

*基于快前置放大器的飞行时间测量系统用于CsPbBr₃单晶迁移率测量

余依云^{1,2}, 潘宁^{2,3}, 王鑫鑫^{2,3}, 王时茂^{2*}

(1. 安徽大学 物质科学与信息技术研究院, 安徽 合肥 230601; 2. 中国科学院合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031; 3. 中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026)

摘要: 针对毫米级厚度CsPbBr₃晶体载流子漂移时间处于微秒量级的特征, 该研究设计了一款专用前置放大器, 并搭建了基于紫外脉冲激光的载流子飞行时间(TOF)测试系统。该放大器以跨阻放大为基础, 后级增设同相放大实现电压信号的增益提升。以飞安级超低输入偏置电流运算放大器为核心, 实现了信号的低噪声转换。设计的快前置放大器线性度优异, 具备微秒级快速响应能力, 其上升时间约1.1 μs, 增益为1.97 V·mA⁻¹, -3 dB带宽为315 kHz, 输出噪声有效值为2.58 mV。在30~70 V偏置电压下, 1 mm厚CsPbBr₃单晶的载流子漂移时间由4.06 μs缩短至3.21 μs, 拟合得到其室温下的空穴迁移率为19.83 cm²·V⁻¹·s⁻¹。该快前置放大器可满足CsPbBr₃单晶微弱瞬态信号的有效获取需求, 实现材料载流子迁移率的测量。

关键词: CsPbBr₃单晶; 飞行时间; 快前置放大器; 载流子迁移率

中图分类号: O657.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4957(XXXX)XX-0001-08

Mobility Characterization in CsPbBr₃ Single Crystals Using a Time-of-Flight Measurement System Based on a Fast Preamplifier

YU Yi-yun^{1,2}, PAN Ning^{2,3}, WANG Xinxin^{2,3}, WANG Shi-mao^{2*}

(1. Institutes of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, China; 2. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 3. Science Island Branch, Graduate School of University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Perovskite semiconductor materials exhibit great potential in radiation detection owing to their excellent radiation response characteristics. Time-of-flight (TOF) measurement serves as an effective method for characterizing carrier transport properties such as mobility, providing crucial support for screening optimal radiation detection materials. To address the microsecond-scale carrier drift times typical of millimeter-thick CsPbBr₃ crystals, a dedicated fast preamplifier is designed and a TOF measurement system based on a pulsed ultraviolet laser is developed. The preamplifier utilizes transimpedance amplification, followed by a non-inverting amplification stage to boost voltage signal gain. By employing an operational amplifier with a femtoampere-level ultralow input bias current, the device achieves low-noise signal conversion. The designed preamplifier exhibits excellent linearity and a microsecond-scale fast response capability. Key performance metrics include a rise time of approximately 1.1 μs, gain of 1.97 V·mA⁻¹, -3 dB bandwidth of 315 kHz, and output noise of 2.58 mV. Under bias voltages from 30 to 70 V, the carrier drift time of a 1 mm CsPbBr₃ single crystal decreases from 4.06 to 3.21 μs, yielding a room-temperature hole mobility of 19.83 cm²·V⁻¹·s⁻¹. This preamplifier effectively acquires weak transient signals from CsPbBr₃, enabling accurate carrier mobility measurements.

Key words: CsPbBr₃ single crystal; time of flight; fast preamplifier; carrier mobility

核辐射探测技术是核安全、医学成像、环境监测、科学研究等领域不可或缺的核心技术^[1-2]。目前核辐射探测器主要分为气体探测器、闪烁体探测器和半导体探测器3大类^[3]。其中, 半导体辐射探测

收稿日期: 2026-05-26; 修回日期: 2026-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(62211540009); 量子技术与器件全国重点实验室开放课题(KF202304)

* 通讯作者: 王时茂, 博士, 副研究员, 研究方向: 半导体辐射探测材料与器件, E-mail: shmwang@aiofm.ac.cn

器凭借探测材料较小的电离能和较高的载流子迁移率,具备更高的探测效率和更优的能量分辨率^[4-5]。加之结构紧凑、线性范围宽,已经成为新一代高性能辐射探测设备的核心器件^[6]。相比于需要在液氮温度下工作的高纯锗(HPGe)和生长成本高昂的碲锌镉(CdZnTe, CZT)^[7],近年来全无机钙钛矿材料凭借其优异的辐射响应特性脱颖而出。例如CsPbBr₃单晶,其原子序数高,对X射线与 γ 射线吸收能力强,并且合适的带隙使其无需制冷即可在室温下工作,大幅降低了探测器的制备与使用成本。同时,该材料具备极强的缺陷容忍度,可通过低成本的液相法或熔体法生长,被认为是极具竞争力的新一代室温半导体辐射探测材料^[8-9]。载流子迁移率(μ)和寿命(τ)等性质,直接决定了探测器的电荷收集效率、能量分辨率与响应速度等性能参数。因此,准确测定CsPbBr₃材料的载流子输运特性,是优化材料制备工艺、设计高性能探测器、提升探测器整体性能的关键。

飞行时间(TOF)测量技术是表征半导体材料载流子输运特性直接、有效的手段之一^[10-11]。通过辐射源(如 α 粒子、X射线或脉冲激光)在材料表层激发电子空穴对,在外加电场的作用下,载流子将穿越整个晶体厚度向相反电极定向漂移。根据Shockley-Ramo定理,载流子在漂移期间会持续诱导产生电流脉冲^[12]。通过捕捉该脉冲信号的平台持续时间,即可获得载流子的漂移时间(t),结合晶体厚度(L)测得载流子的迁移速度($v = L/t$)。且迁移速度(v)与载流子迁移率(μ)和电场强度(E)相关($v = \mu E$),再结合电场强度和电压的关系($E = V/L$),即可得到载流子迁移速率($\mu = L^2/V \cdot t$)。然而,CsPbBr₃单晶在受激后输出的TOF信号通常为极其微弱的瞬态电流信号(nA至 μ A量级),且毫米级厚度的CsPbBr₃单晶载流子漂移时间通常处于微秒(μ s)量级。这就要求与之匹配的前端电子学系统不仅需要具备极低的噪声水平以克服漏电流和外部电磁干扰,还必须具备足够的带宽和快速响应能力,以完整保留信号的陡峭上升沿和平台时域特征。

在TOF迁移率测试电子学的发展历程中,早期常依赖电荷灵敏前置放大器(CSP)进行信号读出^[13-14]。CSP本质为电荷积分器,在能谱测量中表现出极佳的低噪声电荷收集能力,但其输出为电压阶跃波形,需通过测量上升沿来提取漂移时间。为能直观反映探测器载流子的运动状态,能够将瞬态电流等比例转换为电压脉冲的跨阻放大器(TIA)逐渐成为研究主流。近年来,国内外学者在进行钙钛矿等新型半导体TOF测试时,大量使用商用宽带跨阻放大器(如DHPCA-100、SR-570等)^[15-16]。这类仪器实现了电流电压的线性转换,能够从波形平台区精准提取载流子的漂移信息。然而,通用型设备也存在着一定的局限性,其价格普遍高昂,并且固定的带宽及通用型指标无法完美契合所有材料特性。所以随着CsPbBr₃材料的发展,定制化的TIA已成为半导体输运特性测量的重要趋势。

本文针对CsPbBr₃晶体载流子迁移率测试的需求,设计并实现了一款专用的快前置放大器,并搭建了一套紫外脉冲激光激发的TOF分析测试系统。本系统以248 nm深紫外激光为激发源,凭借其在CsPbBr₃表面仅约20 nm的穿透深度,实现载流子的近表面激发。为解决微弱瞬态电流信号的提取问题,基于fA级输入偏置电流的运算放大器ADA4530-1ARZ,设计了一款针对CsPbBr₃晶体载流子输运特性的快前置放大器。基于该测试系统,成功对Au/CsPbBr₃/Au器件开展了不同偏置电场下的瞬态光电响应测试,并拟合得到了室温下空穴的迁移率。

1 实验部分

1.1 快前置放大器设计

为实现载流子漂移时间 t 的精准测试,前置放大电路需严格保证信号时域波形无畸变。鉴于CsPbBr₃单晶载流子漂移时间处于微秒量级,根据信号处理理论,为确保无失真记录约2 μ s脉宽的信号,前端电路-3 dB带宽需大于159 kHz。快前置放大器采用跨阻放大加二级同相放大的两级电路架构,整体采用 ± 5 V双电源供电,电路原理如图1所示。

高压偏置输入端使用了一阶滤波 R_1C_1 对输入电压进行滤波,并使用了限流分压电阻 R_2 以及双向保护二极管 D_1 、 D_2 将放大电路输入端的电压钳位在安全范围内,避免探测器输出的尖峰脉冲或高压浪涌对核心放大器件造成不可逆的损坏,保障电路的工作稳定性。

第一级跨阻放大部分作为电路的第一级处理单元,核心功能是将器件输出的微弱电流信号转换为电压信号,并实现初步的低噪声放大,该模块以ADA4530-1ARZ为核心,其主要参数由表1所示。

ADA4530-1ARZ 自带保护环结构, 在印制电路板 (PCB) 布局时, 在反相输入引脚外围布设保护环走线, 并通过运放的内部缓冲器驱动保护环, 使其与输入引脚保持动态等电位。这一设计清除了引脚间的电势差, 有效隔绝了 PCB 表面杂散漏电流的注入。此外, 反馈电阻 R_4 与电容 C_4 被紧贴运放引脚放置, 最大限度地缩短了走线长度, 从而将输入端的寄生电容降至最低, 避免了由寄生电容谐振引起的高频噪声放大。

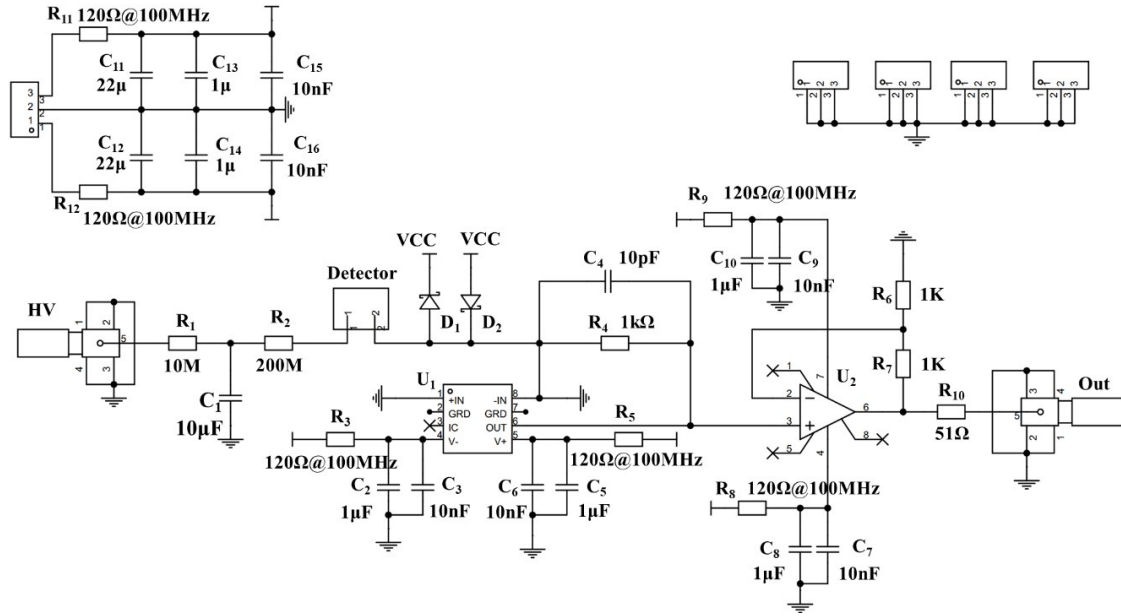


图1 快前置放大器电路原理图

Fig. 1 Circuit schematic of the fast preamplifier

表1 ADA4530-1ARZ 的主要参数

Table 1 Key parameters of ADA4530-1ARZ

Parameter	Bias current	Current noise density	Wide bandwidth	Slew rate
Typical	± 20 fA	$0.07 \text{ fA} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$	2 MHz	$1.4 \text{ V} \cdot \mu\text{s}^{-1}$

跨阻放大电路的增益由反馈电阻 R_f 决定, 输出电压为:

$$V_{\text{out}}' = I_{\text{in}} \times R_f \quad (1)$$

其中, V_{out}' 为跨阻电路输出电压, I_{in} 为快前置放大器输入电流, R_f 即为反馈电阻 R_4 。同时, 为进一步提升跨阻放大模块的工作稳定性, 减少电源纹波对放大电路的影响, 在 ADA4530-1ARZ 的正、负电源端分别接入去耦电容, 实现电源滤波与高频去耦, 确保第一级放大的稳定性与低噪声特性。

二级同相放大部分承接跨阻放大模块的输出信号, 核心功能是完成对信号的进一步精密放大与信号调理, 使输出信号幅度满足后续信号处理的要求。该模块以 OPA188AID 为核心器件, 其共模抑制比高达 146 dB, 能够有效抑制共模干扰, 其主要参数由表 2 所示。

表2 OPA188AID 的主要参数

Table 2 Key parameters of OPA188AID

Parameter	Bias voltage	Voltage noise density	Wide bandwidth	Common mode rejection ratio
Typical	$\pm 6 \mu\text{V}$	$8.8 \text{ nV} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$	2 MHz	146 dB

OPA188AID 的反相输入端接入分压电阻 R_6 与 R_7 , 通过电阻分压实现增益的调节, 该模块输出电压和上级模块输出电压关系为:

$$V_{\text{out}} = \frac{R_6 + R_7}{R_6} V_{\text{out}}' \quad (2)$$

其中, V_{out} 为整个电路的输出电压。该模块利用 OPA188AID 低失调、高共模抑制比的特性, 保证信号在二次放大过程中的线性度与稳定性, 避免信号出现幅度失真。总跨阻增益 G 为输出电压和输入电流的比值, 联立式 (1)、式 (2) 可推导得到 G 为:

$$G = R_4 \cdot \frac{R_6 + R_7}{R_6} = 1 \text{ k}\Omega \cdot \frac{1 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} = 2 \text{ V} \cdot \text{mA}^{-1} \quad (3)$$

电源滤波部分是保障快前置放大器稳定、低噪声工作的重要支撑模块，其核心功能是为跨阻放大模块、二级放大模块的核心运算放大器提供稳定、无纹波的工作电源，减少电源噪声对放大电路的影响。针对高频放大电路对电源的严苛要求，本工作采用多级RC电路，对外部输入的 $\pm 5 \text{ V}$ 电源进行滤波，并在紧靠每级运算放大器的电源引脚处，并联放置 $1 \mu\text{F}$ 和 10 nF 的去耦电容，分别用于过滤低频电源纹波和高频开关噪声。考虑到光学平台和高压电源周围复杂的空间电磁环境，在敏感器件区域上方加装接地屏蔽壳，其实物如图2所示。该屏蔽罩直接与覆铜模拟地实现大面积接触，构成了完整的法拉第笼结构，隔绝了外部空间的高频辐射耦合干扰。

1.2 Au/CsPbBr₃/Au测试器件

研究使用的CsPbBr₃单晶通过溶液精炼辅助逆温度结晶法生长^[17-18]，单晶尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。通过真空热蒸发法在单晶的上下表面分别蒸镀厚度为 50 nm 的Au电极，其中顶电极采用叉指电极（指宽 $80 \mu\text{m}$ ，指间距 $60 \mu\text{m}$ ），激光从叉指电极中间照射到材料表面，电极结构如图3所示。顶电极采用的叉指结构虽然在极表面产生非均匀电场，但该非均匀分量随深度 x 呈 $e^{-2\pi x/d}$ 指数级衰减，其中周期常数 d 为指宽加指间距。当进入厚度为 1 mm 的晶体内部仅一个周期深度 $140 \mu\text{m}$ 时，电场扰动已衰减至不足 0.2% 。因此，器件内部的主体电场分布依旧满足平行板电容器假设。

1.3 TOF测试系统搭建

载流子TOF测量系统采用的 248 nm 准分子激光器购自深圳盛方科技有限公司，脉冲宽度为 25 ns 。该波长对应的光子能量约 5 eV ，高于CsPbBr₃单晶的带隙（约 2.3 eV ），可有效产生电子空穴对，并且激光在CsPbBr₃单晶中的穿透深度仅约 20 nm ，符合TOF测试近表面激发的实验前提。以本工作设计的快前置放大器为前端信号放大单元，结合脉冲高压源、光学系统、示波器（普源DS1202Z-E，带宽 200 MHz ，采样率 1 GSa/s ）等设备构建了TOF测量系统，系统整体架构如图4所示。工作时激光频率设置为 1 Hz ，采用能量计（NOVA II）连续并自动统计脉冲能量，当 200 个脉冲能量的标准差小于 $0.54 \mu\text{J}$ （相对标准差小于 3% ）时开始实验。同时激光器输出的激光通过光学系统截取光束中心的均匀分布区域，确保激光有效照射面积略小于电极的有效面积，使载流子在材料内部均匀、稳定地激发。测试前由高到低逐步衰减激光能量完成激发条件调试，最后将单脉冲激光能量密度衰减至低水平（ $8 \mu\text{J}/\text{mm}^2$ ），避免空间电荷对外部电场造成畸变。通过脉冲高压源提供可调延迟脉冲电压，确保高压源输出的高压与激光脉冲同步。外电路中输出的微弱瞬态电流信号，经本研究设计的快前置放大器进行放大处理后，由示波器实时采集与记录，为后续载流子漂移时间、迁移率等关键参数的提取与分析提供可靠的实验数据。

2 结果与讨论

2.1 快前置放大器性能分析

2.1.1 线性度 由于快前置放大器的输入端为跨阻放大结构，仅能接收电流信号，因此需在信号发生器与放大器输入端之间串联一个高精度电阻 R_{in} ，将信号发生器输出的标准电压信号转换为电流信号，转换公式为：

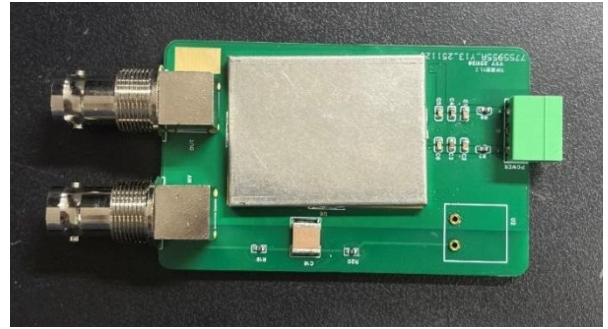


图2 快前置放大器实物图

Fig. 2 Physical image of the fast preamplifier

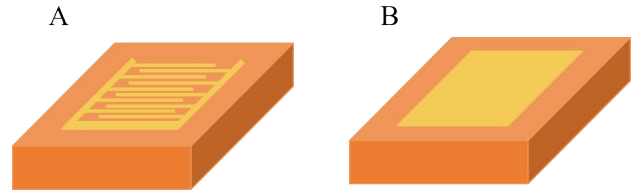


图3 CsPbBr₃单晶电极结构 (A. 顶电极, B. 底电极)

Fig. 3 Structure of CsPbBr₃ single-crystal electrode (A. Top electrode, B. Bottom electrode)

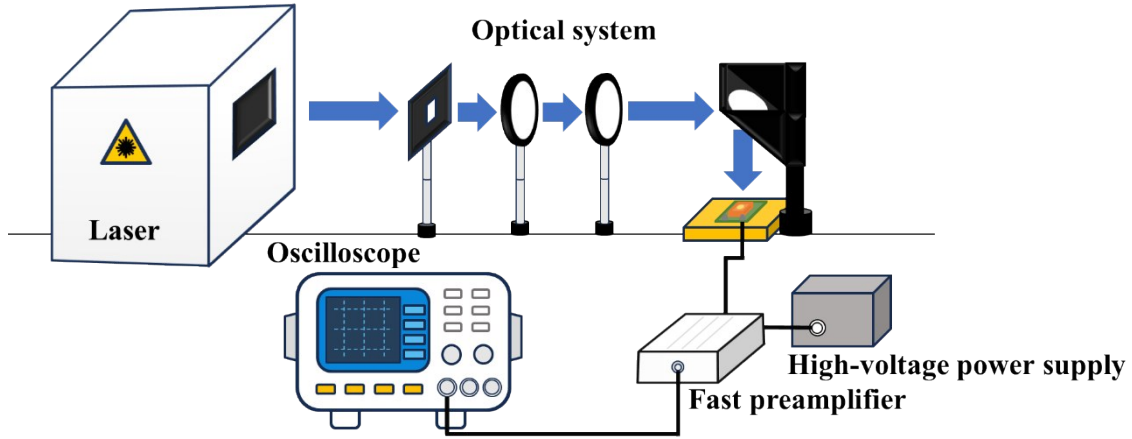


图4 载流子TOF测试系统

Fig. 4 Carrier TOF measurement system

$$I_{in} = \frac{V_{in}}{R_{in}} \quad (4)$$

本工作 R_{in} 选择 $1\text{ k}\Omega$ ，精度为 1% ，确保电流转换的准确性。信号发生器（Suin TFG6803）输出频率为 1 kHz 的正弦波信号，考虑到实际使用中低电压范围使用较多，为更精准反映该常用区间的线性特性，测试取点采用低电压加密取点、高电压均匀分布的原则。输入电流和输出电压的拟合曲线方程为 $V_{out} = 1.97I_{in} - 0.018$ ，其增益 1.97 V/mA 与理论值 2 V/mA 高度吻合，且拟合曲线的决定系数 R^2 为 0.9997 ，放大器线性度良好。

2.1.2 噪声性能 测试过程中，将快前置放大器的输入端短路，消除外部信号与干扰的影响，确保放大器仅输出自身的固有噪声。测试结果如图5所示，波形峰峰值 V_{pp} 为 10 mV 左右，同时通过示波器读取到噪声有效值为 2.58 mV 。

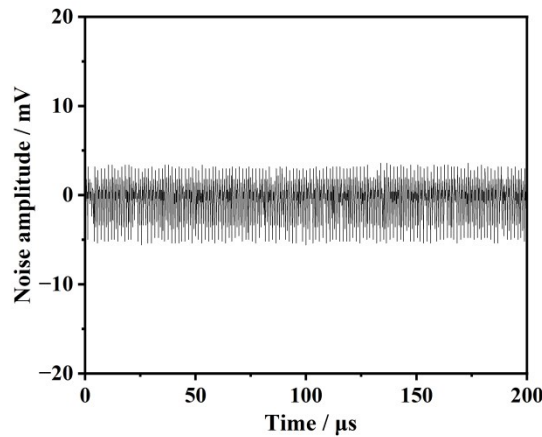


图5 本底噪声波形

Fig. 5 Background noise waveform

2.1.3 带宽 -3 dB 带宽为放大器输出幅值下降至最大输出幅值的 -3 dB (0.707 倍) 时对应的频率区间，足够的带宽是确保放大器完整保留 TOF 信号瞬态时域特征的基础。测试过程中，保持信号发生器的输出电压幅值 1 V 恒定，通过调节信号发生器的输出频率，从 10 Hz 开始，逐步增加至 600 kHz ，在不同频率下通过示波器采集放大器的输出电压幅值。

幅频特性曲线如图6所示，快前置放大器在低频段的输出电压幅值基本保持恒定，无明显衰减，根据电路原理输出幅度最大值应为 2 V ，但由于器件参数的实际偏差等原因，最大输出电压幅值为 1.96 V ，所以 -3 dB 对应的输出电压幅值约为 1.39 V 。结合幅频特性曲线，测得放大器的 -3 dB 截止频率为 315 kHz ，高于设计要求的 159 kHz ，可有效支撑 TOF 测量。并且依据频域和时域转换关系 ($t_r \approx$

0.35 / 带宽), 推算其等效阶跃响应上升时间约为 $1.1 \mu\text{s}$ 。

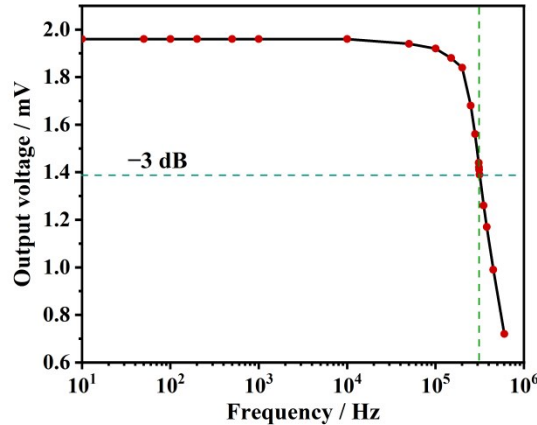


图6 快前置放大器的幅频特性曲线

Fig. 6 Amplitude - frequency characteristics of the fast preamplifier

将所设计的定制化快前置放大器与近几年 CsPbBr₃ 输运特性文献中常用的商用电流放大器 (如 Femto 系列), 以及传统的电荷灵敏前置放大器 (CSP) 进行了关键性能参数的定量对比, 如表3所示。相比于传统的 CSP, 本系统采用的快前置放大器直接实现了瞬态电流到电压的等比例转换。商用高速 TIA 在 10^3 V/A 增益、175 MHz 带宽下表现出 1.9 mV 优异的本底噪声。然而, 针对 CsPbBr₃ 单晶微秒级的漂移信号, 该商用放大器 MHz 级带宽存在过多的冗余, 在复杂测试环境中容易引入高频电磁环境噪声, 且售价极其高昂。相比之下, 本设计针对目标材料的信号特征, 进行了 315 kHz 带宽的定制化设计, 兼具低成本与钙钛矿测试适配性。

表3 本设计快前置放大器与文献中 TOF 测试放大器性能对比

Table 3 Performance comparison between the designed fast preamplifier and TOF amplifiers reported in the literature

Amplifier type	Signal generation mechanism	Product model	Gain	Bandwidth	Noise	References
CSP	Charge-voltage integral conversion	eV-550	0.2 ~ 3.6 mV/fC	—	—	[19]
Commercial current amplifier	Current-voltage proportional conversion	DHPCA-100	10^3 V/A	175 MHz	1.9 mV	[20]
The fast preamplifier	Current-voltage proportional conversion	—	$1.97 \times 10^3 \text{ V/A}$	315 kHz	2.58 mV	This work

2.2 CsPbBr₃ 载流子迁移率测量分析

在恒定激光能量密度 $8 \mu\text{J} \cdot \text{mm}^{-2}$ 下, 调控偏置电压由 30 V 升至 70 V, 采集到的 CsPbBr₃ 单晶 TOF 瞬态响应波形如图 7A 所示。在每个偏压下, 采集 20 个单次激光脉冲触发的瞬态电流波形, 分别提取其漂移时间并取平均值, 用于后续载流子迁移率的计算分析。从波形中可以看出, 感应电流脉冲呈现出快速上升、维持平台、随后下降的 TOF 特征, 平台段的持续时间即代表载流子在极板间的漂移时间 t 。由于晶体内部的电荷陷阱效应、载流子扩散以及测试系统 RC 时间常数的存在, 其波形首尾并非理想的垂直阶跃。为了精确提取载流子漂移时间, 采用切线相交法对数据进行处理。将电流信号的起升最高点记为开始时间 (t_0), 将波形平台区的线性拟合延长切线与快速下降沿的拟合延长切线的交点记为载流子到达接收电极的时间 (t_1), 两者的差值 $t = t_1 - t_0$ 即为载流子有效漂移时间, 具体的几何判断方法如图 8 所示。

当偏置电压为 30 V 时, t 为 $4.06 \mu\text{s}$, 随着偏压升高至 70 V, 内部电场强度增强, 载流子漂移速度加快, 漂移时间缩短至 $3.21 \mu\text{s}$ 。其次, 由于电场强度增加能够减少载流子漂移过程中的电荷损耗, 所以随着高压的增加, 探测得到脉冲信号幅度也逐渐增加, 从 30 V 的 80 mV 左右增加至 70 V 的 140 mV 左右。当 248 nm 的激光在材料阳极表面入射时, 由于穿透深度仅约 20 nm, 激光只在阳极表面附近沉积能量, 此时电子漂移到阳极的距离可以忽略不计, 器件所产生的脉冲信号均有空穴穿越整个材料厚度产生。不同于传统室温半导体, CsPbBr₃ 单晶内部往往存在较强的电子陷阱效应, 而空穴则具备更低的捕获率和更优异的迁移率寿命积 ($\mu\tau$), 是决定该材料辐射探测性能的核心优势载流子。因此, 本实验在系统验证阶段优先提取了最具代表性的空穴迁移率作为评估参数。若需进一步获取电子的输运特

征, 本系统需反转偏压极性。图 7B 是基于不同偏压下平台时间拟合计算得到的空穴迁移率 μ_h 为 $19.83 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 此数值与现有文献报道的无机钙钛矿材料迁移率范围 ($10 \sim 50 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 一致^[21-23]。因此, 基于快前置放大器的 TOF 测量系统可用于 CsPbBr₃ 单晶迁移率的表征。本实验全程控制测试环境温度 (25 ± 1) °C、相对湿度 < 35%, 避免温湿度对晶体载流子输运特性的干扰, 并且基于不同 CsPbBr₃ 单晶进行了多次迁移率测试, 证明了系统的稳定性和可重复性。

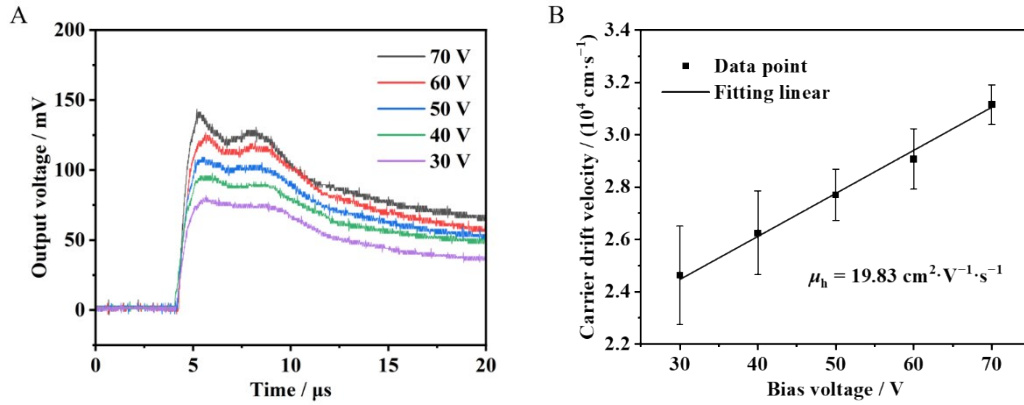


图 7 前置放大器输出的 CsPbBr₃ 单晶 TOF 波形 (A); 基于不同偏压下平台时间拟合得到的空穴迁移率 (B)

Fig. 7 TOF waveforms of CsPbBr₃ single-crystal output from the preamplifier (A); hole mobility fitted from the plateau duration under different bias voltages (B)

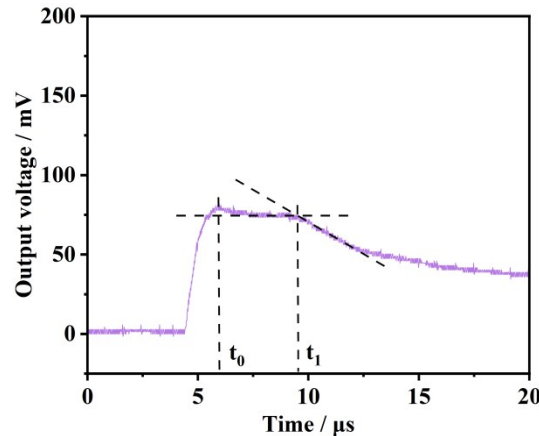


图 8 漂移时间提取方法

Fig. 8 Drift time extraction method

此外, 为了进一步评估本测试系统的数据可靠性, 根据迁移率计算公式 $\mu = L^2/V \cdot t$, 对测量的主要误差来源进行了综合分析。系统的测量误差分别来源于单晶厚度的测量、偏置电压的波动、以及漂移时间的获取, 其中漂移时间的获取是本系统误差的最大来源。一方面, 准分子激光单脉冲能量存在固有抖动, 光斑光强分布不均会影响载流子的分布情况, 造成 TOF 波形扭曲。另一方面, 设计的快前置放大器存在固有本底噪声, 且外界干扰也可能会耦合至信号通路, 模糊波形, 影响漂移时间地读数。此外, 在读取平台区的持续时间时, 不可避免地存在主观读数偏差。同时 CsPbBr₃ 单晶受环境温度和湿度影响大, 环境条件波动也会引入额外测量偏差。上述各类误差共同影响着迁移率测试的结果, 测试过程中主要通过规范测试流程、多次重复采集、保持测试环境稳定等手段, 最大程度降低各类误差对测量结果的干扰, 保证迁移率测试数据的良好可靠性。

3 结 论

本研究针对厚度为毫米级、信号漂移时间为微秒级的 CsPbBr₃ 单晶载流子迁移率测量需求, 成功搭建了一套包含紫外激光激发与低成本定制快前置放大器的 TOF 测试系统。该系统结合 248 nm 紫外脉冲

准分子激光仅约 20 nm 的极浅穿透深度,从物理源头上实现了单极性载流子的高效剥离,避免了电子空穴混合运动对漂移信号的干扰。并且摒弃了商用电流放大器冗余高带宽带来的白噪声缺陷,通过定制化 315 kHz 带宽与飞安级运放设计,将系统本底噪声控制在 2.58 mV。该系统成功无失真地捕捉到 CsPbBr₃ 的微弱瞬态漂移信号,并准确测得 CsPbBr₃ 的空穴迁移率为 19.83 cm²·V⁻¹·s⁻¹。本系统不仅为 CsPbBr₃ 等新一代钙钛矿半导体辐射探测材料的载流子输运特性评估提供了一种高效、针对性的表征工具,同时也为筛选室温辐射探测材料提供了硬件系统参考。

参考文献:

- [1] Spahn M. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, **2013**, 731: 57–63.
- [2] Harding G. *Radiat. Phys. Chem.*, **2004**, 71 (3–4): 869–881.
- [3] Usanase N, Uzun B, Ozsahin D U, Ozsahin I. *Jpn. J. Radiol.*, **2024**, 42 (2): 145–157.
- [4] Abbene L, Gerardi G, Principato F, Buttacavoli A, Altieri S, Protti N, Tomarchio E, Del Sordo S, Auricchio N, Bettelli M. *Synchrotron Radiation*, **2020**, 27 (6): 1564–1576.
- [5] Dudipala K R, Le T H, Nie W, Hoyer R L. *Adv. Mater.*, **2024**, 36 (8): 2304523.
- [6] Li Z Z, Zhou F G, Yao H H, Ci Z P, Yang Z, Jin Z W. *Mater. Today*, **2021**, 48: 155–175.
- [7] Wang T, Xu Y D, Zha G Q, Liu W H, Xu L Y, Bai X X, Fu L, Jie W Q. *Mech. Sci. Technol. Aerosp. Eng.* (王涛, 徐亚东, 查钢强, 刘伟华, 徐凌燕, 白旭旭, 傅莉, 介万奇. 机械科学与技术), **2010**, 29 (4): 546–550.
- [8] Stoumpos C C, Malliakas C D, Peters J A, Liu Z, Sebastian M, Im J, Chasapis T C, Wibowo A C, Chung D Y, Freeman A J, Wessels B W, Kanatzidis M G. *Cryst. Growth Des.*, **2013**, 13 (7): 2722–2727.
- [9] He Y H, Matei L, Jung H J, McCall K M, Chen M, Stoumpos C C, Liu Z F, Peters J A, Chung D Y, Wessels B W, Wasielewski M R, Dravid V P, Burger A, Kanatzidis M G. *Nat. Commun.*, **2018**, 9 (1): 1609–1616.
- [10] Yan H, Cao G, Wang J Q, Zhong C Q, Wang S H, Qin J, Tang F X, Cui M H, Luo Y K, Wang W Z, Zhu Y, Chen J F, Xu R, Wang L J. *Appl. Phys. Lett.*, **2025**, 126 (12): 122105.
- [11] Erickson J C, Yao H W, James R B, Hermon H, Greaves M. *J. Electron. Mater.*, **2000**, 29 (6): 699–703.
- [12] He Z. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, **2001**, 463 (1/2): 250–267.
- [13] Yücel H, Birgül Ö, Uyar E, Çubukçu Ş. *Nucl. Eng. Technol.*, **2019**, 51 (3): 731–737.
- [14] Cheng Y, Zhu M, Wang F, Bai R, Yao J, Jie W, Xu Y. *J. Mater. Chem. A*, **2021**, 9 (48): 27718–27726.
- [15] Feng Y, Pan L, Wei H, Liu Y, Ni Z, Zhao J, Rudd P N, Cao L R, Huang J. *J. Mater. Chem. C*, **2020**, 8 (33): 11360–11368.
- [16] Bennett S H, Ghosh J, Gros-Daillon E, Lédée F, Mayén Guillén J, Verilhac J-M, Zaccaro J, Chung D Y, Klepov V, Kanatzidis M G, Sellin P J. *Front. Detect. Sci. Technol.*, **2023**, 1: 1249892.
- [17] Chen R, Takagi K, Toyoda K, Nishizawa J, Wang S M, Zhao X, He P, Kase H, Meng G, Aoki T. *Appl. Phys. Lett.*, **2025**, 126 (26): 263506.
- [18] Zhao X, Wang S M, Zhuge F W, Zhu N W, Song Y N, Fu M Y, Deng Z H, Fang X D, Meng G. *J. Mater. Chem. C*, **2023**, 11 (25): 8533–8540.
- [19] Zhang X, Li F, Bai R, Sun Q, Hao Y, Xi S, Zhu M, Jiang S, Jie W, Xu Y. *J. Mater. Chem. C*, **2022**, 10 (15): 6017–6024.
- [20] He Y H, Petryk M, Liu Z F, Chica D G, Hadar I, Leak C, Ke W J, Spanopoulos I, Lin W W, Chung D Y, Wessels B W, He Z, Kanatzidis M G. *Nat. Photonics*, **2021**, 15 (1): 36–42.
- [21] Cucco B, Leveille J, Ha V-A, Even J, Kepenekian M, Giustino F, Volonakis G. *PRX Energy*, **2024**, 3 (2): 023012.
- [22] Wang Y Q, Ren R H, Shen N N, Xiao B, He X C, Sun Q H, He Y H. *J. Instrum. Anal.* (汪俞权, 任若茜, 申南南, 肖宝, 何旭昌, 孙皓, 何亦辉. 分析测试学报), **2024**, 43 (10): 1645–1650, 1657.
- [23] Pan L, Feng Y, Kandlakunta P, Huang J, Cao L R. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **2020**, 67 (2): 443–449.

(责任编辑: 盛文彦)