

文章编号: 2095-4980(2021)04-0652-08

基于微纳结构太赫兹光电导天线辐射特性研究

蒋 锐, 李全勇*, 程 爽, 王奇书, 辛胤杰

(长春理工大学 光电工程学院光电工程国家级实验教学示范中心, 吉林 长春 130022)

摘 要: 光电导天线(PCA)作为常用的太赫兹发射器件, 如何提高其辐射效率, 成为国内外研究人员研究的重点。通过时域有限差分法对 PCA 辐射效率进行研究, 在光敏层表面加入柱状结构, 使更多的光被捕获到光敏层, 模拟结果表明该结构具有显著增强辐射效率的作用。通过对比材料、柱状形状对增强效果的影响, 结果表明, 在同一种柱状结构下, 银材料的 PCA、金材料的 PCA、砷化镓材料的 PCA 的增强效果依次降低; 同一材料下, 带有正六棱柱结构、圆柱形结构、正四棱柱结构的光 PCA 的增强效果依次降低。通过材料与结构的最佳组合, 最高的增强效率为传统 PCA 的 1 100%, 最低的增强效率为传统 PCA 的 150%。

关键词: 太赫兹; 光电导天线; 时域有限差分法; 微纳结构; 低温砷化镓(LT-GaAs)

中图分类号: TN383

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020639

Research on radiation characteristics of terahertz photoconductive antenna based on micro-nano structure

JIANG Rui, LI Quanyong*, CHENG Shuang, WANG Qishu, XIN Yinjie

(Key Laboratory of Optoelectric Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin 130022, China)

Abstract: Photo-Conductive Antenna(PCA) is a commonly used terahertz transmitting device. How to improve the radiation efficiency of PCA has become the research focus of domestic and foreign researchers. In this paper, the radiation efficiency of the PCA is studied by using the Finite Difference Time Domain(FDTD) method. The columnar structure is added to the surface of the photosensitive layer, so that more light is captured in the photosensitive layer. The simulation results show that the structure can significantly enhance the radiation efficiency. By comparing the enhancement effects of materials and columnar shapes, the results show that the enhancement effects of the PCA of silver material, gold material, and gallium arsenide material sequentially decrease in the same columnar structure; in the same material, the enhancement effects of the PCA with the regular hexagonal prism structure, the cylindrical structure, and the regular quadrangular prism structure decrease sequentially. Through the optimal combination of materials and structures, the highest and the lowest enhancement efficiencies are respectively 1 100% and 150% that of the traditional PCA.

Keywords: terahertz; photoconductive antenna; Finite Difference Time Domain; micro-nano structure; Low Temperature GaAs(LT-GaAs)

太赫兹波是指频率在 0.1~10 THz(波长为 30~3 000 μm)之间的电磁波, 介于微波与红外之间的电磁波区域, 具有低能安全性、穿透性强、很强的光谱分辨能力等一些独特的特性, 太赫兹技术常被应用在高速无线通信、医学成像、遥感技术、安全扫描等许多领域。光电导天线(PCA)是目前常用的太赫兹波产生器件, 其太赫兹的

收稿日期: 2020-11-22; 修回日期: 2021-01-09

基金项目: 吉林省科技资源开放共享服务平台与科研条件保障资助项目(20191004022TC)

*通信作者: 李全勇 email:liquanyong@cust.edu.cn

产生原理^[1]如图 1 所示,当飞秒激光脉冲照射在两电极之间的光敏材料上,使得光敏层中电子进行跃迁,从而产生自由载流子(电子-空穴对),这些自由载流子在外加偏置电场的作用下,进行加速运动,形成瞬态光电流,同时向外辐射电磁波,且该电磁波的频率处于太赫兹波段^[2]。但由于太赫兹光电导天线的辐射效率很低,如何提高光电导天线的太赫兹辐射效率问题成为了国内外研究人员的研究重点。随着半导体材料的发展,半绝缘砷化镓(SI-GaAs)、石墨烯、蓝宝石上生长的硅等被用作光敏材料^[3-7],然而低温砷化镓(Low-Temperature-grown GaAs, LT-GaAs)有着其他材料无法比拟的优点,如适合与商用的 800 nm 激光配合使用,800 nm 的激光恰好满足 LT-GaAs 的带隙跃迁所需的频率,使得价带电子跃迁到导带产生自由载流子,参与到 PCA 辐射太赫兹波的过程中;制造技术比较成熟;载流子寿命较短;电阻率较低;具有很低的生产成本等优势。使得 LT-GaAs 作为主流的光敏材料被大规模使用在 PCA 的制作中。

随着等离子体结构^[8-21]的迅猛发展,科研人员发现将其应用在增强 PCA 的辐射效率上,可获得较好的增强效果。等离子体结构的使用可以在 PCA 两电极间的光敏层产生电场增强,电磁增强(Electromagnetic Enhancement, EM)源自金属颗粒中表面等离激元的集体振动所产生的局部电场。局部表面等离激元共振(Local Surface Plasmon Resonance, LSPR)可以大大增加在金属颗粒之间的间隙中形成的“热点”处的局部电磁场(Electro-Magnetic Fields, EMF),沿着金属/电介质界面传播的表面等离激元(Surface Plasmon Polariton, SPP)也可以增强 EMF。在特定结构中也观察到 LSPR 和 SPP 之间的耦合效应,如纳米盘阵列^[9,11-12]、纳米柱阵列^[14,16,19]等。等离子体结构的引入主要有两个作用^[12]: 1) 减少光敏层表面的反射; 2) 将激光捕获在光敏层,使得 PCA 结构有着更多的光吸收,更多的光吸收意味着更高的光电流,从而导致更多的 THz 波产生^[11]。即通过等离子体结构提高了光的利用率(光电转换效率),进而提高了天线的辐射效率。

本文选用 LT-GaAs 作为光敏层基底材料,选用 800 nm 飞秒激光作为光源,使用时域有限差分法对纳米柱状结构进行了数值模拟,通过求解不同柱状结构的纳米等离子体结构,并以光电流作为参考标准,对传统光电导天线(Conventional Photo Conductive Antenna, C-PCA)与带有不同柱状纳米等离子结构的 PCA 进行对比,得出了不同等离子体结构的增强效果,并进行了定性分析,总结了不同等离子柱状结构的增强规律。又对柱状结构的材料进行了分析与总结。仿真结果表明,在材料上:选用银材料的等离子柱状结构明显优于金材料的等离子结构,优于与光敏层同种材料的柱状结构。在结构上:正六棱柱结构优于圆柱结构,正四棱柱结构是增强效果最弱的结构,但相对于传统的光电导天线仍具有明显的增强效果。在上述的三种柱状结构的条件下,若想获得最优的天线效率,应选用银材料和正六棱柱的等离子结构这种组合。

1 结构设计与仿真原理

传统的 PCA 结构图与添加的微纳结构的 PCA 结构图分别如图 2(a)和图 2(b)~图 2(d)所示,从图 2(a)可以看出传统的 PCA,使得光直接照射到光敏层基底中,但由于其表面光滑使得较多的光被反射,使得较少的光进入光敏层中。为了使得更多的光被捕获到光敏层表面微纳结构中,表面微纳结构选用与光敏层相同的材料(LT-GaAs)。为了研究不同的柱状结构对光捕获的影响,选取了特殊的几种柱状结构如图 2(b)~图 2(d),分别为正六棱柱结构、圆柱状结构、正四棱柱结构,并保证这三种结构在 xoy 平面的截面具有同一尺寸的外接圆。

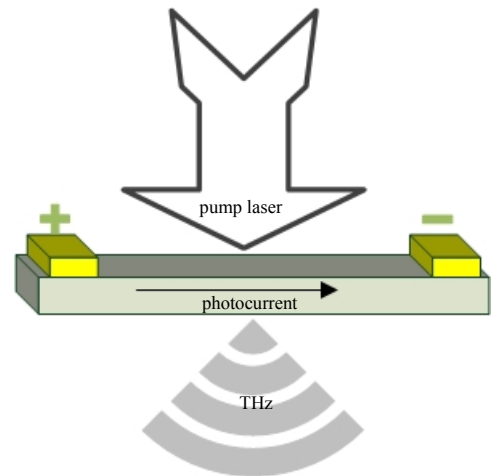


Fig.1 Schematic diagram of photoconductive antenna
图 1 光电导天线原理简图

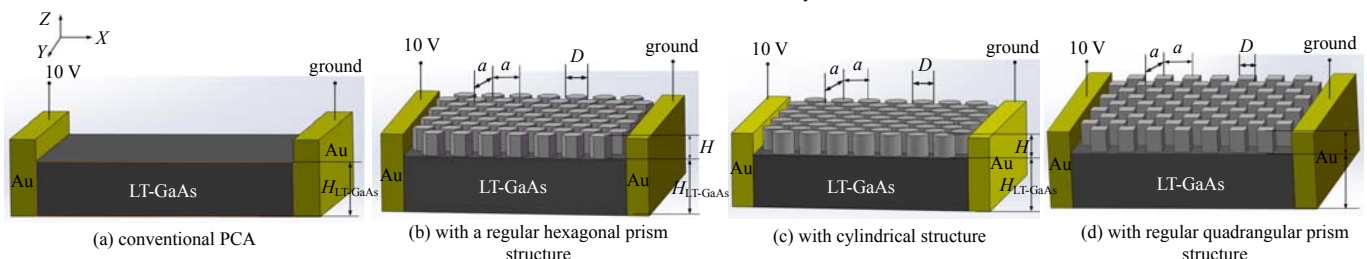


Fig.2 Schematic diagram of PCAs
图 2 多种 PCA 的结构示意图

两个金属电极材料为金，且两电极间的距离为 $2\ \mu\text{m}$ 。柱状结构位于两电极间，置于光敏层上方。通过时域有限差分法来求解半导体问题，为了研究不同柱状结构对光电导天线的辐射效率的影响，采用了 $800\ \text{nm}$ 的 TM 模式激光进行垂直照射，激光脉冲宽度为 $120\ \text{fs}$ ，重复频率为 $75\ \text{MHz}$ ，两电极间采用 $10\ \text{V}$ 的外加偏置电压，模拟时为了保证柱状结构对光的吸收是由于结构间的作用而不是来自反射，需要设置边界条件为完全吸收层。其他参数如表 1 所示。

表 1 仿真所需的材料特性
Table 1 Material and simulation parameters

material	permittivity	DC bias voltage/V	intrinsic concentration/cm ³	temperature/K	refractive index of LT-GaAs	N-type doping/cm ³	carrier lifetime/ps	mobility/(cm ² ·V ⁻¹ ·s ⁻¹)
LT-GaAs	12.9	10	2.1×10^6	300	$3.679 + 0.063i$	1×10^{16}	electron:0.1, hole:0.4	electron:400, hole:100

1.1 时域有限差分法(FDTD)

传统的 FDTD 为了计算空间的电磁辐射问题，常常以入射波的形式将激励源加入到 FDTD 的迭代中，在对太赫兹电磁辐射的模拟时，由于激光脉冲的作用半导体内部将会产生瞬态电流，将半导体中产生的这种瞬态电流以电流源的形式加入到 FDTD 的迭代中，实现太赫兹半导体理论与 FDTD 方法相结合。导体中的电子和空穴对电流的贡献起主要作用，考虑半导体材料磁导率为 0，因而可以将麦克斯韦方程变换为：

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}_n + \vec{J}_p \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

式中： \vec{J}_n, \vec{J}_p 分别为半导体中电子和空穴运动所形成的电流，包括漂移和扩散电流。

在太赫兹辐射仿真计算时，由于载流子浓度、载流子电流、空间电势的存在，在空间的排布上必须对 FDTD 中电场和磁场的空间 Yee 元胞进行修正使其能够适合太赫兹仿真计算，同时依然满足 \vec{E} 和 \vec{H} 场分量取样节点在空间和时间上交替排布，使得每一个 $\vec{E}(\vec{H})$ 场分量周围有四个场分量环绕。根据欧姆定律 $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ ，半导体中的电流分量应该与电场分量在同一空间节点，因为电流的变化会引起半导体中电子和空穴浓度的变化，所以电子和空穴在空间网格上应与电流密度相差 0.5 个网格，而根据泊松方程，空间上的电势应该与半导体中的电子和空穴在同一空间节点。可以得到半导体空间 Yee 元胞，如图 3 所示。而对自由空间的 FDTD 计算，依然采用经典的 Yee 元胞。根据麦克斯韦方程，在计算 THz-PCA 电磁辐射时，需要计算得到半导体中电子和空穴所形成的电流，且考虑偏置电压对载流子电流的影响，可得出：

$$\vec{J}_n = q\mu_n n (\vec{E} + \vec{E}_{dc}) + qD_n \nabla n \quad (3)$$

$$\vec{J}_p = q\mu_p p (\vec{E} + \vec{E}_{dc}) - qD_p \nabla p \quad (4)$$

式中： μ_n 和 μ_p 分别为电子和空穴迁移率； n 和 p 分别为电子和空穴密度； D_n 和 D_p 分别为电子和空穴的扩散系数； $\vec{E}_{dc} = -\nabla \phi$ ； \vec{E}_{dc} 为半导体内部的静电场； ϕ 为静电势。

通过将麦克斯韦波动方程与漂移扩散/泊松方程相结合来研究结构的电学和光学特性。在模拟过程中，通过求解麦克斯韦方程，计算光学响应：

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times \vec{E}) - k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{j\lambda\sigma}{2\pi c\epsilon_0} \right) \vec{E} = 0 \quad (5)$$

式中： ϵ_r, μ_r 分别为相对介电常数、磁导率； σ 为电导率； k_0 和 ϵ_0 是自由空间的传播常数和介电常数； λ 是激发波长； c 是真空中光速； \vec{E} 是复数形式的电场强度矢量； j 为虚数单位。可以通过式(5)求得仿真域各点的电场分布。求解麦克斯韦方程组得到总的功率通量密度：

$$p_s(x, y, z) = \left(|p_{ox}(x, y, z)|^2 + |p_{oy}(x, y, z)|^2 + |p_{oz}(x, y, z)|^2 \right) \quad (6)$$

$$p_{ox}(x, y, z) = \frac{1}{2\eta} \text{Re} \left(|E_y|^2 - |E_z|^2 \right) \quad (7)$$

$$p_{oy}(x, y, z) = \frac{1}{2\eta} \text{Re} \left(|E_z|^2 - |E_x|^2 \right) \quad (8)$$

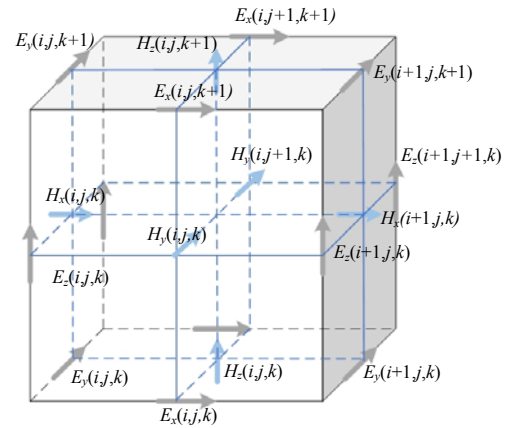


Fig.3 Yee cells in semiconductors
图 3 半导体中的 Yee 元胞

$$p_{oz}(x, y, z) = \frac{1}{2\eta} \operatorname{Re}(|E_x|^2 - |E_y|^2) \quad (9)$$

式中 η 为与材料相关的复合波阻抗。与时间相关的载流子密度为^[12]：

$$G(x, y, z, t) = (4\pi k_{pc} / hc) p_s(x, y, z) \exp\left(4\ln(0.5) \frac{(t-t_0)^2}{D_t^2}\right) \quad (10)$$

式中： k_{pc} 为折射率的虚部； c 为光速； D_t 为激光脉冲持续时间； h 为普朗克常量。

1.2 光栅耦合表面等离子极化激元理论^[22]

对于 TM 模式而言，沿着两个半空间的交界面上传输的表面等离子极化激元模式的色散关系为^[12]：

$$\beta = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}} \quad (11)$$

式中： ε_1 和 ε_2 为交界面两个半空间的介电常数。

同理，对 TE 模式进行分析，考虑 H_x 和 E_y 在交界面方向上的连续性，则得出 $A_1(k_1 + k_2) = 0$ ，由于表面约束条件的要求 $R_e[k_1] > 0$ 和 $R_e[k_2] > 0$ ，则只有在 $A_1 = 0$ 时满足条件，同理导出 $A_2 = A_1 = 0$ 。因此没有 TE 偏振模式的表面波存在，即只有 TM 偏振模式才可能存在表面等离子极化激元模式。由于表面等离子极化激元的传播常数 β 大于光在介质中的波矢 k ，所以其被束缚在界面附近，而且在传播时会在界面两侧发生衰减。

本论文采取の入射光为 800 nm TM 模式高斯光，其电场分布为^[13,16]：

$$E(x, y) = E_0 \frac{W_0}{W(y)} e^{-\left(\frac{x}{W(y)}\right)^2} \cos\left(-ky - k \frac{x^2}{2R(y)} + \eta(y)\right) \hat{Z} \quad (12)$$

$$W(y) = W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{y}{Y_R}\right)^2} \quad (13)$$

$$R(y) = y \left[1 + \left(\frac{Y_R}{y}\right)^2 \right]^2 \quad (14)$$

$$\eta(y) = \frac{1}{2} a \tan\left(\frac{y}{Y_R}\right) \quad (15)$$

$$Y_R = \left(\frac{\pi W_0^2}{\lambda}\right) \quad (16)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (17)$$

式中： x 是到光束方向的距离； y 是到光束焦点(腰)的轴向距离； k 是波长 λ 的波数； E_0 是在时间原点的电场振幅； W_y 是振幅下降到其轴向值的 $1/e$ 时，沿光束的平面 y 上的半径； W_0 是束腰尺寸； $R(y)$ 是在 y 处光束的波前曲率半径； $\eta(y)$ 是 y 处的古依(Gouy)相位。

1.3 漂移扩散理论

在半导体中，因为电子和空穴运动都可以形成电流，其电流密度就是单位时间内通过单位面积的电子和空穴电荷总数，所以总漂移电流密度是电子漂移与空穴漂移电流之和，在已知载流子浓度及其漂移速率的条件下，其半导体中电子和空穴所形成的漂移电流可以表示为：

$$\vec{J}_{\text{drif}} = \vec{J}_{\text{drif}}^n + \vec{J}_{\text{drif}}^p = q(\mu_n n + \mu_p p) \vec{E} \quad (18)$$

扩散电流是由于载流子浓度随位置变化引起的。可动粒子从浓度高的区域向浓度低的区域移动的过程中，由于电子和空穴带有电荷，电子和空穴分布不均匀所导致的扩散运动形成的电流即扩散电流。

对应的三维空间的半导体扩散电流可以表示为：

$$J_{\text{dif}}^n = q D_n \nabla n \quad (19)$$

$$J_{\text{dif}}^p = -q D_p \nabla p \quad (20)$$

因此半导体中会产生四种相互独立的电流，分别为电子的漂移电流和电子扩散电流，空穴的漂移电流和空穴的扩散电流。半导体中的电子总密度和空穴总密度分别为：

$$\vec{J}_n = q\mu_n n \vec{E} + qD_n \nabla n \quad (21)$$

$$\vec{J}_p = q\mu_p p \vec{E} - qD_p \nabla p \quad (22)$$

其总电流密度为^[15]:

$$\vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_p = q(\mu_n n + \mu_p p) \vec{E} + qD_n \nabla n - qD_p \nabla p \quad (23)$$

电流密度同电场一样是评估太赫兹辐射效率的指标, 且与电场呈正相关性。即电场越强, 相对应的电流密度越强, 太赫兹辐射效率越高。

2 结果分析

为了获得较好的吸收效率, 以吸收率为指标对圆柱状结构进行初步模拟优化, 并将该组参数指标推广到其余两种柱状结构中, 使得柱状结构在 xoy 平面内以正三角形方式排列, 即任意三个距离最近的柱状结构中心恰好处于正三角形的三个顶点处, 三角形的边长即为柱状结构的结构周期, 且结构周期 a 固定为 118 nm。保证柱状结构的高度(厚度)与电极厚度 H 相一致, 其数值为 159 nm, 圆柱直径 D 为 89 nm。为了使光更多地被光敏层吸收, 在光敏层表面设计了几种柱状结构, 使光被捕获到结构中, 相对于传统的 PCA, 更多的光子参与太赫兹的激发中, 如图 4 所示, 可以看出柱状结构的吸收作用体现在电场的增强方面。更多的光被光敏层半导体吸收, 进而产生更多的光子, 光敏层表面的电场相对于 C-PCA 有增强的效果。图 4 中可以看出, 电场的增强基本在柱状结构的边缘位置及柱状结构之间的空隙位置。表明这几种柱状结构达到了使得光被束缚在光敏层表面的目的。分析各个柱状结构形状对增强效果的作用, 从图中可以看出, 带有圆柱状结构的 PCA 电场增强效果比带有正六棱柱状结构的 PCA 略高。正六棱柱状结构的 PCA 所增强的电场明显高于带有正四棱柱状结构的 PCA。尽管增强效果最弱的带有正四棱柱状结构的 PCA, 其电场强度也明显高于传统的 PCA。

为了探究电场的增强效果是否与实际相一致, 对载流子的产生速率进行数值计算, 其结果如图 5 所示, 从图 5 中可以看出, 随着光被柱状结构所捕获, 更多的光被光敏层吸收, 产生了更多的电子空穴对, 各个柱状结构间的增强规律大致与电场增强效果相一致。即载流子的产生速率规律为: 带有圆柱状的 PCA 微高于带有正六棱柱状结构的 PCA; 带有正四棱柱状结构的 PCA 的载流子产生速率最低, 但相对于传统的 PCA, 带有正四棱柱状结构的 PCA 载流子产生速率也相对较高。更多的载流子表明, 在外加偏置电压下, 向两电极运动的载流子越多, 通过载流子的不断产生与复合, 可使得更多的太赫兹波被产生, 从原理上提高光-THz 的转换效率。

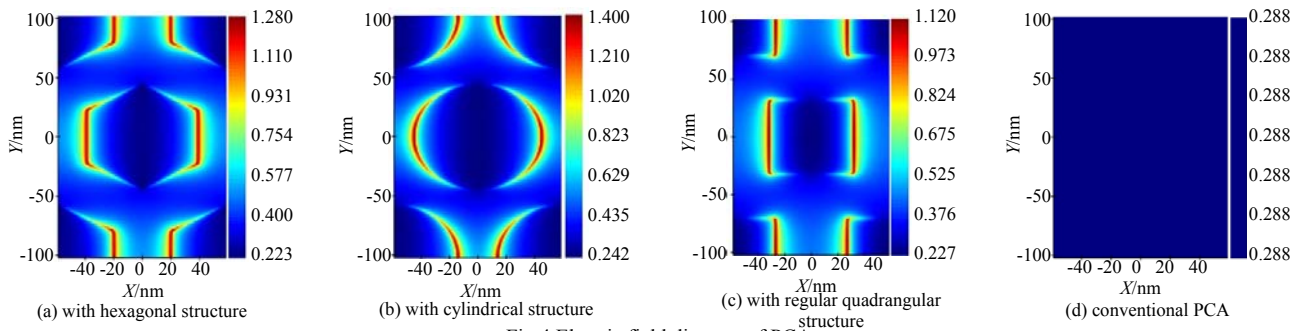


Fig.4 Electric field diagram of PCA

图 4 PCA 的电场图

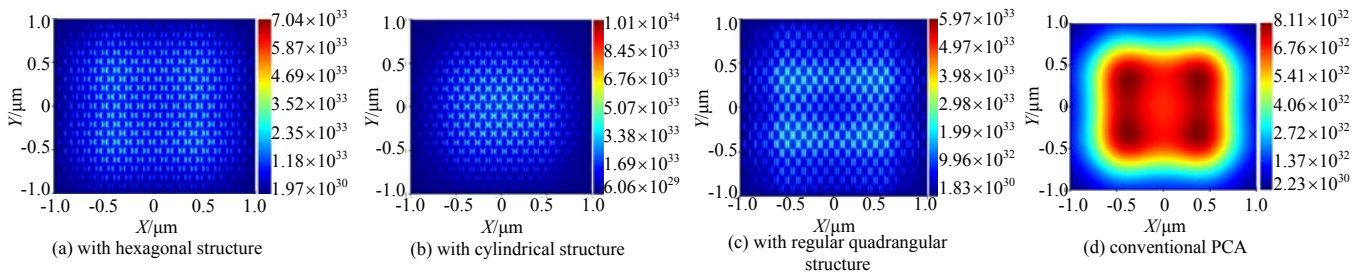


Fig.5 Carrier generation rate of PCA

图 5 PCA 载流子产生速率

为了更加直观地观测到带有不同柱状结构的 PCA 对太赫兹辐射效率的增强作用, 模拟其在外加偏置 10 V 电压作用下, 通过载流子的运动产生表面电流。如图 6 所示, 可以看出随着偏置电压的增加, 电流的强度随之增大, 且在 10 V 时达到最大值, 在 10 V 的工作电压下, 带有各个柱状结构的 PCA 电流曲线差异不大, 重合度

较高，但带有这三种柱状结构的 PCA 相对于传统的 PCA，有着明显的增强效果，大约增强了 150%。可以观察到电流的增强作用与载流子的产生速率不太一致，由于载流子的屏蔽效应所致，虽然圆柱状结构的载流子产生速率很高，可是在外部电场的作用下，当大量的电子空穴对相互分离时，会减小偏置电场。体现在宏观是观测到光电流变小，太赫兹辐射效率降低。

为了使得更多的光子被捕获到光敏层基底中，将砷化镓的柱状结构换成两种常用贵金属材料，使得金属柱状结构间的局部表面等离子体激元共振(LSPR)和沿着金属/电介质界面传播的表面等离子体激元(SPP)进行了耦合，从而极大提高了载流子的产生速率，进一步影响太赫兹的辐射效率。同分析柱状结构的方法类似，为了获得最终的光电流，必须对载流子的产生速率进行数值计算，其结果如图 7 所示，在相同的柱状结构下，当柱状结构材料为银时，其载流子的产生速率高于材料为金时，金材料的产生速率明显高于砷化镓(图 5(a)~(c))和传统 PCA(图 5(d))。且在数值上，当材料为金属时，其载流子产生速率相对于材料为砷化镓时，提高了 100 倍以上，充分证明了随着等离子纳米结构的加入，极大提高了光子的产生，进而使得载流子产生速率具有显著的提高。

如图 8 所示，可以观察到银材料的电流强度，无论是哪种柱状结构，在整体上都优于金材料的(由于银的电导率比金高，会获得更多的电场增强效果)，且在两种贵金属的材料下，无论是哪种柱状结构其电流都远远高于材料为砷化镓下的各个柱状结构。即在金银两种贵金属材料下的带有柱状结构的 PCA 具有很强的太赫兹辐射效率。在同一种柱状结构下，可以观察到银材料、金材料以及砷化镓材料的电流是逐次降低的，可即便是最低的砷化镓材料也总是比常规的 PCA 具有明显的辐射增强效果。

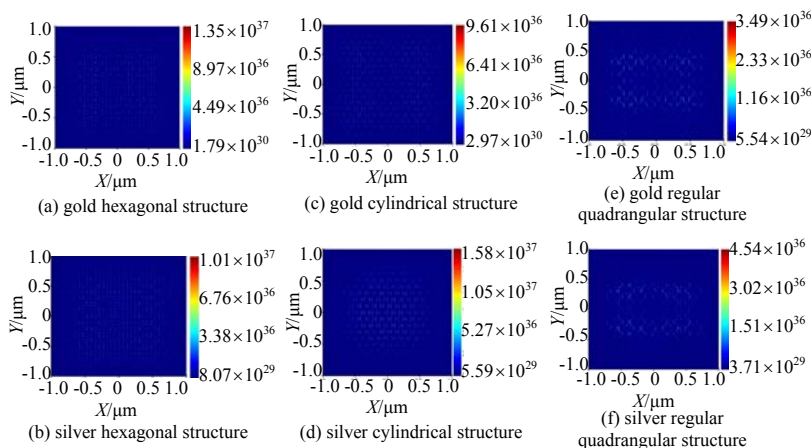


Fig.7 Carrier generation rate of PCA with different structures
图 7 不同结构 PCA 的载流子产生速率

3 结论

在两电极间，激光照射的光敏层区域上增加微纳结构，可以使得更多的光被捕获到结构中，从而进一步使得更多的光子入射到光敏层中，从而获得更多载流子，这些载流子在外加电场的作用下，加速运动形成表面电流，更多载流子的复合向外产生电磁波，从而提高了光电导天线的辐射效率。当微纳结构材料变成金属时，金属微纳柱状结构与半导体光敏层，会使得局域表面等离子体激元共振，可极大地增加金属柱状结构间隙处的局域电磁场，同时沿着金属纳米柱状结构与光敏层表面分界面，存在的表面等离子体激元也会增强局域电磁场。在 LSPR 和 SPP 之间的耦合作用下，金属微纳柱状结构的增强作用比普通的微纳结构(砷化镓的柱状结构)更加显著，且通过在同种材料下对比不同的柱状结构，发现带有正六棱柱形结构的 PCA 的光电流高于带有圆柱形结构的 PCA，且以上这两种柱状结构的电流都高于带有正四棱柱状结构的 PCA，带有微纳结构的 PCA 比传统的 PCA 具有更强的太赫兹辐射效率；在同一柱状结构下，对不同的材料进行数值计算，可知当材料为银时，其辐射效率优于材料为金时，且这两种金属材料下的柱状微纳结构的辐射效率都比材料为砷化镓时具有极其明显的提升。若想要获得较高的太赫兹辐射效率，根据模拟结果，推荐材料为银时，且结构为正六棱柱状的微纳结

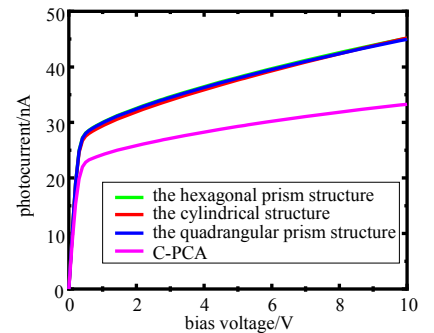


Fig.6 Photocurrent diagram under different columnar structures
图 6 不同柱状结构下的电流图

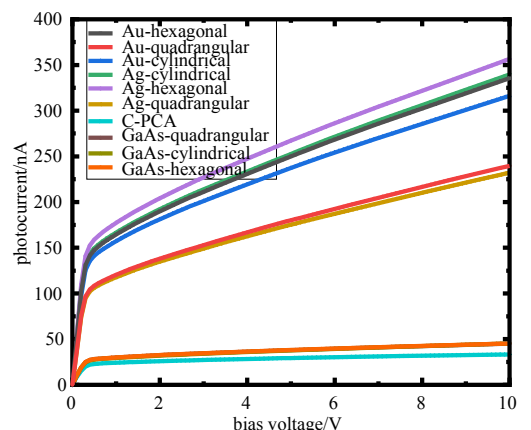


Fig.8 Effects of various materials and columnar structure combinations on photocurrent under different bias voltages
图 8 不同偏置电压下，各个材料及柱状结构的组合对光电流的影响

构。在这种搭配下,相对于传统的光电导天线,光电流的增强效率大概提升了 1 100%。仿真表明,在光敏层加入柱状结构可以捕获更多的光,参与到光-THz 的转换中,特别是,当柱状结构为金属时,金属柱状结构间及金属柱状结构与光敏层半导体间的等离子体激元会极大提升光电导天线的辐射效率,对光电导天线的转换效率的研究具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 闫兴伟,魏志强,李春化. 光电导天线太赫兹波辐射特性研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(6):870-876. (YAN Xingwei,WEI Zhiqiang,LI Chunhua. Progress on the terahertz wave radiation properties of photoconductive antenna[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(6):870-876.)
- [2] PARK Sang-Gil,JIN Kyong Hwan,YI Minwoo,et al. Enhancement of terahertz pulse emission by optical nanoantenna[J]. *Acs Nano*, 2012,6(3):2026-2031.
- [3] MASAHIKO Tani, SHUJI Matsuura, KIYOMI Sakai,et al. Emission characteristics of photoconductive antennas based on low-temperature-grown GaAs and semi-insulating GaAs[J]. *Applied Optics*, 1997,36(30):7853-7859.
- [4] NISSIYAH G J,MADHAN M G. A narrow spectrum terahertz emitter based on graphene photoconductive antenna[J]. *Plasmonics*, 2019,14:2003-2011.
- [5] CORREAS-SERRANO D,GOMEZ-DIAZ J S. Graphene-based antennas for terahertz systems: a review[C]// Forum for Electromagnetic Research Methods and Application Technologies(FERMAT). arXiv, 2017:1-26.
- [6] SAMAN Ghorbani,MOHAMMAD Bashirpour,JAFAR Poursafar,et al. Thin film tandem nanoplasmonic photoconductive antenna for high performance terahertz detection[J]. *Superlattices & Microstructures*, 2018,120:598-604.
- [7] 张继涛,陀明光,梁敏,等. 蝴蝶形的太赫兹辐射光电导天线(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2019,48(4):9-17. (ZHANG Jitao,TUO Mingguang,LIANG Min,et al. Terahertz radiation of a butterfly-shaped photoconductive antenna(invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019,48(4):9-17.)
- [8] PARK Sang-Gil,CHOI Yongje,OH Young-Jae,et al. Terahertz photoconductive antenna with metal nanoislands[J]. *Optics Express*, 2012,20(23):25530-25535.
- [9] BASHIRPOUR M,GHORBANI S,FOROUMZMEHR M,et al. Optical absorption enhancement in LTG-GaAs for efficiency improvement of THz photoconductive antennas[C]// Fourth International Conference on Millimeter-wave and Terahertz Technologies. Tehran,Iran:IEEE, 2016:14-16.
- [10] MOHAMMAD Bashirpour,MATIN Forouzmehr,SEYED Ehsan Hosseininejad,et al. Improvement of terahertz photoconductive antenna using optical antenna array of ZnO nanorods[J]. *Scientific Reports*, 2019,9:1-8.
- [11] MOHAMMAD Bashirpour,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.
- [12] MOHAMMAD Bashirpour,JAFAR Poursafar,MOHAMMADREZA Kolahdouz,et al. Terahertz radiation enhancement in dipole photoconductive antenna on LT-GaAs using a gold plasmonic nanodisk array[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019,120:1057261-1057266.
- [13] SAMAN Ghorbani,MOHAMMAD Bashirpour,MOHAMMAD Kolahdouz. Improving unbiased terahertz photoconductive antenna based on dissimilar Schottky barriers using plasmonic mode excitation[J]. *Optik*, 2019,194:162975.
- [14] JOOSHESH A,SMITH L,MASNADI-SHIRAZI M,et al. Nanoplasmonics enhanced terahertz sources[J]. *Optics Express*, 2014,22(23):27992-28001.
- [15] SERGEY Lepeshov,ANDREI Gorodetsky,Alexander Krasnok,et al. Boosting terahertz photoconductive antenna performance with optimised plasmonic nanostructures[J]. *Scientific Reports*, 2018,8(1):66241-66247.
- [16] BASHIRPOUR M,GHORBANI S,KOLAHDOUZ M,et al. Significant performance improvement of a terahertz photoconductive antenna using a hybrid structure[J]. *RSC Advances*, 2017,7(83):53010-53017.
- [17] OLEG Mitrofanov,IGAL Brener,TING Shan Luk. Photoconductive terahertz near-field detector with a hybrid nanoantenna array cavity[J]. *ACS Photonics*, 2015,2(12):1763-1768.
- [18] YARDIMCI N T,CAKMAKYAPAN S,HEMMATIV 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):41661-41668.
- [19] MING Xia,ZHANG Pei,KUAN Qiao,et al. Coupling SPP with LSPR for enhanced field confinement: a simulation study[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2016,120(1):527-533.
- [20] BURFORD N M,EL-SHENAWEE M O. Review of terahertz photoconductive antenna technology[J]. *Optical Engineering*, 2017,56(1):0109011-01090120.

- [21] POURSAFAR J, BASHIRPOUR M, KOLAHDOUZ M, et al. Ultrathin solar cells with Ag meta-material nanostructure for light absorption enhancement[J]. Solar Energy, 2018, 166(1):98-102.
- [22] MAIER Stefan A. Plasmonics: fundamentals and applications[M]. New York: Springer US, 2007.

作者简介:

蒋 锐(1991-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹光电导器件. email:2018100209@mails.cust.edu.cn.

李全勇(1977-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为太赫兹光电导器件研究.

程 爽(1995-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹时域光谱技术研究.

王奇书(1995-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹时域光谱技术研究.

辛胤杰(1995-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹时域光谱技术研究.

(上接第 651 页)

- [11] 周路, 王云华, 贾宝山, 等. GaAs 表面硫钝化工艺新研究[J]. 真空科学与技术学报, 2012(5):376-378. (ZHOU Lu, WANG Yunhua, JIA Baoshan, et al. Novel type of sulf-solution for GaAs surface passivation[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2012, 32(5):376-378.)
- [12] LLOYD-HUGHES J, MERCHANT S K E, LAN F, et al. Influence of surface passivation on ultrafast carrier dynamics and terahertz radiation generation in GaAs[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(23):232102.
- [13] 高冬美, 陆绮荣, 韦艳冰, 等. P 型 4H-SiC 少数载流子寿命的研究[J]. 中国测试, 2012, 38(1):19-21. (GAO Dongmei, LU Qirong, WEI Yanbing, et al. Study on minority carrier lifetime of P type 4H-SiC[J]. China Measurement & Testing Technology, 2012, 38(1):19-21.)
- [14] LEBEDEV M V, IKEDA K, NOGUCHI H, et al. Effect of surface treatment with different sulfide solutions on the ultrafast dynamics of photogenerated carriers in GaAs(100)[J]. Applied Surface Science, 2013, 267(2):185-188.
- [15] 田伟, 文岐业, 陈智, 等. 硅基全光宽带太赫兹幅度调制器的研究[J]. 物理学报, 2015(2):384-390. (TIAN Wei, WEN Qiye, CHEN Zhi, et al. Optically tuned wideband terahertz wave amplitude modulator based on gold-doped silicon[J]. Acta Physica Sinica, 2015(2):384-390.)
- [16] 夏宁, 方铨, 容天宇, 等. 表面硫钝化对 GaAs 材料光响应特性的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(6):92-97. (XIA Ning, FANG Xuan, RONG Tianyu, et al. Effects of surface sulfur passivation on photoresponse characteristics of GaAs materials[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6):92-97.)

作者简介:

王元圣(1995-), 男, 四川省达州市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹光控调制器. email:18708129313@163.com.

李宜磊(1991-), 男, 成都市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹磁光调制器.

杨青慧(1979-), 女, 辽宁省阜新市人, 教授, 博导, 主要研究方向为太赫兹波传输特性与磁光子晶体波导等.

何雨莲(1990-), 女, 四川省简阳市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹空间调制器.

锁易昕(1997-), 男, 石家庄市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹调控器件.

文岐业(1976-), 男, 桂林市人, 教授, 博导, 主要研究方向为太赫兹波传输与调控理论、太赫兹功能器件与系统应用等.