arXiv:2611.29295v1 [physics.optics] 22 Nov 2026

基于镱的激光系统实现的超宽带、高灵敏度时间分辨太赫兹光谱

Hong-Yuan Wu[1,2],Si-Jia Li[1,2],Jing-Long Ma[1],Guo-Qian Liao[1,2,4],Alexander Holm Ohrt[3],Long Cheng[3],Peter Uhd Jepsen[3],Bin-Bin Zhou[3],Si-Jie Zhang*[1],和 Yu-Tong Li*[1,2,4]1中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家实验室，北京 100190，中国2中国科学院大学物理科学学院，北京 100049，中国3丹麦技术大学电气与光子工程系，孔恩斯灵比，DK-2800，丹麦4松山湖材料实验室阿秒科学中心，广东东莞 523808，中国

*通讯作者：sjzh@iphy.ac.cn；ytli@iphy.ac.cn

摘要

超快光场在量子材料中引入了众多新颖的光诱导态。要识别这些态并阐明其形成机制，需要全面、定量地探测相关能量尺度上的非平衡电动力学。在此，我们开发了一种基于 Yb 激光器的时间分辨太赫兹光谱（TRTS）平台，结合了多通池脉冲压缩、自旋电子学太赫兹产生和空气偏置相干探测。一次时域波形扫描即可连续获得最高达 25 太赫兹（∼100 meV）的相位分辨光谱覆盖，傅里叶分辨率为 0.1 太赫兹（∼0.4 meV）。该能力使得在共同的时间基准下，能够表征量子材料中的低频电荷动力学和高能共振激发。系统单次扫描的时域信噪比达到 72 dB，且长期波形稳定性良好，同时保留大部分激光脉冲能量用于可调谐激发。对本征砷化镓的测量分辨出了 23 太赫兹以上极其微弱的声子特征，并证明了能够定量提取平衡态与瞬态复光学性质。该平台有望为量子材料中的光诱导态提供更完整的微观图景。

关键词：时间分辨太赫兹光谱；超宽带太赫兹光谱学；基于镱的激光器；非平衡电动力学

引言

超快光场开辟了调控量子材料的新途径，使得实现光诱导相变和非平衡条件下无法实现的光诱导态成为可能 [1]。要确定光诱导态的本质及其形成机制，必须解析其低能电动力学响应的演变。时间分辨太赫兹光谱（TRTS）通过对太赫兹电场进行相位分辨测量，可直接、无接触地获取这些信息，从而定量确定瞬态复光学电导率 [2]。

太赫兹时域光谱表征光诱导态的能力，取决于能否在相关能量尺度上可靠地确定其瞬态复数电动力学响应。在足够宽的光谱范围内实现连续的相位分辨覆盖，可在一致的激发条件和共同的时间参考下比较不同能量处响应的动力学，同时有助于区分在有限光谱窗口内可能表现相似的微观过程 [3]。足够的

光谱分辨率对于分离相近的激发并追踪其共振频率和线宽的变化是必要的 [4]。高灵敏度是分辨微弱光诱导响应所必需的，而长期波形稳定性则有助于在长时间实验中进行可靠测量 [5, 6]。宽范围可调谐激发还可选择性地探测不同的非平衡路径 [7–9]。

近年来，毫焦耳级镱基超快激光器取得了长足进展，使系统能够在千赫兹重复频率下长期稳定运行，并为太赫兹探测和灵活的光学激发提供了充足的脉冲能量 [10]。多通池后压缩进一步提供了宽带太赫兹产生与探测所需的短脉冲 [11]。然而，要在单次太赫兹波形扫描中实现连续的相位分辨光谱覆盖，关键取决于产生与探测方案。双色气体等离子体可提供极宽的光谱，但其相位敏感的产生过程容易受到环境波动的影响 [12, 13]。非线性晶体能够高效产生太赫兹波，并支持宽广的多太赫兹光谱，但其固有的声子共振仍会印刻在光谱响应中 [14–17]。自旋电子太赫兹发射器不受相位匹配限制，其可用带宽主要由探测方案决定 [18]。极薄的电光晶体可将探测范围扩展到更高频率，但内部反射可能产生早期回波，缩短可用时间窗口，进而限制光谱分辨率 [19]。通过整合不同光谱窗口的测量结果，可以扩展整体带宽；不过，激发条件和泵浦–探测时序的差异可能使瞬态响应的定量比较变得复杂。

在此，我们在基于镱激光器的太赫兹时间分辨光谱平台中，结合了多通池脉冲压缩、自旋电子太赫兹产生和空气偏置相干探测。单次太赫兹时域波形扫描即可提供连续的相位分辨光谱覆盖，范围达到 25 太赫兹，傅里叶分辨率为 0.1 太赫兹，时域信号噪声比为 72 dB，从而实现超宽带、高灵敏度的太赫兹光谱。激光脉冲能量中约有 80% 可用于灵活激发。对本征砷化镓的测量表明，可以定量提取平衡态与瞬态复光学性质，包括在强深度-
在传统近似修正失效的依赖性光激发条件下。该平台显著拓展了单次实验中可直接、可靠获取的非平衡电动力学信息范围。

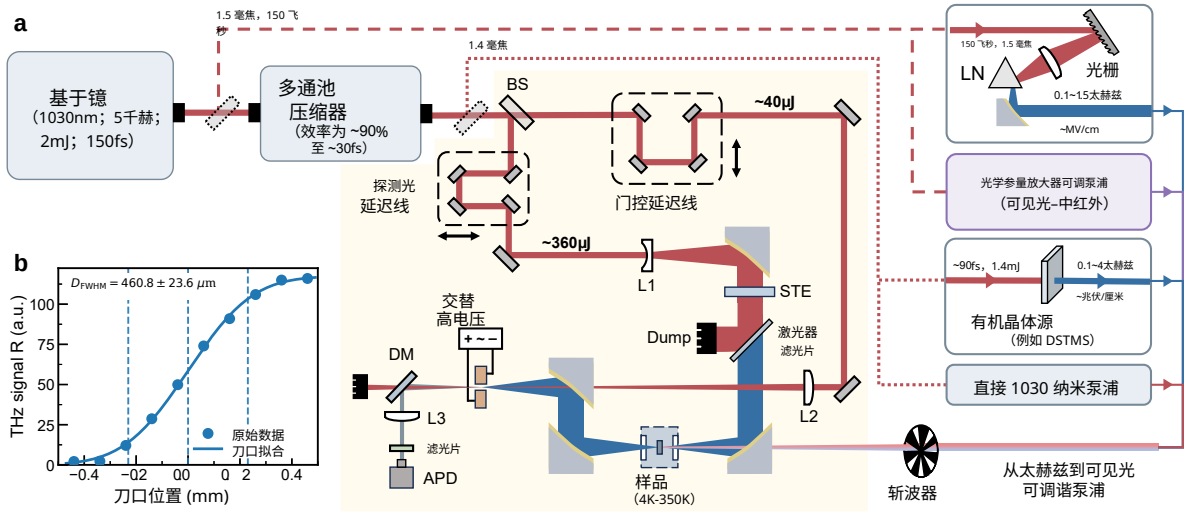

图1：基于镱激光器的超宽带太赫兹时域光谱平台。(a) 泵浦-探测平台示意图。黄色阴影区域表示超宽带太赫兹产生与探测模块。约 2 mJ 的脉冲能量大部分可用于激发，包括利用铌酸锂$_3$（LN）或有机晶体产生强太赫兹辐射，以及通过光学参量放大器（OPA）产生可见光至中红外辐射。BS，分束器；STE，自旋电子太赫兹发射器；L1，凹透镜；L2 和 L3，凸透镜；DM，二向色镜；APD，雪崩光电二极管。(b) 样品位置处太赫兹探测光的刀口表征，测得焦斑半高全宽为 $460.8 \pm 23.6\ \mu$m。

实验装置

图 1(a) 展示了实验布局。该系统以一台毫焦耳级基于镱的飞秒激光器（YC-FL-10-2000-IR）为核心，工作重复频率为 5 千赫，中心波长为 1030 nm，脉冲能量约为 2 mJ，初始脉冲持续时间为 ∼150 fs。脉冲在充氩多通池（MPC；YactoCompress）中进行光谱展宽，随后压缩至 ∼30fs。

压缩后，约 360 μJ 的脉冲用于驱动蓝宝石基底上的 W/CoFeB/Pt 自旋电子太赫兹发射器（STE），以实现超宽带太赫兹产生 [20, 21]。凹透镜（L1）和 90° 离轴抛物面（OAP）反射镜控制发射器上的光通量。透过 STE 的残余 1030 nm 光由激光阻挡元件去除。太赫兹探测光在样品位置聚焦为半峰全宽（FWHM）为 ∼460 μm 的光斑 [图 1（b）], ，其中低温恒温器提供 4–350 K 的温度范围。另一条 ∼40 μJ 分支用作空气偏置相干探测（ABCD）的光学门控 [22, 23]。

约80%的激光脉冲能量仍可用于泵浦激发 [图1（a）]。该能量足以产生强场太赫兹脉冲，其峰值电场可达1 MV/cm以上，所使用的材料包括铌酸锂$_3$ 和DSTMS晶体 [24, 25]。它还可驱动光学参量放大器（OPA），实现可广泛调谐的可见光至中红外激发 [26]。

结果

超宽带太赫兹探针表征

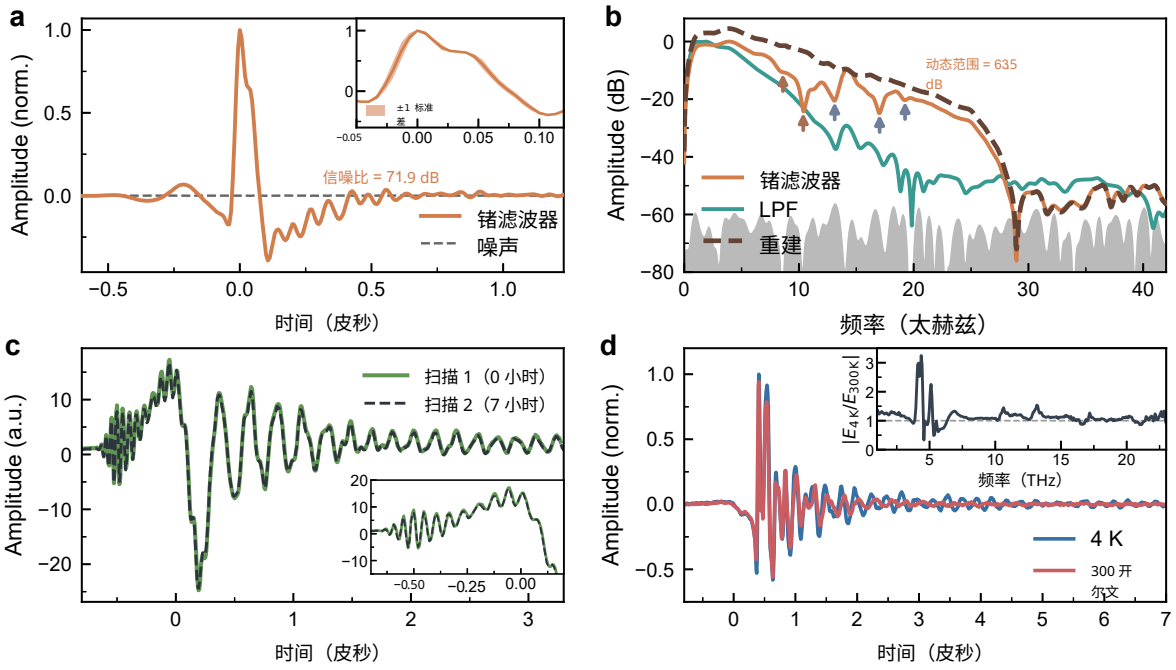

图 2：太赫兹探测光的表征。（a）使用厚度为 1 mm 的锗片阻挡残余激光后测得的时域波形。插图放大显示了 0 皮秒附近的波形；阴影表示 ±1 五次重复测量的标准差（SD）。（b）使用不同滤波器得到的太赫兹振幅谱。箭头标出了来自锗（棕色）和蓝宝石（灰蓝色）的声子相关特征；LPF 表示低通滤波器。虚线曲线为去嵌入声子响应后的光谱。（c）在相隔 7 小时的时间测得的砷化镓上的时域波形。插图放大显示了波形前沿处的高频振荡。（d）GeSe 在 4 K 和 300 K 下的时域波形及相应的光谱比。

图2（a）显示了测得的太赫兹波形。单次扫描在锁相时间常数为200 ms时即可达到71.9 dB的时域信噪比（SNR），对应的相对场噪声约为 2.5×10^{-4}。首次内反射回波约在9.6 ps处出现，与通过STE的430μ μm蓝宝石衬底的往返传播时间吻合良好。由此得到的无回波时间窗对应的傅里叶光谱分辨率约为0.10 THz。插图突出显示了主脉冲及其逐次扫描的重复性，阴影区域表示±1 五次重复扫描的标准差。

对应的幅度谱 [图 2(b)] 峰值动态范围（DR）达到 63.5 dB，并且在接近 28 太赫兹的范围内几乎连续。在 25 太赫兹处，信号仍比光谱最大值低不到 30 dB，为相位分辨光谱学留出了充足余量。8.6、10.4、13、17 和 19 太赫兹附近的光谱极小值，主要源于 1 毫米厚锗阻挡滤光片和 STE 蓝宝石衬底的声子相关响应 [27–29]。陶瓷低通滤波器（LPF）可带来更平滑的低频响应，但会衰减高频光谱 [图 2(b)]。为分离锗片和蓝宝石衬底的贡献，使用文献中的光学常数对其响应进行去嵌入 [20, 21, 30–35]。所得光谱如图 2(b) 中的虚线所示。

通过比较在相同条件下、间隔 7 小时采集的室温砷化镓波形，评估长期稳定性 [图 2(c)]。两条曲线在实验噪声范围内吻合，包括 ∼20 太赫兹波形前沿处的太赫兹高频振荡（如插图所示），表明在此期间未观察到可测量的振幅或相位漂移。使用 GeSe 展示温度依赖测量结果，其在 300 K 和 4 K 下的时域与频域响应呈现出明显不同的声子特征 [图 2(d)]。

砷化镓的平衡光学常数

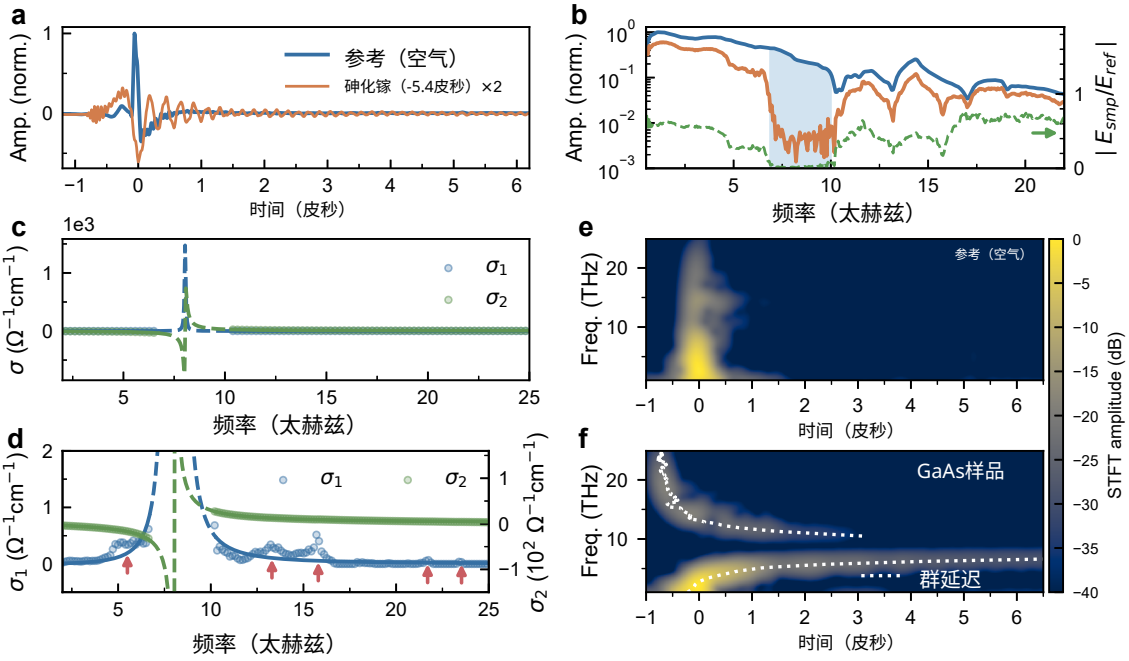

图3：砷化镓的平衡光学响应。(a) 透过空气和砷化镓的太赫兹场；为清晰起见，砷化镓曲线平移了 −5.4 皮秒，并放大至原来的 2 倍。(b) 傅里叶振幅谱和场透射率；7–10 太赫兹处的极小值与 TO 声子有关。(c) 提取的复光学电导率。(d) 弱吸收区域的放大图；实线为强 TO 声子吸收带之外的 Drude–Lorentz拟合曲线，虚线表示排除区域内的建模响应；箭头标示高阶晶格特征。(e,f) 空气和砷化镓的短时傅里叶变换图；(f) 中的虚线为根据提取的折射率计算得到的群延迟。

图3(a)显示了透过空气和砷化镓的电场，相应的傅里叶光谱见图3(b)。根据测得的复透射比 $H_{\mathrm{exp}}(\omega) = E_{\mathrm{smp}}(\omega)/E_{\mathrm{ref}}(\omega)$，可反演得到砷化镓的复折射率 $N(\omega) = n(\omega) + \mathrm{i}k(\omega)$。对于每个试探值 $N(\omega)$，我们根据菲涅耳系数和传播相位计算 500-μm 厚砷化镓薄片的透射率，并通过最小化与 $H_{\mathrm{exp}}(\omega)$ 的复数差值来确定 $N(\omega)$。随后即可直接得到介电函数和光学电导率 [36–38]。由于对噪声高度敏感，反演时排除了 7–10 THz近零透射区域。锗滤波器和蓝宝石衬底引入的局域光谱结构在样品-参考比中大多相互抵消，因此不会影响宽带反演。数值计算细节见补充信息第 S1 节。

图 3(c) 显示了由此得到的复光学电导率，其主要特征是 8 太赫兹附近的横向光学（TO）声子。图 3(d) 的放大尺度揭示了弱得多的高阶晶格吸收。5–6 太赫兹附近的阶梯状结构与二阶声子差频吸收相符，而 13.3、15.8、21.7 和 23.5 太赫兹附近较弱的特征则与更高频的组合过程和多声子过程有关 [39, 40]。在测量光谱范围内同时观察到强烈的 Reststrahlen 响应和显著较弱的高阶特征，表明光谱覆盖范围几乎连续地延伸至 25 太赫兹。

砷化镓波形显著的频率相关延迟为提取的折射率提供了独立验证。图 3(e) 和 3(f) 对比了空气参考波形与砷化镓波形的短时傅里叶变换（STFT）图。根据提取的 $N(\omega)$，我们计算了群折射率 $n_g(\omega)$ 和相对群延迟 $\Delta t_g(\omega) = \frac{d}{c}[n_g(\omega) - 1]$，其中 d 为砷化镓的厚度。图 3(f) 中的白色虚线表示计算得到的延迟，它与测得的时间色散相符，并为宽带光学常数提供了独立的一致性验证。

砷化镓的瞬态光电导

随后，我们研究砷化镓在通量为 $500\ \mu\mathrm{J/cm}^2$ 的 1030纳米脉冲激发后的瞬态响应。通过同步扫描图 1(a) 所示的探测延迟线和门控延迟线，获取泵浦-探测延迟曲线；这样既能改变泵浦-探测延迟，又能保持太赫兹波形上的采样点固定。相比之下，仅扫描探测延迟线，即可记录选定泵浦-探测延迟下的瞬态太赫兹波形。图 4(a) 展示了泵浦诱导电场变化随泵浦-探测延迟的变化，而图 4(b) 展示了若干代表性延迟下的完整瞬态波形。从完整波形中提取的峰值振幅与延迟扫描中的相应数据点一致，证实了两种采集模式的结果相互吻合。

在室温下，1030 纳米泵浦光子能量低于砷化镓的直接带隙 ~1.43 eV [41]。因此，线性吸收较弱 [42], ，而双光子吸收（TPA）可提供高效的激发通道 [43–45]。我们将泵浦传播描述为

$$\frac{\partial I(t,z)}{\partial z} = -\alpha I(t,z) - \beta I^2(t,z), \tag{1}$$

其中 α 和 β 分别为线性吸收系数和双光子吸收系数。如图 4(d) 所示，泵浦强度随深度增加而显著减弱。由于双光子吸收对局部载流子产生率的贡献与 I^2成正比，因此产生的光激发载流子分布高度集中于入射表面附近，而太赫兹探测光探测的深度则大得多。因此，必须在瞬态光学分析中考虑这种显著的深度失配。

对于当前数据，常规的穿透深度修正会使测得光谱的部分范围内出现非物理的负值 $\sigma_1(\omega)$（补充信息第 S2 节）。这些近似之所以失效，是因为其解析解采用了简化的相位处理；对于如此宽的光谱范围内的大幅光诱导场变化，这种处理并不准确 [46]。因此，我们采用多层传输矩阵计算来提取瞬态光学响应，并明确纳入深度依赖激发。首先通过粗略的参数拟合估算表面介电扰动 $\Delta\tilde{\epsilon}_s(\omega)$，随后在克拉默斯–克勒尼希约束下通过变分方法进一步优化 [47–49]。激发剖面计算和反演过程的详情见补充信息第 S2 节。

图4(e)–4(g) 展示了代表性泵浦延迟下反演得到的瞬态复光电导率。在 $\tau = 0.93$ 皮秒时，拟合得到的德鲁德响应相对较弱，但到 $\tau = 4.60$ 皮秒时显著增强

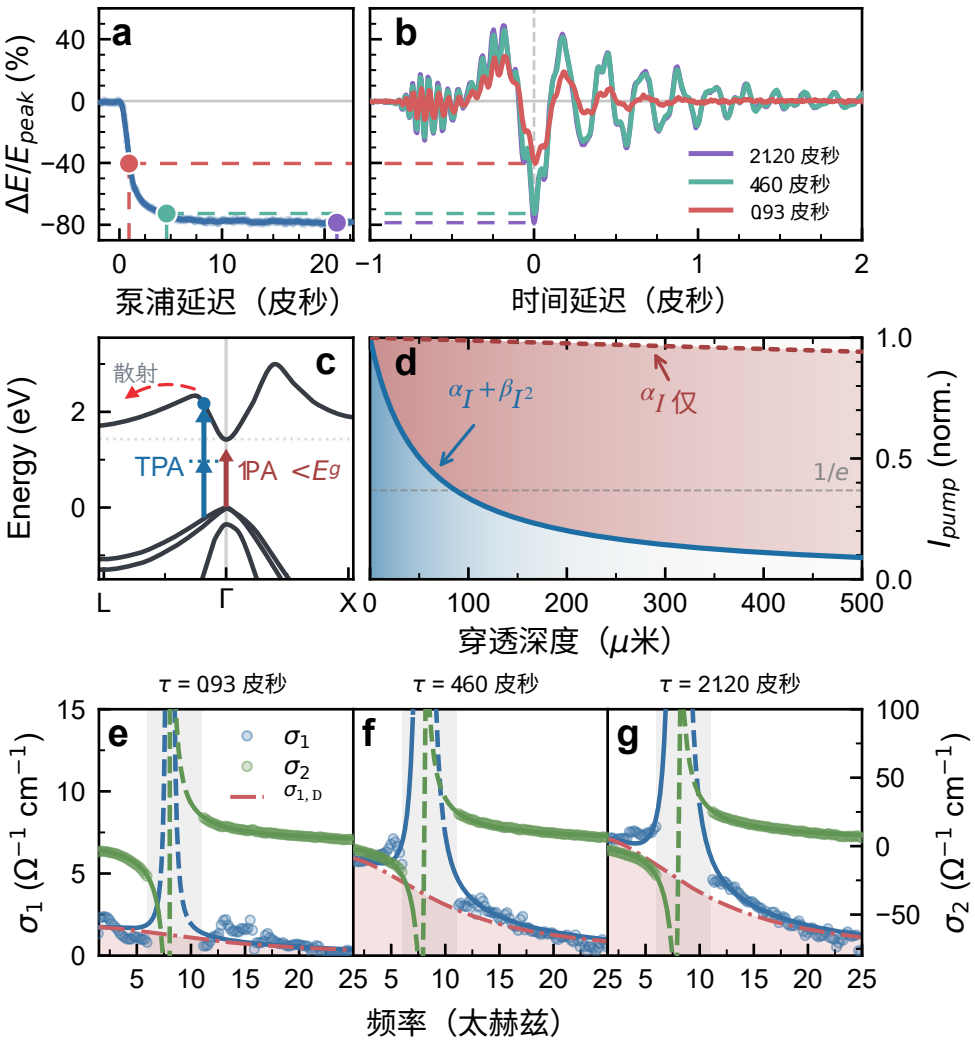

图4：1030纳米激发后砷化镓的超快动力学。(a) 归一化瞬态场变化$\Delta E/E_{\mathrm{peak}}$ 随泵浦-探测延迟的变化。(b) 三个代表性延迟 $\Delta E/E_{\mathrm{peak}}$ 下的瞬态太赫兹波形。(c) 砷化镓示意能带结构，展示双光子激发（双光子吸收）、较弱的带隙下单光子吸收（单光子吸收）以及谷间载流子散射。(d) 归一化泵浦强度随深度的计算变化，其中同时考虑线性吸收和双光子吸收（蓝色实线），并与仅考虑线性吸收的情况（红色虚线）比较。灰色虚线标示 $1/e$ 强度水平。(e–g) 在 $\tau = 0.93$、4.60和21.20 皮秒时测得的瞬态复光电导率。TO声子会强烈抑制灰色频谱区间，因此该区间未纳入定量拟合。红色阴影区域表示拟合得到的德鲁德贡献 $\sigma_1(\omega)$。

此后变化仅较为温和，直至 21.20 皮秒。低频电导率的这种延迟建立，与双光子激发最初将载流子布居到远高于带边的态相一致；随后经历谷间散射和能量弛豫，才形成更强的德鲁德响应 [50–52]。洛伦兹拟合还揭示，光激发后声子共振发生了展宽。

讨论

该太赫兹时域光谱平台所达到的性能，经过有意设计，与量子材料低能光谱学中具有特征性的能量和信号尺度相匹配。连续的相位分辨覆盖可达 25 太赫兹（$\sim$ 100 meV），涵盖广泛的单粒子激发和集体激发 [1], ；同时，0.1 太赫兹（$\sim$ 0.4 meV）的傅里叶分辨率能够分辨许多红外活性共振的频率、线宽和瞬态位移 [53]。$\sim 2.5 \times 10^{-4}$ 的相对场噪声进一步保持了整个宽带响应中低于百分之一的光诱导变化 [54]。这些能力使得在能量相差很大的范围内，同时获取谱权重重分布、散射动力学和共振响应成为可能，并提供完整的振幅和相位信息。由于探测光仅需占用激光输出的一小部分，因此同样的测量还可以与可调谐的强场激发相结合。该平台建立在商业化成熟的毫焦耳级镱激光系统之上，能够广泛应用于各类超快实验室，从而将这一光谱学能力拓展至范围更广泛的研究领域。

当前配置旨在提供一种通用性强的工作方案，各项参数均可轻松扩展，以满足更专业的测量需求。例如，通过衬底工程抑制或延迟首次内反射回波，可延长无回波时间窗，并进一步提高对极窄共振的光谱分辨率 [55]。采用更短的驱动脉冲和门控脉冲，可将可用探测带宽扩展至更高频率 [56]。对于不适用于当前透射几何的非透明或强吸收材料，采用反射几何即可将同样的宽带、相位分辨测量能力拓展至范围广得多的样品 [57]。

结论

总之，我们构建了一个基于镱激光器的太赫兹时间分辨光谱平台，旨在通过单次实验全面、定量地表征非平衡电动力学。该平台实现了连续的相位分辨覆盖，最高达 25 太赫兹（$\sim$100 meV）；傅里叶光谱分辨率为 0.1 太赫兹（$\sim$0.4 meV）；单次扫描的时域信噪比为 71.9 dB；并具备长期振幅与相位稳定性，同时保留了大部分激光能量用于宽范围可调谐激发。对本征砷化镓进行的宽带测量表明，该平台能够准确提取平衡态与瞬态复光学性质。该平台能够在同一次相位分辨测量中追踪跨越相距甚远的能量尺度的光谱权重再分布、散射动力学和共振激发，从而为量子材料中的光诱导非平衡态提供更完整的微观图景。

致谢

我们衷心感谢 Nan-Lin Wang 教授进行了富有成效的讨论。本研究得到了国家重点研发计划（编号：2024YFA1408703、2021YFA1400204 和 2025YFE0202100）以及国家自然科学基金（编号：U24A2016、12304184 和 12574164）的资助。

补充信息

平衡态光学常数提取和深度分辨瞬态多层反演的详细信息，见随附的补充信息（第 S1 和 S2 节）。

参考文献

(1) De la Torre, A.; Kennes, D. M.; Claassen, M.; Gerber, S.; McIver, J. W.; Sentef, M. A. 综述：量子材料中通向超快调控的非热路径。《现代物理评论》2021年，93，041002。 (2) Koch, M.; Mittleman, D. M.; Ornik, J.; Castro-Camus, E. 太赫兹时域光谱。《自然综述：方法入门》2023年，3，48。 (3) Zhang, S. J.; Zhou, X. Y.; Xu, S. X.; Wu, Q.; Yue, L.; Liu, Q. M.; Hu, T. C.; Li, R. S.; Yuan, J. Y.; Homes, C. C.; Gu, G. D.; Dong, T.; Wang, N. L. 在 $La_{2-x}Ba_xCu_4O$ 中诱导光熔化竞争条纹序，同时不引入超导性。《物理评论 X》2024年，14，011036。 (4) Zhang, S.; Sun, Z.; Liu, Q.; Wang, Z.; Wu, Q.; Yue, L.; Xu, S.; Hu, T.; Li, R.; Zhou, X.; Yuan, J.; Gu, G.; Dong, T.; Wang, N. 揭示约瑟夫森电流诱导的非线性太赫兹响应中的频率依赖振荡。《国家科学评论》2023年，10，nwad163。 (5) Huang, C.; Mootz, M.; Luo, L.; Perakis, I. E.; Wang, J. 用太赫兹二维相干光谱探测和调控量子物质中的多重关联。《自然综述：物理》2026年，8，171–185。 (6) Zhang, S. J.; Wang, Z. X.; Xiang, H.; Yao, X.; Liu, Q. M.; Shi, L. Y.; Lin, T.; Dong, T.; Wu, D.; Wang, N. L. 通过时间分辨太赫兹光谱探测欠掺杂 $YBa_2Cu_3O_{6+x}$ 中的光诱导非平衡响应。《物理评论 X》2020年，10，011056。 (7) Disa, A. S.; Nova, T. F.; Cavalleri, A. 利用光进行晶体结构工程。《自然物理》2021年，17，1087–1092。 (8) Yang, C.-J.; Li, J.; Fiebig, M.; Pal, S. 量子材料中多体动力学的太赫兹调控。《自然综述：材料》2023年，8，518–532。 (9) Li, S. J.; Wu, H. Y.; Zhang, S. J.; Li, Y. T. 利用强场太赫兹和中红外辐射探测与操控量子材料。arXiv 预印本 arXiv:2610.11126，2026年。 (10) Donaldson, P. M.; Greetham, G. M.; Middleton, C. T.; Luther, B. M.; Zanni, M. T.; Hamm, P.; Krummel, A. T. 利用 100 kHz 放大镱激光系统突破超快光谱和成像的障碍。《化学研究述评》2023年，56，2062–2071。 (11) Viotti, A.-L.; Seidel, M.; Escoto, E.; Rajhans, S.; Leemans, W. P.; Hartl, I.; Heyl, C. M. 用于超短激光脉冲后压缩的多通池。《光学》2022年，9，197–216。 (12) Buldt, J.; Stark, H.; Müller, M.; Grebing, C.; Jáuregui, C.; Limpert, J. 基于气体等离子体产生的宽带太赫兹辐射，平均功率为 640 mW。《光学快报》2021年，46，5256–5259。 (13) Mi, Y.; Johnston, K.; Shumakova, V.; Møller, S. H.; Jana, K.; Zhang, C.; Staudte, A.; Sederberg, S.; Corkum, P. B. 双色空气等离子体辐射太赫兹波形的主动稳定。《光子学研究》2022年，10，96–103。 (14) Jazbinsek, M.; Puc, U.; Abina, A.; Zidansek, A. 用于太赫兹光子学的有机晶体。《应用科学》2019年，9，882。 (15) Mansourzadeh, S.; Vogel, T.; Omar, A.; Biggs, M. F.; Ho, E. S.-H.; Hoberg, C.; Michaelis, D. J.; Havenith, M.; Johnson, J. A.; Saraceno, C. J. 基于有机晶体 MNA 的高动态范围宽带太赫兹时域光谱仪。《光子学研究》2025年，13，2510–2519。 (16) Cui, W.; Vishnuradhan, A.; Lippl, M.; Yalavarthi, E. K.; Gamouras, A.; Joly, N. Y.; Ménard, J.-M. 使用 BNA 晶体和可调谐单环光纤压缩器实现超过 25 太赫兹的宽带太赫兹光谱系统，2026年。 (17) Jeong, Y.-G.; Zanotto, L.; Seo, D.-J.; Nam, Y.; Jin, X.; Kyoung, J.; Schmidt, B. E.; Shalaby, M.; Razzari, L. 由经充气空芯光纤压缩的镱激光脉冲泵浦有机晶体 BNA，实现多微焦耳宽带太赫兹产生。《光学快报》2025年，50，530–533。 (18) Vogel, T.; Omar, A.; Mansourzadeh, S.; Wulf, F.; Martín Sabanés, N.; Müller, M.; Seifert, T. S.; Weigel, A.; Jakob, G.; Kläui, M.; Pupeza, I.; Kampfrath, T.; Saraceno, C. J. 反射几何中高效冷却的太赫兹自旋电子发射器的平均功率扩展。《光学快报》2022年，30，20451–20468

.

(19) Kampfrath, T.; Nötzold, J.; Wolf, M. 使用厚电光晶体对宽带太赫兹脉冲进行采样。《应用物理快报》2007, 90, 231113. (20) Seifert, T. et al. 高效金属自旋电子超宽带太赫兹辐射发射器。《自然·光子学》2016, 10, 483–488. (21) Rouzegar, R.; Chekhov, A. L.; Behovits, Y.; Serrano, B. R.; Syskaki, M. A.; Lambert, C. H.; Engel, D.; Martens, U.; Münzenberg, M.; Wolf, M.; Jakob, G.; Kläui, M.; Seifert, T. S.; Kampfrath, T. 峰值电场超过 1.5 MV/cm 的宽带自旋电子太赫兹源。《物理评论应用》2023, 19, 034018. (22) Dai, J.; Xie, X.; Zhang, X.-C. 利用气体中的激光诱导等离子体探测宽带太赫兹波。《物理评论快报》2006, 97, 103903. (23) Zhou, B.; Cheng, L.; Ohrt, A. H.; Jepsen, P. U. 通过强相位失配光整流产生超宽带太赫兹波。《光学》2026, 13, 2096–2104. (24) Kong, D.; Su, Y.; Song, C.; Wu, X. 基于工业级高重复频率飞秒激光器的室温高平均功率强场太赫兹源。《光子学研究》2025, 13, 2477. (25) Zheng, Z.; Wang, K.; Li, H.; Meng, X.; Tian, Y.; Song, L. 通过 DSTMS 晶体中的光整流实现高重复频率强场太赫兹源。《高功率激光科学与工程》2024, 12, e61. (26) Budri¯unas, R.; Jurkus, K.; Vengris, M.; Varanavičius, A. 长种子、短泵浦：将掺镱激光辐射转换为可调谐至 2.5–15 μm 的多-μJ 少周期脉冲。《光学快报》2022, 30, 13009–13023. (27) Shirley, E. L.; Lawler, H. M. Si 和 Ge 的双声子红外光谱：特征的计算与归属。《物理评论B辑》2007, 76, 054116. (28) Deinzer, G.; Strauch, D. 基于第一性原理计算的锗和硅双声子红外吸收光谱。《物理评论B辑》2004, 69, 045205. (29) Gueckstock, O.; Nádvorník, L.; Seifert, T. S.; Borchert, M.; Jakob, G.; Schmidt, G.; Woltersdorf, G.; Kläui, M.; Wolf, M.; Kampfrath, T. 以高达 10 kHz 的速率调制自旋电子发射器所产生宽带太赫兹脉冲的偏振。《光学》2021, 8, 1013. (30) Loewenstein, E. V.; Smith, D. R.; Morgan, R. L. 远红外材料的光学常数。2：晶体固体。《应用光学》1973, 12, 398. (31) Mills, I. M.; Crawford, B. 锗在远红外波段的透射。《美国光学学会杂志》1955, 45, 489. (32) Burnett, J. H.; Benck, E. C.; Kaplan, S. G.; Stover, E.; Phenis, A. 锗的折射率。《应用光学》2020, 59, 3985. (33) Alishouse, J. C. 锗吸收系数随温度的变化。《美国光学学会杂志》1966, 56, 525. (34) Seifert, T. S.; Cheng, L.; Wei, Z.; Kampfrath, T.; Qi, J. 超短太赫兹电磁脉冲的自旋电子源。《应用物理快报》2022, 120, 180401. (35) Barker, A. S. 刚玉中的红外晶格振动与介电色散。《物理评论》1963, 132, 1474–1481. (36) Duvillaret, L.; Garet, F.; Coutaz, J.-L. 太赫兹时域光谱中提取材料参数的可靠方法。《IEEE量子电子学精选主题期刊》1996, 2, 739–746. (37) Dorney, T. D.; Baraniuk, R. G.; Mittleman, D. M. 利用太赫兹时域光谱估算材料参数。《美国光学学会杂志》A辑 2001, 18, 1562–1571. (38) Jepsen, P.; Cooke, D.; Koch, M. 太赫兹光谱与成像——现代技术及应用。《激光与光子学评论》2011, 5, 124–166.

(39) Cochran, W.; Fray, S. J.; Johnson, F. A.; Quarrington, J. E.; Williams, N. 砷化镓中的晶格吸收。《应用物理学杂志》1961, 32, 2102–2106. (40) Komandin, G. A.; Chuchupal, S. V. 太赫兹-红外范围内 GaAs 的一阶和二阶吸收过程。《应用光学》2024, 63, 8475. (41) Malone, B. D.; Cohen, M. L. 纳入自旋–轨道相互作用的准粒子半导体能带结构。《物理学杂志：凝聚态》2013, 25, 105503. (42) Valley, G. C.; Smirl, A. L.; Klein, M. B.; Bohnert, K.; Boggess, T. F. GaAs 中的皮秒光折变光束耦合。《光学快报》1986, 11, 647–649. (43) Bechtel, J. H.; Smith, W. L. 皮秒激光脉冲在半导体中的双光子吸收。《物理评论 B辑》1976, 13, 3515–3522. (44) Boggess, T.; Smirl, A.; Moss, S.; Boyd, I.; Van Stryland, E. GaAs 中的光学限幅。《IEEE量子电子学杂志》1985, 21, 488–494. (45) DeSalvo, R.; Sheik-Bahae, M.; Said, A. A.; Hagan, D. J.; Van Stryland, E. W. 晶体中非线性折射和吸收各向异性的 Z 扫描测量。《光学快报》1993, 18, 194. (46) D’Angelo, F.; Němec, H.; Parekh, S. H.; Kužel, P.; Bonn, M.; Turchinovich, D. 利用空气光子学进行自参考超宽带瞬态太赫兹光谱。《光学快报》2016, 24, 10157. (47) Karlsen, P.; Hendry, E. 泵浦-探测光谱中信号分析所用的近似 https://arxiv.org/abs/1902.08619. (48) Kuzmenko, A. B. 光学光谱的克拉默斯–克勒尼希约束变分分析。《科学仪器评论》2005, 76, 083108. (49) Ashoka, A.; Tamming, R. R.; Girija, A. V.; Bretscher, H.; Verma, S. D.; Yang, S.-D.; Lu, C.-H.; Hodgkiss, J. M.; Ritchie, D.; Chen, C.; Smith, C. G.; Schnedermann, C.; Price, M. B.; Chen, K.; Rao, A. 从泵浦-探测光谱中提取定量介电性质。《自然·通讯》2022, 13, 1437. (50) Nuss, M. C.; Auston, D. H.; Capasso, F. 直接亚皮秒测量砷化镓中光激发电子的载流子迁移率。《物理评论快报》1987, 58, 2355–2358. (51) Shah, J.; Deveaud, B.; Damen, T. C.; Tsang, W. T.; Gossard, A. C.; Lugli, P. 通过亚皮秒发光光谱测定 GaAs 中的谷间散射率。《物理评论快报》1987, 59, 2222–2225. (52) Kanasaki, J.; Tanimura, H.; Tanimura, K. 对 GaAs 中光注入热电子的能量、动量和时间分辨分布进行成像。《物理评论快报》2014, 113, 237401. (53) Dong, T.; Zhang, S.-J.; Wang, N.-L. 量子材料超快光学表征的最新进展。《先进材料》2023, 35, 2110068. (54) Demsar, J. 飞秒时域光谱探测的超导体非平衡现象。《低温物理学杂志》2020, 201, 676–709. (55) Koleják, P. et al. 将自旋电子太赫兹发射器的电磁效率最大化。《先进光子学研究》2024, 5, 2400064. (56) Liu, Y.; Liu, Y.; Zhou, H.; Zhang, A.; Yang, S.; Fang, S. 用于亚光学周期双色镱激光合成器的高重复频率少周期绿光源产生。《光学快报》2026, 51, 2728. (57) Zhang, S. J.; Wang, Z. X.; Dong, T.; Wang, N. L. 反射几何下可调谐近红外至中红外泵浦-太赫兹探测光谱。《物理学前沿》2017, 12, 127802.