

高灵敏度低噪声太赫兹电光探测器研究

陈龙超^{1,2}, 范文慧¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西西安 710119;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 本文选用相同光电响应灵敏度的高性能 PIN 光电二极管, 将探测激光信号转换为电流信号, 再通过低噪声电流-电压转换将电流信号转换为电压信号, 通过采用具有很强共模信号抑制能力的差分放大器, 不仅极大地抑制了太赫兹信号本身携带的噪声, 也避免了探测激光强度扰动引起的测量误差. 差分最后经过带通滤波器控制工作带宽和进行降噪处理, 经由主放大器实现太赫兹信号输出. 实验表明, 该探测器具有高灵敏度、高信噪比、宽工作带宽等显著特点, 完全满足了太赫兹时域光谱系统研究的需要.

关键词: 太赫兹波; 电光探测; 信噪比; 灵敏度; 太赫兹时域光谱

中图分类号: TN29; O433. 3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012) 09-1705-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.09.1001

Study on High Sensitivity and Low Noise Electro-Optic Terahertz Detector

CHEN Long-chao^{1,2}, FAN Wen-hui¹

(1. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: An electro-optic terahertz (THz) detector with a newly-designed circuit was investigated. A pair of high-quality PIN photodiodes and a low-noise current-voltage conversion circuit were applied to convert the modulated probe laser to voltage signal. These two voltage signals were subsequently sent to a specially-designed differential amplifier with high common-mode-rejection-rate (CMRR) that largely restrain the noise of terahertz signal and avoid the disturbance of probe laser intensity. Then a band-pass filter was employed to control bandwidth and restrain noise of the detected signal. Finally, the weak THz signal was detected via a main amplifier. Experimental results show that the THz detector has high signal-to-noise-ratio (SNR), teeny distortion and wide bandwidth, which fully satisfy the requirement of terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS).

Key words: terahertz (THz); electro-optic detection; signal-to-noise-ratio (SNR); sensitivity; terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS)

1 引言

1995年, Q Wu等人^[1]首次提出了太赫兹波的电光探测技术, 相比于其它光学超快测量技术, 电光探测技术具有小于1 ps的时间分辨率、太赫兹量级的带宽以及极小的电磁干扰^[2], 因此该技术成为目前重要的太赫兹信号探测方法. 迄今为止, 人们已经利用 ZnTe^[3]、GaP^[4]等非线性电光晶体实现了太赫兹波的探测. 图1是探测太赫兹脉冲的基本原理图, 线偏振的探测激光与太赫兹束共线入射到电光晶体上, 太赫兹脉冲电场作用于电光晶体产生普克尔效应, 从而调制探测激光束的偏

振态. 被调制的椭圆偏振激光束经过一个1/4波片和沃拉斯顿棱镜进行分光, 分别入射到太赫兹电光探测器. 当没有太赫兹脉冲时, 通过电光晶体的探测激光保持线偏振, 经过1/4波片成为圆偏振的激光束, 再经过沃拉斯顿棱镜后就得到两束强度完全相等的激光束(出射激光1和出射激光2), 此时电光探测器得到的信号输出为零. 而当太赫兹脉冲与探测激光同时入射到电光晶体时, 太赫兹脉冲调制电光晶体折射率, 使线偏振的探测激光变为椭圆偏振, 因此从沃拉斯顿棱镜出射的两束光光强不再相等, 光强差 ΔI 与太赫兹电场强度 E_{THz} 的关系为^[5]:

收稿日期: 2011-12-06; 修回日期: 2012-02-24

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(No. 2011AA030100A); 中国科学院百人计划基金项目(No. J08-029); 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(No. YYYJ-1123-4); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(No. 2007CB310405)

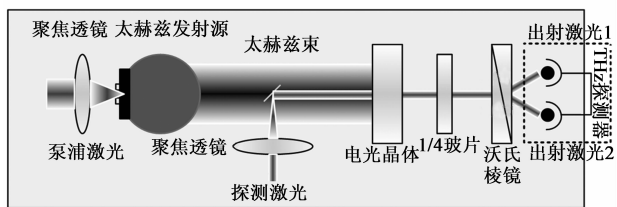


图1 太赫兹脉冲电光探测装置原理图

$$\Delta I(\alpha, \varphi) = I_p \frac{\omega n^3 E_{THz} \gamma_{41} L}{2c} (\cos\alpha \sin 2\varphi + 2\sin\alpha \cos 2\varphi) \tag{1}$$

其中 I_p 为探测激光强度, ω 为太赫兹波频率, n 为电光晶体折射率, γ_{41} 为电光晶体的线性电光系数, L 为电光晶体厚度, c 为光速, α 是太赫兹束偏振方向与电光晶体光轴的夹角, φ 是探测激光束偏振方向与电光晶体光轴的夹角. 由式(1)可以看出, 两束出射激光光强之差正比于太赫兹辐射电场强度. 因此, 要探测太赫兹脉

冲电场波形, 必须运用一个可以探测两束激光光强差的线性电光探测器. 由于目前宽带脉冲太赫兹源的辐射功率较小^[6], 因此, 该探测器不但需要实现两束激光的光电信号转换, 还必须实现信号差分 and 线性放大, 这样才能将微弱的太赫兹信号转换为可测量的电信号. 对于当前主要进行光谱和成像研究的太赫兹时域光谱系统^[7]而言, 探测器测量的太赫兹信号质量直接影响着研究结果的准确性, 因此, 非常有必要研究高灵敏度和高信噪比的太赫兹电光探测器.

2 太赫兹电光探测器

太赫兹电光探测器的基本功能就是实时测量两束从沃拉斯顿棱镜出射的激光光强差, 并将其转换为可供锁相放大器或数据采集卡进一步处理的电压信号^[8]. 根据前面对太赫兹电光探测原理的分析, 综合考虑太赫兹电光探测器性能要求, 本文采用四级结构实现完整的太赫兹电光探测功能, 如图2所示.

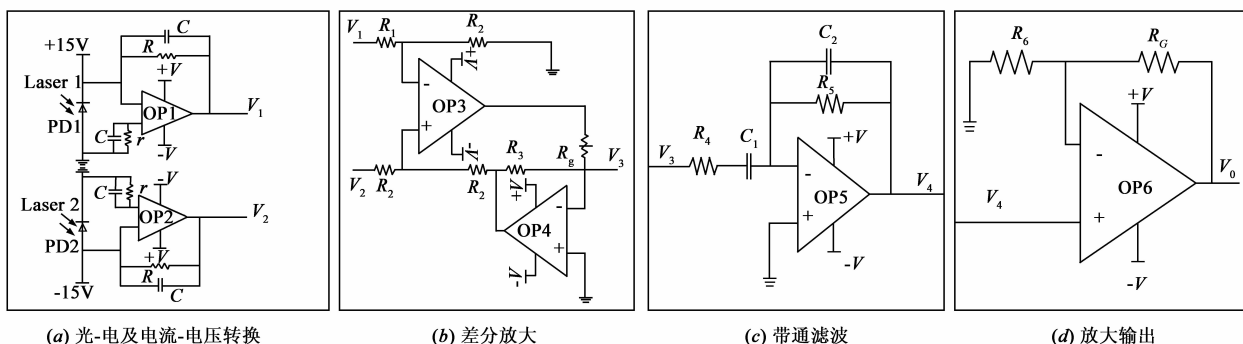


图2 探测器四级电路结构

2.1 光-电及电流-电压转换

为了保证不失真地测量太赫兹信号, 首先需要将沃拉斯顿棱镜出射的两束激光高保真地、线性地转换为电信号. 为了使差分放大模块的输出真实反映两束激光的光强差, 采用两个电光响应灵敏度完全相同的 PIN 光电二极管分别对两束出射激光(Laser1 和 Laser2) 进行光-电转换, 如图2(a)所示. 为此, 首先通过对同批次的 10 支 PIN 光电二极管进行实验测试, 筛选出两个光电响应灵敏度完全一致的光电二极管. 测试过程如下: 采用 800 nm 激光垂直照射光电二极管光敏面并改变入射激光功率, 利用灵敏电流计记录光电二极管的输出光电流, 对每个光电二极管做出光电流-光功率曲线, 如图3所示. 可以看出, 光电二极管的输出光电流 I 与激光强度 P 之间满足关系: $I = SP$, 其中 S 为 PIN 光电二极管的灵敏度, 在 800 nm 激光照射下, 所选用 PIN 光电二极管的响应灵敏度约为 $S = 0.45 \text{ A/W}$. 为了减小误差, 尽管实验结果显示同批次 10 支 PIN 光电二极管具有基本重合的光电流-光功率曲线, 我们还是从中

选出两个光电流-光功率曲线最相近的 PIN 光电二极管作为太赫兹电光探测器的光电转换器件. 同时, 实测光电流-光功率曲线的高度线性化特征表明选用的 PIN 光电二极管具有很好的线性度, 完全可以满足线性光电转换的要求. 另外, 选用的 PIN 光电二极管具有 pF 量级的结电容, 可以保证 PIN 光电二极管的 -3 dB 截止频率达到 GHz 量级, 完全满足了 100 kHz 以下频率调制激光信号的探测需求.

经过 PIN 光电二极管将激光光强转换为电流信号后, 还必须将电流信号转为电压信号, 才能进行后续信号调控. 如图2(a)所示采用精密、高速、低噪声和低输出偏置电流的运算放大器(OP1 和 OP2) 进行电流-电压转换并根据入射激光光强和需要的输出电压确定精密转换电阻 R

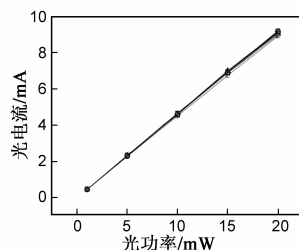


图3 PIN光电二极管的光电流-光功率测试曲线

的阻值.为了消除运算放大器输入偏置电流经过电阻 R 引起的输出电压误差,在运算放大器 (+) 端接入一个阻值与 R 相当的电阻 r .考虑到电阻 r 的接入将引入热噪声,因此需要在电阻 r 上并联一个电容 c ,满足 $1/2\pi rc < 1$ Hz,以此减小噪声带宽.为了防止电路自激,同时也为了减小 PIN 光电二极管引入的噪声,给电阻 R 也并联一个电容 C ,但是电容 C 值过小将会影响输出信号带宽,因此其容值必须满足: $1/2\pi RC > 100$ kHz. 这样,经过电流-电压转换的输出信号电压为 $V = -IR = -SPR$.

根据多级电路信噪比原理,前级电路信噪比直接决定了最终输出信号的信噪比,因此前级电路信噪比对整个系统的信噪比具有决定作用.对于处于最前级的电流-电压转换模块,考虑热噪声 (U_T) 和散粒噪声 (U_S),假设电路的通频带为 Δf ,工作温度为 T ,玻尔兹曼常数为 K ,电子电荷为 q ,则经过电流-电压转换后的电压信号的信噪比为^[9]:

$$\text{SNR} = \frac{V}{\sqrt{U_T^2 + U_S^2}} = \frac{SPR}{\sqrt{4KTR\Delta f + 2qI\Delta fR^2}} \quad (2)$$

由此可见,在探测器前级光电转换电路设计过程中,必须合理地选取器件以保证电流-电压转换后仍具有足够大的信噪比.

2.2 差分放大

由式(1)可知,要得到被探测太赫兹波的强度,必须对与两束光强信号相对应的电压信号进行差分运算.由于光电导天线产生的脉冲太赫兹功率较小^[10] ($< \text{mW}$),导致两个光电转换模块输出电压的差值较小 ($< \text{mV}$),因此在进行电压信号差分的同时还需要对其差值进行适当放大.本文主要采用增益连续可调谐的双运算(OP3 和 OP4)差分放大器,这种放大器不仅可以实现电桥平衡,而且可以通过可变电阻 R_g 实现对差值信号增益的连续可调,具体的差分放大电路如图 2(b)所示.

不难看出,差分放大输出信号 V_3 与两个输入信号 V_1 、 V_2 之间的关系为: $V_3 = R_1 R_g (V_2 - V_1) / R_1 R_3$. 假设电阻 R_2 的容差为 ϵ ,则差分放大器的共模信号抑制比 (CMRR) 为: $20\log_{10} | (1 + R_2/R_1) / \epsilon |$.

可见,在相同情况下,差分增益 R_2/R_1 值越大,CMRR 越大,因此在满足信号电压大小要求的情况下,需要尽量使差分增益 R_2/R_1 变大.更大的 CMRR 意味着该模块不仅可以实现差分,而且可以消除两个输入信号携带的共模噪声,同时也可以消除因探测激光强度扰动引起的测量误差.差分放大过程是整个太赫兹光电探测器最关键的部分,它的输出直接决定了可探测到的太赫兹波形,而差分过程中两路信号极小的失配就有可能导致输出的巨大变化,甚至失真.因此,必须采

用大的 CMRR 值,假设 $R_2/R_1 = 10$, $\epsilon = 0.1\%$,则可以保证 CMRR = 80 dB,基本满足了太赫兹光电探测器的要求.

2.3 带通滤波

实际应用中,太赫兹光电探测器输出的电压信号还必须送入锁相放大器进行处理.考虑到锁相放大器最高工作频率和运算放大器增益带宽积的限制,设计的太赫兹光电探测器 -3 dB 上限工作频率为 80 kHz.此外,为了减少数据采样时间, -3 dB 下限工作频率设计为 30 kHz.也就是说,太赫兹光电探测器的理论有效工作频带 Δf 应满足 $30 \text{ kHz} < \Delta f < 80 \text{ kHz}$.为此,必须对差分输出的电压信号进行适当的滤波,同时也可以减小环境噪声、工频噪声和射频噪声等对测量结果的影响.本文主要采用宽带二阶有源(OP5)带通滤波器,滤波功能模块如图 2(c)所示,该滤波器的传递函数 $H(j\omega)$ 为:

$$H(j\omega) = H_0 \frac{j\omega R_4 C_1}{(1 + j\omega R_4 C_1)(1 + j\omega R_5 C_2)} \quad (3)$$

其中频增益 $H_0 = -R_5/R_4$ (这里保证 H_0 为 1,即滤波器没有放大作用), -3dB 下限频率为 $\omega_L = 1/R_4 C_1$, -3 dB 上限频率为 $\omega_H = 1/R_5 C_2$.通过选取合适的电阻和电容,就可以满足太赫兹光电探测器对设计工作频带的要求.由于本文采用宽带带通滤波器,因此其 Q 值小于 1,该滤波器不具备强烈的频率选择功能,而是在设计的频带内使各个频率成分全部通过,这就保证了探测器可以在一个相对较大的调制频率范围内正常工作,增大了调制频率的工作自由度.

2.4 放大输出

在实际应用中,由于太赫兹信号较小,差分放大环节无法一次性将信号放大到所需幅度 ($\sim 100 \text{ mV}$),而如果差分放大环节设计的放大倍数过大,极易引起电路不稳定,因此必须采用多级放大.本文采用一个可调增益的主放大(OP6)输出模块,其本质是一个正向电压放大器,通过电阻 R_C 和 R_6 调节放大倍数,如图 2(d)所示.最终输出的太赫兹电压信号大小为:

$$V_0 = (1 + \frac{R_C}{R_6}) V_4 = \frac{R_2 R_g}{R_1 R_3} SR (P_{\text{Laser}2} - P_{\text{Laser}1}) (1 + \frac{R_C}{R_6}) = S_D \Delta P \quad (4)$$

式(4)反映了该探测器的基本原理和探测器对太赫兹信号的线性放大作用.输出信号 V_0 与光强差之间的系数为 $S_D = SR(1 + R_C/R_6) R_2 R_g / R_1 R_3$,称作探测器灵敏度.可见,探测器灵敏度同时受 PIN 二极管光谱响应灵敏度 and 电路参数的影响,在保证电路稳定的情况下应使探测器灵敏度最大.取 $R = 1 \text{ k}\Omega$, $R_C/R_6 = 2$, $R_2 R_g / R_1 R_3 = 20$, $S = 0.45 \text{ mA/mW}$,由上式可得到灵敏度 $S_D = 2.7 \times 10^4 \text{ V/W}$.假定入射到 ZnTe 晶体上的太赫兹功率为 $1 \mu\text{W}$ ^[11],探测激光功率为 2 mW, ZnTe 晶体的其它参

数依照已发表的数据^[12],根据式(1)计算得到光功率差 $\Delta P = 6.48 \mu\text{W}$,因此电路输出电压信号 $V_0 = S_D \Delta P = 175 \text{ mV}$.这一电压信号足以满足测量要求,同时也没有超出锁相放大器的最大输入电压(1V),从而实现了低探测光功率下极小功率太赫兹波的有效测量.

3 探测器探测太赫兹脉冲实验结果

为了测试太赫兹光电探测器的实际工作情况,用该探测器进行实际太赫兹脉冲波形探测实验.每次测量之前,改变光电导天线上的偏压频率,在每个频率下测到一个完整的太赫兹时域波形,测量结果如图4(a)所示.

测量结果表明,该探测器实现了预期设计的功能,成功地探测到太赫兹脉冲时域波形.而且,在不同调制

频率下测量得到的太赫兹时域波形基本相同,这说明改变调制频率基本不影响光电导天线辐射太赫兹脉冲.然而,不同调制频率下的太赫兹振幅却有很大不同,图5(a)是峰峰值-调制频率的关系.可以看出,随着频率增加,太赫兹时域波形峰峰值先增大后减小,在40 kHz附近太赫兹波形的峰峰值达到最大值40000,该现象反映了探测器带通滤波模块的特性.由于在太赫兹时域光谱研究中,主要关注的不是太赫兹信号的绝对振幅,而是其信噪比.高信噪比的太赫兹信号可以更加准确地反映被测物质的特征谱线.如图4(c)所示,以调制频率110 kHz下所测太赫兹时域波形为例说明信噪比的定义,太赫兹时域波形零基线附近信号无规则扰动称为噪声(Noise),太赫兹波形峰峰值称为信号(Signal),信噪比定义为: $\text{SNR} = \text{Signal}/\text{Noise}$.

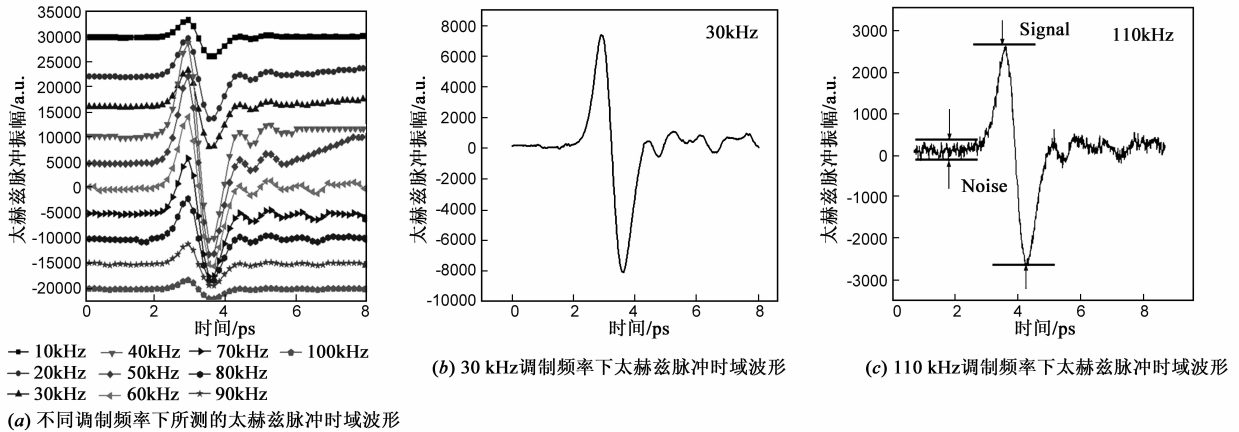


图4

根据信噪比定义和实验数据,可以计算得到太赫兹脉冲信噪比-调制频率曲线如图5(b)所示.其信噪比先增大后减小,并在30 kHz附近达到最大值350,这就是实际应用中该探测器的最佳工作频率,其对应的太赫兹时域波形如图4(b)所示.

与峰峰值-频率曲线相比,信噪比曲线的峰值频率更低,虽然40 kHz是太赫兹脉冲最大振幅对应的频率,但是随着调制频率的升高,探测电路的高频噪声迅速增加,导致高频信噪比快速下降,因此探测器的最大信噪比频点向低频移动.考虑到实际应用中,只要信噪比大于50就基本可以满足太赫兹光谱研究的需要.由图5(b)不难看出,该探测器可以在10 kHz~90 kHz范围内正常工作.事实上,这里测得的太赫兹信号是经过锁相放大器去噪后的信号,而太赫兹信号本身也夹杂着噪声,因此这里的信噪比并不能真实反映太赫兹光电探测器自身的绝对信噪比.考虑到改变调制频率时,太赫兹产生和探测系统其它部分的情况并没有改变,所以这里太赫兹信噪比随调制频率的改变也可以间接地反映太赫兹探测器的信噪比特性.

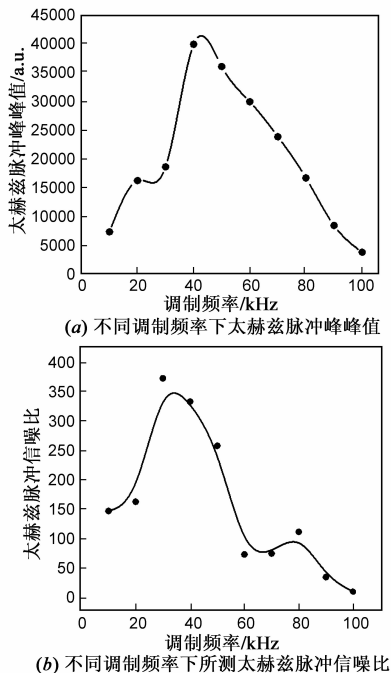


图5

4 结论

通过理论分析太赫兹自由空间电光探测原理,设计了一款新型的四级结构的高灵敏度、低噪声的太赫兹电光探测器.通过测试光电二极管光电流-光功率曲线,选取了具有相同光电响应灵敏度的 PIN 光电二极管,对两束从沃拉斯顿棱镜出射的激光进行线性的无失真光电转换.通过将二极管输出的两路电流信号进行一系列信号调控,包括低噪声电流-电压转换,高 CM-RR 的差分放大以及宽带平坦带通滤波,实现了高达 $2.7 \times 10^4 \text{V/W}$ 的探测器灵敏度和 350 的最大信噪比,完全可以有效的探测到低探测光功率 ($> 0.5 \text{mW}$) 下极小功率 ($\sim \mu\text{W}$) 太赫兹脉冲时域波形.理论分析和实验结果表明,本文研制的太赫兹电光探测器不仅可将微弱的太赫兹信号转变为可测量的电信号,而且具有极高的灵敏度和信噪比,足以满足在太赫兹在光谱成像实验中的需要.

参考文献

- [1] Q Wu, et al. Free-space electro-optic sampling of terahertz beams[J]. Appl Phys Lett, 1995, 67(24): 3523 - 3525.
- [2] D Dragomana, et al. Terahertz fields and applications [J]. Progress in Quantum Electronics, 2004, 28(2004): 1 - 66.
- [3] Q Wu, et al. Free-space electro-optics sampling of mid-infrared pulses[J]. Appl Phys Lett, 1997, 71(10): 1285 - 1286.
- [4] Q Wu, et al. 7 terahertz broadband GaP electro-optic sensor [J]. Appl Phys Lett, 1997, 70(14): 1784 - 1786.
- [5] P C M Planken. 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.
- [6] 姚建铨, 路洋, 等. THz 辐射的研究和应用新进展[J]. 光电子激光, 2005, 16(4): 503 - 510.
YAO Jian-quan, LU Yang, et al. New research progress of THz radiation[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2005, 16(4): 503 - 510. (in Chinese)
- [7] 张振伟, 崔伟丽, 等. 太赫兹成像技术的实验研究[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(3): 218 - 220.

ZHANG Zheng-Wei, CUI Wei-Li, et al. Terahertz time domain spectroscopy imaging [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2006, 25(3): 218 - 220. (in Chinese)

- [8] 谢维信, 裴继红. THz 信号处理与分析的研究现状和发展展望[J]. 电子学报, 2007, 35(10): 1974 - 1979.
XIE Wei-xin, PEI Ji-hong. Review of terahertz signal processing and analysis [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(10): 1974 - 1979. (in Chinese)
- [9] Sergio Franco. Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits[M]. New York: McGraw-Hill, 2001. 277 - 297.
- [10] 许景周, 张希成. 太赫兹科学技术与应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007. 66 - 67.
- [11] P C M Planken, et al. Opto-electronic pulsed THz systems [J]. Semiconductor Science and Technology, 2005, 20(2005): S121 - S127.
- [12] 石顺祥, 刘继芳, 等. 光的电磁理论[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006. 281 - 285.

作者简介



陈龙超 男, 1986 年 9 月生于陕西扶风. 现为中国科学院西安光学精密机械研究所硕士研究生, 主要从事新型太赫兹源和太赫兹探测技术研究.

E-mail: s09002@opt. cn



范文慧 男, 1969 年 5 月生于陕西西安. 中国科学院“百人计划”. 现为中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室研究员、博士生导师. 主要从事太赫兹科学技术方面理论和实验的研究工作.

E-mail: fanwh@opt. ac. cn