

文章编号: 2095-4980(2021)06-0968-05

三角阵列电极的太赫兹光电导天线结构设计

刘乐福, 刘林生*, 陆叶, 李传起*

(广西师范大学 电子工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 光电导天线具有室温操作、紧凑设计和宽带辐射等优点, 但辐射功率低限制了其广泛应用, 其中低光吸收率是辐射功率低的主要原因之一。传统的天线电极无尖端结构, 边缘电场弱, 导致了低的光吸收率。为了提高光电导天线的辐射功率, 设计了一种三角阵列天线电极结构, 该电极结构由 5 个三角形尖端排列组成。使用时域有限差分(FDTD)方法研究了 800 nm 飞秒激光照射下电极的电场增强和衬底对光的吸收。此结构增加了激光入射到衬底的面积, 并且减小了光载流子传输距离, 在无电场情况下光的吸收率达到 30.57%, 相对于传统天线提高了 161%。三角阵列电极结构为传统电极结构设计提供了新思路, 有望与纳米结构结合进一步提高辐射功率。

关键词: 太赫兹; 光电导天线; 时域有限差分; 电极

中图分类号: TN911

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021219

Structure design of a photoconductive antenna with triangular array electrodes

LIU Lefu, LIU Linsheng*, LU Ye, LI Chuanqi*

(College of Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Photoconductive antenna has the advantages of room temperature operation, compact design and wide-band radiation, but its wide application is limited by low radiation power caused primarily by low optical absorptivity. The traditional antenna electrode has no tip structure and the edge electric field is weak, which leads to low light absorption. In order to improve the radiation power of photoconductive antenna, a triangular array antenna electrode structure is designed. The electrode structure is composed of five triangular tips. Finite Difference Time Domain(FDTD) method is adopted to study the electric field enhancement of the electrode and the light absorption of the substrate under 800 nm femtosecond laser irradiation. The results show that this structure increases the area of laser incidence on the substrate and reduces the optical carrier transmission distance. In the case of no electric field, the optical absorption reaches 30.57%, which is 161% higher than that of the traditional antenna. Triangular array electrode structure provides a new idea for the design of traditional electrode structure, which is expected to be combined with nanostructures to further improve the radiation power.

Keywords: terahertz; photoconductive antenna; Finite Difference in Time Domain; electrode

太赫兹波由于其独特的优点而被广泛应用于太空(例如卫星与卫星之间的通信, 因为太空中没有空气衰减)、安检(不同物体对电磁波有不同的吸收)、医学诊断(皮肤癌)、成像、生物传感、化学测试等诸多领域^[1-3]。产生太赫兹波最常见的方法之一是光电导天线。光电导天线由衬底和 2 个电极组成, 其工作原理是当超短激光脉冲照射到加有一定偏压的光电导天线上, 在入射光子能量大于光电导材料禁带宽度时, 会产生电子-空穴对, 这些载流子在外加电场作用下加速运动形成瞬态光电流, 并将存储的静电势能以电磁脉冲的形式释放出来, 当激光脉冲宽度为飞秒量级时, 产生的便是太赫兹辐射。然而, 光电导天线转换效率很低, 对光电导天线的改进具有重要意义。

光电导天线电极对太赫兹波辐射有很重要的影响。电极结构一方面在无电压情况下增强电场, 另一方面增强衬底的光吸收。更高的光吸收可以产生更高的光电流, 从而提高太赫兹波产生^[4]。光电导天线的等离子体接触电

收稿日期: 2021-05-27; 修回日期: 2021-08-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61964003)

*通信作者: 刘林生 email:19046567@qq.com; 李传起 email:lcq@mailbox.gxnu.edu.cn

极最高产生 4 mW 的脉冲太赫兹辐射^[5]，制造等离子体接触电极需要使用电子束光刻等价格高昂的设备。纳米等离子体结构对太赫兹的辐射效率有明显的提高^[6-15]，但使用的都是传统的天线电极结构或蝶形天线电极结构。

本文设计了一种新型三角阵列电极结构，通过时域有限差分方法研究了不同电极结构光电导天线的衬底的吸收和电极的电场增强。为了消除硅透镜、减反射涂层和纳米等离子体结构和衬底材料等因素的影响，光电导天线仅由衬底和电极组成，没有任何透镜或减反射涂层，并且在相同传统的 GaAs 衬底上设计电极，这有助于确定电极结构对光电导天线的影 响。结果表明，通过增强电极结构周围的电场，由于非线性关系，可以使光生载流子产生大的加速度和增强衬底对光的吸收。

1 电极设计原理

太赫兹辐射电场 $E_{\text{THz}} \propto \frac{\partial J(t)}{\partial t}$ ^[16]，因此光电导天线的太赫兹辐射电场和电场强度有关。又根据参考文献[17]，得到光电流：

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

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 ，为了获得电功率，首先要表达出电阻，参考文献[18]得到电阻的近似表达式：

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

式中： c 为光速； f_R 为激光重复频率； λ_L 为激光中心波长。为了得到更一般的结果，将文献中 GaAs 的系数 $3/2$ 替换为 $\frac{1}{\eta_L}$ ，此外还假设整个光电导间隙被均匀照射以简化方程的推导，并证明了这样假设会产生相当精确的结果。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)可以看出，光电导天线最终太赫兹的辐射功率和天线所加的偏置电压、激光器的各项参数(激光功率、重复频率等)和电流密度有很大的关系。通过增加光电导天线上的直流偏置电压，可以使光生载流子加速运动，从而获得高功率的太赫兹输出，因此大的载流子运动加速度，是辐射出高功率太赫兹波的一个关键，但是衬底材料击穿电压的存在限制了辐射功率的最大化。提高激发光强度可以提高光生载流子密度，从而提高太赫兹辐射的功率。激光脉冲强度越大，产生的自由载流子越多，进而形成比较大的光电流。可以通过增加激光泵功率来提高太赫兹的辐射功率，但激光泵功率高会导致太赫兹辐射输出功率趋于饱和。通过改变光斑大小、形状、位置等也可以提高太赫兹辐射功率，但改变这些参数的提升都是有限的，因此问题的关键在于载流子迁移率。

迁移率和电流密度有关，而电流密度和电场强度有关，遗憾的是对于不规则形状的 2 个电极的电场强度很难有一个解析解，因为不同电极形状表面电场分布不同，例如对于蝶形天线，电场主要分布在尖端^[19-20]，这为电场强度的计算带来了困难，为了方便计算可以使用仿真软件建立合适的模型计算。本文设计了一种三角阵列电极结构的光电导天线，并使用 FDTD 方法对其进行仿真模拟计算。

2 模拟和分析

传统的电极结构图由超快光电导体组成，阳极和阴极之间有 $2 \mu\text{m}$ 的间隙，分别连接到最大和最小宽度分别为 $2 \mu\text{m}$ 和 $1 \mu\text{m}$ 的蝶形天线上，如图 1(a)所示，蝶形电极结构如图 1(b)所示，本文提出的光电导天线电极如图 1(c)所示。为了比较不同电极结构光电导天线对光的吸收以及电场增强，3 种光电导天线均使用相同厚度的 GaAs 衬底，相同电极材料 Au，800 nm 中心波长激光照射在阳极附近的同一位置，由于电子比空穴具有更高的迁移率，

并且由于接触电极附近偏置电场的非线性增加，激光不对称地聚焦在阳极附近的光电导天线间隙上以最大化太赫兹辐射。GaAs 厚度均为 $0.5\ \mu\text{m}$ ，电极厚度均为 $50\ \text{nm}$ ，电极间隙均为 $2\ \mu\text{m}$ ，其中三角阵列电极结构的尖端三角形底为 $200\ \text{nm}$ ，高为 $1\ \mu\text{m}$ ，其三维结构图如图 2 所示。为了方便比较，本文设计的三角阵列电极结构在整体的长度和宽度上与传统电极及蝶形电极相同。

本文使用时域有限差分方法分别对 3 种结构进行仿真模拟，得到光电导天线衬底对光的吸收率，和电极的电场增强。由于天线的光吸收率和 THz 辐射效率成正比，可以通过吸收率来评价天线的辐射特性。3 种结构在 $750\sim 850\ \text{nm}$ 波长范围内对光的吸收率如图 3 所示，吸收率由式(5)算出：

$$A=1-T-R \tag{5}$$

式中： A 为吸收率； T 和 R 分别为光的透过率和反射率。透过率和反射率可以通过仿真直接得出，通过式(5)直接计算出吸收率。可以看出在相同条件下，三角阵列电极结构的吸收率在整个仿真波长范围内要远高于传统以及蝶形光电导天线，其中在 $800\ \text{nm}$ 处，传统电极光电导天线吸收率为 18.96% ，蝶形电极光电导天线吸收率为 24.96% ，三角阵列电极光电导天线吸收率为 30.57% ，三角阵列电极相对于传统、蝶形电极光电导天线光吸收率分别提高了 161% 和 123% ，这归因于独特的三角阵列结构，三角阵列结构增加了激光入射到衬底的面积，并且减小了光载流子传输距离。同时，三角阵列结构相比于传统以及蝶形电极结构增加了三角形尖端的数量，这导致更多的电荷聚集在电极尖端，尖端处的电荷积累导致更强的电场。由于仿真厚度只有 $500\ \text{nm}$ ，且仿真区域包含整个电极及间隙部分远大于光源照射范围，从而导致整体吸收率不高。

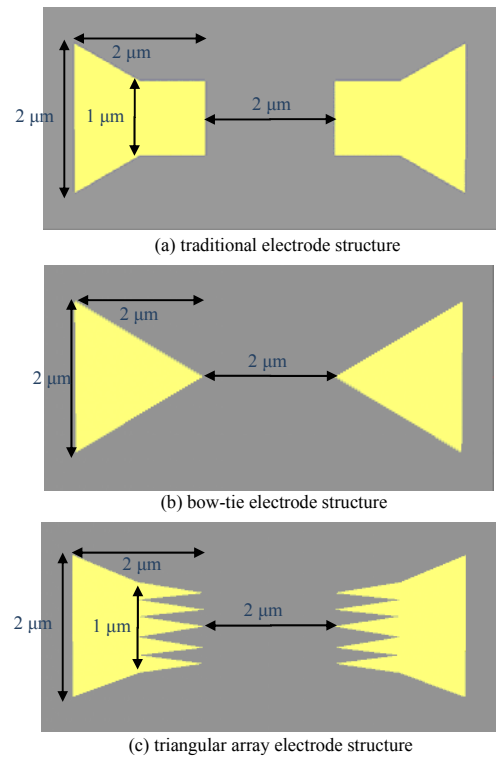


Fig.1 Top view of three structures
图 1 3 种结构的俯视图

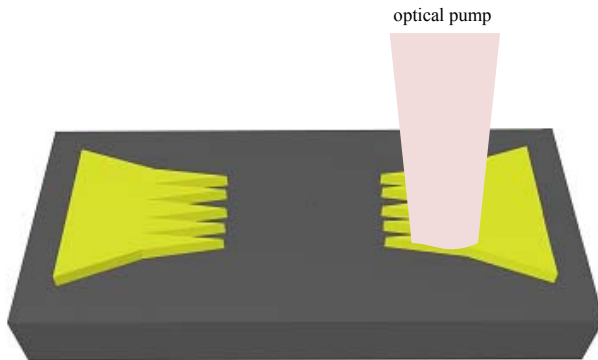


Fig.2 Three-dimensional structure of triangular array electrode
(The optical pumping position is near the anode.)
图 2 三角阵列电极结构的三维结构图,光泵浦位置在阳极附近

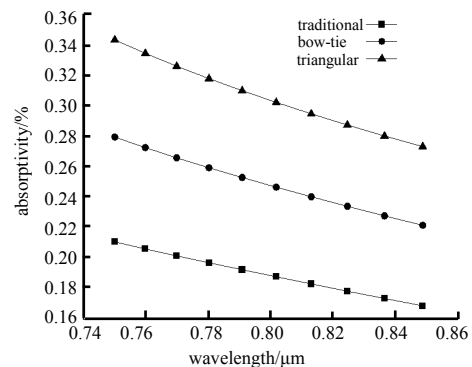


Fig.3 Absorptivity of light in the wavelength range of 750-850 nm in traditional, bow-tie and triangular arrays
图 3 传统、蝶形和三角阵列结构在 $750\sim 850\ \text{nm}$ 波长范围内对光的吸收率

3 种结构在无偏置电压下电极中间厚度位置的电场增强如图 4 所示。三角阵列结构的电场相比于传统和蝶形光电导天线分别提高了 328% 和 180% 。电场强度与电流密度成正比，而电流密度与最终太赫兹辐射电场成正比，所以电场强度的增强最终将导致太赫兹辐射效率的增强。如图 4(a)所示传统电极电场强度分布均匀，但电极尖端处最大电场低于蝶形和新型三角阵列电极，表现为太赫兹波频谱在高频范围内信号相对较弱。如图 4(b)所示蝶形电极电场分布不均匀，因此该形状辐射的太赫兹波的中心频率幅值偏低。如图 4(c)所示新型三角阵列结构的场强分布均匀，光生载流子数量高于传统电极和蝶形电极结构，在相同条件下，该形状相比于传统电极，太赫兹波中心频率峰值强度较高，而且在电极尖端处最大场强远高于传统电极和蝶形电极，电极间有部分光生载流子运动速度快，因此太赫兹波频谱在高频范围内信号相对较强。

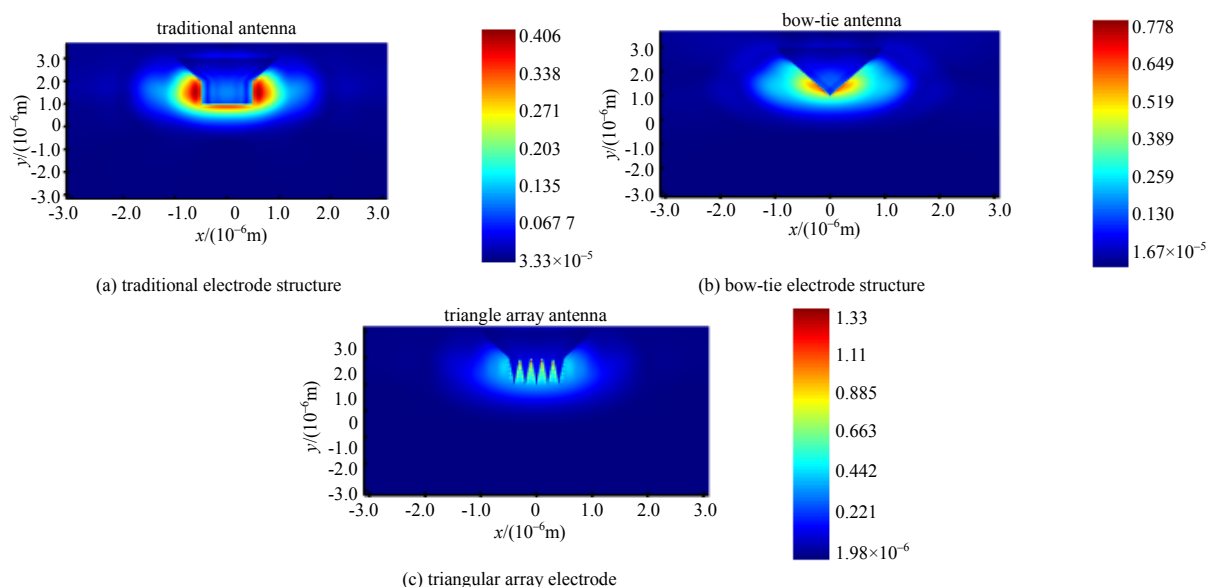


Fig.4 Electric field enhancement of the three structures in the center of the electrode

图 4 3 种结构在电极中心位置的电场增强

3 结论

本文根据光电导天线的设计原理,设计了一种三角阵列电极结构,该结构在保持传统电极结构简单、易制作的优点上,可以有效增强光电导天线对光的吸收,利用时域有限差分法研究表明,三角阵列电极结构光电导天线对光的吸收分别比传统结构以及蝶形结构提高了161%和123%,电场提高了328%和180%。本研究为光电导天线提供了全新的电极结构,利用此电极结构与纳米等离子体结构结合为整体增强光电导天线的太赫兹转化效率提供了途径。

参考文献:

- [1] TONOUCI M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007,1(2):97-105.
- [2] SHEN Y C,TADAY P F. Development and application of terahertz pulsed imaging for nondestructive inspection of pharmaceutical tablet[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2008,14(2):407-415.
- [3] 余晓,杨帆. 太赫兹成像技术用于皮肤烧伤检测的研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021,19(2):201-209. (YU Xiao,YANG Fan. Research progress of terahertz imaging technology for skin burn detection[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021,19(2):201-209.)
- [4] BASHIRPOUR M,KOLAHDOUZ M,NESHAT M. Enhancement of optical absorption in LT-GaAs by double layer nanoplasmonic array in photoconductive antenna[J]. Vacuum, 2017(146):430-436.
- [5] YARDIMCI N T,CAKMAKYAPAN S,HEMMATI S,et al. A high-power broadband terahertz source enabled by three-dimensional light confinement in a plasmonic nanocavity[J]. Scientific Reports, 2017,7(1):4166.
- [6] JIANG R,CHENG S,LI Q,et al. Terahertz radiation enhancement based on LT-GaAs by optimized plasmonic nanostructure[J]. Laser Physics, 2021,31(3):36203.
- [7] ANVARI R,SOOFI H. Enhancement of photocurrent in THz photoconductive antenna by a gold nanorod array[J]. Optik, 2020(207):163827.
- [8] BASHIRPOUR M,FOROZMEHR M,HOSSEININEJAD S E,et al. Improvement of terahertz photoconductive antenna using optical antenna array of ZnO nanorods[J]. Scientific Reports, 2019,9(1):1414.
- [9] GHORBANI S,BASHIPOUR M,KOLAHDOUZ M. Improving unbiased terahertz photoconductive antenna based on dissimilar Schottky barriers using plasmonic mode excitation[J]. Optik(Stuttgart), 2019(194):162975.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] POURSAFAR J, KOLAHDOUZ M, Asl-Soleimani E, et al. Ultrathin tandem-plasmonic photovoltaic structures for synergistically enhanced light absorption[J]. *RSC Advances*, 2016,6(60):55354–55359.
- [13] JOOSHESH A, SMITH L, Masnadi-Shirazi M, et al. Nanoplasmonics enhanced terahertz sources[J]. *Optics Express*, 2014,22(23):27992.
- [14] PARK S, JIN K H, YI M, et al. Enhancement of terahertz pulse emission by optical nanoantenna[J]. *ACS Nano*, 2012,6(3):2026–2031.
- [15] PARK S G, CHOI Y, OH Y J, et al. Terahertz photoconductive antenna with metal nanoislands[J]. *Opt Express*, 2012,20(23):25530–25535.
- [16] LEE Y. *Principles of terahertz science and technology*[M]. New York, NY: Springer-Verlag, 2009.
- [17] HUANG Y. Terahertz photoconductive antenna efficiency[J]. *International Workshop on Antenna Technology (IWAT)*, 2011:152–156.
- [18] 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]// *Bellingham, Wash, USA: SPIE*, 2006:6194.
- [19] 刘娟, 张照云, 李寅鑫, 等. 大间隙GaAs光导天线的太赫兹辐射频谱特性[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2011,9(3):325–329. (LIU Juan, ZHANG Zhaoyun, LI Yinxin, et al. Terahertz radiation spectrum characteristics of large gap GaAs photoconductive antenna[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2011,9(3):325–329.)
- [20] 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):38–42. (SHANG Liping, XIA Zuxue, LIAO Xiaochun, et al. Effect of structure and parameters of THz small aperture photoconductive antenna on gain[J]. *Infrared*, 2011,32(2):38–42.)

作者简介:

刘乐福(1997–), 男, 河南省信阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为半导体器件与 THz 源.
email:1875686226@qq.com.

陆叶(1987–), 男, 南宁市人, 主要研究方向为光通信技术与 OCDMA 编解码.