光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021081602

偏振可调的太赫兹光电导天线设计

潘　武，刘博文*，马　勇，肖惠云，杨龙亮

（重庆邮电大学 光电工程学院，重庆 400065）

摘　要： 提出了一种偏振可调的太赫兹光电导天线，其结构由四个弧形金属电极、低温砷化镓衬底和氮化硅抗反射涂层构成。通过对光电导天线的工作原理分析，可以发现弧形金属电极结构决定天线的辐射偏振，且衬底的载流子迁移率、载流子寿命和衬底材料对激光的吸收直接影响天线的辐射特性。利用 COMSOL 软件对该光电导天线进行建模仿真，其结果表明该光电导天线可以在 45°方向倍增地辐射线偏振太赫兹波，且辐射强度相较于常规光电导天线提高了 30%，辐射带宽高达 10 THz。所设计太赫兹光电导天线具有偏振可调、结构简单和易于加工等特点，在太赫兹光谱检测领域具有广阔的应用前景。

关键词： 太赫兹；偏振可调；光电导天线

中图分类号： TN822　**文章编号：** 1001－5868(2022)01－0110－06

Study on Polarization-controlled Terahertz Photoconductive Antenna

PAN Wu, LIU Bowen, MA Yong, XIAO Huiyun, YANG Longliang

(College of Photoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, CHN)

Abstract: A terahertz photoconductive antenna with adjustable polarization is proposed, which consists of four arc structure metal electrodes, a low-temperature gallium arsenide substrate and an anti-reflection layer of silicon nitride. Through the analysis of the working principles of photoconductive antenna, it can be found that the arc metal electrode structure determines the radiation polarization of the antenna, and the carrier mobility, carrier life and laser absorption of the substrate material can directly affect the radiation characteristics of the antenna. The photoconductive antenna is modeled and simulated by COMSOL software, and the results show that the antenna can multiply the outgoing polarized terahertz wave in the 45° direction, and the radiation intensity is 30% higher than that of the conventional photoconductive antenna and the radiation bandwidth is up to 10 THz. The designed terahertz photoconductive antenna has the characteristics of adjustable polarization, simple structure and easy processing, owning broad application prospects in the field of terahertz spectrum detection.

Key words: terahertz; adjustable polarization; photoconductive antenna

0　引言

太赫兹（Terahertz，THz）波的频率范围在 0.1～10 THz，其对应的波长为 30～3 000 μm，处于微波与红外波段之间[1]。太赫兹波因其光子能量相对较低，且对某些非金属材料和非极性液体都具有良好的穿透能力，而广泛应用于太赫兹光谱领域[2-3]。在太赫兹光谱系统中，光电导天线（Photoconductive Antenna，PCA）具有简单、紧凑和易于与光纤耦合等优势，被广泛应用于太赫兹波的发射和探测[4]。

某些材料在太赫兹范围内具有光学各向异性[5]，目前检测此类材料所使用的太赫兹时域光谱系统（Terahertz Time Domain Spectroscopy，THz-

收稿日期：2021－08－16.

*通信作者：刘博文　E-mail：908967592@qq.com

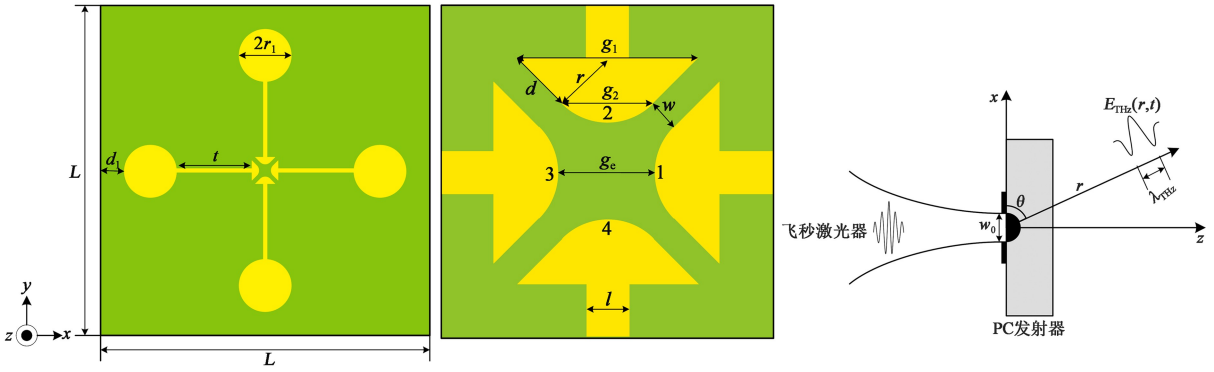
TDS)大多由一对太赫兹光电导发射器/探测器和多个可旋转的线栅偏振器组成，其中偏振器的加入导致整个系统光路趋于复杂化，并导致系统探测器采集的太赫兹波谱信噪比(SNR)下降[6]。因此，对偏振态可调的太赫兹光电导天线进行研究成为必要，以便更准确地获取纯聚合物、复合材料、晶体或介质和半导体材料的物理信息。2006 年，Hirota[7]所在团队为测量生物分子在振动频率范围内的圆二色性(VCD)设计了一种四电极光电导天线结构，通过快速地切换偏置电压和高电阻率 Si 棱镜内的全反射，将±45°线偏振辐射转换为圆偏振辐射，但该结构未进行优化，其辐射强度较低。2016 年，Bulgarevich[8]团队为太赫兹时域光谱系统设计了一种八电极偏振可变的太赫兹发生器，其可实现八个方向的偏振可调，但电极较多，导致其衬底的偏置电场分布受影响，所辐射的太赫兹波偏振态还需加偏振片来控制。2017 年，Bashirpour[9]团队为提高 PCA 衬底对飞秒激光的吸收，将纳米等离子光栅用作抗反射涂层，可使衬底对激光的吸收增加 25%，但存在纳米等离子光栅不易加工的问题。

基于上述问题，本文提出一种四电极太赫兹光电导天线，相比于现有的多电极光电导天线，该结构偏置电场分布均匀，可以直接辐射出八个方向的线偏振太赫兹波，同时加入抗反射涂层，使得光电导天线的辐射强度提高了 30%，辐射带宽高达 10 THz。

1　光电导天线结构设计

本文设计的太赫兹光电导天线结构主要包括底部的衬底层、附着于衬底表面的金属层以及覆盖在电极间隙上的抗反射涂层。金属电极层结构、底部衬底层和抗反射涂层采用的材料分别为金(Au)、低温砷化镓(LT-GaAs)和氮化硅(Si_3N_4)。

偏振可调光电导天线结构如图 1(a)所示。砷化镓衬底边长 $L=1\times10^4$ μm，金属电极层由四个完全相同的结构(电极 1～4)组成，单个电极是由一个等腰梯形和四分之一圆弧组成。等腰梯形上边长 $g_1=15\sqrt{2}$ μm，下边长 $g_2=30\sqrt{2}$ μm，腰长 $d=15.0$ μm。圆的半径 $r=15.0$ μm，其圆心位于等腰梯形下边长的中心位置。天线中心的电极间隙 $g_e=20.0$ μm，两两相邻电极间的间隙大小 $w=(25\sqrt{2}-30)$ μm。因天线电极结构较小，不易施加偏压，而在电极上加外延电极，其电极结构如图 1(b)所示。外延线长 $t=1.975\times10^3$ μm，宽 $l=10$ μm，外延圆电极直径 $r_1=1\times10^3$ μm，其距离衬底边 $d_1=1\times10^3$ μm。衬底层厚度为 350 μm，金属电极层厚度为 0.2 μm，抗反射涂层厚度 $h_1=0.1$ μm。



(a)　天线结构示意图　　(b)　电极结构示意图　　(c)　天线原理示意图

图 1　偏振可调光电导天线结构与原理示意图

光电导天线太赫兹波辐射原理如图 1(c)所示。当飞秒激光照射在衬底表面时，衬底介质上会产生电子-空穴对(光生载流子)，对电极上施加偏置电压，光生载流子在偏压的作用下向施加偏压的电极加速运动，加速运动的载流子产生变化的电流，变化的电流辐射出电磁波。照射激光为飞秒量级，天线辐射的电磁波处于太赫兹频段[10]。

由光电导天线辐射出的太赫兹波，其偏振方向与金属电极层的结构有关。结合电极的对称结构以及偏置电压的施加方法，本文设计的光电导天线的结构可以实现八个方向的偏振可调。

2　光电导天线仿真性能分析

采用 COMSOL Multiphysics 5.6 软件将电磁

波频域模块和半导体物理模块相结合对天线的光电效应进行仿真分析。当一束光子能量高于半导体禁带宽度的飞秒激光入射到半导体衬底中，该飞秒激光脉冲以高斯光束的形式入射，沿 $-z$ 轴方向传播，其偏振方向沿 x 轴，飞秒激光所施加的电场分布可以描述如下[11]：

$$E(x,y,z)=E_0\frac{w_0}{w(z)}\exp\left[-\frac{x^2+y^2}{w^2(z)}-\mathrm{i}k_0z-\mathrm{i}k_0\frac{x^2+y^2}{2R(z)}+\mathrm{i}\eta(z)\right] \tag{1}$$

$$w(z)=w_0\sqrt{1+\left(\frac{z}{z_0}\right)^2} \tag{2}$$

$$R(z)=z\left[1+\left(\frac{z}{z_0}\right)^2\right] \tag{3}$$

$$\eta(z)=\tan^{-1}\left(\frac{z}{z_0}\right) \tag{4}$$

$$z_0=\frac{k_0w_0^2}{2} \tag{5}$$

其中，$w(z)$ 是高斯光束的 $1/e^2$ 光束半径，$R(z)$ 是波前曲率半径，$\eta(z)$ 是高斯光束的 Gouy 相移，z_0 为高斯光束的瑞利距离，k_0 是激光的波数，$k_0=2\pi/\lambda$，E_0 是高斯光束零时刻的电场振幅，w_0 是激光脉冲高斯束腰半径。

首先采用有限元法(FEM)将麦克斯韦方程组和漂移扩散/泊松方程结合，对天线结构的光学特性和电学特性进行仿真分析。在模拟过程中，通过求解麦克斯韦方程组，得到如下光响应：

$$\nabla\times\mu_r^{-1}(\nabla\times\vec{E})-k_0^2\left(\varepsilon_r-\frac{\mathrm{i}\sigma}{\omega\varepsilon_0}\right)\vec{E}=0 \tag{6}$$

通过仿真求解方程(6)，可以获得砷化镓衬底中的功率密度分布 $P_s(x,y,z)$。

其次，使用与时间相关的生成速率结合瞬态半导体方程(泊松方程、漂移扩散方程和连续性方程)来计算激光照射导致的瞬态光电流。与时间相关的载流子生成率[9]计算如下：

$$G(t)=(4\pi k_{pc}/hc)P_s(x,y,z)\cdot\exp\left(4\ln(0.5)\frac{(t-t_0)^2}{\delta_t^2}\right) \tag{7}$$

其中，k_{pc} 是衬底折射率的虚部，c 是光速，δ_t 是激光脉冲持续时间，t_0 是激光脉冲时间延迟。

在瞬态半导体方程中求解瞬态光电流。该过程可描述如下：

$$q\frac{\partial n(\vec{r})}{\partial t}=\nabla J_n(\vec{r})+q(G-R) \tag{8}$$

$$q\frac{\partial P(\vec{r})}{\partial t}=\nabla J_P(\vec{r})+q(G-R) \tag{9}$$

$$J_n(\vec{r})=qu_nn(E_{DC}+E)+qD_n\nabla n \tag{10}$$

$$J_p(\vec{r})=qu_pn(E_{DC}+E)+qD_p\nabla p \tag{11}$$

其中，n 和 p 分别是电子和空穴密度，R 为载流子的复合率，$J_n(\vec{r})$ 和 $J_p(\vec{r})$ 分别是电子和空穴的电流密度，μ_n 和 μ_p 分别是电子和空穴迁移率，E_{DC} 为静电场分量，E 为随着载流子电流变化的时变电场分量。D_n 和 D_p 是与迁移率呈正相关的扩散系数。GaAs 介质的载流子复合主要包括直接复合和陷阱辅助复合(Shockley-Read-Hall，SRH)。

对于 GaAs 材料，直接复合的复合率为[12]

$$R_{OPT}=rnp \tag{12}$$

其中，r 为复合率，对于砷化镓衬底而言，$r=7\times10^{-12}\ \mathrm{cm^3/s}$。

间接复合的复合率可表示为

$$R_{SRH}=\frac{np}{\tau_nn+\tau_pp} \tag{13}$$

式中，τ_n 和 τ_p 分别为电子和空穴的寿命。

因此，总的复合率可由下式表示：

$$R=R_{OPT}+R_{SRH} \tag{14}$$

由式(1)～(3)可知载流子生成率与衬底吸收的激光功率和激光的参数有关；由式(4)～(7)可知衬底产生的电流大小主要受载流子迁移率和偏置电压的影响。由式(9)～(10)可知载流子寿命影响载流子的复合，寿命越短，其复合速度越快，所辐射出的太赫兹频谱带宽越宽。所以该设计选用具有高迁移率、高电阻率和超短寿命载流子的 LT-GaAs 材料。表 1 总结了该设计结构模拟的电学和光学参数。

表 1 结构模拟的电学和光学参数

参数	数值
LT-GaAs 介电常数 ε_r	12.9
LT-GaAs 折射率实部 k	3.697
LT-GaAs 折射率虚部 k_{PC}	0.069
LT-GaAs 相对磁导率 μ_r	1
LT-GaAs 带隙 E_g/eV	1.42
LT-GaAs 亲和力 E_e/eV	4.07
LT-GaAs 电子迁移率 μ_n/($\mathrm{cm^2\cdot V^{-1}\cdot s^{-1}}$)	1 000
LT-GaAs 空穴迁移率 μ_p/($\mathrm{cm^2\cdot V^{-1}\cdot s^{-1}}$)	100
LT-GaAs 电子寿命 τ_n/ps	0.1
LT-GaAs 空穴寿命 τ_p/ps	0.4
激光器功率 P/mW	30
激光脉冲重复率 f_0/MHz	80
激光波长 λ/nm	780
激光脉冲宽度 δ_t/fs	50
激光脉冲延迟 t_0/fs	150
激光束腰 w_0/μm	20

3　光电导天线不同方向的辐射性能

3.1　抗反射涂层对太赫兹辐射强度的影响

由式(3)可知，衬底吸收的激光功率对载流子的生成率影响很大，吸收的激光功率越大，产生的载流子越多。而砷化镓表面对 780 nm 波长飞秒激光的反射率高达 33%，使得飞秒激光能量损失严重。为解决此问题，该光电导天线结构在电极间隙的砷化镓表面加入抗反射薄膜(ACR)，以增大衬底对激光的吸收。

根据单层抗反射涂层原理，当抗反射涂层的折射率 $n=\sqrt{n_1 n_2}$ 时(其中，n_1 为空气折射率，n_2 为砷化镓衬底的折射率)，衬底能够实现对入射光的 100%吸收[13]，故本光电导天线结构的抗反射涂层选用氮化硅(Si_3N_4)。图2为对于不同厚度(h_1)的 ACR，砷化镓衬底对飞秒激光的反射，可以看出，ACR 的最佳厚度为 0.1 μm。

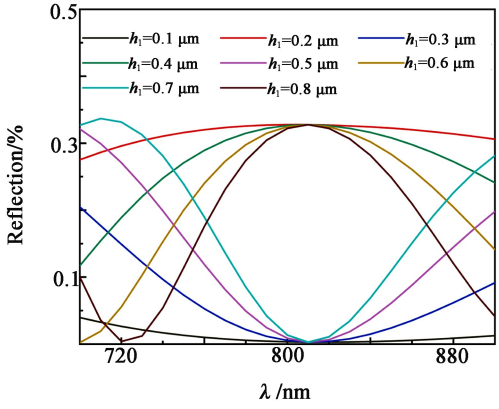


图 2　加入不同厚度 ACR 后，衬底对飞秒激光的反射

添加了 ACR 的 PCA 与传统 PCA 相比，衬底对光的反射系数如图 3 所示。从图中可以看出，当 Si_3N_4 抗反射膜的厚度为 0.1 μm 时，LT-GaAs 表面对波长为 780 nm 激光的光学反射率从 33%减少至 0.573%，使得 LT-GaAs 层内部有更高的光功率，可产生更大的光电流。

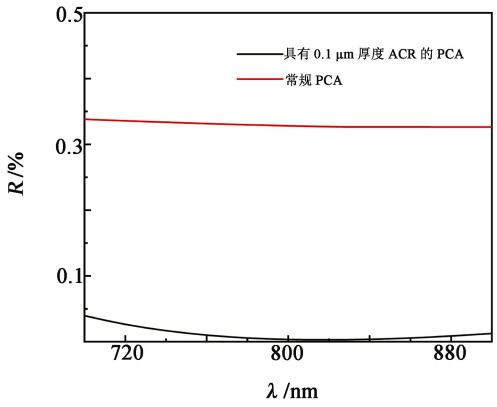
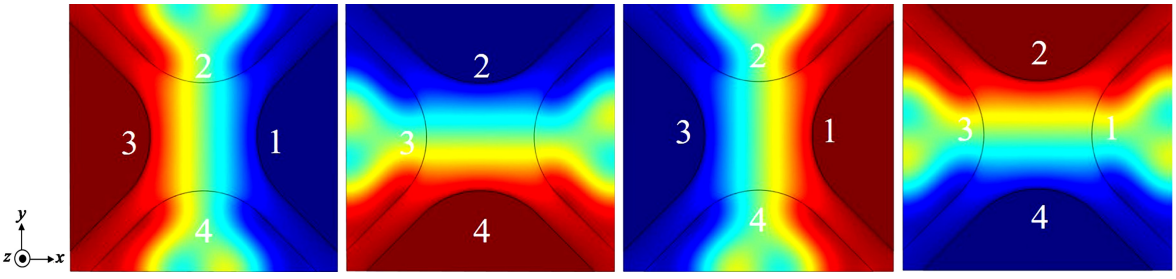


图 3　常规 PCA 和具有 Si_3N_4-ACR 的 PCA 之间的反射率对比

3.2　天线水平垂直偏振的太赫兹辐射性能

本文设计了四个电极，依次在电极 1 和 3 形成的偶极子天线与电极 2 和 4 形成的偶极子天线上施加偏压，改变了太赫兹波的辐射方向。图 4 为两个电极施加偏置电压时的电场分布图。其中，图 4(a)中电场分布对应的光电流方向为 $\theta=0°$。将这种电场分布以 90°为增量逆时针旋转，两电极输出的光电流方向也相应旋转。仿真时设置的静态电场最大值应低于 GaAs 的击穿场[14]，因而将偏压设为 20 V。



(a)　1 接地、3 接正　　(b)　2 接地、4 接正　　(c)　3 接地、1 接正　　(d)　4 接地、2 接正

图 4　两电极施加偏压下的电场分布有限元模拟结果

图 4 的(a)～(d)的电场分布分别对应的光电流方向为 $\theta=0°,90°,180°,270°$。当电极之间的间隙远远小于所辐射出的太赫兹脉冲中心波长时，太赫兹的辐射电场正比于光电流[15]。

$$E_{THz}(r,\beta,t)=\frac{\sin\beta}{4\pi\varepsilon_0 c^2 r}\frac{\partial J(r,t)}{\partial t} \tag{15}$$

其中，β 为入射激光与光电导天线表面的夹角，在该结构的仿真中，确定 $\beta=90°$。

图 5 为常规 PCA 和加入抗反射涂层的 PCA 在 $\theta=0°,90°,180°,270°$方向的太赫兹辐射对比。

由图 5 看出，相对于常规 PCA，添加 ACR 后，

其太赫兹辐射强度增加了 30%左右，其贡献来自于抗反射涂层的加入，使得衬底对飞秒激光的吸收率提高了 30%。

将天线辐射出的太赫兹信号进行快速傅里叶变换，得到太赫兹频谱，图 6 为常规 PCA 和加入 ACR 的 PCA 在垂直方向($\theta=90°/270°$)和水平方向($\theta=0°/180°$)的太赫兹频谱。

由图 6 可知，垂直方向($\theta=90°/270°$)和水平方向($\theta=0°/180°$)太赫兹波的频谱带宽达到 10 THz。

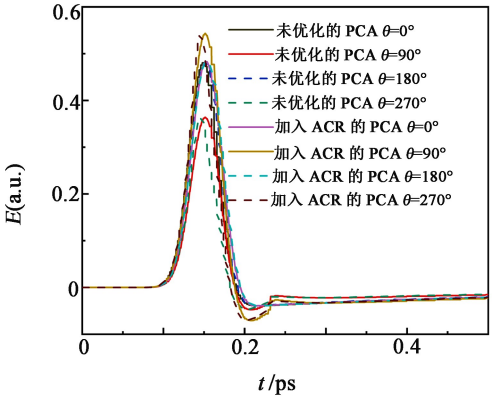


图 5 光电导天线在不同 θ 值下的辐射场强

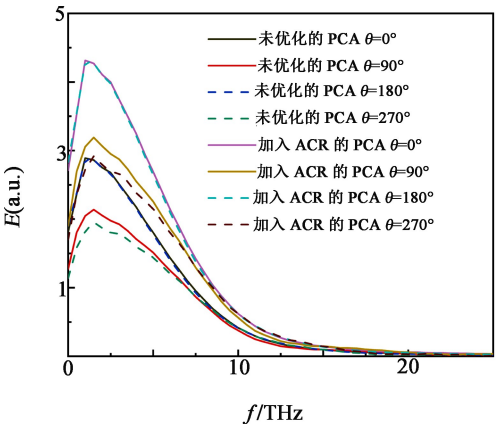
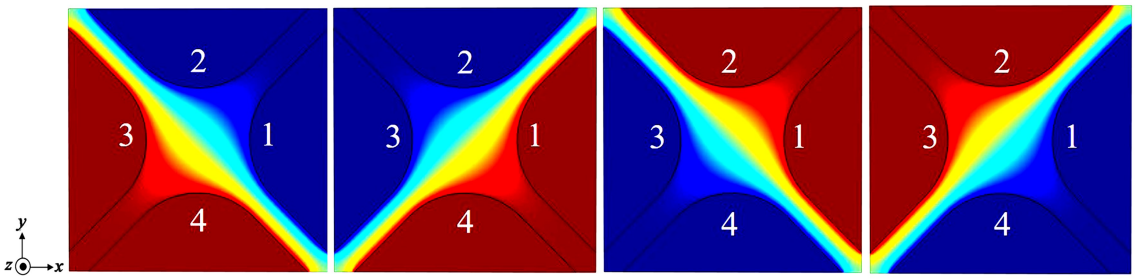


图 6 光电导天线在不同 θ 值下的太赫兹频谱

3.3 天线斜偏振的太赫兹辐射性能

本文设计的光电导天线具有四个电极，可同时对两个电极施加偏置电压，也可同时对四个电极施加偏置电压。图 7 为在四个电极同时施加偏置电压时的电场分布图，图 7(a)中电场分布对应的光电流方向为 $\theta=45°$。将这种电场以 90°为增量逆时针旋转，四个电极输出的光电流方向也相应地旋转。



(a) 1,2 接地、3,4 接正 (b) 2,3 接地、1,4 接正 (c) 3,4 接地、1,2 接正 (d) 1,4 接地、2,3 接正

图 7 四电极施加偏压下的电场分布有限元模拟结果

图 8 为常规 PCA 和加入 ACR 的 PCA 在 $\theta=45°,135°,225°,315°$所对应的光电导天线的太赫兹辐射强度。

分析图 8 和图 5 可知，本设计光电导天线在 θ 值为 45°,135°,225°,315°的太赫兹辐射强度相较于在 θ 值为 0°,90°,180°,270°时提高了 30%。在其他参数相同的条件下，由式(16)可得太赫兹的辐射强度与电极的长度有关[16]：

$$E_{\mathrm{THz}}(r,t)=\frac{l_{\mathrm{e}}}{4\pi\varepsilon c^{2}}\frac{\partial J(r,t)}{\partial t} \tag{16}$$

其中，l_{e} 为电极长度。

而由图 4 和图 7 可知，使用四个电极施加偏压时的电极长度较两个电极施加偏压时更长。

将偏振在 θ 值为 45°,135°,225°,315°方向的光电导天线辐射出太赫兹信号进行快速傅里叶变换，获得图 9 所示的太赫兹波频谱信号。

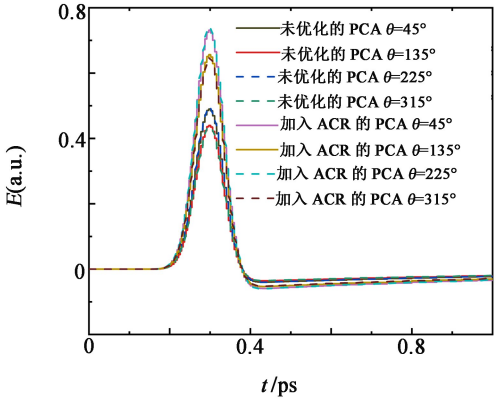


图 8 光电导天线在不同 θ 值下的太赫兹时域谱

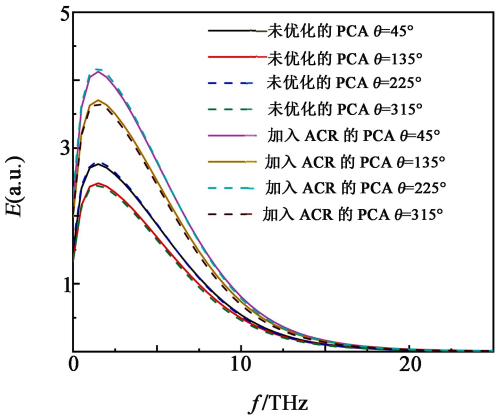


图 9　光电导天线在不同 θ 值下的太赫兹频谱

由图 6 和图 9 可知，该光电导天线辐射的太赫兹波在 8 个方向的辐射带宽均达 10 THz，源于所选材料为超短寿命载流子的 LT-GaAs，其载流子寿命极低，复合速度快，所辐射出的太赫兹波的带宽高。

4　结论

本文提出了一种偏振可调的太赫兹光电导天线，通过对电极依次施加偏置电压，使其逐步产生不同方向的线偏振太赫兹波。结果表明，在两个电极上施加偏置电压，可在水平垂直方向逐步辐射出线偏振太赫兹波；在四个电极上施加偏置电压，可在 $y=x$ 和 $y=-x$ 方向逐步辐射出线偏振太赫兹波。但两种施加偏压的方法所辐射出的太赫兹波强度不同，四个电极接偏压比两个电极接偏压的电极长，辐射出的太赫兹波更强。该天线还添加了 Si_3N_4-ACR，相比于未添加 ACR 的天线，其辐射强度在每个偏振方向都提高了 30%，辐射带宽高达 10 THz。本文提出的偏振可调太赫兹光电导天线在研究太赫兹波段光学各向异性物质的光谱方面具有潜在的应用价值。

参考文献：

[1] Burford N M, El-Shenawee M O. Review of terahertz photoconductive antenna technology[J]. Opt. Eng., 2017, 56(1): 010901.

[2] Bashirpour M, Forouzmehr M, Hosseininejad S E, et al. Improvement of terahertz photoconductive antenna using optical antenna array of ZnO nanorods[J]. Sci. Rep., 2019, 9(1): 1-8.

[3] 沈　涛，潘　武，李　燚，等. 基于超材料的太赫兹超窄带吸收器设计及特性分析[J]. 半导体光电，2020，41(5)：648-651.
Shen Tao, Pan Wu, Li Yan, et al. Design and characteristics analysis of terahertz ultra-narrow band absorber based on metamaterial[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(5): 648-651.

[4] Prajapati, Jitendra, Bharadwaj, et al. Circuit modeling and performance analysis of photoconductive antenna[J]. Opt. Commun., 2017, 394: 69-79.

[5] Castro Camus E, Johnston M B. Extraction of the anisotropic dielectric properties of materials from polarization-resolved terahertz time-domain spectra[J]. J. Opt. A: Pure Appl. Opt., 2009, 11(10): 105206.

[6] Bulgarevich Dmitry S, Watanabe Makoto, Shiwa Mitsuharu, et al. Polarization-variable emitter for terahertz time-domain spectroscopy[J]. Opt. Express, 2016, 24(24): 27160-27165.

[7] Hirota Y, Hattori R, Tani M, et al. Polarization modulation of terahertz electromagnetic radiation by four-contact photoconductive antenna[J]. Opt. Express, 2006, 14(10): 4486-4493.

[8] Bulgarevich D S, Watanabe M, Shiwa M, et al. Polarization-variable emitter for terahertz time-domain spectroscopy[J]. Opt. Express, 2016, 24(24): 27160-27165.

[9] Bashirpour M, Ghorbani S, Kolahdouz M, et al. Significant performance improvement of a terahertz photoconductive antenna using a hybrid structure[J]. RSC Adv., 2017, 7(83): 53010-53017.

[10] Namiot V A, Shchurova L Y. On the generation of electromagnetic waves in the terahertz frequency range[J]. Phys. Lett. A, 2011, 375(28/29): 2759-2766.

[11] Criollo C A, ávila A. Simulation of photoconductive antennas for terahertz radiation[J]. Ing. Invest, 2015, 35(1): 60-64.

[12] Zou X, Dong J, Zhang K, et al. The piezotronic effect on carrier recombination processes in InGaN/GaN multiple quantum wells microwire[J]. Nano Energy, 2021, 87: 106145.

[13] Saint-André S, Rodríguez D, Perillo P, et al. TiO_2 nanotubes antireflection coating design for GaAs solar cells[J]. Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 2021, 230: 111201.

[14] Prajapati J, Bharadwaj M, Chatterjee A, et al. Circuit modeling and performance analysis of photoconductive antenna[J]. Opt. Commun., 2017, 394: 69-79.

[15] Dong C, Shi W, Xue F, et al. Multi-energy valley scattering characteristics for a Si-GaAs-Based terahertz photoconductive antenna in linear mode[J]. Appl. Sci., 2020, 10(1): 7.

[16] 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.

作者简介：

潘　武(1966—)，男，四川省大英县人，教授，主要从事太赫兹技术、超介质材料及应用研究；

刘博文(1995—)，女，四川省雅安市人，硕士研究生，研究方向为太赫兹光电导天线。