

文章编号: 1000-7032(2014)12-1500-06

三路太赫兹光导天线的功率合成技术

邓 琥^{1,2*}, 陈 琦³, 何晓阳³, 尚丽平^{1,2}, 张泽林¹, 刘泉澄¹

(1. 西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621010; 2. 特殊环境机器人技术四川省重点实验室, 四川 绵阳 621010;
3. 中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 针对单个光导天线功率容量有限的问题, 采用光导天线功率合成技术研究高功率、超宽带的太赫兹辐射方法。通过构建三路光导天线功率合成系统, 以 500 μm 孔径的偶极子光导天线为对象, 进行了功率合成技术研究。结果表明: 当三路 500 μm 孔径的偶极子光导天线产生太赫兹的光程差一致时, 合成后的时域光谱峰值最大, 时域相干度达 90.6%, 提高了太赫兹输出的功率。

关键词: 太赫兹; 光导天线; 功率合成

中图分类号: O434.3

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20143512.1500

Power Combining Technology in Three-way Terahertz Photoconductive Antenna

DENG Hu^{1,2*}, CHEN Qi³, HE Xiao-yang³, SHANG Li-ping^{1,2}, ZHANG Ze-lin¹, LIU Quan-cheng¹

(1. College of Information Engineer, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2. Robot Technology Used for Special Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang 621010, China;

3. Research Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

* Corresponding Author, E-mail: denghu@swust.edu.cn

Abstract: For the limited power capacity problem of single photoconductive antenna, we use photoconductive antenna power combining technology to research high power and ultra-broadband terahertz radiation. By constructing a power combining system of three-way photoconductive antenna, using 500 μm aperture dipole photoconductive antenna as the object, we studied the power combining technology. When the optical path differences of terahertz emitted by three-way 500 μm aperture photoconductive dipole antenna are the same, the power combined time-domain spectral reaches to maximum peak, the degree of temporal coherence up to 90.6%, the output power of terahertz is improved efficiently.

Key words: terahertz; photoconductive antenna; power synthesis

1 引 言

太赫兹源是太赫兹研究的基础和前提, 很大程度上决定了太赫兹技术的发展。光导天线

(Photo-conductive antenna, PCA) 由于具有结构简单、输出超宽带、平均功率较高的优点, 成为当前使用最广泛的太赫兹源。针对光导天线, 国内外科学家已开展了大量的研究工作: 分析了光导开

收稿日期: 2014-09-02; 修订日期: 2014-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(11176032); 四川省教育厅青年基金(12ZB337); 极端条件物质特性实验室资助课题(13zxjk02); 特殊环境机器人技术四川省重点实验室开放基金(13zxtk0502)资助项目

关的光电激发原理、影响辐射功率和频带的主要因素(材料载流子寿命、载流子的漂移速度、深能级陷阱)和次要因素(退火温度、光导开关等效电容、电极工艺、电路参数)^[1-4];研究了外置偏压、激光能量对光导开关辐射输出及线性和非线性工作模式的影响^[5-7];讨论了大孔径光导开关、对数螺旋光导天线、对数周期光导天线、双极形、蝶形等天线对实现低旁瓣、高主瓣辐射的作用等^[8-10]。然而,由于单个光导天线功率容量有限,很难达到更高功率的要求。为获得高功率、超宽带的太赫兹辐射,使太赫兹技术更好地应用于材料分析、生物医学、安全检查、环境科学、通信雷达等领域^[11-17],本文研究了 3 个光导天线的功率合成技术,提高了太赫兹输出的功率。

2 光导天线功率合成原理及实验装置

光导天线功率合成的基本原理是基于太赫兹时域波形的一致性。假设有 3 路太赫兹信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 和 $z(t)$ 且时域波形一致, $x(t)$ 、 $y(t)$ 和 $z(t)$ 可由傅里叶频率分解公式展开如下:

$$x(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k e^{j(k\omega t + \alpha_k)}, \quad (1)$$

$$y(t) = B_0 + \sum_{k=1}^{\infty} B_k e^{j(k\omega t + \beta_k)}, \quad (2)$$

$$z(t) = C_0 + \sum_{k=1}^{\infty} C_k e^{j(k\omega t + \theta_k)}. \quad (3)$$

由时频等效变换的原理可知, $x(t)$ 、 $y(t)$ 和 $z(t)$ 时域的一致性决定了频域的一致性。则在公

式(1)、(2)和(3)中, A_0 、 B_0 和 C_0 、 A_k 、 B_k 和 C_k 、 α_k 、 β_k 和 θ_k 应当一致。因此, $x(t)$ 、 $y(t)$ 和 $z(t)$ 在频谱内的各谐波分量也分别满足功率合成的相干条件。

可采用时域相干度 C_T 评价光导天线功率合成效果。时域相干度是指 N 路均不延迟时的时域光谱峰值之和 Y_m (其对应时刻为 T_m) 与 N 路延迟后 T_m 处的时域光谱信号 Y_n 比值的倒数。即:

$$C_T = \frac{Y_n}{Y_m} \times 100\%. \quad (4)$$

三路光导天线功率合成系统原理如下:

飞秒激光器 (MaiTai HP, Spectra Physics) 发出的飞秒激光经反射镜(M1)、1/2 波片(HWP1)和分束镜(CBS1)后被分成泵浦光和探测光。探测光经反射镜(M2、M3、M4、M5)、偏振片(P1)、聚焦透镜(L1)后聚焦到碲化锌电光晶体(ZnTe)上。

泵浦光经置于延迟线 1 (Time delay stage 1, GTS150, Newport) 上的反射镜(M6、M7)、1/2 波片(HWP2)、反射镜(M8)和分束镜(CBS2)后被分成两束泵浦光。其中一束泵浦光 I 经置于延迟线 2 (Time delay stage 2, NRT150, Thorlabs) 上的反射镜(M9、M10)、反射镜(M11)、聚焦透镜(L2)和反射镜(M12)后聚焦到光电导天线 1 (PCA1) 上产生太赫兹波, 产生的太赫兹波被太赫兹透镜(TPX1、TPX2)聚焦到碲化锌电光晶体上。另一束泵浦光经 1/2 波片(HWP3)和分束镜(CBS3)后

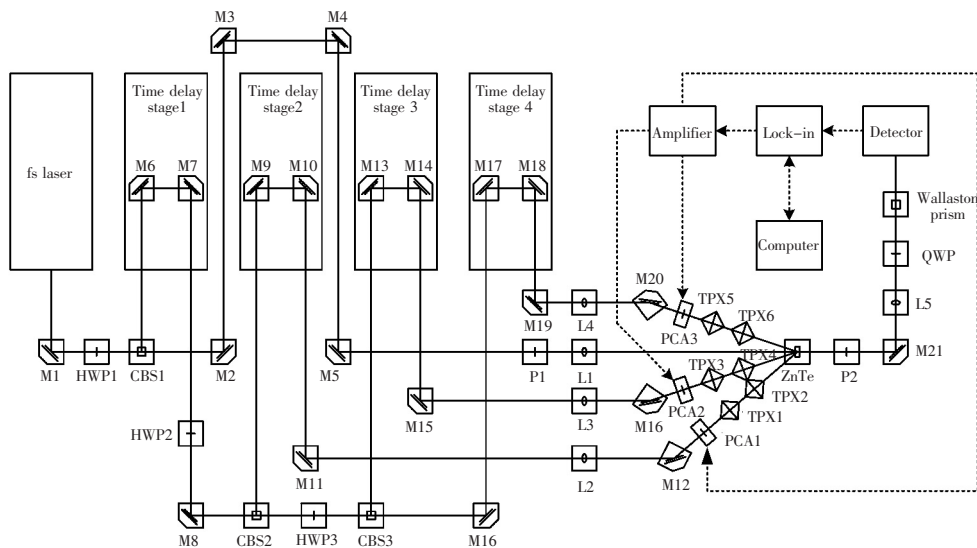


图 1 3 路光导天线功率合成系统光路图

Fig. 1 Optical path diagram of three-way photoconductive antenna power synthesis system

延迟线 3 (Time delay stage 3, NRT150, Thorlabs) 上的反射镜 (M13、M14)、反射镜 (M15)、聚焦透镜 (L3) 和反射镜 (M16) 后聚焦到光电导天线 2 (PCA2) 上产生太赫兹波,产生的太赫兹波被太赫兹透镜 (TPX3、TPX4) 聚焦到碲化锌电光晶体上;另一束泵浦光 III 经置于延迟线 4 (Time delay stage 4, NRT150, Thorlabs) 上的反射镜 (M17、M18)、反射镜 (M19)、聚焦透镜 (L4) 和反射镜 (M20) 后聚焦到光电导天线 3 (PCA3) 上产生太赫兹波,产生的太赫兹波被太赫兹透镜 (TPX5、TPX6) 聚焦到碲化锌电光晶体上。探测光和太赫兹波同时聚焦在碲化锌电光晶体中的同一位置,并且太赫兹波光斑尺寸大于探测光光斑尺寸。

从碲化锌电光晶体透射出的携带有太赫兹波信号的泵浦光经偏振片 (P2)、反射镜 (M21)、聚焦透镜 (L5)、1/4 波片 (QWP)、渥拉斯顿棱镜 (Wallaston prism) 后分成偏振方向垂直的两束激光照射到光电平衡探测器 (Detector) 上。光电平衡探测器的输出经锁相放大器 (Lock-in, SR830, SRS) 后输入到计算机 (Computer) 进行数据处理。锁相放大器输出的 TTL 信号经高压放大器 (Amplifier, HVM-500USB, Zomega) 放大后为光电导天线 (PCA1、PCA2、PCA3) 提供偏置电压。计算机通过功率合成系统软件控制延迟线控制器,实现延迟线移动。3 路光导天线功率合成系统光路如图 1 所示。

3 结果与讨论

实验中的测试条件如下:

(1) 飞秒激光中心波长:800 nm;飞秒激光脉宽:92 fs。

(2) PCA1、PCA2、PCA3 均为 500 μm 孔径的低温生长碲化镓偶极子光导天线。

(3) PCA1、PCA2、PCA3 入射飞秒激光平均功率为 100 mW。

(4) 延迟线 2、3 和 4 的步进精度小于等于 30 μm 。

(5) 环境温度:21 $^{\circ}\text{C}$;环境湿度:相对湿度 40%;光导天线偏置电压:80 V;偏置电压频率:4.397 kHz。

3.1 PCA1 的太赫兹时域光谱

在三路光导天线功率合成系统中仅安装 PCA1,依据测试条件,PCA1 太赫兹时域光谱获取

步骤如下:移动延迟线 2,当其绝对位置为 -0.264 mm 时,探测光与泵浦光 I 之间的光程差一致。固定延迟线 2。通过功率合成系统软件控制延迟线 1 移动,并进行太赫兹时域光谱扫描。经多次测量取平均值后,获得 PCA1 的太赫兹时域光谱信号,其峰值电压为 $0.179 \times 10^{-3}\text{ V}$,如图 2 所示。

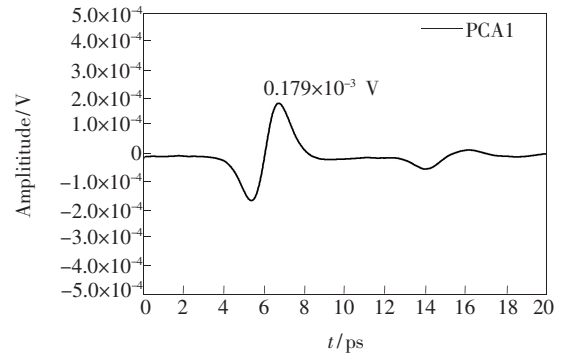


图 2 PCA1 的太赫兹时域光谱

Fig. 2 Terahertz time-domain spectroscopy of PCA1

3.2 PCA2 的太赫兹时域光谱

在三路光导天线功率合成系统中仅安装 PCA2,依据测试条件,PCA2 太赫兹时域光谱获取步骤如下:移动延迟线 3,当其绝对位置为 138.01 mm 时,探测光与泵浦光 II 之间的光程差一致。固定延迟线 3。通过功率合成系统软件控制延迟线 1 移动,并进行太赫兹时域光谱扫描。经多次测量取平均值后,获得 PCA2 的太赫兹时域光谱信号,其峰值电压为 $0.142 \times 10^{-3}\text{ V}$,如图 3 所示。

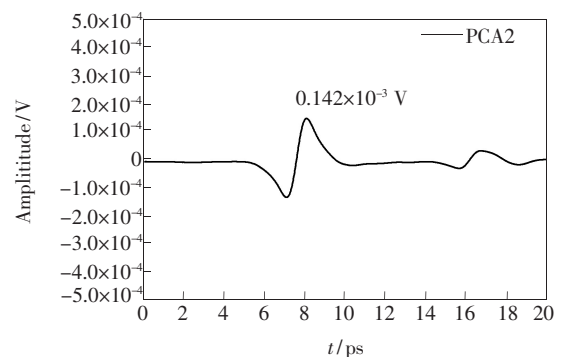


图 3 PCA2 的太赫兹时域光谱

Fig. 3 Terahertz time-domain spectroscopy of PCA2

3.3 PCA3 的太赫兹时域光谱

在三路光导天线功率合成系统中仅安装 PCA3,依据测试条件,PCA3 太赫兹时域光谱获取步骤如下:移动延迟线 4,当其绝对位置为 79.39 mm 时,探测光与泵浦光 III 之间的光程差一致。

固定延迟线 4。通过功率合成系统软件控制延迟线 1 移动, 并进行太赫兹时域光谱扫描。经多次测量取平均值后获得 PCA3 的太赫兹时域光谱信号, 其峰值电压为 $0.262 \times 10^{-3} \text{ V}$, 如图 4 所示。

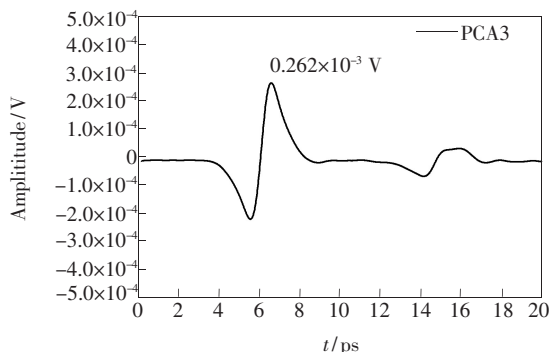


图 4 PCA3 的太赫兹时域光谱

Fig. 4 Terahertz time-domain spectroscopy of PCA3

由图 2 ~ 4 可知, PCA1、PCA2 和 PCA3 的太赫兹时域光谱波形基本一致, 区别在于太赫兹时域光谱峰值电压不同。其主要原因是 PCA1、PCA2 和 PCA3 分别采用各自的泵浦光路, 由于调试的一致性造成太赫兹的产生和收集存在差异。

3.4 PCA1、PCA2 和 PCA3 的功率合成效果

在三路光导天线功率合成系统中同时安装 PCA1、PCA2 和 PCA3, 依据测试条件, PCA1、PCA2 和 PCA3 太赫兹时域光谱功率合成信号获取步骤如下:

(1) 移动延迟线 2 至绝对位置 -0.264 mm 处并固定, 探测光与泵浦光 I 间的光程相等。

(2) 移动延迟线 3 至绝对位置 138.01 mm 处并固定, 探测光与泵浦光 II 间的光程相等。

(3) 以绝对位置 79.39 mm (时间刻度定义为 0 ps) 为中心, $30 \mu\text{m}$ 为步进 (时间步进为 0.2 ps) 移动延迟线 4, 每移动一步, 进行一次太赫兹时域光谱扫描, 获得 PCA1、PCA2 和 PCA3 在不同时刻的飞秒脉冲触发下太赫兹时域光谱功率合成信号。

随着延迟线 4 的移动, 泵浦光 III 和探测光 (即泵浦光 I 和泵浦光 II) 的光程差随之变化。当泵浦光 III 和探测光的光程差从 4.6 ps 减小到 2.8 ps 时, 功率合成后的时域光谱峰值无明显变化, 但两个时域光谱峰值逐渐靠拢, 如图 5 所示。当泵浦光 III 和探测光的光程差从 2.6 ps 减小到 0.8 ps 时, 功率合成后的时域光谱峰值逐渐减小,

如图 6 所示。当泵浦光 III 和探测光的光程差从 0.6 ps 减小到 -1.2 ps 时, 功率合成后的时域光谱峰值逐渐增至最大 (0 ps 时) 后减小, 如图 7 所示。

依据图 5 ~ 7 的太赫兹时域光谱功率合成信号, 比较各次功率合成信号的峰值和对应的延迟线 4 与探测光的光程差, 如图 8 所示。结果表明: 功率合成信号的峰值随着光程差的减小, 先保持

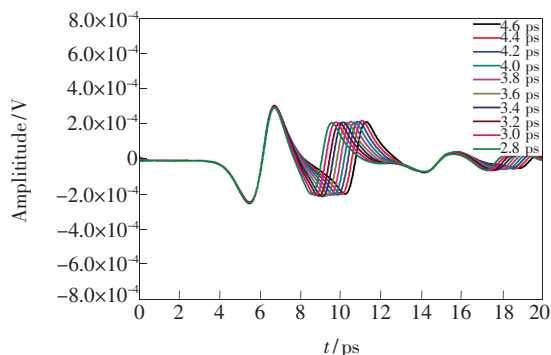


图 5 光程差为 $4.6 \sim 2.8 \text{ ps}$ 时的时域光谱合成信号

Fig. 5 Synthesized of time-domain spectroscopy with the optical path difference from 4.6 to 2.8 ps

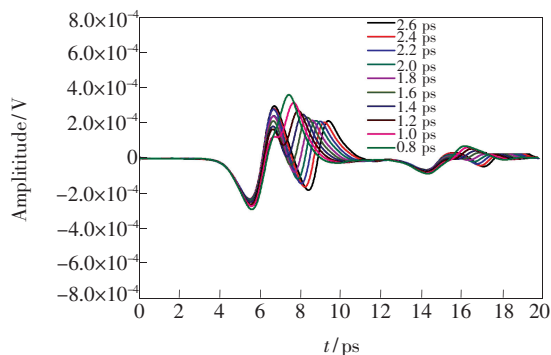


图 6 光程差为 $2.6 \sim 0.8 \text{ ps}$ 时的时域光谱合成信号

Fig. 6 Synthesized of time-domain spectroscopy with the optical path difference from 2.6 to 0.8 ps

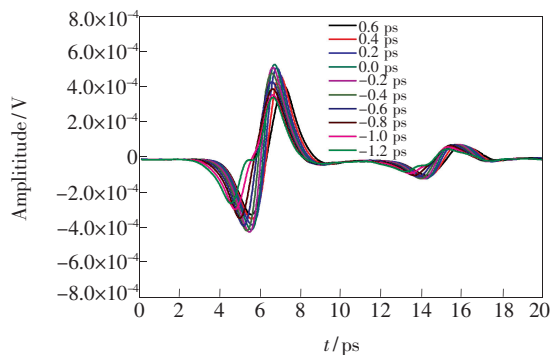


图 7 光程差为 $0.6 \sim -1.2 \text{ ps}$ 时的时域光谱合成信号

Fig. 7 Synthesized of time-domain spectroscopy with the optical path difference from 0.6 to -1.2 ps

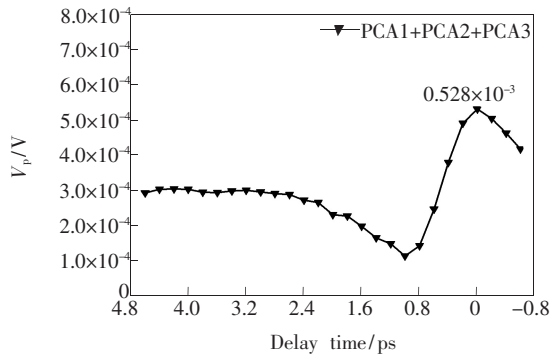


图 8 各次合成信号的时域光谱峰值比较

Fig. 8 Peak comparison of each synthesized signal's time-domain spectroscopy

不变后减小,再增至最大后减小,其变化趋势类似于图 2~4 所示的太赫兹时域光谱波形。

当延迟线 4 移至 0 ps 时,太赫兹时域光谱合成信号最强,达 0.528×10^{-3} V,即此时太赫兹辐射功率最大,如图 9 所示。

由图 9 可知,PCA1、PCA2、PCA3 的太赫兹时

$$C_T = \frac{Y_n}{Y_m} \times 100\% = \frac{0.528 \times 10^{-3}}{0.179 \times 10^{-3} + 0.142 \times 10^{-3} + 0.262 \times 10^{-3}} \times 100\% = 90.6\%. \quad (5)$$

4 结 论

通过构建三路光导天线功率合成系统,分别获得了 3 个 500 μm 孔径的偶极子光导天线的时域光谱信号以及功率合成时域光谱信号。通过控制延迟线的移动,调整 3 个 500 μm 孔径的偶极

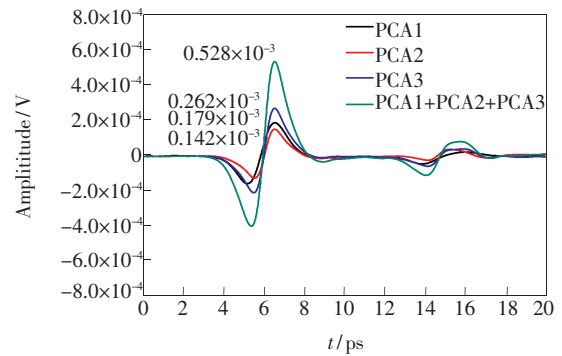


图 9 PCA1、PCA2、PCA3 与最佳合成时的时域光谱比较。

Fig. 9 Comparison of time-domain spectroscopy between PCA1, PCA2, PCA3 and the optimal synthesized one.

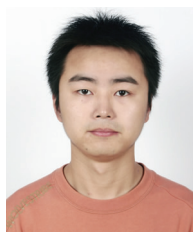
子光谱峰值电压分别为 0.179×10^{-3} 、 0.142×10^{-3} 、 0.262×10^{-3} V,采用 PCA1、PCA2 和 PCA3 进行功率合成时的太赫兹时域光谱峰值电压的最大值为 0.528×10^{-3} V。结合公式(2)可知,最大时域相干度为:

子光导天线产生太赫兹的光程差。当光程差变小时,合成后的时域光谱峰值逐渐增加;当光程差变大时,合成后的时域光谱峰值逐渐减小;当光程差相等时,合成后的时域光谱峰值最大,太赫兹输出功率明显提高,且功率合成的时域相干度达 90.6%,合成效果较好。

参 考 文 献:

- [1] Gregory I S, Baker C, Tribe W R, *et al.* Optimization of photomixers and antennas for continuous-wave terahertz emission [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2005, 41(5):717-728.
- [2] Darrow J T, Zhang X C, Auston D H. Power scaling of large-aperture photoconducting antennas [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, 58(1):25-27.
- [3] Miyamaru F, Saito Y, Yamamoto K, *et al.* Dependence of emission of terahertz radiation on geometrical parameters of dipole photoconductive antennas [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 96(21):211104-1-3.
- [4] Schwagmann A, Zhao Z Y, Ospald F, *et al.* Terahertz emission characteristics of ErAs: InGaAs-based photoconductive antennas excited at 1.55 μm [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 96(14):141108-1-3.
- [5] Stone M R, Naftaly M, Miles R E, *et al.* Electrical and radiation characteristics of semilarge photoconductive terahertz emitters [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 2004, 52(10):2420-2429.
- [6] Darrow J T, Zhang X C, Auston D H, *et al.* Saturation properties of large-aperture photoconducting antennas [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, 28(6):1607-1616.
- [7] Suen J Y, Li W, Taylor Z D, *et al.* Characterization and modeling of a terahertz photoconductive switch [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 96(14):141103-1-3.
- [8] Sang G P, Weiner A M, Melloch M R, *et al.* High-power narrow-band terahertz generation using large-aperture photoconductors

- [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1999, 35(8):1257-1268.
- [9] Dykaar D R, Greene B I. Log-periodic antennas for pulsed terahertz radiation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, 59(3):262-264.
- [10] Smith P R, Auston D H, Nuss M C. Subpicosecond photoconducting dipole antennas [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1998, 24(2):255-260.
- [11] Kaindl R A, Carnahan M A, Hagele D, *et al.* Ultrafast terahertz probes of transient conducting and insulating phases in an electron-hole gas [J]. *Nature*, 2003, 423:734-738.
- [12] Han P Y, Cho G C, Zhang X C. Time-domain transillumination of biological tissues with terahertz pulses [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, 25(4):242-244.
- [13] Zhang J F, Yuan X D, Qin S Q, *et al.* Tunable terahertz and optical metamaterials [J]. *Chin. Opt.* (中国光学), 2014, 7(3):349-364 (in Chinese).
- [14] Pan X C, Yao Z H, Xu X L, *et al.* Fabrication, design and application of THz metamaterials [J]. *Chin. Opt.* (中国光学), 2013, 6(3):283-296 (in Chinese).
- [15] Melinger J S, Yang Y, Mandehgar M, *et al.* THz detection of small molecule vapors in the atmospheric transmission windows [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(6):6788-6807.
- [16] Corti T, Luo B P, Fu Q, *et al.* The impact of cirrus clouds on tropical troposphere-to-stratosphere transport [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2006(6):2539-2547.
- [17] Froberg N, Mack M, Hu B B, *et al.* 500 GHz electrically steerable photoconducting antenna array [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, 58(5):446-448.



邓琥(1980-),男,四川阆中人,讲师,2008年于西南科技大学获得硕士学位,主要从事光谱传感及太赫兹技术的研究。

E-mail: denghu@swust.edu.cn