

文章编号:1002-2082(2010)03-0395-05

光电导天线产生太赫兹波的研究

肖健¹, 高爱华^{1,2}

(1. 西北大学 物理学系, 陕西 西安 710069;

2. 西安理工大学, 陕西 西安 710048)

摘要: 研究了光电导天线产生太赫兹波的辐射特性, 采用时域有限差分方法 (FDTD) 来模拟计算光电导偶极天线的辐射特性, 并在计算机上以伪彩色图进行了图形显示。采用电偶极子天线模型, 以 0.1 THz 电磁波为例计算了天线辐射的特性参数, 得到天线的辐射电阻为 790 Ω , 方向性系数为 1.5。结果表明, 光电导天线可以采用偶极天线的理论进行计算, 可以通过提高电长度来增大辐射电阻, 从而提高太赫兹的辐射功率。

关键词: 光电子学; THz 波辐射特性; 光电导天线; 时域有限差分法

中图分类号: TN29; O434.3

文献标志码: A

Terahertz generation with photoconductive antenna

XIAO Jian¹, GAO Ai-hua^{1,2}

(1. Department of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, China;

2. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The terahertz (THz) radiation properties of photoconductive antenna (PCA) were studied. The radiation characteristics of photoconductive antenna were simulated using FDTD; the results calculated were displayed on a computer in pseudo-color graphical. Using electric dipole antenna model and taking 0.1 THz as an example, equatorial plane and the meridian plane of the antenna pattern were obtained, the antenna radiation resistance is 790 ohm, and directivity factor is 1.5. The results show that photoconductive antenna can be calculated with dipole antenna theory. Radiation resistance is increased by increasing the electrical length, and the power of terahertz radiation is increased as well.

Key words: optoelectronics; terahertz wave radiation properties; photoconductive antenna; FDTD

引言

太赫兹 (THz) 波是指波长范围为 30 μm ~ 3 mm (0.1 THz ~ 10 THz) 之间的电磁辐射, 其波段位于微波和红外光之间。随着超快激光技术和低尺度半导体技术的发展, 使 THz 电磁波的产生技术、辐射机理、检测技术和应用得到了迅速的发展。目前, 产生脉冲 THz 辐射的方法主要有 2 种: 光电导天线和光学整流。前者是利用飞秒激光脉冲触发

直流偏置下的光电导体, 通过相干电流驱动偶极天线产生太赫兹辐射^[1]; 光学整流是一种非线性效应, 是用飞秒激光脉冲和非线性介质 (LiNbO₃, LiTaO₃, ZnTe 等) 相互作用产生低频极化场来辐射脉冲 THz 电磁波的。近年来, 国内外有不少关于光电导天线产生 THz 电磁波的文献报道。Darrow 等人^[2]对光电导天线产生太赫兹波的机理进行了详述, 并且对砷化镓 (GaAs) 和磷化铟 (InP) 作为

收稿日期: 2009-09-14; 修回日期: 2009-12-26

基金项目: 西北大学研究生创新教育项目 (08YSY05 和 08YZZ40)

作者简介: 肖健 (1983—), 男, 陕西咸阳人, 西北大学物理学系硕士研究生, 主要从事太赫兹波方面的研究工作。

E-mail: huilang76447@sina.com

光电导天线的基质材料产生太赫兹辐射的性能进行了对比。Hattori 等人^[3]研究了大孔径光电导天线产生太赫兹波的时间特性, 考虑了半导体载流子寿命和弛豫时间对太赫兹辐射的影响。大孔径光电导天线在强激光脉冲的照射下会产生饱和现象, Darrow 等人^[4-5]分别进行了理论模拟, 得出半导体表面辐射电场对偏置电场的屏蔽效应是产生饱和现象的主要原因。施卫^[6]等人对半绝缘砷化镓(GaAs)天线产生太赫兹波的辐射特性进行了相关研究。

本文基于Maxwell 方程和Yee 氏网格原理, 应用 Matlab 系统软件, 采用时域有限差分方法(FDTD)计算了光电导天线的辐射特性, 根据计算结果采用偶极天线理论对所计算的天线的特性参数进行了计算, 该项工作对复杂形状结构天线的设计和分析具有一定的借鉴价值。

1 基本理论与方法

天线的理论基础是 Maxwell 方程组, 求解 Maxwell 方程在给定边界条件下的解就能得到天线的辐射特性。天线的分析与设计一般涉及到的公式都比较冗长, 计算繁琐。借助于计算机对天线进行分析与设计不仅省时、省力, 而且还可以比较直观地了解其辐射特性。

1.1 光电导偶极天线结构

半绝缘 GaAs 材料具有优良的光电性能, 是制作光电导天线很理想的基底材料(GaAs 材料的电阻率可以达到 $10^7 \Omega \cdot \text{cm} \sim 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$, 击穿强度为 250 kV/cm); 以文献[6]半绝缘 GaAs 材料制成的光电导偶极天线为计算对象, 其结构和尺寸参数如图1 所示。其中半绝缘 GaAs 材料暗态电阻率 $\rho = 5 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$, 载流子的浓度为 $n \approx 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 载流子的迁移率 $\mu > 5500 \text{ cm}^2/(\text{VS})$, 芯片的厚度为

0.6 mm, 外形尺寸为 $6.0 \text{ mm} \times 9.0 \text{ mm}$ 。用电子束蒸渡工艺淀积厚度为 900 nm 的 Au/Ge/Ni 合金电极(条形天线), 经过退火处理与 GaAs 芯片材料形成欧姆接触, 电极尺寸为 $6 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 圆角半径为 1.1 mm, 两电极间隙为 3 mm; 绝缘保护层采用 Si_3N_4 薄膜材料。

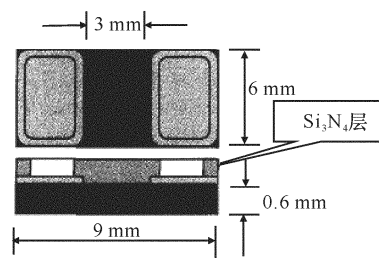


图1 条形结构 GaAs 偶极天线示意图

Fig. 1 Chip of GaAs dipole antenna

1.2 时域有限差分法(FDTD)

时域有限差分法(finite difference time domain, 简称FDTD)是 K. S. Yee 于 1966 年提出的一种电磁场数值计算的新方法。其主要思想是把 Maxwell 方程在空间和时间上离散化, 每一个 E (或 H) 场分量周围有 4 个 H (或 E) 分量环绕, E 场分量位于 Yee 网格每条棱的中心, H 场分量位于 Yee 网格每个面的中心, 每个网格点上的 E (或 H) 场分量只与其相邻点的 H (或 E) 分量及上一时间步该点的 E (或 H) 场数值有关。利用中心差商的形式代替连续微商, 用差分方程代替一阶微分方程, 将含时间变化的 Maxwell 旋度方程转化为一组差分方程, 并在时间轴上逐步推进求解, 由特定问题的初始值和边界条件得到电磁场的空间分布及其随时间的变化。

根据 Maxwell 方程和 Yee 元胞可以得到二维 TE 波的电场差分方程:

$$E_x^{n+1}(i+1/2, j, k) = \frac{\epsilon_x - 0.5\sigma_x \nabla t}{\epsilon_x + 0.5\sigma_x \nabla t} E_x^n(i+1/2, j, k) + \frac{\nabla t}{\epsilon_x + 0.5\sigma_x \nabla t} \times \left[\frac{H_z^n(i+1/2, j+1/2, k) - H_z^n(i+1/2, j-1/2, k)}{\nabla y} - \frac{H_y^n(i+1/2, j+1/2, k+1/2) - H_y^n(i+1/2, j, k-1/2)}{\nabla z} \right] \quad (1)$$

对于磁场有类似的形式, 只是系数部分有所不同, 将电场公式中的电导率换成磁导率、介电常数换成磁导系数就可以得到磁场的 FDTD 方程。

应用 FDTD 法进行电磁问题分析时, 需要考虑

差分方程解的收敛性和稳定性, 同时要对激励源、吸收边界条件进行设定。

1.3 吸收边界条件

受计算机容量的限制, 对所计算区域的截断边

界处要设定吸收边界条件, 将向边界传播波吸收衰减掉。常用的吸收边界条件包括 Mur 吸收边界条件和完全匹配层(PML)吸收边界条件, Mur 吸收边界条件适用于计算机性能较差和计算精度不高的情况, PML 吸收边界条件对计算机的要求比较高, 计算精度较高。本文计算采用 PML 吸收边界条件。

PML 吸收边界条件是由特殊的各向异性材料组成的介质层, 入射波能无反射地射入, 但进入 PML 层的透射波将迅速衰减, 因此 PML 层为有耗介质, 它对于入射波有很好的吸收效果。在计算区域的边界外部构造一层虚拟的损耗媒质, 使得在各个方向上的入射波在边界上的反射很小甚至为零。1994 年 Beernger 以此思想构造了一种非物理的吸收媒质, 与 FDTD 网格外部边界相连, 其波阻抗具有与外向散射波的入射角和频率均无关的特点。以二维 TE 情况为例, 在 PML 介质中, Beernger 为了引入规定损耗的新自由度, 将 H_z 分裂为 2 个分量 H_{zx} 和 H_{zy} , 且 $H_z = H_{zx} + H_{zy}$ 。进而将 Maxwell 方程改写为以下的形式:

$$\epsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma_y E_x = \frac{\partial(H_{zx} + H_{zy})}{\partial y} \quad (2)$$

$$\epsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma_x E_y = \frac{\partial(H_{zx} + H_{zy})}{\partial x} \quad (3)$$

$$\mu_0 \frac{\partial H_{zx}}{\partial t} + \sigma_y^* H_{zx} = -\frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (4)$$

$$\mu_0 \frac{\partial H_{zy}}{\partial t} + \sigma_x^* H_{zy} = -\frac{\partial E_x}{\partial y} \quad (5)$$

式中: σ 和 σ^* 分别表示自由空间中的电导率和磁导率。当 $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_x^* = \sigma_y^*$ 时, (2) 式就退化为自由空间中的 Maxwell 方程, 所以可以认为 (2)~(5) 式描述了一种普遍的情况, 自由空间是其中一个特例, 在不同条件下的具体递推公式可参考文献[8]。

1.4 稳定性条件及激励源的设定

为了保证解的稳定性和收敛性, 离散网格的边长和时间步长的选取都要满足一定的条件^[8]。在编程计算中, 空间步长和时间步长的取值分别为

$$\Delta x = \Delta y = \Delta z = \delta = \lambda/12; \Delta t = \delta/2c$$

(以 0.1 THz 的电磁波为例)

式中: c 为自由空间的光速; x, y, z 方向取值均为 1.5 cm。

在模拟计算中, 激励源采用微分形式的高斯脉冲激励源, 激励源电场表示式为

$$E_i(t) = \frac{t-t_0}{\tau} \exp\left[-\frac{4\pi(t-t_0)^2}{\tau^2}\right] \quad (6)$$

式中 τ 为常数, 其数值决定着高斯脉冲的宽度。

1.5 FDTD 算法的 Matlab 程序设计

借助 Matlab 7.0 应用软件, 采用 C 语言编程, 对图 1 所示的光电导天线的辐射特性进行模拟计算, 并在计算机上以伪彩色图形的形式对光电导天线在赤道面和子午面内的电磁场辐射分布图进行了显示。

(1) 式用 Matlab 语言表示为

$$\begin{aligned} \text{ex}(1:\text{ie}, 2:\text{je}, 2:\text{ke}) &= \text{ca} * \text{ex}(1:\text{ie}, 2:\text{je}, 2:\text{ke}) + \dots \\ &\text{cb} * (\text{hz}(1:\text{ie}, 2:\text{je}, 2:\text{ke}) - \text{hz}(1:\text{ie}, 1:\text{je}-1, 2:\text{ke}) + \dots \\ &\text{hy}(1:\text{ie}, 2:\text{je}, 1:\text{ke}-1) - \text{hy}(1:\text{ie}, 2:\text{je}, 2:\text{ke})) \end{aligned} \quad (7)$$

也可以使用嵌套循环:

```
for i=1:ie
    for j=2:je
        for k=2:ke
            ex(i,j,k) = ca * ex(i,j,k) + ...
                cb * (hz(i,j,k) - hz(i,j-1,k) + hy(i,j,k-1) - hy(i,j,k));
        end
    end
end
```

$$(8)$$

式中: ex 表示 x 方向的电场; ie, je 和 ke 是计算区域网格的划分; ca, cb 是相关系数的定义。对于其

他方向的电场和磁场有类似的形式。只要给定初始值和边界条件, 我们就可以利用 (7) 式和 (8) 式进行

迭代计算。

2 结果分析与讨论

2.1 天线辐射的方向图

通常天线辐射的立体方向图都比较复杂, 所以在实际中经常采用平面方向图。在大多数情况下, 人们都选择通过最大辐射方向的互相垂直的 2 个平面, 这 2 个面分别称为赤道面和子午面。根据 FDTD 方法所计算的条形光电导天线辐射的方向图如图 2 所示。

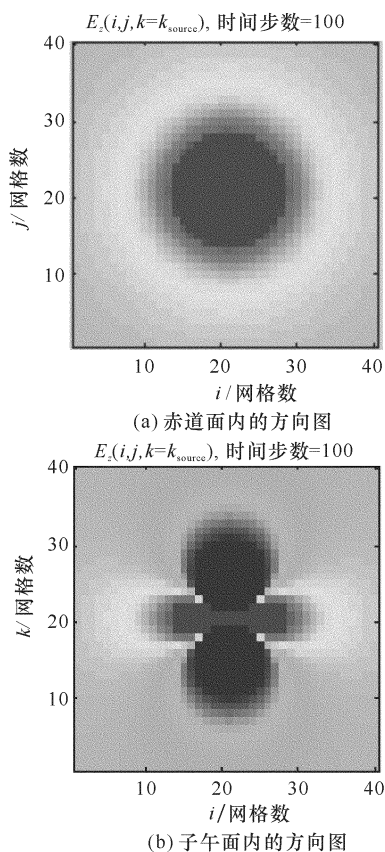


图 2 光电导偶极子天线辐射的方向图
Fig. 2 Photoconductive dipole antenna radiation directional diagram

由图 2(a) 知, 在赤道面内 $\theta = 90^\circ$, 光电导天线在赤道面内的方向图为一个圆。这与偶极天线在赤道面内的方向性函数 $f(\varphi) = \frac{\pi l}{\lambda}$ 与 φ 无关的结论相一致。由图 2(b) 知, 在子午面内 (φ 为某一常数), 光电导天线在子午面内的方向图在 $\theta = 0^\circ$ 和 $\theta = 180^\circ$ 时有极大值, 而 $\theta = 90^\circ$ 时有次极小值, 辐射图形为中心对称、轴对称分布, 此结果与偶极天线在子午面内的方向性函数是 θ 的正弦函数, 即 $f(\theta) = \frac{\pi l}{\lambda} \sin\theta$ 的结果相一致。

2.2 天线的方向系数

所谓天线的方向性系数 D 是指天线集中辐射能量的特性, 其物理意义是指: 由于天线有方向性, 使某方向的辐射功率密度比均匀辐射时增加的倍数。因此方向性系数越大, 天线的方向性就越强。天线方向性系数 D 的表达式为

$$D = S(\theta_1, \varphi_1) / S_u \quad (9)$$

式中: $S(\theta_1, \varphi_1)$ 为特定方向的辐射功率密度; S_u 为均匀辐射时的功率密度。

由光电导天线辐射的方向图知, 此天线就是偶极天线, 由偶极天线的方向性系数表达式可计算其方向系数:

$$D = \frac{120 \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2}{80\pi^2 \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2} = 1.5 \quad (10)$$

假如用分贝表示方向性系数, 则为 $D = 10 \log D = 1.76$ 。

2.3 天线的辐射电阻和功率

由于所计算的光电导天线可视为电偶极天线, 所产生的辐射可看成是采用电流激励的, 因此可采用电偶极子天线模型来进行其特性分析^[9]。将偶极子天线向外辐射电磁波的功率想象为一个等效电阻上的损耗, 即辐射功率被一个电阻所吸收, 并假设流过该电阻的电流等于天线上的电流振幅值, 则辐射功率可表示为

$$P_\Sigma = \frac{1}{2} I_m^2 R_\Sigma \quad (11)$$

式中: R_Σ 为辐射电阻; I_m 为电流振幅。

对于电偶极子, 其辐射电阻可表示为

$$R_\Sigma = \frac{2\pi}{3} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2 \quad (12)$$

式中: μ 为介质的磁导系数; ϵ 为介电常数; λ 电磁波的波长; l 为电偶极子的长度; $\left(\frac{l}{\lambda} \right)$ 称为电长度。在自由空间中, 辐射电阻可以简化为

$$R_\Sigma = 80\pi^2 \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2 \quad (13)$$

对文中所计算的光电导天线, 长度为 3 mm, 波长为 3 mm (0.1 THz), 由 (11) 式计算得到其辐射电阻 $R_\Sigma = 790 \Omega$ 。

3 结论

借助 Matlab 应用系统, 利用 FDTD 法通过建立模型和 C 语言编程对一个光电导偶极天线的辐射特性进行了仿真分析, 并在计算机上以伪彩色图

的形式给出了天线在赤道面内和子午面内的电磁场辐射分布图。仿真结果说明:天线就是偶极天线,由偶极天线的理论计算所模拟天线的方向性系数是1.5,辐射电阻为790 Ω 。

参考文献:

- [1] DRAGOMAN D, DRAGOMAN M. Terahertz fields and applications[J]. Progress in Quantum Electron, 2004, 28(1):1-66.
- [2] DARROW J T, ZHANG Xi-cheng, AUSTON D H, et al. Saturation properties of large-aperture photoconducting antennas [J]. IEEE J. Quantum Electron, 1992, 28(6):1607-1616.
- [3] TOSHIAKI H, KEIJI T, HIROKI N. Time-resolved study of intense terahertz pulses generated by a large-aperture photoconductive antenna[J]. Jpn. J. Appl. Phys., 2001, 40(8):4907-4912.
- [4] DARROW J T, Zhang X C, AUSTON D H. Power scaling of large-aperture photoconducting antennas [J]. Appl. Phys. Lett., 1991, 58(1):25-27.
- [5] 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):2042-2046.
JIA Wan-li, JI Wei-li, 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): 2042-2046. (in Chinese with an English abstract)
- [6] 施卫, 张显斌, 贾婉丽, 等. 用飞秒激光触发GaAs光电导体产生THz电磁波的研究[J]. 半导体学报, 2004, 25(12):1735-1738.
SHI Wei, ZHANG Xian-bin, Jia Wan-li, et al. Investigation on terahertz generation with GaAs photoconductor triggered by femto-second laser pulse[J]. Chinese J. Semiconductors, 2004, 25(12): 1735-1738. (in Chinese with an English abstract)
- [7] 许景周, 张希成. 太赫兹科学与技术[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.
XU Jing-zhou, ZHANG Xi-cheng. Terahertz science and technology [M]. Beijing: Beijing University Press, 2007. (in Chinese)
- [8] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 第2版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.
GE De-biao, YAN Yu-bo. Finite-difference time-domain electromagnetic method[M]. 2nd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2005. (in Chinese)
- [9] 闻映红. 天线与电波传播理论[M]. 修订版. 北京: 清华大学出版社, 2007.
WEN Ying-hong. Antenna and radio wave propagation theory [M]. Revision. Beijing: Tsinghua University Press, 2007. (in Chinese)