

文章编号: 2095-4980(2019)05-0755-05

高速太赫兹时域光谱系统中平衡探测器的设计

张宏飞^{a,b,c,d}, 苏波^{*a,b,c,d}, JONES David R^{a,b,c,d}, 何敬锁^{a,b,c,d}, 张存林^{a,b,c,d}

(首都师范大学 a.太赫兹光电子学教育部重点实验室; b.太赫兹波谱与成像北京市重点实验室;
c.北京成像理论与技术高精尖创新中心; d.物理系, 北京 100048)

摘要: 平衡探测器是直接探测太赫兹信号的器件, 位于高速太赫兹时域光谱(THz-TDS)系统末端光信号检测部分, 是将光学信号转变为模拟电信号的关键器件, 其性能决定了测量出的THz信号的精确度。利用2个低噪声光电二极管串联, 直接探测出2束激光的差值光电流, 降低了探测噪声; 选用增益带宽乘积为4 GHz的运算放大器对差值光电流进行两级放大, 得到高动态范围的THz信号, 提高了THz信号的探测速度, 并测量了 α -乳糖一水合物吸收峰, 得到了和文献中相同的吸收峰。

关键词: 太赫兹时域光谱; 异步采样; 平衡探测器; 放大器

中图分类号: TN247

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201905.0755

Design of balanced detector in high speed THz-TDS system

ZHANG Hongfei^{a,b,c,d}, SU Bo^{*a,b,c,d}, JONES David R^{a,b,c,d}, HE Jingsuo^{a,b,c,d}, ZHANG Cunlin^{a,b,c,d}

(a.Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education; b.Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging;
c.Beijing Advanced Innovation Center for Imaging Theory and Technology; d.Department of Physics,
Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: Balanced detector, which is located at the end of high-speed Terahertz Time-Domain Spectroscopy(THz-TDS) system, is a device to detect THz signals directly. The optical signal detection part is the key device for converting the optical signal into analog electrical signal. Its performance determines the accuracy of the measured THz signal. Using two low-noise photodiodes in series, the differential photocurrent of two lasers is directly detected, and the detection noise is reduced. The operational amplifier with a gain bandwidth product of 4 GHz is utilized to perform two-stage amplification of the differential photocurrent. The THz signal with high dynamic range is obtained and the detection speed of the THz signal is improved. The absorption peaks of α -lactose monohydrate are measured, and the same absorption peaks as those in literatures are obtained.

Keywords: Terahertz Time-Domain Spectroscopy; asynchronous sampling; balanced detector; amplifier

传统的太赫兹时域光谱(THz-TDS)系统的泵浦脉冲与探测脉冲由同一台飞秒激光器通过偏振分束镜分束的方式获得, 它们的相对时间延迟通过机械延迟线相对增加探测脉冲的光程实现^[1]。通过机械延迟线上万次的步进扫描, 获取一个 THz 脉冲, 因此测量速度受到很大的限制。为提高测量速度, 异步采样在 1987 年被提出^[2]。基于异步采样的高速 THz-TDS 系统使用 2 台重复频率略有差别的飞秒激光器, 通过 2 台激光器重复频率之差提供泵浦脉冲与探测脉冲的相对时间延迟, 其扫描速度可达 20 kHz, 具有扫谱时间快, 测量精确度高, 频谱分辨率高的优点。高速 THz-TDS 中平衡探测器的性能决定了测量出的 THz 信号的精确度。

1 高速太赫兹时域光谱系统

高速 THz-TDS 系统是一种超快的 THz-TDS 方法, 无需机械延迟线进行扫描操作, 可以获得高达 20 kHz 的

收稿日期: 2018-09-15; 修回日期: 2019-01-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61575131; 61675138; 61575130); 北京市教育委员会科技计划资助项目(SQKM201810028004)

*通信作者: 苏波 email:su-b@163.com

扫描速率。此系统采用 2 个重复频率略有不同的飞秒激光器，分别作为泵浦激光器和探测激光器，其重复频率分别为 $(f+\Delta f)$ 和 f ，频率之差为 Δf 。此时探测脉冲与泵浦脉冲的相对时间延迟从 0 至 $1/f$ 呈周期性变化。相对时间延迟完成一个周期的变化，系统即完成一个 THz 时域谱的测量，测量周期为： $T=1/\Delta f$ 。系统中探测脉冲与泵浦脉冲的相对时间延迟步长即光学时间分辨力为^[3]： $\Delta\tau = \frac{\Delta f}{(f+\Delta f)f}$ 。测量 THz 信号中的一个点所需要的时间为： $t_s=1/f$ ，

而真实的时间间隔为 $\Delta\tau$ ，测量出的 THz 信号在时域上被放大，其放大倍数为： $p = \frac{1/f}{\Delta\tau} = \frac{f+\Delta f}{\Delta f} = (f/\Delta f)+1$ 。测量出的 THz 信号时域值除以其放大倍数，得到真实的 THz 时域谱^[4]。

高速 THz-TDS 系统中探测脉冲与泵浦脉冲每重合一次即完成一次 THz 信号的测量，图 1 为高速 THz-TDS 系统示意图。该系统中使用的 2 个飞秒激光器来源于 Laser Quantum 公司。探测激光器的重复频率为 1 GHz，泵浦激光器的重复频率为 $(1 G+\Delta f)$ Hz，其中 Δf 可设置为 1~20 kHz。脉冲能量为 0.9 nJ，中心波长为 800 nm，脉冲宽度为 50 fs。探测激光和泵浦激光分别由分束镜(Beam Splitter, BS)分出一束激光照射在高速光电二极管(Photo-Diode, PD)上，将光脉冲信号转换为电脉冲信号，并输入重频控制器(Offset-Locking Electronics)中，由重频控制器输出高压控制泵浦激光器中的压电陶瓷(Piezoelectric, PZT)，从而控制泵浦激光器的重复频率，将重复频率之差锁定在设定的 Δf 上。触发信号探测器采用双光子吸收原理，即只有泵浦脉冲和探测脉冲同时照射在触发信号探测器的光电二极管上才会输出触发信号，其光电二极管的响应中心波长为 400 nm，响应带宽为 125 MHz。数据采集卡为 GAGE 公司的 PCI-e 数据采集卡^[5]。THz 脉冲由泵浦脉冲聚焦在 THz 天线上产生，并由 4 个离轴抛物面镜聚焦在碲化锌(ZnTe)晶体上，探测脉冲在第 4 个离轴抛物面镜处与 THz 脉冲合束^[6]，经过 1/4 波片由沃拉斯通棱镜分束照射在平衡探测器上。数据采集卡采集平衡探测器的输出信号进而得到 THz 信号^[7]。

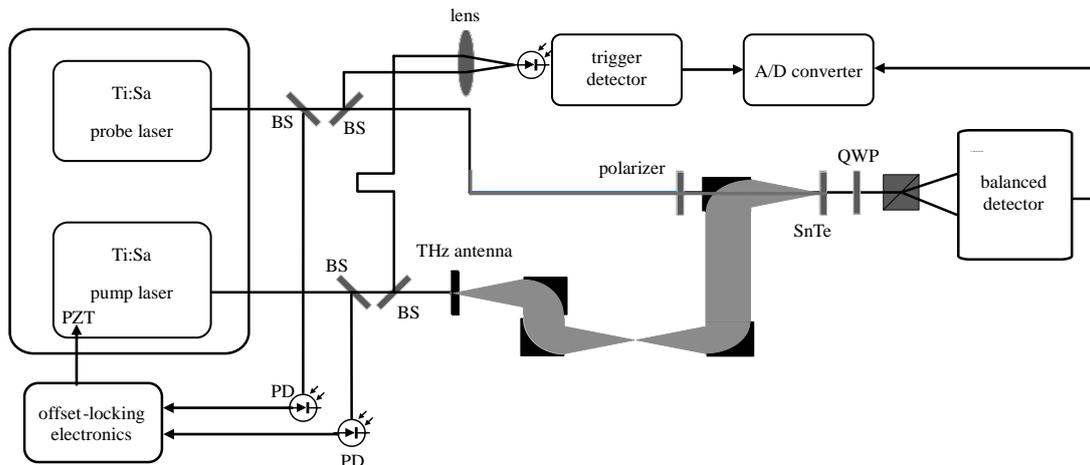


Fig.1 Schematic diagram of high-speed THz-TDS
图 1 高速太赫兹时域光谱系统示意图

其中平衡探测器是直接探测出 THz 信号的器件^[8]。从系统功能角度来看，平衡探测器位于系统末端光信号检测部分，是将光学信号转变为模拟电信号的关键器件，其性能决定了测量出的 THz 信号的精确度。高动态范围、高增益带宽的平衡探测器可以提高 THz 的测量速度与动态范围，进而提高整个时域光谱系统的性能^[9]。

2 平衡探测器原理

THz 探测光路如图 1 所示，初始状态下沃拉斯通棱镜的入射光为圆偏光，在 THz 电场作用下，沃拉斯通棱镜的 2 束出射光可表示为^[8]：

$$\begin{cases} I_1(\theta) = I_0 \cos^2\left(\frac{\pi}{4} - \theta\right) = \frac{I_0}{2}(1 + \sin 2\theta) \\ I_2(\theta) = I_0 \cos^2\left(\frac{\pi}{4} + \theta\right) = \frac{I_0}{2}(1 - \sin 2\theta) \end{cases}$$

式中： I_0 是进入沃拉斯通棱镜的总光强； I_1 和 I_2 分别为沃拉斯通棱镜的 2 束出射光光强； θ 为在 THz 电场作用下探测光的偏振面相对于初始状态时的旋转角。在测量 THz 的过程中， $\theta \neq 0$ ，因此将 2 束光进行差除以和的运算，

即有: $\Delta I = (I_1 - I_2) / (I_1 + I_2) = \sin\theta \approx \theta$ 。其中 θ 的大小与 THz 的瞬时电场成正比, 即 $\theta = kE_{\text{THz}}$ ^[10], 其中 k 为比例系数, E_{THz} 为 THz 信号的瞬时电场强度。所以 ΔI 可正比例表征 THz 信号强度。

平衡探测器原理如图 2 所示, 其中 PD1 和 PD2 是 2 个同型号的性能十分接近的光电二极管, 对沃拉斯通棱镜 2 束出射光的光强进行探测。采用光电二极管串联的方式将 2 个光电二极管的光电流做减法运算, 输出 2 个光电二极管电流信号的差值^[11]。这样最大程度上抑制了两束光的共模噪声, 提高了动态范围。跨阻放大器(TIA)和运算放大器(Amp)对输出的电流进行放大, 并抑制高频噪声^[12]。

3 平衡探测器的设计

平衡探测器二极管的性能至关重要, 选取光电二极管需满足 3 个条件: 一要保证低的输入噪声, 二是有效的响应带宽要达到 1 GHz, 三是可以接收完整的光斑信号^[13]。本文选取 THORLABS 公司的 FDS010 光电二极管作为光电探测器件, 此二极管为硅光二极管, 响应带宽为 1 GHz, 光电探测面积为 0.8 mm², 在 10 V 电压下暗电流只有 0.3 nA, 等效噪声抑制比低至 $5.0 \times 10^{-14} \text{ W} / \sqrt{\text{Hz}}$ 。为均衡响应噪声和响应速度, 采用 $\pm 10 \text{ V}$ 双电源为 2 个串联的光电二极管供电, 二极管为反向偏置。

平衡探测器中 2 个光电二极管输出的差值光电流较小, 在 nA 量级, 因此两级放大电路需满足低输入偏置电流、高增益、高灵敏度的条件。采用 ANALOG DEVICES 公司的 LTC6269-10 运算放大器, 它的输入偏置电流低至 $\pm 3 \text{ fA}$, 电流噪声只有 $7 \text{ fA} / \sqrt{\text{Hz}}$ 。2 个相同的增益带宽乘积为 4 GHz 的运算放大器封装在一个 LTC6269-10 里面, 第一个运算放大器用于组建跨阻放大器, 作为低噪声前端放大, 第二个放大器用于组建超低噪声高速放大器。

4 测试结果

采用搭建的高速 THz-TDS 系统对平衡探测器进行测试, Δf 设置为 2 kHz, 即 THz 信号的测量周期为 0.5 ms。图 3(a)为 Newport 公司的通用 80 MHz 平衡探测器单个周期实时 THz 信号测量结果, 图 3(b)为本文所研制的平衡探测器单个周期实时 THz 信号测量结果, 这 2 个信号的测量用时皆为 0.5 ms。此探测器可有效测量出 THz 信号, 并抑制噪声。图 4(a)中对 THz 信号进行了 1 024 次积分平均运算, 用时 0.523 s, 得到动态范围为 57 dB 的 THz 信号。图 4(b)为对 1 024 次积分平均得到的 THz 信号进行快速傅里叶变换得到的频域图^[14]。

得到 THz 信号后用已知指纹谱的 α -乳糖一水合物(其分子式为 $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11} \cdot \text{H}_2\text{O}$)进行验证。利用搭建的高速 THz-TDS 系统与所研制的平衡探测器对 α -乳糖一水合物的吸收峰进行测量, 并把测量结果与文献[15]中的测量结果进行对比, 如图 5 所示, 其中左上角为文献中测量的吸收峰。结果显示本系统可以准确测量出 α -乳糖一水合物的吸收峰, 并且吸收峰更为明显, 吸收峰的半高宽更小, 说明本系统的灵敏度和频谱分辨力更高。

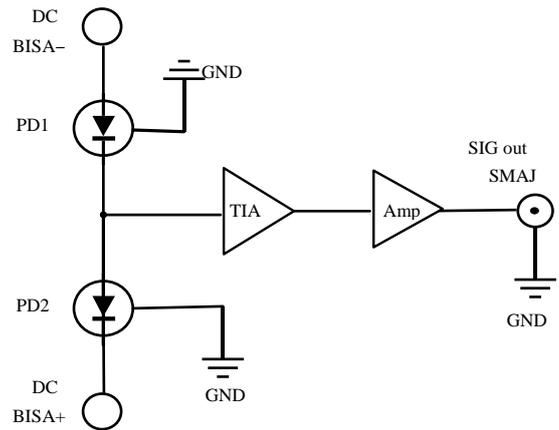
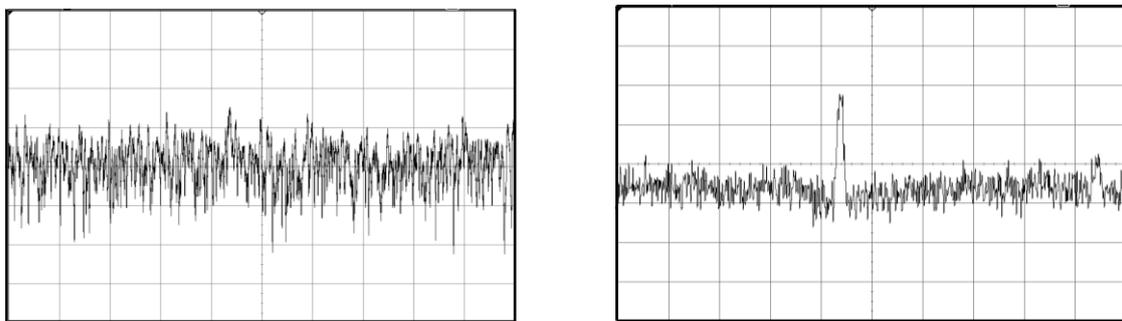


Fig.2 Schematic diagram of balanced detector
图 2 平衡探测器原理示意图



(a) real-time THz signal of Newport balanced detector

(b) real-time THz signal of proposed balanced detector

Fig.3 THz real-time measurement signal
图 3 THz 实时测量信号

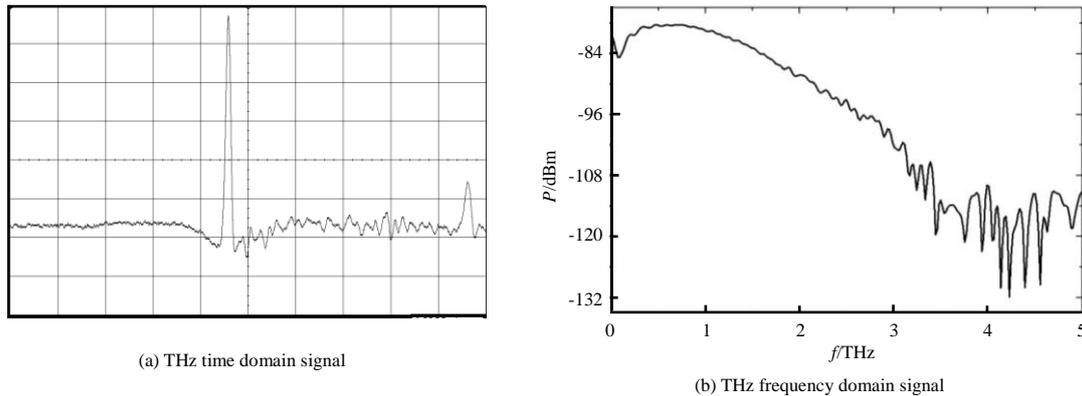


Fig.4 Average THz signal obtained by 1 024 integrals
图 4 1 024 次积分后得到的平均 THz 信号

5 结论

此平衡探测器可有效将 nA 量级的 THz 信号进行放大,并能很好地抑制噪声,使得光谱系统在一个周期内即可得到一个 THz 信号。相比于商业化的通用平衡探测器,其 THz 信号探测的增益和动态范围都得到提高。使用 Newport 公司的通用 80 MHz 平衡探测器需进行 32 768 次积分平均才能得到动态范围可观的 THz 信号,而此平衡探测器仅用 1 024 次积分平均即可得到动态范围为 57 dB 的 THz 信号,缩短了 THz 信号测量所需的时间。从 α -乳糖一水合物的吸收峰中可以得出,此系统具有更高的灵敏度和更高的频谱分辨力。此平衡探测器使高速 THz-TDS 系统真正具有扫谱时间短、测量精确度及动态范围都高的优点。

参考文献:

- [1] 张亮亮. THz 时域光谱系统及自由空间电光取样 THz 光谱测量[D]. 北京:首都师范大学, 2005. (ZHANG Liangliang. THz Time-Domain Spectral system and free space electro-optical sampling THz spectral measurement[D]. Beijing:Capital Normal University, 2005.)
- [2] GEBS R, KOATT G, JANKE C, et al. Sub-50 fs Time-Domain Spectroscopy using high-speed ASOPS[C]// CLEO/QELS: 2010 Laser Science to Photonic Applications. San Jose, CA, USA: IEEE, 2010: CMA1.
- [3] NAGHDEHFORUSHHA S A, MORADI G. An improved method to null-fill H-plane radiation pattern of graphene patch THz antenna utilizing branch feeding microstrip line[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2019(181):21-27.
- [4] BARTELS A, THOMAA, JANKE C, et al. High-resolution THz spectrometer with kHz scan rates[J]. Optics Express, 2006, 14(1):430-437.
- [5] 郝鑫, 汪朝晖, 赵磊, 等. 太赫兹通信中高速数字信号处理并行化算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(6): 881-884. (HAO Xin, WANG Zhaohui, ZHAO Lei, et al. High speed digital signal processing parallelization algorithm in terahertz communication[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017, 15(6):881-884.)
- [6] KLIEBISCH O, HEINECKE D C, DEKORSY T. Ultrafast time-domain spectroscopy system using 10 GHz asynchronous optical sampling with 100 kHz scan rate[J]. Optics Express, 2016, 24(26):29930-29940.
- [7] ELZINGA P A, KNEISLER R J, LYTLE F E, et al. Pump/probe method for fast analysis of visible spectral signatures utilizing asynchronous optical sampling[J]. Applied Optics, 1987, 26(19):4303-4309.
- [8] GUI Yonglei, SUN Likai, CUI Hongliang, et al. Balanced amplified photodetector with low phase noise and large area[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(2):284-292.
- [9] VAN E M, FATTINGER C, GRISCHKOWSKY D. High-brightness terahertz beams characterized with an ultrafast detector[J]. Applied Physics Letters, 1989, 55(4):337-339.

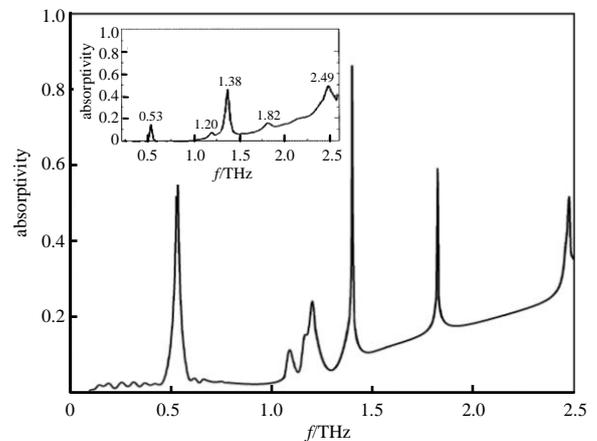


Fig.5 Absorption peaks of α -lactose monohydrate
图 5 α -乳糖一水合物的吸收峰

- [10] PLANKEN P C M, NIENHUYS H K, BAKKER H J, et al. Measurement and calculation of the orientation dependence of terahertz pulse detection in ZnTe[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2001, 18(3):313–317.
- [11] KHANI B, RYMANOV V, HONECKER J, et al. Coherent photonic 70 GHz band mixer module with WR-12 output[C]// 2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves. Copenhagen, Denmark: IEEE, 2016:1–2.
- [12] LEE Y S. 太赫兹科学理论与技术原理[M]. 李允植, 崔万照, 译. 北京: 国防工业出版社, 2012. (LEE Y S. Principles of terahertz theory science and technology[M]. Translated by LI Yunzhi, CUI Wanzhao. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.)
- [13] 代永红, 刘彦飞, 周浩天, 等. 空间相干光通信中平衡探测器灵敏度测试实验[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10):3110–3116. (DAI Yonghong, LIU Yanfei, ZHOU Haotian, et al. Sensitivity testing and experiment of balanced photodetectors in the space coherent optical communication[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(10):3110–3116.)
- [14] 黄俊滔, 饶志明, 谢芳森. GaP, GaAs 和 PPLN 晶体级联差频产生太赫兹辐射[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(4):576–583. (HUANG Juntao, RAO Zhiming, XIE Fangsen. Cascaded difference-frequency generation for THz in GaP, GaAs and PPLN crystals[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16(4):576–583.)
- [15] 黄瑞瑞, 赵国忠, 刘影, 等. 4 种乳糖的太赫兹光谱和红外光谱特性研究[J]. 光学学报, 2015, 35(A02):228–234. (HUANG Ruirui, ZHAO Guozhong, LIU Ying, et al. Study of terahertz and infrared spectra of four kinds of lactose[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(A02):228–234.)

作者简介:



张宏飞(1990–), 男, 山东省聊城市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹探测与成像. email: zhfei@cnu.edu.cn.

苏波(1975–), 男, 山西省运城市人, 博士, 副教授, 主要研究方向为太赫兹微流控及太赫兹片上系统.

JONES David R(1961–), 男, 特聘国外专家, 主要从事电子电路的研究与设计.

何敬锁(1971–), 男, 河北省辛集市人, 博士, 副教授, 主要研究方向为 THz 光通信.

张存林(1961–), 男, 北京市人, 博士, 教授, 主要研究方向为太赫兹及红外波谱与成像.