

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.05.12

# 单模太赫兹半导体激光器高精度调谐特性研究

管玟<sup>1,2</sup>, 李子平<sup>1</sup>, 马旭红<sup>1,3</sup>, 王晨捷<sup>1,3</sup>, 万文坚<sup>1</sup>, 曹俊诚<sup>1,3</sup>, 黎华<sup>1,3\*</sup>

(1.中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050;

2.上海科技大学, 上海 201210; 3.中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 大量物质的特征吸收谱在太赫兹范围内, 因此近年来太赫兹光谱应用的发展备受关注。相比于现有的商业光谱仪, 基于可调谐单模激光器的光谱测量方法具有高精度和高光谱获取速度的优势。太赫兹量子级联激光器是可调谐激光源的理想选择。在利用其实现光谱测量前, 需对其调谐特性进行研究, 但是现有测量方法受到精度限制。研究发现, 利用太赫兹量子级联光频梳和单模激光器之间的拍频, 可在微波波段得到对应的拍频信号。当调谐单模激光器时, 拍频信号会发生相应的频移。因此, 结合量子级联激光器的自探测, 利用频谱分析仪测量拍频信号的频移情况, 可以实现对单模激光器调谐的高精度测量。最终得到所测太赫兹单模激光器的调谐速率为 53 MHz/K (温度调谐) 和 2.7 MHz/mA (电流调谐)。

**关键词:** 太赫兹; 量子级联激光器; 外差探测

中图分类号: TB96

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2022)05-0108-05

## High precision frequency tuning of single mode terahertz semiconductor laser

GUAN Wen<sup>1,2</sup>, LI Ziping<sup>1</sup>, MA Xuhong<sup>1,3</sup>, WANG Chenjie<sup>1,3</sup>,WAN Wenjian<sup>1</sup>, CAO Juncheng<sup>1,3</sup>, LI Hua<sup>1,3\*</sup>

(1. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Shanghai 200050, China;

2. ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China; 3. University of Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The characteristic absorption spectra of a large number of substances are in the terahertz range, so the development of terahertz spectroscopy applications has attracted much attention in recent years. Compared to existing commercial spectrometers, spectral measurement methods based on tunable single-mode lasers offer the advantages of high accuracy and high spectral acquisition speed. Terahertz quantum cascade laser (QCL) is an ideal candidate for tunable laser sources. Its tuning characteristics need to be studied before it can be used to achieve spectral measurements, but the existing measurement methods are limited by accuracy. The study finds that the corresponding beatnote signals can be obtained in the microwave band by beating the terahertz quantum cascade optical frequency comb and the single-mode laser. When the single-mode laser is tuned, the beatnote signals shift accordingly. Therefore, combined with the self-detection technology of QCLs, the tuning coefficient of the single mode laser can be measured with high precision by measuring the microwave beatnote signals using a spectrum analyzer. The resulting coefficient of the measured terahertz single-mode laser were 53 MHz/K (temperature tuning) and 2.7 MHz/mA (current tuning).

**Key words:** terahertz; QCL; heterodyne detection

收稿日期: 2022-10-08; 修回日期: 2022-10-19

基金项目: 国家自然科学基金(62235019, 61875220, 62035005, 61927813, 61991430); 中科院“从0到1”原始创新项目(ZDBS-LY-JSC009); 中科院仪器研制项目(YJKYYQ20200032); 国家优秀青年科学基金项目(62022084); 上海市优秀学术带头人计划(20XD1424700)

引用格式: 管玟, 李子平, 马旭红, 等. 单模太赫兹半导体激光器高精度调谐特性研究 [J]. 计测技术, 2022, 42 (5): 108-112.

Citation: GUAN W, LI Z P, MA X H, et al. High precision frequency tuning of single mode terahertz semiconductor laser [J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42 (5): 108-112.



## 0 引言

频率范围处于0.1~10 THz的电磁波被定义为太赫兹波。由于大量物质的“指纹谱”(特征吸收线)处于太赫兹波段<sup>[1-2]</sup>,所以太赫兹光谱在基础科学、生物诊断和安防等方面具有独特的应用优势。

傅里叶变换红外(Fourier transform infrared, FTIR)光谱仪和时域光谱仪(Time-domain spectroscopies, TDS)是现有的两种常见的可应用于太赫兹波段的商业光谱测量仪器。这两种光谱仪各有其优势,FTIR的测量范围覆盖可见光到太赫兹波,而TDS在光谱测量方面具有很高的动态范围(>40 dB)。但是,无论是FTIR还是TDS都很难实现高精度的光谱测量。大多数的FTIR可以实现的最高精度为GHz量级,并且精度越高,其内部干涉仪的臂长越长,仪器体积越大。同样地,TDS可实现的精度也仅在GHz量级。相较上述两种商业光谱仪,利用双光梳实现光谱测量具有优势,可以快速获取数据且无需移动部件。双光梳由两个重复频率有略微差别的光频梳拍频产生<sup>[3-4]</sup>,可以利用其中一个光频梳的自探测直接测量双光梳谱,即可在频谱分析仪上进行观测<sup>[5-6]</sup>。尽管如此,利用双光梳只能实现对光谱的间接测量,因为如果想要根据微波波段的双光梳谱得到太赫兹光谱,首先需要建立双光梳谱与用于探测样品的光频梳梳齿之间的联系。文献[8]中提出先利用双光梳测量水汽的吸收谱,再通过与HITRAN数据库中的结果进行比较,最后判断出两个光频梳的相对位置,可大致推断出双光梳梳齿对应的太赫兹频率。可以看出该方法具有一定的复杂性。为了更简便地实现光谱测量,研究人员提出了一种利用可调谐单模激光器实现的光谱测量的方法。由于单模激光器只包含一个频率,该方法可以较为方便地建立微波与太赫兹波之间的联系。

太赫兹量子级联激光器是一种高输出功率<sup>[7]</sup>,宽频率覆盖范围(1.2~5.6 THz)<sup>[8-9]</sup>,高远场光斑质量<sup>[10]</sup>,高工作温度(250 K)<sup>[11]</sup>的电泵浦半导体太赫兹源,所以它适合作为光谱测量中所需的可调谐激光源。目前为止,不同的方法被提出以测量单模激光器的调谐特性,如利用FTIR直接测量,但该方法精度较低。本文提出了一种基于太赫兹

量子级联光频梳和单模激光器拍频的高精度调谐测量方法被提出。该方法中使用的两台量子级联激光器(Quantum Cascade Lasers, QCL)激光中心频率均为4.2 THz,通过光路将其中一台QCL的出射光耦合至另一台QCL的谐振腔中,二者拍频后得到对应的微波信号。通过测量这些微波拍频信号,可以得到单模激光器的调谐特性<sup>[12]</sup>。量子级联激光器的载流子弛豫时间为ps量级,可以直接作为探测器测得微波拍频信号,随即传输至频谱分析仪用于观察与分析。频谱分析仪具有高分辨力,可以实现对单模激光器调谐的高精度测量。

## 1 实验原理及装置

图1所示的激光器拍频原理示意图中,蓝色实线表示光频梳QCL1的梳齿, $f_{\text{rep}}$ 为其重复频率,红色虚线表示单模激光器QCL2,二者拍频会产生不同的微波信号 $f_1, f_2, \dots, f_n$ 。

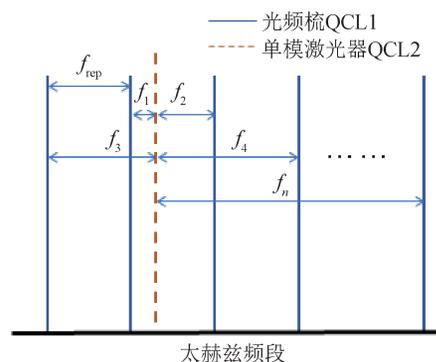


图1 激光器拍频原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the laser beating system

从图1可以看出:信号满足一定的数学关系,即: $f_1 + f_2 = f_{\text{rep}}, f_1 + f_{\text{rep}} = f_3, f_2 + f_{\text{rep}} = f_4, f_3 + f_4 = 3f_{\text{rep}}, \dots$ ,依此类推。同时,当单模激光器QCL2被调谐时,微波信号也会发生同步的频移。虽然 $f_n$ 位于不同的频率,但在理想情况下,它们的频移速率和范围原则上是相同的。所以,只要测量其中一根拍频信号,即可得到单模激光器的调谐特性,即调谐速率和调谐范围。通过该方法可以联想到使用两个单模激光器拍频来进行调谐测量,但是,这对单模激光器频率有很高的要求,二者的频率差需要在频谱分析仪的测量范围内,并且即使拍频信号在频谱分析仪的测量范围内,从一堆杂乱的噪声中找到该信号也很困难。而利用单模激光器和光频梳进行拍频,可以确保在重复频率范围

内出现两个拍频信号，且只要找到一根拍频信号，即可通过它们之间的数学关系估算出其它信号所在位置，大大降低了调谐测量的难度。

图2所示为激光器拍频实验的装置图。QCL1与QCL2的有源区都基于 $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{GaAs}$ 的材料体系，采用束缚态到连续态的跃迁方式产生光子，结合声子散射实现下能级的粒子数减少<sup>[13]</sup>。通过分子束外延技术将上述级联结构生长在半绝缘的GaAs衬底上，再经过工艺加工，制作出长6 mm，宽150  $\mu\text{m}$ 的半绝缘表面等离子体波导结构，最后将其封装在铜制的热沉上以便散热与测量。在测量过程中，分别用两个独立的电源对QCL1和QCL2进行供电，给QCL1施加较高的电流，使其工作在光频梳状态，同时给QCL2施加较低的电流，使其工作在单模状态。QCL1的出射光经过两个离轴抛物面镜后聚焦并耦合至QCL2的谐振腔内。QCL2不仅可以与QCL1拍频，同时还可以对拍频得到的信号进行自探测<sup>[6-8]</sup>。利用QCL本身作为探测器，可以代替外部探测器，从而简化实验装置。为了提取微波信号，在离QCL2后端面约1~2 mm的位置安装了微带线，其一端通过金线键合与QCL2的上电极相连，另一端则通过同轴高频线与外部电路相连。首先将高频线与一个T型偏置器相连以隔绝直流，这样可以更好地传输微波信号；然后将信号传送至一个增益为30 dB的微波放大器，以便于观察与测量；最终将其传送至频谱分析仪（Rohde & Schwarz，FSW26）。

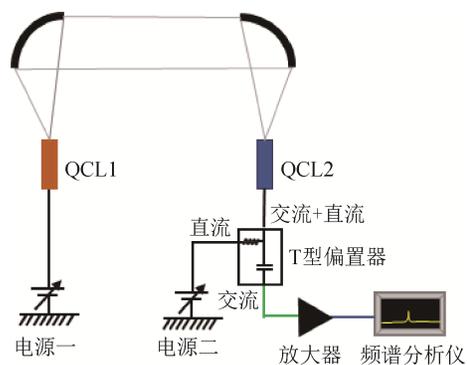


图2 激光器拍频实验装置图

Fig.2 Experimental setup of the laser beating system

## 2 实验结果与讨论

为了证实上文中所述的电流对QCL工作状态的影响，首先用FTIR（Bruker，Vertex 80v）测量

了QCL1和QCL2在不同电流下的发射光谱。如图3所示，QCL1的工作电流为988 mA，工作温度为30 K，可以看出它工作在多模状态。而根据课题组以往的工作<sup>[9-14]</sup>，可以证实这是一种特殊的多模状态，即光频梳状态。QCL2的工作电流为690 mA，工作温度为32 K，可以看出它工作在单模状态，并且该单模状态可在一定电流范围内维持。

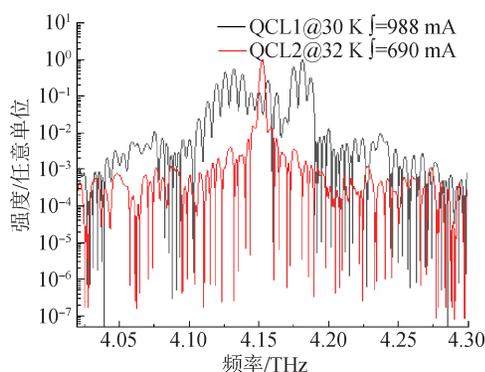


图3 QCL1与QCL2的发射光谱图

Fig.3 Emission spectra of QCL1 and QCL2

将QCL1和QCL2的电流分别设置为988 mA和648 mA，热沉温度控制在28.5 K时，利用QCL2测量二者的拍频信号。实验中一共测得五根拍频信号，图4中展示了其中两根， $f_1$ 和 $f_2$ 。为了证明它们是QCL1和QCL2拍频而得，同时测量并绘出了QCL1的模式间拍频信号。图4中标注出了这三个信号所对应的频率， $f_1$ 为2.24 GHz， $f_2$ 为3.91 GHz，QCL1的模式间拍频信号为6.15 GHz，通过计算可以发现它们之间的关系满足前文原理中所提出的 $f_1 + f_2 = f_{\text{rep}}$ ，可以证明它们的确为QCL1和QCL2之间的拍频信号。另外，从图4中还可以发现，QCL1模式间拍频是单根信号，这是QCL处于光频梳状态的必要条件； $f_1$ 和 $f_2$ 周围没有边模，可以间接说明QCL2处于单模状态。

证明了实验原理的可行性后，根据该原理对单模激光器QCL2的调谐特性进行测量。将QCL1和QCL2的电流分别设置为988 mA和648 mA，再利用温度控制器改变QCL2的温度。前文中提到的，原则上，不同的拍频信号所反映出的调谐特性应该几乎相同，故选取 $f_2$ 来记录其变化。如图5所示，当温度下降时 $f_2$ 向频率低的方向移动，即 $f_2$ 对应的频率减小。一般来说，当温度降低时，激光器的频率会发生蓝移，因此可以推测QCL2的频

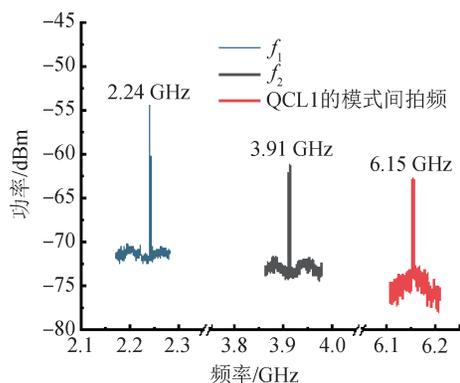


图4 QCL2测得的拍频信号

Fig.4 Beatnote signals measured by QCL2

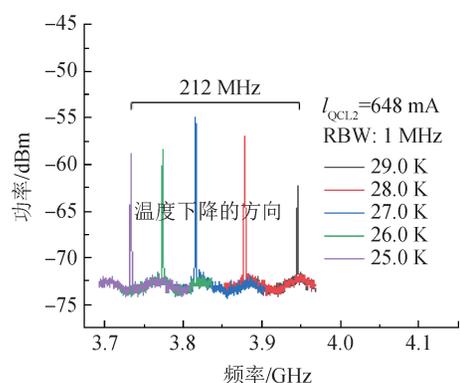


图5 QCL2的温度调谐特性

Fig.5 Temperature tuning characteristics of QCL2

率更靠近其左边的(QCL1的)梳齿。以1 K为步长,测量了从25 K到29 K所对应的 $f_2$ 的频率,其频率移动范围约为212 MHz,可计算出其平均调谐速率为53 MHz/K。需要说明的是,当温度高于29 K时,由于信号太弱而无法测量,当温度低于25 K时, $f_2$ 周围开始出现边模,因此更低温度的情况也未测量。另外,此处的速率为人为所取的平均值,并不代表QCL2随温度的调谐速率是线性的。

图6记录的是改变单模激光器QCL2的电流时, $f_2$ 的频移情况,即QCL2被电流所调谐时的情况。当QCL2的电流小于680 mA时, $f_2$ 信号太弱无法与噪声区分,而当电流大于700 mA时, $f_2$ 开始出现边模,所以按照5 mA为步长,记录了680 mA到700 mA所对应的 $f_2$ 。上文已推测出QCL2更靠近其左边的梳齿,电流增大时QCL一般会发生蓝移,所以 $f_2$ 会减小,这与图6中的现象是一致的,可以证明QCL2更靠近其左边的梳齿这一推论是正确的。在这段电流范围内, $f_2$ 的频移范围为51 MHz,即QCL2的频移范围为51 MHz,可以计算出QCL2的电流调谐速率约为2.6 MHz/mA。同样需要说明

的是,此处的速率为人为所取的平均值,并不代表QCL2随电流的调谐速率是线性的。

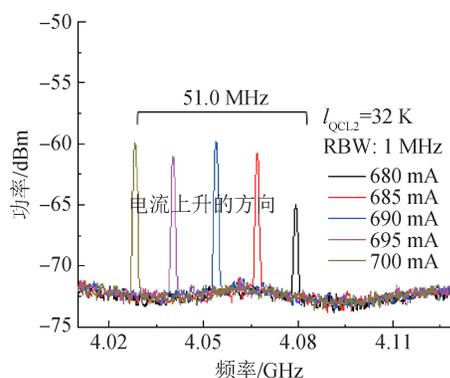


图6 QCL2的电流调谐特性

Fig.6 Current tuning characteristics of QCL2

需要说明的是,该实验中的光频梳和单模激光器均处于自由运行状态,二者产生的拍频信号具有一定的不稳定性,在获取调谐速率结果时进行了平均处理,所以目前无法得知单模激光器随温度/电流的调谐是否为线性。如需确认其线性度,可以对光频梳和单模激光器进行进一步稳频处理。如果单模激光器随温度/电流的调谐是线性的,在测量光谱时,可以直接由初始频率和改变的温度/电流来获得实时频率;如果是非线性的,可以将非线性区分割为不同的小区段,每个小区段中调谐速率可以近似为线性,同时减小温度/电流的步长,也可以测得对应光谱。但是,后者的测量结果具有一定误差,若要获得准确结果,也可以寻找其它线性的调谐方式。

另外,由于实验中所用的QCL2的每毫安或每开尔文的调谐速率为MHz量级,所以频谱分析仪采用的分辨力带宽(Resolution bandwidth, RBW)为1 MHz。而频谱分析仪的RBW可以达到Hz量级,所以当需要更高的精度来测量其他单模激光器的调谐特性时,该方法也可以适用。该方法的另一个优点在于,直接利用QCL的自探测测量拍频信号,响应速度快,响应带宽大,且无需在测量装置中引入另外的探测器,降低了实验装置的复杂性。

最后,该拍频机制在一些实际应用方面展现出了潜在价值。一方面,它可以用来测量窄吸收线的线型。由于下变频光谱可以使用频谱分析仪进行实时观测,可以通过温度和/或电流调谐激光频率,然后获得每个点的功率值,从而得到完整

线型。另一方面,它有望应用于太赫兹通信。当QCL1或QCL2输出的太赫兹波携带了特定信号时,会反映在二者的拍频信号上,利用其中任一QCL可以测得拍频信号。并且,由于QCL1和QCL2拍频会产生不同的拍频信号,原则上可以提供多个不同的传输信道。

### 3 总结

综上所述,本研究提出了一种可以表征太赫兹单模QCL调谐特性的拍频方法。在研究过程中,单模QCL和光频梳QCL拍频所得信号直接由单模QCL测量而得。该方法不需要外置探测器,也没有任何移动部件。实验结果表明,所测单模QCL的温度和电流调谐速率分别为53 MHz/K和2.6 MHz/mA。相较于FTIR,该方法有两点优势:测量精度高、获取数据的速度快。该方法有望实现窄吸收线型测量和多信道太赫兹通信的应用。

#### 参考文献

- [1] TONOUCI M. Cutting-edge terahertz technology [J]. *Nature photonics*, 2007, 1(2): 97-105.
- [2] FISCHER B M, HOFFMANN M, HELM H, et al. Terahertz time-domain spectroscopy and imaging of artificial RNA[J]. *Optics express*, 2005, 13(14): 5205-5215.
- [3] CODDINGTON I, NEWBURY N, SWANN W. Dual-comb spectroscopy[J]. *Optica*, 2016, 3(4): 414-426.
- [4] RÖSCH M, SCALARI G, VILLARES G, et al. On-chip, self-detected terahertz dual-comb source[J]. *Applied physics letters*, 2016, 108(17): 171104.
- [5] YANG Y, BURGHOFF D, HAYTON D J, et al. Terahertz multiheterodyne spectroscopy using laser frequency combs[J]. *Optica*, 2016, 3(5): 499-502.
- [6] ZHAO Y R, LI Z P, ZHOU K, et al. Phase locking of terahertz semiconductor dual-comb laser sources[J]. *Laser photonics review*, 2021, 15(4): 2000498.
- [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] SCALARI G, WALTHER C, FISCHER M, et al. THz and sub-THz quantum cascade lasers[J]. *Laser & photonics reviews*, 2009, 3(1-2): 45-66.
- [9] LI L, KUNDU I, DEAN P, et al. High-power GaAs/Al-GaAs quantum cascade lasers with emission in the frequency range 4.7-5.6 THz[C]. *Leeds*, 2016.
- [10] WAN W J, LI H, CAO J C. Homogeneous spectral broadening of pulsed terahertz quantum cascade lasers by radio frequency modulation[J]. *Optics express*, 2018, 26(2):

980-989.

- [11] KHALATPOUR A, PAULSEN A K, DEIMERT C, et al. High-power portable terahertz laser systems [J]. *Nature photonics*, 2021, 15(1): 16-20.
- [12] GUAN W, LIAO X, LI Z, et al. Frequency tuning behaviour of terahertz quantum cascade lasers revealed by a laser beating scheme [J]. *Optics express*, 2021, 29(14): 21269-21279.
- [13] WIENOLD M, SCHROTTKE L, GIEHLER M, et al. Low-threshold terahertz quantum-cascade lasers based on GaAs/Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub> as heterostructures [J]. *Applied physics letters*, 2010, 97(7): 71113.
- [14] LI H, YAN M, WAN W, et al. Graphene-coupled terahertz semiconductor lasers for enhanced passive frequency comb operation [J]. *Advanced science*, 2019, 6(20): 1900460.

(本文编辑:田艳玲)



**第一作者:**管玫(1996—),女,博士研究生,主要研究方向为太赫兹量子级联激光器。



**通讯作者:**黎华(1982—),男,研究员,博士生导师,主要从事太赫兹(THz)量子级联激光器(QCL)与光频梳研究工作。2009年毕业于中国科学院上海微系统与信息技术研究所,获工学博士学位。2009至2015年,先后在德国慕尼黑工业大学肖特基研究所(“洪堡学者”)、日本东京大学生产技术研究所(日本学术振兴会“JSPS”博士后研究员)、法国巴黎七大材料与量子现象实验室(博士后)开展合作研究。2014年12月加入中国科学院上海微系统与信息技术研究所工作至今。

入选国家优青、上海市优秀学术带头人、上海市青年拔尖人才开发计划、中国科学院高层次人才计划等。曾获得上海市自然科学奖二等奖(排名第三)、中国电子学会“优秀科技工作者”、国家人社部留学人员择优资助、中科院“从0到1”原始创新项目、中国科学院院长优秀奖、国家优秀青年科学基金获等。在《Advanced Science》《Laser & Photonics Reviews》《Nature Communications》等期刊发表了SCI论文70余篇,在国际会议做邀请报告30余次,获授权中国发明专利20件。