第 XX 卷第 XX 期
XXXX 年 XX 月

红 外 与 毫 米 波 学 报
J. Infrared Millim. Waves

Vol. XX, No. XX
XX,XXXX

文章编号:1001-9014(XXXX)XX-0001-06　　DOI:10. 11972/j. issn. 1001-9014. XXXX. XX. 001

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
(西安理工大学理学院,陕西省超快光电技术与太赫兹科学重点实验室,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(Photoconductive antenna,PCA),叉指型光电导天线(Interdigitated photoconductive antenna,IPCA)能够在较小光敏面积内构建多个阵元,辐射性能更优越。本文设计并研制了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:叉指光电导天线;太赫兹时域光谱系统;太赫兹
PACS:

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凭借其独特的室温工作特性、较高稳定性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(Interdigitated 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

基金项目:国家自然科学基金(编号62371391、62435020)、陕西省超快光电子技术与太赫兹科学重点实验室(编号: 2018SZS-06)、西安市超快光电器件技术重点实验室(编号: 201805055ZD6- CG39)
Foundation items:National Natural Science Foundation of China (62371391,62435020), Key Laboratory of Ultrafast Optoelectronics Technology and Terahertz Science in Shaanxi (2018SZS-06), 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

(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。并在金属层和天线电极之间增加一层Si_3N_4绝缘涂层,如图1(a)中的灰色结构所示,Si_3N_4比传统的SiO_2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 galliμm arsenide, SI-GaAs)上生长的低温砷化镓(low temperature galliμm 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800nm、脉宽80fs、重复频率为80MHz,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。

表1 6个不同结构参数IPCA

Table 1 6 different structural parameters IPCA

天线编号	电极间距D (μm)	电极间隙G (μm)	电极宽度W(μm)	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

3 结果与讨论

3.1 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280mW,偏置电场为12kV/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

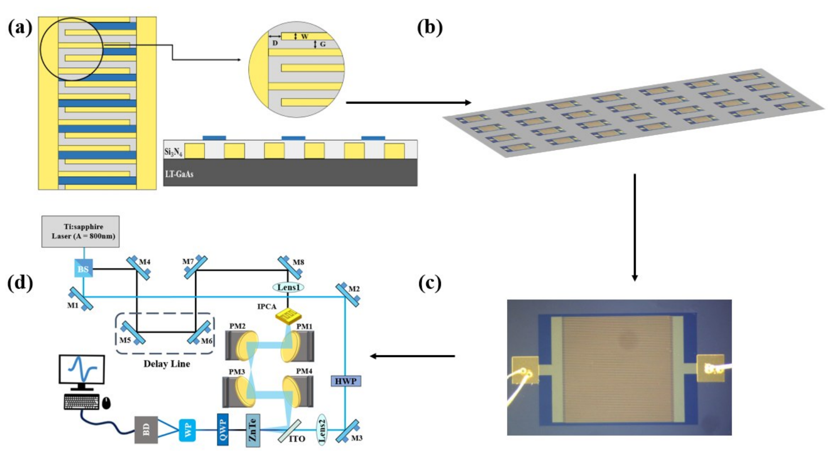

图1 基于THz-TDS的不同电极参数IPCA测试示意图(a)IPCA结构示意图(b)IPCA加工晶圆示意图(c)IPCA实物图(d)THz-TDS光路图

Figure 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 μm,PPCA 的电极间隙为 150 μm(实物图见图 2a 插图);蝴蝶结天线的电极间隙为 50 μm(实物图见图 2b 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 $E_{\mathrm{THz}}(t)$ 可以表示为,

$$E_{\mathrm{THz}}(t) = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0 c^2}\frac{A}{z}\frac{\partial}{\partial t}J_s(t) \qquad (1)$$

其中 A 为有效光敏面积,$Js(t)$ 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与天线面积成正比。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(degree of polarization,DOP)。其中 $I_{/\!/}$ 和 $I_{\perp}$ 为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 范围内均在 96% 以上。

$$DOP(f) = \frac{I_{/\!/}^2(f) - I_{\perp(f)}^2}{I_{/\!/}^2(f) + I_{\perp(f)}^2} * 100\% \qquad (2)$$

3.2　不同电极参数的 IPCA

3.2.1　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 320mW,偏置电场为 12kV/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。

$$E_{THz} \propto AE_b \qquad (3)$$

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。

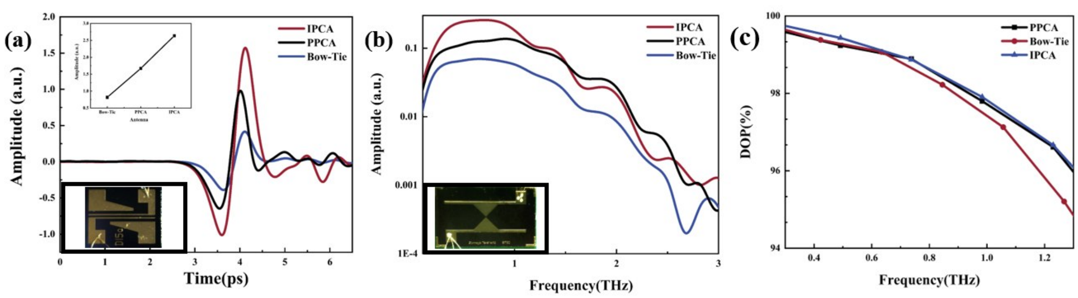

图 2　不同电极形状天线(a)时域信号,插图为 PPCA 实物图(b)频域信号,插图为蝴蝶结天线实物图(c)偏振态

Figure 2　Antennas with different electrode shapes (a) Time domain signals, the illustration is the physical picture of PPCA (b) Frequency domain signals, the illustration is the physical picture of bowtie antenna (c) polarization state

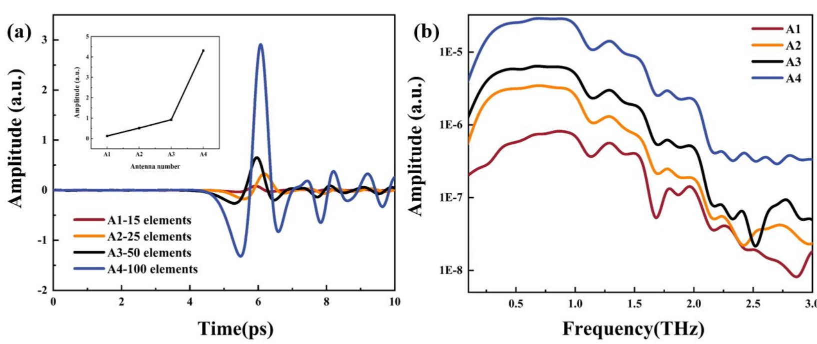

图 3　不同阵元数目天线(a)时域信号(b)频域信号

Figure 3　Antennas with different number of array elements (a) Time domain signals (b) Frequency domain signals

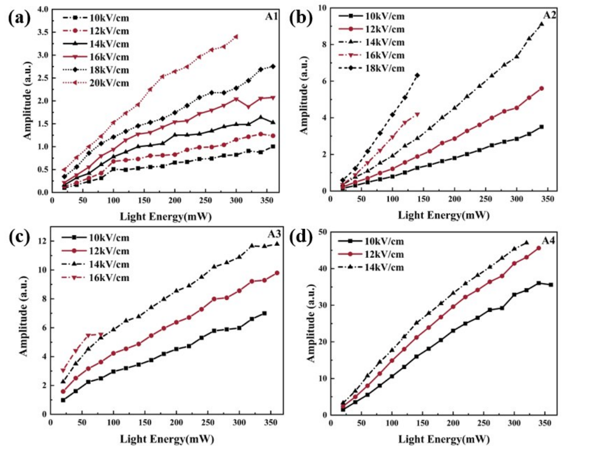

图4 不同阵元数目天线在不同偏置电场下辐射THz波幅值随泵浦光能的变化

Figure 4 Variation of THz amplitude radiated by antennas with different number of array elements under different bias electric fields with pump light energy

为了进一步对IPCA的辐射性能进行研究，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，这一数值达到是A1的14倍。实验结果表明，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。

3.2.2 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300mW，偏置电场为5kV/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_a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。

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

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 μm，电极长度为2 mm；单只天线的电极间隙为20 μm，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

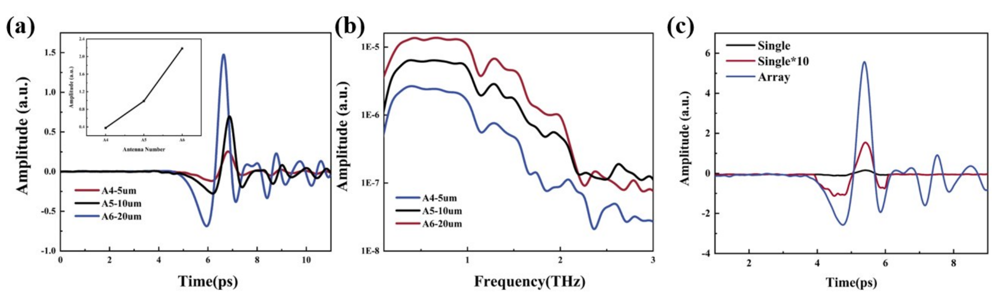

图5 不同电极间隙天线(a)时域信号(b)频域信号(c)单个天线和40阵元阵列的时域信号波形对比，以及单个元件时域信号波形放大10倍后的曲线

Figure 5 Different electrode gap antennas (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

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。

4　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）在相同实验条件下，在相同电极间隙下，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。

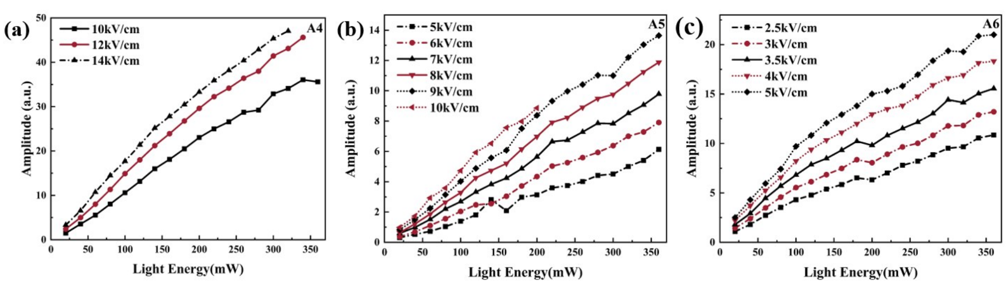

图6　不同电极间隙IPCA在不同偏置电场下辐射THz波幅值随泵浦光能的变化

Figure 6　Variation of THz amplitude radiated by IPCA with different electrode gaps under different bias electric fields with pump light energy

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 Yuan-Sen, CHEN Li-Gang, YAN Shi-Han, FU Ying, QIU Fu-Cheng, YANG Zhong-Bo, ZHANG Ming-Kun, TANG Ming-Jie, WANG Hua-Bin. 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,付颖,邱付成,杨忠波,张明焜,汤明杰,王化斌.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] Yao-Chun, Shen. Terahertz pulsed spectroscopy and imaging for pharmaceutical applications: A review [J]. International Journal of Pharmaceutics, 2011, 417(1-2):48-60.

[6] Nagatsuma, Tadao. 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 Jia-Lu, TANG Jing-Chao, WANG Kai-Cheng, GUO Liang-Hao, WANG Shao-Meng, GONG Yu-Bin. 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,郭良浩,王少萌,宫玉彬.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 Gupta, Goutam Rana, Arkabrata Bhattacharya, et al. Enhanced optical-to-THz conversion efficiency of photoconductive antenna using dielectric nano-layer encapsulation [J]. APL Photonics 1 May 2018; 3 (5): 051706.

[13] CHEN Yi-Cong, WANG Shuo-Bo, ZHAI Guo-Hua, GAO Jian-Jun. 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,高建军.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 Ting, JIN Zhi, LI Chun-Hui, SHI Wei. 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,施卫.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).

[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] P, J, Hale, 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.

[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 (October 2016) [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(4):1-8..

[27] Yan Zhijin, Shi Wei. 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.