

文章编号: 2095-4980(2024)10-1063-10

太赫兹光热电探测器读出方法

张金铎^{a,b}, 陈 猛^b, 刘睿丰^{a,b}, 王迎新^{*a,b}

(清华大学 a.工程物理系; b.危爆物品探测技术国家工程研究中心, 北京 100084)

摘 要: 太赫兹光热电探测器基于热生载流子在温度梯度驱使下迁移的原理实现太赫兹波探测, 具有快响应、超宽带、自供电、室温工作及结构简单等优势, 受到广泛关注。目前, 探测器读出主要采用调制-解调方法, 通过电流放大器与锁相放大器级联实现测量, 集成度低, 成本高, 难以实现阵列读出。为满足光谱测量、成像感知等应用需求, 本文对光热电阵列探测器单元读出方法进行研究。从探测器机理出发, 对输出信号进行建模分析; 在此基础上设计板级专用读出电路, 实现前置放大与锁相放大功能。测试表明, 该方法可以在强噪声背景环境下对太赫兹光热电探测器进行高精度度读出, 增益达到 140.7 dB, 信噪比改善了 38.3 dB。

关键词: 读出电路; 光热电效应; 太赫兹波; 锁相放大; 长波光子学

中图分类号: TN710

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024379

Readout method of terahertz photothermoelectric detectors

ZHANG Jinduo^{a,b}, CHEN Meng^b, LIU Ruifeng^{a,b}, WANG Yingxin^{*a,b}

(a.Department of Engineering Physics; b.National Engineering Research Center of Dangerous Articles and Explosives Detection Technologies, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Terahertz photothermoelectric detectors are based on the principle of thermogenerated carriers migrating under the influence of a temperature gradient to achieve terahertz wave detection. They have advantages such as fast response, ultra-wideband, self-powered, room temperature operation, and simple structure, which have attracted widespread attention. Currently, the readout of detectors mainly adopts a modulation-demodulation method, realized by cascading a current amplifier with a lock-in amplifier for measurement, which has low integration, high cost, and is difficult to achieve array readout. To meet the application requirements of spectral measurement and imaging perception, this paper studies the readout method of the photothermoelectric array detector unit. Starting from the detector mechanism, the output signal is modeled and analyzed; based on this, a board-level dedicated readout circuit is designed to achieve front-end amplification and lock-in amplification functions. Tests show that this method can achieve high-precision readout of terahertz photothermoelectric detectors in a strong noise background environment, with a gain of 140.7 dB, and the signal-to-noise ratio is improved by 38.3 dB.

Keywords: readout circuit; photothermoelectric effect; terahertz wave; lock-in amplifier; long-wavelength photonics

太赫兹波段频率范围为 0.1~10 THz(对应波长范围为 3 000~30 μm), 是电子学领域到光子学领域的过渡区域, 属于长波光子学研究的重要领域。太赫兹波具有安全性高、穿透性好、“指纹”谱特征丰富等诸多优势, 在安检^[1]、通信^[2]、生物医学^[3]等领域具有广阔的应用前景。太赫兹探测技术主要分为电子学探测方法、光学探测方法与光热效应探测方法。其中, 光热效应探测方法响应带宽较大, 在 0.1~10 THz 范围内均可实现有效探测, 逐渐成为超宽带太赫兹波探测的主流技术, 代表器件有微测辐射热计^[4]、高莱探测器^[5]、热释电探测器^[6]和光热电探测器^[7]等。太赫兹光热电探测器通过吸收太赫兹波形成温度梯度, 进而基于热生载流子在温度梯度驱使下发生

收稿日期: 2024-08-16; 修回日期: 2024-09-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62105178; 62375149; 62327804)

*通信作者: 王迎新 email:wangyingxin@tsinghua.edu.cn

迁移的原理实现太赫兹探测, 具有快响应、超宽带、自供电、室温工作及结构简单等优势, 有望在下一代超宽带长波光子探测技术中得到广泛应用。

读出电路主要对探测器输出的电信号进行放大和滤波, 以便进行模数转换, 需具有较好的专用性与集成性。目前, 对光热效应太赫兹探测器专用读出电路的研究主要集中在微测辐射热计与热释电探测器。刘新华等^[8]针对 Nb_5N_6 微测辐射热计设计了包括阻抗变换、信号放大、低通滤波和工频陷波模块的低噪声单通道读出电路, 信号增益达 940。裴宇峰^[9]针对 1×64 线阵列 Nb_5N_6 微测辐射热计设计了包括直流偏置模块、放大模块、多路选通模块与数据采集控制模块的板级读出电路, 1 kHz 频率处等效输入噪声谱密度约为 $6.4 \text{ nV/Hz}^{0.5}$, 与 Nb_5N_6 微测辐射热计本征噪声相当。姜周^[10]则进一步针对该线阵列探测器设计了全差分读出电路, 最小可读出 $10 \mu\text{V}_{\text{pp}}$ 的信号, 通道间均一性良好, 适合开发高效低成本的太赫兹检测系统。王春^[11]针对 4×4 面阵 Nb_5N_6 微测辐射热计设计了包含电容反馈跨阻放大器(Capacitive Transimpedance Amplifier, CTIA)、带隙基准源、相关双采样(Correlated Double Sampling, CDS)电路和开关电容(Switched Capacitor, SC)放大器模块的读出电路芯片, 待测信号动态范围达到 50 dB, 读出帧率约为 49 Hz, 像素功耗约为 0.94 mW, 为大规模阵列读出电路的实现提供了思路。肖宁^[12]在此基础上设计了逐次逼近型模数转换器(Successive Approximation Register Analog-to-Digital Converter, SAR ADC)、系统读出时序电路和并串转换电路, 所设计的模数转换器的分辨率为 10 位, 实现该探测器阵列的数字化读出。庾涛^[13]针对规模为 80×60 的 VO_x 微测辐射热计焦平面阵列分别设计了以偏置电路、积分电路、采样保持电路和模数转换电路为主要模块的模拟电路系统, 以及以数据串并转换电路、中央时序控制电路和行列选通电路为主要模块的数字电路系统, 成功设计满足该探测器实际应用要求的集成电路芯片。樊霖^[14]针对 1×32 线阵列钽酸锂热释电太赫兹探测器设计了板级读出电路, 将 32 路信号分为 8 组, 每组信号采用 4 路线性镜像放大方式, 提高了线列放大电路通道均一性。徐智^[15]针对钽酸锂热释电探测器设计了包括前置放大模块、增益可调放大模块、滤波模块及采集控制模块的读出电路, 可实现根据探测器输出信号幅度在 4 种增益挡位之间自适应调节的功能。

微测辐射热计通常在电压或电流偏置条件下工作, 热释电探测器内阻较大($\text{k}\Omega$ 量级), 而太赫兹光热电探测器需在无偏条件下工作, 且内阻较小($\text{k}\Omega$ 量级), 针对微测辐射热计与热释电探测器设计的读出电路难以直接用于光热电探测器。目前, 太赫兹光热电探测器通常使用电流放大器、锁相放大器等通用测试仪器进行读出, 在实际应用中存在诸多不便, 亟需针对光热电探测器特点设计专用板级读出电路。

本文面向石墨烯沟道太赫兹光热电探测器的读出需求, 基于高集成度、高专用性及低成本理念, 设计了一种包括前置放大级和锁相放大级的信号读出电路, 成功实现该探测器的高精确度读出。

1 太赫兹光热电探测器

1.1 太赫兹光热电效应

太赫兹光热电效应首次发现于碳纳米管-金属接触异质结中^[16-17], 证实了光热电效应用于长波光子探测的可行性。该效应的基本原理如图 1 所示^[18], 包含光热转换与热电转换 2 个过程。探测器材料吸收入射的太赫兹波后温度发生变化, 在器件中形成温度差; 随后热生载流子在温度梯度驱使下自发从高温区向低温区迁移, 形成与入射太赫兹波能量成正比的温差电动势。该过程可用塞贝克效应(Seebeck effect)描述, 探测器温差电动势的大小与沟道材料的塞贝克系数及温度梯度有关^[19]:

$$\Delta U = - \int_0^l \nabla T(x) S(T, E_F) dx \quad (1)$$

式中: ΔU 、 ∇T 、 E_F 与 l 分别为温差电动势、温度梯度、费米能级与沟道长度; S 为塞贝克系数, 与温度和材料种类有关, 可通过 Mott 公式计算^[20]:

$$S = - \frac{\pi^2 k^2 T}{3e} \left(\frac{d \ln \sigma}{dE} \right) \Big|_{E=E_F} \quad (2)$$

式中: k 为玻尔兹曼常量; T 为热力学温度; e 为单位电荷量; σ 为材料电导率。因此, 塞贝克系数 S 主要与材料电导率与费米能级有关, 表征费米能级附近电导率随电子能级的变化。

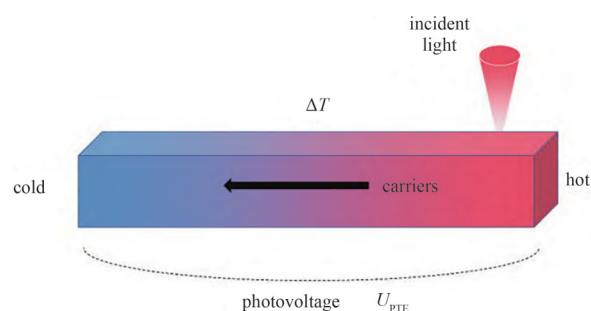


Fig.1 Process of terahertz photothermoelectric effect
图 1 太赫兹光热电效应基本过程

1.2 探测器工作原理

本文所研究的太赫兹光热电探测器结构如图2所示。通过构建非对称电极材料结构，调控沟道材料两端塞贝克系数，使热生载流子发生定向迁移，从而实现基于太赫兹波-热生载流子-温差电动势转换的太赫兹波探测。

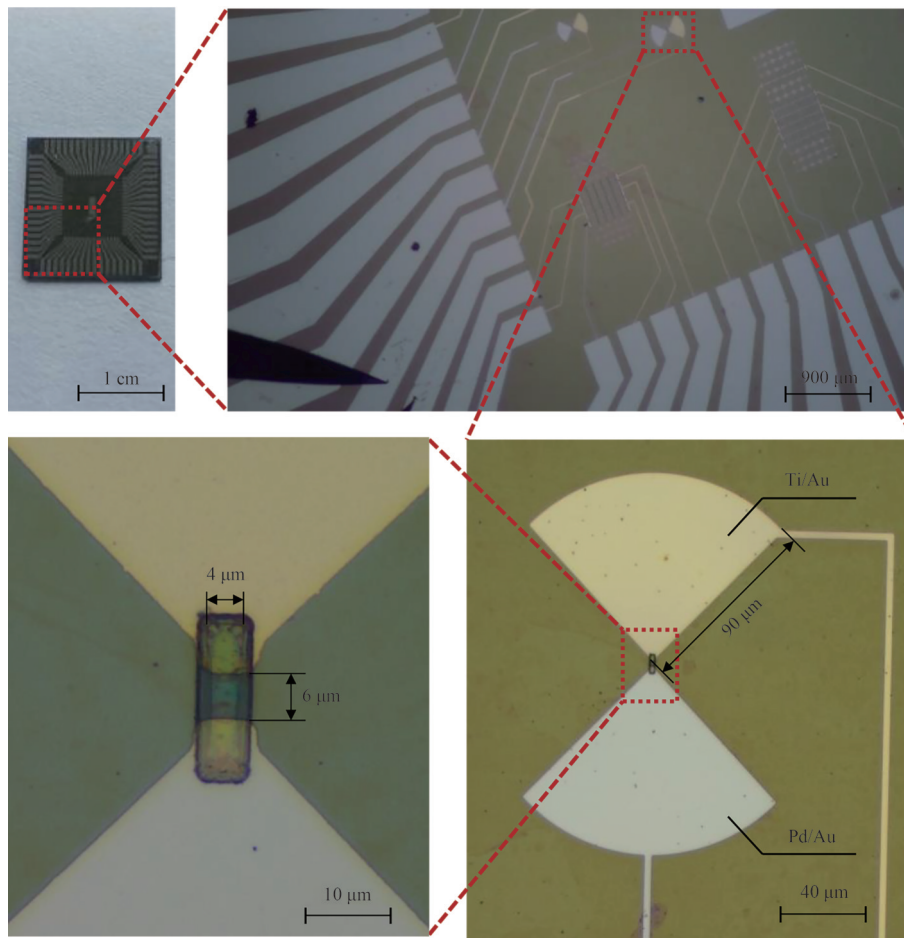


Fig.2 Micrograph of the terahertz photothermoelectric detector studied in this paper

图2 本文所研究的太赫兹光热电探测器的显微照片

该器件为两端器件。首先，将石墨烯材料转移至 500 μm 厚的氧化硅衬底(氧化层厚度为 300 nm)上，刻蚀石墨烯沟道，工艺要求为长 6 μm，宽 4 μm；然后，在石墨烯沟道上制作半径为 90 μm、中心角为 90°的扇型天线电极结构，两端电极材料分别为 Ti/Au 与 Pd/Au(Ti 与 Pd 厚度为 10 nm，Au 厚度为 50 nm)。这种扇型天线结构有利于将太赫兹波聚焦到器件沟道处^[21]以提高器件响应率，对沿扇型角范围内方向偏振的太赫兹波聚焦较佳；最后，在沟道上沉积厚为 20 nm 的氧化铝介质层，防止石墨烯在空气中发生氧化。

该器件的工作原理为：当沟道两端塞贝克系数存在差异或沟道内形成温度梯度时，探测器输出温差电动势，将太赫兹光强转化为电学信号。在金属与石墨烯接触处，石墨烯能带发生弯曲，由于两端金属电极材料不同，其功函数也各不相同，使沟道两端石墨烯费米能级存在差异，形成非平衡势场。由式(2)可知，费米能级不同时，沟道两端石墨烯的塞贝克系数不同。由于聚焦后的太赫兹光斑大于探测器尺寸，探测器沟道中无法形成温度梯度。因此，该器件通过构建非对称电极材料结构，通过调节石墨烯沟道两端塞贝克系数实现太赫兹波探测。

1.3 探测器性能参数

与读出电路设计直接相关的性能指标有光响应率、噪声等效功率与响应带宽等，通常从响应率与响应速度两个方面评价光电探测器的性能。

光响应率定义为探测器输出电流值或电压值与器件接收到的太赫兹波功率之比。电流响应率为：

$$R_1 = \frac{I_{od}}{P} \quad (3)$$

电压响应率为：

$$R_U = \frac{U_{od}}{P} \quad (4)$$

式中： I_{od} 和 U_{od} 分别为探测器输出电流和电压； P 为探测器接收到的太赫兹波功率。

噪声等效功率(Noise Equivalent Power, NEP)定义为引起与输出信号相同大小的探测器噪声对应的入射太赫兹波功率。以电流噪声表示的噪声等效功率为：

$$P_{NE} = \frac{i_n}{R_I} \quad (5)$$

以电压噪声表示的噪声等效功率为：

$$P_{NE} = \frac{u_n}{R_U} \quad (6)$$

式中： P_{NE} 为噪声等效功率，常用单位为 $W/Hz^{0.5}$ ； i_n 和 u_n 分别为探测器输出电流噪声谱密度和电压噪声谱密度，常用单位分别为 $A/Hz^{0.5}$ 与 $V/Hz^{0.5}$ 。太赫兹光热电探测器的主要噪声源为 Johnson 噪声^[22]，其噪声等效功率表示为：

$$P_{NE} = \frac{\sqrt{4kTR_d}}{R_U} \quad (7)$$

式中 R_d 为暗态下的探测器等效电阻。

采用调制-解调读出方法的光电探测器的光响应率通常与光调制频率有关：

$$R(f) = \frac{R_0}{\sqrt{1 + (2\pi f)^2}} \quad (8)$$

式中： R_0 为理想低频光照下的光响应率； f 为光调制频率。探测器的响应带宽定义为：光响应率与理想低频光响应率相比下降 3 dB 时的光调制频率，可记为 f_c 。

2 现有读出方法及瓶颈

目前，太赫兹光热电探测器读出主要采用调制-解调方法，通过电流放大器与锁相放大器等通用测试仪器模块级联使用实现测量。

电流放大器内含运算放大器与滤波器等模块，具备放大与降噪功能，可将输入电流信号转为电压信号输出，常用于探测器之后的前置放大。锁相放大器基于相关检测原理，利用信号与噪声频带分布不同的特征进行超窄带解调，将特定频率的微弱信号从强噪声背景(噪声强度为信号强度的数万倍乃至数十万倍)中提取出来^[23]。锁相放大器通常由相敏检波器(Phase Sensitive Detector, PSD)与低通滤波器(Low Pass Filter, LPF)2 个模块构成，相敏检波器通过将叠加噪声的待测信号与已知的参考信号相乘实现解调功能，低通滤波器对解调后信号进行窄带低通滤波，最大程度地将信号转换为稳定的直流电平。

现有读出方法的功能模块图如图 3 左侧框图所示。信号发生器用于产生一定频率的方波信号，对太赫兹源进行调制，并作为锁相放大器的参考信号。调制后的太赫兹波经光学系统聚焦入射到探测器表面，探测器输出信号由电流放大器放大降噪，而后通过锁相放大器进行窄带解调与滤波，最终得到与太赫兹光功率成正比的直流电压信号。这种读出方法能够从强噪声背景中提取信号幅度等信息，适用于该探测器的工作环境。但该读出方法存在诸多瓶颈，给探测器的实际应用带来较大困难：第一，该方法集成度低，体积庞大，内部组件设计复杂，无法与本文所研究的微纳探测器件及后端信号处理模块进行集成，限制了该探测器的应用场景；第二，该方法信号通道数较少，无法实现多通道并行信号读出，与光谱分析、成像感知等实际应用场景中大规模阵列探测器的信号读出需求相悖；第三，该方法专用性差，难以针对特定探测器的实际性能进行优化调整，与探测器之间的匹配程度不足，降低了信号读取效率；第四，通用测试仪器价格昂贵，购置成本较高，制约着太赫兹光热电探测器的大规模应用。因此，亟需设计该探测器的新型读出方法，在保证高精确度、低噪声信号读取的基础之上，提高读出电路专用性与系统集成度，降低读出电路成本与体积，克服限制该探测器实际应用的不利因素。

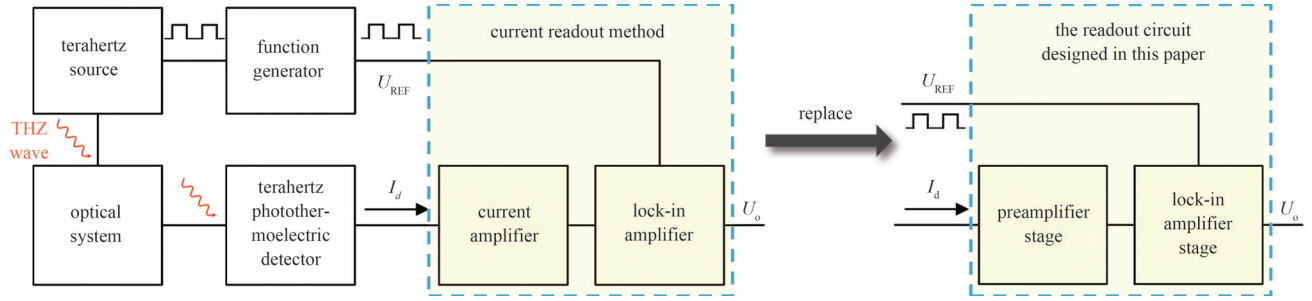


Fig.3 Module diagram of the current readout method and the proposed readout circuit of the detector

图3 探测器现有读出方法及本文所设计读出电路功能模块图

3 太赫兹光热电探测器专用板级读出电路

3.1 探测器等效电路模型

为设计专用读出电路,需对探测器的电学性质进行测量,建立其等效电路模型。对于太赫兹光热电探测器,决定其电路模型的3个重要性质分别为信号时域特性、阻抗特性与噪声特性。

首先对探测器输出信号时域特性进行分析,包括信号波形与幅度两方面。如图3左侧框图,采用电流放大器(Stanford Research System, SR570)与锁相放大器(Stanford Research System, SR830)进行测量分析,选取频率为377 Hz的方波作为调制信号以避开工频干扰。由于该探测器的响应带宽达6.4 kHz^[24],约为377 Hz调制频率的17倍,可近似认为该探测器输出电信号为理想方波,上升沿和下降沿带来的波形畸变忽略不计。则该读出系统增益的表达式为:

$$U_o = I_d A_{\text{pre}} \frac{\sqrt{2}}{\pi} \quad (9)$$

式中: U_o 为锁相放大器输出电压; I_d 为探测器输出电流; A_{pre} 为电流放大器增益; $\sqrt{2}/\pi$ 为方波幅值与其基频正弦波有效值的转换系数。实验测得当入射太赫兹光功率为0.6 mW时,锁相放大器输出电压为7.2 mV,测试中设定电流放大器增益为126.0 dB,由式(9)计算得到探测器输出电流近似为8.0 nA。

然后对探测器阻抗特性进行分析。无太赫兹光照射时,将探测器接入数字源表(Keithley 2602B),采用恒压求流法测量探测器内阻,该探测器暗态等效电阻约为5 k Ω 。考虑该器件电容效应以寄生电容为主,大小在fF~pF量级,对该探测器本征响应带宽(10 kHz以下)的影响较小,因此本文在探测器建模时近似忽略探测器电容效应的影响。

进一步对探测器噪声特性进行分析。在无太赫兹光照射时,将探测器接入频谱分析仪(Stanford Research System, SR780),测量探测器输出端噪声,得到信号在1 Hz~51.2 kHz范围内的电压噪声谱密度,如图4所示。器件的低频(1 kHz以下)噪声远强于中高频噪声,是总积分噪声的主要成分;中高频噪声(1 kHz以上)以白噪声为主,电压噪声谱密度在23.6~252 nV/Hz^{0.5}之间。根据电阻测量结果,由式(6)~(7)计算探测器理论Johnson电压噪声谱密度,约为10.5 nV/Hz^{0.5}。探测器电压噪声谱密度与总积分电流噪声有效值的转换关系为:

$$i_{n,\text{rms}} = \frac{1}{R_d} \sqrt{\int_{f_L}^{f_H} u_n^2 df} \quad (10)$$

式中: $i_{n,\text{rms}}$ 为探测器总积分电流噪声有效值; u_n 是探测器电压噪声密度; f_L 和 f_H 分别为所关心的噪声频率下限与上限。由式(10)计算出1 Hz~51.2 kHz范围内探测器总积分电流噪声有效值为168 nA。系统信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)定义为信号功率与噪声功率之比,表达式为:

$$R_{\text{SN}} = 10 \lg \frac{P_{\text{sig}}}{P_{\text{noise}}} = 20 \lg \frac{I_d}{i_{n,\text{rms}}} \quad (11)$$

式中 P_{sig} 和 P_{noise} 分别为信号平均功率与噪声平均功率。系统的信噪比约为-26.4 dB。

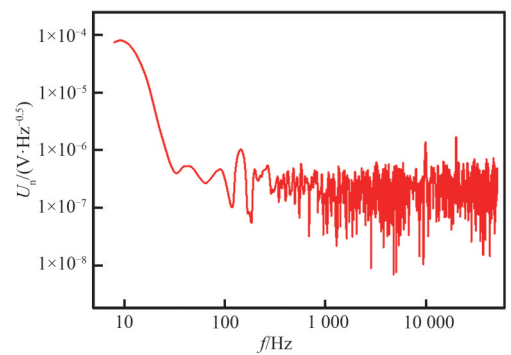


Fig.4 Measured voltage noise spectral density of the detector

图4 实验测量的探测器电压噪声谱密度图

本文测量结果与文献[24]基本相符。电压噪声谱密度实验值大于理论值,说明探测器在工作环境中会不可避免地受到空间电磁干扰的影响,并且该探测器输出信号强度显著小于噪声强度,微弱的信号电流完全淹没于噪声中。这对专用读出电路提出了高精度度、低噪声的设计要求。

基于以上分析构建太赫兹光热电探测器等效电路模型,如图5所示。该模型由信号电流源 I_d 、探测器内阻 R_d 及噪声电流源 i_n 组成,其中信号电流源为幅度8 nA、频率377 Hz的周期方波,探测器内阻为5 k Ω ,总积分电流噪声有效值为168 nA,信噪比为-26.4 dB。

3.2 读出电路架构

考虑探测器等效电路模型,本文设计的太赫兹光热电探测器板级读出电路包含前置放大级与锁相放大级2个模块,系统功能模块图如图3右侧虚线框区域所示。前置放大级用于提供信号增益,锁相放大级实现解调降噪,二者级联可实现该探测器的高精度度、低噪声读出。

前置放大级通常由多级放大电路构成,其基本要求包括3点:第一,需将探测器输出电流转变为电压,便于后续信号处理;第二,需提供可调节的信号增益,便于针对不同光照条件进行灵活调整;第三,需进行低噪声设计,读出电路引入的噪声应当不大于探测器噪声以防止信噪比降低。光电探测器常用的前置放大级结构有电压型、电流型及电荷型3类,如图6(a)~(c)所示。其中 U_{in} 和 I_{in} 分别为前置放大级输入电压与电流, U_o 为输出电压。电压型前置放大器通过探测器自身阻抗实现电流-电压转换,放大电路仅起电压放大作用;电流型前置放大器与电荷型前置放大器分别以电阻或电容反馈的形式构成跨阻放大器,信号电流流经反馈电阻或电容实现电流-电压转换。电压型前置放大器优点为设计简单,但由于太赫兹光热电探测器内阻通常在k Ω 量级,信号增益较小,且噪声特性较差,因此不适用于太赫兹光热电探测器的读出;电荷型前置放大器增益稳定,信噪比提升较大,但该结构输出电压信号仅保留了输入电荷信息,与探测器电流信号相比,波形发生畸变,无法与锁相放大级级联使用,与本文读出需求不匹配;电流型前置放大器增益稳定,且输出电压波形不会发生明显畸变,与本文设计需求相符。

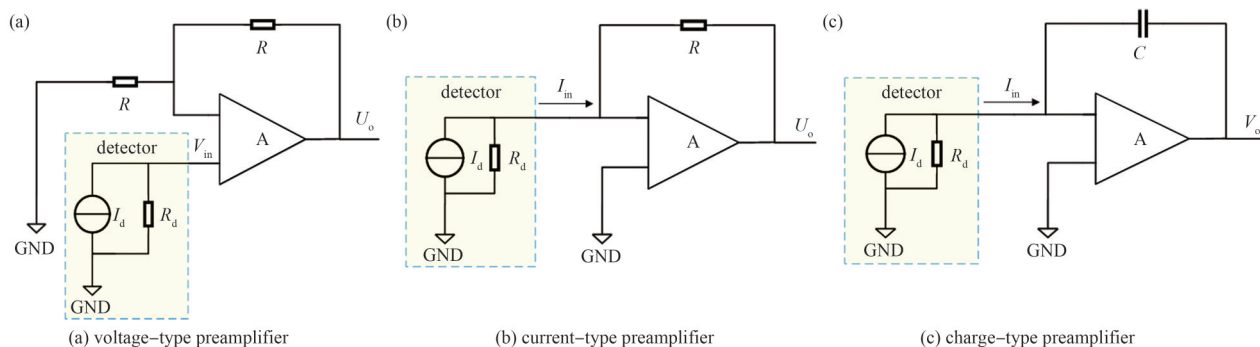


Fig.6 Common architectures of the preamplifier for the terahertz photoelectric detector

图6 光电探测器前置放大级常用结构

锁相放大级通常由相敏检波器与低通滤波器组成,其结构如图7所示。其基本要求包括2点:第一,输入动态范围应较大,对不同信噪比的前置放大级输出信号均可进行处理;第二,低通滤波器截止频率尽可能窄,以最大程度地抑制噪声。相敏检波器通常有模拟乘法器型与开关型两种,分别由模拟乘法器与电子开关实现待测信号与参考信号相乘的功能。模拟乘法器型相敏检波器输出信号幅度与参考信号相关,且存在非线性项,测量精确度较低,与本文高精度度、低噪声的读出需求不匹配;开关型相敏检波器线性良好,抗过载能力强,符合本文设计需求。

基于以上分析,本文选择电流型前置放大器作为前置放大级的主要模块,开关型相敏检波器

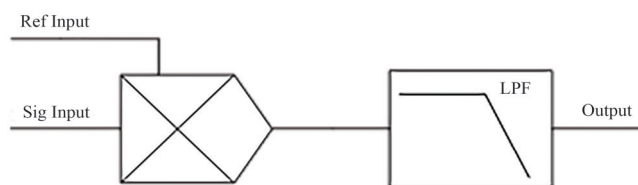


Fig.7 Architecture of the lock-in amplifier

图7 锁相放大级结构

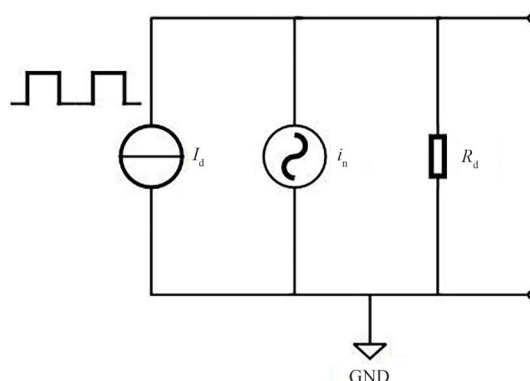


Fig.5 The equivalent circuit model of the detector

图5 探测器等效电路模型

作为锁相放大级的主要模块，设计面向太赫兹光热电探测器的板级专用读出电路。

3.3 前置放大级

设计的前置放大级通过两级放大器实现，电路结构如图 8 所示。

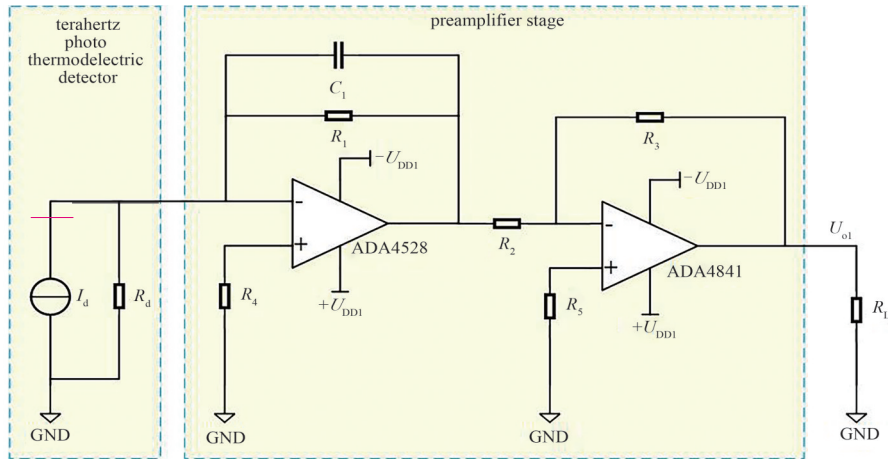


Fig.8 Circuit structure of the preamplifier stage

图 8 前置放大级电路结构

第一级放大器采用电流型前置放大器结构，实现信号电流-电压转换。选取低噪声精密运算放大器(Analog Devices, ADA4528)作为第一级放大器的核心器件；选取高精度度(0.1%)的 $1\text{ M}\Omega$ 电阻作为反馈电阻 R_1 ，在保证 120 dB 较大的电流到电压的增益同时，不会因反馈电阻取值过大而使系统信噪比与稳定性降低。在反馈网络添加补偿电容 C_1 对环路稳定性进行补偿，保证放大器处于负反馈工作状态。

第二级放大器采用反相比例放大电路，其增益可通过改变反馈电阻数值调节。选取通用运算放大器(Analog Devices, ADA4841)作为核心器件；电阻 R_2 与 R_3 构成反馈放大网络，阻值方便可调。在两级运放同相输入端分别添加补偿电阻 R_4 与 R_5 ，对运放输入偏置电流进行补偿，提升精确度。

设计的前置放大级整体直流增益 A_1 为：

$$A_1 = R_1 \times \frac{R_3}{R_2} \quad (12)$$

当 $R_1=1\text{ M}\Omega$ ， $R_2=1\text{ k}\Omega$ ， $R_3=20\text{ k}\Omega$ ，探测器信号电流 $I_d=8\text{ nA}$ ，调制频率 $f=377\text{ Hz}$ 时，对该电路进行仿真验证，得到输出端电压 U_{o1} 波形如图 9 所示。该波形未发生明显畸变，幅值为 159.95 mV。仿真所得前置放大级增益为 146.0 dB，与式(12)计算所得理论增益相符。对本文设计前置放大级引入的噪声进行仿真，结果表明，在 1 Hz ~10 kHz 范围内输入端电流噪声谱密度约为 $1\text{ pA/Hz}^{0.5}$ ，总输入端电流噪声有效值约为 0.163 nA。

设计的前置放大级电路可实现探测器输出信号的电流-电压转换与放大，其输出端 mV 量级的电压可输入锁相放大级进一步处理。该电路引入的噪声远小于探测器自身噪声与工作环境电磁干扰引入的噪声，成功实现低噪声设计。此外，该电路还具备结构简单，元器件成本低廉等优势。

3.4 锁相放大级

设计的锁相放大级电路结构如图 10 所示。相敏检波器选取高精度开关型乘法器(Analog Devices, AD630)，该乘法器具备解调功能，在参考信号为高电平时，将输入信号以一定正增益传递至输出端；反之，则将输入信号以一定的负增益传递至输出端，可等效为输入信号与一定幅度的方波作乘法运算。以信号发生器产生的调制信号作为参考信号输入，该参考信号与经过前置放大级放大后的探测器输出信号拥有近似相同的频率与相位，两者相乘将信号频段搬移至直流，而噪声仍存在于各频率分量中。通过配置芯片引脚连接模式，将芯片内部反馈回路增益设置为 2，以进一步提供增益。

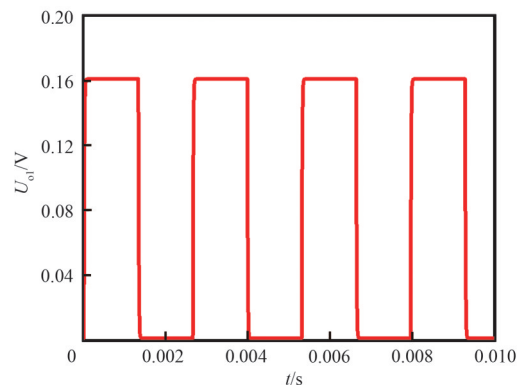


Fig.9 Simulation waveform of the output voltage of the preamplifier stage

图 9 前置放大级输出电压仿真波形

低通滤波器采用通用运算放大器(Texas Instruments, NE5532)作为有源器件,通过配置电阻 R_6 、 R_7 与电容 C_2 、 C_3 的数值,设置截止频率为 10 Hz。该截止频率的设置是在考虑调制信号与前置放大级输出信号频率误差的基础上,尽可能压缩滤波带宽,以尽可能好地抑制噪声,提取出信号电压。

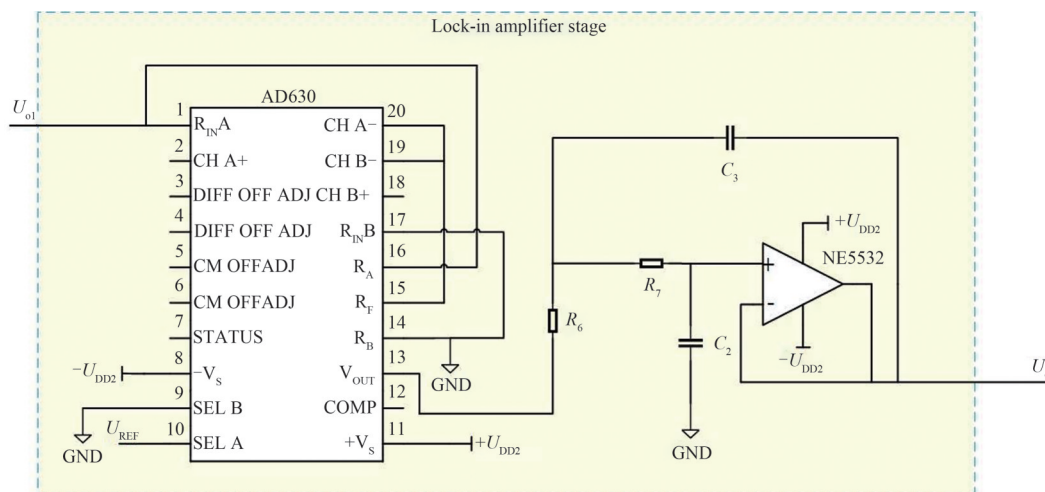


Fig.10 Circuit structure of the lock-in amplifier stage

图 10 锁相放大级电路结构

对所设计的低通滤波器的传递函数进行仿真,得到幅频响应特性,如图 11 所示。仿真结果表明,该低通滤波器截止频率约为 10 Hz,斜率约为 -40 dB/dec,满足相敏检波器后级低通滤波器的设计需求。参考信号设置为与前置放大级输出的方波信号同频率、同相位的方波信号,对该电路进行仿真验证,得到输出端电压 U_o 波形如图 12 所示。当锁相放大级输出电压信号达到稳态时,幅度约为 0.29 V,与增益为 2 时的理论输出电压稳态值 0.32 V 基本相符。

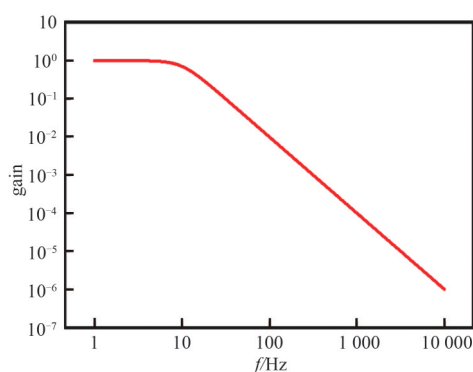


Fig.11 The amplitude-frequency response of low-pass filter in simulation

图 11 低通滤波器幅频响应特性仿真结果

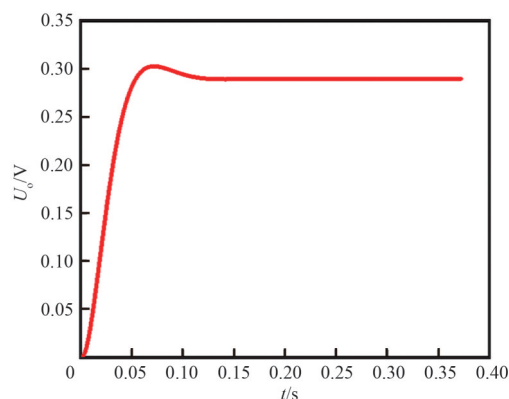


Fig.12 Simulation waveform of the output voltage of the lock-in amplifier stage

图 12 锁相放大级输出电压仿真波形

本文所设计的锁相放大级电路可实现对前置放大级输出信号的解调与滤波。该电路将信号频段搬移至直流,并通过低通滤波器滤除高频噪声,信噪比得到较大改善,实现了微弱信号的提取。锁相放大级同样具备系统简单,成本低廉的优势,便于在阵列探测器中得到应用。

4 实验及评估

搭建如图 13 所示的测试系统对所设计的太赫兹光热探测器读出电路的性能进行实验测试,图中模块①~⑥分别为太赫兹源、真空测试台、信号发生器、本文所设计的读出电路、直流电源和示波器。太赫兹光热探测器放置于真空探针台中,通过三同轴电缆引出至读出电路。

设定太赫兹波功率为 0.6 mW,配置系统总增益恒定,进行通光(ON)和遮光(OFF)操作,分别测量传统读出方法与本文所设计读出电路输出信号波形,如图 14 所示。测量得到本文设计的读出电路输出电压峰峰值约为 80.0 mV,输出端信噪比约为 11.9 dB,信噪比提升了 38.3 dB;而传统读出方法输出电压峰峰值约为 142.4 mV,

输出端信噪比约为 14.6 dB，信噪比提升了 41.0 dB。

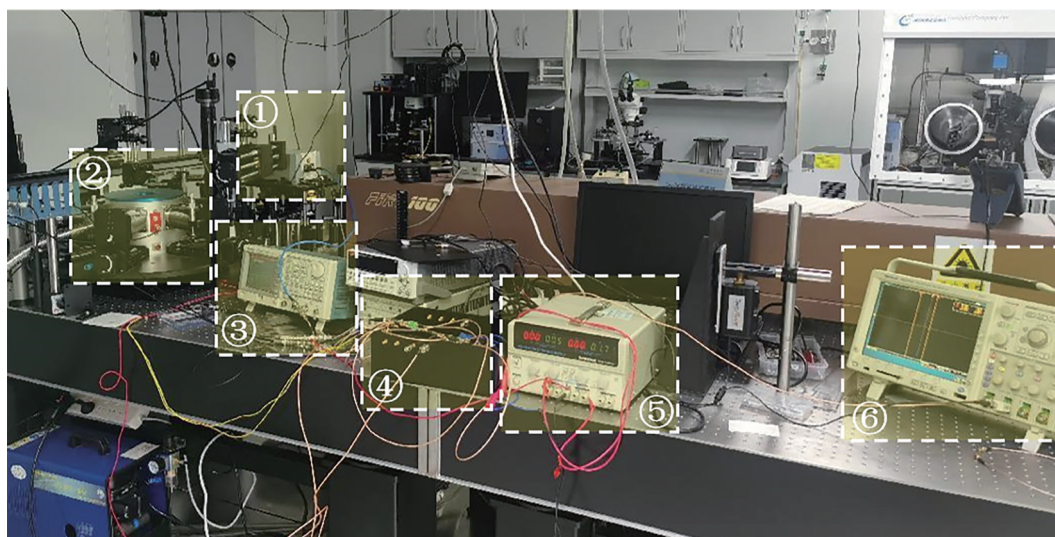


Fig.13 Experiment conditions of the test system
图 13 测试系统实验条件图

测试结果表明，本文所设计电路增益与仿真结果相符，信噪比提升显著，成功实现从强噪声背景中提取太赫兹光热电探测器输出信号的功能。本文提出的读出方法与传统的通用测试仪器读出方法的信号提取能力基本相当，但大大降低了电路成本与体积，可作为阵列式太赫兹光热电探测器的单元读出电路。

5 结论

本文首次针对太赫兹光热电探测器设计和制造了包括前置放大级与锁相放大级的板级专用前端读出电路，将 nA 量级光电流信号在强噪声背景环境下(信噪比为 -26.4 dB)放大至 mV~V 量级直流电压信号，信号增益达 140.7 dB，信噪比提升了 38.3 dB。本文所提出的读出电路成功实现了该探测器微弱信号提取功能，与传统读出方法读出能力基本相当，但电路成本与体积显著降低。

本文所设计读出电路克服了原有读出方法集成度低、专用性差与价格昂贵等瓶颈，成功实现太赫兹光热电探测器的高精确度、高集成度、高适配性及低成本读出。该读出电路结构简单，成本较低，可用于太赫兹光热电阵列探测器的单元读出模块，使设计与制备大规模阵列探测器具备了技术可行性。读出电路输出信号直接表征空间太赫兹波强度，可作为太赫兹传感、成像及光谱分析等系统中的关键光电探测组件，实现多维度长波光子信息感知与提取，便于长波光子技术在安检、生物医学及物质科学等领域中的发展与应用。本文后续工作还将通过优化电路各级参数进一步提升信号增益、信噪比及动态范围等性能，探索更适合于多通道阵列化读出的电路结构，提高系统集成度。

参考文献：

- [1] LIU H B, ZHONG H, KARPOWICZ N, et al. Terahertz spectroscopy and imaging for defense and security applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2007,95(8):1514–1527. doi:10.1109/JPROC.2007.898903.
- [2] NIU Yong, LI Yong, JIN Depeng, et al. A survey of millimeter wave communications(mmWave) for 5G:opportunities and challenges[J]. Wireless Networks, 2015,21(8):2657–2676. doi:10.1007/s11276-015-0942-z.
- [3] PICKWELL E, WALLACE V P. Biomedical applications of terahertz technology[J]. Journal of Physics D:Applied Physics, 2006, 39(17):301–310.
- [4] 杨建忠. 太赫兹探测器测试系统的设计[D]. 成都:电子科技大学, 2017. (YANG Jianzhong. Design of terahertz detector test

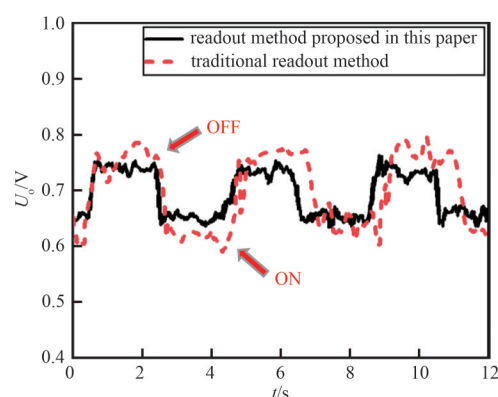


Fig.14 The output signal waveforms of traditional readout method and the proposed readout method under light(ON) and light blackout(OFF) conditions
图 14 通光(ON)与遮光(OFF)条件下,传统读出方法与本文提出读出方法的输出信号波形

- system[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2017.)
- [5] LEWIS R A. A review of terahertz detectors[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2019,52(43):433001. doi:10.1109/JPROC.2007.898903.
- [6] SIZOV F. Terahertz radiation detectors:the state-of-the-art[J]. Semiconductor Science and Technology, 2018,33(12):123001. doi:10.1088/1361-6641/aae473.
- [7] 吴炜东,王迎新,赵自然. 太赫兹光热电探测方法研究进展[J]. 科学通报, 2022,67(8):714–727. (WU Weidong,WANG Yingxin,ZHAO Ziran. Recent progress of terahertz detectors based on photothermoelectric effect[J]. Chinese Science Bulletin, 2022,67(8):714–727.) doi:10.1360/TB-2021-0730.
- [8] 刘新华,万超,康琳,等. 低噪声太赫兹 Microbolometer 读出电路[J]. 电子测量技术, 2013(4):76–79. (LIU Xinhua,WAN Chao,KANG Lin,et al. Low-noise terahertz Microbolometer readout circuit[J]. Electronic Measurement Technology, 2013(4):76–79.) doi:10.3969/j.issn.1002-7300.2013.04.018.
- [9] 裴宇峰. 阵列 Nb₃N₆ 太赫兹检测器读出电路设计[D]. 南京:南京大学, 2016. (PEI Yufeng. Design of array Nb₃N₆ microbolometer readout circuit[D]. Nanjing,China:Nanjing University, 2016.)
- [10] 姜周. 用于高灵敏检测的低噪声放大读出电路[D]. 南京:南京大学, 2018. (JIANG Zhou. Low-noise amplification readout circuits for highly sensitive detection[D]. Nanjing,China:Nanjing University, 2018.)
- [11] 王春. 常温太赫兹检测器 CMOS 读出电路设计[D]. 南京:东南大学, 2018. (WANG Chun. Design of the normal temperature terahertz detector CMOS readout circuits[D]. Nanjing,China:Southeast University, 2018.)
- [12] 肖宁. 常温太赫兹信号检测器中 CMOS 读出电路关键模块设计[D]. 南京:东南大学, 2020. (XIAO Ning. Design of key modules of CMOS readout circuit in terahertz signal detector at normal temperature[D]. Nanjing, China:Southeast University, 2020.)
- [13] 庾涛. 太赫兹探测器读出集成电路的研究与设计[D]. 成都:电子科技大学, 2014. (TUO Tao. Design and research on terahertz detector readout integrated circuit[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2014.)
- [14] 樊霖. 太赫兹探测器读出电路设计[D]. 成都:电子科技大学, 2015. (FAN Lin. THz detector readout circuit design[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2015.)
- [15] 徐智. 钽酸锂热释电太赫兹探测器读出电路设计[D]. 成都:电子科技大学, 2017. (XU Zhi. Lithium tantalate pyroelectric terahertz detector readout circuit design[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2017.)
- [16] WANG Yingxin,ZHANG Guowei,QIAO Lingbo,et al. Photocurrent response of carbon nanotube-metal heterojunctions in the terahertz range[J]. Optics Express, 2014,22(5):5895–5903.
- [17] WANG Yingxin,DENG Xiangquan,ZHANG Guowei,et al. Terahertz photodetector based on double-walled carbon nanotube macrobundle-metal contacts[J]. Optics Express, 2015,23(10):13348–13357. doi:10.1364/OE.23.013348.
- [18] 刘睿丰,陈猛,王迎新,等. 柔性光热电探测器研究进展[J]. 中国激光, 2023,50(23):1–22. (LIU Ruifeng,CHEN Meng,WANG Yingxin,et al. Research progress of flexible photothermoelectric detectors[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023,50(23):1–22.) doi:10.3788/CJL221536.
- [19] CAI X H,SUSHKOV A B,SUESS R J,et al. Sensitive room-temperature terahertz detection via the photothermoelectric effect in graphene[J]. Nature Nanotechnology, 2014,9(10):814–819. doi:10.1038/nnano.2014.182.
- [20] CUTLER M,MOTT N F. Observation of Anderson localization in an electron gas[J]. Physical Review, 1969,181(3):1336. doi:10.1103/PhysRev.181.1336.
- [21] VITI L,PURDIE D G,LOMBARDO A,et al. HBN-Encapsulated, graphene-based, room-temperature terahertz receivers,with high speed and low noise[J]. Nano Letters, 2020,20(5):3169–3177. doi:10.1021/acs.nanolett.9b05207.
- [22] LIU Changlong,WANG Lin,CHEN Xiaoshuang,et al. Top-gated black phosphorus phototransistor for sensitive broadband detection[J]. Nanoscale, 2018,10(13):5852–5858. doi:10.1039/C7NR09545G.
- [23] 郭忠凯,李永刚,于博丞,等. 锁相放大器的研究进展[J]. 物理学报, 2023,72(22):126–144. (GUO Zhongkai,LI Yonggang,YU Bocheng,et al. Research progress of lock-in amplifiers[J]. Acta Physica Sinica, 2023,72(22):126–144.) doi:10.7498/aps.72.20230579.
- [24] CHEN Meng,WANG Yingxin,ZHAO Ziran. Monolithic metamaterial-integrated graphene terahertz photodetector with wavelength and polarization selectivity[J]. ACS Nano, 2022,16(10):17263–17273. doi:10.1021/acsnano.2c07968.