



太赫兹GaAs光电导天线阵列辐射特性

闫志巾 施卫

**Radiation characteristics of terahertz GaAs photoconductive antenna arrays**

Yan Zhi-Jin Shi Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 248704 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20211210

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211210>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

专题: 太赫兹生物物理

## 太赫兹 GaAs 光电导天线阵列辐射特性\*

闫志巾 施卫†

(西安理工大学应用物理系, 西安 710048)

(2021年6月29日收到; 2021年7月21日收到修改稿)

GaAs 光电导天线是太赫兹电磁波的重要辐射源之一, 天线阵列可以提高 THz 波的辐射强度, 因而光电导天线及阵列一直以来备受瞩目. 本文采用 CST Microwave Studio 软件对光电导天线阵列辐射太赫兹电磁波的特性进行仿真计算. 根据电流脉冲模型计算了激光入射到 GaAs 光电导天线时产生的脉冲光电流, 并作为激励源对光电导天线的辐射性能进行仿真计算, 分析了天线结构和衬底材料对辐射太赫兹波的影响. 在此基础上计算了 GaAs 光电导天线阵列辐射太赫兹波的远场辐射. 仿真结果表明: 光电导天线阵列辐射太赫兹波的方向性更强, 主波瓣宽度减小, 其远场辐射符合电场叠加的倍数关系. 研制了  $1 \times 2$  GaAs 光电导天线阵列, 实验测试结果与仿真结论相一致, 为制备多阵元太赫兹光电导天线阵列奠定了理论和实验基础.

**关键词:** 太赫兹, 电磁波, 光电导天线, 天线阵列**PACS:** 87.50.U-, 72.20.-i, 87.55.Gh**DOI:** 10.7498/aps.70.20211210

## 1 引言

太赫兹 (terahertz, THz) 波是指频率从 0.1—10 THz、相应的波长在 3 mm 到 30  $\mu\text{m}$  范围内、介于毫米波与红外光之间的电磁波<sup>[1-5]</sup>, 具有辐射频谱宽、光子能量低、光谱分辨能力高、穿透性强等优势, 因而被广泛应用于卫星通信、雷达成像、安全检测、生化检查、材料表征等众多领域<sup>[6-10]</sup>. 光电导天线作为一种常用的 THz 电磁波辐射源<sup>[11]</sup>, 辐射性能稳定, 是目前产生 THz 电磁波的重要方法之一, 已经在 THz 时域光谱 (THz time-domain spectroscopy, THz-TDS) 系统中得到了广泛应用. 提高 THz 脉冲的辐射强度一直是业界普遍关注的热点问题, 光电导天线阵列是提高 THz 波辐射强度的方法之一. 近年来, Awad 等<sup>[12]</sup>、Tiedje 等<sup>[13]</sup>和 Yang 等<sup>[14]</sup>从制备工艺、衬底材料、天线结构及

阵元数目等众多因素出发, 通过实验的方法研究光电导天线阵列辐射 THz 波的特性. Awad 等<sup>[12]</sup>设计的 14 元天线阵列的辐射功率只比单个光电导天线增加了 30%, Knotts 等<sup>[15]</sup>的实验中一个 2 元天线阵列的辐射功率为单个光电导天线的 1.5 倍. 这些实验中天线阵列的辐射功率没有随阵元数目按比例增加, 未达到理论预期值. 为了分析影响天线阵列辐射功率的原因, 进一步探究辐射机理, 需要对光电导天线进行仿真研究. 本文对麦克斯韦方程组的积分方程进行离散处理, 通过建立 Yee 网格, 采用完全匹配层吸收边界条件<sup>[16-18]</sup>, 利用 CST Microwave Studio (MWS) 软件, 根据时域有限积分方法<sup>[19,20]</sup>(finite integration technique, FIT) 对光电导天线及阵列辐射 THz 电磁波的特性进行仿真研究, 该工作对光电导天线的设计和分析具有一定的指导意义, 为多阵元光电导天线阵列的研究奠定了理论和实验基础.

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2017YFA0701005)、国家自然科学基金 (批准号: 51807161)、强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室 (批准号: SKLIPR1812)、中国博士后科学基金 (批准号: 2018M633547) 和陕西高校青年创新团队 (批准号: 21JP084) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: swshi@mail.xaut.edu.cn

## 2 激励源的计算理论模型

对激励源的选择是采用 FIT 方法分析 THz 电磁场的一个非常重要的问题. 按照光电导天线的工作原理, 需要选择电流作为 CST MWS 仿真的激励源. 本文首先用解析法计算激光入射到 GaAs 光电导天线时产生的脉冲光电流, 然后将该电流作为激励源, 在偶极天线两电极间馈电, 利用 CST MWS 对光电导 THz 辐射源进行仿真计算.

光电导天线的结构示意图如图 1 所示<sup>[21]</sup>. 天线两电极间加载偏置电压  $U_b$ , 天线上产生的偏置电场为  $E_b$ , 当触发光垂直入射到光电导天线的表面时, GaAs 衬底表面产生光生载流子, 根据电流瞬冲模型<sup>[21]</sup>, 载流子在偏置电场  $E_b$  的作用下加速运动, 在天线中间形成增大的电流; 同时由于载流子的复合作用, 以及载流子漂移形成的内建电场产生的屏蔽作用, 光电流迅速减小, 形成电流的振荡, 振荡的电流向外辐射电磁波. 天线的远场辐射  $E_{\text{THz}}(t)$  可以表示为<sup>[22-24]</sup>

$$E_{\text{THz}}(t) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{A}{z} \frac{\partial}{\partial t} J_s(t). \quad (1)$$

其中  $A$  为天线面积,  $J_s(t)$  为表面电流密度,  $z$  为场点到天线中心的距离.

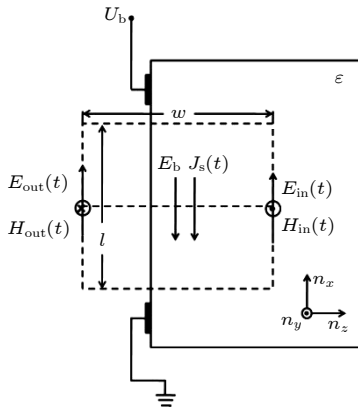


图 1 光电导天线示意图

Fig. 1. Schematic diagram of photoconductive antenna.

光生电流随时间的变化可以用图 1 所示的光电导天线模型来分析, 光生电流分布在 GaAs 衬底的表面, 根据欧姆定律, 表面电流密度  $J_s(t)$  可表示为

$$J_s(t) = \sigma(t) [E_b + E_{\text{in}}(t)], \quad (2)$$

其中  $\sigma(t)$  是电导率,  $E_{\text{in}}(t)$  是光生电流在衬底内部产生的电场强度.

根据麦克斯韦方程组和界面上的边界条件, 可以得到表面电流密度  $J_s(t)$  和内部电场  $E_{\text{in}}(t)$  的关系:

$$J_s(t) = -\frac{1 + \sqrt{\epsilon}}{\eta_0} E_{\text{in}}(t), \quad (3)$$

其中  $\epsilon$  是衬底 GaAs 材料的介电常数,  $\eta_0$  为自由空间中的波阻抗或真空阻抗. 由 (2) 式和 (3) 式可以得到内部电场  $E_{\text{in}}(t)$  与偏置电场  $E_b$  的关系:

$$E_{\text{in}}(t) = -\frac{\sigma(t)\eta_0}{\sigma(t)\eta_0 + (1 + \sqrt{\epsilon})} E_b. \quad (4)$$

由 (2) 式和 (4) 式得到表面电流密度  $J_s(t)$  与偏置电场  $E_b$  的关系, 表面电流密度可以进一步表示为

$$J_s(t) = \frac{(1 + \sqrt{\epsilon})\sigma(t)}{\sigma(t)\eta_0 + (1 + \sqrt{\epsilon})} E_b. \quad (5)$$

电导率  $\sigma(t)$  成为描述光生电流的关键, 它是载流子浓度  $n(t)$  和迁移率  $\mu(t)$  的函数, 由于电子的贡献远大于空穴的贡献, 这里只考虑电子的作用:

$$\sigma(t) = n(t)\mu(t)e. \quad (6)$$

由 GaAs 内部载流子的动力学行为, 根据电子在外电场作用下的运动方程, 可以得到瞬态迁移率  $\mu(t)$  随着时间的改变而变化的函数关系式<sup>[25]</sup>:

$$\mu(t) = \frac{e\tau_e}{m^*} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_e}\right) \right]. \quad (7)$$

其中,  $\tau_e$  为动量弛豫时间, 也就是当载流子在电场的作用下开始做漂移运动时, 连续发生两次散射所需的平均时间, 对低温生长的 GaAs 为 10—30 fs.

载流子浓度  $n(t)$  可用如下微分方程表示:

$$\frac{dn(t)}{dt} = -\frac{n(t)}{\tau_c} + G(t). \quad (8)$$

(8) 式右侧的第 1 项表示由于复合引起载流子的减少项, 其中  $\tau_c$  为载流子寿命, 第 2 项  $G(t)$  表示载流子产生率, 是由于光激发引起载流子的增加项.

载流子产生率  $G(t)$  正比于激发激光的光强, 由于激光光斑覆盖整个天线两极之间的面积, 可以认为电极间隙均匀照射, 因此不考虑激光面分布, 可以将激光描述为按时间分布的高斯光束:

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{t^2}{\tau_0^2}\right), \quad (9)$$

其中  $\tau_0$  是激光脉宽. 将 (9) 式代入 (8) 式可得

$$\frac{dn(t)}{dt} = -\frac{n(t)}{\tau_c} + \frac{(1-R)\alpha}{h\nu} I_0 \exp\left[-\frac{(t-t_0)^2}{\tau_0^2}\right], \quad (10)$$

其中  $R$  是反射率,  $\alpha$  是吸收系数,  $h\nu$  是光子能量,  $t_0$  表示激光的峰值位置. 对 (10) 式积分可得到载

流子浓度  $n(t)$ :

$$n(t) = \frac{(1-R)\alpha}{h\nu} I_0 \frac{\tau_0 \sqrt{\pi}}{2} \exp \left[ -\frac{t_0^2}{\tau_0^2} + \frac{(2t_0\tau_c + \tau_0^2)^2}{4\tau_0^2\tau_c^2} \right] \times \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{t}{\tau_0} - \frac{2t_0\tau_c + \tau_0^2}{2\tau_0\tau_c} \right) - \operatorname{erf} \left( -\frac{2t_0\tau_c + \tau_0^2}{2\tau_0\tau_c} \right) \right] \exp \left( -\frac{t}{\tau_c} \right), \quad (11)$$

其中误差函数  $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-u^2) du$ .

当光生载流子寿命为 0.3 ps, 激光脉宽为 80 fs, 计算光激发载流子浓度的结果如图 2 所示. 根据 (5) 式计算激光激发 GaAs 光电导天线产生的电流, 结果如图 3 所示, 以该电流作为激励源对光电导天线及阵列辐射 THz 波的特性进行仿真计算.

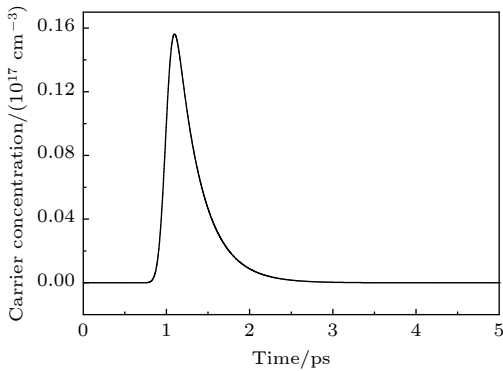


图 2 光激发载流子浓度

Fig. 2. Concentration of photo induced carriers.

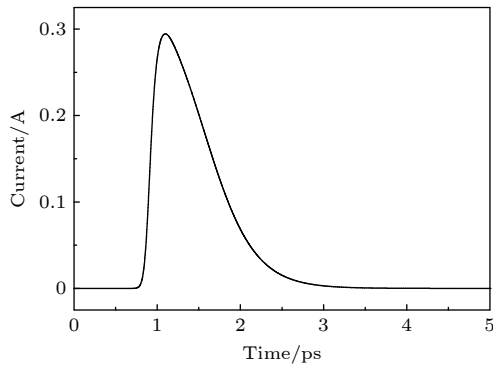


图 3 电流随时间关系曲线  
Fig. 3. Current vs. time curve.

### 3 光电导天线的仿真

#### 3.1 天线结构的影响

单个偶极子天线模型如图 4 所示, 天线中心偶极部分的电极宽度和长度均为  $30 \mu\text{m}$ , 两极间隙

为  $30 \mu\text{m}$ . 两侧的金属微带传输线可以将电源和电极连接并传导天线偶极辐射时产生的热量, 长度为  $250 \mu\text{m}$ , 宽度为  $30 \mu\text{m}$ .

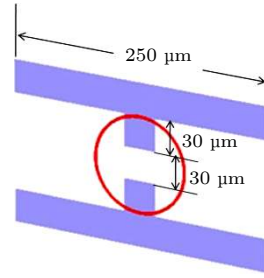


图 4 偶极天线示意图

Fig. 4. Schematic diagram of dipole antenna.

天线采用离散端口激励方式, 由天线两极间隙馈电, 以图 3 所示的激光激发 GaAs 光电导天线产生的电流作为输入的激励信号, 天线的  $S$  参数 (即输入反射系数) 如图 5 所示, 其中黑色实线表示包含微带传输线在内的整个天线的  $S$  参数, 可以看出, 在 0.34, 1.17 及 2.12 THz 处出现了多个谷值, 说明在这些频率处天线对输入信号的反射比较低, 即辐射效率较高, 2.12 THz 处的辐射效率最高. 红色虚线表示天线偶极部分 (图 4 红色圆环内的部分) 的  $S$  参数, 与整个天线的  $S$  参数相比, 天线偶极部分的  $S$  参数只有 1 个谷值, 出现在接近 1 THz 的位置. 比较两个结果发现, 含有微带传输线的天线峰值增多, 辐射频率的范围比只考虑偶极部分天线的频谱更宽. 包含微带传输线的天线在 1 THz 时的电场分布如图 6 所示, 由于微带传输线的尺寸与该频率 THz 波的波长相当, 在微带传输线上出现了明显的振荡分布. 以上分析说明微带传输线对天线的辐射有很大影响, 是天线结构的重要组成部分.

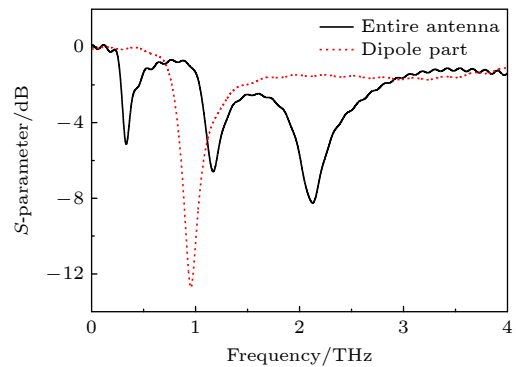


图 5 天线  $S$  参数

Fig. 5.  $S$ -parameter of antenna.

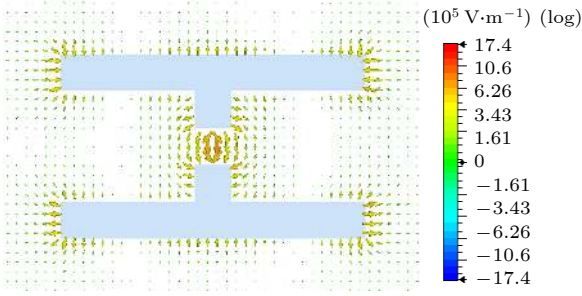


图 6 天线上的电场分布 (1 THz)

Fig. 6. Electric field distribution around the antenna (1 THz).

### 3.2 衬底的影响

不考虑光电导天线衬底材料的影响时, 光电导天线在 1 THz 的远场辐射三维方向图和  $E$  面电场分布图如图 7 和图 8 所示, 在 0—3 THz 的频率范围内, 天线的三维方向图相类似, 均为偶极子天线的面包圈结构.

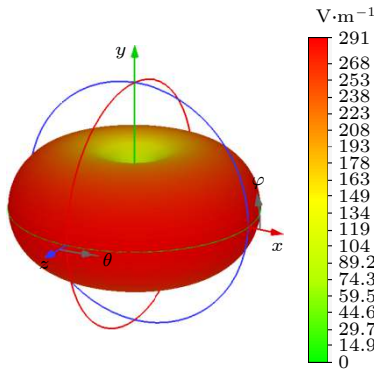


图 7 无衬底时天线远场辐射的三维方向图 (1 THz)

Fig. 7. Three-dimensional pattern of far-field radiation of antenna without a substrate (1 THz).

用 GaAs 作为光电导天线的衬底材料时, 其远场辐射的三维方向图如图 9 所示, 可以看到, 考虑衬底材料后, 光电导天线远场辐射的三维方向图与频率有关, 在不同频率时方向图有较大的差异, 在较低频率 0.3 THz 时, 天线的三维方向图与偶极子天线的面包圈结构相似, 1 THz 时天线的方向图与偶极辐射的方向图不同, 已经不再是面包圈式的结构. 随着频率的增大, 三维方向图的结构越来越复杂, 天线辐射形成多个波瓣.

图 10 是以 GaAs 作为衬底材料时, 光电导天线在  $E$  面的远场辐射方向图, 衬底位于  $z$  轴正方向, 激光从  $z$  轴负方向入射, 沿  $z$  轴正方向太赫兹辐射场强明显高于其他方向, 说明 GaAs 衬底材料对

光电导天线辐射 THz 波的影响很大, 有助于提高辐射的方向性.

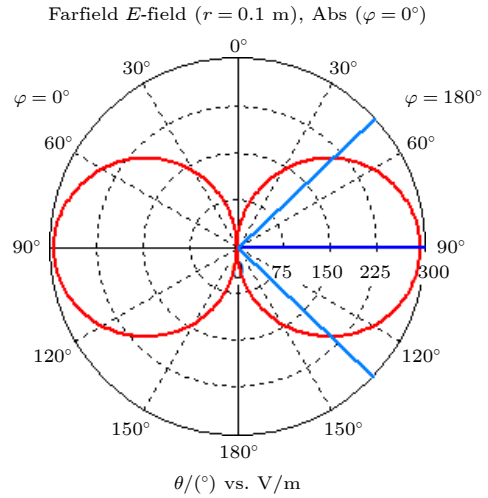


图 8 无衬底时天线  $E$  面电场分布方向图 (1 THz)

Fig. 8. Electric field distribution pattern on the  $E$  surface of antenna without a substrate (1 THz).

### 4 光电导天线阵列的仿真

采用 CST MWS 对光电导天线阵列辐射太赫兹波进行仿真计算. 由图 4 所示的偶极天线构成的  $2 \times 2$  天线阵列示意图如图 11 所示, 每个偶极天线的电极间距  $d$  为  $30 \mu\text{m}$ , 相邻两个偶极天线中心之间的距离  $D$  为  $300 \mu\text{m}$ , 衬底材料为 GaAs. 在 4 个阵元的间隙输入图 3 所示的激励信号, 在加载激励信号的阵元数分别为 1, 2, 4 的情况下, 垂直于天线平面中心轴上的电场随时间变化曲线如图 12 所示, 分析该结果可知, 2 个阵元加载激励信号时, 天线阵列辐射 THz 波的电场强度是单个天线的 2 倍; 4 个阵元加载激励信号时, 天线阵列辐射 THz 波的电场强度是单个天线的 4 倍, 说明天线阵列远场辐射符合电场叠加的倍数关系, 即  $E = nE_0$ .

天线阵列辐射 THz 波的远场辐射三维方向图和  $E$  面电场分布方向图如图 13 和 14 所示. 可以看到, 随着频率的增大, 天线阵列辐射形成的波瓣数比单个天线的更多; 天线的主波瓣在垂直天线平面的中心轴方向, 与单个天线相比, 光电导天线阵列辐射 THz 波的主波瓣宽度变窄, 方向性增强. 说明天线阵列不仅可以提高辐射的电场强度, 而且还可以提高辐射的方向性.

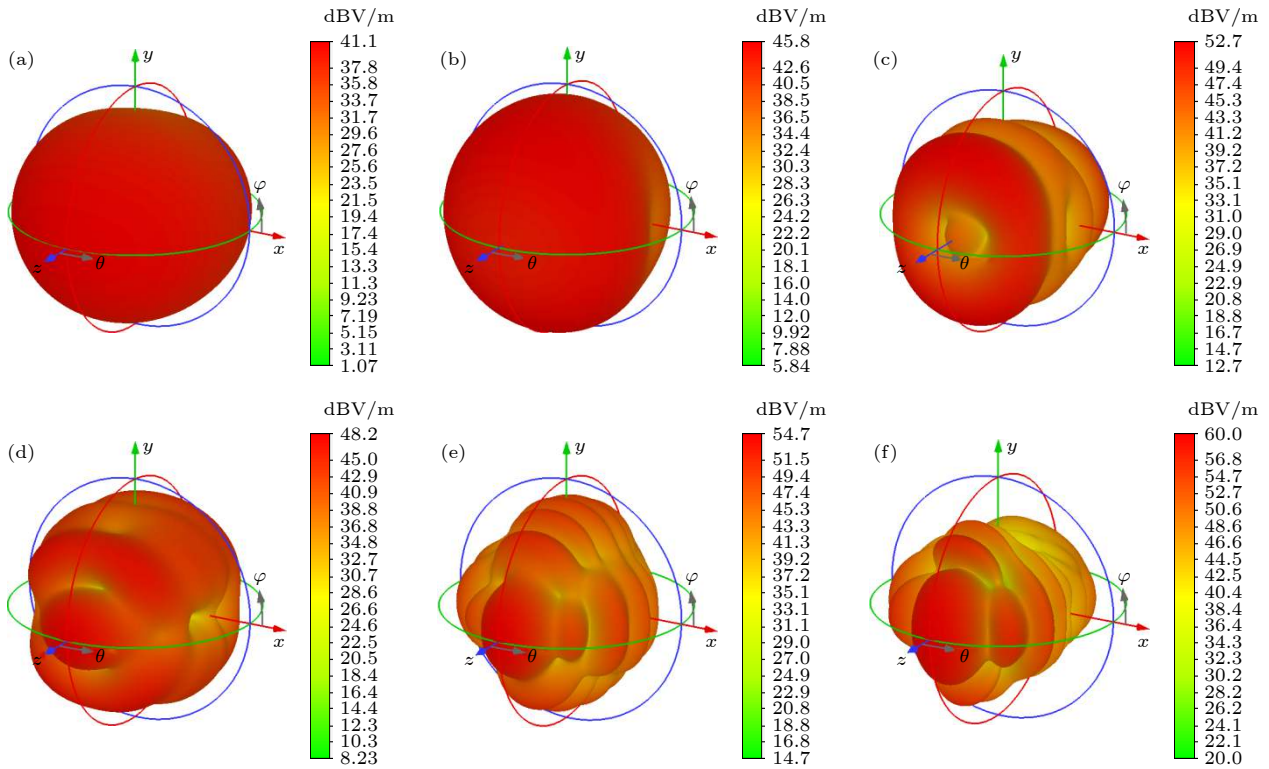


图 9 有衬底时天线远场辐射的三维方向图 (a) 0.3 THz; (b) 0.5 THz; (c) 1 THz; (d) 1.5 THz; (e) 2 THz; (f) 2.5 THz

Fig. 9. Three-dimensional patterns of far-field radiation of antenna with a substrate: (a) 0.3 THz; (b) 0.5 THz; (c) 1 THz; (d) 1.5 THz; (e) 2 THz; (f) 2.5 THz.

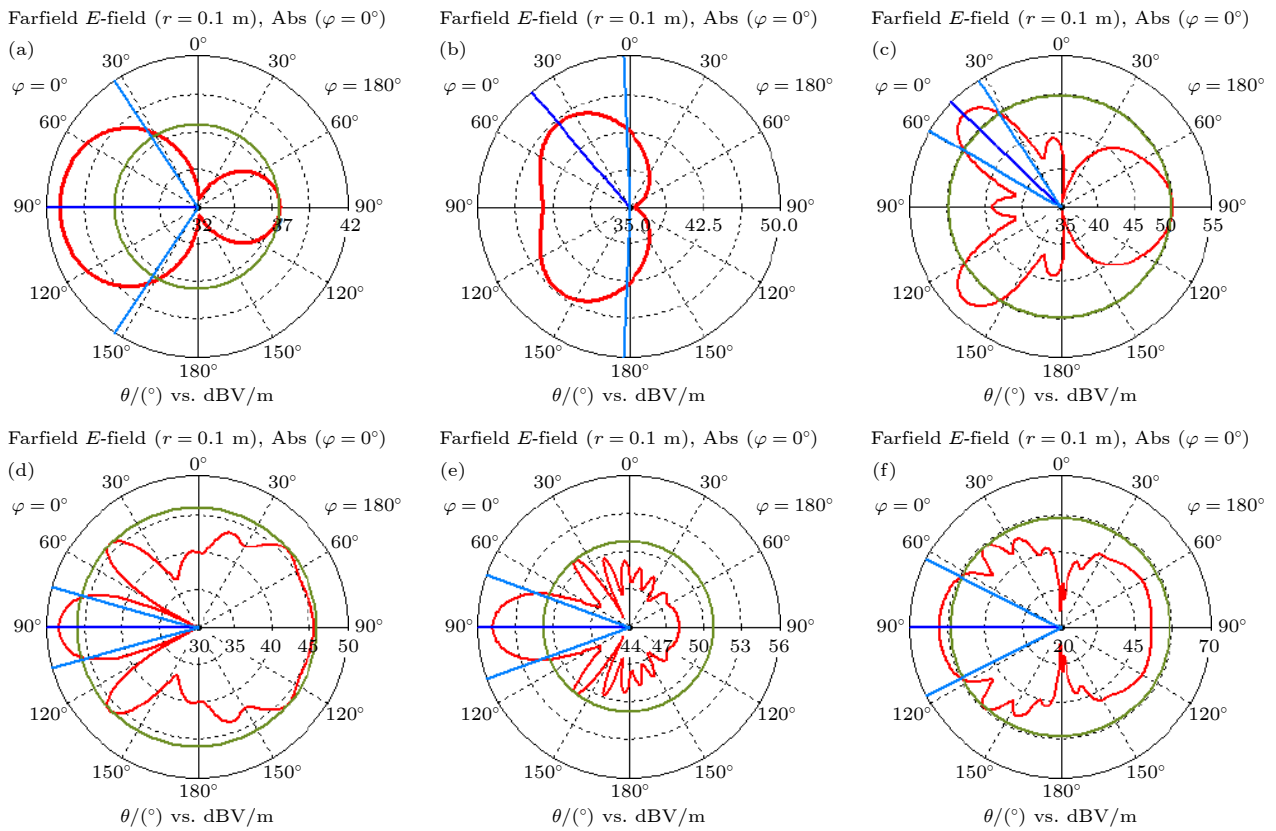


图 10 有衬底时天线  $E$  面电场分布方向图 (a) 0.3 THz; (b) 0.5 THz; (c) 1 THz; (d) 1.5 THz; (e) 2 THz; (f) 2.5 THz

Fig. 10. Electric field distribution pattern on the  $E$  surface of antenna with a substrate: (a) 0.3 THz; (b) 0.5 THz; (c) 1 THz; (d) 1.5 THz; (e) 2 THz; (f) 2.5 THz.

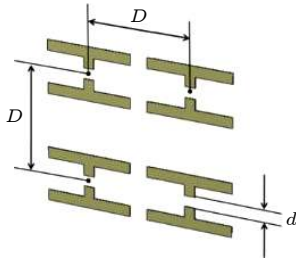


图 11 天线阵列示意图 ( $d: 30 \mu\text{m}$ ,  $D: 300 \mu\text{m}$ )

Fig. 11. Schematic diagram of antenna array ( $d: 30 \mu\text{m}$ ,  $D: 300 \mu\text{m}$ ).

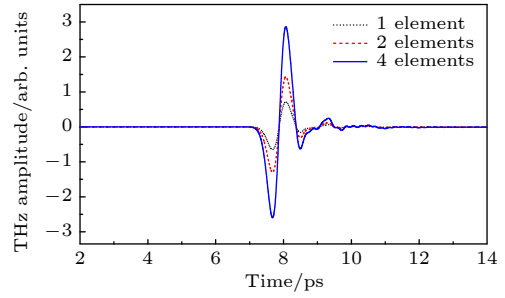


图 12  $2 \times 2$  天线阵列的时域谱

Fig. 12. Time-domain waveforms of  $2 \times 2$  antenna array.

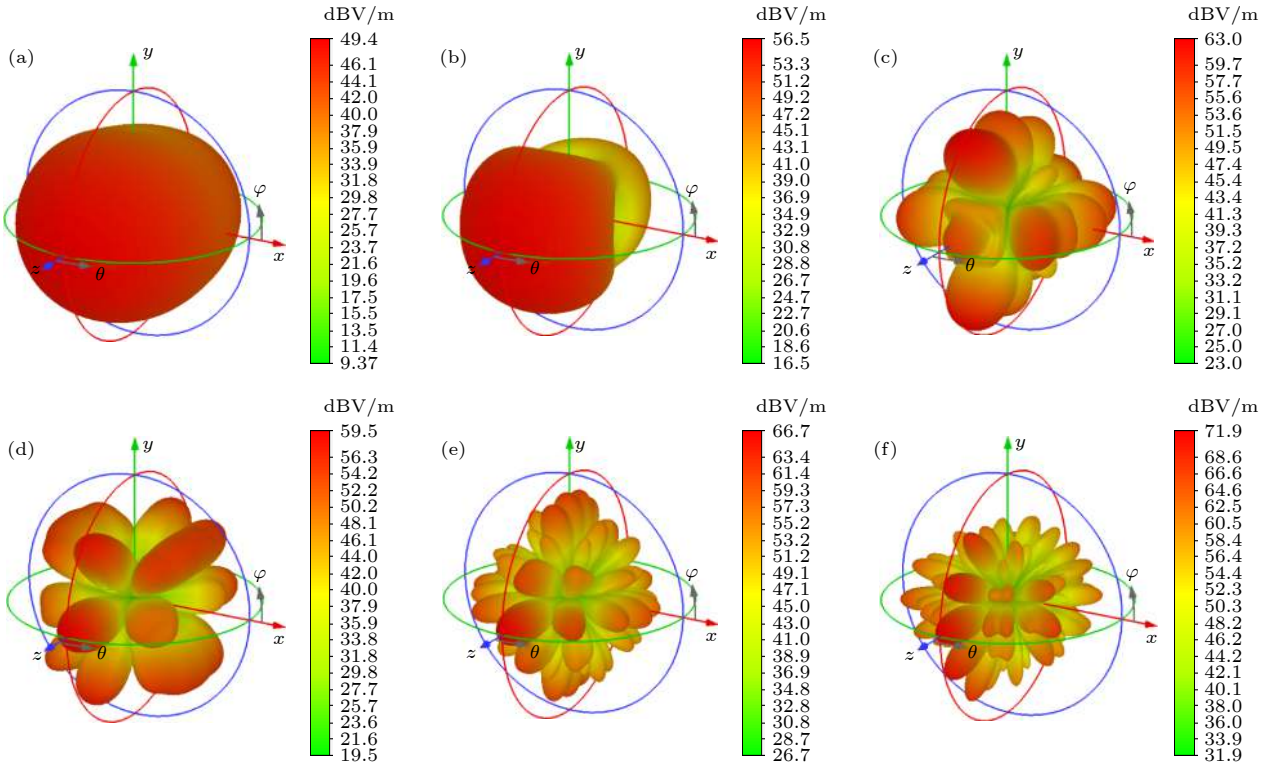


图 13 有衬底时天线阵列远场辐射的三维方向图 (a) 0.3 THz; (b) 0.5 THz; (c) 1 THz; (d) 1.5 THz; (e) 2 THz; (f) 2.5 THz

Fig. 13. Three-dimensional patterns of far-field radiation of antenna array with a substrate: (a) 0.3 THz; (b) 0.5 THz; (c) 1 THz; (d) 1.5 THz; (e) 2 THz; (f) 2.5 THz.

## 5 光电导天线阵列实验

利用透射式 THz-TDS [26] 系统研究了  $1 \times 2$  天线阵列的辐射特性. 图 15 所示为  $1 \times 2$  天线阵列的实物图, 天线衬底材料为 GaAs, 电极间距为  $150 \mu\text{m}$ , 两阵元中心之间的距离为  $500 \mu\text{m}$ , 天线电极通过金线连接到芯片管脚, 再通过 SMA (Sub-Miniature-A) 和同轴电缆连接到外部电源, 阵列中每个阵元上所加的偏置电压可以单独控制. 天线阵列在直流 30 V 偏压的作用下辐射 THz 波的时域谱如图 16 所示, 其中虚线分别表示阵元 1 和阵元 2

单独工作时辐射 THz 波的时域谱, 实线表示两个阵元同时工作时产生的 THz 波时域谱. 将阵元 1 与阵元 2 所辐射的 THz 波求和, 然后与两个阵元同时工作时的 THz 波进行比较, 时域谱如图 17 所示. 结果表明  $1 \times 2$  天线阵列的两个阵元同时工作时辐射 THz 波的时域谱 (实线) 与求和曲线 (虚线) 几乎完全重合, 说明  $1 \times 2$  天线阵列辐射 THz 波的电场强度等于两阵元单独工作时的辐射强度之和. 该结果从实验上验证了天线阵列远场辐射符合电场叠加的倍数关系, 模拟结论与实验结果一致.

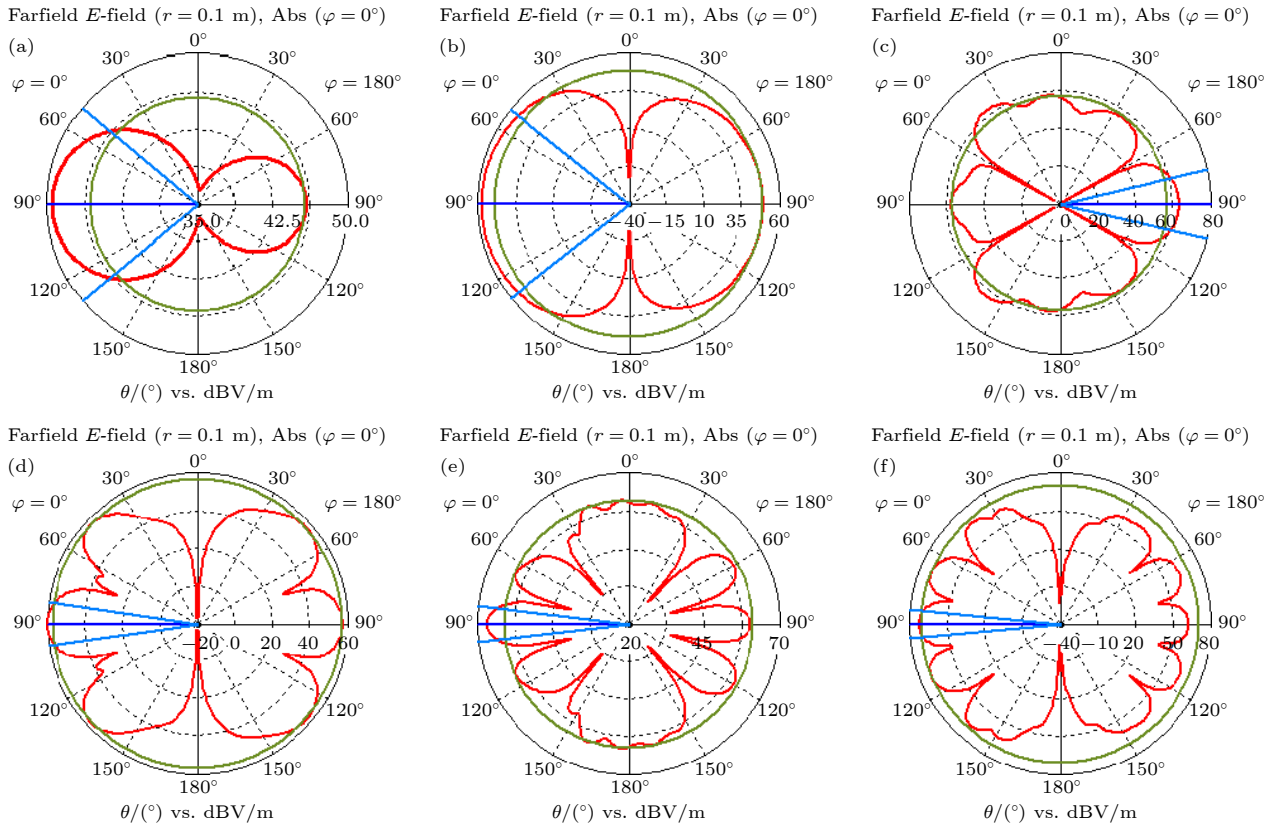


图 14 有衬底时天线阵列  $E$  面电场分布方向图 (a) 0.3 THz; (b) 0.5 THz; (c) 1 THz; (d) 1.5 THz; (e) 2 THz; (f) 2.5 THz  
 Fig. 14. Electric field distribution pattern on the  $E$  surface of antenna array with a substrate: (a) 0.3 THz; (b) 0.5 THz; (c) 1 THz; (d) 1.5 THz; (e) 2 THz; (f) 2.5 THz.

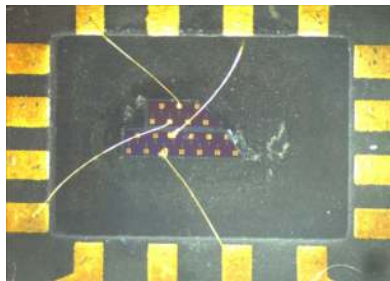


图 15  $1 \times 2$  天线阵列实物图  
 Fig. 15. Figure of  $1 \times 2$  antenna array.

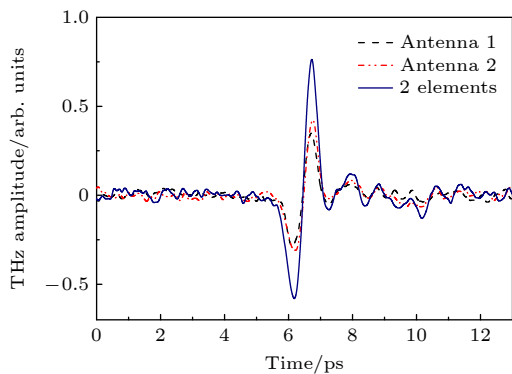


图 16  $1 \times 2$  天线阵列的时域谱  
 Fig. 16. Time-domain waveforms of  $1 \times 2$  antenna array.

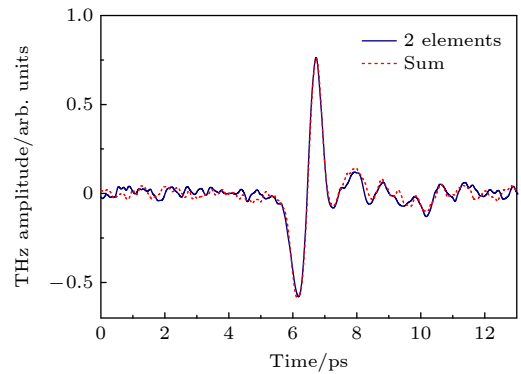


图 17 两个阵元同时工作与两个阵元辐射 THz 波求和的时域谱  
 Fig. 17. Time-domain waveforms when 2 elements are working simultaneously, and when radiative THz waves of 2 elements are superposed.

## 6 结论

本文采用 CST MWS 研究了 THz 光电天线及阵列的辐射特性, 对  $1 \times 2$  天线阵列的 THz 辐射性能进行了实验测试, 结果表明:

- 1) 仿真结果得出  $2 \times 2$  天线阵列远场辐射 THz 波的电场强度是单个天线的 4 倍, 符合电场



叠加的倍数关系, 即  $E = nE_0$ ;

2) 与单个天线相比, 随着频率的增大, 天线阵列辐射 THz 波形成的波瓣数目更多, 主波瓣宽度更窄, 方向性更强, 表明天线阵列有助于增强 THz 波辐射的方向性, 提高辐射的电场强度;

3) 用 THz-TDS 系统测试了所研制的  $1 \times 2$  GaAs 光电导天线阵列的 THz 辐射电场强度, 远场辐射符合电场叠加倍数关系, 模拟结论与实验结果一致.

## 参考文献

- [1] Ferguson B, Zhang X C 2002 *Nat. Mater.* **1** 26
- [2] Yen T J, Padilla W J, Fang N, Vier D C, Smith D R, Pendry J B, Basov D N, Zhang X J 2004 *Science* **303** 1494
- [3] Wang K L, Mittleman D M 2004 *Nature* **432** 376
- [4] Chen H T, Padilla W J, Zide J M O, Gossard A C, Taylor A J, Averitt R D 2006 *Nature* **444** 597
- [5] Tonouchi M 2007 *Nat. Photonics* **1** 97
- [6] Huang K C, Wang Z C 2011 *IEEE Microw. Mag.* **12** 108
- [7] Oh S J, Huh Y M, Haam S, Suh J S, Son J H 2012 *37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* Wollongong, Australia, September 23–28, 2012 p1
- [8] Kemp M C, Taday P F, Cole B E, Cluff J A, Fitzgerald A J, Tribe W R 2003 *Terahertz for Military and Security Applications* Orlando, USA, July 29, 2003 p44
- [9] Nagel M, Bolivar P H, Burcherseifer M, Bosserhoff H K, Buttner R 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 154
- [10] Mickan S, Abbott D, Munch J, Zhang X C, Doorn T 2000 *Microelectron. J.* **31** 503
- [11] He Y J, Chen Y L, Zhang L, Wong S W, Chen Z N 2020 *China Commun.* **17** 124
- [12] Awad M, Nagel M, Kurz H, Herfort J, Ploog K 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 181124
- [13] Tiedje H F, Saeedkia D, Nagel M, Haugen H K 2010 *IEEE T. Microw. Theory* **58** 2040
- [14] Yang X X, Vorobiev A, Yang J, Jeppson K, Stake J 2020 *IEEE T. THz. Sci. Techn.* **10** 554
- [15] Knotts M E, Denison D R 2006 *Quantum Electronics and Laser Science Conference* Long Beach, USA, May 21–26, 2006 p24
- [16] Berenger J P 1994 *J. Comput. Phys.* **114** 185
- [17] Berenger J P 1996 *J. Comput. Phys.* **127** 363
- [18] Berenger J P 1996 *IEEE T. Antenn. Propag.* **44** 110
- [19] Weiland T 1996 *Int. J. Numer. Model. El.* **9** 295
- [20] Weiland T, Timm M, Munteanu I 2008 *IEEE Microw. Mag.* **9** 62
- [21] Darrow J T, Zhang X C, Auston D H, Morse J D 1992 *IEEE J. Quantum Elect.* **28** 1607
- [22] Benicewicz P K, Roberts J P, Taylor A J 1994 *J. Opt. Soc. Am. B* **11** 2533
- [23] Hattori T, Tukamoto K, Nakatsuka H 2001 *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** 4907
- [24] Tani M, Matsuura S, Sakai K, Nakashima S 1997 *Appl. Optics* **36** 7853
- [25] Liu H, Ji W L, Shi W 2008 *PIERS Online* **4** 386
- [26] Yan Z J, Shi W, Hou L, Xu M, Yang L, Dong C G, Li S T 2017 *Mater. Res. Express* **4** 015304

SPECIAL TOPIC—Terahertz biophysics

# Radiation characteristics of terahertz GaAs photoconductive antenna arrays<sup>\*</sup>

Yan Zhi-Jin Shi Wei<sup>†</sup>*(Department of Applied Physics, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)*

( Received 29 June 2021; revised manuscript received 21 July 2021 )

## Abstract

A GaAs photoconductive antenna is one of the important radiation sources of terahertz electromagnetic waves. Antenna arrays can increase the radiation intensity of terahertz waves. Therefore, photoconductive antennas and arrays have attracted much attention for a long time. In this study, CST Microwave Studio is used to conduct a simulation calculation of the characteristics of a photoconductive antenna array radiating terahertz electromagnetic waves. Using the current transient model, the pulsed photocurrents generated when the laser is incident on the GaAs photoconductive antenna are calculated. With the pulsed photocurrents serving as an excitation source, a simulation calculation of the radiation performance of photoconductive antenna is conducted, and the effects of antenna structure and substrate material on the radiation of terahertz waves are analyzed. Based on this, the far-field radiation of terahertz wave radiated by the GaAs photoconductive antenna array is calculated. The simulation results show that the photoconductive antenna array radiates terahertz waves with stronger directivity. The width of main lobe is reduced, and its far-field radiation conforms to the multiple relationships of electric field superposition. A  $1 \times 2$  GaAs photoconductive antenna array is developed, and the experimental results are consistent with the simulation conclusions, thereby laying a theoretical and experimental basis for fabricating the multielement terahertz photoconductive antenna arrays.

**Keywords:** terahertz, electromagnetic wave, photoconductive antenna, antenna array**PACS:** 87.50.U-, 72.20.-i, 87.55.Gh**DOI:** [10.7498/aps.70.20211210](https://doi.org/10.7498/aps.70.20211210)

<sup>\*</sup> Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2017YFA0701005), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51807161), the State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect of China (Grant No. SKLIPR1812), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2018M633547), and the Youth Innovation Team of Shaanxi Universities, China (Grant No. 21JP084).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [swshi@mail.xaut.edu.cn](mailto:swshi@mail.xaut.edu.cn)