

可产生任意偏振方向太赫兹波的光电导太赫兹辐射源

施卫^{*†}, 金枝[†], 张磊, 侯磊, 杨磊

西安理工大学陕西省超快光电与太赫兹科学重点实验室, 陕西 西安 710048

摘要 基于太赫兹时域光谱 (THz-TDS) 系统, 使用两个相互垂直的光电导天线构建了 1×2 GaAs 光电导太赫兹源阵列。通过调控各个阵元的偏置电压, 对其辐射太赫兹波的偏振方向进行研究。结果表明: 在已实现光电导发射天线阵列的高效合成以及可同时检测脉冲太赫兹波的振幅、相位及偏振态的探测天线的基础上, 通过调控各个阵元的偏置电压分别改变了平行和垂直两个阵元辐射太赫兹波的强度; 经过 1×2 GaAs 光电导太赫兹源阵列在远场的同步合成, 可产生不同偏振方向的脉冲太赫兹波, 实现了以全电控的方式产生任意偏振方向太赫兹波的光电导太赫兹辐射源。

关键词 太赫兹时域光谱系统; 太赫兹辐射源; 光电导天线阵列; 偏振方向

中图分类号 O59

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231534

A Photoconductive Terahertz Radiation Source Generating Terahertz Waves with Arbitrary Polarization Direction

Shi Wei^{*†}, Jin Zhi[†], Zhang Lei, Hou Lei, Yang Lei

Shaanxi Provincial Key Laboratory of Ultrafast Optoelectronics and Terahertz Science, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China

Abstract Based on terahertz time domain spectral (THz-TDS) system, we use two mutually perpendicular photoconductive antennas construct a 1×2 GaAs photoconductive terahertz source array. Its radiation terahertz wave polarization direction is studied by adjusting the bias voltage of each array element. The results indicate that, on the basis of the efficient synthesis of photoconductive emission antenna arrays and the detection antenna that can simultaneously detect the amplitude, phase and polarization state of pulsed terahertz waves, the intensity of terahertz waves radiated by two parallel and vertical elements are changed by adjusting the bias voltage of each array element. After 1×2 GaAs photoconductive terahertz source array synchronously synthesized in the far field, pulse terahertz waves with different polarization directions are generated, realizing a photoconductive terahertz radiation source that can generate terahertz waves with arbitrary polarization direction in a fully electrically controlled manner.

Key words terahertz time domain spectral system; terahertz radiation source; photoconductive antenna array; polarization direction

1 引言

太赫兹 (THz) 波的频率范围通常被定义为 0.1~10 THz, 是介于微波与红外光波之间的一段尚未被完全开发利用的电磁波。在 THz 光谱表征技术中, THz 时域光谱 (THz-TDS) 已在材料分析、生物医疗、安全检测、环境监控等多个领域得到广泛应用^[1-3]。THz-TDS 系统具有超宽带和高动态范围, 且可以同时获得检测样品的振幅和相位谱信息^[4-5]。

然而, 目前 THz-TDS 系统所使用的辐射天线只能辐射单一方向的线偏振 THz 波^[6]。当需要改变发射天线辐射的脉冲 THz 波的偏振方向时, 只能用可旋转的线栅偏振器。线栅偏振器难以实现连续调节且调节精度有限, 会导致整个光谱系统的光路复杂, 系统信噪比 (SNR) 降低^[7]。

在 THz-TDS 系统中, 偏振可调的 THz 源在手性物质和其他偏振敏感物质的表征和检测中具有重要作用。要通过 THz 光谱来反映这些物质的构型、构象以

收稿日期: 2023-06-14; 修回日期: 2023-06-29; 录用日期: 2023-08-08; 网络首发日期: 2023-08-18

基金项目: 重点研发计划 (2017YFA0701005)、国家自然科学基金面上项目 (51807161, 62075179)

通信作者: *swshi@mail.xaut.edu.cn

[†]共同第一作者

及光学信息,就必须用不同偏振态的 THz 波与这些物质相互作用,并测出 THz 波的振幅、相位和偏振态,方可完整地了解物质的内在结构^[8-9]。

国内外学者都尝试研制过偏振可调的 THz 发射天线:2006 年,Hirota 等^[10]用四电极光电导天线和一块全反射硅棱镜产生了圆偏振 THz 波;2016 年,Bulgarevich 等^[11]又设计了 8 个电极的光电导天线,它能够产生旋转步长为 45° 的不连续的线偏振 THz 波;2020 年,Hawecker 等^[12]使用水平和竖直插指型光电导天线阵列(PCA),通过改变水平和竖直 PCA 上的偏置电压,实现了对 THz 波偏振方向的连续调节,然而,由于没有消除 PCA 各个阵元之间的反向电流,其合成度并未达到预期效果。

前期的研究工作已经实现了光电导发射天线阵列的高效合成^[13],也实现了光电导探测天线阵列的高效合成以及可以同时检测脉冲 THz 波的振幅、相位及偏振态的探测天线阵列^[14-15]。本文在上述工作的基础上,设计并研制了可以产生任意偏振方向的脉冲 THz 波的发射天线阵列,并测试了其特性。最终实现了以全电控的方式产生偏振方向可调 THz 波的光电导 THz 辐射源。

2 实验系统及所用光电导天线介绍

如图 1 所示,THz-TDS 系统所用激光器为波长 800 nm、脉宽 70 fs、重复频率 80 MHz 的钛蓝宝石激光器(MaiTai XF-1, Spectra-physics, 美国)。飞秒激光经过偏振分束棱镜(BS)被分为泵浦光和探测光。探测光经反射镜 M6、透镜 L2 聚焦后穿过氧化铟锡玻璃(ITO)膜,垂直入射到探测晶体(ZnTe)上;光强较强的泵浦光通过时间延迟系统(delay line)辐射到 PCA

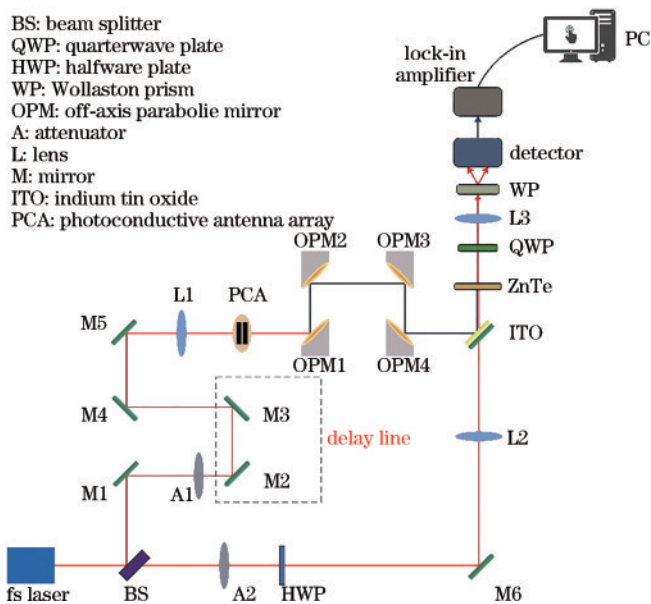


图 1 THz-TDS 系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of THz-TDS system

上产生 THz 波。THz 波经过 4 个镀金离轴抛物面镜(OPM1、OPM2、OPM3、OPM4)准直后,由 ITO 反射,垂直入射在探测晶体上,并与探测光聚焦位置相同;再经过四分之一波片(QWP)和透镜 L3 被沃拉斯顿棱镜(Wallaston prism)分成偏振方向相互垂直的两束光。两束光通过一个光电探头(detector)连接到锁相放大器(lock-in amplifier),最后通过计算机(PC)进行数据采集。

光电导天线的基底材料是利用分子束外延系统在(100)方向半绝缘砷化镓(SI-GaAs)上生长的低温砷化镓(LT-GaAs)。通过电子束蒸发工艺将 Ni/Au-Ge/Au 沉淀在 LT-GaAs 上,并通过快速热退火(RTA)将其金属化。通过精确控制 RTA 的时间和温度,AuGeNi 合金电极与 LT-GaAs 衬底可以形成欧姆接触^[16]。

可以产生任意偏振方向 THz 波的 1×2 GaAs PCA 由两个电极方向相互垂直的天线构成。图 2(a)是电极方向垂直的天线,记为 PCAV;图 2(b)是电极方向平行的天线,记为 PCAL;图 2(c)是 1×2 GaAs PCA 的实物图;图 2(d)是 1×2 GaAs PCA 的示意图。天线阵列的长度和宽度均为 $4000 \mu\text{m}$,电极间隙为 $50 \mu\text{m}$ 。图 2(d)的引线标识分别代表对 PCAL 和 PCAV 施加偏置电压的正极和负极。

当飞秒激光脉冲照射 1×2 GaAs PCA 时,天线阵列的两个阵元分别辐射竖直方向和水平方向偏振的 THz 脉冲,它们经离轴抛物面镜会聚后合成为一个 THz 脉冲。当改变加载在 PCAL 及 PCAV 的偏置电压时,经过合成可得到不同偏振方向的 THz 脉冲。当两个光电导天线两端所加偏置电压相同时, 1×2 GaAs PCA 所辐射 THz 波的偏振方向应是 45° 方向;当减小其中一个天线两端的偏置电压时, 1×2 GaAs PCA 所辐射 THz 波的偏振方向会向偏置电压大的天线的方向偏转。连续调节偏置电压,偏振方向也随之连续偏转,从而实现了可以产生任意偏振方向 THz 波的光电导 THz 辐射源。

3 实验结果分析与讨论

相互垂直的两个天线需要分别施加偏置电压,才能产生任意偏振方向的 THz 波。实验中令两个直流电源独立工作来对相互垂直的两个天线施加偏置电压。通过给其中一个光电导天线的支路中串联定值电阻或滑动变阻器来改变单个天线的偏置电压。偏置电压的改变会导致光电导天线辐射 THz 波的幅值发生改变,从而使 1×2 GaAs PCA 辐射 THz 波的偏振方向发生改变。光电导天线两端的偏置电压如表 1 所示。在改变天线偏置电压前,先调整天线的相应参数,如表 1 所示。两个光电导天线两端偏置电压相等时,两个天线所产生的 THz 波幅值相当,如图 3 所示。将该条件下

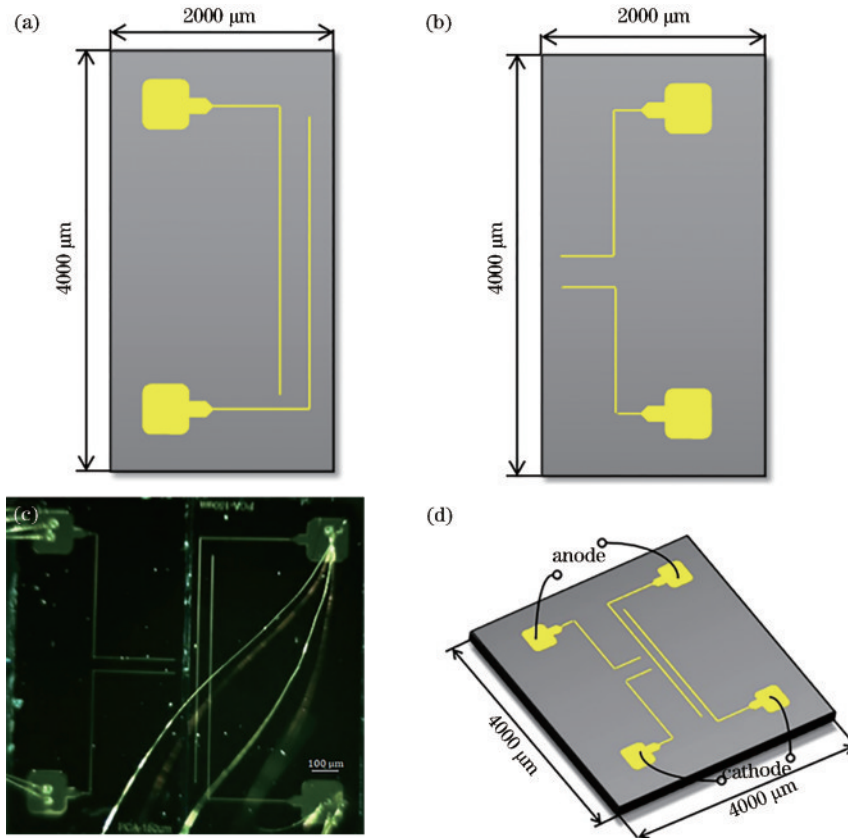


图2 1×2 GaAs PCA。(a) PCAV；(b) PCAL；(c) 1×2 GaAs PCA 实物图；(d) 1×2 GaAs PCA 示意图

Fig. 2 1×2 GaAs PCA. (a) PCAV; (b) PCAL; (c) physical diagram of 1×2 GaAs PCA; (d) schematic diagram of 1×2 GaAs PCA

表1 参考信号相关参数

Table 1 Related parameters of reference signal

Antenna	Dark resistance /kΩ	On-state resistance /kΩ	Bias voltage /V	Amplitude / arb. units
PCAV	472	4.5	80	2.4
PCAL	338	7.0	80	3.2

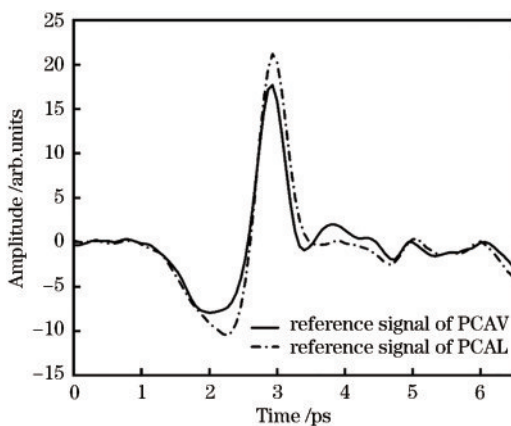


图3 实验用参考信号的幅值

Fig. 3 Amplitude of reference signals used in the experiment

两个光电导天线产生的 THz 波作为实验中的参考信号,此时 1×2 GaAs PCA 辐射 THz 波的偏振态为线偏振。

图 4 为光电导天线的电路连接示意图,它显示了

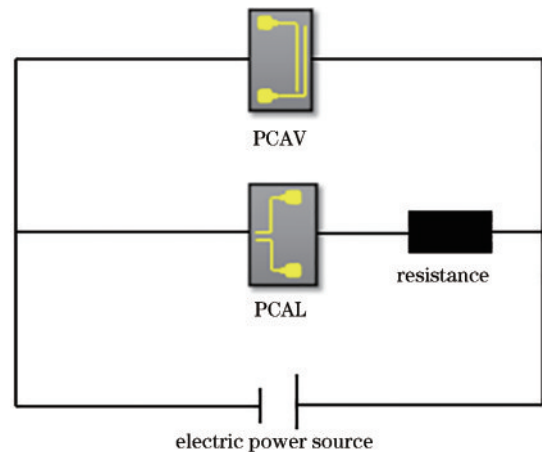


图4 光电导天线电路示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the photoconductive antenna circuit

在 PCAL 所在支路中串联定值电阻的情况。

首先给 PCAV 所在支路串联定值电阻。如表 1 所示,在光电导天线接收到触发光照射后,PCAV 的通态电阻为 4.5 kΩ。在 PCAV 所在支路串联 15 kΩ 和 100 kΩ 的定值电阻之后,其辐射 THz 波的峰值如图 5(a)所示。依照串联分压原则,在串联定值电阻之后,PCAV 两端的实际电压值如表 2 所示。

由偏置电场对光电导天线辐射 THz 波幅值的影

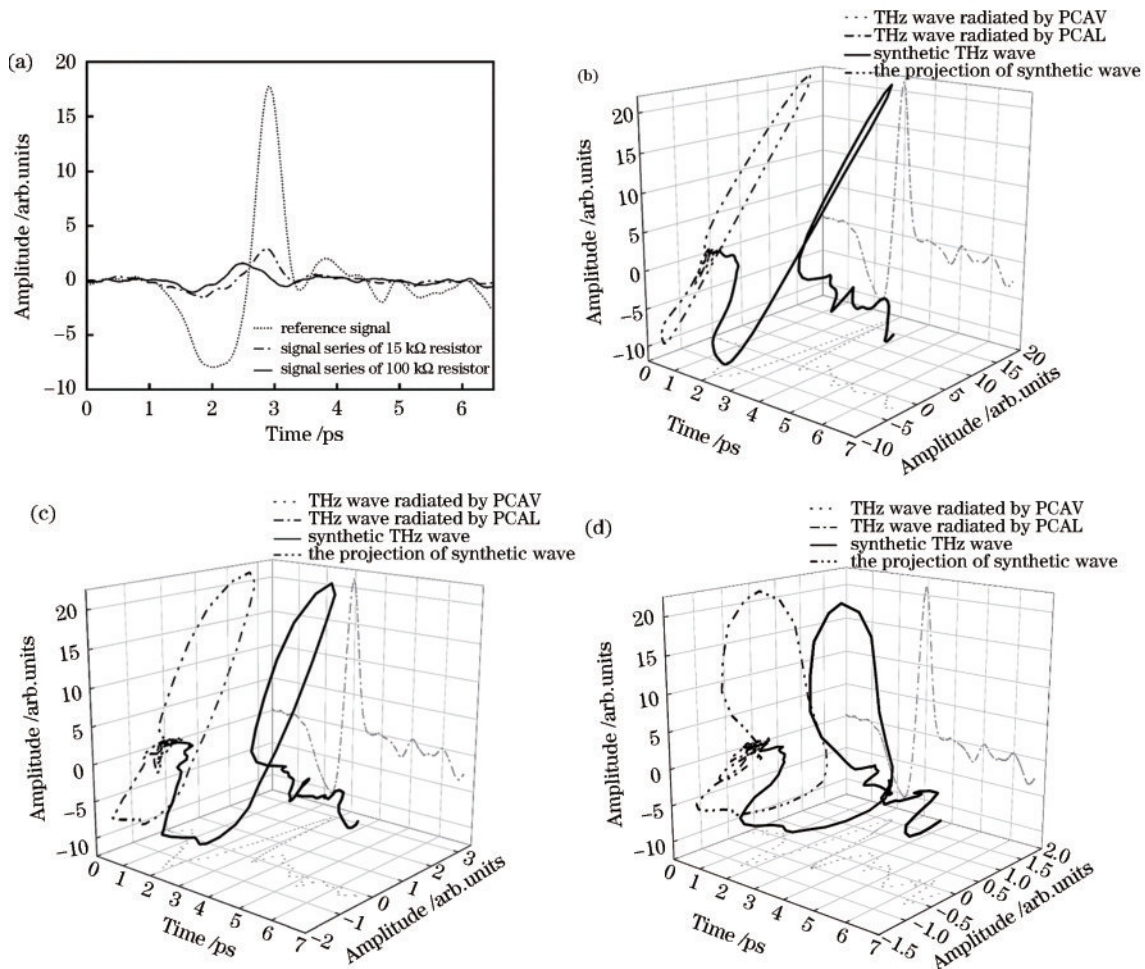


图5 PCAV串联定值电阻后的相关数据。(a) 参考信号与串联定值电阻后信号的幅值对比;(b) 参考信号的偏振方向;(c) 串联 15 kΩ电阻后信号的偏振方向;(d) 串联 100 kΩ电阻后信号的偏振方向

Fig. 5 Correlation data of PCAV after series fixed resistor. (a) Comparison of the amplitude between the reference signal and the signal series fixed resistor; (b) polarization direction of the reference signal; (c) polarization direction of the signal series resistor of 15 kΩ; (d) polarization direction of the signal series resistor of 100 kΩ

表2 PCAV串联定值电阻时的电压分配

Table 2 Voltage distribution when PCAV series fixed resistor

Resistance value /kΩ	Voltage at both ends of the antenna /V	Voltage at both ends of the resistor /V
15	18.5	61.5
100	3.4	76.6

响可知,在PCAV所在支路串联定值电阻后,PCAV两端的电压迅速下降,使光电导天线辐射THz波的幅值发生变化,进而导致1×2 GaAs PCA辐射THz波的偏振方向也发生变化,如图5(a)、(b)所示。图5(b)是PCAL、PCAV辐射THz波的波形图与合成THz波在时间谱中的波形图及合成波形图在Z方向上的投影。光电导天线处于参考信号状态时,两个光电导天线辐射THz波的幅值相近,故合成后的THz波峰值方向在空间中呈45°。而在PCAV串联15 kΩ定值电阻之后,1×2 GaAs PCA辐射THz波的偏振方向的变化如图5(c)所示。相较于参考信号时1×2 GaAs PCA辐射THz波的偏振方向,串联15 kΩ

定值电阻后,其辐射THz波的偏振方向逐渐向90°方向靠拢。这种靠拢趋势在PCAV串联100 kΩ定值电阻之后更加明显,如图5(d)所示,1×2 GaAs PCA辐射THz波的峰值方向几乎朝着90°的方向。

串联定值电阻的方式可以改变1×2 GaAs PCA辐射THz波的偏振方向,但在实验中不便拆卸更换电阻,故在使用单个电源的情况下尝试使用滑动变阻器代替定值电阻。实验中所使用的滑动变阻器的阻值范围为0~100 kΩ,在PCAV所在支路中加入滑动变阻器以取代定值电阻的位置。

通过调节滑动变阻器,使其接入光电导天线支路中的电阻逐渐增大,由图6(a)可知,在电阻增大的过程中,PCAV辐射THz波的幅值有所减小。由于该滑动变阻器的阻值范围较小,对整个PCA偏振方向的调控存在一定的局限性,故偏振方向的变化较小。但从图6(b)与图6(c)中仍可观察到1×2 GaAs PCA辐射THz波的偏振方向也随滑动变阻器阻值的变化发生了细微偏转。

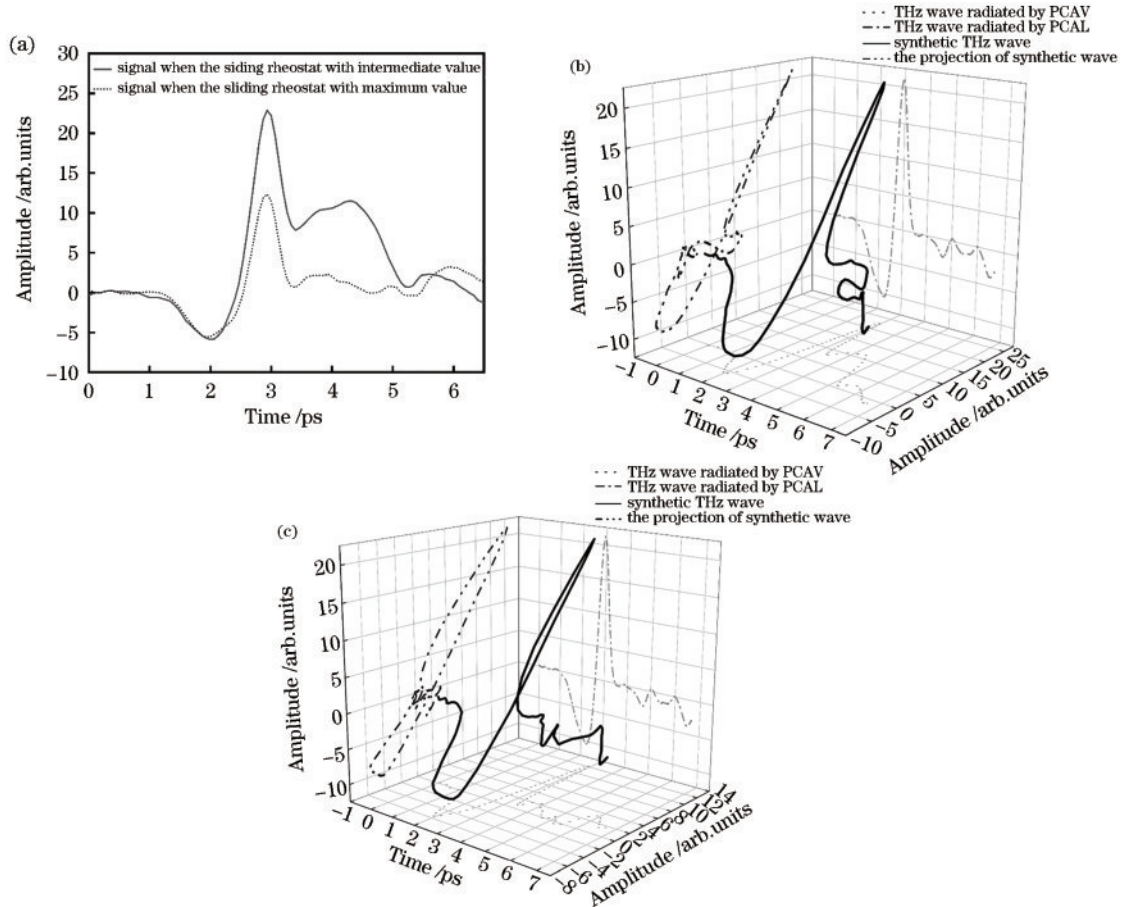


图 6 PCAV 所在支路串联滑动变阻器后的实验数据。(a)滑动变阻器不同阻值时的信号幅值;(b)滑动变阻器阻值为中间值时 1×2 GaAs PCA 辐射 THz 波的偏振方向;(c)滑动变阻器阻值为最大值时 1×2 GaAs PCA 辐射 THz 波的偏振方向
Fig. 6 Experimental data of PCAV series sliding rheostat. (a) Amplitude of the signals when the sliding rheostat with different resistance value; (b) polarization direction of THz wave radiated by 1×2 GaAs PCA when the resistance of the sliding rheostat in series is the intermediate value; (c) polarization direction of THz wave radiated by 1×2 GaAs PCA when the resistance of the sliding rheostat in series is the maximum value

4 结 论

本文设计研制了可以产生任意偏振方向 THz 波的发射天线阵列,并测试了其特性。通过令单个电源独立工作的方式调控各阵元的偏置电压来改变两个阵元辐射 THz 波的强度,使 1×2 GaAs PCA 产生不同偏振方向的 THz 波,实现了以全电控的方式产生任意偏振方向 THz 波的光电导 THz 辐射源。结果表明:在参考信号下,即两个光电导天线两端偏置电压相等时, 1×2 GaAs PCA 所辐射 THz 波的偏振方向为 45° ,此时的偏振态为线偏振;通过减小其中一个光电导天线两端的偏置电压, 1×2 GaAs PCA 所辐射 THz 波的偏振方向会向所加偏置电压大的天线方向偏转;连续调节电压,偏振方向也随之连续偏转,从而实现可产生任意偏振方向 THz 波的光电导 THz 辐射源。

参 考 文 献

[1] Kampfrath T, Sell A, Klatt G, et al. Coherent terahertz control of antiferromagnetic spin waves[J]. Nature

Photonics, 2011, 5(1): 31-34.

[2] Dai J M, Liu J L, Zhang X C. Terahertz wave air photonics: terahertz wave generation and detection with laser-induced gas plasma[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(1): 183-190.
[3] Lee Y K, Choi S W, Han S T, et al. Detection of foreign bodies in foods using continuous wave terahertz imaging[J]. Journal of Food Protection, 2012, 75(1): 179-183.
[4] Chu Y X, Gan Z B, Liang X Y, et al. High-energy large-aperture Ti: sapphire amplifier for 5 PW laser pulses[J]. Optics Letters, 2015, 40(21): 5011-5014.
[5] Du S Q, Li H, Xie L, et al. Vibrational frequencies of anti-diabetic drug studied by terahertz time-domain spectroscopy[J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(14): 143702.
[6] Federici J, Moeller L. Review of terahertz and subterahertz wireless communications[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(11): 111101.
[7] Zhang T Y, Zhang Z H, Mark A A. Dielectric analysis of polymeric materials and mixtures using terahertz time domain spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral

- Analysis, 2019, 39(6): 1689.
- [8] Prajapati J, Bharadwaj M, Chatterjee A, et al. Circuit modeling and performance analysis of photoconductive antenna[J]. Optics Communications, 2017, 394: 69-79.
- [9] Jepsen P U, Cooke D G, Koch M. Terahertz spectroscopy and imaging-modern techniques and applications[J]. Laser & Photonics Reviews, 2011, 5(1): 124-166.
- [10] Hirota Y, Hattori R, Tani M, et al. Polarization modulation of terahertz electromagnetic radiation by four-contact photoconductive antenna[J]. Optics Express, 2006, 14(10): 4486-4493.
- [11] Bulgarevich D S, Watanabe M, Shiwa M, et al. Polarization-variable emitter for terahertz time-domain spectroscopy[J]. Optics Express, 2016, 24(24): 27160-27165.
- [12] Hawecker J, Pistore V, Minasyan A, et al. Cavity-based photoconductive sources for real-time terahertz imaging [J]. Photonics Research, 2020, 8(6): 858-863.
- [13] 闫志中, 施卫. 太赫兹 GaAs 光电导天线阵列辐射特性[J]. 物理学报, 2021, 70(24): 248704.
Yan Z J, Shi W. Radiation characteristics of terahertz GaAs photoconductive antenna arrays[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(24): 248704.
- [14] Shi W, Wang Z Q, Hou L, et al. A high performance terahertz photoconductive antenna array detector with high synthesis efficiency[J]. Frontiers in Physics, 2021, 9: 751128.
- [15] Shi W, Wang Z Q, Li C F, et al. New antenna for detecting polarization states of terahertz[J]. Frontiers in Physics, 2022, 10: 850770.
- [16] 王志全, 施卫. 太赫兹时域光谱中脉冲太赫兹波全息探测[J]. 物理学报, 2022, 71(18): 188704.
Wang Z Q, Shi W. Holographic detection of pulsed terahertz waves in terahertz time domain spectrum[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(18): 188704.