

太赫兹光电导天线电极双层异排列微纳结构研究

夏鹏宇^{1,2}, 李全勇^{1,2*}, 李堂玥^{1,2,3}, 张悦^{1,2}, 谢蕙阳^{1,2}, 张丹丹^{1,2,3}, 任姣姣^{1,2,3}¹长春理工大学光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;²长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;³长春理工大学中山研究院, 广东 中山 528400

摘要 太赫兹光电导天线是一种常用的太赫兹源,但光导材料都有很高的折射率,导致其光电转换效率较低,同时由于存在电场的屏蔽效应,太赫兹辐射功率极易饱和,难以提升。基于表面等离子激元理论,采用时域有限差分方法(FDTD)软件计算仿真了太赫兹波通过柱状金属间隙的增强性能,从改变微纳结构着手以改善太赫兹光电导天线把泵浦激光转换为太赫兹波的转换效率。设计的双侧异排列微纳结构透过率达到 90.38%,电场强度达到 1.02,是单层微纳结构的 185.45%。结果表明,当其他条件相同的情况下,单层正三角形排列的圆柱纳米柱优于其他单层结构,双层异排列微纳结构优于单层微纳结构及其他双层结构。

关键词 光电导天线; 太赫兹; 异排列; 双层微纳结构; 时域有限差分法

中图分类号 TN383

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230804

1 引言

太赫兹(THz)波是一种电磁波,其频率一般都在 0.1~10 THz 之间^[1-2]。由于其穿透性高、光子能量低、通信容量大等特点,太赫兹波在宽带通信、医学成像、无损检测、安检等领域都有相当重要的应用,但如何高效地产生高质量的太赫兹波已成为一大技术难题,因此太赫兹频段曾经也被叫作太赫兹空隙^[2-4]。随着超快光电子学领域的飞速发展,光电导天线(PCA)作为一种同时涉及电子学和光子学领域的太赫兹源,在室温就能使用,且产生太赫兹波频率较高,对激光泵浦原功率要求不高等优势使其在众多太赫兹源中脱颖而出。

太赫兹光电导天线的概念首先是在 1990 年提出的,Zhang 等^[5-6]使用中心波长为 620 nm、脉宽为 70 fs、重复频率为 1000 MHz、脉冲能量为 0.2 nJ 的超快激光照射半导体材料产生太赫兹波。2005 年和 2009 年,Chimot 等^[7]和 Williams 等^[8]利用太赫兹光电导天线分别得到了频率超过 2 THz 和功率超过 12 μ W 的太赫兹波。而 PCA 与等离子体纳米柱和纳米方块阵列结构的结合则是在 2011 年被提及的,Park 等^[9]通过飞秒激光脉冲在 PCA 基底中实现局域电场增强,形成较强的光电流,从而产生较高功率的太赫兹辐射。2018 年

6 月,中国科学院西安光学精密机械研究所的宋超^[10]讨论了不同的基底材料表面微结构阵列减小入射激发光反射以实现光电导天线产生太赫兹波的增强,研究了激光中心波长 800nm 下,基于 Au 材质的三种微结构阵列的不同减反效果。2021 年,长春理工大学的蒋锐等^[11]研究了正三角形排列下不同柱状结构、不同材质的微纳结构对 PCA 效率的增强,最高增强效率约为传统 PCA 的 1100%。

本文选取低温生长砷化镓(LT-GaAs)作为光敏层基底材料,选用波长为 1550 nm、脉宽为 100 fs 的纵模模式激光作为光源,使用时域有限差分法对太赫兹光电导天线的微纳结构进行了数值模拟,微纳结构的形状、大小、间距、周期等都会对太赫兹光电导天线的增强效率有一定的影响,并且在基底下层加入了与上层排列不同、尺寸不同的第二层微纳结构。研究结果表明:在选取单层微纳结构时,应选取增强效率高于六棱柱和正方体的圆柱结构;而在使用双层微纳结构时,下层微纳结构与上层排列不同、尺寸不同能够使增强效率进一步提升。

2 基本原理

2.1 太赫兹光电导天线原理

如图 1 所示,光电导天线通常由半导体基底材料、

收稿日期: 2023-04-12; 修回日期: 2023-05-17; 录用日期: 2023-06-15; 网络首发日期: 2023-06-25

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20220508032RC)、中山市第九批创新科研团队(GXTD2022010)、中山市第二批社会公益和基础研究项目(2022B2012)

通信作者: *liquanyong@cust.edu.cn

蒸镀在基底材料上的电极、电极间的微纳结构和偏置电压组成^[12]。光电导天线是一种电子开关,利用了半导体或者绝缘体暴露在激发光中时电导率增大的特性。光电导率源于光照条件下半导体中产生的非平衡载流子,即电子和空穴数目的增加。当使用光子能量大于半导体基底材料禁带宽度的飞秒脉冲激光激励光电导天线两个金属电极之间的缝隙时,基底材料中能够瞬时产生大量的电子和空穴,这些光生载流子在偏置电压的作用下,会进行加速运动形成瞬态光电流,进而产生太赫兹脉冲^[13]。在光电导天线辐射太赫兹波的模拟中,激光照射在光电导天线电极之间的间隙处,使得衬底中激发出瞬态光电流,把瞬态光电流作为电流源合并到 FDTD 计算过程,这就将 FDTD 算法用在了半导体计算过程中。

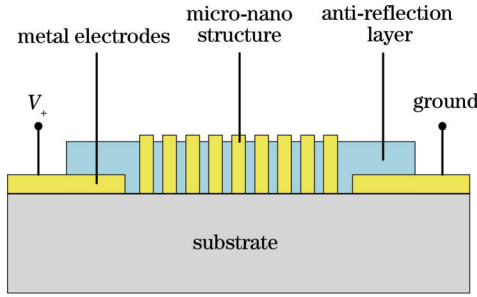


图 1 太赫兹光电导天线装置图

Fig. 1 Diagram of terahertz photoconductive antenna device

太赫兹辐射电场 $E_{\text{THz}} \propto \frac{\partial J(t)}{\partial t}$, 因此 PCA 的 THz 辐射电场与电场强度成正比。光电流的表达式可以通过查阅参考文献^[14]得出

$$I = \frac{qU_b \mu \tau \eta_L P_L}{h f_L l^2}, \quad (1)$$

式中: U_b 为偏置电压; τ 为光电流衰减时间; η_L 为照明效率; P_L 为入射到间隙上的激光功率; h 为普朗克常数; f_L 为激光频率; l 为间隙长度; μ 为迁移率, q 为电荷量。这个光电转换过程将激光功率 P_L 转换成电功率 P_E , 要求得电功率, 可以通过文献找到电阻的近似表达式^[15]为

$$R \approx \frac{h c f_R l^2}{\eta_L q \mu P_L \lambda_L}, \quad (2)$$

式中: c 为光速; f_R 为激光重复频率; λ_L 为激光中心波长。原文献中砷化镓(GaAs)的系数可以被替换以用于理论的进一步推导, 在假设整个基底被光线均匀照射的情况下, 其结果并不会产生精度误差, 则电功率为

$$P_E = I^2 R \approx \frac{q U_b^2 \mu^2 \tau^2 \eta_L P_L f_R}{h f_L l^2}. \quad (3)$$

则激光-电能转换效率可以被估算为

$$\eta_{LE} = \frac{P_E}{P_L} \approx \frac{q U_b^2 \mu^2 \tau^2 \eta_L f_R}{h f_L l^2}. \quad (4)$$

由式(4)推导可得, 光电导天线的辐射功率由多种参数共同影响, 如电流密度、偏置电压, 以及所选用激光器的功率、重复频率等。增加偏置电压确实可以通过增加载流子移动速度的方式来提高 PCA 的功率, 这也是一种过去常用的辐射高功率太赫兹波的方法。但这种做法往往会导致衬底材料被击穿, 击穿电压的存在使辐射功率达到极限^[16-17]。而在这时可以提高所选用激发光的强度, 以提升光生载流子的数量。在高功率激光照射下, 会产生高密度的自由载流子, 光电流也会进一步提升, 但这种方法也存在输出功率的极限。即使再通过改变照射位置、照射面积、照射方式等方式改变, 其对太赫兹辐射功率产生的影响也都是有限的。所以应该着眼于提升载流子迁移率, 而微纳结构能够有效改变载流子迁移率^[18]。

2.2 微纳结构仿真原理

对金属微纳结构进行分析, 可以从球形金属纳米粒子入手。当球形金属纳米粒子的尺寸远小于照射它的光的波长时, 共振状态会使其周围产生电场。其周围电场可以视为恒定电场, 且应为其中心原点的电偶极子产生的电场与外加电场的叠加。根据准静态近似理论^[19], 如图 2 所示, 假设在一个介电常数为 ϵ_0 且充满均匀电场 $E = E_0 z$ 的环境中, 半径为 a 、介电常数为 ϵ_m 的球形金属纳米粒子外的电场如图 2 所示, θ 为外加电场与电偶极子产生电场的夹角, 则金属纳米球外电位函数 ϕ_{out} 可以表示为

$$\phi_{\text{out}} = -E_0 r \cos \theta + \frac{p}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cos \theta, \quad (5)$$

式中: p 是电偶极矩, 表达式为 $p = \epsilon \alpha E_0$; α 是极化强度, 表达式为

$$\alpha = 4\pi a^3 \left(\frac{\epsilon_m - \epsilon_0}{\epsilon_m + 2\epsilon_0} \right). \quad (6)$$

又由文献^[20]得出, 当 $\epsilon_m + 2\epsilon_0 = 0$ 时金属纳米球达到共振状态, 则此时电场强度 E_{out} 表达式为

$$E_{\text{out}} = e_r \left(E_0 \cos \theta + 2 \frac{\epsilon_m - \epsilon_0}{\epsilon_m + 2\epsilon_0} a^3 E_0 \frac{\cos \theta}{r^3} \right) + e_\theta \left(-E_0 \sin \theta + \frac{\epsilon_m - \epsilon_0}{\epsilon_m + 2\epsilon_0} a^3 E_0 \frac{\sin \theta}{r^3} \right). \quad (7)$$

令上式 $r = a$, $\theta = 0$, 可以得到球形金属纳米粒子外表面的电场, 推出电场增强因子(EF)^[21]表示为

$$F_{\text{EF}} = \left| \frac{E_{\text{out}}}{E_0} \right|^2 = 9 \left(\frac{\epsilon_m}{\epsilon_m + 2\epsilon_0} \right)^2. \quad (8)$$

通过叠加大量球形金属纳米粒子的叠加, 使微纳结构对太赫兹光电导天线的电场有极大的增强^[22]。另外, 微纳结构的结构参数、周期参数等也都会对增强效率产生影响, 本文对此展开仿真研究。

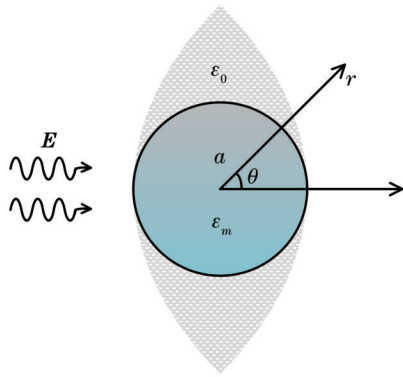


图 2 球形金属纳米粒子周围电场示意图

Fig. 2 Schematic diagram of electric field around a spherical metal nanoparticle

3 仿真部分

3.1 太赫兹光电导天线基底材料仿真

一般来说,太赫兹光电导天线的基底材料的击穿

电压不应过低、载流子寿命不应过长和载流子迁移率不应过慢。GaAs很好地符合了上述要求,其载流子寿命非常短($<1\text{ ps}$),迁移率和击穿电压也较为优秀,因此在PCA的基底材料使用率中排行前列。为了证明以上结论,可以使用FDTD软件对多种基底材料进行仿真模拟。FDTD软件给出了多种材料可以选用,方便对太赫兹光电导天线的基底材料特性展开研究。不同材料作为基底时,记录其透过率以研究基底材料的电阻率、载流子迁移率和载流子寿命等对产生太赫兹波的影响。与此同时,还应考虑基底材料的能隙大小,以便与激发光波长更好地匹配。例如:在激发光波长为 800 nm (1.55 eV)时,常选用能隙 1.43 eV 的GaAs材料作为基底材料;在激发光波长为 1550 nm (0.8 eV)时,常选用能隙小于 0.8 eV 的LT-GaAs材料作为基底材料。本文选取的LT-GaAs基本材料特性如表1所示。

表 1 LT-GaAs 的材料特性

Table 1 Material properties of LT-GaAs

Material	Permittivity	Temperature /K	Mean laser power P_{ave} /mW	Intrinsic carrier concentration / cm^{-3}	Electron mobility / $[\text{cm}^2 \cdot (\text{V} \cdot \text{s})^{-1}]$	Hole mobility / $[\text{cm}^2 \cdot (\text{V} \cdot \text{s})^{-1}]$	Electron lifetime / s	Hole life /s
LT-GaAs	12.9	300	10	2.1×10^{-6}	1000	100	1×10^{-13}	4×10^{-13}

3.2 太赫兹光电导天线基底表面微纳结构仿真

在基底表面加入电介质减反层可以有效增加微纳结构对入射光的吸收率,因此可以在仿真时加入 Si_3N_4 减反层等以提升效率。但金属微纳结构与LT-GaAs在界面处形成了电场的局域增强更为明显,因此本文着手于改变微纳结构的周期、结构参数等以研究微纳结构对太赫兹光电导天线的效率增强。

搭建太赫兹光电导天线模型后,在基底表面加入柱状微纳结构,研究其对电场的增强以及反射余波的减少,其中减反层厚度和基底厚度均为 $1\text{ }\mu\text{m}$,透射率监视器和电场监视器位于基底下 $1\text{ }\mu\text{m}$ 处。观察

微纳结构加入前后透过率和反射率监视器的变化,可以得出衬底对激发光的吸收率 $A = 1 - T - R$, T 为透过率, R 为反射率。又因为减反层的存在,反射率变化不大,所以透过率越低,吸收率越高。

首先改变柱状微纳结构的形状为长方体、圆柱、六棱柱,如图3所示,再控制柱状结构的高度、横截面积(边长或直径)相近,根据最高透过率选取最佳单微纳结构。波长 1550 nm 激光下长方体、圆柱、六棱柱单微纳结构透过率分别为 0.198 、 0.197 和 0.201 ,可以得出单圆柱微纳结构的透过率最低,即吸收率最高。

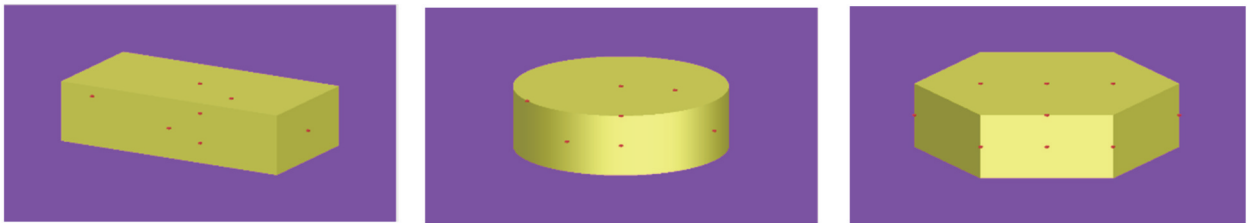


图 3 长方体、圆柱、六棱柱微纳结构

Fig. 3 Rectangular, cylindrical, and hexagonal prism micro-nano structures

但是需要注意的是:如果电极间的微纳结构尺寸过小,容易在光电流较强时发生熔化现象,从而引起光电导天线短路;如果电极间的微纳结构过厚,虽然可以明显地降低透过率,但此时的吸收率也将大大下降,导

致太赫兹光电导天线的总体效率降低。因此,在仿真的过程中应该选取一种平衡的结构,其能够在具有高吸收率的同时,有效地降低透过率。

另外,柱状微纳结构的分布周期也会影响太赫兹

波的产生。将不同排列分布形式、不同排列密度的微纳结构分别进行模拟,选取单层结构结果如图 4 所示。

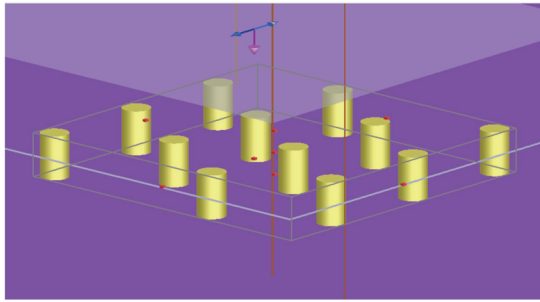


图 4 3×4 正三角形排列的上层圆柱微纳结构

Fig. 4 Upper cylindrical micro-nano structure arranged by 3×4 equilateral triangles

可以得出结论,在 1550 nm 的 100 fs 激光脉冲光源下,周期为 1 μm, 3×4 正三角形排列的直径 0.1225 μm、高 0.75 μm 的圆柱微纳结构具有较小的透过率,即较高的吸收率,也就代表能够高效地产生太赫兹波,此时产生的电场强度图和透过率图分别如图 5 和图 6 所示,其中心电场强度最高达到 0.55,透过率约为 0.16。

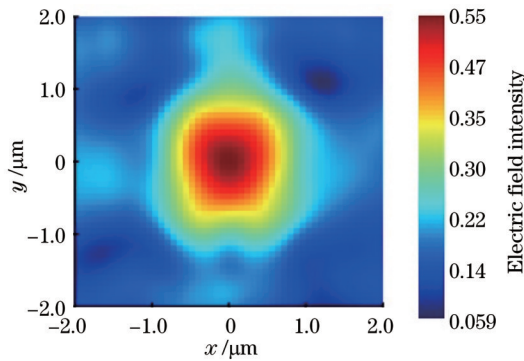


图 5 选取的上层圆柱微纳结构电场强度图

Fig. 5 Selected upper cylindrical micro-nano structure electric field intensity diagram

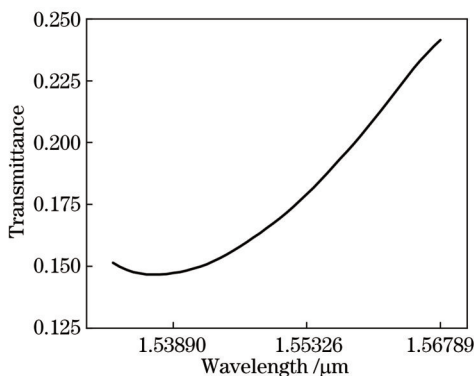


图 6 选取的上层圆柱微纳结构透过率图

Fig. 6 Selected upper cylindrical micro-nano structure transmittance diagram

3.3 双层微纳结构太赫兹光电导天线仿真

在提高太赫兹光电导天线转换效率的方式上, Bashirpour 等^[14]提出了在基底材料两侧集成不同材料的微纳结构,即加入双层的微纳结构,且下层圆柱的结构安排在上层圆柱的间隙中时,会使产生的太赫兹波在通过下层微纳结构时得到第二次加强,从而增强转换效率。通过以下仿真验证这一结论。

图 7 为计算得出的第一种上层采用直径为 0.1225 μm、高为 0.75 μm,周期为 1 μm 的 3×4 正三角形排列,下层采用直径为 0.05 μm、高为 0.2 μm,周期为 0.5 μm 的正方形排列的双层圆柱微纳结构图,观察图 8 可以看出电场强度明显增大,中心电场强度最高达到 0.86,证明双层微纳结构确实对太赫兹光电导天线的转换效率有一定提升作用。

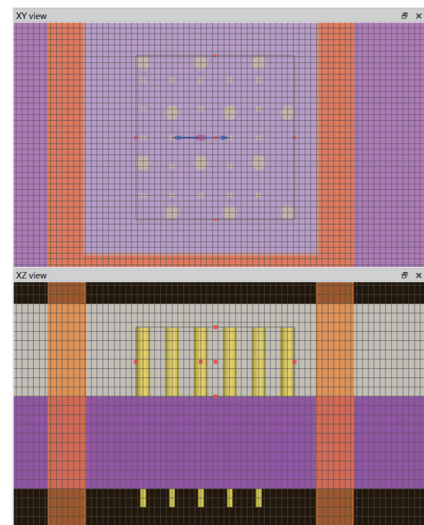


图 7 第一种双层圆柱微纳结构图

Fig. 7 First double-layer cylindrical micro-nano structure diagram

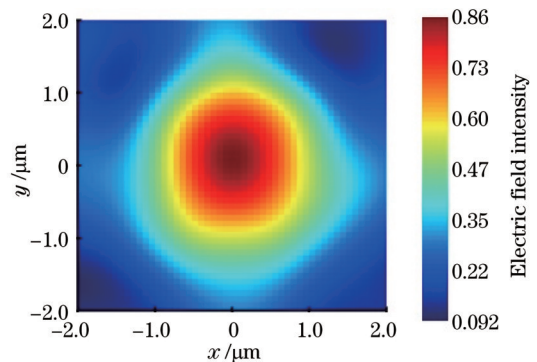


图 8 第一种双层圆柱微纳结构电场强度图

Fig. 8 Electric field intensity diagram of the first double-layer cylindrical micro-nano structure

为了探究双层微纳结构的周期与透过率的关系,扩大仿真范围以尝试多种不同周期组合,在保证可行性的情况下达到效率最高值。在仿真的过程中,除扩大仿真范围后数量增多外,上层微纳结构的其他参数

不再进行变化,以确保选取的结构具有相同的上层透过率。另外,下层微纳结构应保持合适的间距穿插在上层微纳结构间隙下方,过密的下层微纳结构可能会降低太赫兹波的产生效率。

通过计算和扫描得到的双层异排列微纳结构图、电场强度图和透射率图如图 9、图 10 和图 11 所示,其透过率约为 0.09,中心部分电场强度最高达到 1.02,是单层微纳结构的 185.45%。可以得出结论,在 1550 nm 的 100 fs 激光脉冲光源下,加入 4×5 正三角形排列的周期为 $1 \mu\text{m}$ 、直径为 $0.1225 \mu\text{m}$ 、高为 $0.75 \mu\text{m}$ 的上层圆柱微纳结构和 8×8 正方形排列的周期为 $0.5 \mu\text{m}$ 、直径为 $0.17 \mu\text{m}$ 、高为 $0.5 \mu\text{m}$ 的下层圆柱微纳结构会使衬底具有较高的吸收率,即 PCA 更高的转换效率。

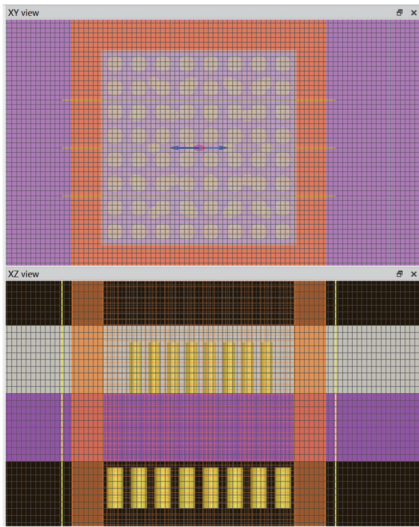


图 9 双层异排列微纳结构图

Fig. 9 Double-layer heterogeneous micro-nano structure diagram

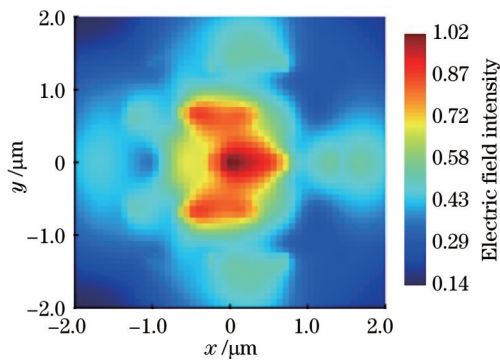


图 10 双层异排列微纳结构的电场强度图

Fig. 10 Electric field intensity diagram of double-layer heterogeneous micro-nano structure

4 结 论

本文使用 FDTD 仿真了一种太赫兹光电导天线电极间的双层异排列微纳结构,与传统结构不同的是,

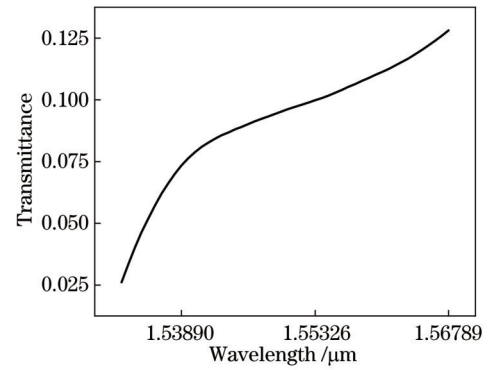


图 11 双层异排列微纳结构的透射率图

Fig. 11 Transmittance diagram of double-layer heterogeneous micro-nano structure

本文不仅在基底上层表面添加了微纳结构,也在基底下层加入了与上层排列不同、尺寸不同的微纳结构。激光照射在两电极间的微纳结构时,会使更多的光子入射到光敏层中,而由于下层微纳结构是穿插在上层微纳结构的间隙中的,所以能再次激发更多光子,并且也能对上层的载流子进行二次加速,产生更多电磁波,从而提升光电天线的辐射功率。另外,本文提出的微纳结构深宽比、频率等在现有的等离子刻蚀技术下基本能够完成加工。

本文选择的双层异排列微纳结构太赫兹光电导天线相对于单层微纳结构太赫兹光电导天线,能够明显增强微纳结构的吸收率和电场强度,提升效率最高达到 185.45%。这种双层异排列微纳结构具有结构上的创新,能够使太赫兹光电导天线高效地产生高质量的太赫兹波。

参 考 文 献

- [1] 韩张华, 孙开礼, 蔡阳健. 微纳光学结构与太赫兹辐射产生技术的研究进展[J]. 光学学报, 2021, 41(8): 0823017.
Han Z H, Sun K L, Cai Y J. Research progress of micro-nano optical structure and terahertz radiation generation technology[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(8): 0823017.
- [2] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology[J]. Nature Materials, 2002, 1(1): 26-33.
- [3] Köhler R, Tredicucci A, Beltram F, et al. Terahertz semiconductor-heterostructure laser[J]. Nature, 2002, 417 (6885): 156-159.
- [4] Williams B S. Terahertz quantum-cascade lasers[J]. Nature Photonics, 2007, 1(9): 517-525.
- [5] Zhang X C, Hu B B, Darrow J T, et al. Generation of femtosecond electromagnetic pulses from semiconductor surfaces [J]. Applied Physics Letters, 1990, 56(11): 1011-1013.
- [6] Darrow J T, Zhang X C, Auston D H. Saturation properties of large-aperture photoconducting antennas[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992, 28(6): 1607-1616.
- [7] Chimot N, Mangeney J, Joulaud L, et al. Terahertz radiation from heavy-ion-irradiated $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ photoconductive antenna excited at $1.55 \mu\text{m}$ [J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(19): 193510.
- [8] Williams K K, Taylor Z D, Suen J Y, et al. Toward a 1550 nm InGaAs photoconductive switch for terahertz generation[J]. Optics Letters, 2009, 34(20): 3068-3070.

- [9] Park S G, Jin K H, Yi M, et al. Enhancement of terahertz pulse emission by optical nanoantenna[J]. ACS Nano, 2012, 6(3): 2026-2031.
- [10] 宋超. 亚波长金属结构高效太赫兹光电导发射天线分析与设计[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2018.
Song C. Analysis and design of efficient terahertz photoconductive emitters based on sub-wavelength metal structures[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [11] 蒋锐, 李全勇, 程爽, 等. 基于微纳结构太赫兹光电导天线辐射特性研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021, 19(4): 652-659.
Jiang R, Li Q Y, Cheng S, et al. Research on radiation characteristics of terahertz photoconductive antenna based on micro-nano structure[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021, 19(4): 652-659.
- [12] Al-Daffaie S, Jumaah A J, Rubio V L, et al. Design and implementation of a terahertz lens-antenna for a photonic integrated circuits based THz systems[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 1476.
- [13] 谷建强, 王可蒙, 许祎, 等. 基于超材料的太赫兹光电导天线[J]. 中国激光, 2021, 48(19): 1914004.
Gu J Q, Wang K M, Xu Y, et al. Metamaterials-based terahertz photoconductive antennas[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(19): 1914004.
- [14] Bashirpour M, Poursafar J, Kolahdouz M, et al. Terahertz radiation enhancement in dipole photoconductive antenna on LT-GaAs using a gold plasmonic nanodisk array[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 120: 105726.
- [15] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. Nature, 2003, 424(6950): 824-830.
- [16] 熊中刚, 邓琥, 熊亮, 等. 基于 DL 模型与时域耦合波理论的 PCA THz 调制机理研究[J]. 激光与红外, 2020, 50(6): 743-748.
Xiong Z G, Deng H, Xiong L, et al. Research on mechanism of PCA THz modulation based on the DL model and time-domain coupled wave theory[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(6): 743-748.
- [17] 熊中刚, 尚丽平, 邓琥, 等. 加载方形开口谐振环的太赫兹光电导天线性能仿真分析[J]. 中国激光, 2021, 48(16): 1614001.
Xiong Z G, Shang L P, Deng H, et al. Simulation and analysis of performance of terahertz photoconductive antenna with square split-ring resonators[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(16): 1614001.
- [18] 刘乐福, 刘林生, 陆叶, 等. 三角阵列电极的太赫兹光电导天线结构设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021, 19(6): 968-972.
Liu L F, Liu L S, Lu Y, et al. Structure design of a photoconductive antenna with triangular array electrodes[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021, 19(6): 968-972.
- [19] 童廉明, 徐红星. 表面等离子激元: 机理、应用与展望[J]. 物理, 2012, 41(9): 582-588.
Tong L M, Xu H X. Surface plasmons—mechanisms, applications and perspectives[J]. Physics, 2012, 41(9): 582-588.
- [20] 张志东. 金属微纳结构局域表面等离子激元共振和表面等离子激元传播特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
Zhang Z D. Study on local surface plasmon resonance and surface plasmon propagation characteristics of metal micro-nanostructures[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [21] Kneipp K, Kneipp H, Manoharan R, et al. Extremely large enhancement factors in surface-enhanced Raman scattering for molecules on colloidal gold clusters[J]. Applied Spectroscopy, 1998, 52(12): 1493-1497.
- [22] Gric T, Gorodetsky A, Trofimov A, et al. Tunable plasmonic properties and absorption enhancement in terahertz photoconductive antenna based on optimized plasmonic nanostructures[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2018, 39(10): 1028-1038.

Double-Layer Heterogeneous Micro-Nano Structure of Terahertz Photoconductive Antenna Electrodes

Xia Pengyu^{1,2}, Li Quanyong^{1,2*}, Li Tangyue^{1,2,3}, Zhang Yue^{1,2}, Xie Huiyang^{1,2},
Zhang Dandan^{1,2,3}, Ren Jiaojiao^{1,2,3}

¹Key Laboratory of Photoelectric Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

²School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

³Zhongshan Institute of Changchun University of Science and Technology, Zhongshan 528400, Guangdong, China

Abstract

Objective Terahertz (THz) waves are electromagnetic ones with frequencies ranging from 0.1 THz to 10 THz. Due to their high penetration, low photon energy, and high communication capacity, terahertz waves are widely employed and have important applications in broadband communication, medical imaging, nondestructive testing, security, and other fields. However, as how to generate high-quality terahertz waves becomes a major technical problem, the THz frequency band is once called the THz gap. With the rapid development of ultrafast optoelectronics, photoconductive antenna (PCA), a THz source involved in electronics and photonics, can be applied at room temperature, with high frequency of THz wave generation and low requirements for laser pump power, which makes it stand out among other THz sources. However, due to the high refractive index of photoconductive materials, the photoconversion efficiency of THz PCA is

low. Meanwhile, due to the shielding effect of electric fields, the THz radiation power is easily saturated and difficult to improve.

Methods The radiation power of THz PCA is affected by many parameters, such as current density, bias voltage, selected laser power, and repetition frequency. However, the micro-nano structures can effectively improve carrier mobility to form more obvious local enhancement of electric fields at the interface with LT-GaAs substrate. Therefore, based on the surface plasmas theory, our paper adopts the finite difference time domain (FDTD) method. With the purpose to study the efficiency enhancement of THz PCA, the period and structural parameters of micro-nano structures are calculated and simulated by FDTD software. In simulating THz wave radiation of PCA, the laser irradiates at the gap between the PCA electrodes, which stimulates the transient photocurrent in the substrate. The transient photocurrent is incorporated into the FDTD calculation as the current source, which makes the FDTD algorithm can be employed in semiconductor calculation.

Adding a dielectric anti-reflection layer on the substrate surface can increase the absorption rate of incident light of micro-nano structures. Therefore, the Si_3N_4 anti-reflection layer can be added during simulation to improve efficiency. After the THz PCA model is built, micro-nano columnar structures are added on the substrate surface to study the enhancement of electric fields and the reduction of reflection after-wave. The changes in transmittance and reflectance monitors before and after adding micro and nano structures are observed and recorded. It should be noted that if the micro-nano structures between the electrodes are too small, it is easy to melt under a strong photocurrent, which results in a short PCA circuit. If the micro-nano structures among the electrodes are too thick, the absorption rate will also be greatly reduced despite significantly reduced reflectivity, causing decreased overall efficiency of the THz PCA. Therefore, a balanced structure should be selected during the simulation to reduce the reflectivity with a high absorption rate. Additionally, the distribution period of the columnar micro-nano structures also affects the generation of THz waves. The micro-nano structures with different arrangement distribution forms and densities are simulated respectively, and the results of single-layer structures are selected (Fig. 4).

To explore the relationship between the period and the transmittance of double-layer micro-nano structures, we expand the simulation range to try a variety of different period combinations, which can achieve maximum efficiency and ensure feasibility. During the simulation, other parameters of the upper micro-nano structures are not changed to ensure that the selected structure has the same upper layer transmittance, except for the increasing number after expanding the simulation range. In addition, the lower micro-nano structures should be interspersed below the gap of the upper micro-nano structures at an appropriate spacing. On the contrary, the generation efficiency of THz waves may be reduced if the lower micro-nano structures are too dense.

Results and Discussions Under the 1550 nm 100 fs laser pulse light source, the cylindrical micro-nano structure with a diameter of 0.1225 μm and a height of 0.75 μm arranged by 3×4 triangles with a period of 1 μm has a small transmittance to generate THz waves, which means a high absorption rate. Meanwhile, the electric field intensity (Fig. 5) and the transmittance (Fig. 6) are shown in the figures. The maximum intensity of the central electric field is 0.55 and the transmittance is about 0.16. The double-layer heterogeneous micro-nano structure (Fig. 9), electric field intensity (Fig. 10), and transmittance obtained through calculation and scanning (Fig. 11) are shown. The transmittance is about 0.09, and the electric field intensity of the central part reaches the highest value of 1.02, which is 185.45% of the single-layer micro-nano structure. It can be concluded that under the 1550 nm 100 fs laser pulse light source, the addition period is 1 μm and the diameter of the 4×5 equilateral triangle arrangement is 0.1225 μm , with the height of 0.75 μm and the period of 0.5 μm . The cylindrical micro-nano structure with a diameter of 0.17 μm and a height of 0.5 μm in the 8×8 square arrangement has a higher absorption rate.

Conclusions Single-layer equilateral triangular cylindrical nanocrystals are proven to be better than other single-layer structures in other conditions. The double-layer heterogeneous micro-nano structures are superior to the single-layer micro-nano structures and other double-layer structures. This double-layer heterogeneous micro-nano structure has structural innovation, which can make the THz PCA generate high-quality THz waves. Additionally, the depth-to-width ratio and frequency of the proposed micro-nano structure can be processed by the existing plasma etching technology.

Key words photoconductive antenna; terahertz; heterogeneous arrangement; double-layer micro-nano structure; finite difference time domain