

太赫兹时域光谱系统中基于差分探测的 自平衡装置的研究

苏 波 周庆莉 范 宁 张存林

首都师范大学物理系太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048

摘要 在太赫兹时域光谱系统中, 利用两个光电二极管组成的差分电路对太赫兹波进行差分探测是最基本的探测方式。在探测前, 首先要调节 1/4 波片, 使得飞秒探测光通过沃拉斯顿棱镜后的两束偏振光的光强相等, 即两束光照射到差分光电二极管后输出的电流为零。目前, 调节两束光强相等的方法大多是借助于实验人员的经验, 通过手动调节 1/4 波片, 依靠肉眼观察光强的强弱, 调节精度很低。实验研究了一个能够调节光路, 使沃拉斯顿棱镜出射的 s 偏振光和 p 偏振光光强相等的自平衡装置。通过运算放大电路、电压转换电路和模拟/数字(A/D)转换电路对二极管输出的差分信号进行处理, 并在单片机的控制下, 利用步进电机带动 1/4 波片转动, 快速达到平衡状态。实验证明该平衡装置能够达到 0.9° 的平衡精度。

关键词 探测器; 太赫兹时域光谱; 自平衡装置; 差分探测; 1/4 波片; 沃拉斯顿棱镜

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.s230002

Study on Autobalance Device Based on Differential Detection in THz Time-Domain Spectroscopy System

Su Bo Zhou Qingli Fan Ning Zhang Cunlin

*Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics of Ministry of Education, Department of Physics,
Capital Normal University, Beijing 100048, China*

Abstract Using differential circuit constituted by two photodiodes to detect terahertz (THz) wave is the most basic detection method in THz time-domain spectroscopy system. Before detection of THz wave, the first task is to adjust the quarter-wave plate and make the polarized light beam of equal intensity when femtosecond detection light goes through the Wollaston prism, that is to say that the output differential current of the photodiodes is zero. At present, the most common method of adjusting the quarter-wave plate is manual regulation through the observation with the naked eyes by virtue of the experience of operators, so the regulation accuracy is very low. An autobalance device which can make the s polarized light and p polarized light generated by Wollaston prism have the same intensity is developed. The operational amplifier circuit, voltage conversion circuit and analogue / digital (A/D) conversion circuit are used to process the differential signaling of the two photodiodes, the single chip microcomputer is adopted to control rotation of the quarter-wave plate driven by a stepping motor, and the optical balance can be reached fast. The balance precision of 0.9° can be achieved by the developed autobalance device.

Key words detectors; terahertz time-domain spectroscopy; autobalance device; differential detection; 1/4 wave plate; Wollaston prism

OCIS codes 300.6495; 040.2235; 040.1880; 040.5160

1 引 言

太赫兹时域光谱技术的基本原理是利用飞秒激光对光电导材料或电光材料进行激发, 发射出的太赫兹脉冲被聚焦后, 照射到样品上, 太赫兹脉冲被样品调制, 携带了样品信息的太赫兹脉冲再次聚焦到探测器上,

收稿日期: 2015-03-19; 收到修改稿日期: 2015-04-24

基金项目: 北京市优秀人才培养资助项目(2013D005016000005)

作者简介: 苏波(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事太赫兹探测方面的研究。E-mail: su-b@163.com

通过控制探测光和抽运光的时间延迟来完成对整个太赫兹脉冲在时域上的相干测量,然后对绘制的太赫兹时域谱进行傅里叶变换,得到样品的频域信息^[1]。太赫兹时域光谱技术中最关键的环节是太赫兹波的探测,自由空间电光取样探测是典型的探测方法^[2]。探测时,首先要调节 1/4 波片,使得飞秒探测光通过沃拉斯顿棱镜后分成的两束偏振光的光强相等,即两束光照射到差分光电二极管后输出的电流为零。目前,调节两束光强相等的方法大多是借助于实验人员的经验,通过手动调节 1/4 波片,依靠肉眼观察光强或者通过光功率计探测光的强弱。若用肉眼观察光强,精度显然很低,若用光功率计来探测光强,存在两次测量 s 偏振光和 p 偏振光的位置不能完全一致的问题,所以两种方法对光强的调节精度都不是很高,从而对后续太赫兹波的探测影响较大。目前,国外已有针对太赫兹波探测的自平衡装置出售,但是存在价格昂贵、体积较大的问题,不利于实验的实施。本文研究了一种用单片机控制、步进电机驱动的基于差分探测的自平衡装置,具有体积小、价格低和控制精度高的特点。

2 自平衡原理

太赫兹波差分探测的工作原理如图 1 所示,当太赫兹波经过半透半反镜照射到电光晶体上时,电光晶体的折射率椭球将会被改变。当线偏振的探测脉冲在晶体内与太赫兹光共束共线传播时,相位会被调制。由于电光晶体的折射率会被太赫兹脉冲电场改变,所以探测光经过电光晶体时,其偏振态将会由线偏振转变为椭圆偏振,再经沃拉斯顿棱镜分为 s 偏振光和 p 偏振光,而这两束光的光强差正比于太赫兹电场^[3-5]。使用差分探测器可以将这两束光的光强差转换为电流差,从而探测到太赫兹电场随时间变化的时域光谱^[6-7]。利用机械电动延迟线可以改变太赫兹脉冲和探测脉冲的时间延迟,通过扫描这个时间延迟可得到太赫兹电场的时域波形^[8-10]。

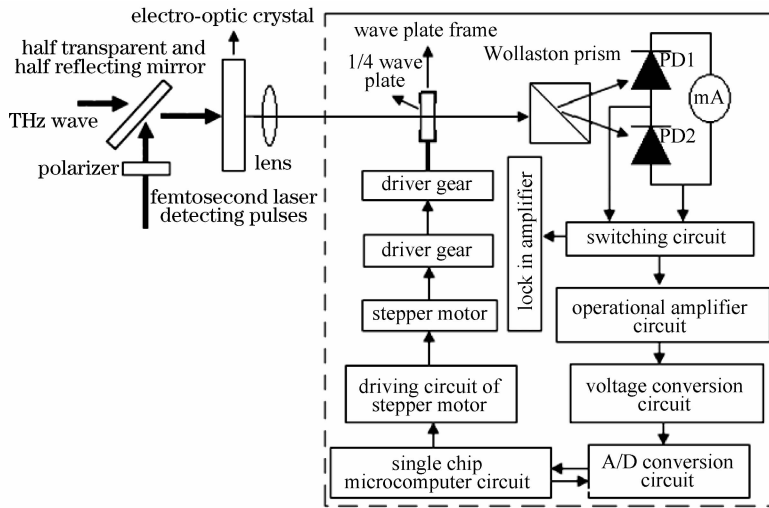


图 1 太赫兹波差分探测的工作原理

Fig. 1 Operation principle of THz wave differential detection

图 1 中虚框内的部分就是实验要研究的自平衡装置的工作原理。没有太赫兹波入射时,令飞秒激光探测脉冲单独经过电光晶体、凸透镜、1/4 波片和沃拉斯顿棱镜,通过调节 1/4 波片使得经过沃拉斯顿棱镜后 s 偏振光和 p 偏振光的光强相等^[11]。具体的调节过程是令 s 偏振光和 p 偏振光照射到由两个光电二极管组成的差分电路上,其输出的电流信号经过开关切换电路后由运算放大电路进行放大,再经过电压转换电路实现负电压向正电压的转换。单片机控制模拟/数字(A/D)转换器实时采集电压转换电路输出的电压信号,然后控制步进电机驱动电路使其带动步进电机转动,步进电机再通过传动齿轮带动固定在波片镜架上的 1/4 波片的正转和反转,当差分电路输出的电流值处于接近零的阈值范围时,步进电机停止转动,1/4 波片达到最佳位置。此时,单片机进入死循环,除非复位后再次启动。在自平衡装置对光路的平衡调整过程中,单片机会控制红色发光二极管(LED)和绿色 LED 的亮与灭来进行自平衡装置所处状态的识别。红色 LED 亮时,表明自平衡装置处在光路的平衡调整过程中;绿色 LED 亮时,表明光路已经调整平衡。光路调整平衡后,通过开关切换电路进行电路的切换,将光电二极管输出的差分电流送入锁相放大器,开始进行太赫兹波的差分探测。

3 自平衡装置的研究

3.1 硬件部分

硬件部分包括光路部分和电路部分。光路部分由安装在波片镜架上的 1/4 波片和沃拉斯顿棱镜组成。1/4波片的直径为 17.50 mm,波片镜架上有调节旋钮,能够带动 1/4 波片转动;沃拉斯顿棱镜的厚度为 14.00 mm,直径为 25.30 mm。电路部分的原理图如图 2 所示,由光电二极管差分电路 1、开关切换电路 2、运算放大电路 3、电压转换电路 4、A/D 转换电路 5、单片机电路 6、步进电机驱动电路 7 和步进电机 8 组成。波片镜架、沃拉斯顿棱镜和步进电机用有机玻璃制成的架子固定,而光电二极管差分电路、开关切换电路、运算放大电路、电压转换电路、A/D 转换电路、单片机电路和步进电机驱动电路都焊接在一个印刷电路板(PCB)上。

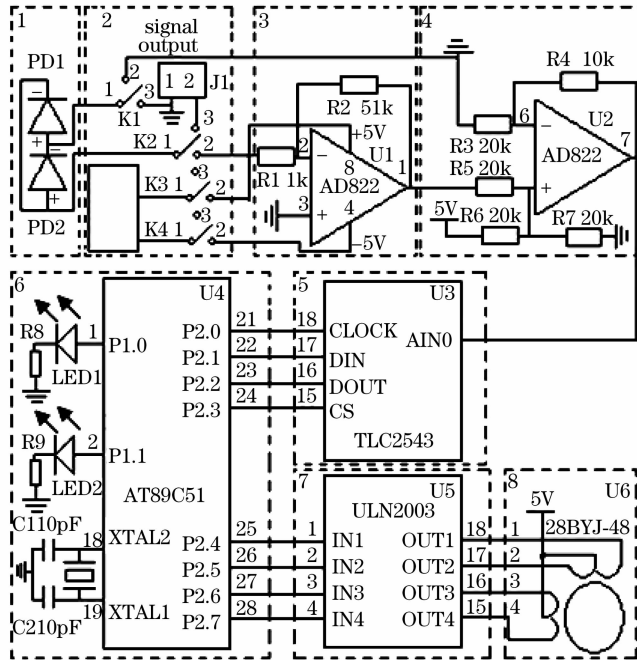


图 2 自平衡装置电路原理图

Fig. 2 Circuit principle diagram of autobalance device

3.1.1 光电二极管差分电路

光电二极管差分电路 1 上的两个光电二极管为 FDS100 型,除了正极和负极外,还将整个外壳作为地信号引出一个极,具有很高的抗干扰性和灵敏度。两个光电二极管的中心间距为 1.10 cm,距离沃拉斯顿棱镜 2.00 cm,其中心与 1/4 波片以及沃拉斯顿棱镜的中心都在同一个平面上,并且刚好能够接收到从沃拉斯顿棱镜射出的 s 偏振光和 p 偏振光。

3.1.2 开关切换电路

开关切换电路 2 由 4 个单刀双掷开关组成,分别是 k1, k2, k3 和 k4,它们的主要功能是在光路自平衡调节时和光路自平衡调节后进行电路的切换。k1 负责地信号的切换, k2 负责电流信号的切换, k3 和 k4 负责 +5 V 和 -5 V 电源的切换。当光路处在自平衡调节状态时,开关切换电路将光电二极管差分电路的输出端与运算放大电路相连,即 k1 和 k2 的 1 引脚分别与各自的 2 引脚相连接。此时,单刀双掷开关 k3 和 k4 的 1 引脚与各自的 2 引脚相连接,保证开关电源为电路供电;当光路处在平衡状态时,开关切换电路将光电二极管差分电路的输出端与信号输出接口相连,即 k1 和 k2 的 1 引脚分别与各自的 3 引脚相连接,光电二极管差分电路输出的电流信号直接通过信号输出端口送往锁相放大器。在这里,光电二极管输出的差分信号的地信号与电路上其他器件的地信号也断开,目的是防止对太赫兹波探测时自平衡装置中电路上地信号的串扰。开始太赫兹波探测时,单刀双掷开关 k3 和 k4 的 1 引脚与各自的 3 引脚(悬空)相连接,切断自平衡装置电路上的电源,实现了节能。

3.1.3 运算放大电路和电压转换电路

运算放大电路 3 和电压转换电路 4 的主要元件是 AD822AN,包含两个运算放大器,其中一个对光电二极管差分电路输出的信号进行放大,另一个将放大的电压信号进行转换,即将第一个运算放大器输出的一 5

$\sim +5\text{ V}$ 电压按比例转换为 $0\sim 5\text{ V}$ 电压,这是通过同向求和运算电路实现的^[12]。由于能够实现正负电压采集和转换的 A/D 转换器件的价格都比较高,而仅仅对正电压采集且具有相同转换位数的 A/D 转换器件的价格比较低,所以通过这样的电路设计能够降低自平衡装置的制作成本。

3.1.4 A/D 转换电路

A/D 转换电路主要器件是 TLC2543,这是一个采用开关电容逐次逼近技术完成 A/D 转换的 12 位串行模数转换器。它的主要功能是在单片机的控制下,对电压转换电路输出的电压进行实时 A/D 转换。

3.1.5 单片机电路和步进电机驱动电路

单片机电路以 STC12C5A60S2 为核心,控制 A/D 转换器实现数据的采集,同时对采集到的数据进行分析,然后对步进电机驱动电路发出相应的指令。另外,单片机还根据采集到的数据控制红色和绿色 LED 的亮与灭来指示当前的光路是否调节平衡。

步进电机驱动电路主要由达林顿管 ULN2003 组成,起到吸收电流、增加驱动能力的作用。在单片机的控制下,驱动步进电机的转动。

3.1.6 步进电机

步进电机采用的是 5 V 直流电压驱动的 28BYJ-48,其减速比为 $1/64$ 。步进电机的转轴和 $1/4$ 波片镜架上的调节旋钮上都安装有直径为 15.00 mm ,厚度为 4.00 mm ,齿数为 45 齿,模数为 0.5 的铜齿轮,它们相互咬合,带动波片镜架调节旋钮的转动,进而带动 $1/4$ 波片的转动,自动调节光路的平衡。

3.2 软件部分

单片机中的程序是利用单片机 C 语言进行编写的,在 Keil5 编译软件上对程序进行编译,并生成相应的二进制代码,然后通过程序下载器将二进制代码写入单片机中。单片机软件的流程图如图 3 所示。

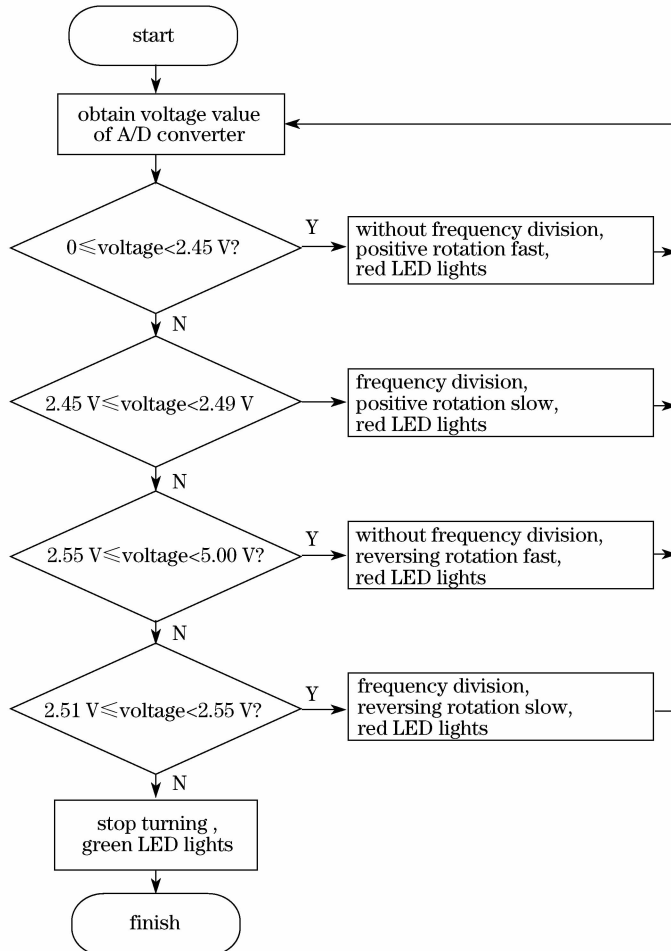


图 3 单片机软件流程图

Fig. 3 Flow chart of single chip microcomputer software

程序的主要思想是将 0~5 V 电压分为 0~2.45 V, 2.45~2.49 V, 2.49~2.51 V, 2.51~2.55 V 和 2.55~5 V 5 个电压段, 其中 2.49~2.51 V 是光路平衡的电压段, 步进电机不转动, 绿色 LED 亮; 2.45~2.49 V 和 2.51~2.55 V 是光路接近平衡的电压段, 采用软件分频延时方法使步进电机转速较慢, 红色 LED 亮; 0~2.45 V 和 2.55~5 V 是远离平衡的电压段, 不采用软件分频延时方法, 使步进电机快速转动, 向平衡点靠近, 红色 LED 亮。另外, 为了防止外界随机噪声的影响而产生的伪平衡问题, 单片机程序还采用了 30 次重复采集测量的方式进行判断, 如果 A/D 转换器 30 次采集的数据都在光路平衡的电压段, 则认为光路真正平衡。

在上述硬件和软件的结合下, 研制出的基于差分探测的自动平衡装置实物图如图 4 所示, 其尺寸为 128 mm×93 mm×33mm(不包括开关电源)。

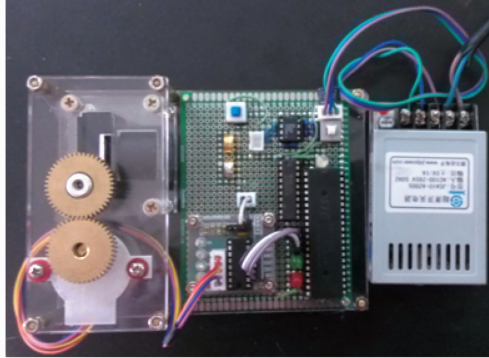


图 4 自动平衡装置实物图

Fig. 4 Photograph of autobalance device

4 实验部分

4.1 平衡精度实验

光电二极管差分电路输出的差分信号经过放大和电压转换, 如果处于 2.49~2.51 V 的范围时, 即认为调节平衡, 这就存在平衡精度的问题。为此, 设计了如下实验: 首先调整进入两个光电二极管的光强, 使得电压转换电路输出的电压为 2.49 V, 然后由单片机控制步进电机转动, 当电压转换电路输出的电压为 2.50 V 时, 步进电机停止转动, 记录 1/4 波片转过的角度。再控制步进电机逆向转动, 使电压转换电路输出的电压从 2.50~2.49 V 变化, 记录 1/4 波片逆向转过的角度, 如此往复 10 个循环, 发现 1/4 波片转过角度平均值为 0.8°。同理, 使电压转换电路输出电压在 2.50~2.51 V 之间变化, 重复 10 个循环, 1/4 波片转过的角度平均值为 0.9°。所以, 该装置的平衡精度为 0.9°。

4.2 太赫兹波探测实验

将研制的基于差分探测的自平衡装置放入大恒公司研发的太赫兹时域光谱系统 (THz-TDS) 中进行测试, 如图 5 所示。图中左下方放置的即为研制的自平衡装置, 用 ±5 V/1 A 输出的开关电源为其供电, 测试过程中, 锁相放大器采用的是电压模式。另外, 还测试了国外的自平衡装置的太赫兹时域谱图, 并与自主研发的自平衡装置探测的时域谱图进行了对比, 结果如图 6 所示。其中用黑色曲线表示的是国外自平衡装置探测的太赫兹时域谱图, 蓝色曲线是自主研发装置的结果。从两个太赫兹时域谱图测量结果的对比来看, 自主研发的自平衡装置的灵敏度要高于国外的自平衡装置。

5 结 论

针对利用太赫兹时域光谱系统对太赫兹波进行探测时, 需要手动调节 1/4 波片使得通过沃拉斯顿棱镜后的 s 偏振光和 p 偏振光光强相等所带来的费时、费力且调节精度较低的缺点, 采用开关切换电路、运算放大电路、电压转换电路、A/D 转换电路、单片机电路、步进电机驱动电路、步进电机和两个相同的传动齿轮, 并配合相应的控制软件, 研制了一个基于差分探测的自平衡装置。在太赫兹时域光谱系统上对该装置进行了性能测试, 实验结果证实了该装置运行的可靠性和实用性。该系统的尺寸为 128 mm×93 mm×33 mm,

能够达到 0.9° 的平衡精度,而且具有成本低、稳定性高和便于操作的特点。

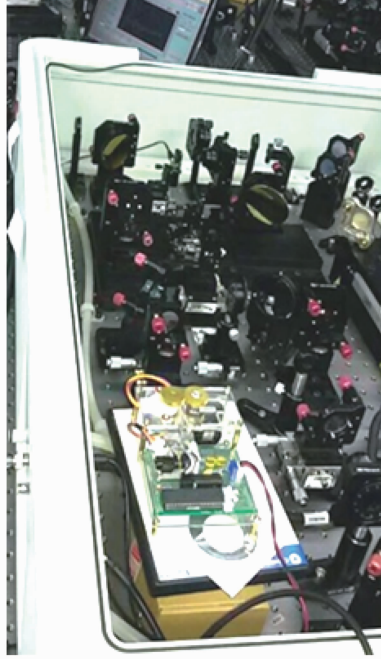


图 5 太赫兹波时域光谱系统

Fig. 5 THz-TDS system

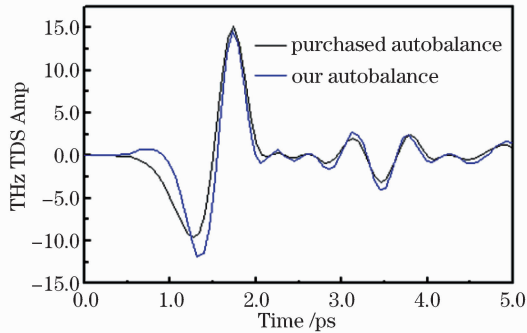


图 6 两种装置探测的太赫兹时域谱对比

Fig. 6 Comparison of THz time-domain spectra detected by two autobalance devices

参 考 文 献

- Xu Jingzhou, Zhang Xicheng. Terahertz Science and Technology and Its Applications [M]. Beijing: Peking University Press, 2007.
许景周,张希成.太赫兹科学技术和应用[M].北京:北京大学出版社,2007.
- Wang Shaohong, Xu Jingzhou, Wang Li, *et al.*. Applications and prospects of terahertz technology [J]. Physics, 2001, 30(10): 612-615.
王少宏,许景周,汪力,等. THz 技术的应用及展望[J]. 物理, 2001, 30(10): 612-615.
- Zhang Cunlin. Terahertz Sensing and Imaging [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
张存林.太赫兹感测与成像[M].北京:国防工业出版社,2008.
- Liu Wenquan, Lu Yuanfu, Feng Guangzhi, *et al.*. Research progress of rapid scan terahertz time domain spectroscopy system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(12):123001.
刘文权,鲁远甫,冯光智,等.快速扫描太赫兹时域光谱系统的研究进展[J].激光与光电子学进展,2011, 48(12):123001.
- He Jun, Zhang Bo, Zhao Xu, *et al.*. Polarization detection characteristics of ZnTe in terahertz time-domain spectroscopy system [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(s1): s111001.
何君,张波,赵旭,等.太赫兹时域光谱系统中 ZnTe 的偏振探测特性[J].中国激光,2013, 40(s1): s111001.
- Zhao Guozhong. Progress on terahertz science and technology [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 33(2): 1-6.
赵国忠.太赫兹科学技术研究的新进展[J].国外电子测量技术,2014, 33(2): 1-6.
- Y-S Lee. Principles of Terahertz Science and Technology [M]. Cui Wanzhao Trans. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
Y-S Lee.太赫兹科学与技术原理[M].崔万照译.北京:国防工业出版社,2012.
- Yang Yuping, Zhang Zhenwei. Terahertz Imaging [M]. Beijing: Minzu University of China Press, 2008.

- 杨玉平,张振伟. 太赫兹成像技术[M]. 北京: 中央民族大学出版社,2008.
- 9 Yang Kun, Zhao Guozhong, Liang Chengsen, *et al.*. Comparison between pulsed terahertz imaging and continuous-wave terahertz imaging [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(11): 2853–2858.
- 杨 昆,赵国忠,梁承森,等. 脉冲太赫兹波成像与连续波太赫兹成像特性的比较[J]. 中国激光,2009,36(11): 2853–2858.
- 10 Sun Zhenlong, Tu Xuecou, Jiang Yi, *et al.*. Fast imaging system based on self-made terahertz detector [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0811002.
- 孙振龙,涂学凑,姜 奕,等. 基于自制太赫兹检测器的快速成像系统[J]. 中国激光,2014,41(8): 0811002.
- 11 Ye Yutang, Xiao Jun, Rao Jianzhen, *et al.*. Optical Tutorial [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- 叶玉堂,肖 峻,饶建珍,等. 光学教程[M]. 北京:清华大学出版社,2011.
- 12 Hua Chengying, Tong Shibai. Analog Electronic Technology (4th Edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- 华成英,童诗白. 模拟电子技术基础(第四版)[M]. 北京:高等教育出版社,2007.

栏目编辑: 吴秀娟