

## 34 $\mu\text{m}$ 孔径 GaAs 偶极子光电导天线辐射特性仿真研究

张李伟<sup>1</sup>, 尚丽平<sup>1</sup>, 唐金龙<sup>2</sup>, 夏祖学<sup>1</sup>, 邓 琥<sup>1</sup>

(1. 西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621010; 2. 西南科技大学 理学院, 四川 绵阳 621010)

**摘要:** 光电导天线的辐射特性仿真是设计和制造光电导天线的重要依据。将蒙特卡洛经验公式修正的 GaAs 迁移率随电场强度的变化关系引入德鲁德-洛伦兹模型, 分析了光电导天线载流子输运情况。又将德鲁德-洛伦兹模型计算的光生载流子密度与时域有限差分方法相结合, 得到 34  $\mu\text{m}$  孔径 GaAs 偶极子光电导天线的时域、频域及三维辐射特性。辐射峰值为 0.8 THz, 频谱宽度大于 1 THz, 与太赫兹时域光谱系统实际测量得到的数据吻合。结果表明: 仿真方法正确可行, 能够为设计和制造高增益、宽频带的太赫兹光电导天线提供参考依据。

**关键词:** 太赫兹; 光电导天线; 时域有限差分方法; 德鲁德-洛伦兹模型; 辐射特性  
**中图分类号:** TN201   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2013)01-0108-05

## Simulation of radiation characteristics of 34 $\mu\text{m}$ aperture GaAs dipole photoconductive antenna

Zhang Liwei<sup>1</sup>, Shang Liping<sup>1</sup>, Tang Jinlong<sup>2</sup>, Xia Zuxue<sup>1</sup>, Deng Hu<sup>1</sup>

(1. School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;  
2. School of Science, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

**Abstract:** Simulation characteristics of photoconductive antenna (PCA) radiation are the important basis for design and manufacture of photoconductive antenna. The method introduced the relationship between Monte-Carlo empirical-formula and updated GaAs migration-rate versus electric-field strength. The photo-generated carrier-density of 34  $\mu\text{m}$ -aperture GaAs dipole photoconductive antenna was computed based on Drude-Lorentz model. Combining the photo-generated carrier-density with finite difference time domain (FDTD) method, time-domain, frequency-domain and three-dimensional radiation characteristics were simulated. The frequency spectrum of the terahertz radiation ranged about 1 THz, and its amplitude peaks were at roughly 0.8 THz, which consisted well with the data obtained from terahertz time-domain spectrum system (THz-TDS). The results show the feasibility of this method, which provides a reference for design and manufacture of the high-gain, wideband THz photoconductive antenna.

**Key words:** THz; photoconductive antenna; FDTD; Drude-Lorentz model; radiation characteristics

收稿日期: 2012-05-05; 修订日期: 2012-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(11176032)

作者简介: 张李伟(1987-), 男, 硕士生, 主要从事太赫兹光电导天线模拟方面的研究。Email: zhanggliwei@126.com

导师简介: 尚丽平(1968-), 女, 教授, 硕士生导师, 博士后, 主要从事光电检测与太赫兹技术方面的研究。

Email: shangliping@swust.edu.cn

## 0 引言

光电导天线(PCA)在超短脉冲激光触发下产生的非平衡载流子在强场作用下快速输运、辐射太赫兹电磁波,是产生太赫兹的重要方法,以其较高的辐射功率和宽频带受到了广泛关注<sup>[1-3]</sup>。

PCA 的载流子输运过程符合波耳兹曼方程、电子辐射过程符合麦克斯韦方程。针对 PCA 的仿真方法主要有两类,一是使用经典的扩散-漂移模型及其修正模型,如相对电流瞬冲模型<sup>[4]</sup>、与场相关的陷阱俘获模型<sup>[5]</sup>分析载流子的输运,将载流子密度耦合到时域有限差分(FDTD)方法网格中进行全波分析<sup>[6-7]</sup>;二是使用半经典模型应用蒙特卡洛方法,对载流子在强场作用下的碰撞、散射机制进行模拟<sup>[8]</sup>,分析 THz 辐射特性及其影响因素<sup>[9-10]</sup>。第一种方法将半导体器件数值模拟与电磁场数值模拟统一在有限差分的时域网格中,能较快收敛,但对 GaAs 衬底的小尺寸 PCA 器件,忽略了载流子在 GaAs 两能谷中的散射及碰撞,精度上存在缺陷;第二种方法可以较准确地得到 PCA 载流子的输运情况,但占用 CPU 时间较长、存储空间较大。

文中将蒙特卡洛经验公式修正的 GaAs 迁移率随场强关系、德鲁德-洛伦兹(DL)模型<sup>[11]</sup>计算得到的光生载流子密度耦合到 FDTD 中,对 34  $\mu\text{m}$  孔径偶极子 PCA 进行了仿真,得到时域、频域及三维辐射波形图,并与实验数据进行了对比。结果表明,仿真准确,光生载流子直接耦合入 PCA 金属边界,省去了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。

## 1 理论模型分析

### 1.1 DL 模型及其可行性分析

光电导天线在偏置电场和飞秒激光脉冲同时作用下,其表面电流密度为<sup>[9]</sup>:

$$J(t) = \frac{\sigma_s(t)E_b}{1 + \frac{\sigma_s(t)\eta_0}{1 + \sqrt{\epsilon_r}}} \quad (1)$$

式中: $\sigma_s(t)$ 为表面电导率; $E_b$ 为所加的偏置电场; $\eta_0$ 为自由空间波阻抗,大小为 377  $\Omega$ ; $\epsilon_r$ 为光电导体的相对介电常数。

根据半导体的光生载流子理论,能量超过半导

体禁带宽度的光子照射到半导体表面,在照射点上将半导体价带电子激发到导带,产生导带电子和价带空穴。这些非平衡载流子在外加电场作用下加速运动,辐射出 THz 电磁波。因而载流子密度对太赫兹的辐射起到了至关重要的作用。

对于 GaAs 衬底的 PCA,本征载流子浓度是 300 K 时为  $1.1 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ ,而当光生载流子浓度为  $10^{16} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  时,散射机制可以将光生载流子维持在热平衡状态;同时强场条件下,PCA 漂移电流远大于扩散电流,这样扩散电流可以忽略不计。DL 模型忽略了半导体中的扩散效应,将光生载流子视为电子气,所以可以用 DL 模型定量模拟 THz 辐射中载流子的动态输运过程。

### 1.2 GaAs 材料电子迁移率计算

公式(1)中, $\sigma_s(t)$ 与迁移率  $\mu$  紧密相关<sup>[9]</sup>,如公式(2)所示:

$$\sigma_s(t) = \frac{q(1-R)}{h\nu} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\left(\frac{t-t'}{\tau}\right)^2\right) \cdot \exp\left(-\frac{t-t'}{\tau_{\text{car}}}\right) \cdot \mu(t-t') dt' \quad (2)$$

式中: $q$ 为电荷量,其值为  $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ; $R$ 为半导体材料表面的反射率,一般取 0.3; $h\nu$ 为光子能量; $\tau$ 为光脉冲半宽; $\tau_{\text{car}}$ 为载流子寿命; $\mu$ 是迁移率。

对于 GaAs 半导体材料,迁移率与外加电场的关系满足蒙特卡洛数值模拟经验公式<sup>[12]</sup>,如公式(3)所示:

$$\mu = \mu_0 \frac{1 + \frac{V_{\text{sat}}}{\mu_0 E_b} \left(\frac{E_b}{E_{\text{th}}}\right)^4}{1 + \left(\frac{E_b}{E_{\text{th}}}\right)^4} \quad (3)$$

式中: $\mu_0$ 为无电场情况下的电子迁移率,取值为  $8000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ; $V_{\text{sat}}$ 为高电场条件电子的饱和速率,取值为  $8.5 \times 10^6 \text{ cm/s}$ ; $E_{\text{th}}$ 为特征电压,大小为 4 kV/cm。

## 2 34 $\mu\text{m}$ 孔径偶极子 PCA 仿真

实验仿真条件如下:GaAs 材料 PCA 衬底厚度为 600  $\mu\text{m}$ ,两电极的间隙为 34  $\mu\text{m}$ ;触发激光为钛宝石自锁模飞秒激光器,其平均功率为 327 mW,脉冲半宽为 30 fs,脉冲重复频率为 75 MHz,波长为 800 nm;偏置电压为 55 V,对应偏置电场为 16.18 kV/cm。

### 2.1 载流子的输运模拟

图 1 为激光照射 GaAs 材料后载流子密度随时

间的输运情况。由图可见,电流脉冲存在拖尾现象,与公式(2)相符。非平衡电子向阳极金属电极移动,空穴向阴极金属电极移动,主要的复合产生在电子遂穿 Cu/Ge 合金电极欧姆接触势垒中,载流子寿命决定了复合过程的快慢,这是电流密度中脉冲拖尾的主要因素。载流子密度直接影响 PCA 辐射波形,是决定 THz 辐射的根源。

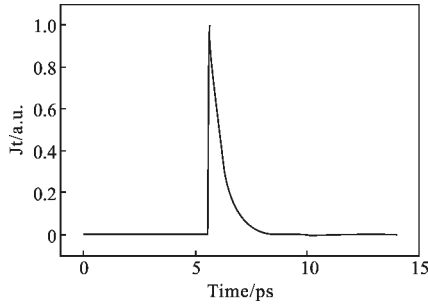
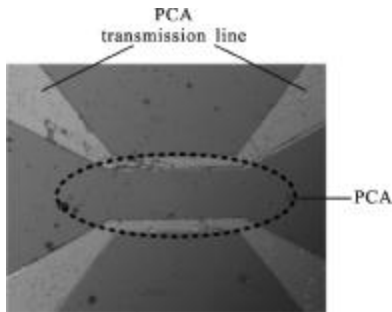


图 1 DL 模型对载流子密度的时域仿真波形

Fig.1 Time-domain waveform simulation of the carrier density with DL model

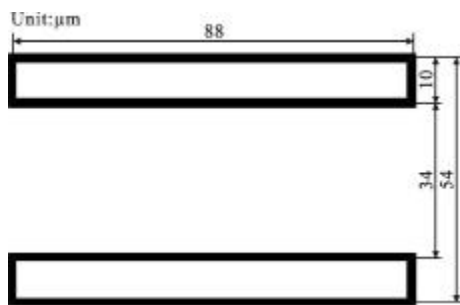
### 2.2 仿真模型建立及参数选取

设计 PCA 实物图如图 2(a)所示,PCA 的尺寸参数如图 2(b)所示。



(a) 34 μm 孔径偶极子 PCA 实物图

(a) Physical picture of 34 μm aperture dipole PCA



(b) 34 μm 孔径偶极子 PCA 尺寸

(b) Size of 34 μm aperture dipole PCA

图 2 34 μm 孔径偶极子 PCA

Fig.2 34 μm aperture dipole PCA

设计天线频率为 0.8 THz,则:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{0.8 \times 10^{12}} = 375 \mu\text{m} \quad (4)$$

计算所得天线长度<sup>[13]</sup>:

$$l = \lambda_n/2 = \frac{\lambda/n}{2} = \frac{375/3.4}{2} \approx 55 \mu\text{m} \quad (5)$$

如图 2(a)实物图所示,考虑 PCA 的 34 μm 孔径和偶极子两端 10 μm 电极后,天线长度为 54 μm;选取天线宽度为 88 μm。

对 PCA 划分均匀网格要求,  $\Delta x \leq \frac{\lambda}{12} = \frac{375}{12} = 31.25 \mu\text{m}$ ,参考德拜长度<sup>[6]</sup>后,选取  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1 \mu\text{m}$ 。

根据 Courant 稳定性条件<sup>[14]</sup>:

$$\Delta t \leq \frac{\delta}{c \sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} = \frac{1 \times 10^{-6}}{3 \times 10^8 \times \sqrt{3}} \approx 0.192 \times 10^{-14} \text{ s} \quad (6)$$

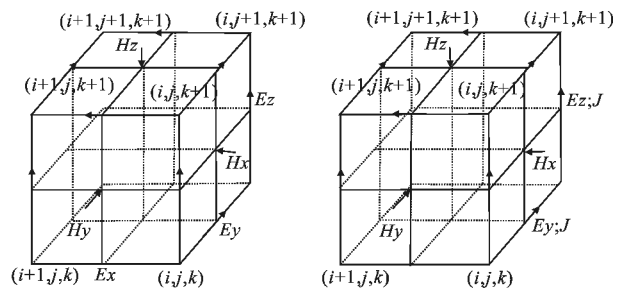
如公式(6)所示,选取时间步长为 0.6 fs,满足离散后差分麦克斯韦方程组的解无数值色散的条件。

GaAs 的光吸收深度为 10 μm,所以只选取 50 μm 厚 GaAs 衬底进行网格划分,以减少计算量。由于引入电流密度项麦克斯韦方程组卷积形公式(7)、(8),将载流子密度耦合到 FDTD 中。

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (7)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{J}(t) \quad (8)$$

式中的电流密度项需要迭代入激励网格,使得 PCA 的 Yee 元胞<sup>[14]</sup>如图 3 所示。



(a) 传统 Yee 元胞

(b) PCA 仿真 Yee 元胞

(a) Traditional Yee cell

(b) PCA simulation of Yee cell

图 3 Yee 元胞

Fig.3 Yee cell

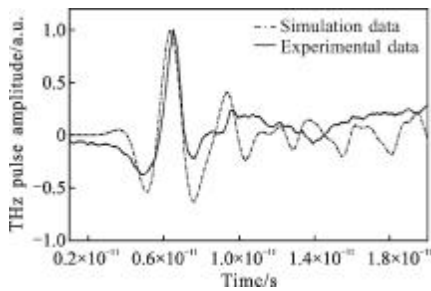
在加入电流密度项的电极与衬底接触面上的网格差分方程为:

$$E_x^{n+1}\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right)=E_x^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right)+\frac{\Delta t}{\varepsilon\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right)} \cdot \left[\frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right)-H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}, k\right)}{\Delta y}-\frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}\right)-H_z^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j, k-\frac{1}{2}\right)}{\Delta z}\right]-\frac{\Delta t}{\varepsilon\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right)}\left[J^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right)\right] \quad (9)$$

运用 FDTD 求得空间电场和磁场, 根据近远场变换与傅里叶变换可以得到 PCA 的辐射方向和增益, 实现对 PCA 辐射特性的研究。

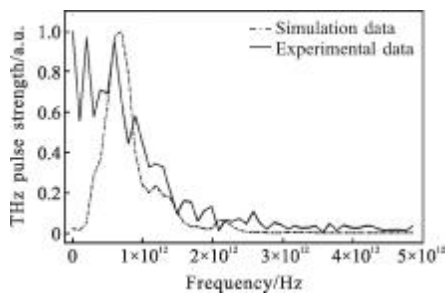
### 3 仿真结果与实测结果对比分析

图 4 为 PCA 在飞秒激光脉冲触发下得到的太赫兹时域、频域波形对比图。



(a) 34 μm 孔径偶极子 PCA 仿真、实验时域波形对比

(a) Comparison of 34 μm aperture dipole PCA simulation and experimental time-domain waveform



(b) 34 μm 孔径偶极子 PCA 仿真、实验频域波形对比

(b) Comparison of 34 μm aperture dipole PCA simulation and experimental frequency-domain waveform

图 4 34 μm 孔径偶极子 PCA 实验、仿真对比

Fig.4 Comparison of 34 μm aperture dipole PCA simulation and experimental data

从图 4 中可以看到 PCA 的时域特性仿真与实

验波形较吻合, 脉宽为 3.5ps, 峰峰值宽度为 1.3ps, 且频域在 0.8THz 左右脉冲强度最强。图 4(b)中在 0~0.5THz 范围存在较大差异, 原因是: (1) THz-TDS 系统实际测量中, 低频噪声对于太赫兹辐射脉冲信号的影响使频谱在 0~0.3 THz 范围内不可靠<sup>[15]</sup>; (2) 在仿真分析中, 没有考虑激光器 75 MHz 重复频率以及外加偏置电场调制频率的影响, 而这些会影响光电导天线载流子输运情况<sup>[8]</sup>。

图 5 为光生载流子加入后分别向电极两端运动, 产生的三维电场。当激光照射 PCA 间隙局部区域, 极短时间内光生载流子浓度增大, 由于电子-空穴对的数目不断变化以及载流子漂移速度从零达到稳态值需要一定的弛豫时间 (GaAs 约为 1ps)<sup>[12]</sup>, 因而会在 GaAs 表面形成瞬态变化的电流, 这种瞬态变化的电流在 PCA 偏压的作用下, 垂直于半导体表面方向辐射出太赫兹波。

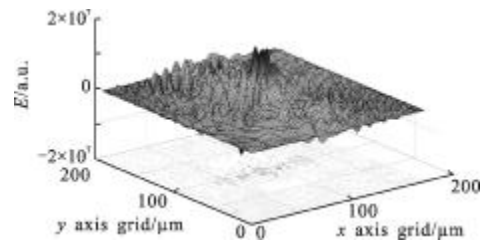


图 5 34 μm 孔径偶极子 PCA 三维辐射场

Fig.5 34 μm aperture dipole PCA three-dimensional radiation field

### 4 结论

基于 DL 模型结合 FDTD 对 34 μm 孔径偶极子 PCA 进行了仿真, 仿真与实验结果吻合。

THz-TDS 测出的时域波形是一个 nA 量级的相对值, 其与电场值成正比。通过将仿真得到的电场值与实验值归一化后进行对比, 发现辐射 THz 频谱与设计值基本相符, 因此证明采用这种仿真方法是合理的。对于激光激发产生的电流密度, 与三维波尔兹曼方程耦合到 FDTD 中进行求解不同, 采用 DL 模型并引入蒙特卡洛迁移率经验公式代替, 不仅运算速度快、编程简单、机理明确, 而且通过验证有较高的准确性, 能够为 PCA 设计、制造提供参考依据。

### 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)
- 程伟, 王迎新, 赵自然. 光电导太赫兹源新进展 [J]. *激光与红外*, 2011, 41(6): 597-604.
- [2] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology[J]. *Nature Materials*, 2002, 1: 26-33.
- [3] Lu Yimin, Wang Jiachun, Shi Jiaming, et al. Application of THz technology for detection in soot and wind-blown sand [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39 (3): 487-490. (in Chinese)
- 陆益敏, 汪家春, 时家明, 等. 太赫兹技术在烟尘与风沙探测中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(3): 487-490.
- [4] Darrow J T. Saturation properties of large-aperture photoconducting antennas [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1992, 28(6): 1607-1616.
- [5] White W T I. Modeling GaAs high-voltage, subnanosecond photoconductive switches in one spatial dimension [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1990, 37(12): 2532-2541.
- [6] 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 Transactions on Plasma Science*, 2009, 37(1): 219-228.
- [7] Sirbu M, Lepaul S B P, Aniel F. Coupling 3-D Maxwell's and Boltzmann's equations for analyzing a terahertz photoconductive switch[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2005, 53(9): 2991-2998.
- [8] Shi Wei. Study of high-gain ultra-fast high-voltage photoconductive semiconductor switches [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1997. (in Chinese)
- 施卫. 高倍增超快高压半导体光电导开关的研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 1997.
- [9] Jia Wanli, Ji Weili, Shi Wei. Two-dimensional Monte Carlo simulation of screening of the bias field in terahertz generation from semi-insulated GaAs photoconductors [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(4): 2042-2045. (in Chinese)
- 贾婉丽, 纪卫莉, 施卫. 半绝缘 GaAs 光电导开关产生太赫兹波电场屏蔽效应的二维 Monte Carlo 模拟[J]. *物理学报*, 2007, 56(4): 2042-2045.
- [10] Xing Zhou, Sotiris Alexandrou, Thomas Y Hsiang. Monte Carlo investigation of the intrinsic mechanism of subpicosecond pulse generation by nonuniform illumination [J]. *Appl Phys*, 1995, 77(3): 706-711.
- [11] Zhisheng Piao, Masahito Tani, Kiyomi Sakai. Carrier dynamics and terahertz radiations in photoconductive antenna [J]. *Appl Phys*, 2000, 39: 96-100.
- [12] Horio K, Ikoma T, Yanai H. Computer-aided analysis of GaAs n-i-n structures with a heavily compensated i-layer [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1986, 33(9): 242-250.
- [13] Shang Liping, Xia Zuxue, Liao Xiaochun, et al. Influence of structure and parameters of small-aperture THz photoconductive antenna on its gain [J]. *Infrared*, 2011, 32(2): 28-42. (in Chinese)
- 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): 28-42.
- [14] Kane Y. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1966, 14(3): 302-307.
- [15] Zhang Lei. Terahertz time-domain spectroscopy of traditional chinese medicines [D]. Beijing: Capital Normal University, 2004. (in Chinese)
- 张雷. 中草药太赫兹 (THz) 谱 [D]. 北京: 首都师范大学, 2004.