniaturized strong-coupled FSS structure with excellent angular stability[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2020, 69(12):8470-8478.
- [13] LI Hua, ZHOU Kang, CAO Juncheng. A terahertz quantum cascade laser with active region structure and wide band gain: CN108336643A[P]. 2018.
黎华, 周康, 曹俊诚. 有源区结构及具有宽带增益的太赫兹量子级联激光器: CN108336643A[P]. 2018.
- [14] GUAN W, LI Z, ZHOU K, et al. Repetition frequency locking of a terahertz quantum cascade laser emitting at 4.2 THz [J]. *Terahertz Science and Technology*, 2020, 13(1):32-40.
- [15] WANG C, LI Z, LIAO X, et al. Improved comb and dual-comb operation of terahertz quantum cascade lasers utilizing a symmetric thermal dissipation[J]. *Optics Express*, 2021, 29(18):433938.
- [16] ZHAO Y, LI Z, ZHOU K, et al. Active stabilization of terahertz semiconductor dual-comb laser sources employing a

- phase locking technique[J]. *Laser Photonics Reviews*, 2021, 15:200498.
- [17] 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.
- [18] ZHOU K, LI H, WAN W J, et al. ridge width effect on comb operation of terahertz quantum cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(19):191106.

Radio Frequency Transmission in Terahertz Quantum Cascade Laser Frequency Combs

LIU Han^{1,2}, LI Ziping¹, MA Xuhong^{1,2}, WU Shumin^{1,2}, LIAO Xiaoyu^{1,2}, GUAN Wen^{1,3},
ZHOU Kang^{1,2}, ZHAO Yiran^{1,2}, CAO Juncheng^{1,2}, LI Hua^{1,2}

(1 Key Laboratory of Terahertz Solid State Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Science, Shanghai 200050, China)

(2 Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

(3 School of Information Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China)

Abstract: The electrically pumped terahertz quantum cascade laser is characterized by high output power, low threshold, high quality far-field beam, etc., which is one of the most efficient terahertz radiation sources in the frequency range between 1 THz and 5 THz. Due to its outstanding performances, the terahertz quantum cascade laser is an ideal semiconductor platform for the terahertz frequency comb generation. Different approaches, e.g., group velocity dispersion engineering, active microwave injection locking, passive stabilization, etc., have been employed to obtain broadband frequency combs based on terahertz quantum cascade lasers. Regardless of the stabilization technique employed, the radio frequency transmission in the terahertz quantum cascade laser cavity is a key point for the comb characterization, because the repetition frequency of the laser comb determined by the laser cavity length normally lies in the microwave frequency range. Previous studies mainly focus on the optimizations of laser structures to improve frequency stability. The design and optimization of broadband impedance matching unit are less investigated. In this article, a tapered microstrip line structure is designed to solve the impedance mismatching problem in the extraction and transmission of the radio frequency signal of the terahertz quantum cascade laser frequency comb. The input and output impedances of the tapered microstrip line structure are designed to be 20 Ω and 50 Ω , respectively. The simulation of the tapered microstrip line is carried out by employing a finite element method. The structure and parameter optimization of the tapered microstrip line is systematically studied. The calculated S_{21} and S_{11} are -0.1209 dB and -17.5133 dB, respectively, at the central frequency of 6.2 GHz. Then the electric field distribution of the tapered structure is simulated and the skin effect of the calculated electric field distribution of the tapered microstrip line is consistent with that of the traditional microstrip line. Furthermore, a corresponding equivalent circuit model is established to analyze its physical characteristics. In the experiment, the tapered microstrip line structure is applied to the extraction and characterization of the radio frequency signal of a terahertz quantum cascade laser frequency comb to verify the transmission effect of the tapered microstrip line. We first evaluate the basic performance of the terahertz quantum cascade laser. The maximum power is 0.75 mW at an operation temperature of 20 K. And the repetition frequency of the terahertz quantum cascade laser is successfully measured. The radio frequency linewidth and the signal to noise ratio are measured to be 3.7 kHz and 60 dB, respectively. And the repetition frequency shows a stable single-line signal in the injection current range of 700~900 mA. The stability of the repetition frequency is further verified under the condition of resolution bandwidth 500 Hz, video bandwidth 50 Hz, a driving current of 790 mA, and an operation temperature of 20 K. The frequency fluctuation range of the repetition frequency is measured to be 110 kHz in 30 s and 480 kHz in 2 min. And the amplitude Allan variance value of different time intervals is basically between 10^{-1} and 10^{-2} . The measured max-hold and amplitude Allan variance results also show a high-level stability of the repetition frequency. The experiments show that the designed tapered microstrip line is able to achieve the impedance matching between the laser chip and the external radio

frequency transmission cable, which can significantly improve the signal-to-noise ratio of the comb repetition frequency by at least 10 dB and shorten its linewidth from 394 kHz to 3.7 kHz. The designed tapered impedance microstrip line can effectively transmit the repetition frequency and reflect the comb structure of a terahertz quantum cascade laser optical comb. This work provides a simulation and experimental basis for the radio frequency transmission study and mode-locking of optical frequency combs and dual-comb sources in the terahertz frequency range.

Key words: Terahertz; Quantum cascade laser; Optical frequency comb; Impedance matching; Tapered microstrip line

OCIS Codes: 140.5965; 300.6370; 300.6360; 300.6495; 300.6170

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (Nos. 61875220, 61927813, 62035005, 61991430, 62105351), the “From 0 to 1” Innovation of the Chinese Academy of Science (No. ZDBS-LY-JSC009), National Science Fond of Excellent Young Scholars (No.62022084), Shanghai Outstanding Academic Leaders Plan (No. 20XD1424700), Shanghai Young Top Talent Support Program