

偶极子光电导天线结构对 THz 辐射特性影响的研究

夏祖学^{1,2}, 刘发林¹, 陈俊学³, 尚丽平², 邓 琥², 熊 亮²

- (1. 中国科学技术大学 信息科学技术学院, 安徽 合肥 230027;
2. 西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621010;
3. 西南科技大学 理学院, 四川 绵阳 621010)

摘 要: 研究了 GaAs 工型偶极子光电导天线(PCA)结构参数对 THz 辐射特性的影响。首先利用 DL (Drude-Lorentz)模型得到了光电导天线的电流解析解,结合时域有限差分(FDTD)进行半解析半数值仿真,有效地解决了纯解析解(通过光电流对时间求导数可以得到辐射的 THz 的相对强度)无法和 PCA 结构直接对应的仿真问题,也较直接全波 FDTD 方法计算效率高。接着,利用偶极子光电导天线的等效电路模型和等效源阻抗公式,结合实际的 PCA 参数,分别得到了 PCA 阻抗和源阻抗,说明了由于源阻抗很低,导致匹配效率较低。最后,综合考虑数值仿真结果和理论计算结果可证明,工型偶极子光电导天线的辐射效率会随着其长宽比的增加而相应增加,该结论与相关文献实测结果吻合,从而也验证了文中 FDTD 仿真结果、理论模型及计算结果的有效性。

关键词: 太赫兹辐射; 光电导天线结构参数; 匹配效率; 时域有限差分; 德鲁德-洛伦兹模型
中图分类号: TN201 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2429-06

Impact of dipole photoconductive antenna structure on the THz radiation characteristics

Xia Zuxue^{1,2}, Liu Falin¹, Chen Junxue³, Shang Liping², Deng Hu², Xiong Liang²

- (1. Department of Electronic Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;
2. School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;
3. School of Science, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: Influence of the geometrical parameters of GaAs dipole photoconductive antenna (PCA) on the PCA's radiation characteristics was studied. At first, the analytical solution of PCA's current obtained by the Drude-Lorentz(DL) model was obtained as excitation, and the numerical finite-difference time-domain (FDTD) simulation was conducted. This had effectively solved the problem of analytical solution (where the relative intensity of THz radiation can be obtained by time derivative) which cannot simulate the influence of PCA structure parameters. Then, using the equivalent circuit model of dipole photoconductive antenna and the equivalent source resistance's expression, both the PCA's and the source's impedances were obtained for the practical PCAs. And it is demonstrated that the matching efficiency is not high

收稿日期:2014-12-13; 修订日期:2015-01-15

基金项目:国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金(11176032)

作者简介:夏祖学(1975-),男,博士生,主要从事太赫兹光导天线研究及微波器件、天线方面的研究。Email:xiazuxue@mail.ustc.edu.cn

导师简介:刘发林(1963-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事电磁场与微波技术、微波通信等方面的研究。Email:liuf@ustc.edu.cn

because of the very low source impedance. Finally, by considering both the FDTD simulation results and theoretical calculation results, it can be proved that the dipole antenna's radiation efficiency will increase with the increase of its aspect ratio. This conclusion is found to be in accordance with the reported measured results. Thus the simulation results, the theoretical model and the calculation results are all verified.

Key words: THz radiation; PCA geometrical parameters; match efficiency; FDTD; DL model

0 引言

光电导天线(PCA)自 1984 年 Auston 等人首次提出以来成为了目前最常用的太赫兹波产生结构^[1],这都得益于激光超短脉冲技术和半导体材料技术的发展。光电导天线产生 THz 波主要有基于脉冲和连续波两种机制,分别产生宽谱和窄带频谱。在典型脉冲 THz 系统中,飞秒激光触发电导天线的偶极子间隙的 GaAs 材料,使得光生载流子在偏压的作用下辐射出宽谱的 THz 波。

脉冲光电导天线产生的 THz 频谱范围宽度一般在 3 THz 以内,峰值频率都位于 THz 波段的低频区域^[2-3],而且 THz 波辐射效率非常低^[4-5]。因此,优化天线结构设计,进而提高 THz 辐射特性一直是国内外研究者的目标。工形偶极子光电导天线辐射的 THz 波有效谱较宽,又有较高的辐射强度,是最常用的天线结构^[5-6]。2010 年,日本信州大学的 Miyamaru 等人^[7]实测发现增加偶极子的长宽比可以增加光电导天线的发射效率。2012 年, Irie 等人^[8]利用有限积分(FIT)技术,对 Miyamaru 等人的模型进行了仿真,但是没有给出天线的几何尺寸长度、宽度对 THz 波辐射效率影响。参考文献[9-10]基于时域有限差分(FDTD)方法研究了工形偶极子光电导天线辐射特性,只给出了辐射的 THz 波时域波形。

一方面,光电导天线尺寸小,一般在微米量级,传统的微加工工艺都难于加工,一般采用光刻法、喷墨打印法,但也存在成本昂贵,加工周期长的问题。另一方面,光电导天线与传统的微波射频天线非常不同,还没有能够兼顾电磁仿真和半导体数值模拟的可供利用的商业软件。因此,目前报道的基于 THz-TDS 系统对光电导天线的 THz 辐射特性进行实验研究的文章数量不多,基于算法进行理论仿真的

文章就更少。文中将结合德鲁德-洛伦兹(DL)模型^[11]导出光照产生的光导电流作为激励,采用 FDTD 方法对 GaAs 工形偶极子结构参数,特别是不同长度、宽度对 THz 辐射频谱特性的影响进行仿真研究。还通过偶极子光电导天线的等效电路模型和等效源阻抗公式,计算出二者的阻抗,具体说明了低匹配效率来自于低源阻抗;并给出了长度、宽度变化对 THz 波辐射峰值频率影响的物理解释。

1 偶极子光电导天线结构参数对 THz 波辐射特性的影响分析

根据赫兹偶极子理论,辐射远场 THz 波为:

$$E_{\text{THz}}(t) = -\frac{A}{4\pi r \epsilon_0 c^2} \frac{d}{dt} J_s \propto \frac{d}{dt} I_{\text{PC}}(t) \quad (1)$$

式中: J_s 为表面电流密度; I_{PC} 为光电流。也就是说辐射的 THz 的强度正比于光电导天线表面的电流密度,也正比光电导电流。因此光生载流子产生的光电流是决定 THz 辐射的根源。德鲁德-洛伦兹(Drude-Lorentz, DL)模型有效地描述了激光激发的电子空穴对的载流子输运过程。基于 DL 模型可得到公式(2)的光生电流如下:

$$I_{\text{PC}}(t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \mu_e E_{\text{DC}} I_{\text{out}} \left[\exp\left(\frac{\tau_p^2}{4\tau_c^2} - \frac{t-t_0}{\tau_c}\right) \cdot \text{erfc}\left(\frac{\tau_p}{2\tau_c} - \frac{t-t_0}{\tau_p}\right) - \exp\left(\frac{\tau_p^2}{4\tau_{cs}^2} - \frac{t-t_0}{\tau_{cs}}\right) \cdot \text{erfc}\left(\frac{\tau_p}{2\tau_{cs}} - \frac{t-t_0}{\tau_p}\right) \right] \quad (2)$$

式中: $1/\tau_{cs} = 1/\tau_c + 1/\tau_s$; $\text{erfc}(x) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \int_x^\infty e^{-t^2} dt$ 。

这里, μ_e 为电子的迁移率; E_{DC} 为直流偏置电场; I_{out} 为高斯形入射激光脉冲的光强; τ_p 为高斯脉冲半宽度时间,文中用 120 fs; τ_s 是载流子漂移速度从零达到稳态值所需要的弛豫时间(对于 GaAs 约为 1 ps); t_0 为高斯脉冲的延迟时间,文中选用 4 ps; τ_c 为载流

子寿命,取为 1 ps。根据上述参数设置,可以得到用于仿真的光生电流的时域波形,如图 1 所示。

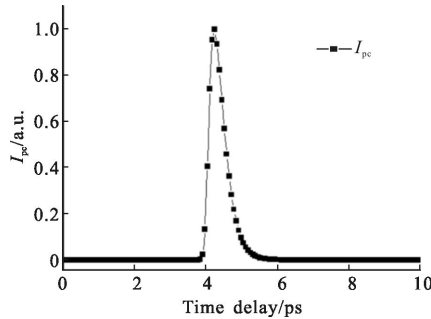


图 1 光生电流的时域波形

Fig.1 Time-domain waveform of photo-generated current

从图 1 可以看到,光生载流子在偏置电场作用下加速运动,产生的电流在开始阶段快速单调上升,电流从零增加到峰值所需要的时间由激光脉冲宽度决定。当电流达到峰值后,尽管载流子的平均速度仍在增大,但是由于内建电场的屏蔽作用和载流子的寿命限制,导致光生载流子数随时间的变化逐渐趋于零。这时载流子的总数保持不变。通过对光电流取时间导数,可以定性求解 THz 辐射电场,归一化辐射频谱只和激光脉冲半宽度、载流子寿命等有关。但纯解析求解方法存在归一化辐射频谱不能和 PCA 结构完全对应的问题。文中试图再结合 FDTD 方法,既能求解辐射频谱,又能和 PCA 结构完全对应,这将给实际设计带来方便。

作为模拟脉冲激励 PCA 的重要仿真技术之一的 FDTD 方法,得到了越来越多的应用。主要就是因为 FDTD 方法是基于时域 Maxwell 微分方程求解电磁问题的一种数值计算方法,通过一次时域分析计算,借助傅里叶变换可以得到宽频信息,非常适合光电导天线辐射 THz 宽谱的仿真计算。如果考虑光生载流子产生电流的 FDTD 全波数值模拟的方法,由于要考虑静电场的产生、载流子产生与复合的半导体运输过程等,因此计算量非常大。而由 DL 模型计算产生的光导电流作为激励,再采用 FDTD 方法仅仅对光电导天线部分进行仿真,可省去对激光照射部分光生载流子的有限差分迭代,CPU 占用时间缩短^[2],仿真效率较全波的 FDTD 数值模拟方法高。因此,这里考虑采用光电流求解和 FDTD 方法结合,以分析不同 PCA 结构的 THz 辐射特性的问题。

2 基于 FDTD 方法和解析电流结合的高效研究

2.1 不同长度偶极子 PCA 辐射 THz 频谱特性

首先在电极的激活区域,施加基于 DL 模型得到的归一化光生电流,也即是归一化的瞬态变化光电流密度,再结合下列旋度的微分形式的麦克斯韦公式(3)、(4)可以得到时变的电磁场,公式(4)中的电流密度需要代入激励网格。然后再通过近远场变换来模拟 THz 光导天线的远场辐射。

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times H = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} + J \quad (4)$$

这里仿真的工型偶极子天线结构如图 2 所示(长度单位: μm),介质基底为 LT-GaAs。由于受 Debye 深度(约 $1 \mu\text{m}$ 左右)^[1]的限制,以及计算机内存和计算效率的限制,综合考虑,采用均匀网格的划分, $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1 \mu\text{m}$ 。时间间隔 $\Delta t = 1.67 \text{ fs}$, 满足 Courant 稳定性条件,确保离散后的差分麦氏方程组的解无数值色散。

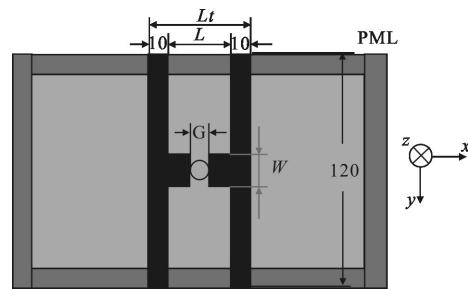


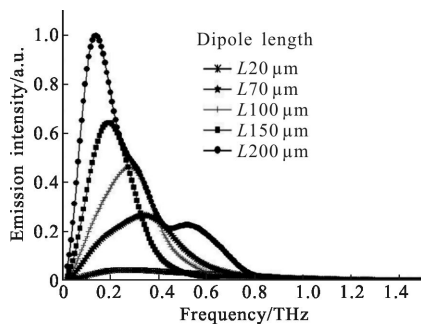
图 2 工型偶极子天线结构

Fig.2 Structure of the dipole PCA

仿真时载流子寿命 τ_c 为 1 ps, 激光半宽度 τ_p 为 120 fs, 金属被看作成完美电导体, 高折射率基底材料 GaAs 的介电常数为 12.9。仿真的偶极子天线长度 L 依次取为 $20 \mu\text{m}$ 、 $70 \mu\text{m}$ 、 $100 \mu\text{m}$ 、 $150 \mu\text{m}$ 和 $200 \mu\text{m}$ (天线间隙的具体数值不变, 均为 $G = 5 \mu\text{m}$, $W = 10 \mu\text{m}$), 文中基于 5 种长度的 FDTD 仿真结果如图 3(a)所示, 图 3(b)为参考文献[7]的实测图, 可以看到, 两者吻合较好。

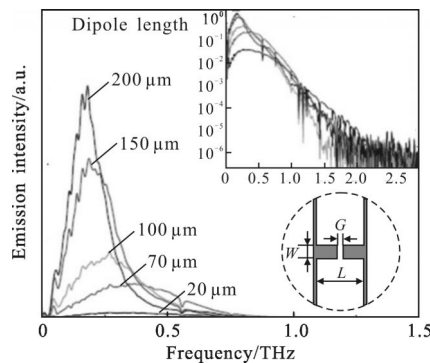
从图 3(a) FDTD 仿真结果可以看到, 从小到大的五种天线长度仿真对应的谐振频率分别为 0.36 THz,

0.32 THz, 0.28 THz, 0.22 THz, 0.19 THz, 和参考文献[7]实测结果趋势也一致,即随着天线长度 L 的增加,对应的 THz 波的中心频率向低端移动,这可以由微波天线理论的谐振公式解释。比较发现,得到的光电导天线频谱都是宽谱特性,不同长度天线的频谱范围都主要集中在 1 THz 以下,主要原因是光电导天线的 Q 值很低,所以相应的带宽较大,而非微波驻波天线的窄带特性,也就不具有明显的谐振特性。



(a) 半波 FDTD 仿真曲线

(a) Half wave FDTD simulation curves



(b) 参考文献[7]测量曲线

(b) Experimental curves in reference[7]

图 3 不同天线长度的 PCA 辐射的 THz 波频谱图

Fig.3 THz spectra of the PCAs with different lengths

另一方面,在谐振频率随天线长度增加向低端移动的情况下,由于能量守恒,辐射 THz 波场强也必然增加,图 3 中仿真和实验结果也吻合。 $L=200 \mu\text{m}$ 的 THz 峰值频率 0.19 THz(实测 0.25 THz)对应的幅值大致是 $L=20 \mu\text{m}$ THz 峰值频率 0.36 THz (实测 0.35 THz)的 25 倍,与参考文献[7]实测趋势一致。总之,仿真结果与实测结果定性上趋势完全一致,具体峰值频率仿真与实测结果的少许差异,主要在于仿真参数的选取,如材料载流子寿命等取值的不同。

2.2 全波 FDTD 和半波 FDTD 数值方法仿真效率的比较

这里使用的是主频 2.0GHz 处理器电脑,内存 2G 配置,32 位 WindowsXP 操作系统。基于 FDTD 方法和电流结合的方法,半波 FDTD 仿真结果和全波 FDTD 仿真结果基本一致。不同长度 PCA 天线全波 FDTD 仿真频谱曲线如图 4 所示。

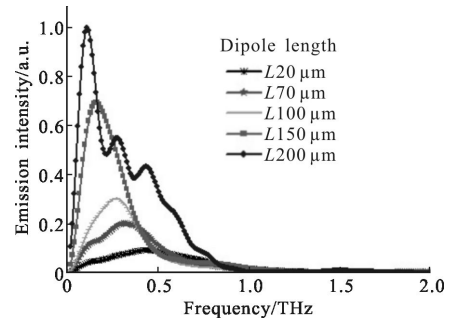


图 4 全波 FDTD 仿真辐射频谱

Fig.4 Full wave FDTD simulation emission spectra

从图 3(a)和图 4 可以看出,半波与全波仿真的峰值谐振频率随天线长度增加都向低端移动,与参考文献 [7] 实测趋势都一致,而幅度变化趋势也一致,也注意到了具体归一化值并不相同。这里定义峰值频率相对误差 γ_{pr} 为:仿真峰值频率与实测峰值频率之差与实测峰值频率之比。不同长度 PCA 天线仿真比较如表 1 所示。

表 1 不同长度 PCA 天线仿真比较

Tab.1 Comparison of PCAs with different lengths

$L/\mu\text{m}$	Full wave time-consuming	γ_{pr} (full wave)	Half wave time-consuming	γ_{pr} (half wave)
20	3 h25 min	20%	1 h44 min	2.86%
100	4 h48 min	13.3%	2 h6 min	-6.7%
200	6 h6 min	-44%	2 h9 min	-24%

从表1 还可以看到,在计算总空间不变($300 \mu\text{m} \times 120 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$),时间步长等均一致的前提下,半波 FDTD 方法耗时变化不大,省去了全波 FDTD 方法中光生载流子的有限差分迭代,CPU 占用时间明显缩短,而全波 FDTD 仿真随着天线尺寸的增加,耗时明显增加。并且,对于简单结构的偶极子天线的半波较全波仿真的峰值频率相对误差低。因此,综合起来,看出半波 FDTD 较全波 FDTD 的仿真有优势。

2.3 不同宽度工型 PCA 的 THz 辐射频谱特性

固定天线的长度 $L=20\ \mu\text{m}$ 时, τ_c 为 $1\ \text{ps}$, τ_p 为 $120\ \text{fs}$, 与前述条件一致。文中仿真时, 假设光斑长度 $3\ \mu\text{m}$, 刚好正入射到孔径的中央, 不同天线宽度(天线间隙长度数值不变, 均为 $G=5\ \mu\text{m}$) 光导天线频谱如图 5 所示。

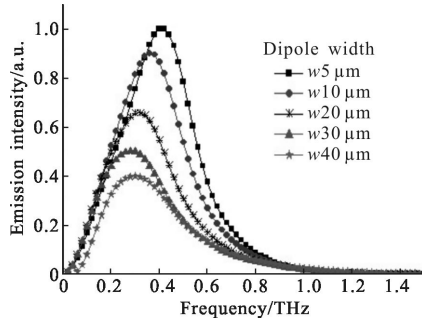


图 5 不同天线宽度光导天线频谱

Fig.5 THz spectra of the PCAs with different widths

从图 5 可以看到, 不同天线宽度光导天线仿真频谱变化的整体趋势都随着天线宽度的减少, 辐射的 THz 波电场逐步增强。这与 Khiabani 文章^[13]结论一致, 其工作条件是总的输入电流为常数。这也和相关文献结论^[13], 为了获得较强的 THz 波信号, 天线孔径的长度、宽度都应该取得较小值是一致的(考虑到间隙击穿, 天线孔径长度取值也不能太小)。Miyamaru 文章^[7]上的相关结论与此不一致, 但其工作条件是随着天线电极宽度的增加, 外加电压也相应增加, 则产生的静态电场按照相应比例也增加, 辐射的 THz 波电场也相应增加。

考虑到天线宽度太窄难于加工和获取较强的 THz 波辐射电场, 天线宽度一般典型值取为 $10\ \mu\text{m}$ 。光导天线辐射 THz 波的效率非常低, 如何改善天线结构, 从而提高光电导天线的辐射效率, 有必要进一步从偶极子 PCA 等效电路模型、等效时变电导以及天线阻抗匹配上进一步考虑。

3 偶极子 PCA 等效电路模型及辐射频谱特性解释

3.1 偶极子 PCA 等效电路及等效源电阻

光电导发射天线基本等效电路如图 6 所示, 在光导天线结构中, 超短激光脉冲照射到光导材料上产生电子-空穴对, 电子-空穴对在偏置电场作用下

加速运动形成光电流, 从而改变了电极间的电导, 对应的就是在传统的光导天线结构中光电导开关电阻 $R_s(t)$ 的倒数, Z_a 为光电导天线的等效辐射电阻。根据参考文献[5], 可以得到光电导天线的源阻抗:

$$R_s = \frac{\rho L_g}{A} \approx \frac{3hcf_R L_g^2}{2e\mu_e P_{av} \lambda_L} \quad (5)$$

对于典型的脉冲光电导天线, 仿真计算时, 对于低温砷化镓, μ_e 取值为 $1\ 000\ \text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ^[4]; 激光波长 λ_L 为 $800\ \text{nm}$, 激光脉冲重复频率 f_R 为 $80\ \text{MHz}$, 平均激光功率 P_{av} 为 $36\ \text{mW}$; 这里 $L_g=5\ \mu\text{m}$ 。计算可得到源阻抗 $R_s=1.289\ \Omega$, 阻抗和天线几何参数、激光参数和半导体材料等参数都有关系, 和参考文献[4]不同条件下相关算例结果得到的 $0.827\ \Omega$ 接近, 与参考文献[5]实际测试的阻抗 $2.53\ \Omega$ 也接近, 仿真和实测结果的不完全相同的原因是仿真简化的电流脉冲为矩形(方便 FDTD 仿真计算), 而不是实际的高斯脉冲。

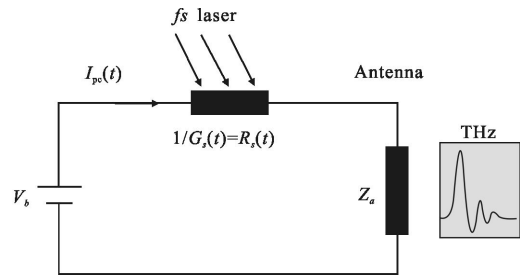


图 6 光电导发射天线等效电路

Fig.6 Equivalent circuit of the dipole PCA

3.2 工型偶极子 PCA 几何参数与匹配效率影响及解释

根据天线理论, 天线效率包括辐射效率和阻抗匹配效率(这里暂时没有考虑光电转换效率 η_E , 一般情况下为 10^{-4} 量级), 辐射效率定义为辐射功率和天线接收到的输入功率之比:

$$\eta_r = \frac{P_r}{P_{in}} \times 100\% \quad (6)$$

匹配效率定义为天线接收到的输入功率与源的供给功率之比:

$$\eta_m = P_{in}/P_s = (1 - \Gamma^2) \times 100\% \quad (7)$$

式中: Γ 为反射系数。

$$\Gamma = \frac{Z_a - Z_s}{Z_a + Z_s} \quad (8)$$

真空媒质中的偶极子天线在谐振频率上辐射阻

抗为 73.1Ω 。因此,对于介电常数为 12.9 的低温砷化镓基底材料,则光电导偶极子天线在谐振频率上的辐射阻抗为 $27 \Omega^{[4]}$,根据公式(8)可以计算得到反射系数 $\Gamma=0.9089$ 。根据公式(7)可以得到匹配效率 η_m 仅为 0.1739,也就是说即使选择较好的天线几何参数,脉冲光电导天线的匹配效率仍然很低。辐射效率 η_r 较高,可达 80%,再考虑不高的匹配效率,和极低的光电转换效率 η_{LE} ,总的辐射效率依然非常低。因此,提高光电导天线的辐射效率就非常有意义了,考虑到图 3 的 FDTD 仿真和实测结论:谐振频率随天线长度增加向低端移动的情况下,辐射 THz 波场强也增加。再结合图 5 的结论:随着天线宽度的减少,辐射的 THz 波电场逐步增强。综合考虑可以得出,增加光电导天线的长宽比,最终也会提高天线的总的辐射效率,这和参考文献[7]结论吻合。

4 结 论

文中首先基于 DL 方法得到了偶极子光电导天线的电流密度,进而结合 FDTD 方法仿真了不同长度、宽度的工型偶极子天线,得到了 THz 波辐射的频谱图。FDTD 仿真结果表明:随着天线长度增加,辐射的 THz 波的中心频率向低端移动;随着天线宽度的减少,辐射的 THz 波电场逐步增强。并且,基于 FDTD 方法和电流结合的半波仿真方法,较全波 FDTD 方法计算效率高。接着,通过偶极子光电导天线的等效电路模型和等效源阻抗公式,结合计算实例,说明了低源阻抗是造成低匹配效率的原因,也较好地解释了工型偶极子 PCA 的提高长宽比,可以提高天线的辐射效率;并和相关文献结论吻合,也验证了文中的光电导天线理论模型以及 FDTD 仿真结果的有效性。

合理选择天线的长度、宽度等几何参数和光电导材料的参数、入射光光强、电场偏压等,对提高光电导天线辐射效率有一定的影响,如何能够提高天线的辐射效率,同时也能使频谱能量向高端移动将是以后研究的一个重要方向。

参考文献:

[1] Cheng Wei, Wang Yingxin, Zhao Ziran. New research progress of photoconductive terahertz source [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(6): 597-604. (in Chinese)

[2] Hughes S, Tani M, Sakai K. Vector analysis of terahertz transients generated by photoconductive antennas in near-and far-field regimes[J]. *Appl Phys*, 2003, 93(8): 4880-4884.

[3] Smith P R, Auston D H, Nuss M C. Subpicosecond photoconducting dipole antennas [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1988, 24(2): 255-260.

[4] Huang Y, Khiabani N, Shen Y C, et al. Terahertz photoconductive antenna efficiency [C]//2011 International Workshop on Antenna Technology (iWAT), 2011: 152-156.

[5] Ezdi K, Islam M N, Reddy Y A N, et al. A numerical study of photoconductive dipole antennas: the real emission frequency and an improved antenna design [C]//SPIE, 2006, 6194: 61940G: 1-9.

[6] Liu Juan, Zhang Zhaoyun, Li Yinxin, et al. Terahertz radiation frequency spectrum of large-aperture GaAs photoconductor antennas Information and Electronic Engineering [J]. *Information and Electronic Engineering*, 2011, 9(3): 325-329. (in Chinese)

[7] 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(211104): 1-4.

[8] Irie K, Saigusa M, Takano K, et al. Analysis and estimation of spectrum characteristics for dipole photoconductive antenna that includes photocurrent and receiving antenna effects[C]//Infrared Millimeter Waves and 37th International Terahertz Electronics Conference IRMMW-THz, 2012: 1-2.

[9] Moreno-Perez E, Pantoja M F, García S G, et al. Time domain simulation of THz photoconductive antennas [C]//6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), 2012: 1054-1057.

[10] Kirawanich P, Yakura S J, Islam N E. Study of high-power wideband terahertz-pulse generation using integrated high-speed photoconductive semiconductor switches [J]. *IEEE Journal of Plasma Science*, 2009, 37(1): 219-228.

[11] Zhisheng Piao, Masahito Tani, Kiyomi Sakai, et al. Carrier dynamics and terahertz radiations in photoconductive antenna [J]. *Appl Phys*, 2000, 39: 96-100

[12] Zhang Liwei, Shang Liping, Tang Jinlong, et al. Simulation of radiation characteristics of 34 μm aperture GaAs dipole photoconductive antenna [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2013, 42(1): 108-112. (in Chinese)

[13] Khiabani N, Huang Y, Shen Y C, et al. A novel simulation method for THz photoconductive antenna characterization [C]//Antennas and Propagation(EUCAP) 2013 7th European Conference, 2013: 751-754.