

光电导天线材料对辐射太赫兹波特性的模拟分析

侯磊^{1*}, 吴晓博¹, 杨磊¹, 施卫¹, 杭玉桦²

(1. 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;

2. 苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215004)

摘要: 光电导天线是太赫兹时域光谱系统中普遍使用的宽带太赫兹辐射源, 天线衬底材料对其辐射太赫兹波特特性至关重要。目前广泛使用的光电导天线材料是第二代半导体材料 GaAs, 而第三代半导体材料具有更大的禁带宽度, 对提高天线辐射太赫兹波的功率更有利。本文利用大孔径光电导天线的电流瞬冲模型, 对常用光电导天线材料(SI-GaAs、LT-GaAs)和未来有望应用于光电导天线的第三代半导体材料(ZnSe、GaN、SiC)辐射太赫兹波的特性进行了仿真研究, 结果表明在相同偏置电场和各自最高光通量触发下, LT-GaAs 天线辐射太赫兹波的幅值最高、频谱最宽; 第三代半导体材料制备的天线可以承受更高的偏置电场, 在各自的最大偏置电场下辐射太赫兹波的强度远远大于 GaAs 天线。本工作对研制新型的第三代半导体光电导天线提供了理论指导。

关键词: 太赫兹辐射; 第三代半导体材料; 电流瞬冲模型; 光电导天线

中图分类号: O47

文献标识码: A

Simulation analysis of radiation terahertz wave characteristics of photoconductive antenna materials

HOU Lei^{1*}, WU Xiao-Bo¹, YANG Lei¹, SHI Wei¹, HANG Yu-Hua²

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

2. Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou 215004, China)

Abstract: The photoconductive antenna is a kind of widely used broadband terahertz (THz) radiation source in THz time-domain spectroscopy systems, and the substrate material of the antenna is crucial for the characteristics of generated THz wave. The widely used photoconductive antenna material is the second-generation semiconductor of GaAs, while the third-generation semiconductor has a larger band gap, which is more advantageous for improving the power of THz wave from photoconductive antenna. In this work, the current surge model of large-aperture photoconductive antennas was used to simulate the characteristics of THz waves radiated by the photoconductive antenna made from commonly used SI-GaAs and LT-GaAs, and the third-generation semiconductors (ZnSe, GaN, SiC) that are expected to be used in the future for photoconductive antennas. The results show that under the same bias electric field and their respective highest pump laser flux, LT-GaAs antenna generates THz waves with the highest amplitude and widest frequency. The photoconductive antenna made by the third-generation semiconductor materials can withstand higher bias electric fields, and the intensity of radiated THz waves is much greater than that from GaAs antennas under their respective maximum bias electrical fields. This work provides theoretical guidance for the development of new third-generation semiconductor photoconductive antennas.

Key words: terahertz radiation, third-generation semiconductor materials, current surge model, photoconductive antenna

收稿日期: 2023-10-19, 修回日期: 2024-04-22

Received date: 2023-10-19, Revised date: 2024-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(62075179); 陕西省教育厅基金重点项目(22JS026 and 22JS027)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (62075179) and the Natural Science Foundation of Shaanxi Provincial Department of Education (22JS026 and 22JS027)

作者简介 (Biography): 侯磊 (1978—), 男, 河南沈丘人, 教授, 博士, 主要研究领域为太赫兹光电导天线、利用里德堡原子探测太赫兹电磁波等. E-mail: houleixaut@126.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: houleixaut@126.com

引言

太赫兹(THz)波是频率在 0.1~10 THz 的电磁波,介于微波与红外之间。近几十年来,超快激光技术迅速发展,为太赫兹脉冲的产生提供了稳定、可靠的激发光源,使太赫兹辐射的产生、检测和应用得到蓬勃发展。太赫兹波具有光子能量低、空间和时间分辨率高、瞬时带宽较宽等诸多优点,其在生物学、医学、天文学、通信、雷达等领域具有广阔的应用前景^[1-7]。

宽带太赫兹波的产生方法包括:光电导机制^[8]、利用晶体二阶非线性光整流法^[9]、激光诱导气体电离法^[10]和通过激光激发液态介质产生^[11]等。其中,光电导天线是应用最广泛的一种宽带太赫兹辐射源,可在具有较短载流子寿命的高阻半导体材料上制备一定结构的金属电极得到。当使用光子能量高于半导体能隙的飞秒激光脉冲照射电极间隙时,在半导体表面被照射区域会产生瞬态光生载流子,在天线两电极间施加的偏置电场作用下,这些载流子加速运动,将储存的静电势能以电磁脉冲形式辐射出来,即太赫兹脉冲。

大孔径光电导天线的电极间隙大于发射太赫兹脉冲的中心波长,具有光激发表面大和电极结构简单的特点。由于天线电极尺寸较大,随着入射光能增加不容易出现饱和现象,并且能够承受更高的偏置电压,因此可通过提高光通量及偏置电压来提高太赫兹波的辐射功率。衬底材料是影响大孔径光电导天线辐射效率的一个关键因素,性能优良的衬底材料应具有较短的载流子寿命、较高的电阻率、较大的载流子迁移率以及良好的热导率。砷化镓(GaAs)是常用的光电导天线衬底材料,半绝缘砷化镓(SI-GaAs)由于其性能可靠以及制备工艺成熟的特点被广泛使用^[12];低温砷化镓(LT-GaAs)具有比 SI-GaAs 更低的载流子寿命,被认为是目前最好的光电导天线衬底材料。1997 年, Tani M 等人对比了使用 LT-GaAs 与 SI-GaAs 作为衬底材料的光电导天线的辐射特性,发现 LT-GaAs 天线可以承受更大的偏置电场,并且其载流子寿命更短,从而使辐射太赫兹波的功率更强^[13]。近些年来,研究人员尝试利用第三代半导体材料产生太赫兹波。2003 年, Holzman J F 等人在高达 125 kV/cm 的偏置场和 28 mJ/cm² 的未饱和光通量情况下激发硒化锌(ZnSe)天线产生了太赫兹波^[14]。2007 年, Imafuji O 等人在 500 V 的偏置电压下用波长为 266 nm 激光激发氮化

镓(GaN)光电导天线产生了 93.3 pJ/脉冲的太赫兹波,并且观察到其特性与 LT-GaAs 天线产生的辐射特性相似^[15]。2014 年, Ropagnol X 等人研究了用 4H-碳化硅(4H-SiC)和 6H-碳化硅(6H-SiC)光电导天线在低触发光通量下产生太赫兹波,并且发现在各自的击穿电压下 6H-SiC 光电导天线产生的太赫兹波的功率是 ZnSe 光电导天线的 2.3 倍^[16]。因此,光电导天线衬底材料对其辐射太赫兹波的特性具有重要影响,但由于受限于材料的制备以及对激光器波长和脉宽的要求,目前各类材料辐射太赫兹波的实验尚未充分开展。本文基于电流瞬冲模型,对以 LT-GaAs、SI-GaAs、GaN、ZnSe 和 SiC 半导体材料为衬底的大孔径光电导天线辐射太赫兹波的特性进行模拟,所得到的结果对不同材料太赫兹光电导天线的研制具有一定的参考价值。

1 计算方法

Darrow J T 基于麦克斯韦电磁场理论推导得到大孔径光电导天线的远场太赫兹电场强度表达式如下^[17]:

$$E_{\text{far}}(t) = \frac{A}{4\pi\epsilon_0 c^2 z} \frac{(1 + \sqrt{\epsilon_r})^2 \dot{\delta}_s(t)(t - z/c)}{\left[\eta_0 \delta_s(t - z/c) + (1 + \sqrt{\epsilon_r}) \right]^2}, \quad (1)$$

方程(1)中, δ_s 是电导率, η_0 是自由空间波阻抗, ϵ_r 为半导体材料的相对介电常数, A 为有效发射面积, c 是自由空间光速, z 是观察点距离天线中心的距离。

光电导天线材料的表面电导率随时间变化,表示为:

$$\delta_s(t) = \frac{q(1 - R)}{h\nu} \int_{-\infty}^t \mu(t - t') I_{\text{opt}}(t') \exp\left(-\frac{t - t'}{\tau_c}\right) dt' \quad (2)$$

$$\text{设泵浦光为高斯分布 } I_{\text{opt}}(t) = \frac{F}{2\sqrt{\pi} \Delta t} \exp\left(-\frac{t^2}{\Delta t^2}\right),$$

其中 F 为总泵浦光通量, R 为天线材料的反射率, 定

义饱和光通量 $F_{\text{sat}} = \frac{4h\nu(1 + \sqrt{\epsilon_r})}{q\mu_s\eta_0(1 - R)}$, 其中 μ_s 为光电

导天线表面电导率最高时光生载流子的瞬态迁移率, 对方程(1)化简得到远场太赫兹电场强度表达式^[18]:

$$E_{\text{far}}(t) = \frac{A(1 + \sqrt{\epsilon_r})}{4\pi c} \frac{\frac{F}{F_{\text{sat}}} \sum_2(t - z/c)}{z \left[1 + \frac{F}{F_{\text{sat}}} \sum_1(t - z/c) \right]^2} E_b, \quad (3)$$

$\Sigma_1(t)$ 、 $\Sigma_2(t)$ 是由泵浦激光脉冲宽度 τ_p 、光生载流子寿命 τ_c 、载流子弛豫时间 τ_s 决定的函数。

将对应参量带入方程(3),计算可得天线辐射太赫兹波在远场情况下的时域波形。

2 光电导天线材料的特性研究

由于光电导天线辐射太赫兹波的特性受衬底材料的载流子寿命、迁移率、电阻率等参数影响,因此为了准确获得各种材料的天线辐射太赫兹波特特性,我们首先对SI-GaAs、LT-GaAs、GaN、ZnSe、SiC五种材料的特性进行研究。

GaAs材料禁带宽度为1.44 eV,具有较高的载流子迁移率,电子饱和速率为 2×10^7 cm/s,热导率为 0.46 W/cm·K,通常使用波长为800 nm左右的激光器作为泵浦光源。SI-GaAs材料的载流子寿命较长,一般大于200 ps。相比于SI-GaAs材料,LT-GaAs具有更高的电场击穿强度(5×10^5 V/cm)、极短的载流子寿命(<1 ps),被认为是制造光电导器件的最佳材料之一^[13]。

GaN是典型的第三代宽禁带半导体材料,禁带宽度为3.4 eV,具有高击穿电场强度(3.3×10^6 V/cm),高电子饱和速率(2.5×10^7 cm/s),高热导率(1.3 W/cm·K),这些优越的性能对GaN光电导天线的辐射效率是有利的。

ZnSe的禁带宽度为2.67 eV,具有高击穿强度($>7 \times 10^4$ V/cm),载流子迁移率大约为 140 cm²/Vs,由于单晶材料比多晶材料的迁移率更高,因此单晶ZnSe具有更高的光电太赫兹波转换率^[19]。

SiC的禁带宽度为3 eV左右^[20],晶体结构对其禁带宽度有影响,具有高电子饱和速率(2×10^7 cm/s),高热导率(4.9 W/cm·K),以及高击穿场(2.2×10^6 V/cm)。该材料在高频、高温、高功率的环境下可以发挥出独特的优势。

本文模拟中所使用的几种光电导材料的参数见表1。

3 饱和光通量、相同偏置电场下,不同衬底材料光电导天线辐射太赫兹波的模拟分析

利用电流瞬冲模型,对以上五种半导体材料(LT-GaAs, SI-GaAs, GaN, ZnSe, SiC)为衬底材料的光电导天线进行模拟,天线结构均为具有大的光激发表面和带状电极的大孔径光电导天线,激光照射面积为 1 cm²,远场到光电导天线中心的距离为 10 cm,偏置电场均为 1 kV/cm,照射在各种材料

表1 本文所使用的几种光电导材料的参数

Table 1 The parameters of photoconductive materials applied in the text

Material	Band gap E_g /eV	Relative di- electric con- stant ϵ_r	Carrier life- time τ_c /ps	Carrier re- laxation time τ_r /ps
SI-GaAs	1.44	13.18	200	0.5
LT-GaAs	1.44	12.9	1	0.16
GaN	3.40	9.8	150	0.2
单晶 ZnSe	2.67	6.29	500	2.7
3C-SiC	2.20	9.72	3×10^6	0.2
4H-SiC	3.23	9.70	1 000	0.63
6H-SiC	3.00	9.70	400	1.25

的光电导天线上的光脉冲能量均为其饱和值,对于砷化镓材料(SI-GaAs和LT-GaAs),设定激光波长为800 nm,对于第三代半导体材料(ZnSe、GaN、SiC),设定激光波长为400 nm,五种光电导天线辐射太赫兹波的远场时域波形如图1所示。

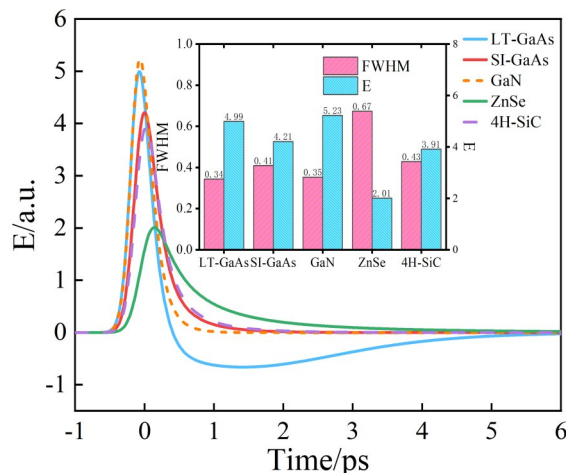


图1 饱和光通量、相同偏置电场下,不同材料的光电导天线辐射太赫兹波的远场时域波形图,插图表示远场时域波形半高全宽以及峰值

Fig. 1 Far field time-domain waveforms of THz waves generated by photoconductive antennas with different substrate materials illuminated by their respective saturated light flux and biased with the same electric field, the inset shows the full widths at half maximum (FWHMs), and peak electric field intensities of the THz time-domain waveforms in far-field

由图1可知,LT-GaAs光电导天线辐射太赫兹波的时域波形脉宽最窄,其半高全宽(FWHM)为0.34 ps,这主要是因为LT-GaAs具有非常小的载流子寿命,天线中光电流随时间变化最快;GaN天线辐射的太赫兹波兼具幅值高、脉宽窄的优点,因为GaN

材料载流子寿命与弛豫时间都较短;ZnSe 光电导天线辐射太赫兹波的幅值最小且脉宽最大,因为其载流子寿命最大,且 ZnSe 波形下降最缓慢,这主要与材料的弛豫时间较长相关。

通过快速傅里叶变换得到五种天线辐射太赫兹波的频谱图,见图 2。

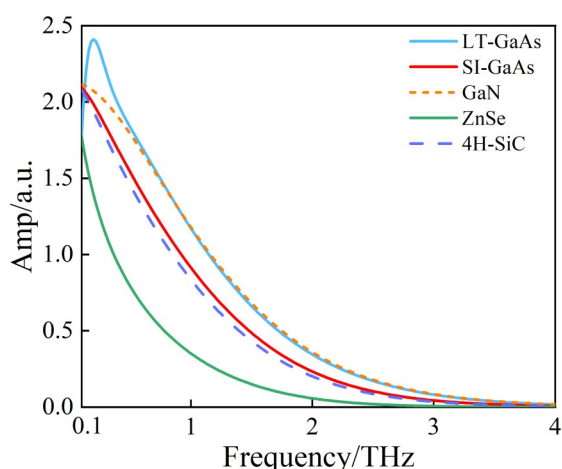


图2 不同材料的光电导天线辐射太赫兹波的远场频谱图
Fig. 2 Far field spectra of THz waves generated by photoconductive antennas with different substrate materials

由图 2 可知,五种天线辐射太赫兹波的频谱范围在 0.1~4 THz 之间,其中,LT-GaAs 天线辐射太赫兹波的频谱宽度最宽,可达到 4 THz,其峰值频率最高,为 0.33 THz;SI-GaAs 天线辐射太赫兹波的峰值频率为 0.22 THz;4H-SiC、ZnSe、GaN 三种材料的光电导天线辐射太赫兹波的远场频谱峰值频率在 0.1 THz 附近,这是由于他们的载流子寿命较长导致的,GaN

天线辐射太赫兹波的带宽大于 ZnSe 天线和 4H-SiC 天线,因为其较短的载流子寿命使其辐射太赫兹波的时域波形较窄,从而得到较大的频谱宽度。

如图 3 所示,在偏置电压 1×10^3 V/cm 以及饱和光通量下,对 LT-GaAs 天线和 SI-GaAs 天线辐射太赫兹波的时域与频域模拟结果进行对比,可以看出 LT-GaAs 天线辐射太赫兹波的时域与频域信号都要优于 SI-GaAs 天线。对于 LT-GaAs 材料,由于较短的载流子寿命和较短的弛豫时间,其电导率高,通过方程(1)、(2)可知,较高的电导率对提高辐射太赫兹波的场强有利。同时,由于衬底材料载流子寿命对光电-太赫兹波转换效率有重要影响,较短的载流子寿命意味着载流子可以更快地复合,光电导天线中的瞬态电流随时间变化更快,因此产生太赫兹波的时域波形的半高全宽更小,对应的频谱带宽更宽。

通过上述模拟结果可知,在相同的偏置电场和各自的饱和触发光能下,对相同间隙的大孔径光电导天线,在相同的远场位置处,LT-GaAs 天线辐射太赫兹波的峰值最高、带宽最大、峰值频率最高,这得益于 LT-GaAs 较短的载流子寿命。

碳化硅有多种晶体结构,包括四方晶体结构(3C-SiC)、六方晶体结构(4H-SiC、6H-SiC)和立方晶体结构(2H-SiC、15R-SiC)等,由于碳化硅具有高电子迁移率、高击穿电场以及耐高温的优异性能,用其制备的光电导天线可以承受更高的偏置电场,对提高天线的辐射功率有利。图 4 展示了偏置电压为 1×10^6 V/cm 以及在各自的饱和光通量下,三种 SiC 衬底材料的天线辐射太赫兹波的远场模拟结果。

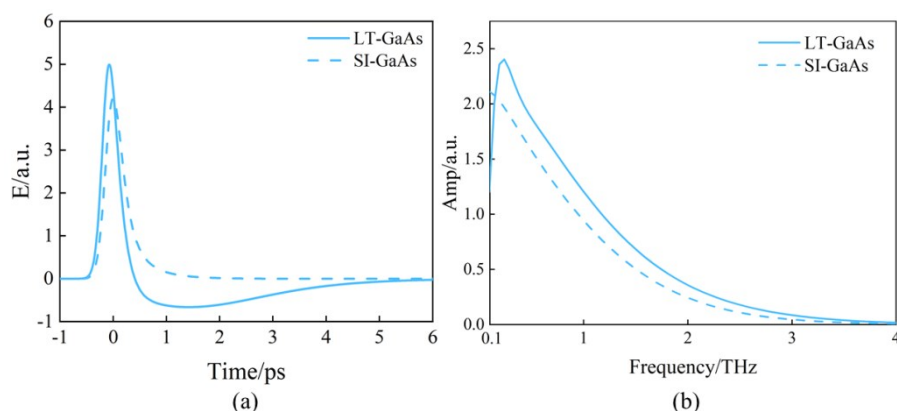


图3 LT-GaAs 天线和 SI-GaAs 天线辐射太赫兹波远场的时域波形和频谱的模拟结果:(a)太赫兹波时域波形;(b)太赫兹波频谱

Fig. 3 Simulated time-domain waveforms and spectra of far-field THz waves generated by LT-GaAs and SI-GaAs antennas: (a) THz time-domain waveforms; (b) THz spectra

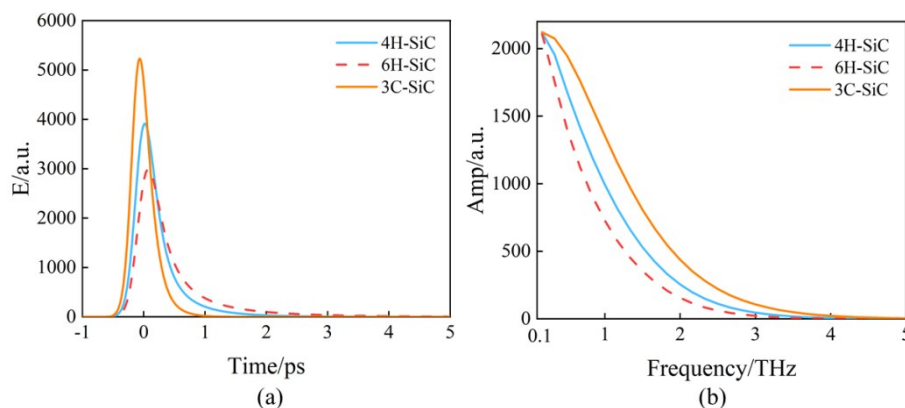


图4 SiC天线辐射太赫兹波的时域波形和频谱:(a)太赫兹波时域波形;(b)太赫兹波频谱

Fig. 4 Time-domain waveforms and spectra of THz waves radiated by three kinds of SiC antennas: (a) THz time-domain waveforms; (b) THz spectra

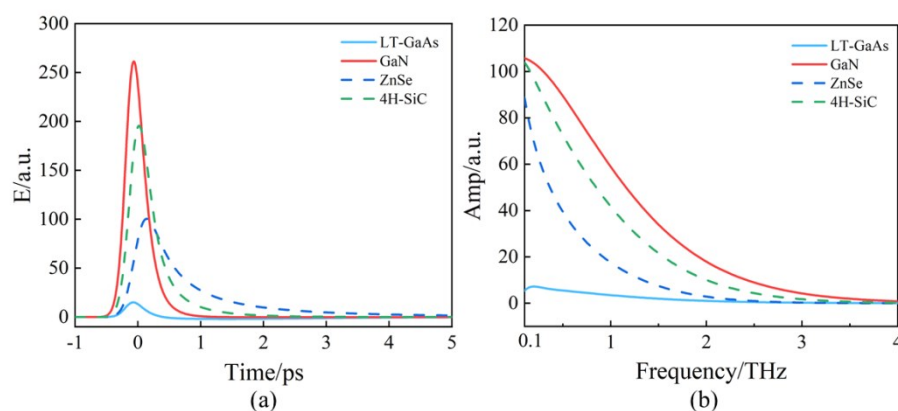


图5 饱和光通量、不同偏置电场下,不同衬底材料光电导天线辐射太赫兹波的时域波形与频谱:(a)太赫兹波时域波形;(b)太赫兹波频谱

Fig. 5 Time-domain waveforms and spectra of THz waves radiated by photoconductive antennas with different substrate materials illuminated by their respective saturated light flux and biased by different electric fields: (a) THz time-domain waveforms; (b) THz spectra

3C-SiC天线的远场太赫兹波强度大于其他两种材料,因为3C-SiC的电子迁移率相对较高,载流子弛豫时间相对较短。但是,由于3C-SiC的能带宽度较小(2.2 eV),而4H-SiC(3.23 eV)和6H-SiC(3 eV)带宽较大,它们的击穿场强约是3C-SiC的两倍(4H-SiC为 2.2×10^6 V/cm,6H-SiC为 2.4×10^6 V/cm),因此在兼顾辐射功率和带宽时,4H-SiC是三种SiC材料中的最佳选择。

4 饱和光通量、不同偏置电场下,不同衬底材料光电导天线辐射太赫兹波的模拟分析

考虑到不同光电导天线材料的击穿场强不同,而场强是影响天线辐射性能的一个关键因素,GaAs材料带隙较小,因此击穿电场较低;GaN、ZnSe、SiC

等第三代半导体禁带宽度大,击穿电场高,在较高的偏置电场下可以获得更高的太赫兹辐射强度。

图5模拟了偏置电场为 3×10^3 V/cm的LT-GaAs天线与偏置电场为 5×10^4 V/cm的GaN、ZnSe、4H-SiC天线辐射的远场太赫兹波时域波形和频谱的对比。由结果可知,GaN、ZnSe、4H-SiC天线辐射太赫兹波的幅值都远高于LT-GaAs天线辐射太赫兹波的幅值,其中GaN天线的太赫兹波幅值高达LT-GaAs天线的18倍以上,幅值最低的ZnSe天线产生的太赫兹波是LT-GaAs天线的7倍多。因此,第三代半导体在高偏置电场情况下具有高的太赫兹信号强度,并且他们的频谱宽度都可以达到或接近3 THz,这符合研究太赫兹产生与探测的主要频率范围。

在实际应用中,由于较强的太赫兹信号可以传播较远的距离,系统具有更高的信噪比,具有更广阔的应用前景,因此第三代半导体作为太赫兹光电导天线衬底材料的研发与应用对太赫兹技术的广泛应用有着极大的促进作用。

5 结语

本文分析了通常使用的两种 GaAs 光电导衬底材料以及三种第三代半导体光电导衬底材料的性能,基于电流瞬冲模型对以上五种半导体材料的光电导天线辐射太赫兹波进行仿真分析。当施加偏置电场为 1×10^3 V/cm,且在饱和光通量的条件下,LT-GaAs 天线辐射的太赫兹波具有最高的幅值和最大的带宽,这得益于其较短的载流子寿命。第三代半导体材料具有禁带宽度大、耐压高的优点,对比了偏置电场为 3×10^3 V/cm 的 LT-GaAs 光电导天线与偏置电场为 5×10^4 V/cm 的 GaN、ZnSe、4H-SiC 的光电导天线时域与频域的太赫兹信号,结果表明第三代半导体材料制备的天线击穿电场强,可以产生更强的太赫兹辐射。然而,利用第三代半导体制备光电导天线的工艺尚不成熟,并且需要使用波长较短的紫外飞秒激光器触发,这些因素制约着第三代半导体光电导天线的应用。本文关于天线材料对天线辐射性能的理论研究对研制新型第三代半导体光电导天线具有一定的参考价值。

References

- [1] Pandit N, Jaiswal R K, Pathak N P. Towards development of a non-intrusive and label-free THz sensor for rapid detection of aqueous bio-samples using microfluidic approach [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 2021, **15**(1): 91–101.
- [2] Markelz A G, Mittleman D M. Perspective on terahertz applications in bioscience and biotechnology [J]. *ACS Photonics*, 2022, **9**(4): 1117–1126.
- [3] Yan Z, Zhu L G, Meng K, et al. THz medical imaging: from in vitro to in vivo [J]. *Trends in Biotechnology*, 2022, **40**(7): 816–830.
- [4] Shen S, Liu X, Shen Y, et al. Recent advances in the development of materials for terahertz metamaterial sensing [J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, **10**(1): 2101008.
- [5] Leitenstorfer A, Moskalenko A S, Kampfrath T, et al. The 2023 terahertz science and technology roadmap [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2023, **56**(22): 223001.
- [6] Sariahdeen H, Alouini M S, Al-Naffouri T Y. An overview of signal processing techniques for terahertz communications [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2021, **109**(10): 1628–1665.
- [7] Akyildiz I F, Han C, Hu Z, et al. Terahertz band communication: An old problem revisited and research directions for the next decade [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, **70**(6): 4250–4285.
- [8] Auston D H, Cheung K P, Smith P R. Picosecond photoconducting Hertzian dipoles [J]. *Applied Physics Letters*, 1984, **45**(3): 284–286.
- [9] Zhang X C, Ma X F, Jin Y, et al. Terahertz optical rectification from a nonlinear organic crystal [J]. *Applied Physics Letters*, 1992, **61**(26): 3080–3082.
- [10] Karpowicz N, Zhang X C. Coherent terahertz echo of tunnel ionization in gases [J]. *Physical Review Letters*, 2009, **102**(9): 093001.
- [11] Zhang L L, Wang W M, Wu T, et al. Strong terahertz radiation from a liquid–water line [J]. *Physical Review Applied*, 2019, **12**(1): 014005.
- [12] You D, Jones R R, Bucksbaum P H, et al. Generation of high-power sub-single-cycle 500-fs electromagnetic pulses [J]. *Optics Letters*, 1993, **18**(4): 290–292.
- [13] Tani M, Matsuura S, Sakai K, 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.
- [14] Holzman J F, Elezzabi A Y. Two-photon photoconductive terahertz generation in ZnSe [J]. *Applied physics letters*, 2003, **83**(14): 2967–2969.
- [15] Imafuji O, Singh B P, Hirose Y, et al. High power sub-terahertz electromagnetic wave radiation from GaN photoconductive switch [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **91**(7): 071112.
- [16] Ropagnol X, Bouvier M, Reid M, et al. Improvement in thermal barriers to intense terahertz generation from photoconductive antennas [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, **116**(4): 043107.
- [17] Darrow J T, Zhang X C, Auston D H, et al. Saturation properties of large-aperture photoconducting antennas [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1992, **28**(6): 1607–1616.
- [18] Tong-Yi Z, Jun-Cheng C. Study of the surface and far fields of terahertz radiation generated by large-aperture photoconductive antennas [J]. *Chinese Physics*, 2004, **13**(10): 1742–1746.
- [19] Ropagnol X, Morandotti R, Ozaki T, et al. Toward high-power terahertz emitters using large aperture ZnSe photoconductive antennas [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2011, **3**(2): 174–186.
- [20] Kaminski N, Hilt O. SiC and GaN devices – wide bandgap is not all the same [J]. *IET Circuits, Devices & Systems*, 2014, **8**(3): 227–236.