

文章编号: 1005-5630(2022)05-0020-08

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2022.005.003

# 太赫兹双梳光谱中重复频率差影响的研究

吴静睿, 郭旭光

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 太赫兹双梳光谱技术因其高频率分辨率和高灵敏度等优点, 近年来成为一种有力的光谱测量技术。为了提高光谱系统的探测性能, 本文分析了双梳光谱技术在时域和频域中的采样原理及方法, 基于两台飞秒激光器搭建了一套重复频率可调的太赫兹双梳光谱系统。通过改变一台光频梳的重复频率, 系统地研究了不同重复频率差对太赫兹双梳光谱系统性能的影响。结果表明有效范围内的重复频率差越小, 探测到光谱质量越高。当重复频率差为 10 Hz 时, 太赫兹双梳光谱系统的探测性能最佳。此研究为太赫兹双梳光谱技术选择最合适的重复频率差提供了方法。

**关键词:** 光学频率梳; 太赫兹波; 双梳光谱; 重复频率差

**中图分类号:** O 433.1 **文献标志码:** A

## Research on the effect of repetition frequency difference for terahertz dual-comb spectroscopy

WU Jingrui, GUO Xuguang

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Terahertz dual-comb spectroscopy has become a powerful spectral measurement technology recently due to its high frequency resolution and high sensitivity. According to the sampling principles and methods of dual-comb spectroscopy in time domain and frequency domain, a terahertz spectroscopic system with tunable repetition frequency based on two femtosecond lasers is established in order to improve the detection performance of the spectroscopic system in this paper. By changing the repetition frequency of an optical frequency comb, the effect of repetition frequency difference on the terahertz dual-comb spectrum is analyzed systemically. The results show that the smaller the repetition frequency difference in the effective range, the higher the detected spectral quality. The detection performance of the terahertz dual-comb spectroscopy system is optimal when the repetition frequency difference is 10 Hz. These results provide a method to select the most suitable repetition frequency difference for terahertz dual-comb spectroscopy.

收稿日期: 2022-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(61731020)

作者简介: 吴静睿(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为太赫兹精密波谱。E-mail: 594596756@qq.com

通信作者: 郭旭光(1972—), 男, 研究员, 研究方向为太赫兹技术。E-mail: xgguo\_sh@qq.com

**Keywords:** optical frequency comb; terahertz wave; dual-comb spectroscopy; repetition frequency difference

## 引 言

光学频率梳(optical frequency comb, OFC)因具有高精度和高光谱分辨率, 已经成为宽带光谱学的一种新兴技术。光学频率梳在时域是等间距的激光脉冲序列, 在频域中展示为等频率间距分布的梳齿线。这些梳齿具有间距相等、数量众多、光谱范围宽、梳齿宽度窄等特点, 这些特点为获得高光谱分辨率奠定了基础。一直以来, 由于光波段的频率远大于电子仪器工作带宽, 导致没有一种直接的方法可以准确地在电子电路中获取光波段的频率和相位信息, 而光学频率梳的发明<sup>[1]</sup>在射频电子设备和光频段之间提供了一种新型的连接方式<sup>[2]</sup>, 从而解决了这一难题。

飞秒激光频率梳近年来在高精度光谱测量中贡献了重要力量, 提供了许多新型光谱测量方法<sup>[3-4]</sup>。其中基于光频梳的相干性, 使用两个具有微小重复频率差的光频梳组成的双梳光谱技术进一步展示了光频梳在宽带光谱学的发展潜力。双梳光谱技术也因其高光谱采集速度、高频率分辨率和良好的稳定性等特点<sup>[5]</sup>得到了广泛的应用<sup>[6-13]</sup>。2002年, Schiller<sup>[14]</sup>首次提出了双梳光谱的概念。2004年, Keilmann等<sup>[15]</sup>首次设计了实验, 验证了其有效性和可行性。2005年, Janke等<sup>[16]</sup>首次在太赫兹时域光谱系统中引入了两个重复频率差异较小的同步飞秒激光器, 采用异步光学采样技术, 使用电控延迟线代替传统机械延迟线完成光谱的采样, 结果表明使用异步光学采样方法显著提高了太赫兹时域光谱仪的性能。自此以后, 异步光学采样技术被广泛地应用于太赫兹时域光谱系统的研究中<sup>[17-19]</sup>。2006年, Yasui等基于光学频率梳提出了太赫兹双梳光谱系统, 并基于异步光学采样技术证明了太赫兹双梳光谱系统与太赫兹时域光谱系统之间的等价性<sup>[20-21]</sup>。在过去的 20 年里, 太赫兹双梳光谱系统取得了长足的进步, 具有代表性的突破有: 扩展时间延迟窗口, 开发多个太赫兹脉冲的采集方法, 获得了梳状模式分辨光谱, 克服了重复频率限制的频率分辨率问题<sup>[22]</sup>; 为了不受泵浦和检测飞秒激光器的重复频率稳定和同步的限制, 在太赫兹双梳

光谱系统中采用了两个独立的自由运行飞秒激光器或一个具有两个输出端口的双向自由运行飞秒激光器<sup>[23-24]</sup>; 为了消除干涉图中有关激光定时抖动的失真, 引入了参考通道来检测激光定时抖动, 并开发了后/实时校正<sup>[25]</sup>和自适应采样<sup>[26-28]</sup>技术等。

在太赫兹双梳光谱系统中, 包含测量信息的泵浦光频梳(频率间隔 =  $f_r$ )被另一个频率有微小偏移的探测光频梳(频率间隔 =  $f_r + \Delta f$ )采样, 产生了射频梳齿(频率间隔 =  $\Delta f$ )。由于射频梳本质上是泵浦光梳通过压缩因子( $f_r/\Delta f$ )降低频率后的线性变换, 所以可以通过直接利用射频梳齿来分辨光谱。因此在泵浦光频梳重复频率确定的情况下, 选择合适的重复频率差  $\Delta f$  决定了太赫兹双梳光谱系统的光谱质量。基于两台重复频率稳定的飞秒激光器搭建了一套太赫兹双梳光谱采样系统, 通过微小改变两飞秒激光器的重复频率, 来控制重复频率差  $\Delta f$  的变化, 通过多频外差的方法直接使用频谱分析仪在不同的重复频率差下测量了系统的太赫兹频域信号, 获得太赫兹频域谱。通过对比不同的重复频率差  $\Delta f$  得到的频域结果图, 验证和分析了不同的重复频率差对太赫兹双梳光谱的影响, 选取了合适的重复频率差, 为后续太赫兹双梳光谱系统的重复频率差选定提供了方法。

## 1 实验原理及装置

### 1.1 光学频率梳原理

光学频率梳由光纤锁模激光器产生, 在时域上的表现为等间隔的光学脉冲序列, 在对飞秒光学频率梳的重复频率  $f$  和载波包络相位  $\varphi$  进行同步控制后, 通过傅里叶变换, 在频域上, 光学频率梳则表现为离散且等间隔的频率梳齿线。

理想飞秒锁模激光器谐振腔输出的脉冲电场强度  $\tilde{E}(t)$  在时域中表示为<sup>[29]</sup>:

$$\tilde{E}(t) = A(t) \exp \left[ i\omega_c t + i \left( \frac{\varphi_{\text{ceo}} t}{T_r} \right) \right] \otimes \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \delta(t - mT_r) \quad (1)$$

式中： $t$ 表示时间； $A(t)$ 表示脉冲高斯包络函数； $\omega_c$ 表示载波频率； $\varphi_{ceo}$ 表示载波包络偏移； $\delta(t-mT_r)$ 表示狄拉克函数； $m$ 为整数； $\otimes$ 表示卷积运算。在频域中可表示为等间隔的梳齿，即：

$$\tilde{E}(\omega) = \tilde{A}(\omega - \omega_c) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(\omega - 2\pi n f_r - 2\pi f_{ceo}) \quad (2)$$

式中： $n$ 为整数； $\omega$ 表示角频率； $f_r$ 表示激光脉冲的重复频率； $f_{ceo}$ 表示载波包络偏移频率； $\tilde{A}(\omega - \omega_c)$ 表示频域电场包络。设第 $n$ 个梳齿频率为 $f_n$ ，若想让狄拉克函数不等于0，则 $f_n$ 必须满足梳齿方程：

$$f_n = n f_r + f_{ceo} \quad (3)$$

式中： $f_{ceo}$ 表示载波包络偏移频率。式(3)也表示了通过光学频率梳可以连接光频段( $f_n$ )和射频波段( $f_r$ )。

### 1.2 太赫兹双梳光谱原理

太赫兹双梳光谱系统的测量原理与以光学频率梳作为光源的傅里叶变换光谱系统的测量原理十分相似<sup>[30]</sup>，区别在于傅里叶变换光谱系统是将一束光分成两束，这两束光经过反射后合束，再经过样品被探测器采集，通过移动反射镜实现光谱的采集。而在太赫兹双梳光谱系统中，使用两个独立的脉冲激光器作为光源，泵浦光频率梳(重复频率= $f_r$ )和探测光频率梳(重复频率= $f_r + \Delta f$ )之间存在一个微小的重复频率差 $\Delta f$ ，重复频率差导致泵浦脉冲光和探测脉冲光之间的相对时间延迟增加，最大延迟时间是泵浦光频率梳的重复频率的倒数( $1/f_r$ )，因此在不需要机械延迟线的情况下泵浦脉冲激光激发的太赫兹时域信号可以被探测脉冲激光所采集。理想上两频率梳的电场强度 $E(t)$ 分别表示为：

$$E_1(t) = \sum_n A_{1,n} \exp[-i2\pi\{f_{1,0} + n(f + \Delta f)\}t] \quad (4)$$

$$E_2(t) = \sum_n A_{2,n} \exp[-i2\pi\{f_{2,0} + n f\}t] \quad (5)$$

式中： $A_{i,n}$ 和 $f_{i,0}$ 分别表示脉冲包络的傅里叶分

量和每个梳齿的载波包络偏移量频率( $i = 1, 2$ )。这两个脉冲序列在一个光电探测器上被检测，探测到的信号强度可以表示为：

$$I(t) \propto |E_1(t) + E_2(t)|^2 \quad (6)$$

这个信号包含许多频率分量，但在这里，只考虑频率梳1和梳2最近的梳齿之间的组合。在本实验系统中，使用低通电子滤波器来完成滤波。由式(4)、(5)和(6)可知，探测后的时域信号可表示为：

$$S(t) \propto \sum_n A_{1,n} A_{2,n}^* \exp\{-i2\pi(\Delta f_0 + n\Delta f)t\} \quad (7)$$

式中： $\Delta f$ 表示两梳的重复频率差。时域经过傅里叶变换后的频域谱表示为：

$$B(\nu) \propto \sum_n A_{1,n} A_{2,n}^* \delta\{\nu - (\Delta f_0 + n\Delta f)\} \quad (8)$$

式(8)表明待测的高频频率梳被下转到一个低频率区域的过程，其下转的压缩因子为 $f_r/\Delta f$ 。该压缩因子可以通过重复频率差的变化进行改变。

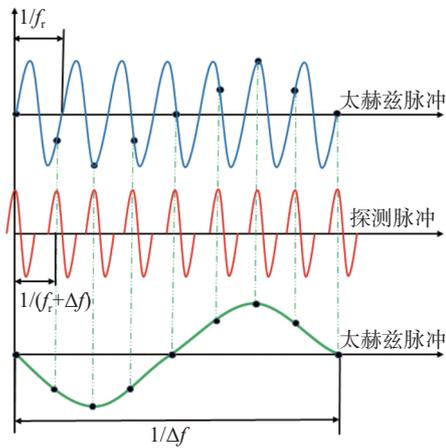
太赫兹双梳光谱的采样过程在时域上呈现为异步光学采样，产生相关干涉图，通过压缩因子( $f_r/\Delta f$ )的变换即可得到原太赫兹脉冲。异步光学采样技术即为使用两脉冲激光产生的电延迟线代替传统时域光谱中的机械延迟线实现采样。与使用机械延迟线的等效采样相比，异步光学采样技术具有采样速度快、误差小、可连续多信号连续采样和自由缩短或延长采样时间窗口等优点。在频域上两双梳光谱交差的区域产生外差干涉，在射频区域产生拍频信号，拍频后的梳齿间距为两光频梳的重复频率差 $\Delta f$ ，探测光频梳对泵浦光频梳进行多频外差采样，通过两光频梳之间拍频作用将难以探测的光频段下换到电子器件可探测的射频段，通过对采集到射频段的电信号乘以压缩因子( $f_r/\Delta f$ )的计算，即可完成对太赫兹频段信号的采样还原。本文中的太赫兹双梳光谱系统与传统的太赫兹时域光谱系统之间的优劣势如表1所示。

表 1 太赫兹双梳光谱系统与传统的太赫兹时域光谱系统的优劣对比

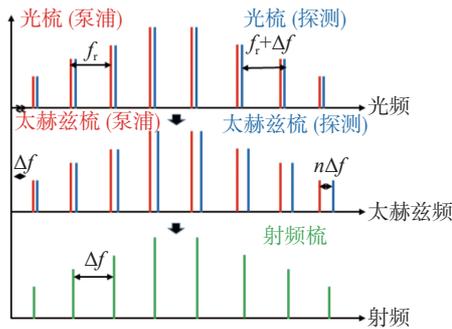
Tab. 1 Comparison of advantages and disadvantages of THz dual-comb spectroscopy system and traditional THz time-domain spectroscopy system

	光源	采样方式	采集时间	光谱分辨率	信噪比	需要傅里叶变换
太赫兹双梳波谱系统	两个	脉冲拍频多频外差采样	短(毫秒)	低(GHz)	高	否
太赫兹时域波谱系统	单个	机械延迟等效采样	长(秒)	高(MHz)	较低	是

太赫兹双梳光谱的采样原理如图1所示。图1(a)展示了异步光学采样的原理(太赫兹双梳光谱时域信号采集原理)<sup>[31]</sup>, 重复频率为 $f_r$ 的泵浦脉冲激光照射进发射光电导天线的电极间隙处激发出电子空穴对, 此时给天线外加偏压后外加电场使电子空穴对加速运动, 并辐射出重复频率为 $f_r$ 太赫兹脉冲(蓝)。重复频率为 $f_r + \Delta f$ 探测脉冲激光(红)照射进探测天线中, 激发出电子空穴对, 这些电子空穴对在太赫兹信号产生的电场作用下进行加速, 产生电信号被探测仪器接收, 对接收到的电信号进行处理后得到原始的太赫兹信号从而完成对太赫兹时域脉冲信号的采集。



(a) 太赫兹双梳光谱的时域异步光学采样原理



(b) 太赫兹双梳光谱的频域多频外差采样原理

图1 太赫兹双梳光谱的采样原理

Fig. 1 Principle of sampling for terahertz dual-comb spectroscopy

设在实验室时间 $t = 0$ 时, 发射光路的太赫兹脉冲和探测光路的飞秒脉冲同时到达探测器, 那么在 $t = 1/f_r$ 时, 太赫兹脉冲与探测脉冲之间存在时间间隔 $\tau$ 为:

$$\tau = \frac{1}{f_r} - \frac{1}{f_r + \Delta f} = \frac{\Delta f}{(\Delta f + f_r)f_r} \approx \frac{\Delta f}{f_r^2} \quad (9)$$

采集一个完整太赫兹脉冲所用时间为:

$$t = \frac{1}{f_r + \Delta f} \times \frac{f_r}{\Delta f} \approx \frac{1}{\Delta f} \quad (10)$$

所以当实验室时间 $t = 1/\Delta f$ 时, 一个完整太赫兹脉冲被采样完成, 且总采样时间 $\tau = 1/f_r$ 。实验室时间 $t$ 和采样时间 $\tau$ 之间的关系表达式为:

$$t = \tau \times \frac{f_r}{\Delta f} \quad (11)$$

当太赫兹脉冲被完全采样后, 即可对时域信号进行傅里叶变换从而获得相对应的信号频域谱。

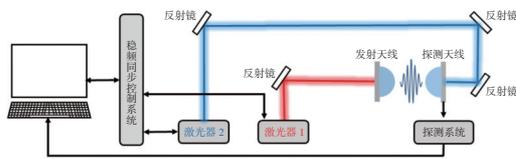
如图1(b)展示了多频外差采样的原理(太赫兹双梳光谱频域信号采集原理)。当重复频率为 $f_r$ 的泵浦光频梳(红)入射到太赫兹发射光电导天线时, 给天线外加偏压后辐射出太赫兹梳, 由于光电导天线发射器通过二次检测, 使光梳的电场平方, 将光强度转换为载流子, 并通过偶极子辐射发射电磁太赫兹波的频率梳, 因此它向下转换至太赫兹频段, 而不改变梳齿频率间距。泵浦太赫兹梳(红)是一个没有频率偏移的谐波频率梳, 其频率 $= f_r, 2f_r, 3f_r, \dots, nf_r$ 。重复频率为 $f_{r2} = f_r + \Delta f$ 的探测光频梳(蓝)照射进探测天线中, 探测光频梳的频率 $= f_{r2}, 2f_{r2}, 3f_{r2}, \dots, nf_{r2} = f_r + \Delta f, 2(f_r + \Delta f), 3(f_r + \Delta f), \dots, n(f_r + \Delta f)$ , 此时在光电导探测器中探测梳与泵浦梳发生多频外差光导混合, 产生一个重复频率为 $\Delta f$ 的射频梳, 使用频谱分析仪即可直接对射频梳进行采集。对采集到的射频梳进行压缩因子 $f_r/\Delta f$ 的转换即可回转得到太赫兹梳的信息, 完成对太赫兹脉冲的频域信号采集<sup>[32]</sup>。

异步光学采样和多频外差采样的方法都将高频的太赫兹信号下转到低频的射频信号后进行采集。时域测量完成后需要完成傅里叶变换后得到频域信息, 用频谱仪可以直接在频域中进行全带宽的测量和采集, 同时也可对某一特定频段的信号进行直接采集和分析, 这使太赫兹信号的采集和分析变得简易且方便。该采样方法在分辨梳齿线的精确测量和超快速测量方面都具有巨大的潜力。

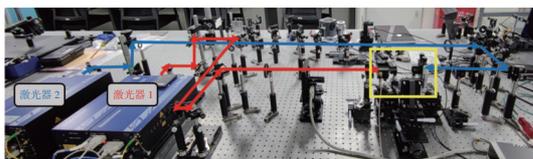
### 1.3 实验装置

为了验证测量重复频率差对太赫兹双梳光谱的影响, 设计了图2(a)的光路原理图, 并根据

光路原理图搭建了图 2(b)实验系统光路图。实验开始前,我们需要开启两台飞秒脉冲激光器(Menlo, C-Fiber 780)预热 90 min 后打开稳频同步系统(Menlo Systems, ASOPS, EM100),设置两台激光器的重复频率后开启同步控制系统。激光器 1 的重复频率为 100 MHz,激光器 2 的重复频率为  $100 \text{ MHz} - \Delta f$ ,两激光器的输出波长均为 780 nm,平均功率均大于 100 mW,脉冲宽度均小于 100 fs。为了防止激光的光功率过高对天线造成损伤,在光路系统中加入光学衰减片来控制光功率,使照射进天线的光功率符合天线输入功率标准,防止损伤天线电极。激光器 1 射出的泵浦脉冲激光(红)经过反射镜调整光路后,照射进发射光电导天线(Teravil, ETM-8)中,通过电源表(KEITHLEY, 2400)对发射天线外加 30 V 电压后辐射出太赫兹脉冲。另一激光器 2 射出的探测脉冲激光(蓝)经过反射镜后射进探测天线(Batop, PCA-44-06-10-800-h)中,将探测天线输出的电信号经过前置放大器(FEMTO, DHPCA-100 I/V)的放大(放大增益为  $10^6 \text{ V/A}$ )后接入探测仪器中,可以实现对太赫兹脉冲信号的探测。为了探测时域信号,将放大后的电信号接入示波器(KEYSIGHT, DSAZ504A, 采样率为  $1 \text{ G sample/s}$ )中,通过调整示波器的时间轴标度,来放大和缩小延迟时间范围,从而可以探测一个或者多个周期的太赫兹脉冲信号,经过傅里叶变换后,得到信号的频谱信息。



(a) 太赫兹双梳光谱系统的光路原理图



(b) 太赫兹双梳光谱系统的实验光路图

图 2 太赫兹双梳光谱系统的光路原理图及光路实验图  
Fig. 2 Schematic and experimental diagram of the optical path of the terahertz dual-comb spectroscopy system

由于太赫兹双梳光谱具有同时探测时域和频域信号的优点,也可以将探放大后的电信号接入

频谱信号分析仪(KEYSIGHT, N9040B)中来直接探测太赫兹频域信号。通过调整频谱信号分析仪的分辨率带宽、扫宽等参数即可直接获得射频波段的频谱数据,再将射频数据经过压缩因子  $f_r/\Delta f$  的变换后得到太赫兹段的频谱数据从而完成太赫兹信号的频域测量。

在太赫兹双梳光谱系统中,希望所有的数据采样值都是真实有效的,所以此系统需要一个合适的重复频率差值。假设需要测试的频谱宽度为  $\Delta F$ ,由奈奎斯特-香农采样定理可知,光学采样的自由光谱范围为 0 到  $f_r/2$ 。由于下转换光谱的带宽为  $\Delta f \times \Delta F / f_r$ ,由此关系式可知改变重复频率差会影响光谱跨度范围。而如果被下转换的太赫兹双梳光谱不在这个自由谱的范围内,采样过程就会产生混叠效应。为了避免出现这种混叠影响信号质量,重复频率差需要满足以下条件:

$$\Delta F \times \frac{\Delta f}{f} \leq \frac{f}{2} \quad (12)$$

$$\Delta f \leq \frac{f^2}{2\Delta F} \quad (13)$$

因此需要式(13)所示的范围内选择合适的重复频率差值。由压缩因子  $f_r/\Delta f$  可知,改变两光频梳的重复频率差  $\Delta f$  会直接影响低频到高频的变换系数从而影响到光谱的质量,同时由式(11)可知改变  $\Delta f$  也会影响太赫兹脉冲的采集的速度。由式(10)可知两光梳间的重复频率差越小,光采样时间间隔越小,得到的频谱就越精细,因此理论上减小两光频梳的重复频率差有利于测量精度的提升。

## 2 结果与分析讨论

以下所有测量均在环境温度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,相对湿度为 50% 条件下进行。首先开启两台飞秒激光器预热 90 min 后,开启重复频率稳定和同步控制系统,将激光器 1 的重复频率设为 100 MHz,激光器 2 的重复频率分别设置为  $100 \text{ MHz} \sim 50 \text{ Hz}$ 、 $100 \text{ MHz} \sim 40 \text{ Hz}$ 、 $100 \text{ MHz} \sim 25 \text{ Hz}$ 、 $100 \text{ MHz} \sim 10 \text{ Hz}$ 、 $100 \text{ MHz} \sim 5 \text{ Hz}$ 、 $100 \text{ MHz} \sim 2 \text{ Hz}$ 。每次改变激光器 2 的重复频率后,待稳定控制系统 90 min 后测量。频域信号的结果如图 3(a)~(f)所示。

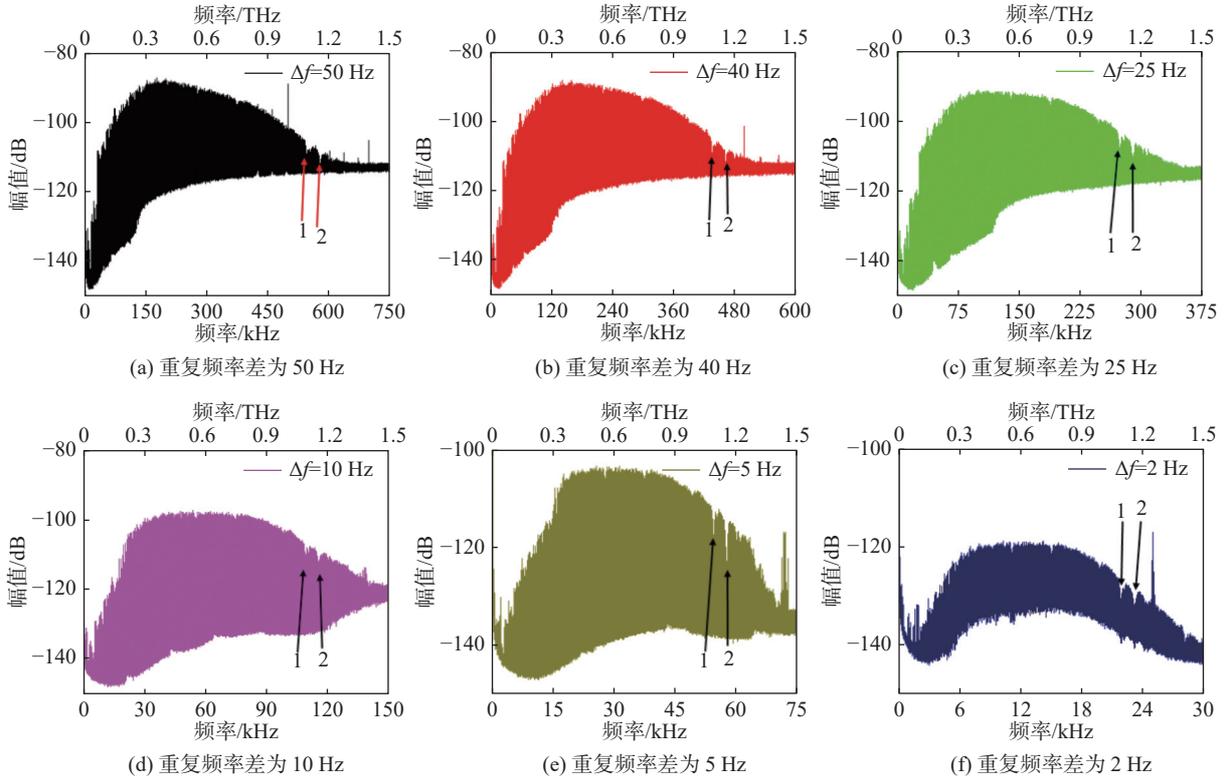


图 3 不同重复频率差下测得太赫兹频谱信号

Fig. 3 Measured terahertz spectrum signal with different repetition frequency difference

由于频谱仪直接测得的信号位于 kHz 的射频波段, 需要通过压缩因子  $f_r/\Delta f$  的变换上转到太赫兹波段, 得到原始的太赫兹频谱。如图 3 所示, 下横轴坐标为测试所得射频段, 上横轴坐标为上转至所在的太赫兹波段。由 6 次测量的上横坐标可知, 本次实验所测高频太赫兹信号波段为 0~1.5 THz, 而当  $\Delta f$  改变时, 所需测量的射频波段的范围也会随之发生改变。例如当  $\Delta f = 50$  Hz 时, 此时的压缩因子  $f_r/\Delta f = 100$  MHz/50 Hz =  $2 \times 10^6$ , 那么高频 0~1.5 THz 范围下转到射频段范围为 0~750 kHz, 所以当两光梳重复频率差为 50 Hz 时, 实验所需测量射频波段为 0~750 kHz。同理, 当  $\Delta f$  分别为 40 Hz、25 Hz、10 Hz、5 Hz 和 2 Hz 时, 频谱仪所需测得的射频范围分别为 0~600 kHz、0~375 kHz、0~150 kHz、0~75 kHz、0~30 kHz。由计算和测量结果可知测量同一波段的高频信号时, 两光梳间的重复频率差越小, 需要测得射频波段范围越小。

为了验证理论计算与实际测量的准确性, 在 6 次测量的每个结果中都选取了 1.097 THz 和 1.163 THz 位置的水汽吸收峰<sup>[33]</sup>, 分别标识为水

汽吸收峰 1 和水汽吸收峰 2, 将 6 个测试结果图叠加后如图 4 所示。由图 4 的吸收峰放大叠加图可以清晰地看出, 6 次测量的频谱结果图在 1.097 THz 和 1.163 THz 的水汽吸收峰位置严格对应, 没有偏移。证实了此次测量的频谱结果的正确性和一致性。由图 3 所示结果可知, 尽管都是对原太赫兹频谱信号的还原, 但是由于重复频率差  $\Delta f$  的不同, 压缩因子  $f_r/\Delta f$  的值会变化, 导致实际所测得射频段范围也不同, 进而对原信

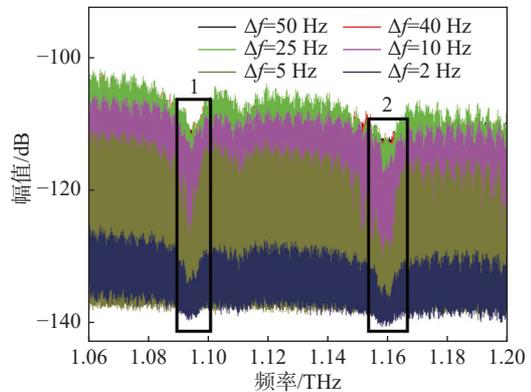


图 4 水汽吸收峰位置的放大图

Fig. 4 The zoomed of the position of the water absorption peak

号的还原效果也有显著差异。所以选择合适的重复频率差，也是影响太赫兹双梳光谱测量质量的重要因素。

当重复频率差  $\Delta f$  大于 25 Hz 时，结果显示在射频段 150 kHz 位置底噪有明显升高。这是由于信号在输入频谱分析仪前接入了直流低通滤波器，导致低频段的噪声通过，高频段部分被滤除。当重复频率差  $\Delta f$  变大时，压缩因子  $f_r/\Delta f$

的值变小，则需要测量的射频波段增长，高频段引入的偏移噪声增加，因此影响了高频信号的频谱质量，在结果图中显示为 1.3 THz 后信号梳齿显著降低。但是当重复频率差  $\Delta f$  过小时，梳齿会出现断层，采样仪器无法采集到完整的梳齿以及底噪，造成频谱信息的缺失。为了直观对比结果，选取了 0.4888~0.490 THz 高频位置重复频率差为 10 Hz 和 2 Hz 的梳齿对比如图 5 所示。

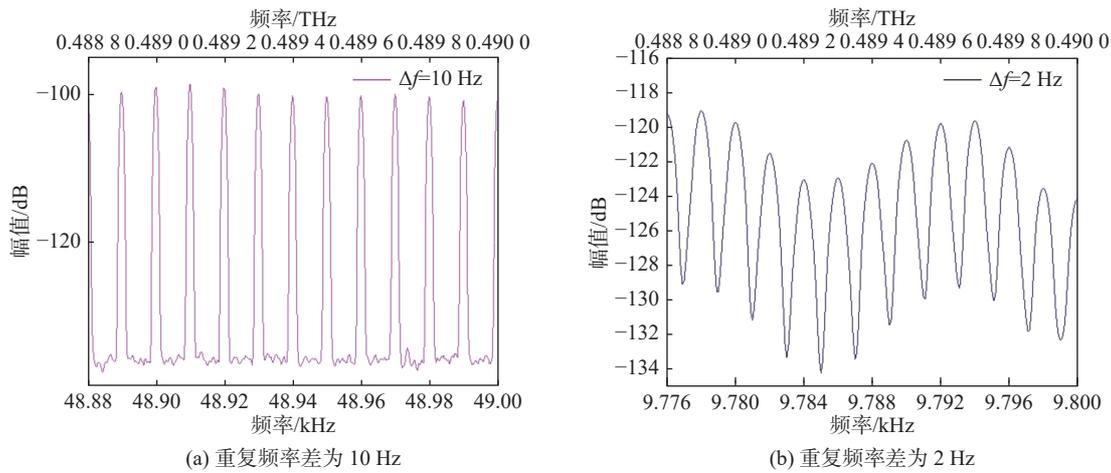


图 5 太赫兹频谱信号在 0.4894 THz 位置的梳齿放大图  
Fig. 5 The zoomed of the combs of the terahertz spectrum signal around 0.4894 THz

图 5(a)为重复频率差  $\Delta f = 10$  Hz 时太赫兹梳齿的放大图，由频谱结果图看出梳齿完整稳定，底噪位置清晰确定。图 5(b)为重复频率差  $\Delta f = 2$  Hz 时太赫兹梳齿的放大图，可以看出梳齿清晰但不稳定，出现上下浮动的现象，梳齿不完整且无法观测到信号底噪，严重影响了频谱的质量。因此相比于其他结果，重复频率差  $\Delta f = 5$  Hz 和 10 Hz 时，输出频谱质量最好。而相比于  $\Delta f = 5$  Hz,  $\Delta f = 10$  Hz 的梳齿信号的动态范围更大，约为 47 dB ( $\Delta f = 5$ Hz 时约为 40 dB)，所以选取  $\Delta f = 10$  Hz 为最佳重复频率差。因此可知并非重复频率差  $\Delta f$  越小越好，当重复频率差过小时，频谱信息失真，影响信号的质量。因此选取合适的重复频率差可获得最佳的频谱信号。

### 3 结 论

本文从光学频率梳和太赫兹双梳光谱的原理出发，基于可稳定重复频率的两台飞秒激光器和两个光电导天线搭建了一套完整的太赫兹双梳光

谱采样系统。通过稳定泵浦激光器的重复频率并轻微改变探测激光器的重复频率来控制两激光器的重复频率差。在不同的重复频率差下测量了系统的太赫兹频域信号，通过对比实验结果分析了改变重复频率差对太赫兹双梳光谱的影响。结果表明，重复频率差变小时，压缩因子随之变大，光谱系统测得频谱越精细，频谱质量越好。但当重复频率差  $\Delta f$  低于 10 Hz 时，光谱质量下降，频谱信息失真，影响测试结果。因此在环境温度为 25 ℃、相对湿度为 50 % 和测量太赫兹频谱范围在 0~1.5 THz 等测量条件的情况下选取  $\Delta f = 10$  Hz 作为最佳重复频率差条件。由此，通过原理分析和实验结合的方法，选取了最佳的重复频率差测试条件，为基于飞秒激光器的太赫兹双梳光谱提供了选取最佳重复频率差的方法。

### 参考文献：

[1] UDEM T, HOLZWARTH R, HÄNSCH T W. Optical frequency metrology[J]. *Nature*, 2002, 416(6877): 233 - 237.  
[2] 孙青, 杨奕, 孟飞, 等. 基于频率梳的太赫兹频率精密

- 测量方法研究[J]. *光学学报*, 2016(4): 133 – 138.
- [ 3 ] ADLER F, MASIOWSKI P, FOLTYNOWICZ A, et al. Mid-infrared Fourier transform spectroscopy with a broadband frequency comb[J]. *Optics express*, 2010, 18(21): 21861 – 21872.
- [ 4 ] GOHLE C, STEIN B, SCHLIESSER A, et al. Frequency comb vernier spectroscopy for broadband, high-resolution, high-sensitivity absorption and dispersion spectra[J]. *Physical review letters*, 2007, 99(26): 263902.
- [ 5 ] CODDINGTON I, NEWBURY N, SWANN W. Dual-comb spectroscopy[J]. *Optica*, 2016, 3(4): 414 – 426.
- [ 6 ] SCHLIESSER A, BREHM M, KEILMANN F, et al. Frequency-comb infrared spectrometer for rapid, remote chemical sensing[J]. *Optics express*, 2005, 13(22): 9029 – 9038.
- [ 7 ] BERNHARDT B, OZAWA A, JACQUET P, et al. Cavity-enhanced dual-comb spectroscopy[J]. *Nature photonics*, 2010, 4(1): 55 – 57.
- [ 8 ] IDEGUCHI T, POISSON A, GUELACHVILI G, et al. Adaptive dual-comb spectroscopy in the green region[J]. *Optics letters*, 2012, 37(23): 4847 – 4849.
- [ 9 ] CODDINGTON I, SWANN W C, NEWBURY N R. Time-domain spectroscopy of molecular free-induction decay in the infrared[J]. *Optics letters*, 2010, 35(9): 1395 – 1397.
- [10] YASUI T, NOSE M, IHARA A, et al. Fiber-based, hybrid terahertz spectrometer using dual fiber combs[J]. *Optics letters*, 2010, 35(10): 1689 – 1691.
- [11] 于子蛟, 韩海年, 魏志义. 双光梳光谱学研究进展[J]. *物理*, 2014, 43(07): 460 – 467.
- [12] PENG Y, SHI C, WU X, et al. Terahertz imaging and spectroscopy in cancer diagnostics: a technical review[J]. *BME Frontiers*, 2020: 2020.
- [13] PENG Y, SHI C, ZHU Y, et al. Terahertz spectroscopy in biomedical field: a review on signal-to-noise ratio improvement[J]. *Photonix*, 2020, 1(1): 1 – 18.
- [14] SCHILLER S. Spectrometry with frequency combs[J]. *Optics letters*, 2002, 27(9): 766 – 768.
- [15] KEILMANN F, GOHLE C, HOLZWARTH R. Time-domain mid-infrared frequency-comb spectrometer[J]. *Optics letters*, 2004, 29(13): 1542 – 1544.
- [16] JANKE C, FÖRST M, NAGEL M, et al. Asynchronous optical sampling for high-speed characterization of integrated resonant terahertz sensors[J]. *Optics letters*, 2005, 30(11): 1405 – 1407.
- [17] BARTELS A, CERNA R, KISTNER C, et al. Ultrafast time-domain spectroscopy based on high-speed asynchronous optical sampling[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2007, 78(3): 035107.
- [18] KLATT G, GEBS R, SCHÄFER H, et al. High-resolution terahertz spectrometer[J]. *IEEE journal of selected topics in quantum electronics*, 2010, 17(1): 159 – 168.
- [19] TAKAGI S, TAKAHASHI S, TAKEYA K, et al. Influence of delay stage positioning error on signal-to-noise ratio, dynamic range, and bandwidth of terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(3): 841 – 845.
- [20] YASUI T, KABETANI Y, SANEYOSHI E, et al. Terahertz frequency comb by multifrequency-heterodyning photoconductive detection for high-accuracy, high-resolution terahertz spectroscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(24): 241104.
- [21] YASUI T, SANEYOSHI E, ARAKI T. Asynchronous optical sampling terahertz time-domain spectroscopy for ultrahigh spectral resolution and rapid data acquisition[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(6): 061101.
- [22] HSIEH Y D, IYONAGA Y, SAKAGUCHI Y, et al. Terahertz comb spectroscopy traceable to microwave frequency standard[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2013, 3(3): 322 – 330.
- [23] HU G, MIZUGUCHI T, OE R, et al. Dual terahertz comb spectroscopy with a single free-running fibre laser[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1 – 9.
- [24] CHEN J, NITTA K, ZHAO X, et al. Adaptive-sampling near-Doppler-limited terahertz dual-comb spectroscopy with a free-running single-cavity fiber laser[J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(3): 036004.
- [25] ZHU Z, NI K, ZHOU Q, et al. Digital correction method for realizing a phase-stable dual-comb interferometer[J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16813 – 16823.
- [26] IDEGUCHI T, POISSON A, GUELACHVILI G, et al. Adaptive real-time dual-comb spectroscopy[J]. *Nature communications*, 2014, 5(1): 1 – 8.
- [27] ZHANG W, CHEN X, WU X, et al. Adaptive cavity-enhanced dual-comb spectroscopy[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(8): 883 – 889.
- [28] YASUI T, ICHIKAWA R, HSIEH Y D, et al. Adaptive sampling dual terahertz comb spectroscopy using dual free-running femtosecond lasers[J]. *Scientific reports*, 2015, 5(1): 1 – 10.
- [29] PICQUÉ N, HÄNSCH T W. Frequency comb spectroscopy[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(3): 146 – 157.
- [30] GIACCARI P, DESCHÊNES J D, SAUCIER P, et al. Active Fourier-transform spectroscopy combining the direct RF beating of two fiber-based mode-locked lasers with a novel referencing method[J]. *Optics express*, 2008, 16(6): 4347 – 4365.
- [31] GUO X G, JIANG X L, ZHU Y M, et al. Unified description on principles of fourier transform infrared spectroscopy and terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 101: 105 – 109.
- [32] FU H, JIANG X, WU J, et al. Terahertz dual-comb spectroscopy: A comparison between time- and frequency-domain operation modes[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2021, 115: 103699.
- [33] CUI H, ZHANG X B, SU J F, et al. Vibration-rotation absorption spectrum of water vapor molecular in frequency selector at 0.5 – 2.5 THz range[J]. *Optik*, 2015, 126(23): 3533 – 3537.