

文章编号: 1005-5630(2023)05-0087-08

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2023.005.011

介质透镜操控光电导天线辐射太赫兹波的研究

李党党, 郭旭光

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 飞秒激光驱动的太赫兹 (terahertz, THz) 光电导天线是 THz 时域谱系统中常用的 THz 源, 受全向辐射模式的影响, 该光电导天线的天线主瓣小, 方向性差。对波束的有效操控将有助于提高光电导天线的发射效率。以低温生长的砷化镓 (LT-GaAs) 作为天线基底材料, 通过电磁仿真软件 CST 对蝶形天线辐射 THz 波的电磁分布特性进行仿真, 研究了介质透镜对蝶形天线辐射出的 THz 波的操控。通过对透镜扩展厚度的理论与数值分析, 得出一定频率下的最佳透镜扩展厚度值。仿真结果表明: 随着频率的提高, 蝶形天线在加载更小扩展厚度的硅透镜时可获得更好的方向性。

关键词: 蝶形天线; 介质透镜; 波束操控; 方向性

中图分类号: TN 253 **文献标志码:** A

Study on terahertz wave emission from a dielectric-lens-controlled photoconductive antenna

LI Dangdang, GUO Xuguang

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The terahertz photoconductive antenna driven by femtosecond laser is a common terahertz source in terahertz time-domain spectroscopic system. Because of its omni-directional radiation mode, the main lobe of photoconductive antennas is small and its directivity is poor. The effective control of the wide-band terahertz beam is important to improve the emission efficiency of the photoconductive antennas. Using low-temperature growth gallium arsenide (LT-GaAs) as the substrate material of antenna, the electromagnetic distribution characteristics of terahertz wave radiated by the butterfly antenna are simulated by the electromagnetic software CST, and the effect of dielectric lens on terahertz wave radiated by a butterfly antenna is studied. The optimum expanding region thickness of lens is obtained by theoretical and numerical analysis. The simulation results show that with the increase of frequency, the butterfly antenna can obtain higher directivity with a thinner expanding region of the silicon lens.

收稿日期: 2023-02-22

基金项目: 国家自然科学基金 (61731020)

第一作者: 李党党 (1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为 THz 光电导天线。E-mail: 2241087823@qq.com

通信作者: 郭旭光 (1972—), 男, 研究员, 研究方向为 THz 技术。E-mail: xgguo_sh@qq.com

Keywords: butterfly antenna; dielectric lens; beam manipulation; directivity

引 言

在室温下可稳定工作,能产生宽带太赫兹(terahertz, THz)脉冲的光电导天线(photoconductive antenna, PCA)具有低泵浦功率、高信噪比、宽频谱等特点,在 THz 时域谱系统中备受青睐^[1-2]。随着 THz 波的应用范围迅速扩展至国防安检、无线通信、医药检测等诸多领域,人们对光电导天线的性能提出了更高要求,以期获得高效率、高方向性的 THz 波。近年来,更多研究集中在分析 THz 脉冲辐射微观过程中的影响因素,并通过研究半导体基底、天线结构、偏置电压以及结合超材料来改变飞秒激光脉冲与衬底的相互作用来实现 THz 天线发射效率的增强。然而,对于天线所辐射出的 THz 脉冲进行直接操控是提高天线发射效率不可或缺的重要步骤。

光电导天线以球面波的形式向空气中辐射能量时,由于自由空间和光电导天线衬底折射率的显著差异会导致大部分辐射能量(>80%)在介质内反射,从而使辐射功率下降^[3]。近年来,通过研究透镜对发射功率^[4]及辐射电磁分布^[5-6]的影响,引入了高电阻率介质硅透镜,使高度发散的 THz 波在球形界面处折射,会聚成发散角较小的波束,同时透镜跟基底的介电常数相近使得光学特性变得连续^[7]。硅透镜改善了不同电极结构所构成的光电导天线的辐射方向^[8-9],不同形状的透镜相继被提出^[10-11],在 THz 系统中发挥作用^[12-13]。然而经半球形透镜会聚的 THz 波依旧发散严重,在 THz 时域光谱系统中仍然需要在半球形透镜后搭建太赫兹透镜进行再次准直聚焦,这不仅会对透过的 THz 波造成损耗,还会极大地增加实验的复杂度和难度,导致实验中 THz 波的收集效率依然很低,因此还需进一步对透镜进行研究。

本文采用电磁仿真软件 CST 对蝶形天线耦合介质透镜结构的电场分布进行了仿真,模拟了蝶形天线在加载硅透镜时的波束变化。为了使 THz 光电导天线的增益及辐射方向获得增强和调整,对透镜的扩展区厚度参数进行了模拟优化,

获得了较高方向性的硅透镜扩展厚度,实现了对 THz 波的有效操控。通过提高仿真频率,进一步研究了高频时介质透镜对电磁分布的影响。

1 天线原理及仿真设计

1.1 光电导天线原理

光电导天线利用外加电场驱动,由超快激光脉冲激发的光生载流子来发射 THz 脉冲。图 1 为光电导天线发射 THz 脉冲原理图,该天线由低温生长的砷化镓(LT-GaAs)、半绝缘砷化镓基底、2 个蒸镀在 LT-GaAs 上的电极和 1 个偏置电压源组成。由于 2 个电极间的 LT-GaAs 具有绝缘性,当没有飞秒激光脉冲照射时,光电导天线处于高阻状态;当入射光照射到电极间隙内的 LT-GaAs 上时,若光子能量大于或等于半导体材料的禁带宽度,材料吸收光子的能量,在被照射区域束缚价电子从价带跃迁到导带,同时在价带形成一个空穴。激发出的电子-空穴对在外加偏置电压 V_b 作用下做定向加速运动,形成瞬态光电流 J_s ,由于 LT-GaAs 材料内电子、空穴通过非辐射复合,导致其寿命在亚皮秒量级,光电流不停在皮秒和亚皮秒量级变化,变化的电流向外辐射出 THz 波,硅透镜附加在天线的背面,用以增加 THz 辐射的耦合效率。

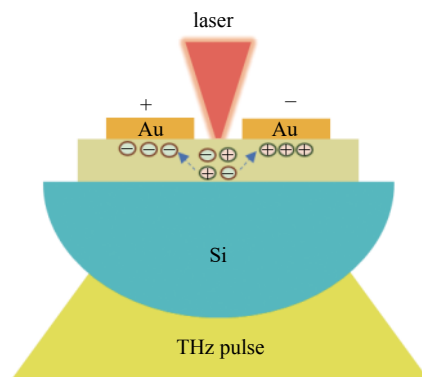


图 1 光电导天线发射 THz 脉冲原理图

Fig. 1 Principle diagram of terahertz pulse emitted by a photoconductive antenna

忽略空穴只考虑电子迁移运动的影响,两极间电流密度表示为

$$J(t) = N(t)e\mu E_b \quad (1)$$

式中: N 为光生电子密度; e 为电子电量; μ 为电子迁移率; E_b 为电场强度。 N 作为时间 t 的函数, 是由激发它的光脉冲的时域包络以及自由电子的寿命所决定的。

这一瞬变电流脉冲在远场 THz 辐射的场强可以表示为

$$E_{\text{THz}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{A}{c^2 z} \frac{\partial J(t)}{\partial t} = \frac{Ae}{4\pi\epsilon_0 c^2 z} \frac{\partial N(t)}{\partial t} \mu E_b \quad (2)$$

式中: A 为半导体表面上被激光照射区域的面积; ϵ_0 为真空中的介电常数; c 为真空中的光速; z 为测量点到光导天线的距离。光导天线辐射 THz 波的电场正比于触发光脉冲的能量和外加偏置电场的场强。然而在实际应用中, THz 波电场和激发光强以及外加偏置电场的线性关系只是在低激发光强和弱偏置电场时适用, 当激光存在时, 半导体基底具有了导电性质, 电荷运动所产生的太赫兹电场将反过来屏蔽外加的偏置电场, 这时的光生电流密度为

$$J(t) = \sigma(t) E_b \left[1 + \frac{\sigma(t)\eta_0}{1+n} \right] \quad (3)$$

式中: σ 是半导体的电导率; η_0 表示空气的阻抗; n 是半导体的折射率。其中 σ 是由激发光的光强 I_0 决定的, 将式 (3) 代入式 (2) 有

$$E_{\text{THz}} \propto \frac{d\sigma(t)}{dt} \left[1 + \frac{\sigma(t)\eta_0}{1+n} \right]^2 \propto \frac{I_0}{(1+kI_0)^2} \quad (4)$$

可以看到当激光光强增加到一定程度时, 太赫兹电场将随之出现饱和。另外, 当偏置电压升高到一定程度时, 半导体基底将会被电场击穿。

光电导天线的方向性系数表示天线的能量聚集情况, 是衡量天线性能的重要指标。最大辐射值对应方向上会产生最大的场强, 天线的方向性越好, 辐射的能量越集中。方向性系数 D 在数值上定义为天线向单个方向进行辐射的强度值 $U(\theta, \varphi)$ 与天线向四周均匀辐射的强度值 $P_\Sigma/4\pi$ 之比, 即

$$D(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_\Sigma} \quad (5)$$

方向性系数的单位是分贝 (dB), 设标准参

考方向的方向系数为 1, 结果用 dBi (D (dBi) = 10lg (D)) 表示。方向性系数用来表示电磁辐射的聚集能力, 表明能量转换的是效率 η_A , 将二者联合引入天线的增益 $G(\theta, \varphi)$ 的概念, 增益为某方向上所对应辐射强度 $U(\theta, \varphi)$ 与以其等功率 P_A 输入时均匀辐射时强度 $P_A/4\pi$ 之比, 是天线的重要性能指标, 即

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_A} \quad (6)$$

天线将能量向外辐射, 天线效率指的是将馈线中输入的能量转换成向外部辐射能量的能力, 一般定义天线效率 η_A 为辐射出的总功率 P_γ 与输入功率 P_{in} 的比值, 假定馈线电阻等损耗功率总和为 P_R , 故有

$$\eta_A = \frac{P_\gamma}{P_{\text{in}}} = \frac{P_\gamma}{P_R + P_\gamma} \quad (7)$$

介质透镜的引入有助于提高光电导天线的聚焦能力, 使得透镜前端电场分布更加集中, 提高天线的方向性, 从而提高天线的增益和发射效率。

1.2 天线结构设计

常见的光电导天线有偶极子天线、蝶形天线、对数周期天线以及螺旋形天线等, 蝶形天线具有结构简单、频率响应特性好等优势, 与偶极子天线相比, 蝶形天线在低频范围有较高的辐射场幅度^[14]。在一定频率、间隙和天线长度下, 蝶形天线比偶极子天线具有更大的增益^[15]。天线夹角 ω 为 90° 的蝶形天线可以获得较宽的频带^[16], 另外, 夹角大小影响天线的方向性, 当 ω 为 90° 时, 天线有较好的方向性^[17]。为验证蝶形与偶极子天线的辐射特性, 选择天线角度为 90° 的蝶形天线与相同电极长度、间隙宽度及衬底厚度的偶极子天线进行仿真对比, 在 0.1 THz 时得出 2 种天线的方向性见表 1。

表 1 蝶形天线与偶极子天线方向性对比
Tab. 1 Directivity comparison of butterfly antenna and dipole antenna

天线结构	0.1 THz 时的方向性 /dBi
偶极子	4.265
蝶形	4.957

从仿真结果可知，天线角度为 90°的蝶形天线在 0.1 THz 时的方向性大于偶极子天线，因此后续选择蝶形天线进行研究。蝶形天线结构如图 2 所示。

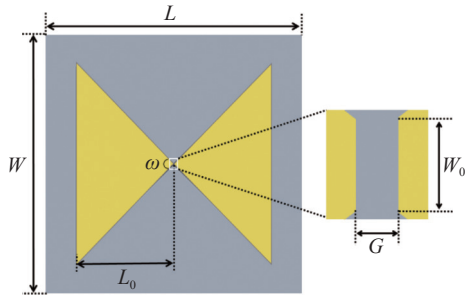


图 2 蝶形天线结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the butterfly antenna structure

电极长度较长的天线有较高的发射密度^[18]，本文蝶形天线选取相对于 THz 波段辐射波长较长的电极长 1 500 μm，天线间隙为 5 μm。LT-GaAs 具有高的载流子迁移率，短的载流子寿命和高击穿电压等优点，当波长为 780 nm 的激光入射 LT-GaAs 时，单光子能量为

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (8)$$

式中： h 为普朗克常数； c 为真空中光速； λ 为激光波长。由此可得光子能量 E 大于 LT-GaAs 的禁带宽度 1.43 eV，可使电子发生带间跃迁。蝶形天线的其他参数如表 2 所示。

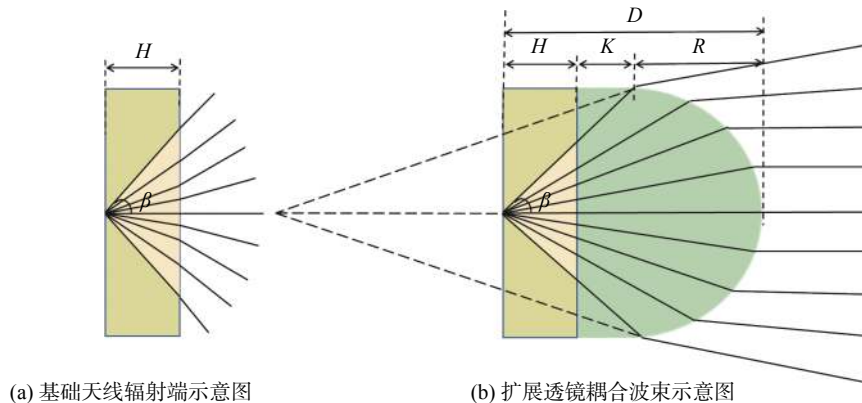
表 2 蝶形天线结构参数

Tab. 2 Structural parameters of the butterfly antenna

参数名称	数值
基底材料	LT-GaAs ($\epsilon_r = 12.9$)
基底长度/μm	4 000
基底宽度/μm	4 000
基底厚度/μm	350
电极长度/μm	1 500
天线间隙长度/μm	5
天线间端宽度/μm	10
天线角度/(°)	90

1.3 介质透镜扩展区厚度理论分析

如图 3 (a) 所示，单个天线由于基底和空气的介电常数差，辐射出的多数电磁波由于全内反射而被束缚在天线基底中，只有辐射角度小于 $\beta = \arcsin(n^{-1}) \approx 17.05^\circ$ 的 THz 波可以透过基底^[4]，与其匹配使用的硅透镜可以大幅提高天线内的 THz 辐射耦合至自由空间，同时压缩天线辐射的 THz 波束发散角。在蝶形天线基底端加载一个扩展透镜，材料为与 LT-GaAs 折射率相近的高阻硅， R 是透镜的半径， H 为基底厚度， K 为扩展长度，从电极发射端到透镜顶部的距离为 D ，如图 3 (b) 所示



(a) 基础天线辐射端示意图

(b) 扩展透镜耦合波束示意图

图 3 天线波束辐射示意图

Fig. 3 Schematic of antenna beam radiation

根据几何光学，蝶形天线的两根电极中心相当于点光源，THz 波经基底透过扩展透镜，扩展部分连接基底与透镜半球，与基底折射率相近的

材料厚度用来增加点光源到透镜距离，使得发光点靠近焦点处。当光源点位于透镜的焦点处时，蝶形天线发射准直的 THz 波^[19]。当 $D = H + R +$

$K = R[1/(n-1)+1]$ 时, 扩展透镜可实现 THz 波的准直。硅的折射率 n 取 3.414, 在厚度为 $350 \mu\text{m}$ 的 GaAs 衬底上, 选择半径 $R = 3000 \mu\text{m}$ 的硅透镜, $D = 1.414 R = 4242 \mu\text{m}$, 在 CST 中建模。对加载扩展硅透镜的蝶形天线辐射性能进行数值研究, 并设置不加载透镜和不同扩展厚度 K 的透镜进行对比, 透镜参数如表 3 所示。

表 3 透镜参数表
Tab. 3 Parameters of dielectric lens

参数名称	变量数值
硅透镜半径/ μm	3000
扩展长度/ μm	0, 300, 500, 892

2 电磁模拟结果及分析

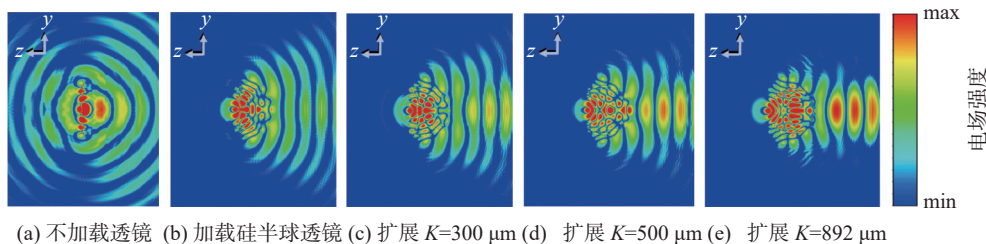
在 CST 软件中选择电流脉冲作为激励源在蝶形天线两电极间馈电, 模拟激光入射后在外加偏压下形成的瞬态电流脉冲, 边界条件设为 open (add space), 在 z 轴方向加长仿真区域, 以便看到更大范围的 THz 波辐射特性。在 0.1 THz 频率下 $x = 0$ 平面中的模拟电场分布分别如图 4 所示。

由图 4 (a) 可明显看出, 在不加载透镜时, 基底与空气的折射率差导致电磁波只能在基底内部反射, 小部分能量在基底内向空间中辐射时, 形成的 THz 波以球面波的形式全向传播, 向基底 ($-z$) 方向的电场分布小, 方向性差。图 4 (b) 是加载硅半球透镜时的辐射电场分布, 辐射方向有所改善, 更多的功率经硅透镜辐射至自由空间, 但发散比较严重, 在 THz 系统中使用时需额外添加透镜对波束进行准直, 增加了 THz 系

统的复杂度。图 4 (c) 和图 4 (d) 所示为扩展区厚度分别为 $300 \mu\text{m}$ 和 $500 \mu\text{m}$ 时的模拟结果, 随着透镜扩展厚度的增大, 初始的球面波在基底一端的场强会逐渐增强, 辐射角度会变小。图 4 (e) 所示为扩展厚度为 $892 \mu\text{m}$ 的模拟结果, 电场分布显示出 THz 辐射接近预期的准直波束。由此可知, 在理论上能准直太赫兹波束的扩展厚度值范围内不断增加透镜扩展厚度可以达到逐步收缩光束的效果。

扩展透镜使得蝶形天线产生的 THz 波向自由空间辐射更多的同时, 准直后 THz 辐射方向性更好, 在距离透镜表面一定距离观察辐射功率, 如图 5 (a) 所示, 在 z 轴正向电极一端 $z = 6000 \mu\text{m}$ 处的 THz 电场分布几乎为零, 而在硅透镜一端 $z = -6000 \mu\text{m}$ 处有较明显场强分布, 如图 5 (b) 所示, 大部分信号辐射朝着衬底和透镜方向。为了缩短仿真时间, 仿真空间只模拟至 $z = -10000 \mu\text{m}$, 在此位置的电场分布如图 5 (c) 所示, 结合图 5 (d) 三维方向图和图 5 (e) 中的 E 面远场辐射方向图, 可知最大场强沿着硅透镜中心向 $-z$ 方向辐射, 蝶形天线在此方向上的主波束变窄, 方向性更好。光束在远场处, 辐射图案中的中心波瓣成为辐射的最大传播部分, 随着辐射距离变大, 信号会以较小的发散角度逐渐发散, 中心场强光斑逐渐减弱并放大, 并非准直辐射, 根据上文中不同扩展厚度的模拟电场分布可知, 适当增加透镜扩展厚度可达到收缩光束的效果, 此结果有助于在搭建 THz 光谱系统时实现对信号更有效的探测。

由蝶形天线辐射三维方向图 5 (d) 可知其增益为 17.74 dBi , 远场辐射方向如图 5 (e) 和 (f) 所示, E 面和 H 面的旁瓣分别为 -12.5 dB 和 -16.2 dB , 这表明基底一端的增益比其他任何方



(a) 不加载透镜 (b) 加载硅半球透镜 (c) 扩展 $K=300 \mu\text{m}$ (d) 扩展 $K=500 \mu\text{m}$ (e) 扩展 $K=892 \mu\text{m}$

图 4 0.1 THz 时模拟电场分布 (电场方向沿着 x 轴)

Fig. 4 The simulated electric field distribution at 0.1 THz (the direction of the electric field follows the x -axis)

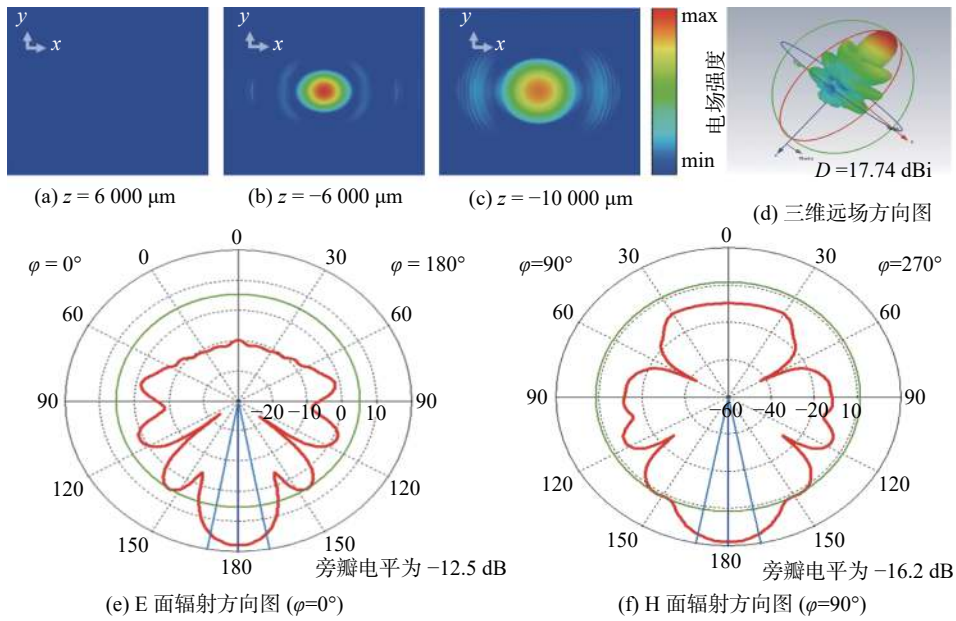


图 5 0.1 THz 时蝶形天线的远场模拟结果

Fig. 5 The far-field simulation results of the butterfly antenna at 0.1 THz

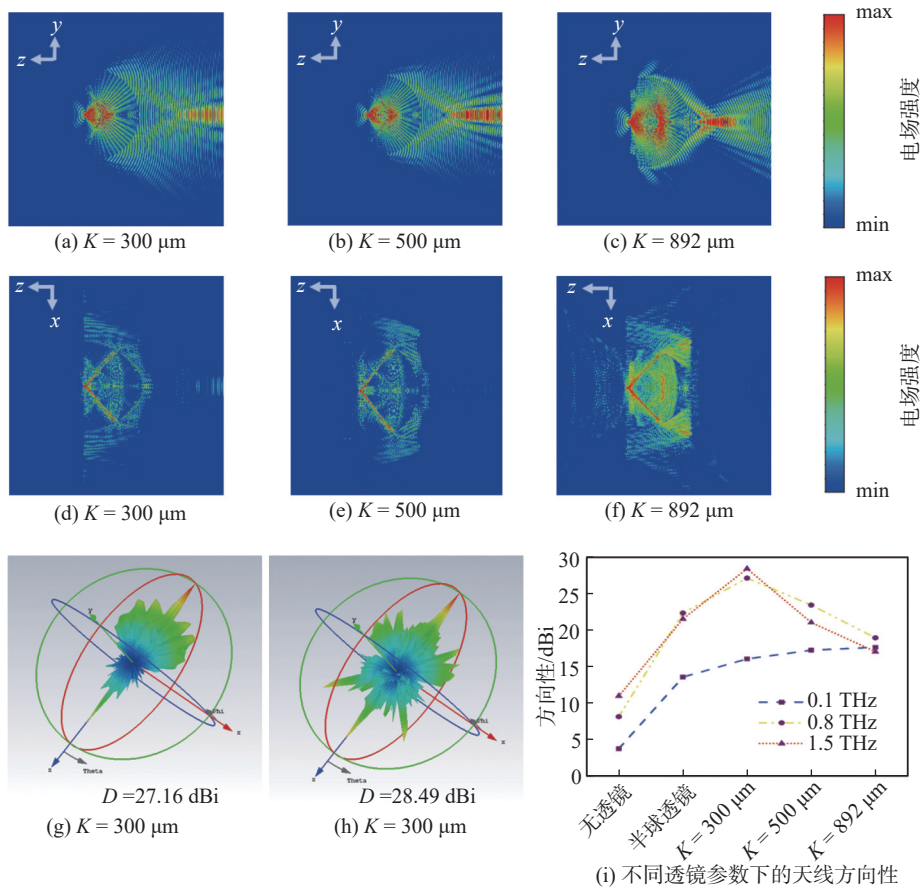


图 6 频率为 0.8 THz 和 1.5 THz 时蝶形天线的辐射特性

Fig. 6 The radiation characteristics of the butterfly antenna at 0.8 THz and 1.5 THz frequencies

向都大, 产生的大部分功率都沿 $-z$ 轴辐射。

由仿真可知 0.1 THz 时, 在蝶形天线基底端加载不同厚度的扩展透镜, 在不超过焦距的范围内随着扩展厚度的增大, 基底一侧的辐射功率变大。加载 $K = 892 \mu\text{m}$ 的扩展透镜, 能在期望的方向上压缩 THz 波束辐射角度, 只是 THz 波束仍非准直, 分析呈现扩散趋势的原因是与蝶形天线工作频率相关。为了进一步分析扩展透镜对蝶形天线辐射效率的影响, 模拟了更高频率下的蝶形天线辐射性能。

仿真得到 0.8 THz 和 1.5 THz 时蝶形天线的模拟电场分布以及三维辐射方向结果, 如图 6 所示。图 6 (a) 为 0.8 THz 下扩展厚度为 $300 \mu\text{m}$ 时蝶形天线的模拟电场分布图, 此时蝶形天线的方向性为图 6 (i) 中所示结果, 为 27.16 dBi。当扩展厚度增加到 $K = 500 \mu\text{m}$ 和 $K = 892 \mu\text{m}$ 时, 方向性变差, 如图 6 (b) 和图 6 (c) 所示。图 6 (d) 为 1.5 THz 下扩展厚度为 $300 \mu\text{m}$ 时蝶形天线的模拟电场分布图, 此时的方向性如图 6 (h) 所示, 为 28.49 dBi; 在更高频率下, 当 K 为 $500 \mu\text{m}$ 或 $892 \mu\text{m}$ 时, 天线辐射的波瓣数量增加, THz 波在介质内形成驻波, 在基底和透镜界面反射, 如图 6 (e) 和图 6 (f) 所示。不同透镜参数下的天线方向性如图 6 (i) 所示, 从仿真结果可以得知: 随着频率的增大, 在较小的扩展厚度下 ($300 \mu\text{m}$) 扩展透镜近似于准直透镜, 方向性最好, 随着扩展厚度增大, 辐射产生聚焦行为, 从而影响天线向远处辐射的性能。在一定厚度的基底上时, 随着仿真频率的增加, 蝶形天线辐射产生基底模式, 有更多功率被束缚于器件内, 陷入基底并影响辐射方向, 天线的最大辐射方向随着频率的变化显著发生变化, 未能在全频段内大致向同一个方向辐射。

3 结 论

对蝶形天线加载不同参数的硅透镜进行了数值模拟, 得出以下结论: 在低频段, 随着透镜扩展厚度的增加, 蝶形天线辐射 THz 波束逐渐收缩。当基底表面的电极中心位于扩展透镜的焦点处时, 蝶形天线辐射的波束趋于准直辐射, 此时

天线的方向性是不加载透镜时的 358%, 相对于加载半球形透镜, 方向性提高了 31%。此结论相较于近年来关于扩展透镜的研究方向性提高了 168%^[19]。随着仿真频率的提高, 介质透镜在更小的扩展厚度时获得较高的方向性, 在 0.8 THz 和 1.5 THz 时方向性分别为 27.16 dBi 和 28.49 dBi, 相较于加载半球形透镜, 方向性分别提高了 22% 和 32%, 此结论优于锥形喇叭天线对于天线方向性的改善^[4]。在高工作频率时, 过大的基底厚度和扩展透镜厚度会使得辐射出的功率陷入介质内部并影响天线的方向性。

本文对透镜的研究有助于在搭建各类光谱系统实验时, 根据工作频率选择不同扩展厚度的透镜进行准直或会聚, 解决了光线经半球形透镜会聚后仍需在天线后端放置太赫兹透镜的实验复杂性问题, 减少 THz 波的损耗, 实现实验中波束的可控性, 提高对 THz 波的收集效率。

参考文献:

- [1] AUSTON D H, CHEUNG K P, SMITH P R. Picosecond photoconducting Hertzian dipoles[J]. *Applied Physics Letters*, 1984, 45(3): 284 – 286.
- [2] JEPSEN P U, JACOBSEN R H, KEIDING S R. Generation and detection of terahertz pulses from biased semiconductor antennas[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1996, 13(11): 2424 – 2436.
- [3] LI D, HUANG Y. A theory of how to improve the radiation of the photoconductive antenna[C]// *Proceedings of 2007 International workshop on Antenna Technology: Small and Smart Antennas Metamaterials and Applications*. Cambridge, UK: IEEE, 2007.
- [4] 张清刚. 改进光电导太赫兹天线输出功率与方向的研究 [J]. *真空电子技术*, 2012(5): 27 – 30.
- [5] ELEFThERIADES G V, BRAND Y, ZÜRCHER J F, et al. ALPSS: a millimetre-wave aperture-coupled patch antenna on a substrate lens[J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(3): 169 – 170.
- [6] UHJ JEPSEN P, KEIDING S R. Radiation patterns from lens-coupled terahertz antennas[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(8): 807 – 809.
- [7] RAHMAN S M, JIANG Z G, XING H L, et al. Lens-coupled folded-dipole antennas for terahertz detection

- and imaging[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2015, 9(11): 1213 – 1220.
- [8] FROBERGER K, BELEM GONCALVES C, DUCOURNAU G, et al. Radiation pattern measurements of a silicon-lens horn antenna[C]// *Proceedings of the 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*. Paris, France: IEEE, 2019.
- [9] VAN RUDD J, JOHNSON J L, MITTLEMAN D M. Cross-polarized angular emission patterns from lens-coupled terahertz antennas[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2001, 18(10): 1524 – 1533.
- [10] SØNDERGAARD T M, SØRENSEN C B, SKOVSEN E. Design of a compact cylindrical micro-lens for efficient out-coupling and collimation of THz radiation from a photoconductive antenna[C]//*Proceedings of the 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*. Paris, France: IEEE, 2019.
- [11] FLORIAN F, MARC-AURELE B, TOMOYUKI U, et al. Aspheric silicon lenses for terahertz photoconductive antennas[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(2): 021113.
- [12] VAN EXTER M, GRISCHKOWSKY D R. Characterization of an optoelectronic terahertz beam system[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1990, 38(11): 1684 – 1691.
- [13] VAN RUDD J, MITTLEMAN D M. Influence of substrate-lens design in terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2002, 19(2): 319 – 329.
- [14] TANI M, MATSUURA S, SAKAI K, et al. Emission characteristics of photoconductive antennas based on low-temperature-grown GaAs and semi-insulating GaAs[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(30): 7853 – 7859.
- [15] 尚丽平, 夏祖学, 廖小春, 等. THz 小孔径光电导天线结构及参数对增益的影响 [J]. *红外*, 2011, 32(2): 38 – 42.
- [16] 陈燕林. 新型平面蝴蝶结槽天线的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [17] 黄振, 于斌, 赵国忠, 等. 小孔径蝴蝶型光电导天线太赫兹辐射源的研究 [J]. *激光与红外*, 2009, 39(2): 183 – 186,193.
- [18] LIU T A, CHOU R H, PAN C L. Dependence of terahertz radiation on gap sizes of biased multi-energy arsenic-ion-implanted and semi-insulating GaAs antennas[J]. *Applied Physics B*, 2009, 95(4): 739 – 744.
- [19] 蒋锐, 李全勇, 程爽, 等. 基于介质透镜的太赫兹光电导天线研究 [J]. *长春理工大学学报:自然科学版*, 2021, 44(6): 19 – 26.

(编辑: 李晓莉)