

文章编号: 1001-3806(2012)04-0504-04

太赫兹光电导天线发射装置的优化设计

徐朝辉, 樊宇

(周口师范学院 物理与电子工程系, 周口 466001)

摘要: 为了研究金属纳米狭缝对太赫兹光电导天线辐射功率的影响, 基于时域有限差分法对太赫兹波通过金属狭缝时的增强特性进行了分析计算, 研究了太赫兹波通过金属纳米狭缝电场的增强幅度与狭缝宽度和太赫兹波频率之间的规律。结果表明, 在太赫兹光电导天线发射装置上增加一个纳米狭缝能够增强太赫兹波的发射功率, 频率为 0.1 THz 的太赫兹波通过 70 nm 宽度金属狭缝时, 辐射功率最大可以增强 800 倍。该研究结果对太赫兹光电导天线结构的改进有一定的借鉴意义。

关键词: 激光技术; 太赫兹波; 光电导天线; 纳米金属狭缝; 辐射功率

中图分类号: O441.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.04.018

Optimum design of radiation facility of THz photoconductive antennas

XU Zhao-hui, FAN Yu

(Department of Physics and Electronic Engineering, Zhoukou Normal University, Zhoukou 466001, China)

Abstract: In order to study effect of metal nano-gaps on the radiation power of THz photoconductive antennas, enhancement characteristics of THz wave passing through nano-gaps were calculated by means of finite difference time domain method. The dependence of the intensity of the electromagnetic field on the frequency of THz wave and the width of mental slit was discussed. The results showed that the power of THz wave can be enhanced by the THz photoconductive antennas attached with metal nano-gap, and the power of 0.1 THz wave can be enhanced by 800 times with it passing through a metal nano-gap in 70 nm width. The work has a certain reference to the design of antenna structure.

Key words: laser technique; THz wave; photoconductive antenna; metal nano-gap; radiation power

引言

近年来, 太赫兹波的研究在世界范围内受到了极大的关注, 开发电磁波谱中最后一个尚未得到广泛应用的波段的技术变得越来越重要。太赫兹辐射源, 是限制太赫兹波在各个领域实际应用的决定性因素之一, 如何才能有效地产生大功率、高能量、高效率且能在室温下运转的宽频带太赫兹辐射源, 是当前太赫兹研究需要重点解决的现实问题。光电导天线(photoconductive antenna, PCA)是目前产生脉冲太赫兹辐射源最常用的方法, 以其良好的性能、广阔的应用前景成为一个热门研究课题。

光电导天线辐射太赫兹波的能量主要来源于直流

偏置电压, 在基质材料和飞秒激光脉冲强度选定的情况下, 太赫兹辐射功率与偏置电压成正比, 但天线的耐压极限决定了偏置电压不能大于击穿电压。因此, 为了提高偏置电压应该设计和改进天线的结构, 使天线能够承受更高的直流偏置电压。目前, 在天线形状上用圆角电极代替传统的矩形的光电导天线电极^[1], 以及通过对电极进行绝缘保护, 已经极大地提高了光电导天线辐射功率^[2,3]。此外, 对辐射装置的改进也可以提高天线的辐射功率, 具体来说, 就是在光电导体上开辟一个金属狭缝, 可以达到相应的目的, 狭缝的形状和尺度都会影响光电导天线的辐射性能。

本文中基于量子力学和统计物理的理论, 建立了光电导天线的 Drude 模型, 并运用时域有限差分法亚网格技术计算了不同金属狭缝宽度的电磁场和能量的增强效果。最后对太赫兹光电导天线的优化设计提供了一些建议。

1 太赫兹光电导天线模型的建立

太赫兹光电导天线主要由太赫兹源、天线结构和飞秒激光器组成。为了提高太赫兹波的辐射功率, 可

基金项目: 河南省基础与前沿技术研究计划资助项目(122300410168); 河南省教育厅科学技术研究重点资助项目(12B140019)

作者简介: 徐朝辉(1978-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事太赫兹光电导天线方面的研究。

E-mail: xuzhaohui1978@163.com

收稿日期: 2011-10-02; 收到修改稿日期: 2011-11-11

以在光电导辐射装置的基础上进行一些改进,如图1所示,改进装置由参考狭缝和纳米狭缝两部分构成,目的是增强太赫兹波的辐射效果^[1-2]。基本思想:光电导天线产生的太赫兹波通过1nm尺寸的狭缝,金属平面放置于垂直入射的太赫兹电场中。当太赫兹波通过狭缝间隙时,异号电荷就会在狭缝的两个边缘处积累,产生随太赫兹波变化的自由振荡电流。由于狭缝间隙很窄(远小于太赫兹波的波长),就使得狭缝间隙内的电场强度被增强(平均电场强度的大小与电荷的积累成正比例)。利用这种窄狭缝场增强效应,可以增强入射的太赫兹辐射。而且随着狭缝宽度的减小电场会不断地增强。因为随着狭缝宽度的减小,狭缝两个边缘的异号电荷相互吸引的强度将大大增加,这就使得电荷更趋近边缘内侧分布,狭缝间隙内电场增强的效果会更好,进而对太赫兹辐射的增强作用更大。

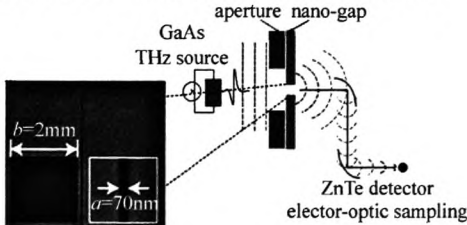


Fig. 1 Principle of optimum design on radiation facility of THz photoconductive antennas
a—width of nano-gap b—width of aperture

设太赫兹电磁波沿法线方向入射到孔径宽度为 x (远小于太赫兹波长)的金属平面上,在狭缝的两个边缘有电荷积累。根据太赫兹电磁波和金属狭缝的作用过程,其金属表面电荷密度作为时间的函数可以表示成如下形式^[3,4]:

$$\sigma(x, t) = \frac{\epsilon_0 E_0}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{\lambda}{x}} \exp(-i\omega t) \exp\left(-\frac{i\pi}{4}\right) \quad (1)$$

式中, ϵ_0 是真空中的介电常数; E_0 是入射到金属孔径的太赫兹电场; λ 为太赫兹波波长; ω 是太赫兹波的角频率; x 是金属表面距离边缘的长度。

太赫兹电磁波和金属狭缝的作用过程中相当于太赫兹电磁波和金属内电子的相互作用。根据太赫兹波和物质相互作用的理论,太赫兹电磁场和金属平面的相互作用过程中,用Drude模型计算天线相互作用的复介电常数^[5],有:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)} \quad (2)$$

式中, ϵ_∞ 是金属的高频介电常数, $\omega_p = \sqrt{\frac{N_e e^2}{m^* \epsilon_\infty \epsilon_0}}$ 是金属的等离子体振荡频率(N_e 为单位体积内的自由电子数, m^* 为电子的静止质量, e 为电荷常数, ϵ_0 为真空中

介电常数), γ 为电子的相位相干性衰减系数。在计算中以金(Au)材料为例,根据相关文献中报道的金材料的参量如下^[6]:金的等离子体振荡频率 $\omega_p = 1.37 \times 10^4 \text{ THz}$;金中电子的相位相干性衰减系数 $\gamma = 40.7 \text{ THz}$;频率 $\nu = 0.1 \text{ THz}$ 的太赫兹波在金材料中的趋肤深度是250nm;太赫兹电场通过2mm×2mm的参考金属狭缝的电场值定义为 $E_{\text{far,ap}}$;太赫兹电场通过金属纳米狭缝的电场值定义为 $E_{\text{far,gap}}$;定义这两种测量电场的归一化比值如下:

$$\alpha(\omega) = \left| \frac{E_{\text{far,gap}}}{E_{\text{far,ap}}} \right| \quad (3)$$

近场电场的增强倍数定义为:

$$n = \frac{\alpha(\omega)}{\beta} \quad (4)$$

式中, n 表示太赫兹电磁场通过纳米金属狭缝的增强倍数, β 是纳米金属狭缝和参考狭缝宽度的比值。

太赫兹入射电场 E_{inc} 经过参考狭缝后用单缝夫琅和费衍射公式进行计算。用矢量衍射理论计算法向入射的电场强度,通过参考狭缝后太赫兹远场电场计算公式如下^[7]:

$$E_{\text{far,ap}} = \left(\frac{e^{ikR}}{i\lambda R} \right) \int_0^b \int_0^b E_{\text{inc}} dx dy = \left(\frac{e^{ikR}}{i\lambda R} \right) E_{\text{inc}} b^2 \quad (5)$$

式中, b 是参考狭缝的宽度(2mm), R 是狭缝到探测器之间的距离。

太赫兹波通过纳米金属狭缝后的远场电场计算公式如下^[7]:

$$E_{\text{far,ap}} = \left(\frac{e^{ikR}}{i\lambda R} \right) \int_0^a \int_0^a E_{\text{inc}} dx dy = \frac{e^{ikR}}{i\lambda R} \langle E_{n,\text{avg}} \rangle ab \quad (6)$$

式中, a 是纳米狭缝宽度, $E_{n,\text{avg}}$ 是纳米狭缝内的平均电场,计算公式如下^[7]:

$$E_{n,\text{avg}} = a^{-1} \int_0^a E_{n,\text{avg}}(x) dx \quad (7)$$

由(3)式~(8)式推导太赫兹近场电场增强倍数表达式如下:

$$N = \frac{\alpha(\omega)}{\beta} = \frac{\frac{E_{\text{far,gap}}}{E_{\text{far,ap}}}}{\frac{a}{b}} = \frac{b}{a} \left(\frac{E_{\text{far,gap}}}{E_{\text{far,ap}}} \right) = \frac{b}{a} \frac{\langle E_{n,\text{avg}} \rangle a}{E_{\text{inc}} b} = \frac{\langle E_{n,\text{avg}} \rangle}{E_{\text{inc}}} \quad (8)$$

式中, $\beta = \frac{a}{b}$ 是金属狭缝宽度和参考孔径的比值为常数, a 是纳米金属孔径的缝隙宽度。

(8)式的推导得到近场电场增强的影响因素:

$$\frac{\langle E_{n,\text{avg}} \rangle}{E_{\text{inc}}} = \frac{\alpha(\omega)}{\beta} \quad (9)$$

在时域有限差分(finite difference time domain, FDTD)模拟计算中,激励源是电流源,表示如下:

$$j(x, t) = \sigma(x, t) E_0 = E_0 \sigma(x, t) = \frac{\epsilon_0 E_0}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{\lambda}{x}} \exp(-i\omega t) \exp\left(-\frac{i\pi}{4}\right) \quad (10)$$

基于 FDTD 方法可以计算太赫兹电磁场通过金属狭缝的增强值^[7],在模拟中用 2 维 FDTD 亚网格剖分技术计算了频率 $\nu = 0.1 \text{ THz}$ (波长 $\lambda = 3 \text{ mm}$) 太赫兹波通过金属纳米狭缝的电磁场增强和能量的增强。

FDTD 计算区域的选择如下: x 方向长度为 700 nm , z 方向长度为 700 nm 。计算网格的划分如下:

常规网格的空间步长 $\nabla x = \nabla z = \delta = \frac{\lambda}{10}$; 常规网格的时间步长 $\nabla t = \frac{\delta}{2c}$; 亚网格的空间步长 $\nabla x' = \frac{\delta}{N} = \frac{\lambda}{10N}$; 亚

网格的时间步长 $\nabla t' = \frac{\delta}{N} = \frac{\delta}{2cN}$; N 是正整数。 N 的选

择与具体计算的电磁问题有关,这里选择 $N = 10^5$ 。亚

网格的空间步长和时间步长的取值如下:亚网格空间步长为 $\nabla x' = 3 \text{ nm}$,亚网格时间步长为 $\nabla t' = 5 \text{ fs}$ 。

金属纳米狭缝之间的空间近似为真空, FDTD 计算中基本参量的设置如下:介电常数 $\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)}$; 金属平面的厚度 $h = 60 \text{ nm}$; 金属表面的电

导率 $\sigma(x, t) = \frac{\epsilon_0 E_0}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{\lambda}{x}} \exp(-i\omega t) \exp\left(-\frac{i\pi}{4}\right)$; 真空

介电常数 $\epsilon = \epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$; 真空磁导率 $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$; 空气的波阻抗 $\eta_0 = 377 \Omega$; 真空中光速 $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$; 空气的电导率 $\sigma = 0$; 空气中的导磁率 $\sigma_m = 0$ 。

2 结果与分析

模拟计算结果如图 2 所示(图形右边的色柱标尺为相应量的增强倍数)。

图 2a 为金属狭缝宽度是 500 nm (厚度 $h = 60 \text{ nm}$) 情况下的横向电场数值模拟结果。其中,计算区域是 $700 \text{ nm} \times 700 \text{ nm}$, 频率为 0.1 THz (波长为 3 mm) 横向电场分布模式。模拟结果表明,相对于无金属狭缝的情况,场增强了 200 倍。

图 2b 为金属狭缝宽度是 70 nm (厚度 $h = 60 \text{ nm}$) 情况下的横向电场数值模拟结果。其和 500 nm 狭缝宽度的增强效果相比要大得多,场增强了 800 倍,瞬时最大值可以达到 10^3 倍。

图 2c 为金属狭缝宽度是 70 nm (厚度 $h = 60 \text{ nm}$) 情况下的横向磁场数值模拟结果。其和电场集中在孔径

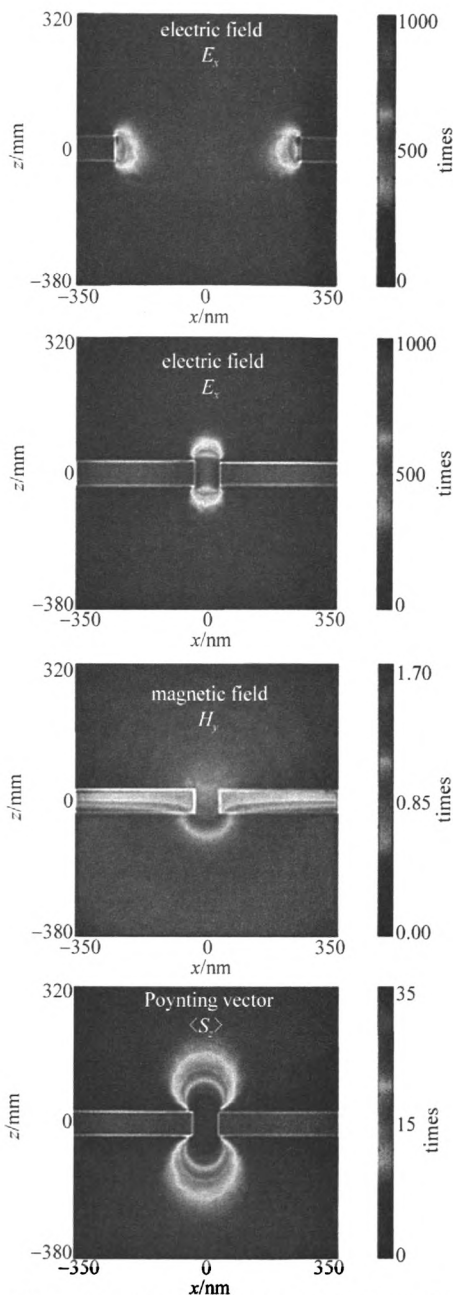


Fig. 2 Enhancement of electromagnetic field and energy when THz wave through metal gaps

a—electric field enhancement of THz radiation through gap of 500 nm b—electric field enhancement of THz radiation through gap of 70 nm c—magnetic field enhancement of THz radiation through gap of 70 nm d—Poynting vector enhancement of THz radiation through gap of 70 nm

区域附近形成了鲜明的对比,磁场是更加的分散,基本上没有加强。结果表明,磁场能够比较深地穿透金属内部,与金属的趋肤深度基本一致,因此不会加强。

图 2d 为平均坡印廷矢量的增强。结果表明,坡印廷矢量的提高要远远小于电场和磁场相乘的简单算

法,这是因为增强的电场和磁场的相位差接近 90° 。

根据(9)式可以得到在不同金属狭缝宽度的条件下,电场的增强与太赫兹波频率的关系曲线(如图3所示)。可以看出,太赫兹波通过20nm,70nm,150nm,500nm和14 μm 金属狭缝时电场的增强与太赫兹波频率的关系。图3表明,在相同金属狭缝宽度情况下,电场的增强与太赫兹频率的 $\frac{1}{f}$ 成正比关系;在相同太赫兹波频率情况下,电场的增强与金属狭缝的宽度成反比的关系。

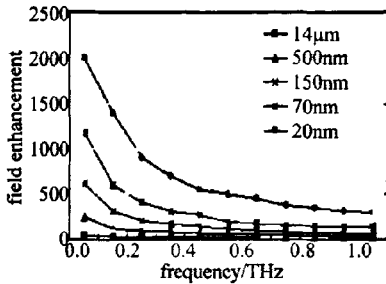


Fig. 3 Dependence of electric field on the width of nano-gaps

3 结论

提出了一种太赫兹光电导天线辐射装置的改进方案:原辐射装置的基础上,增加一个纳米宽度的金属缝隙,让太赫兹电磁波通过狭缝,能够极大地增强辐射功率。模拟结果表明:频率 $\nu=0.1\text{THz}$ 的太赫兹波通过500nm宽度金属狭缝时,横向电场增强了200倍;通过70nm宽度金属狭缝时,横向电场增强了800倍。太赫兹波通过金属狭缝电场的增强与狭缝宽度和太赫兹波频率有关,相同太赫兹波频率的情况下,金属狭缝宽度越小电场的增强越大,相同金属狭缝宽度情况下,太赫兹波的频率越小电场的增强越大。

因为毫米波可以集中在小于金属趋肤深度的纳米缝隙内,因此,可以通过进一步减小金属缝隙的宽度来增强太赫兹电场。而金属缝隙的宽度极限应大于金属充电的屏蔽宽度,根据 Thomas-Fermi 屏蔽长度,通常金属充电的屏蔽宽度低于1nm。太赫兹电磁波聚焦在纳米金属缝隙,有可能使太赫兹电磁场增强 10^4 倍,这种信号增强效应对大多数应用都是十分重要的。比如对太赫兹辐射和纳米粒子^[8-10](几十纳米的空间分辨率)相互作用的研究;太赫兹天文信号检测(其中低通滤波特性)和太赫兹非线性光学等。

参考文献

- [1] EBBESEN T W, LEZEC H J, CHAEMI H F, *et al.* Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. *Nature*, 1998, 391(6668): 667-669.
- [2] LIANG L J. Propagation characteristic of photonic crystal in THz range[J]. *Laser Technology*, 2009, 33(1): 36-40 (in Chinese).
- [3] SHI W, LIANG X Z. Fabrication of high gain GaAs photoconductive switches[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 1998, 32(8): 20-22 (in Chinese).
- [4] BARNES W L, DEREUX A, EBBESEN T W. Surface plasmon sub-wavelength optics [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 824-830.
- [5] OZBAY E. Merging photonics and electronics at nanoscale dimensions [J]. *Science*, 2010, 311(5758): 189-193.
- [6] HILLENBRAND R, TAUBNER T, KEILMANN F. Phonon-enhanced light-matter interaction at the nanometre scale[J]. *Nature*, 2002, 418(6894): 159-162.
- [7] SUN H L. Optical information processing; fundamentals [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1981: 40-50.
- [8] SHALAEV V M. Optical negative-index metamaterials [J]. *Nature Photon*, 2007, 1(1): 41-48.
- [9] ORDAL M A. Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti and W in the infrared and far infrared[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(7): 1099-1119.
- [10] AZAD A K, ZHANG W. Resonant terahertz transmission in sub-wavelength metallic hole arrays of sub-skin-depth thickness[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(21): 2945-2947.

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>