

偏振可调的太赫兹砷化镓光电导天线阵列研究

董陈岗^{1,2}, 施卫^{2*}, 韩小卫^{2,3}, 王志全^{1,2}, 王欣¹, 张修兴¹

(1. 渭南师范学院物理与电气工程学院, 陕西渭南714099;

2. 西安理工大学陕西省超快光电技术与太赫兹科学重点实验室, 陕西西安710048;

3. 陕西铁路工程职业技术学院, 陕西渭南714000)

摘要:光电导天线阵列作为太赫兹辐射的重要发射器件,传统天线因固定偏振状态而限制了其应用的灵活性。针对这一问题,设计并研究了一种偏振可调的四元太赫兹砷化镓光电导天线阵列,旨在增强其在应用中的多功能性和适用性。该天线阵列通过精细控制阵元的激励方式,采用同相不等幅激励和90°相差激励两种方式,实现线偏振和圆偏振太赫兹波的精确调控。结果表明,采用同相不等幅激励时,实现了线偏振太赫兹波在360°范围内的灵活调控;采用90°相差激励时,产生了圆偏振太赫兹波,其-10 dB阻抗带宽范围为0.057~1.013 THz,相对带宽为178.69%;轴比带宽范围为0.815~0.947 THz,相对带宽为14.98%。

关键词:光电导天线阵列;太赫兹辐射;激励调控

中图分类号:O441.4

文献标识码:A

The research on polarization-tunable terahertz GaAs photoconductive antenna array

DONG Chen-Gang^{1,2}, SHI Wei^{2*}, HAN Xiao-Wei^{2,3}, WANG Zhi-Quan^{1,2},
WANG Xin¹, ZHANG Xiu-Xing¹

(1. School of Physics and Electrical Engineering, Weinan Normal University, Weinan 714099, China;

2. Key Laboratory of Ultrafast Optoelectronic and Terahertz Science, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

3. Shaanxi Railway Institute of Vocational Technology, Weinan 714000, China)

Abstract: As an important emitter for terahertz radiation, photoconductive antenna arrays are limited in their application flexibility due to the fixed polarization state of traditional antennas. In response to this issue, we have designed and studied a polarization-adjustable four-element terahertz gallium arsenide photoconductive antenna array, aiming to enhance its versatility and applicability in various applications. By precisely controlling the excitation of each element, the antenna array can achieve precise control of linearly and circularly polarized terahertz waves through in-phase unequal amplitude excitation and phase difference excitation. The results show that with in-phase unequal amplitude excitation, flexible control of linearly polarized terahertz waves within a 360-degree range can be achieved. With a 90-degree phase difference excitation, circularly polarized terahertz waves are generated, with a -10 dB impedance bandwidth range of 0.057 THz to 1.013 THz and a relative bandwidth of 178.69%. The axial ratio bandwidth range is 0.815 THz to 0.947 THz, with a relative bandwidth of 14.98%.

Key words: photoconductive antenna array, terahertz radiation, excitation regulation

收稿日期:2024-07-08,修回日期:2024-10-01

Received date:2024-07-08, revised date:2024-10-01

基金项目:国家自然科学基金(62371391);陕西省科技厅基金青年项目(2023-JC-QN-0676);陕西省教育厅基金一般专项(21JK0632);渭南市科学技术局基金重点研发计划项目(2022ZDYFJH-123)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (62371391), the Natural Science Foundation of Shaanxi Provincial Department of Science and Technology (2023-JC-QN-0676), Research Foundation of Education Bureau of Shaanxi Provincial (21JK0632), Key Research and Development Plan Project of Science and Technology Bureau of Weinan (2022ZDYFJH-123)

作者简介(Biography):董陈岗(1987-),男,陕西渭南人,博士,主要从事太赫兹光电导器件及无损检测等研究. E-mail: dongchengang@wnu.edu.cn

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: swshi@mail.xaut.edu.cn

引言

太赫兹波(Terahertz, THz)作为电磁波谱中的一个重要频段,其频率范围在 0.1 ~ 10 THz 对应的波长为 30 ~ 3 000 μm ,处于微波波段与红外波段之间,具有许多独特的物理特性和广泛的应用潜力^[1-4]。相较于其他频段的电磁波,太赫兹波具有低能量、无电离辐射、穿透力强等特点,使其在无损检测、医学成像、材料检测、通信传输等方面具有独特的优势^[5-8]。

砷化镓(Gallium Arsenide, GaAs)作为一种典型的光电导材料,具有快速的光电响应速度和良好的光电导特性,因此在太赫兹波段的应用中表现出良好的性能。通过调控 GaAs 材料的光电导性质和天线结构设计,可以实现对太赫兹波段信号的高效接收和发射,为太赫兹技术的进一步应用提供了重要的技术支持^[9-11]。然而,传统的 GaAs 光电导天线结构通常具有固定的偏振特性,这限制了太赫兹系统在复杂环境中的适应能力和灵活性。因此,设计一种偏振可调的太赫兹砷化镓光电导天线阵列,具有重要的科学意义和工程应用价值。

利用多元光电导天线阵列辐射偏振可调的太赫兹波,国内外专家以此为基础开展了一系列的研究工作。2016年, S. Dmitry 等^[12]设计了一款 8 元光电导天线阵列,通过同步偏置电压和单偏光片,可实现线性偏振太赫兹电场以 45° 为旋转步长的连续旋转。2019年, C. D. W. Mosley 等^[13]设计了一种多元交叉光电导辐射器,通过改变施加到水平和垂直发射像元的相对偏置电压,控制远场太赫兹辐射的偏振角。2020年, D. Warmowska 等^[14]设计了一种带有缝隙辐射和一层极化贴片的共源天线阵列,中心频率为 350 GHz,研究表明, 2×2 和 4×4 天线阵列均能辐射圆极化波,增益分别为 13.8 dBic 和 18.4 dBic。2022年,施卫等^[15]通过实验测试了 PCA 回路中的电感对其辐射太赫兹波的时域谱和频谱的影响,研究表明,回路中的电感对光电导天线的辐射太赫兹波没有明显影响。2023年, Pooja Bundel 等^[16]设计了一种基于三层金属网格薄膜圆偏振器的光电导天线,测得的 3 dB 轴比带宽为 54.7%,频带范围为 0.57 ~ 1.00 THz。2023年, Bai J 等^[17]设计一种超宽带太赫兹反射式超材料偏振转换器,在中心频率 7.5 THz,带宽 5.0 THz 范围内实现线偏振和圆偏振太赫兹波高效转换,偏振转换率大于 99%。2023年,施卫等^[18]使用两个相互垂直的

光电导天线构建了 1×2 砷化镓光电导天线阵列,且消除了各个阵元间反向电流的影响,通过调控各个阵元的偏置电压,获得了不同偏振方向的脉冲太赫兹波。

在上述工作的基础上,本文设计并研究了一种偏振可调的四元太赫兹砷化镓光电导天线阵列,通过调节各阵元的激励幅值和相位,实现了辐射太赫兹波从线偏振、椭圆偏振到圆偏振的精确调控。研究表明,在同相不等幅、等幅不同相和不同相不等幅的激励模式下,辐射的太赫兹波主要表现为椭圆偏振光;在同相不等幅激励模式下,通过调节各阵元的激励幅值,实现了线偏振太赫兹波的偏振角调谐;在 90° 相差激励模式下,成功实现了圆偏振太赫兹波的辐射。

1 理论分析

1.1 GaAs 材料理论计算

Drude 模型,也称为 Drude 自由电子色散模型,是由 Paul Drude 在 1900 年提出的,旨在解释电子在固体(特别是金属)中的输运性质,该模型中有三个假设:(1)自由电子与其他电子或者原子核之间没有电磁相互作用;(2)将自由电子视为带点的小球,在外力作用下,其运动过程遵循牛顿运动定律;(3)自由电子在运动过程中与周围原子核、杂质或者晶格缺陷之间发生弹性碰撞。在 Drude 模型的基础上计算 GaAs 材料在太赫兹波段内的光学特性(折射率、介电常数和消光系数等),将其结果作为模拟计算的设定参数^[19,20]。计算过程如下:

GaAs 半导体材料的参数分别是:高频极限介电常数 $\epsilon_\infty \approx 12.9$,载流子浓度 $n \approx 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,电子有效质量 $m^* \approx 0.067 m_e$,弛豫时间 $\tau \approx 10^{-12} \text{ s}$,碰撞频率 $\gamma_D = 1/\tau$,天线中心频率为 1 THz 时,其 $\omega = 10^{12} \text{ rad/s}$ 。根据自由电子的电动响应,得到其相对复介电常数的 Drude 模型表达式为:

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma_D} \quad , \quad (1)$$

其中, $\omega_p = \sqrt{ne^2/m^*\epsilon_0}$ 为等离子体频率, $\epsilon_r(\omega)$ 是频率为 ω 处的复介电常数,其实部和虚部分别表示如下:

$$\epsilon_1(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma_D^2} \quad , \quad (2)$$

$$\epsilon_2(\omega) = \frac{\omega_p^2\gamma_D}{\omega(\omega^2 + \gamma_D^2)} \quad . \quad (3)$$

在 GaAs 半导体材料复介电常数实部和虚部计算的基础上, 进一步计算其复折射率, 其中包括实部折射率和虚部消光系数, 表达式如下所示:

$$n(\omega) = \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon_1(\omega)^2 + \varepsilon_2(\omega)^2} + \varepsilon_1(\omega)}{2}}, \quad (4)$$

$$\kappa(\omega) = \sqrt{\frac{\sqrt{\varepsilon_1(\omega)^2 + \varepsilon_2(\omega)^2} - \varepsilon_1(\omega)}{2}}. \quad (5)$$

在天线中心频率为 1 THz 时, 根据 Drude 模型计算的 GaAs 材料的光学系数计算结果如下所示: 折射率 $n(\omega)$ 约为 3.37, 消光系数 $\kappa(\omega)$ 约为 0.43, 复介电常数实部 $\varepsilon_1(\omega)$ 约为 11.15, 虚部 $\varepsilon_2(\omega)$ 约为 2.93。这些数值提供了 GaAs 在太赫兹频段内的光学特性, 可以用于设计和分析太赫兹器件和系统, 实际数值可能会因材料的具体参数不同而有所变化。

1.2 线偏振太赫兹波产生机理

根据简谐振动矢量的合成可知, 线偏振光、椭圆偏振光和圆偏振光可以看作由两个振动相互垂直、相位差恒定的线偏振光叠加而成, 为使天线阵列辐射可调谐线偏振光, 对其阵元进行不等幅同相激励, 初相位都为 0。假设四元太赫兹砷化镓光电导天线阵列的各阵元均采用离散端口激励, 分别标记为 Port1–Port4, 且相邻阵元之间的间隙方向互相垂直, 远场辐射的总电场分量可以表示为:

$$E_x = (A + C) \cos(\omega t), \quad (6)$$

$$E_y = (B + D) \cos(\omega t + \Delta\phi), \quad (7)$$

式中, $\Delta\phi$ 是两列光波的相位差, 类比于两个相互垂直简谐振动的合成可知, E_x 和 E_y 两个光振动合成矢量端点的轨迹方程为:

$$\left(\frac{E_x}{A+C}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{B+D}\right)^2 - 2 \cdot \frac{E_x}{A+C} \cdot \frac{E_y}{B+D} \cos \Delta\phi = \sin^2 \Delta\phi. \quad (8)$$

当 $\Delta\phi \neq 0, \pi$ 时, 两线偏振光合成结果为椭圆偏振光, 由于激励信号的相位、幅值在实验时的控制精度较低, 导致导致四元光电导天线阵列辐射的太赫兹波均为椭圆偏振光; 当 $\Delta\phi = 0, \pm\pi$ 时, 两线偏振光合成结果为线偏振光; 当 $\Delta\phi = \pm\pi/2$ 时, 两线偏振光合成结果为圆偏振光。因此, 将四元光电导天线阵列的激励设置为同相不等幅, 通过改变各阵元激励幅值, 可以实现远场太赫兹波的电场调谐。假设线偏振的目标方向与 x 轴的夹角为 θ , 则太赫兹波电场在 x 轴和 y 轴的分量满足:

$$\tan(\theta) = \frac{E_y}{E_x} = \frac{B+D}{A+C}. \quad (9)$$

利用公式(8), 根据目标方向角度 θ , 调整各阵元激励幅值, 使得线偏振太赫兹波在 $0 \sim 360^\circ$ 范围内连续可调。为了简化处理, 将各阵元激励幅值进行归一化处理, 设定 $A + C = 2$, 并根据目标方向角计算 $B + D$, 结果如表 1 所示。

表 1 不同偏角下的激励幅值(归一化)

Table 1 Excitation amplitude at different deflection angles (normalized)

Angle	A + C	B + D	A	C	B	D
0°	2.0000	0.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000
30°	2.0000	1.1547	1.0000	1.0000	0.5774	0.5774
60°	2.0000	3.4641	1.0000	1.0000	1.7321	1.7321
90°	0.0000	2.0000	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000
120°	2.0000	-3.4641	1.0000	1.0000	-1.7321	-1.7321
150°	2.0000	-1.1547	1.0000	1.0000	-0.5774	-0.5774
180°	2.0000	0.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000

1.3 圆偏振太赫兹波产生机理

为了在四元太赫兹砷化镓光电导天线阵列产生稳定的圆偏振太赫兹波, 首先需要保证相邻阵元在物理空间上相互正交排列; 其次, 给各阵元给予相同振幅的激励信号, 确保在正交方向上辐射的太赫兹波电场强度相等, 且主瓣方向一致; 最后, 在物理空间上相互正交排列的各阵元的同频激励信号须保持 90° 的相位差。假设激励信号为正弦波形式, 第 1 个、2 个 H 型偶极子天线的电场分量分别表示为:

$$E_x(t) = E_0 \cos(\omega t), \quad (10)$$

$$E_y(t) = E_0 \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = E_0 \sin(\omega t), \quad (11)$$

式中, E_0 是振幅, ω 是角频率, t 是时间。将这两个正交且具有 90° 相位差的电场分量叠加后, 将产生圆极化电场为:

$$E(t) = E_x \hat{i} + E_y \hat{j} = E_0 \cos(\omega t) \hat{i} + E_0 \sin(\omega t) \hat{j}. \quad (12)$$

从公式(12)中可知, 电场矢量 $E(t)$ 在 xoy 平面上以角速度 ω 旋转, 形成一个圆极化波。如果分别取时间 $t = 0, T/4, T/2, 3T/4$ 时, 其中 $T = 2\pi/\omega$, 电场矢量 $E(t)$ 随着时间在 xoy 平面上逆时针旋转, 形成左旋圆极化波。如果需要形成右旋圆极化波, 只需将 $E_y(t)$ 的相位差改成 -90° 即可。

2 天线结构及仿真计算

四元太赫兹砷化镓光电导天线阵列结构主要包括: 基底材料、欧姆电极及绝缘保护层。其中基

底材料选用半绝缘砷化镓,为了提高光电导天线辐射太赫兹波功率,将基底材料进行减薄处理,厚度为 $400\text{ }\mu\text{m}$,实验测得SI-GaAs材料的载流子迁移率 $\mu \geq 5\,000\text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$,载流子浓度 $n \approx 10^{15}\text{ cm}^{-3}$,暗态电阻 $\rho \geq 5 \times 10^7\text{ }\Omega \cdot \text{cm}$ 。由于计算机资源的限制,仿真计算时基底材料的厚度设置为 $15\text{ }\mu\text{m}$,天线结构及激励方向如图1所示。

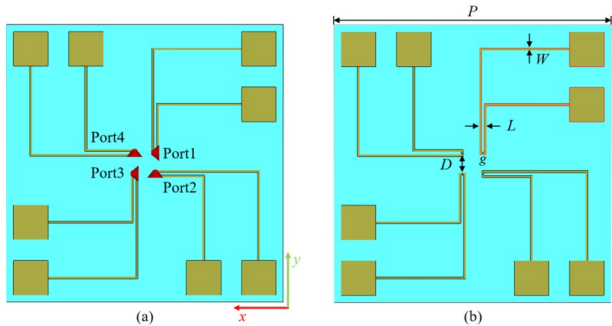


图1 基于双折射晶体的光学脉冲微分实验装置图
Fig. 1 Experimental setup for light pulse differentiation based on birefringent crystal

天线阵列的设计和优化通过 CST Microwave Studio进行仿真计算,优化的参数如表2所示。仿真中采用 Drude 模型对天线基底材料进行参数设置,

天线电极选用完美导体近似(PEC),激励源选择“离散端口”(Discrete Port)进行激励,最后采用时域求解器(Time Domain Solver)进行计算。

表2 天线结构参数

Parameters	Antenna period P	Antenna length L	Transmission line width W	Antenna Gap g	Element spacing D
Dimensions/ (μm)	4000	100	30	5	300

3 结果与讨论

3.1 线偏振太赫兹波

为实现太赫兹波线偏振连续可调,将各阵元激励设置为同相不等幅模式(初相位均为0),通过改变各阵元激励幅值,可以灵活调节远场太赫兹波的偏振电场,实现阵列天线的定向辐射和偏振态调控。结果如图2所示,分别为 30° 、 60° 、 120° 和 150° 线偏振调节(以 xoy 面 x 轴为基准线),其中绿色曲线为 x 方向上的太赫兹波电场强度分量、蓝色曲线为 y 方向上的太赫兹波电场强度分量,红色曲线则为天线阵列辐射太赫兹波线偏振光的电场方向。

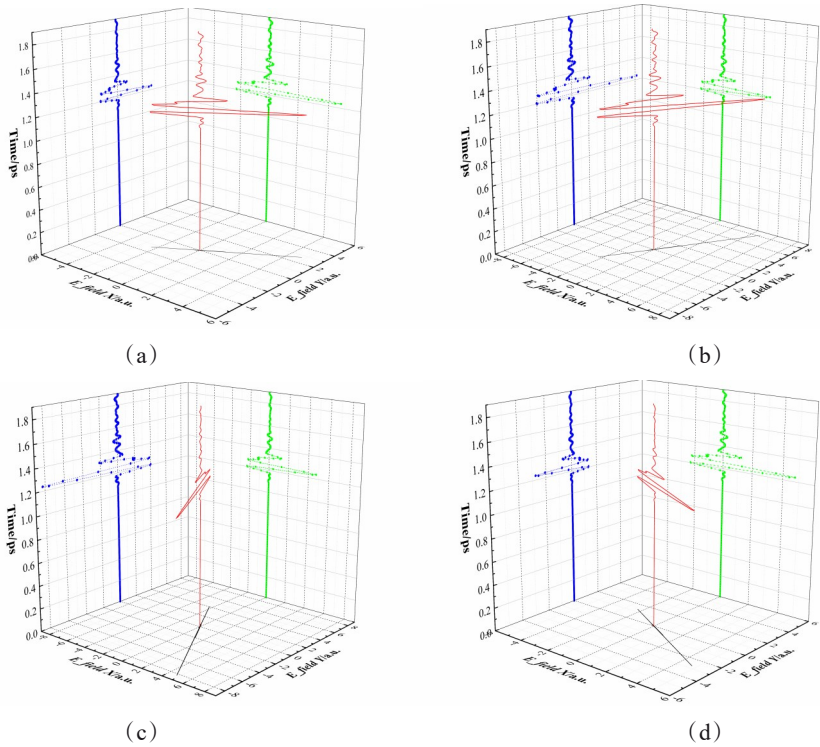


图2 阵列天线的线偏振太赫兹波调控
Fig. 2 Linearly polarized terahertz wave control of array antenna: (a) 30° ; (b) 60° ; (c) 120° ; (d) 150°

从图2可知,当Port1的幅值A和Port3的幅值C均设置为1、当Port2的幅值B和Port4的幅值D均设置为0.5774时,四元光电导天线阵列辐射的太赫兹辐射线偏振光电场方向与 x 轴正方向的夹角 $\theta = 30^\circ$,如图2(a)所示;当Port1的幅值A和Port3的幅值C均设置为1、当Port2的幅值B和Port4的幅值D均设置为1.7321时,四元光电导天线阵列辐射的太赫兹辐射线偏振光电场方向与 x 轴正方向的夹角 $\theta = 60^\circ$,如图2(b)所示;当Port1的幅值A和Port3的幅值C均设置为1、当Port2的幅值B和Port4的幅值D均设置为-1.7321时,四元光电导天线阵列辐射的太赫兹辐射线偏振光电场方向与 x 轴正方向的夹角 $\theta = 120^\circ$,如图2(c)所示;当Port1的幅值A和Port3的幅值C均设置为1、当Port2的幅值B和Port4的幅值D均设置为-0.5774时,四元光电导天线阵列辐射的太赫兹辐射线偏振光电场方向与 x 轴正方向的夹角 $\theta = 150^\circ$,如图2(d)所示。

3.2 圆偏振太赫兹波

在四元光电导天线阵列设计中,通过优化阵元间距和排列方式,可以显著改善阵列的耦合效应和互调干扰特性,从而改善阵列天线的辐射特性,包括主瓣方向、辐射效率和波束宽度等,从而满足太赫兹时域光谱系统的性能要求。天线设计时,物理间距 $D = 300 \mu\text{m}$,排列方式按照正方形顶点排列,使得各阵元间的物理距离和电气间距相等,保证太赫兹波主瓣方向一致性。仿真计算时给阵元1施加激励,探测各阵元的 S 参数来判断阵元间的互耦强度,结果如图3所示。从图3中可以得到,天线阵元1中施加的激励幅值峰峰值约为1.60,而在阵元2、阵元3及阵元4中检测的响应输出信号峰峰值约为0.54,根据测量的输出信号和激励信号,测得的 S 参数约为-9.43 dB,表明阵元间具有较好的隔离,耦合强度较小。

阻抗带宽(impedance bandwidth)是天线在一定频率范围内反射系数小于-10 dB的频率范围,意味着天线的输入阻抗与馈电系统的特性阻抗匹配良好,更多的输入功率被天线辐射出去,图4为光电导天线阵列仿真的 S 参数。由图4可知,仿真的-10 dB阻抗带宽为0.057~1.013 THz,相对带宽为178.69%,中心频率为0.535 THz,这表明光电导天线阵列在较宽的频率范围内能够保持良好的阻抗匹配和高效辐射特性,适用于多种宽频带太赫兹应用,特别是在现代通信和成像系统中具有重要的应

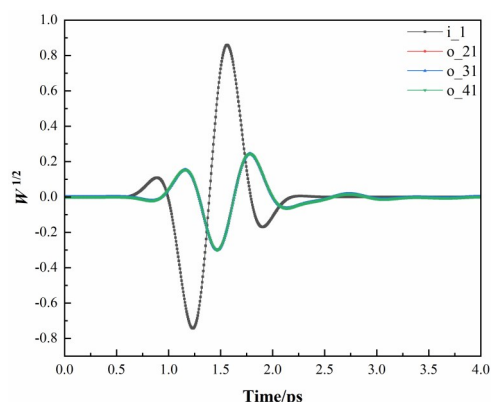


图3 阵元间的互耦和互调干扰性能

Fig. 3 Mutual coupling and inter-modulation interference in the antenna array

用前景。

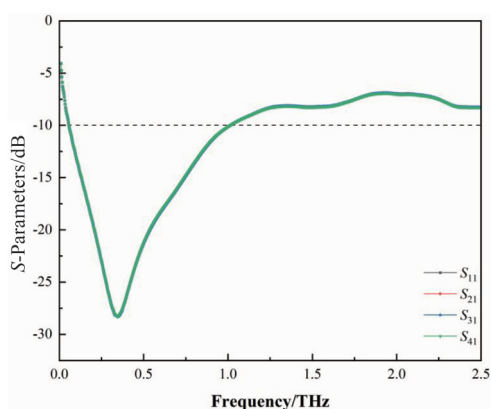


图4 天线阵列的 S 参数

Fig. 4 S -parameters of photo-conductive antenna array

轴比(axial ratio, AR)是指天线在工作频率范围内维持圆极化特性的频率范围,理想的圆极化天线的轴比应为1 dB(或0 dB)。实际应用中,当轴比小于或等于3 dB时,通常认为天线保持了良好的圆极化特性,图5为四元太赫兹光电导天线阵列轴比曲线。由图5可知,同相激励(in-phase excitation)时,频段内无法保持良好的圆极化特性,轴比均大于3 dB;而在 90° 相差激励(quadrature phase excitation)时,仿真的3 dB轴比带宽为0.815~0.947 THz,相对带宽为14.98%,中心频率为0.881 THz,表明在该频率范围内,光电导天线阵列维持着良好的圆极化性能。

图6给出了四元光电导天线阵列在轴比中心频率处的天线增益及方向图。由图6(a)天线增益可知,天线阵列在轴比中心频率0.881 THz处的主瓣增益为-5.399 dBi,表明在主要辐射方向上的能量

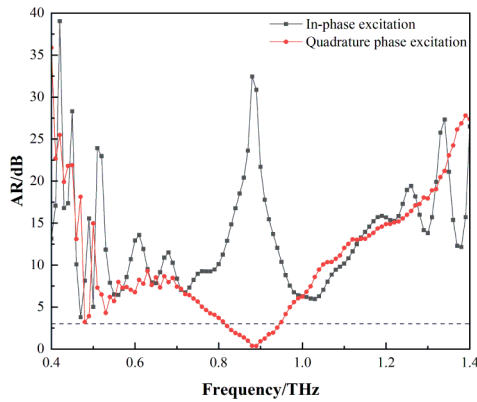


图5 天线阵列的轴比

Fig. 5 AR of photo-conductive antenna array

较低,可能受限于天线结构和基底材料的电磁特性。从6(b)天线电场方向图可知,天线阵列的主瓣方向为 z 轴正方向($\theta = 0^\circ$),这一方向上辐射强度最高,显示出天线在该方向上具有最佳的辐射性能;同时3dB角宽为28.9 deg.,较宽的3 dB角宽意味着天线阵列辐射的太赫兹波能量在更大范围内分布,需要优化设计以提高定向性;旁瓣电平为-3.1 dB,这一较高的旁瓣电平可能会导致不必要的辐射能量散射,影响辐射效率。

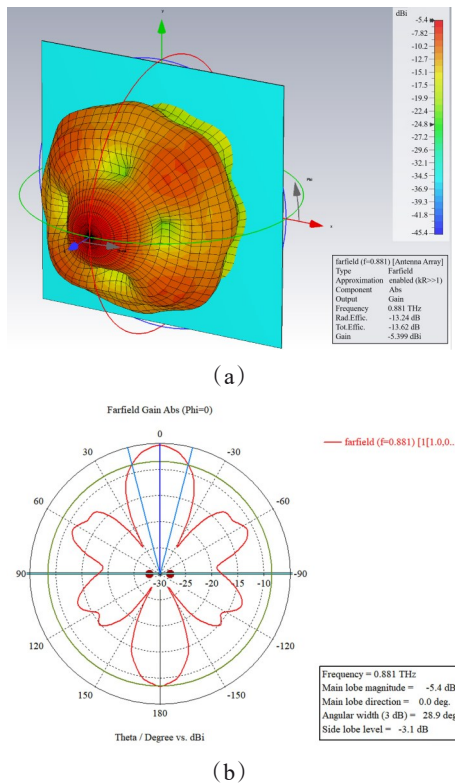


图6 天线阵列的增益和方向图仿真结果

Fig. 6 Gain and radiation pattern simulation results of the antenna array: (a) gain; (b) radiation pattern

图7为光电导天线阵列在不同激励模式下的频谱图,通过分析该图,无论是同相激励还是相差激励,光电导天线阵列的太赫兹频谱宽度均大于2.5 THz,这表明在设计宽带太赫兹天线时,激励模式对频谱宽度的影响较小。需要注意的是,在低频波段0.07 THz和0.18 THz,90°相差激励模式下所辐射的太赫兹电场相比同相激励会出现较大的衰减,这种现象可能是由于相差激励在低频波段下,阵元间的相位差导致电场的相互干涉,从而降低了整体辐射强度。

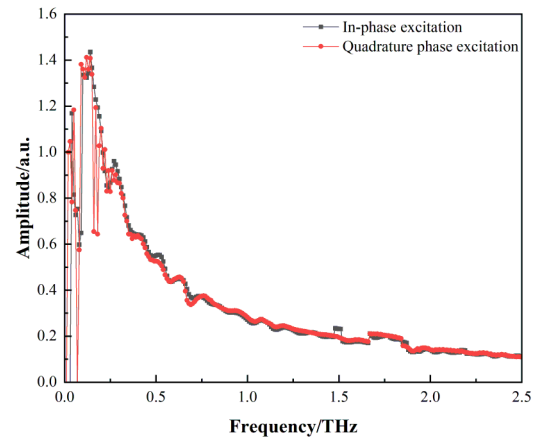


图7 光电导天线阵列的频谱图

Fig. 7 Spectrum diagram of photo-conductive antenna array

4 结论

本文聚焦于传统光电导天线阵列在太赫兹波辐射中因固定偏振状态导致的应用灵活性受限问题,设计了一种偏振可调的四元太赫兹砷化镓光电导天线阵列,通过精细调控天线阵列的激励方式,成功实现对太赫兹波偏振态的精确调控。实验结果表明,传统的光电导天线阵列,由于各阵元激励幅值、相位及泵浦激光的影响,导致其辐射的太赫兹波多为椭圆偏振光;采用同相不等幅激励,获得了360°范围内任意角度的线偏振太赫兹波。采用90°相差激励方式,产生了圆偏振太赫兹波,其-10 dB阻抗带宽为0.057~1.013 THz,相对带宽为178.69%,轴比带宽为0.815~0.947 THz,相对带宽为14.98%。下一步的工作将研究如何提升精确调控天线阵列各阵元的激励信号的稳定性和重复性,进而完成四元太赫兹砷化镓光电导天线阵列的实验测试。

References

- [1] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and

- technology [J]. *Nature Materials*, 2002, 1(1): 26–33.
- [2] Lee Y S. Principles of terahertz science and technology [M]. New York: Springer Science & Business Media, 2009.
- [3] 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.
- [4] Plusquellic D F, Siegrist K, Heilweil E J, et al. Applications of terahertz spectroscopy in biosystems [J]. *ChemPhysChem*, 2007, 8(17): 2412–2431.
- [5] Fitch M J, Leahy-Hoppa M R, Ott E W, et al. Molecular absorption cross-section and absolute absorptivity in the THz frequency range for the explosives TNT, RDX, HMX, and PETN [J]. *Chemical Physics Letters*, 2007, 443(4–6): 284–288.
- [6] You C W, Lu C, Wang T Y, et al. Method for defect contour extraction in terahertz non-destructive testing conducted with a raster-scan THz imaging system [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(17): 4884–4889.
- [7] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology [J]. *Nature Materials*, 2002, 1(1): 26–33.
- [8] Akyildiz I F, Han C, Hu Z, et al. Terahertz band communication: An old problem revisited and research directions for the next decade [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(6): 4250–4285.
- [9] Darrow J T, Zhang X C, Auston D H. Power scaling of large-aperture photoconducting antennas [J]. *Applied Physics Letters*, 1991, 58(1): 25–27.
- [10] Ma C, Yang L, Dong C, et al. An experimental study on LT-GaAs photoconductive antenna breakdown mechanism [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, 65(3): 1043–1047.
- [11] Zhang Z Z, Fu Z L, Wang C, et al. Research on terahertz quantum well photodetector [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2022, 41(01): 103–109.
张真真, 符张龙, 王长, 等. 太赫兹量子阱探测器研究进展[J]. *红外与毫米波学报*, 2022, 41(01): 103–109.
- [12] 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.
- [13] Mosley C D W, Staniforth M. Scalable interdigitated photoconductive emitters for the electrical modulation of Terahertz beams with arbitrary linear polarization [J]. *AIP Advances*, 9, 0405323 (2019).
- [14] Warmowska D, Abdalmalak K A, Muñoz L E G, et al. High-gain, circularly-polarized THz antenna with proper modeling of structures with thin metallic walls [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 125223–125233.
- [15] Shang T, Jin Z, Li C H, et al. Influence of inductance of photo-conductive terahertz source circuit on its radiation characteristics [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2022, 41(4): 751–755.
尚婷, 金枝, 李春晖, 等. 光电导太赫兹源回路电感对其辐射特性的影响[J]. *红外与毫米波学报*, 2022, 41(4): 751–755.
- [16] Bundel P, Wu G B, Chen B J, et al. Wideband circular polarizer for a photoconductive antenna [J]. *Optics Letters*, 2023, 48(12): 3223–3226.
- [17] Bai, J, Chen, T, Wang, S et al. Ultra-broadband and high-efficiency terahertz reflective metamaterials polarization converter [J]. *Appl. Phys. A*, 2023, 129(9): 610.
- [18] Shi W, Jin Z, Zhang L, et al. A photoconductive terahertz radiation source generating terahertz waves with arbitrary polarization direction [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(18): 1811022.
施卫, 金枝, 张磊, 等. 可产生任意偏振方向太赫兹波的光电导太赫兹辐射源[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(18): 1811022.
- [19] Li H Y, Zhou S M, Li J, et al. Analysis of the Drude model in metallic films [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(34): 6307–6311.
- [20] Huggard P G, Cluff J A, Moore G P, et al. Drude conductivity of highly doped GaAs at terahertz frequencies [J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 87(5): 2382–2385.