

文章编号: 1006-4710(2011)03-0339-05

砷化镓太赫兹光导天线的制备及性能研究

刘红, 支娜, 陈霄

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 用半绝缘砷化镓(SI-GaAs)材料制备了太赫兹(THz)光导天线和天线阵列,其电极间隙分别为50 μm 、100 μm 、150 μm 。用THz时域光谱系统(THz-Time domain system)测试和比较了三种不同电极间隙天线的THz辐射性能,研究了电极间隙的大小对光导天线辐射THz性能影响。实验表明相同衬底材料、几何结构和制作工艺的天线,辐射出的THz电磁波的频谱基本相同,与电极间隙无关;光导天线THz电磁波远场辐射强度与外加偏置电场和天线的有效辐射面积成正比。光导天线阵列在相同的偏置电场以及相同激光光源的情况下比常规光导天线有更强的辐射THz波的能力。

关键词: 砷化镓光导天线;太赫兹电磁波;皮秒电脉冲

中图分类号: TN304.2⁺³

文献标志码: A

Terahertz Radiation from SI-GaAs Photoconductive Dipole Antenna

LIU Hong, ZHI Na, CHEN Xiao

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Terahertz (THz) photoconductive antennas and antennas array are prepared with the semi-insulating GaAs materials, whose electrode gap are 50 μm , 100 μm and 150 μm respectively. THz - Time Domain System used to test and compare THz radiation performances of 3 kinds of antennas with different electrode gap. Also, the effect of electrode gaps upon the photoconductive antennas radiation THz performances are studied in this paper. The experiment indicates that the antenna prepared with the same structure material, geometric structure and preparing technology can emit the spectrum of THz electromagnetic waves and have no relation with electrode gaps. Remote field radiation intensity of photoconductive antenna THz electro-magnetic waves is in positive proportion with the outside additional bias electric field and the antenna effective radiation area. In this case of the same bias electric filed and the same laser power resources, photoconductive antennas array have the stronger radiation THz wave ability than that of the normal photoconductive antennas.

Key words: GaAs photoconductive antennas; Terahertz radiation; pico second electric pulse

THz电磁波是指频率在0.1~10.0 THz(相应波长为3000~30 μm)范围内的电磁辐射,它具有许多独特性能:例如很多介电材料和非极性液体对THz波是透明的,可以利用THz波对不透明的物体进行透视成像,在安检中有很高的应用价值^[2];THz波的光子能量只有毫电子伏(meV)量级,频率为1 THz的电磁波的光子能量大约只有4 meV,不会对生物组织产生有害的光电离,可以利用THz波对生物组织进行活体检测等^[3,4];许多有机分子的转动和振动的跃迁在THz频段表现出强烈的吸收和色散特性,从而在THz频谱中表现出特有的吸收峰,可以利用THz光谱鉴别物质的组份^[5,6]。此外,THz

波的频率高决定了它具有很高的空间分辨率;THz波的脉宽短决定了它具有很高的时间分辨率,这些都赋予THz波具有广阔的应用前景^[7-11]。用超快激光脉冲触发直流偏置下的光导天线是目前常用的THz波产生方法^[12-14]。由于光导天线结构简单,使用方便,并且辐射THz电磁波的强度较高,所以在实验室和时域光谱系统中得到广泛应用,如THz时域光谱系统Mini-z(Zomega Terahertz Corporation, USA),TPS spectra 3000(TeraView Ltd, UK),以及成像设备TPI Imaga 2000(TeraView Ltd, UK)中都采用光导天线作为THz源。在超快激光脉冲作用下,光导天线内因光生载流子在偏置电场作用下的加速

收稿日期: 2011-06-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61007060,51107099)。

作者简介: 刘红(1960-),女,山东沂蒙人,工程师,研究方向为太赫兹光导天线。E-mail: liuhong@xaut.edu.cn。

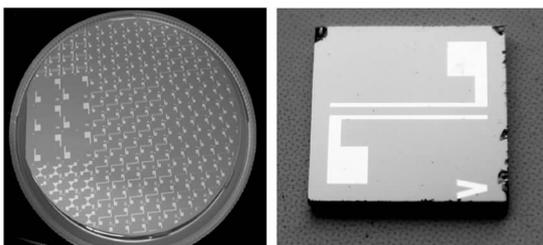
运动而辐射 THz 电磁波^[15,16]。光电导 THz 电磁辐射发射系统的性能与光电导芯片、天线的几何结构以及触发激光脉冲宽度有关。其中,光电导芯片是产生 THz 电磁波的关键部件,性能良好的光电导芯片应该具有载流子寿命短,迁移率高和能够承受高电压,大电流的能力。

本文制备了具有传输线电极结构的 SI-GaAs 光导天线及光导天线阵列,两电极间隙为 50 μm 、100 μm 、150 μm ,电极材料采用一定比例的 Au/Ge/Ni 合金化工艺与 SI-GaAs 形成欧姆接触,绝缘保护采用 Si_3N_4 绝缘薄膜。用 THz 时域光谱系统测试了光导天线及其阵列辐射 THz 波的性能,分析了它们辐射 THz 电磁波的特性。

1 光导天线的制备及辐射 THz 波原理

1.1 光导天线的制备

用光导天线产生 THz 电磁辐射,常用的天线结构有:赫兹偶极天线、共振偶极天线、锥形天线、传输线天线以及大孔径光导天线。其中传输线天线结构简单、使用方便。SI-GaAs 材料的电阻率高达 $10^7 \sim 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$,禁带宽度 $E_g = 1.42 \text{ eV}$,击穿场强达 250 kV/cm,具有优良的电、光性能,是制作光导天线的理想材料。本文选用 SI-GaAs 作为光导天线芯片材料,其暗态电阻率 $\rho > 5 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$,载流子浓度 $n \approx 10^{14} \text{ cm}^{-3}$,电子迁移率 $\mu > 5500 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$,芯片的厚度为 0.6 mm,外型尺寸为 5 mm \times 5 mm;用电子束蒸发工艺淀积厚度为 900 nm 的 Au/Ge/Ni 合金电极,经退火处理与 SI-GaAs 晶片形成欧姆接触,电极尺寸为 1 mm \times 1 mm,两电极间隙分别为 50 μm 、100 μm 、150 μm ,形成传输线光导天线结构;光导天线的绝缘保护采用 Si_3N_4 绝缘薄膜,与通常的钝化保护层相同。所制备的 SI-GaAs 光导天线如图 1 所示,图(a)为 3 吋 SI-GaAs 晶圆,图(b)为切割后的光导天线单元。



(a) 3吋SI-GaAs晶圆

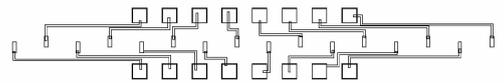
(b) 光导天线单元

图1 SI-GaAs 光导天线

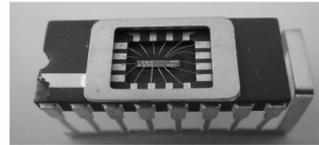
Fig.1 SI-GaAs photoconductive antennas

本文还设计并制备一个由 8 个小间隙光导天线单元组成的天线阵列,阵列的衬底是 SI-GaAs 材料,

如图 2 所示。每个单元都有分立的电极,可以独立操作。电极间隙和电极宽度的几何尺寸分别为 150 μm 和 10 μm 。光导天线阵列安置在一个覆盖着陶瓷衬底的集成电路中,电极与引线插脚相连。



(a) 叉指型天线阵列结构示意图



(b) 安装在集成电路封装管壳中的天线实物图

图2 SI-GaAs 光导天线阵列

Fig.2 SI-GaAs photoconductive antennas array

1.2 光导天线辐射 THz 波原理

当超短激光脉冲触发加有一定偏压的光导天线时,如果入射光子能量大于 SI-GaAs 的禁带宽度,则在半导体内激发载流子,这些载流子在外加电场作用下加速运动,并将存储的静电势能以电磁脉冲的形式释放出来。由于电子的迁移率远远大于空穴的迁移率,所以由空穴运动产生的电流可以被忽略。在两电极间的电流密度表示为:

$$J(t) = N(t)e\mu E_b \quad (1)$$

式中, N 为光生电子密度, e 为电子电量, μ 为电子迁移率, E_b 为偏置电场场强。 N 由触发光脉冲虽时间变化的光子数和 SI-GaAs 内光生电子的寿命所决定,因此电流 J 是瞬变的,它将产生电磁辐射。当触发光脉冲宽度为飞秒量级时,所产生的远场 THz 辐射的场强可以表示为:

$$E_{\text{THz}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{A}{c^2 z} \frac{\partial J(t)}{\partial t} = \frac{Ae}{4\pi\epsilon_0 c^2 z} \frac{\partial N(t)}{\partial t} \mu E_b \quad (2)$$

式中, A 为半导体表面上被激光照射区域的面积, ϵ_0 为真空中的介电常数, c 为真空中的光速, z 为测量点到光导天线的距离。可见,光导天线辐射 THz 波的电场正比于触发光脉冲的能量和外加偏置电场的场强。

2 性能测试与讨论

2.1 实验结果及分析

2.1.1 不同电极间隙光导天线的 THz 辐射性能

在光导天线产生 THz 脉冲的探测中,所记录的是 THz 脉冲电场随时间变化的时域波形,一般由数个电磁振荡周期组成,其中每个振荡周期对于不同频谱宽度的 THz 脉冲可以从几十飞秒到 1 ~ 2 皮

秒。对 THz 脉冲时域波形进行傅里叶变换,可以得到该电磁脉冲的频谱分布。

用电极间隙分别为: $50\ \mu\text{m}$ (No. 1)、 $100\ \mu\text{m}$ (No. 2) 以及 $150\ \mu\text{m}$ (No. 3) 的三个光导天线, 它们

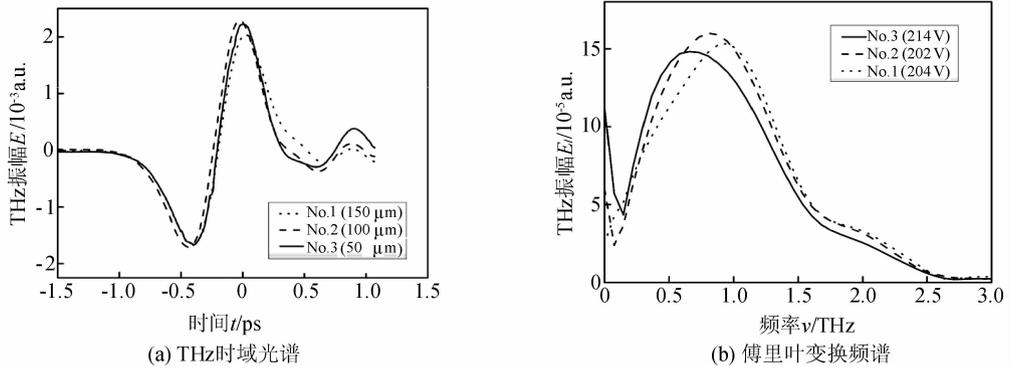


图3 天线 No. 1、No. 2、No. 3 的 THz 时域光谱及傅里叶变换频谱

Fig. 3 THz time spectrum and Fourier transform frequency spectrum of the three antennas

天线 No. 1 ~ No. 3 所辐射 THz 波的频谱范围相同, 均为 $0.2 \sim 3.0\ \text{THz}$, 这是由于天线 No. 1 ~ No. 3 具有相同的结构、衬底材料以及制作工艺。但是它们频谱的峰值频率不同, 分别为 $0.6\ \text{THz}$, $0.8\ \text{THz}$ 和 $1.0\ \text{THz}$, 由图 3 可知, THz 峰值频率随着天线电极间隙的减小而增加。这是因为在光能比较小的情况下, 天线内部所产生的光生载流子浓度比较低, 因此空间电荷屏蔽效应不明显, 而辐射场屏蔽效应是导致天线辐射 THz 功率饱和的主要因素^[15], 由于辐射场与天线的有效辐射面积是成正比的, 因此间隙较大(有效面积较大)的天线出现的饱和现象更明显, 从而抑制了天线的最大 THz 辐射功率, 导致 THz 峰值频率随着天线电极间隙的减小而增加。

改变偏置电压时, 天线 No. 1 ~ No. 3 辐射 THz 波的幅值随天线偏置电压之间的关系曲线如图 4 所示。

由图 4 可见, 在外加偏置电压低于 $100\ \text{V}$ 时, No. 3 天线所辐射出 THz 波振幅几乎为零, 而 No. 1 天线所辐射出 THz 波振幅高于 No. 2 天线。通过计算可以得到, 此时 No. 3 天线两电极之间的偏置电场小于 $6\ \text{kV/cm}$, 而 No. 2 与 No. 3 天线的偏置电场接近 $10\ \text{kV/cm}$ 和 $20\ \text{kV/cm}$ 。由于作用于 No. 3 天线上的偏置电场较小, 能为光生载流子提供的加速动力也很小, 因此 No. 3 天线所辐射 THz 波在偏置电压低于 $100\ \text{V}$ 时, 在实验中基本观察不到, 与式 (2) 给出的 THz 波远场辐射强度与外加偏置电场的正比例关系相符合。由于光导天线辐射 THz 波的强度不仅决定于偏置电场, 还与天线的辐射面积有关。所以, No. 2 天线具有最佳的偏置电场和辐射面

的结构、材料和制作工艺都相同。图 3 所示为采用 THz 时域光谱系统测得 No. 1 ~ No. 3 的光导天线辐射 THz 波的时域波形及相应的频谱。

积, 表现出偏置在 $160\ \text{V}$ 之上时, 其辐射强度高于 No. 1 和 No. 3 天线。

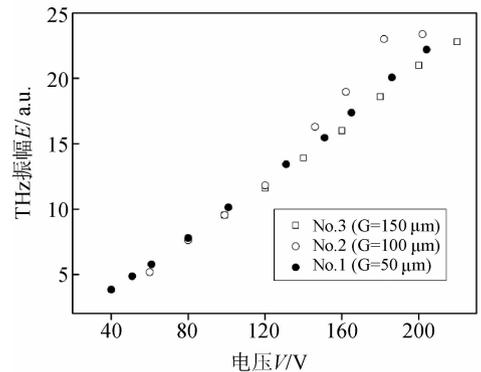


图4 THz 振幅与天线 No. 1、No. 2 以及 No. 3 外加偏置电压之间的关系

Fig. 4 Dependence of THz amplitude of No. 1, No. 2 and No. 3 with the bias voltage

在电压为 $100\ \text{V}$ 时, 作用于 No. 1 ~ No. 3 天线上的偏置电场分别达到了 $20\ \text{kV/cm}$, $10\ \text{kV/cm}$ 以及 $6.7\ \text{kV/cm}$, No. 1 天线的偏置电场强度几乎是 No. 3 的三倍, 但是它们所辐射出的 THz 波振幅基本相同, 这是由于 No. 3 天线的偏置电场虽然比较低, 但是它的有效辐射面积比较大, 因此可以辐射出与 No. 1 天线基本相同强度的 THz 波, 验证了式 (2) 给出的 THz 波远场辐射强度与天线的有效辐射面积也是成正比的。

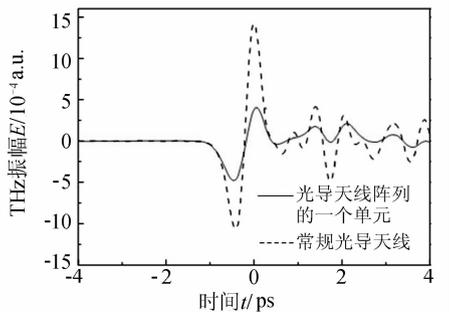
当电压达到 $220\ \text{V}$ 时, 天线 No. 1 与 No. 3 所辐射出的 THz 波振幅又基本相同。在相同的偏置电压和激发光强下, 尽管较大电极间隙天线 No. 3 上的偏置电场相对天线 No. 1 较小, 但是天线 No. 3 的 THz 辐射强度却与小间隙的天线 No. 1 基本相同, 而

电极间隙较小的天线 No. 1 所承受的电场力要比天线 No. 3 大得多,更容易被击穿,因此较大间隙的天线比小间隙天线的辐射性能好。

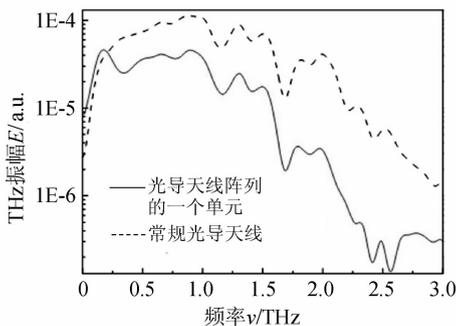
2.2.2 光导天线阵列的 THz 辐射性能

将光导天线周期性排列起来,就形成了光导天线阵列,天线阵列比单个天线的有效辐射面积大很多,因此它的 THz 发射功率也比单个天线要大。

本文测试了具有交叉电极光导天线阵列与单个常规光导天线在同一偏置电场下的 THz 辐射性能。由于实验所用的光纤激光的光斑直径是几十微米,可以将光斑照射在交叉电极天线阵列中的其中一个天线单元上(其电极间隙为 $150\ \mu\text{m}$),两端所加的偏压为 $90\ \text{V}$,而给电极间隙为 $100\ \mu\text{m}$ 的常规天线加上 $60\ \text{V}$ 的偏压,使两种天线在同一电场强度下工作。用 THz 时域光谱系统探测,得到常规光导天线和光导天线阵列其中一个天线单元的时域波形和频谱,如图 5 所示。



(a) 相同电场下常规光导天线和光导天线阵列的一个单元的 THz 时域光谱波形



(b) 相同电场下常规光导天线和光导天线阵列的一个单元的 THz 波频谱

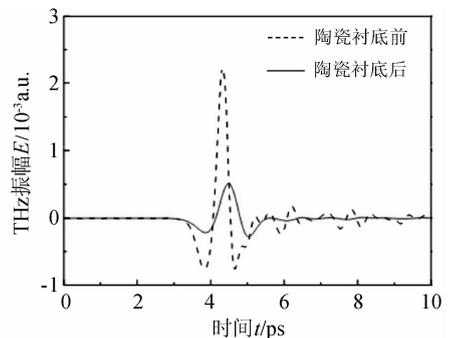
图 5 常规光导天线与光导天线阵列的一个单元的 THz 辐射

Fig. 5 THz radiation from one common antenna and one interdigital antenna unit at same electrical field

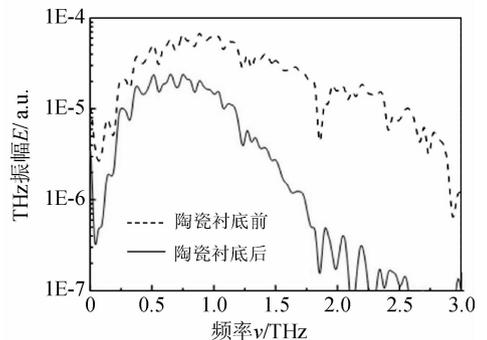
从图 5 可见,常规光导天线所发射 THz 波强度比天线阵列中的一个天线单元大得多,其 THz 的振幅比天线单元的振幅大了将近 3 倍。同时,常规光导天线的 THz 频谱扩展到将近 $3\ \text{THz}$,比一个天线单元的频谱宽。而天线单元的光谱在 $1.7\ \text{THz}$ 时有

一个截止频率。在大于 $1.7\ \text{THz}$ 的范围内几乎没有 THz 信号存在。两种天线都由同样的 SI-GaAs 制备,都工作于同一偏置电场下,且测试条件相同,因此天线单元按说也应该与常规光导天线一样可以产生频带宽度为 $3\ \text{THz}$ 的电磁波,但实验结果并非如此,这是由于天线阵列的陶瓷衬底吸收了部分 THz 波导致信号衰减所致。

为了进一步研究交叉电极天线阵列的性能,本文测试了 THz 波在陶瓷衬底中的传输损耗,图 6 为 THz 波经过陶瓷衬底前后的时域光谱和频谱,可以看出经过陶瓷衬底后的 THz 波只有入射 THz 波的 23%,频率大于 $2.5\ \text{THz}$ 的电磁波都被陶瓷衬底所吸收了,在 $1.7\ \text{THz}$ 以上出射 THz 波有很明显的衰减。



(a) THz 波在陶瓷衬底前后的时域光谱比较



(b) THz 波在陶瓷衬底前后的频谱比较

图 6 THz 波在陶瓷衬底前后的比较

Fig. 6 THz wave before and after transmission of ceramic substrate

如果在陶瓷衬底上钻一个洞,释放陶瓷内的电磁波,使 THz 波可以通过,那么 THz 波的振幅就会增加 4 倍,在相同电场强度下天线阵列中的一个单元所产生的 THz 波的振幅就是常规光导天线所产生的 THz 波的振幅的 $4/3$ 。

因此,光导天线阵列芯片中有 8 个天线单元,如果将泵浦光束扩束,使其光斑尺寸可以覆盖所有的天线单元,当激光功率足够高时,天线阵列所产生的 THz 振幅在同样的电场强度下就会增加 8 倍。因

此,在相同的电场强度下,天线阵列所产生的 THz 波的振幅就会比一般的常规光导天线产生的 THz 波振幅大 10 倍。

3 结 论

1) 相同衬底材料、几何结构和制作工艺的光导天线,辐射出的 THz 波频谱具有相同的宽度,与电极间隙无关;

2) THz 波远场辐射强度与外加偏置电场和天线的有效辐射面积成正比例关系,大间隙的光导天线辐射 THz 波的性能优于小间隙光导天线;

3) THz 波频谱的峰值频率随着光导天线电极间隙的减小而增大,这是辐射场屏蔽效应所引起的饱和现象所导致;

4) 具有交叉电极结构的光导天线阵列辐射 THz 波性能的实验测试表明,光导天线阵列在相同的偏置电场以及相同激光光源情况下比常规光导天线具有更强的 THz 波辐射能力。

参考文献:

- [1] Verghese S, McIntosh K A, Brown E R. Highly tunable fiber-coupled photomixers with coherent terahertz output power [J]. IEEE Transaction on Microwave Theory and Technique, 1997, 45 (8): 1301-1309.
- [2] Woodward R M, Cole B E, Wallace V P, et al. Terahertz pulse imaging in reflection geometry of human skin cancer and skin tissue [J]. Physics in Medicine and Biology, 2002, 47(21): 3853-3856.
- [3] Markelz A G, Roitberg A, Heilweil E J. Pulsed terahertz spectroscopy of DNA, bovine serum albumin and collagen between 0.1 and 0.2 THz [J]. Chemistry Physics Letters, 2000, 320 (1-2): 42-48.
- [4] Png G M, Choi J W, Ng B W-H, et al. The impact of hydration changes in fresh bio-tissue on THz spectroscopic measurements [J]. Physics in Medicine and Biology, 2008, 53 (13): 3501-3517.
- [5] Liu H B, Chen Y Q, Bastiaans J G, et al. Detection and identification of explosive RDX by THz diffuse reflection

- spectroscopy [J]. Optics Express, 2006, 14 (1): 415-423.
- [6] Hooper J, Mitchell E, Konek C, et al. Terahertz optical properties of the high explosive β -HMX [J]. Chemistry Physics Letters, 2009, 467 (4-6): 309-312.
- [7] Huang F, Schulkin B, Altan H. Terahertz study of 1,3,5-trinitro-s-triazine by time-domain and Fourier transform infrared spectroscopy [J]. Applied Physics Letters, 2004, 85 (23): 55351-55353.
- [8] Hu Y, Huang P, Guo L T, et al. Terahertz spectroscopic investigations of explosives [J]. Physics Letters A, 2006, 369 (6), 728-732.
- [9] Singh S. Sensors-an effective approach for the detection of explosives [J]. Journal of Hazardous Material, 2007, 144 (1-2): 15-28.
- [10] Giles D A, Andrew B D, Fan W. Terahertz spectroscopy of explosives and drugs [J]. Materialstoday, 2008, 11 (3): 18-26.
- [11] Karpowicz N, Zhong H, Zhang C L, et al. Compact continuous-wave sub-terahertz system for inspection applications [J]. Applied Physics Letters, 2005, 86 (5): 054105-1-3.
- [12] Shi W, Xu J Z, Zhang X C. Terahertz generation from Si_3N_4 covered photoconductive dipole antenna [J]. Chinese Optics Letter, 2003, 1(5): 308-310.
- [13] Xu J Z, Shi W, Hou L. Terahertz generation from multiple transparent dielectric coated GaAs antenna [C] // 2004 Joint 29th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 12th International Conference on Terahertz Electronics, Berlin, Germany, 2004: 315-316.
- [14] Shen Y C, Upadhy P C, Linfield E H, et al. Ultrabroadband terahertz radiation from low-temperature-grown GaAs photoconductive emitters [J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(15): 3117-3119.
- [15] Kim D S, Citrin D S. Coulomb and radiation screening in photoconductive terahertz sources [J]. Applied Physics Letters, 2006, 88 (16): 161117-1-3.
- [16] Zhang H, Wahlstrand J K, Choi S B, et al. Contactless photoconductive terahertz generation [J]. Optics Letters, 2011, 36(2): 223-225.

(责任编辑 杨小丽)