

文章编号: 1672-8785(2025)08-0007-06

光纤耦合式太赫兹辐射源 设计与测试

张桂鸣 朱军锋 张 亭 杜志强

吴 斌 杨延召 蔡高航

(中国电子科技集团公司第 41 研究所, 山东 青岛 266555)

摘 要: 光电导天线(Photoconductive Antenna, PCA)是目前太赫兹时域光谱系统中使用最多的太赫兹辐射源之一。根据 PCA 产生太赫兹信号的原理, 利用基于 InGaAs/InAlAs 超晶格材料的 PCA 芯片, 开展 1560 nm 激光激发的光纤耦合式太赫兹辐射源模块的设计与仿真。通过集成化的光路与结构设计, 获得了小型化光纤耦合式太赫兹辐射源。在平均功率为 25 mW、脉宽为 100 fs、中心波长为 1560 nm 的飞秒脉冲激光激发下, 太赫兹辐射源单条波形采样中得到的太赫兹信号光谱范围达到 0.1~2.9 THz, 同时动态范围达到 57 dB。另外, 通过实验探究了太赫兹辐射源输出信号幅值与偏置电压及激励光功率之间的关系。

关键词: 光电导天线; 太赫兹辐射源; 光纤耦合; InGaAs/InAlAs 超晶格

中图分类号: O433.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.08.002

Design and Testing of Fiber-Coupled Terahertz Radiation Source

ZHANG Gui-ming, ZHU Jun-feng, ZHANG Ting, DU Zhi-qiang,

WU Bin, YANG Yan-zhao, CAI Gao-hang

(The 41st Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao 266555, China)

Abstract: Photoconductive antenna (PCA) is one of the most commonly used terahertz (THz) radiation sources in terahertz time-domain spectroscopy systems. Based on the principle of terahertz signal generation by PCA, a fiber-coupled terahertz radiation source module excited by a 1560 nm laser is designed and simulated using a PCA chip based on InGaAs/InAlAs superlattice. Through the integrated design of optical path and structure, a miniaturized fiber-coupled terahertz radiation source is achieved. Under excitation with a femto-second pulse laser with an average power of 25 mW, a pulse width of 100 fs, and a central wavelength of 1560 nm, the terahertz signal spectrum obtained from a single waveform sampling of the terahertz radiation source extends from 0.1 to 2.9 THz, with a dynamic range of 57 dB. Furthermore, the relationship between the output signal amplitude of the terahertz radiation source and the bias voltage and excitation light power is experimentally investigated.

Key words: photoconductive antenna; terahertz radiation source; fiber-coupled; InGaAs/InAlAs superlattice

收稿日期: 2024-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(62127804); 国家重点研发计划项目(2023YFF0722400)

作者简介: 张桂鸣(1995-), 男, 河南周口人, 硕士, 主要从事光电测试、太赫兹光谱等方面的研究。

E-mail: gmzhang7905@163.com

0 引言

太赫兹波是指频率为 0.1~10 THz 的电磁波^[1]。它具有很多特殊的性质,在爆炸物检测、隐身材料研究、生物医学、无损检测等众多领域都有重要的研究价值^[2-5]。自太赫兹技术诞生以来,高效便携太赫兹源的研制一直是太赫兹技术研究领域的关键问题。目前太赫兹波的产生有多种方式,包含真空电子器件、固体微波器件、量子级联激光器、非线性晶体整流以及光电导天线等技术^[6-9]。相较于其他方案,PCA 具有光谱宽度大、体积小、室温工作、易于集成、易于批量制备等优势,是目前最成熟的太赫兹源,被广泛应用于太赫兹时域光谱仪(Terahertz Time-Domain Spectrometer, THz-TDS)等太赫兹仪器。

PCA 太赫兹源能够在飞秒脉冲激光激励下产生光生载流子;在外加偏置电场的作用下,载流子运动形成的瞬态光电流向外辐射出太赫兹波^[10]。不同 PCA 太赫兹源在激励源、光电导材料、电极形状等方面存在差异。根据激励源波长的不同,常见 PCA 太赫兹源主要可以分为 800 nm 激光激励 PCA 太赫兹源和 1550 nm 激光激励 PCA 太赫兹源。PCA 采用 III/IV 族材料作为光电导材料,其中 800 nm 激光激励 PCA 一般选用 GaAs 类材料。这种材料自 20 世纪 80 年代以来一直作为重要的光电导材料使用,故材料生长工艺成熟,国内外相关研究也最多^[11-12]。1550 nm 激光激励 PCA 通常选用 InGaAs 类材料和 InGaAs/InAlAs 超晶格材料。由于高性能 InGaAs 生长需要采用分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)技术,设备要求较高,国内只有少数单位开展过相关研究^[13]。此类产品目前被国外 Menlo Systems、TOPTICA 等公司垄断。相比于 800 nm 激光激励 PCA,1550 nm 激光激励 PCA 不需要昂贵的激光器作为泵浦源,能更方便地集成在全光纤光路太赫兹系统中,有效降低成本和减小体积,并带来更高的稳定性。它已取代 800 nm 激光激励 PCA,成为当前太赫兹时域

光谱系统中应用最广泛的太赫兹辐射源。

本文利用基于 InGaAs/InAlAs 超晶格材料的 PCA 芯片,设计和封装了一种 1550 nm 激光激发的光纤耦合式太赫兹辐射源模块;采用太赫兹时域光谱系统测试了太赫兹辐射源单次扫描后得到的光谱信号;最后,进一步通过实验探究了太赫兹辐射源产生信号幅值与偏置电压及激励光功率之间的关系。

1 基本原理

对于小孔径 PCA 和强场大孔径 PCA,都可以使用德鲁德-洛伦兹(Drude-Lorentz, DL)模型对其太赫兹电场进行推导^[10,14],然后根据推导结果理解太赫兹辐射电场与激励光及偏置电压之间的关系。DL 模型对 PCA 中飞秒激光激发的电子-空穴对的载流子输运过程进行了理论推导,其中光生载流子被当作电子气处理,半导体材料中的扩散效应由于相较于空间-电荷场屏蔽效应要小得多而未被考虑。

在 PCA 电极上外加偏置电压后,飞秒脉冲激光在 PCA 电极间隙附近激发的载流子同时进行漂移与复合过程。这种情况下的载流子密度动力学可以被描述为

$$\frac{dn_c(t)}{dt} = -\frac{n_c(t)}{\tau_c} + G(t) = -\frac{n_c(t)}{\tau_c} + G_0 \exp\left(-\frac{t^2}{\delta t^2}\right) \quad (1)$$

式中, $n_c(t)$ 是自由载流子密度; $G(t)$ 是光脉冲激发下载流子的产生率; G_0 是 $t=0$ 时 $G(t)$ 的值,即 $t=0$ 时光脉冲激发下载流子的产生率; τ_c 是自由载流子寿命; δt 为激光脉冲持续时间。

与电子相比,空穴的有效质量非常大,因而移动速度十分缓慢,在光生电流产生作用中的贡献可以忽略不计。所以只需考虑电子运动速度的变化:

$$\frac{d\vec{v}_e(t)}{dt} = -\frac{d\vec{v}_e(t)}{\tau_s} + \frac{e}{m_e} \vec{E}_{dc} \quad (2)$$

式中, $\vec{v}_e(t)$ 是电子平均运动速度; τ_s 是半导体中载流子漂移速度从零达到稳态值所需要的动量弛豫时间; m_e 是电子的有效质量; $\vec{E}_{dc}$ 是外

加偏置电压电场。通过文献与公式推导可知, 太赫兹电场满足以下关系:

$$\vec{E}_{THz} = -\frac{A}{4\pi\epsilon_0 c^2 r} \frac{\partial \vec{J}(t)}{\partial t} \propto en_e(t) \frac{\partial \vec{v}_e(t)}{\partial t} + e\vec{v}_e(t) \frac{\partial n_e(t)}{\partial t} \quad (3)$$

式中, A 是电流可流经区域的面积; c 为真空中的光速; r 为距离天线辐射源的直线距离; ϵ_0 是自由空间介电常数; $\vec{J}(t)$ 是半导体材料表面电流密度; $n_e(t)$ 是电子载流子密度。

由式(3)可知, 远场辐射的幅值正比于载流子密度的变化和载流子的加速度。除了光电导材料因素之外, 载流子密度还与激励光强度有关, 载流子的加速度也与外加偏置电压电场有关, 因此太赫兹辐射源的辐射电场幅值与偏置电压及激励光功率之间密切关联。

2 方案设计与仿真

InGaAs/InAlAs 超晶格作为 PCA 材料, 能够响应 1550 nm 波段的飞秒脉冲激光, 具有载流子寿命短、暗电阻高等优点。本文选用 InP:Fe 半绝缘材料作为衬底, 借助 MBE 技术生长包含 100 个周期的 InGaAs/InAlAs 超晶格, 并在生长完成的外延材料上使用湿法腐蚀方法形成受光台面, 最后通过磁控溅射技术在材料表面制作 Ti/Au 天线电极。图 1 为受光台面与 PCA 电极的局部图(台面尺寸为 $40\ \mu\text{m} \times 55\ \mu\text{m}$)。因此, 为保证太赫兹辐射功率达到最大, 激光光斑尺寸应设计为直径 $50\ \mu\text{m}$ 左右。

对基于 PCA 的太赫兹辐射源模块进行设计。通过优化光路设计, 可以实现太赫兹源的小型化, 并提升太赫兹源的稳定性。传统上,

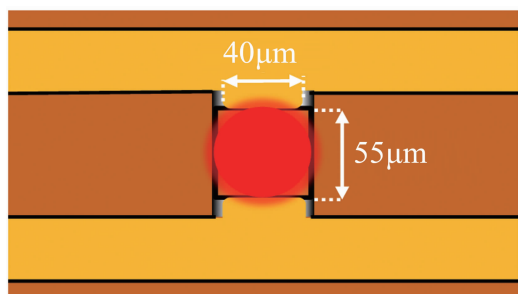


图 1 PCA 局部结构

为实现激励光在 PCA 前聚焦成较小光斑, 使用准直透镜/聚焦凸透镜组合。这种光路方式由于尺寸较大, 主要应用于空间光路太赫兹系统。随着太赫兹仪器的发展, 全光纤光路太赫兹系统逐渐成为主流, 因此需要对 PCA 激励光路的聚焦方法开展设计优化。本文选用基于自聚焦透镜的保偏光纤准直器实现激励光的传输和聚焦。

自聚焦透镜是一种折射率沿径向渐变的柱状特殊光学透镜, 其折射率可以表示为

$$n^2(r) = n_0^2(1 - g^2 r^2) \quad (4)$$

式中, n_0 为透镜中心轴线的折射率; g 为折射率分布常数。

普通透镜中, 光沿着直线传播, 在透镜表面处发生折射。自聚焦透镜中, 径向折射率分布近似为抛物线变化, 光路以一种曲线方式连续折射、会聚光线。

使用 ZEMAX 仿真工具, 可以对光束在自聚焦中的传输特性进行分析。选择 SLS-1.0 作为镜面模型, 光源为点光源(波长为 $1.55\ \mu\text{m}$), 透镜直径为 1 mm、厚度为 3.8 mm, 数值孔径为 0.3; 改变光源与透镜入射端面之间的距离, 观察自聚焦透镜出射端面后 2 mm 处的光斑。当光源距离入射面 0.5 mm 时, 光斑的几何直径约为 $50\ \mu\text{m}$ 。自聚焦透镜在 ZEMAX 中的光路如图 2 所示。

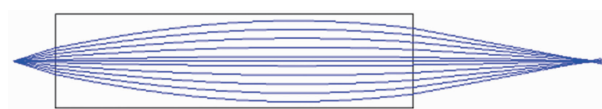


图 2 自聚焦透镜光路

PCA 产生的太赫兹信号向外辐射时, 从光密介质(光电导材料)向光疏介质(空气)传输, 发散严重。为了提高出射太赫兹波的方向性和传输效率, 需要在 PCA 出射面对太赫兹波进行聚束。高阻硅透镜材料是一种电阻率很高的硅晶体。这种材料对太赫兹波吸收造成的损耗很小, 在太赫兹波段的折射率约为 3.4, 与光电导材料的太赫兹折射率相匹配, 能够有

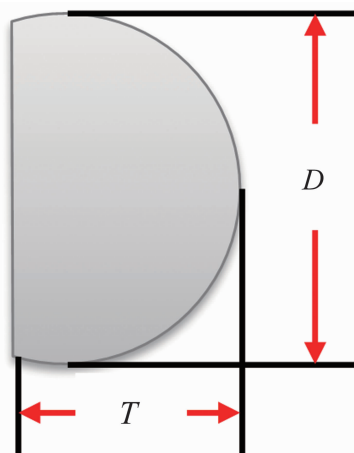


图 3 高阻硅超半球透镜的尺寸参数

效耦合出 PCA 中产生的太赫兹信号。通过设计高阻硅超半球镜参数,可以大大提升太赫兹波的会聚能力。图 3 所示为高阻硅超半球镜的尺寸参数设置。其中,透镜直径为 D ,厚度为 T 。

同样,使用 ZEMAX 仿真工具对高阻硅超半球镜进行建模分析。考虑到透镜与 PCA 衬底材料的折射率相同(均为 3.4),将 PCA 辐射产生区域设为点光源,改变透镜厚度 T (透镜直径 D 为 10 mm),观察光束的光路变化。当透镜厚度为 6.35 mm 时,光束光路如图 4 所示。可以看出,它能够较好地会聚光束;在距透镜出射面 50 mm 处,太赫兹光斑的直径小于 20 mm。

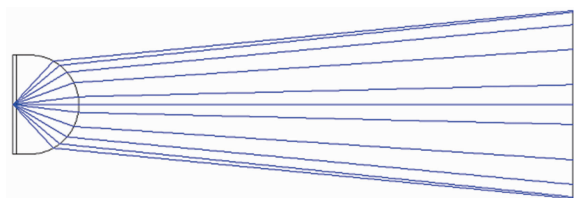


图 4 高阻硅超半球透镜光路图

3 光谱实验与结果分析

通过搭建太赫兹时域光谱系统对光纤耦合式太赫兹辐射源进行测试。系统方案图如图 5 所示。其中,飞秒脉冲光源为 TOPTICA 公司生产的 FemtoFERb 1560 掺铒光纤飞秒激光器,飞秒激光器光谱中心波长为 1560 nm,重复频率约为 100 MHz,平均功率约为 90 mW,PCA 前激励光脉冲宽度约为 100 fs。飞秒激光器输

出的脉冲激光经过 1×2 保偏光纤耦合器分成两路。一路经过可调光学衰减器(Variable Optical Attenuator, VOA)后,输入光纤耦合式太赫兹辐射源,激励太赫兹辐射源产生载流子;载流子在太赫兹辐射源外加直流偏置电压的作用下加速运动,产生太赫兹波并辐射出去;在经过抛物面准直、聚焦光路后,由太赫兹探测器接收。另一路经过光延迟线后输入太赫兹探测器。太赫兹探测器选用 Menlo Systems 公司生产的 TERA 15 光电导接收天线,光电导接收天线被飞秒脉冲激光激励产生载流子;载流子在接收的太赫兹电场作用下运动,产生微弱的电流信号;电流信号经过放大器放大,被数据采集卡采集并上传到计算机中进行处理和显示。直流偏置电压源选择大恒光电公司生产的 HVM-500USB 高压源,其电压在 5~100 V 范围内调节。光学延迟线采用 General Photonics 公司生产的 MDL-002 型产品,其延迟范围在 0~560 ps 内可以调节。电流信号放大器为 Femto 公司生产的 DLPCA-200 低噪声微弱信号放大器,其放大倍数设置为 10^7 V/A。使用的 USB61210 采集卡来自上海简仪公司,其采样率为 2 MS/s,分辨率为 16 位。

3.1 光谱测试

设置直流偏置电压为 60 V,调节激励光功率为 25 mW,使用自相关仪测得飞秒激光脉冲宽度约为 100 fs。设置光延迟线扫描范围为 0~100 ps。在光延迟线从 0 ps 扫描到 100 ps 的过程中,使用等效时间采样法采集一条光纤耦合式太赫兹辐射源产生的太赫兹信号的时域谱,经过快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)得到太赫兹辐射源产生太赫兹信号的频域谱。从图 6 和图 7 中的数据可以看出,太赫兹辐射发射的太赫兹信号的时域光谱波形信噪比良好,频域光谱范围为 0.1~2.9 THz,动态范围约为 57 dB。

3.2 激励光功率与偏置电压影响分析

图 8 所示为偏置电压不变、激励光功率改变的情况下得到的太赫兹辐射源产生太赫兹信

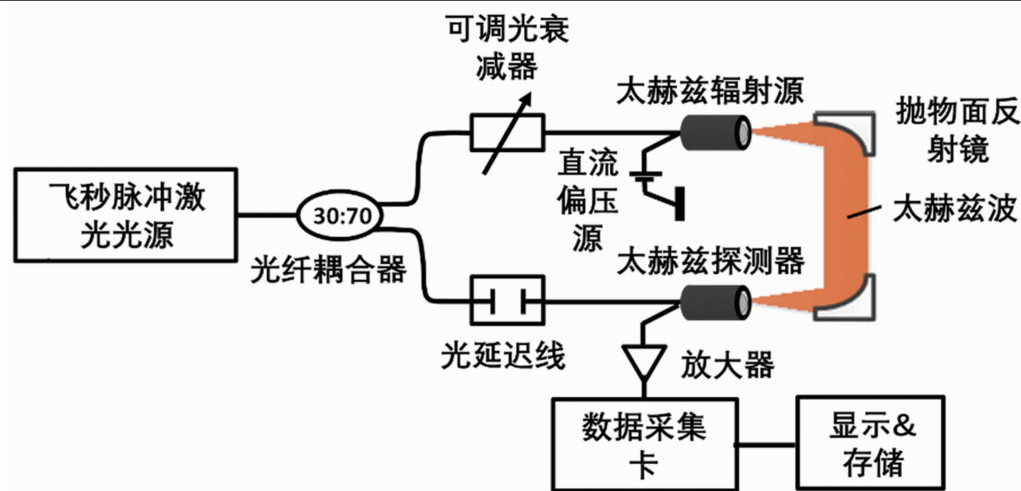


图 5 太赫兹时域光谱系统示意图

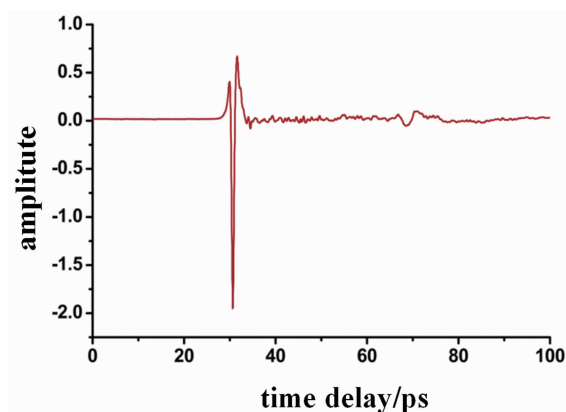


图 6 光纤耦合式太赫兹辐射源时域谱

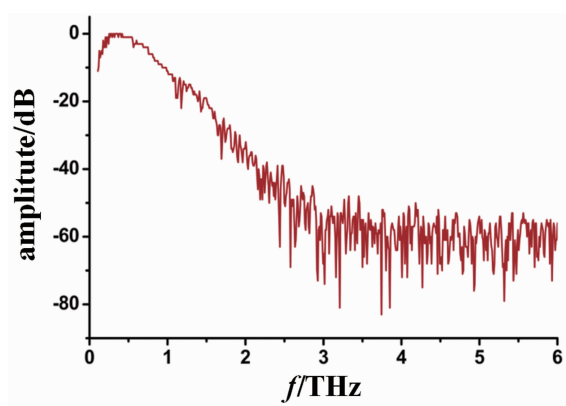


图 7 光纤耦合太赫兹辐射源频域谱

号幅值数据。使用多项式拟合方法对数据进行了拟合。结果表明,随着激励光功率的增大,太赫兹辐射源产生信号幅值增大,但增幅逐渐放缓。这是因为在激励光照射下,光生载流子在外加偏置电场作用下向两端运动而分离,形成与外加偏置电场相反的内建电场,导致空间

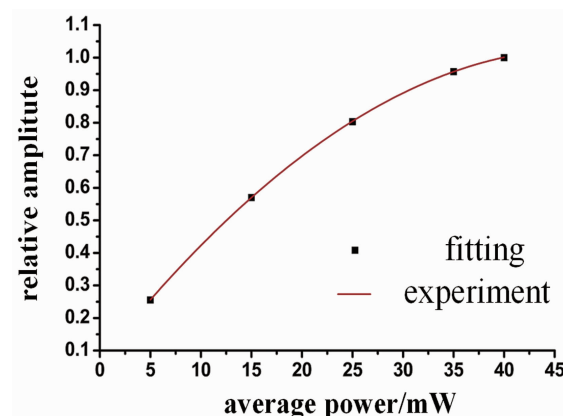


图 8 太赫兹辐射源产生的信号幅值与激励光功率的关系图

电荷屏蔽效应。

图 9 所示为激励光功率不变、偏置电压强度改变时太赫兹辐射源产生太赫兹信号幅值发生的变化。同样进行多项式拟合,得到图 9 中的曲线。随着偏置电压的增大,太赫兹信号幅值与偏置电压之间基本成线性关系。当偏置电压达到 75 V 时,继续将偏置电压增至 80 V,信号幅值不再增大。此时,太赫兹辐射源所加偏置电压达到一个较大值(即 16 kV/cm),接近 PCA 可能击穿阈值。若继续增大偏置电压,PCA 极有可能击穿,所以太赫兹辐射源的安全工作电压应当小于 75 V。

4 结束语

太赫兹辐射源是太赫兹时域光谱系统中的关键核心器件,研究光纤耦合式太赫兹辐射源

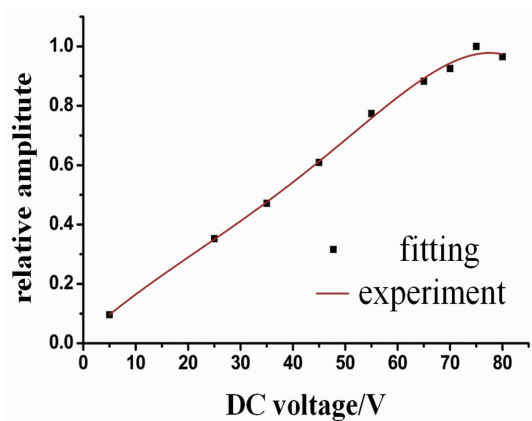


图 9 太赫兹辐射源产生的信号幅值与偏置电压的关系图

对小型化全光纤太赫兹时域光谱仪的开发具有重要意义。本文基于 InGaAs/InAlAs 超晶格光电导天线,开展了小型化光纤耦合式太赫兹辐射源模块设计与研制,并搭建了相应的测试系统。可以看出,该太赫兹辐射源单条扫描光谱信号的频域范围达到 0.1~2.9 THz,同时动态范围达到 57 dB。另外,通过实验探究了太赫兹辐射源输出太赫兹信号幅值与偏置电压及激励光功率之间的关系,并对实验中出现的饱和现象进行了分析。结果表明,本文研制的光纤耦合式太赫兹辐射源具有单条波形光谱质量高、1550 nm 激光直接激发、击穿阈值较高等优点。由于目前测试中还存在因工艺与光路问题产生的次生小峰,降低了光谱质量,未来将进一步优化制作工艺与测试系统,遏制次生峰的产生。

参考文献

- [1] Fattinger C, Grischkowsky D. Terahertz Beams [J]. *Applied Physics Letters*, 1989, **54**(6): 490-492.
- [2] 张亮亮,张存林,赵跃进,等.爆炸性物质太赫兹时间分辨光谱测量[J].*光谱学与光谱分析*, 2007, **27**(8): 1457-1460.
- [3] 朱旭,许浩,黄应千.太赫兹隐身技术应用研究综述[J].*兵器装备工程学报*, 2022, **43**(S1): 16-19.
- [4] 朱亦鸣,施辰君,吴旭,等.生物医学检测中太赫兹光谱技术的算法研究[J].*光学学报*, 2021, **41**(1): 385-394.
- [5] 金玉环,朱凤霞,封建欣.基于太赫兹技术的复合材料无损检测研究综述[J].*太赫兹科学与电子信息学报*, 2023, **21**(11): 1295-1305.
- [6] 窦玉焕,束小建,吴岱,等.中物院 1~4.2 THz FEL 装置波导谐振腔优化设计[J].*强激光与粒子束*, 2022, **34**(3): 70-74.
- [7] Li R, Xu Y, Zhang S, et al. High brightness terahertz quantum cascade laser with near-diffraction-limited Gaussian beam [J]. *Light: Science & Applications*, 2024, **13**(10): 2124-2130.
- [8] Li F, Zhong K, Zhang Y, et al. Optical rectification in 4H-SiC: paving the way to generate strong terahertz fields with ultra-wide bandwidth [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2023, **11**(5): 115-126.
- [9] Yasuo M, Hiromitsu A, Takahiro N K. Terahertz wave emission with 1.5 μm pump from photoconductive antenna using stacked Er-doped-InAs quantum dot layers with ultrafast carrier relaxation [J]. *Journal of Applied Physics*, 2023, **134**(14): 143101.
- [10] Piao Z, Tani M, Sakai K. Carrier Dynamics and Terahertz Radiation in Photoconductive Antennas [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2000, **39**(1): 96-100.
- [11] Berry C W, Jarrahi M. Principles of Impedance Matching in Photoconductive Antennas [J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2012, **33**(12): 1182-1189.
- [12] Shi W, Hou L. Theoretical study of field intensity of THz radiation from GaAs large-aperture photoconductive antennas [J]. *Chinese Physics Letters*, 2006, **23**(10): 2867-2870.
- [13] 陈益航,杨延召,张桂铭,等. InGaAs/InAlAs 光电导太赫兹发射天线的制备与表征[J].*太赫兹科学与电子信息学报*, 2023, **21**(12): 1403-1409.
- [14] 熊中刚,邓琥,熊亮,等.光电导天线太赫兹辐射峰值调控研究[J].*强激光与粒子束*, 2020, **32**(3): 80-87.