

叉指型 GaAs 光电导太赫兹辐射源性能及参数研究

张玉松, 施卫*, 李一凡, 侯磊, 李环林

(西安理工大学陕西省超快光电与太赫兹科学重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 优化光电导天线的基底材料与电极结构对提高其辐射太赫兹波性能至关重要。相比传统光电导天线(PCA), 叉指型光电导天线(IPCA)能够在较小光敏面积内构建多个阵元, 辐射性能更优越。文章设计并研制了6种具有不同阵元数目和电极间隙的IPCA, 通过金属层遮挡消除相邻电极间的反向电场, 对比了IPCA与传统PCA(平行电极天线和蝴蝶结天线)的辐射特性及偏振特性。进一步研究了IPCA的辐射特性随阵元数目、电极间隙、泵浦光能和偏置电场的变化。实验结果表明, 40阵元的IPCA相比于单个天线, 其THz脉冲辐射幅值提高了30倍。

关键词: 太赫兹辐射; 叉指光电导天线; 太赫兹时域光谱系统; 辐射源

中图分类号: O43

文献标识码: A

Research on the performance and parameters of interdigital GaAs photoconductive terahertz radiation source

ZHANG Yu-Song, SHI Wei*, LI Yi-Fan, HOU Lei, LI Huan-Lin

(Shaanxi Key Laboratory of Ultrafast Photoelectronic Technology and Terahertz Science, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Optimizing the base material and electrode structure of photoconductive antennas is crucial for enhancing their terahertz wave radiation performance. Compared with traditional photoconductive antennas (PCAs), the interdigital photoconductive antenna (IPCA) can accommodate multiple array elements within a smaller photosensitive area, leading to better radiation performance. This study designed and developed six types of IPCAs with varying numbers of array elements and electrode gaps. By introducing metal layer shielding to eliminate the reverse electric field between adjacent electrodes, the radiation and polarization characteristics of the IPCA were compared with those of traditional PCAs (parallel electrode and bowtie antennas). Furthermore, variations in the radiation characteristics of the IPCA with respect to the number of array elements, electrode gaps, pump light energy, and bias electric field were investigated. Experimental results show that the THz pulse radiation amplitude of a 40-array-element IPCA is 30 times higher than that of a single antenna.

Key words: terahertz radiation, interdigital photoconductive antenna, terahertz time domain spectroscopy system, radiation source

引言

太赫兹(Terahertz, THz), 其频率范围为0.1~10 THz, 波段位于微波和红外光波之间, 兼具光子学与电子学的特征与优势^[1-3]。自1984年D. H. Auston首次证实光电导天线(Photoconductive Antenna, PCA)可用于THz波产生与检测^[4]以来, 基于飞秒激光脉冲的THz辐射产生与检测技术已在环境监测、

生物医学、分子光谱学^[5-8]等重要领域获得广泛应用。在各类THz源与检测器中, PCA凭借其独特的

收稿日期: 2025-01-15, 录用日期: 2025-03-17

Received date: 2025-01-15, accepted date: 2025-03-17

基金项目: 国家自然科学基金(62371391, 62435020)、陕西省超快光电子技术太赫兹科学重点实验室(2018SZS-06)、西安市超快光电器件技术重点实验室(201805055ZD6-CG39)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (62371391, 62435020), the Key Laboratory of Ultrafast Optoelectronics Technology and Terahertz Science in Shaanxi (2018SZS-06), the Key Laboratory of Ultrafast Optoelectronic Devices Technology in Xi'an (201805055ZD6-CG39)

作者简介(Biography): 张玉松(1998—), 女, 山东济宁人, 博士研究生, 主要研究领域为太赫兹科学与技术. E-mail: z2200920066@163.com

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: swshi@mail.xaut.edu.cn

室温工作特性、较高稳定性的THz发射效率、有利于光纤耦合的特性、紧凑结构及宽带频谱特性优势^[9-14],已成为太赫兹时域光谱系统(Terahertz Time Domain Spectral System, THz-TDS)的核心器件。然而,尽管PCA具有诸多优点,但依旧存在泵浦飞秒激光功率利用不充分、光饱和效应等问题,极大地限制了其实际应用范围^[15]。PCA的性能主要取决于以下因素:基底材料、电极形状和天线结构等^[16],前人已在这些方面尝试了多种方法来提高PCA的辐射性能。除了采用不同的半导体材料外^[17-18],在天线结构设计方面,提出了多种方案,如偶极子天线、螺旋型天线、蝴蝶结天线及IPCA^[19-21]等,这些结构在一定程度上提高了THz辐射功率和效率。

叉指型光电导天线(Interdigital Photoconductive Antenna, IPCA)因其独特的大光敏面积和小电极间隙特性,已成为高性能THz源研究的重要方向。大光敏面积不仅可以充分利用泵浦光能,使光功率分散到更大的区域,从而降低光饱和效应,并减少THz脉冲产生过程中的衍射;小电极间隙在较低的偏置电压下产生高偏置电场,降低系统直流噪声并提升信噪比,从而有利于产生高功率THz辐射。然而,由于IPCA相邻阵元间的偏置电场方向相反,所产生的THz波会相互抵消,研究者们尝试了多种方法来消除反向电场。Toshiaki H^[22]等人在半绝缘GaAs衬底上制作了有金属层遮挡的大口径PCA辐射阵列,7个元件独立工作的时域波形的累加结果与同时工作的时域波形基本重合。M. Awa^[23]等人提出了一种基于LT-GaAs的IPCA,通过完全去除电极间的光电导材料来消除反向电场,阵列比单个元件的THz电场振幅增加了约30%。先前的这些研究已经证明,与偶极子天线或大孔径天线相比,叉指结构能显著提高辐射性能。然而,关于IPCA电极参数的研究多集中在电极间隙对辐射性能的影响上^[24-26]。

本文利用金属层遮挡消除天线叉指结构产生的反向电场,研究了不同电极尺寸参数下IPCA的辐射性能。首先,比较了蝴蝶结天线、平行电极天线(Parallel Electrode Photoconductive Antenna, PPCA)和IPCA的辐射性能及其偏振特性。然后,研究分析了在相同实验条件下,天线辐射性能随阵元数目和电极间隙的变化,以及辐射幅值随偏置电场和泵浦光能的变化。最后,比较了40阵元IPCA阵列与单个天线的辐射信号幅值。

1 IPCA和实验方法

基于THz-TDS对不同电极参数的IPCA进行测试,如图1所示。IPCA中,具有反向偏置电场的相邻电极间隙会发射相反极性的THz波,两者相互抵消,这会影响THz辐射强度。因此,为了防止反向电场的产生,将IPCA相隔一个电极间隙沉积一层金属层,其能够将泵浦光全反射,确保天线仅产生同相辐射,如图1(a)中的蓝色结构所示。同时在金属层和天线电极之间增加一层Si₃N₄绝缘涂层,如图1(a)中的灰色结构所示,Si₃N₄比传统的SiO₂具有更高的介电常数。天线的基底材料是采用分子束外延系统在(100)方向的半绝缘砷化镓(Semi-Insulating Gallium Arsenide, SI-GaAs)上生长的低温砷化镓(Low Temperature Gallium Arsenide, LT-GaAs)。通过电子束蒸发工艺将Ni/Au-Ge/Au按照一定比例沉淀在LT-GaAs上,并通过快速退火(Rapidthermal Annealing, RTA)将其合金化,通过精确控制RTA的时间和温度,AuGeNiAu合金电极与LT-GaAs衬底形成欧姆接触,IPCA实物图如图1(b~c)所示。本文研制了6个不同电极参数的IPCA,编号为A1~A6,见表1。其中A1~A4的电极间隙(G)、电极间距(D)、电极宽度(W)都相同,但阵元数目不同;A4~A6具有相同的电极间距(D),但电极间隙(G)不同,见表1。

THz-TDS所用激光器为钛蓝宝石激光器(Spectra-Physics, MaiTaiXF-1),波长为800 nm、脉宽为80 fs、重复频率为80 MHz,经过分束镜的飞秒激光分成两束,一路经过透镜聚焦到IPCA上,作为泵浦光激发产生THz波;当使用入射光脉冲照射PCA电极间隙时,PCA芯片光敏区域就会产生光生载流子。光生载流子在偏置电场的作用下加速运动,使得PCA向外辐射脉冲THz电磁波。另一路作为探测光,用于检测THz波。THz-TDS光路图如图1(d)所示。

2 结果与讨论

2.1 不同电极形状天线

为了更全面地评估IPCA的性能,在相同实验条件下,即泵浦光功率为280 mW、偏置电场为12 kV/cm,基于THz-TDS对不同电极形状的PCA进行了辐射性能测试,如图2所示。A4号IPCA的电极间隙为5 μm ,PPCA的电极间隙为150 μm (实物图见图2(a)插图);蝴蝶结天线的电极间隙为50 μm (实物

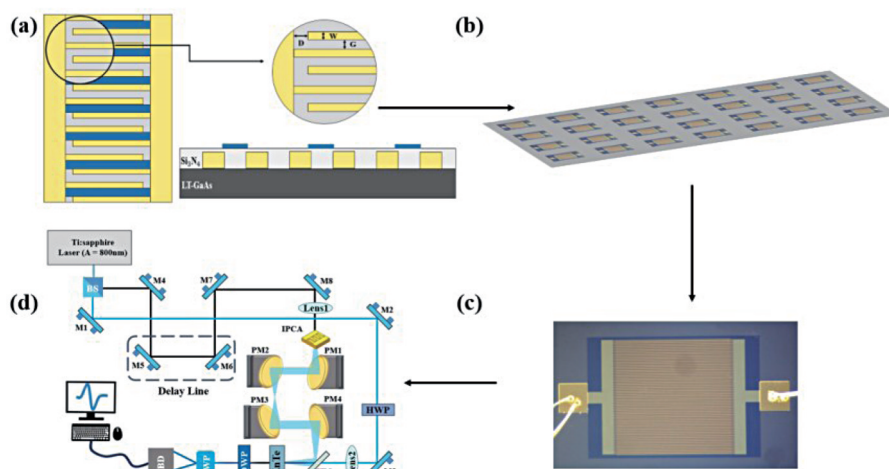


图1 基于THz-TDS的不同电极参数的IPCA测试示意图:(a)IPCA结构示意图;(b)IPCA加工晶圆示意图;(c)IPCA实物图;(d)THz-TDS光路图

Fig. 1 Schematic diagram of IPCA test of different electrode parameters based on THz-TDS: (a) schematic diagram of IPCA structure; (b) schematic diagram of IPCA processing wafer; (c) IPCA physical diagram; (d) THz-TDS optical path diagram

表1 6个不同结构参数的IPCA

Table 1 IPCA with 6 different structural parameters

天线编号	电极间距 $D/\mu\text{m}$	电极间隙 $G/\mu\text{m}$	电极宽度 $W/\mu\text{m}$	阵元数目
A1	50	5	5	15
A2	50	5	5	25
A3	50	5	5	50
A4	50	5	5	100
A5	50	10	5	65
A6	50	20	5	40

图见图2(b)插图)。实验结果表明,IPCA辐射强度优于传统结构,其THz时域信号幅值分别达到蝴蝶结天线的3.2倍和PPCA的1.6倍。根据电流瞬冲模型^[27],天线的远场辐射 $E_{\text{THz}}(t)$ 可以表示为,

$$E_{\text{THz}}(t) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{A}{z} \frac{\partial}{\partial t} J_s(t) \quad , \quad (1)$$

其中, A 为有效光敏面积, $J_s(t)$ 为表面电流密度, z 为场点到天线中心的距离。由公式(1)可知,天线的远场辐射与载流子密度变化率和天线面积成正比。尽管蝴蝶结天线和PPCA电极间隙远远大于IPCA,但其最佳辐射性能的实现依赖于泵浦光斑在电极间隙区域的精确聚焦,这导致实际光敏面积较小、光密度较高。IPCA采用交错电极结构,通过构建多个阵元扩大了有效光敏面积,从而产生更多的光生载流子。同时,该结构有效降低了光功率密度,延缓光饱和效应。

不同电极形状天线会有不同的偏振状态,为了分析它们的偏振特性,在THz-TDS光路中加入了THz偏振片,得到了两个正交方向上的THz波时域信号,根据公式(1)计算了三种天线的偏振度(Dependent Degree of Polarization, DOP)。其中, $I_{//}$

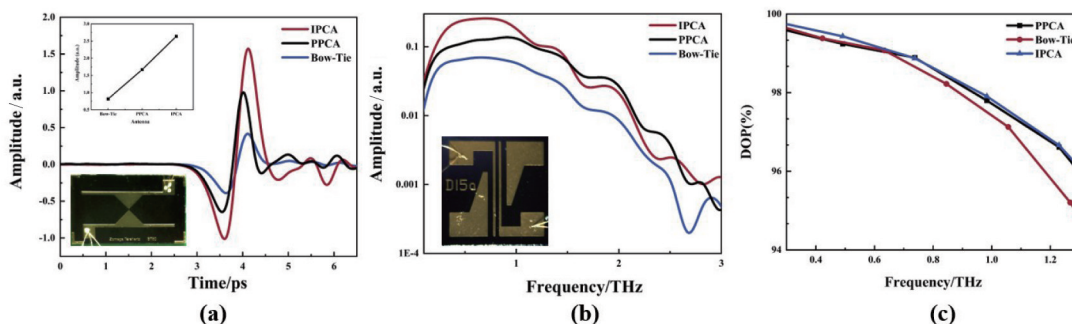


图2 不同电极形状的天线:(a)时域信号,插图为蝴蝶结天线实物图;(b)频域信号,插图为PPCA实物图;(c)偏振态
Fig. 2 Antennas with different electrode shapes: (a) time domain signals, the illustration shows the real picture of bowtie antenna; (b) frequency domain signals, the illustration shows the real picture of PPCA; (c) polarization state

和 I_{\perp} 分别是偏振片方向为平行和正交时的振幅, 结果如图 2(c) 所示。三种天线的 DOP 都比较高, 其中 IPCA 在 0.3~1.3THz 范围内均为 96% 以上。

$$DOP(f) = \frac{I_{\parallel}^2(f) - I_{\perp}^2(f)}{I_{\parallel}^2(f) + I_{\perp}^2(f)} * 100\% \quad (2)$$

2.2 不同电极参数的 IPCA

2.2.1 A1~A4 天线辐射特性

A1~A4 天线拥有相同的天线电极间隙, 阵元数目不同。在相同实验条件下, 即泵浦光功率为 320 mW、偏置电场为 12 kV/cm, 测试了 IPCA 辐射的 THz 波时域信号及其对应的频谱, 如图 3 所示。天线的远场辐射 E_{THz} 遵循公式 (3)^[22], 这里, A 是有效光敏面积, E_b 是施加的偏置电场。

$$E_{\text{THz}} \propto AE_b \quad (3)$$

在相同偏置电场的实验条件下, 光敏面积的增加能显著增强 THz 辐射强度, 实验结果证实了这一点。A4 天线优于 A1、A2 和 A3 天线, 其中 A4 的阵元数目是 A1 的 6.7 倍, 其辐射幅值约是 A1 的 35 倍。另外从图 3 可以得出, A4 天线辐射的 THz 信号的信噪比最高可达 10^4 以上。

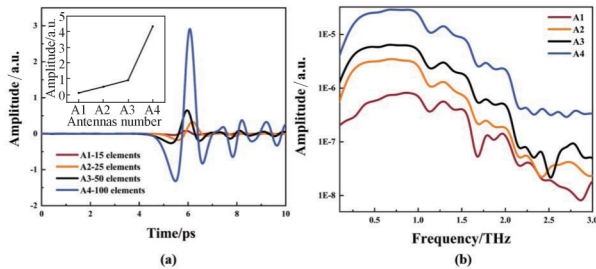


图 3 不同阵元数目的天线: (a) 时域信号; (b) 频域信号

Fig. 3 Antennas with different numbers of array elements: (a) time domain signals; (b) frequency domain signals

为了进一步对 IPCA 的辐射性能进行研究, 本文对 A1~A4 在不同泵浦光能和不同偏置电场下, 辐射的 THz 波时域信号幅值的变化曲线进行了分析, 如图 4 所示。四种天线在低泵浦光能时, 辐射幅值随入射光通量线性增加。通过计算曲线两点间的数值差, 获得辐射幅值随泵浦光功率及偏置电场变化的平均斜率。对于泵浦光能-辐射幅值的平均斜率, A1 天线为 0.005, A4 天线为 0.13, 即光能每升高 1 mW, 辐射幅值增加 0.13, 这一数值达到 A1 天线的 26 倍。对于偏置电场-辐射幅值平均斜率, A1 为 0.17, A4 为 2.4, 即偏置电场每升高 1 kV/cm, 辐射幅值增加 2.4, 这一数值达到 A1 的 14 倍。实验结果表

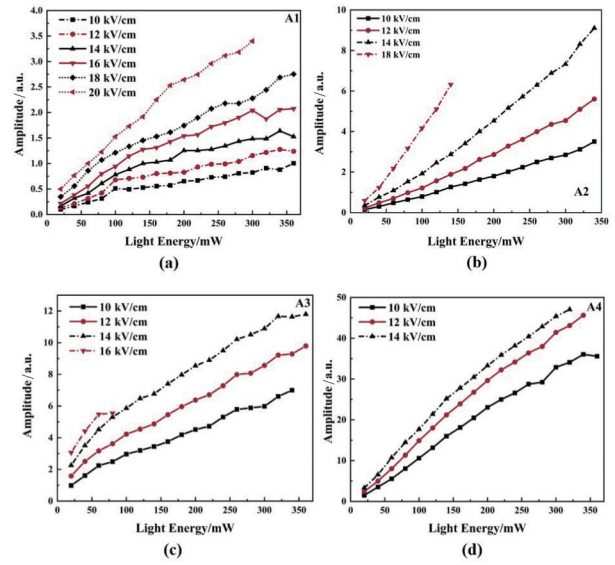


图 4 不同阵元数目的天线在不同偏置电场下辐射 THz 波幅值随泵浦光能的变化: (a) A1 天线; (b) A2 天线; (c) A3 天线; (d) A4 天线

Fig. 4 Changes in THz wave amplitude radiated by antennas with different array element numbers under different bias electric fields with pump light energy: (a) A1 antenna; (b) A2 antenna; (c) A3 antenna; (d) A4 antenna

明, 随着天线阵元数目的增加, 光能利用率得到有效提升, 天线辐射性能显著增强。在 A1~A4 天线各自能承受的最高偏置电场和泵浦光能下, A4 天线辐射强度最佳。

2.2.2 A4~A6 天线辐射性能

A4~A6 天线拥有不同电极间隙, 在相同实验条件下, 即泵浦光功率为 300 mW、偏置电场为 5 kV/cm, 测试结果如图 5 所示。从图中可以看出 A6 辐射强度优于 A4、A5 天线, A6 天线的信号幅值约为 A4 的 5.2 倍。对于三种不同间隙的 IPCA, 使用公式 (4)^[28] 计算三种天线的有效光敏面积 A , L_e 和 W_a 为天线金属电极区域的长度和宽度, L_e 、 W_e 和 N_e 为天线电极长度、宽度和电极数量。

$$A = (L_a W_a) - (N_e L_e W_e) \quad (4)$$

A4 为 3.03 mm^2 , A5 为 3.37 mm^2 , A6 为 3.61 mm^2 , 光敏面积的增加使得 A6 天线优于 A4、A5 天线, 进一步对比测试了 40 阵元的 A6-IPCA 与单只天线的时域波形。其中, 40 阵元 IPCA 天线阵列的每个阵元电极间隙为 $20 \mu\text{m}$, 电极长度为 2 mm; 单只天线的电极间隙为 $20 \mu\text{m}$, 电极长度为 3.5 mm。实验结果如图 5(c) 所示, 图中黑色曲线表示单个天线辐射的 THz 波时域信号, 红色曲线为单个天线时域信号放大 10 倍后的结果, 蓝色曲线则为 40 阵元 IPCA 的

时域信号。实验结果表明,阵列天线的时域信号幅值约为单个天线的30倍。

图6展示了A4~A6在不同泵浦光能和不同偏置电场条件下THz辐射强度的变化规律。随着天线电极间隙的增大,施加的电压阈值也相应提高。在泵浦光能-辐射幅值曲线中,A6天线的平均斜率为0.05,A4为0.13,其是A6天线的2.6倍,这主要归因于A4天线具有更多的阵元,从而降低了光密度,减缓了光饱和效应。在偏置电场-辐射幅值的曲线中,A6天线的平均斜率为3.64,A4天线的平均斜率为2.4,即A6是A4的1.5倍。这一差异主要源于A6天线具有更大的光敏面积,能够产生更多的光生载流子,这些载流子在偏置电场作用下加速运动,从而提升了辐射幅值。从图中可以看出,由于天线间隙不同,A4~A6天线能够承受的最高偏置电场也各不相同,A4为14 kV/cm,A5为10 kV/cm,A6为5 kV/cm,A4天线能达到的辐射强度最佳。

3 结论

本文研制了具有不同电极参数的IPCA,通过利

用金属层对入射光的反射作用有效消除反向电场,并基于THz-TDS系统对其进行了深入研究,主要研究结果如下:

(1)在相同实验条件下,IPCA辐射的THz波时域信号幅值达到蝴蝶结天线的3.2倍、PPCA的1.6倍;同时,IPCA在0.3~1.3 THz频率范围内的DOP值均保持在96%以上。

(2)在相同实验条件、相同电极间隙下,IPCA的辐射幅值随阵元数目的增加而显著增大,这主要归因于阵元数目对泵浦光能密度及光利用率的影响;在相同实验条件下,IPCA的辐射幅值亦随电极间隙的增大而提升,电极间隙主要影响载流子的传输距离及偏置电场的强度。其中,在天线各自的极限偏置电场和光能条件下,A4号IPCA(100阵元,电极间隙为5 μm)能达到的辐射性能最佳,其信噪比最高可达 10^4 。

(3)与单个元件相比,40阵元IPCA的辐射信号幅值提升了30倍。

通过优化电极结构,可以有效调控强辐射天线的性能,为高性能IPCA在新兴领域的应用奠定了重要基础。未来,IPCA有望在6G及更高通信系统中

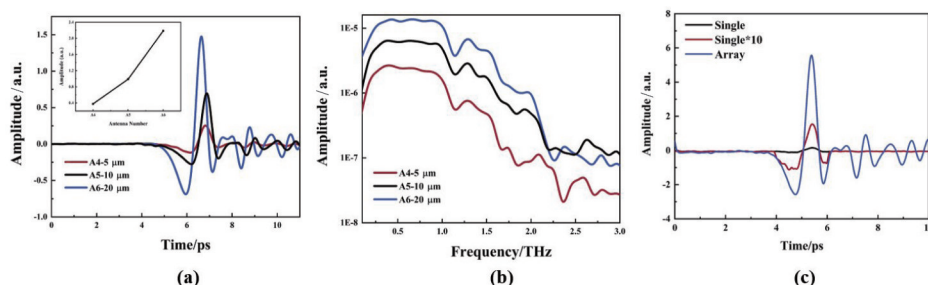


图5 不同电极间隙的天线:(a)时域信号;(b)频域信号;(c)单个天线和40阵元阵列的时域信号波形对比,以及单个元件时域信号波形放大10倍后的曲线

Fig. 5 Antennas with different electrode gaps: (a) time domain signals; (b) frequency domain signals; (c) comparison of time domain signal waveforms of a single antenna and a 40-element array, and the curve of time domain signal waveform of a single element amplified by 10 times

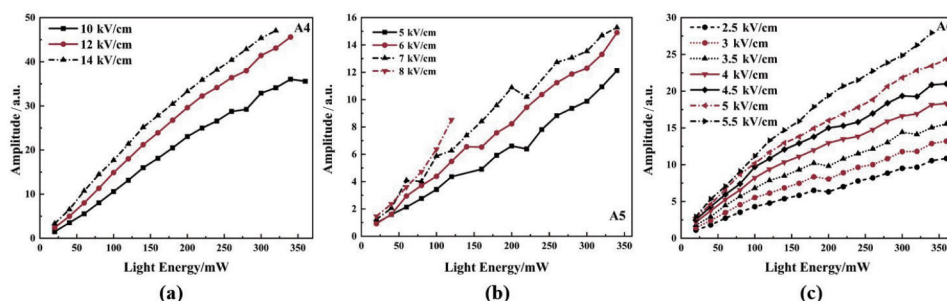


图6 不同电极间隙的IPCA在不同偏置电场下辐射THz波幅值随泵浦光能的变化:(a)A4天线;(b)A5天线;(c)A6天线

Fig. 6 Changes in THz wave amplitude radiated by IPCA with different electrode gaps under different bias electric fields with pump light energy: (a) A4 antenna; (b) A5 antenna; (c) A6 antenna

构建紧凑型 THz 源,例如采用 THz IPCA 阵列对 THz QCL 阵列进行相位锁定并实现 THz 光的相干合成,为等离子体诊断、生物医学成像和无损检测对大功率 THz 源的需求奠定基础。

References

- [1] Burford N M, El-Shenawee M O. Review of terahertz photoconductive antenna technology [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(1): 010901.
- [2] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1: 97-105.
- [3] Guo Y S, Chen L G, Yan S H, et al. Current research status of terahertz biomedical applications [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2024, 43(5): 642-656.
郭缘森,陈利刚,颜识涵,等.太赫兹生物医学应用研究现状[J].*红外与毫米波学报*, 2024, 43(5): 642-656.
- [4] Auston D H, Cheung K P, Smith P R. Picosecond photoconducting Hertzian dipoles [J]. *Applied Physics Letters*, 1984, 45(3): 284-286.
- [5] Shen Y C. Terahertz pulsed spectroscopy and imaging for pharmaceutical applications: A review [J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2011, 417(1-2): 48-60.
- [6] Nagatsuma T. Terahertz technologies: Present and future [J]. *IEICE Electron Express*, 2011, 8(14): 1127-1142.
- [7] He Y, Chen Y, Zhang L, et al. An overview of terahertz antennas [J]. *China Communications*, 2020, 17(7): 124-165.
- [8] Ma J L, Tang J C, Wang K C, et al. A THz-TDS based metamaterial sensor for the sensitive distinguishment of food additives [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2022, 41(3): 581-588.
马佳路,唐靖超,王凯程,等.一种基于 THz-TDS 技术用于食品添加剂高灵敏度区分的超材料传感器[J].*红外与毫米波学报*, 2022, 41(3): 581-588.
- [9] Boby E N F, Prajapati J, Rathinasamy V, et al. Parametric investigation of interdigitated photoconductive antenna for efficient terahertz applications [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2022, 47(3): 3597-3609.
- [10] Tiedje H F, Saeedkia D, Nagel M, et al. Optical scanning techniques for characterization of terahertz photoconductive antenna arrays [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2008, 58(7): 2040-2045.
- [11] Emadi R, Barani N, Safian R, et al. Hybrid computational simulation and study of terahertz pulsed photoconductive antennas [J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2016, 37(11): 1-17.
- [12] Abhishek G, Goutam R, Arkabrata B, et al. Enhanced optical-to-THz conversion efficiency of photoconductive antenna using dielectric nano-layer encapsulation [J]. *APL Photonics*, 2018, 3(5): 051706.
- [13] Chen Y C, Wang S B, Zhai G H, et al. A review on Terahertz lens antennas [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2023, 42(6): 806-814.
陈屹聪,王烁博,翟国华,等.太赫兹透镜天线的进展研究[J].*红外与毫米波学报*, 2023, 42(6): 806-814.
- [14] Shang T, Jin Z, Li C H, et al. Influence of inductance of photo-conductive terahertz source circuit on its radiation characteristics [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2022, 41(4): 751-756.
尚婷,金枝,李春晖,等.光电导太赫兹源回路电感对其辐射特性的影响[J].*红外与毫米波学报*, 2022, 41(4): 751-756.
- [15] Emadi R, Safian R, Nezhad A Z. Theoretical modeling of terahertz pulsed photoconductive antennas based on hot-carriers effect [J]. *IEEE*, 2017(4): 8400309-1-8400309-9.
- [16] Flora B E N, Sachin K, Shyamal M. Design and analysis of a serrate-shaped fractal photoconductive antenna for terahertz applications [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2023(6): 55.
- [17] Brorson S D, Zhang J, Keiding S R. Ultrafast carrier trapping and slow recombination in ion-bombarded silicon on sapphire measured via THz spectroscopy [J]. *Applied Physics Letters*, 1994, 64(18): 2385-2387.
- [18] Kononenko V V, Zavedeev E V, Dezhkina M A, et al. Generation of terahertz radiation in Boron-doped diamond [J]. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2023, 50(Suppl. 5): S606-S612.
- [19] Singh R, Rockstuhl C, Menzel C, et al. Spiral-type terahertz antennas and the manifestation of the Mushiake principle [J]. *Optics Express*, 2009, 17(12): 9971-9980.
- [20] Hale P J, Madeo J, Chin C, et al. 20 THz broadband generation using semi-insulating GaAs interdigitated photoconductive antennas [J]. *Optics Express*, 2014.
- [21] Nguyen T K, Kim W T, Kang B J, et al. Photoconductive dipole antennas for efficient terahertz receiver [J]. *Optics Communications*, 2017, 383: 50-56.
- [22] Hattori T, Egawa K, Ookuma S I, et al. Intense terahertz pulses from large-aperture antenna with interdigitated electrodes [J]. *Japanese Journal of Applied Physics. Part 2, Letters & Express Letters*, 2006, 45(12/16): L422-L424.
- [23] Awad M, Nagel M, Kurz H, et al. Characterization of low temperature GaAs antenna array terahertz emitters [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(18): 161117.
- [24] Nilforoushan N, Kidd C, Fournier A, et al. Efficient THz generation from low-temperature-grown GaAs photoconductive antennas driven by Yb-doped fiber amplifier at 200 kHz repetition rate [J]. *Applied Physics Letters*, 2023, 123(24): 241107.
- [25] Madeo J, Jukam N, Oustinov D, et al. Frequency tunable terahertz interdigitated photoconductive antennas [J]. *Electronics Letters*, 2010, 46(9): 611-613.
- [26] Ropagnol X, Chai X, Raeis-Zadeh S M, et al. Influence of gap size on intense THz generation from ZnSe interdigitated large aperture photoconductive antennas [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(4): 1-8.
- [27] Yan Z J, Shi W. Radiation characteristics of terahertz GaAs photoconductive antenna arrays [J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(24): 9.
闫志巾,施卫.太赫兹 GaAs 光电导天线阵列辐射特性 [J].*物理学报*, 2021, 70(24): 9.
- [28] Boby E N F, Prajapati J, Rathinasamy V, et al. 6G and beyond: Investigation of broadband terahertz interdigitated photoconductive antenna by exploiting laser parameters [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2021.