材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022031004

光泵浦太赫兹探测对于不同掺杂硅的光激发动力学表征

陈涛涛[1,2]，张逸竹[3]，赵静静[1,2]，周　茜[1,2]，李东栋[1]，江玉海[1,2,4*]

（1. 中国科学院上海高等研究院，上海 201210；2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 天津大学 太赫兹波研究中心及精密仪器与光电子工程学院，天津 300072；4. 上海科技大学 大科学中心和物理科学与技术学院，上海 201210）

摘　要： 提出了一种光泵浦太赫兹探测技术的改进方案，使用双色飞秒激光场电离空气诱导等离子体辐射的超短宽带太赫兹脉冲作为探测脉冲，表征了硅的光激发动力学，通过表征过程验证了基于所提改进方案的光泵浦太赫兹探测系统的性能。硅的泵浦深度随泵浦功率的增加而提高，400 nm泵浦光的泵浦深度大于800 nm泵浦光。使用400 nm泵浦光，p掺杂硅的泵浦深度最大，本征硅次之，n掺杂硅最小；而使用800 nm泵浦光，p掺杂硅的泵浦深度最大，n掺杂硅次之，本征硅最小。此外，基于探测脉冲的超宽带宽和超短脉宽，还观测到了p掺杂硅中的亚皮秒激发态声子波包振荡。

关键词： 太赫兹；光泵浦太赫兹探测；硅；太赫兹时间分辨光谱；声子波包

中图分类号： TN304　**文章编号：** 1001－5868(2022)04－0791－06

Characterization of Photo-Excited Dynamics for Different Doped Si by Optical Pump Terahertz Probe

CHEN Taotao[1,2], ZHANG Yizhu[3], ZHAO Jingjing[1,2], ZHOU Xi[1,2], LI Dongdong[1], JIANG Yuhai[1,2,4]

(1. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, CHN; 2. Center for Terahertz Waves and School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, CHN; 3. Center for Transformative Science and School of Physical Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, CHN; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: An improved scheme of optical pump terahertz probe (OPTP) technique was proposed. Using an ultrashort broadband terahertz (THz) pulse of air-induced plasma radiation ionized by a two-color femtosecond laser field as the probe pulse, the photo-excited dynamics in silicon was characterized with the improved OPTP, and the capability of the OPTP system based on the improved scheme of this paper was verified through a characterization process. The pump depth of silicon increase with higher pump power, so that the pump depth of 400 nm pump pulse is greater than that of 800 nm pump pulse. The pump depth of p-doped silicon is the largest, followed by intrinsic silicon, and the smallest for n-doped silicon while using 400 nm pump pulse. However, the pump depth of p-doped silicon is the largest, followed by n-doped silicon, and the smallest for intrinsic silicon while using 800 nm pump pulse. Furthermore, based on the ultrawide bandwidth and ultrashort pulse width of the probe pulse, the sub-picosecond phonon wavepacket oscillation in excited state is observed.

Key words: terahertz; optical pump terahertz probe; Si; time-resolved terahertz spectroscopy; phonon wavepacket

收稿日期：2022－03－10.

基金项目：国家自然科学基金项目(12174284, 11827806, 11874368).

* **通信作者：**江玉海

E-mail: jiangyh@shanghaitech.edu.cn

0 引言

利用各种超快光谱技术，半导体光激发动力学的时域分辨率可以达到飞秒量级。太赫兹(THz)时间分辨光谱，又称为光泵浦太赫兹探测(OPTP)光谱，是近年来新出现的一种典型的超快光谱技术，能够有效地观测半导体中 THz 频段的光激发载流子和激子-声子耦合动力学，具有广阔的应用前景[1-4]。在相关的研究中，作为探测脉冲的 THz 通常是使用光整流或者光电导天线的方法产生的[5-7]，这种 THz 约 1 ps 的脉宽限制了 OPTP 的时间分辨率。然而，半导体中快于 1 ps 的光激发动力学，尤其是激发态的声子波包动力学同样具有重要的意义[8-10]。目前，半导体中的超快光激发动力学通常使用可见光或近红外波段作为探测光进行泵浦探测研究[11]，这种方法对于低能的动力学过程不敏感，并且 OPTP 通常局限于 THz 的脉宽而没有足够的时间分辨能力。

双色飞秒激光电离空气诱导等离子体辐射的 THz 具有超宽带宽和超短脉宽[12-14]，是一种有效的 OPTP 探测脉冲 THz 源。在已有的研究中，已经证实了这种 THz 源具有超过 50 THz 的带宽和短于 100 fs 的脉宽[15-16]。这种超短宽带的空气等离子体 THz 在高次谐波和光电子谱重构等研究中具有广泛的应用[17-18]。在我们最近的另一项研究工作中，发现当双色激光场(400 nm/800 nm，35 fs)的焦点沿传播方向不重合时，由于等离子体的级联效应，THz 的辐射效率提高一个数量级，带宽拓展到超过 100 THz[19]。因此，空气等离子体 THz 源适合作为 OPTP 的探测脉冲。

本文提出了一种 OPTP 技术的改进方案，使用空气等离子体辐射的 THz 作为 OPTP 的探测脉冲，实现了约 100 fs 的 OPTP 时间分辨。研究了 Si 的光激发动力学过程，验证了该 OPTP 系统的性能。定义样品的 THz 差分透射率($\Delta T = T - T_0$，T_0 和 T 分别是探测脉冲先于泵浦脉冲到达样品和探测脉冲晚于泵浦脉冲到达样品时的 THz 透射率)为泵浦深度 L。本文研究了 Si 的掺杂种类、泵浦脉冲的波长和功率对于样品的泵浦深度的影响。实验结果表明，在饱和泵浦功率之内，泵浦功率越高，样品的泵浦深度越大；对于同一种样品，当泵浦功率相同时，400 nm 泵浦光的泵浦深度大于 800 nm 泵浦光；在 400 nm 泵浦光相同功率条件下，不同掺杂的硅的泵浦深度满足 $L_{\text{p掺杂硅}} > L_{\text{本征硅}} > L_{\text{n掺杂硅}}$，而在 800 nm 泵浦光相同功率条件下，泵浦深度满足 $L_{\text{p掺杂硅}} > L_{\text{n掺杂硅}} > L_{\text{本征硅}}$。此外，基于探测脉冲的超宽带宽和超短脉宽，在样品被光激发之后的弛豫过程中，还观测到了 p 掺杂硅中的亚皮秒激发态声子波包振荡。本文改进的 OPTP 技术为研究半导体中的超快光激发动力学过程提供了一种有效的手段，能够避免常规的 OPTP 技术中基态和激发态声子波包简并混合的问题。此外，本文改进的 OPTP 技术对于半导体相变、生物材料光催化等过程的研究同样能够提供更加丰富的动力学信息，对这些动力学过程的进一步理解都很有帮助。

1 实验装置与实验方法

实验光路如图 1 所示。OPTP 系统是基于一台重复频率为 1 kHz 的钛宝石飞秒脉冲放大器(Spectra-Physics，Spitfire)提供的中心波长为 800 nm、脉冲宽度为 35 fs、线宽为 60 nm 的飞秒激光搭建的。脉冲能量为 1.75 mJ 的飞秒激光被分束镜分成三束。标记为 1 的光束用作泵浦光。泵浦光经过一个精密电动位移台构成的延迟线，能够为 OPTP 提供−50～950 ps 的泵浦探测延迟。此后，泵浦光通过由透镜组构成的缩束系统，光束直径被缩束至 3 mm。缩束后的泵浦光通过安装在可翻转镜架上的 200 μm 厚的 β-BBO 晶体和滤光片，能够实现泵浦光波长在 400 和 800 nm 之间的切换。通过在泵浦光路中放置合适的衰减片，能够实现泵浦光功率的调节。最后，泵浦光照射在样品上，激发样品。标记为 2 的光束被用于产生 THz 脉冲。使用一块焦距为 150 mm 的凸透镜对该飞秒光束紧聚焦，在透镜和焦点之间通过一块 200 μm 厚的 β-BBO 晶体来产生双色飞秒激光场。聚焦的双色飞秒激光场电离空气，诱导空气等离子体并辐射 THz，该 THz 作为探测脉冲被一对焦距为 100 mm 的离轴抛物面镜准直并聚焦至样品上被泵浦光激发的区域。THz 的焦斑直径大约为 300 μm，远小于泵浦光的光斑直径，这样能够确保 THz 脉冲探测到的样品区域都是被泵浦光激发过的。透射样品的 THz 波被另一对焦距为 100 mm 的离轴抛物面镜重新准直并聚焦到一块 400 μm 厚的 GaP 晶体上，同时将标记为 3 的光束作为自由空间电光取样的探测光，通过长焦距的凸透镜聚焦到 GaP 晶体上，对 THz 信号进行探测。

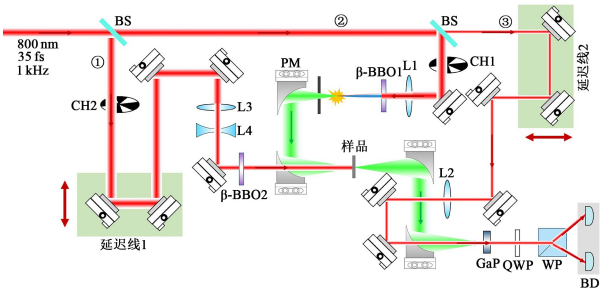


图 1　实验光路图。BS：分束镜；L1，L2，L3：凸透镜；L4：凹透镜；β-BBO1，β-BBO2：倍频晶体（硼酸钡）；PM：离轴抛物面镜；CH1，CH2：光学斩波器；GaP：磷化镓晶体；QWP：1/4 波片@800 nm；WP：沃拉斯顿棱镜；BD：平衡探测器

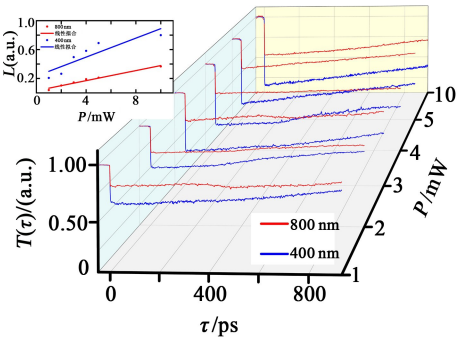
在 OPTP 系统中有两个延迟线。延迟线 1 用来控制泵浦脉冲和 THz 脉冲之间的延迟 τ，延迟线 2 用来控制 THz 脉冲和自由空间电光取样探测光之间的延迟 t。在不同的泵浦探测延迟 τ 下，通过扫描延迟 t，实现对 THz 时域波形的探测，对 THz 时域波形进行傅里叶分析，能够获得相应的 THz 光谱，进而在每个延迟 τ，通过延迟 t 的扫描获得相应的光谱分辨的泵浦探测响应。相应地，将延迟 t 固定在 THz 时域波形的最大值的位置，通过扫描延迟 τ 能够探测样品的光激发动力学响应。

2　结果分析与讨论

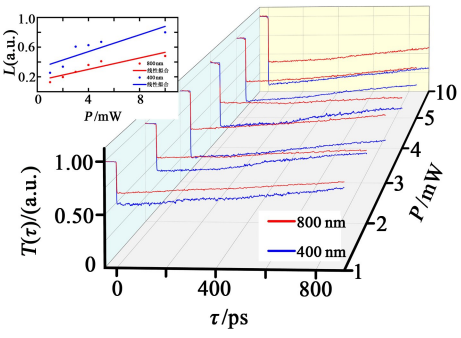
为了验证基于本文提出的方案改进的 OPTP 系统的性能，使用一系列不同功率中心波长分别为 400 nm（光子能量 3.1 eV）和 800 nm（光子能量 1.55 eV）的飞秒光作为泵浦光激发 300 μm 厚晶向为〈100〉的本征硅、p 掺杂硅和 n 掺杂硅，对其进行了相关的光激发动力学实验研究。在该实验中，所使用的两种泵浦光的光子能量均大于样品的禁带宽度（室温下本征硅的禁带宽度约为 1.12 eV，掺杂硅的禁带宽度小于 1.12 eV），因此样品被泵浦光激发，处于价带的电子被激发至导带，形成电子-空穴对。样品内载流子浓度增加，对 THz 的吸收增加，THz 的透射降低，THz 时间分辨光谱中会在泵浦探测延迟 $\tau=0$ 附近出现陡峭的下降沿，随后由于电子-空穴的复合而缓慢恢复，恢复过程将持续数纳秒[20-21]。本文研究了泵浦光波长 λ、泵浦光功率 P 以及掺杂类型对于泵浦深度 L 的影响，并通过测量光谱分辨的泵浦探测响应观测到了 p 掺杂硅在被功率为 2 mW 的 400 nm 泵浦光激发之后导带内的声子波包振荡现象。

2.1　泵浦光功率和泵浦波长对泵浦深度的影响

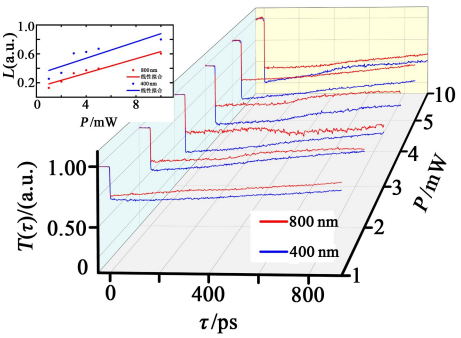
图 2 所示为室温下使用一系列不同功率的 400 和 800 nm 泵浦光的条件下 Si 的 THz 时间分辨光谱，该图中的泵浦深度均以功率为 10 mW、波长为 400 nm 的泵浦光的泵浦深度进行归一化。实验中使用的泵浦光功率最高为 10 mW，是为了避免样品因为泵浦光功率过高导致的热效应或者其他的非线性效应对于实验结果的影响。图 2(a)所示为本征硅在泵浦功率分别为 1，2，3，4，5，10 mW 条件下的 THz 时间分辨光谱 $T(\tau)$，插图所示为泵浦深度随泵浦功率的变化关系，其中蓝色线是 400 nm 泵浦光的结果，红色线是 800 nm 泵浦光的结果。相应地，图 2(b)和(c)分别是 p 掺杂硅和 n 掺杂硅的实验结果。



(a)　本征硅



(b)　p 掺杂硅



(c)　n 掺杂硅

图 2　Si 的 THz 时间分辨光谱

如图 2 插图所示，对于本征硅、p 掺杂硅和 n 掺杂硅，泵浦深度 L 随泵浦光功率 P 的变化表现出一致性：在泵浦功率的饱和值之内，对于同一波长的泵浦光，泵浦深度 L 和泵浦光功率 P 满足：$L \propto P$。这一结果的主要原因是泵浦深度 L 正比于样品的 THz 电导率 σ_s，而样品的 THz 电导率 σ_s 正比于载流子浓度 n 和迁移率 μ 的乘积[22]：

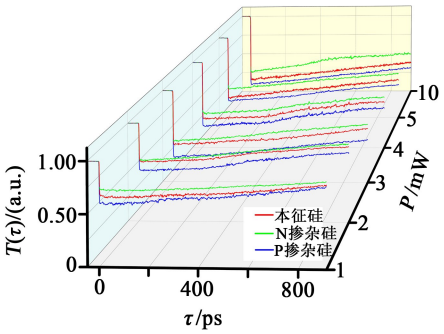
$$\sigma_s = e[\mu_e n_e + \mu_h n_h] = e\sum \mu n \qquad (1)$$

式中，μ_e，n_e，μ_h，n_h，μ，n 分别是电子的迁移率和浓度、空穴的迁移率和浓度、载流子迁移率和浓度，e 是元电荷。对于特定的样品，电子和空穴的迁移率为定值。在泵浦功率饱和值之内，载流子浓度 n 正比于泵浦光功率 P，因此泵浦深度 L 正比于泵浦光功率 P。

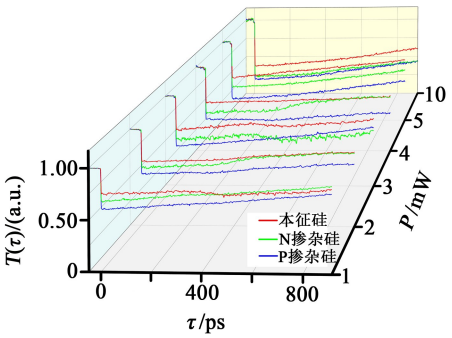
如图 2 所示，对于本征硅、p 掺杂硅和 n 掺杂硅，泵浦深度 L 随泵浦光波长 λ 的变化同样也表现出一致性：在实验中使用的两种泵浦波长 400 和 800 nm 之间对比，在相同泵浦功率条件下，$L_{400} > L_{800}$。在泵浦光激发样品的过程中，400 nm 的泵浦光具有比 800 nm 的泵浦光更高的载流子激发效率，因此在相同功率条件下，400 nm 的泵浦光能够激发更高的载流子浓度。根据方程(1)，对于特定样品，THz 电导率 σ_s 正比于载流子浓度 n，即泵浦深度 $L \propto n$。因此，在相同泵浦功率条件下，400 nm 泵浦光的泵浦深度大于 800 nm 泵浦光。

2.2 掺杂类型对泵浦深度的影响

图 3(a) 为本征硅、p 掺杂硅和 n 掺杂硅在 400 nm 泵浦光的功率分别为 1,2,3,4,5,10 mW 条件下的 THz 时间分辨光谱 $T(\tau)$。从图 3(a)可见，在 400 nm 泵浦光同一泵浦功率条件下，样品泵浦深度满足：$L_{\text{p掺杂硅}} > L_{\text{本征硅}} > L_{\text{n掺杂硅}}$，并且在不同泵浦光功率条件下，这一规律是一致的。相应地，图 3(b)为本征硅、p掺杂硅和n掺杂硅在 800 nm泵浦光的功率分别为 1,2,3,4,5,10 mW 条件下的 THz 时间分辨光谱 $T(\tau)$。从图 3(a)可见，在 400 nm 泵浦光同一泵浦功率，三种样品的泵浦深度之间满足：$L_{\text{p掺杂硅}} > L_{\text{n掺杂硅}} > L_{\text{本征硅}}$。图 3 中的泵浦深度均以功率为 10 mW 相应波长的泵浦光的泵浦深度进行归一化。由图 3 可见，在 400 和 800 nm 的泵浦光波长条件下，不同掺杂对泵浦深度的影响不同。



(a) 400 nm 泵浦光



(b) 800 nm 泵浦光

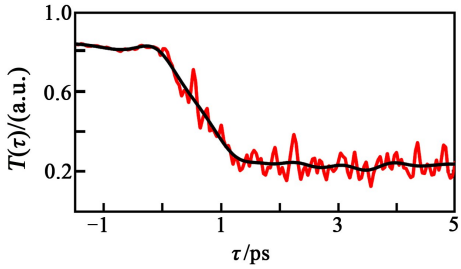
图 3 Si 的 THz 时间分辨光谱。图中的红线是本征硅的实验结果，绿线是 n 掺杂硅的实验结果，蓝线是 p 掺杂硅的实验结果

2.3 p 掺杂硅导带内的声子波包振荡

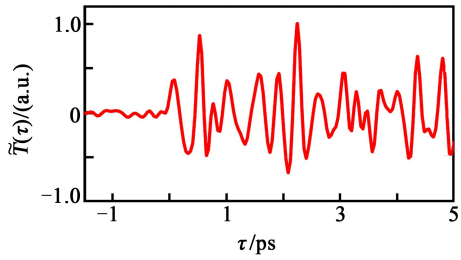
为了进一步验证基于本文提出的方案改进的 OPTP 系统的时间分辨和光谱分辨性能，本文进一步测量了 p 掺杂硅在功率为 2 mW 的 400 nm 泵浦光条件下的精细扫描 THz 时间分辨光谱和光谱分辨的泵浦探测响应，观测到了样品激发之后导带内的声子波包振荡现象。

图 4(a)所示为功率为 2 mW 的 400 nm 泵浦光激发 P 掺杂硅的 THz 时间分辨光谱 $T(\tau)$。相比于图 2 中对应的 THz 时间分辨光谱，这里的测量将泵浦探测延迟 τ 的扫描步长从 667 fs 减小为 16 fs。从图 4(a)中可见，在样品被泵浦光激发后，在 THz 时间分辨光谱中叠加了非常明显的快速振荡信号，并且信号具有良好的重复性。这些快速振荡的信号在一定程度上验证了本文的 OPTP 系统良好的时间分辨性能。通过对 $T(\tau)$ 的轮廓进行双指数拟合，并从信号中减掉双指数拟合的结果，获得快速振荡分量 $\tilde{T}(\tau)$ 如图 4(b)所示。$\tilde{T}(\tau)$ 是样品激发态晶格相干振动的表现。在 p 掺杂硅被泵浦光激发的过程中，由于作为探测光的 THz 脉冲具有超宽的带宽，p 掺杂硅激发态中一系列的振动模式之间以固定的相位形成相干声子波包，声子波包的振荡改变了样品的电导率，进而对 THz 时间分辨光谱形成了

快速调制，即本文观测到的叠加了快速振荡的 THz 时间分辨光谱 $T(\tau)$。



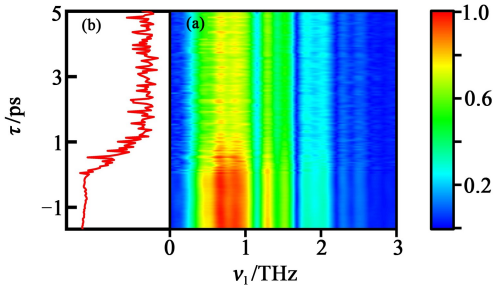
(a)　时间分辨光谱(红色线是实验测量结果，黑色线是双指数拟合的结果)



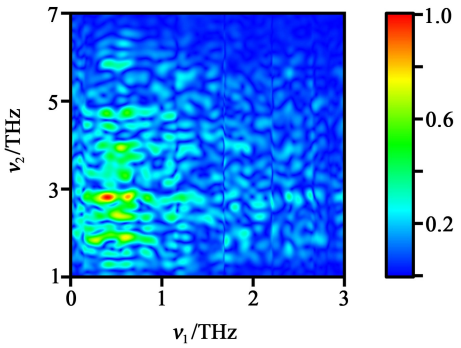
(b)　时间分辨光谱中的振荡分量

图 4　p 掺杂硅在功率为 2 mW 的 400 nm 泵浦光条件下的 THz 时间分辨光谱

在每一个泵浦探测延迟 τ 通过自由空间电光取样测量透射样品的 THz 电场的时域波形，通过对其沿着电光采样延迟 t 方向进行傅里叶变换，获得使用功率为 2 mW 的 400 nm 泵浦光激发 p 掺杂硅的光谱分辨的泵浦探测响应 $T(\nu_1,\tau)$如图 5(a)所示。在该图中，沿着泵浦探测延迟 τ 方向的条纹是样品激发态声子波包的体现。将 $T(\nu_1,\tau)$沿着探测光的频率 ν_1 轴积分，得到如图 5(b)所示的结果，该结果和图 4(a)中的 $T(\tau)$基本一致，这在一定程度上证明了本文的 OPTP 系统良好的频率分辨能力。$T(\nu_1,\tau)$中包含多种频率的振荡模式，从图 5(a)中可以看出，不同的探测光频率 ν_1 下的振荡模式互不相同。在每个探测光频率 ν_1 处进行双指数拟合，并减去双指数拟合的结果，将剩余的振荡分量进行傅里叶变换，得到如图 5(c)所示的二维光谱 $\widetilde{T}(\nu_1,\nu_2)$。从图 5(c)中可以看出，随着探测光频率 ν_1 的增加，振荡的主要频率 ν_2 在轴上的宽度逐渐变窄，并且振荡的频率也逐渐降低。这一现象可以归因于低能量的振动态比高能量的振动态的分布更密集。



(a)　THz 透射谱随泵浦探测延迟 τ 的变化；(b)　图(a)沿着 ν_1 轴积分的结果



(c)　图(a)沿着泵浦探测延迟 τ 方向做傅里叶变换，获得的二维光谱

图 5　p 掺杂硅在功率为 2 mW 的 400 nm 泵浦光条件下的光谱分辨的光泵浦太赫兹探测光谱

3　结论

本文提出了一种光泵浦太赫兹探测技术的改进方案，使用空气等离子体太赫兹脉冲作为探测脉冲，能够有效提高光泵浦太赫兹探测的时间分辨和光谱分辨能力。利用基于本文改进方案的光泵浦太赫兹探测系统，表征了 Si 的光激发动力学。实验结果表明，Si 的掺杂类型、泵浦光的功率 P 和泵浦波长 λ 都会影响泵浦深度。另外，测量了 p 掺杂硅在功率为 2 mW 的 400 nm 泵浦光条件下精细扫描的 THz 时间分辨光谱和光谱分辨的泵浦探测响应，观测到了 p 掺杂硅中的亚皮秒激发态声子波包振荡，这在常规的光泵浦太赫兹探测系统中是难以观测到的。通过对 Si 的光激发动力学的表征，证明了基于本文提出的改进方案的光泵浦太赫兹探测系统具有良好的时间分辨和光谱分辨性能，能够测量半导体激发态的声子波包动力学，这为研究半导体中的超快光激发动力学过程提供了一种有效的手段。

参考文献：

[1]　Pashkin A, Kubler C, Ehrke H, et al. Ultrafast insulator-metal phase transition in VO_2 studied by multiterahertz spectroscopy[J]. Phys. Rev. B, 2011, 83(19): 195120.

[2]　Wehrenfennig C, Eperon G E, Johnston M B, et al. High charge carrier mobilities and lifetimes in organolead trihalide perovskites[J]. Adv. Mater., 2014, 26(10): 1584-1589.

[3] Ulbricht R, Hendry E, Shan J, et al. Carrier dynamics in semiconductors studied with time-resolved terahertz spectroscopy[J]. Rev. Mod. Phys., 2011, 83(2): 543-586.

[4] Huber R, Kubler C, Tubel A, et al. Femtosecond formation of coupled phonon-plasma modes in inp: Ultrabroadband THz experiment and quantum kinetic theory [J]. Phys. Rev. Lett., 2005, 94(2): 027401.

[5] Kubler C, Ehrke H, Huber R, et al. Coherent structural dynamics and electronic correlations during an ultrafast insulator-to-metal phase transition in VO_2 [J]. Phys. Rev. Lett., 2007, 99(11): 116401.

[6] Lui C H, Frenzel A J, Pilon D V, et al. Trion-induced negative photoconductivity in monolayer MoS_2 [J]. Phys. Rev. Lett., 2014, 113(16): 166801.

[7] George P A, Strait J, Dawlaty J, et al. Ultrafast optical-pump terahertz-probe spectroscopy of the carrier relaxation and recombination dynamics in epitaxial graphene[J]. Nano Lett., 2008, 8(12): 4248-4251.

[8] Mooney J, Saari J I, Kelley A M, et al. Control of phonons in semiconductor nanocrystals via femtosecond pulse chirp-influenced wavepacket dynamics and polarization[J]. J. Phys. Chem. B, 2013, 117(49): 15651-15658.

[9] Pfeifer T, Kutt W, Kurz H, et al. Generation and detection of coherent optical phonons in germanium[J]. Phys. Rev. Lett., 1992, 69(22): 3248-3251.

[10] Thouin F, Valverde-Chavez D A, Quarti C, et al. Phonon coherences reveal the polaronic character of excitons in two-dimensional lead halide perovskites[J]. Nat. Mater., 2019, 18(7): 349-356.

[11] Tang Y F, Li M, Zhang Y Z, et al. Ultrafast carrier dynamics in high-performance α-bis-PCBM doped organic-inorganic hybrid perovskite solar cell [J]. Organic Electronics, 2019, 75: 105384.

[12] Cook D J, Hochstrasser. Intense terahertz pulses by four-wave rectification in air[J]. Opt. Lett., 2000, 25(16): 1210-1212.

[13] Zhang K X, Zhang Y Z, Wang X C, et al. Continuum electron giving birth to terahertz emission[J]. Photon. Res., 2020, 8(6): 760-767.

[14] Zhang K X, Zhang Y Z, Wang X C, et al. Experimental evidence for terahertz emission of continuum electrons in the dual-color laser field[J]. Opt. Lett., 2020, 45(7): 1838-1841.

[15] Matsubara E, Nagai M, Ashida M. Ultrabroadband coherent electric field from far infrared to 200 THz using air plasma induced by 10 fs pulses[J]. Appl. Phys. Lett., 2012, 101(1): 011105.

[16] Oh T I, You Y S, Jhajj N, et al. Intense terahertz generation in two-color laser filamentation: energy scaling with terawatt laser systems[J]. New J. Phys., 2013, 15(7): 075002.

[17] Zhang Y Z, Yan T M, Jiang Y H. Ultrafast mapping of coherent dynamics and density matrix reconstruction in a terahertz-assisted laser field[J]. Phys. Rev. Lett., 2018, 121(5): 113201.

[18] Li B Y, Zhang J C, Zhang Y Z, et al. Terahertz-field-induced near-cutoff even-order harmonics in a femtosecond laser[J]. Phys. Rev. A, 2020, 102(6): 063102.

[19] Zhang Y Z, Jiao Z H, He T, et al. Intensity-surged and bandwidth-extended terahertz radiation in two-foci cascading plasmas[J]. arXiv e-prints arXiv, 2022, 2201.12801.

[20] Blumroder U, Hempel H, Fuchsel K, et al. Investigating subsurface damages in semiconductor-insulator-semiconductor solar cells with THz spectroscopy[J]. Physica Status Solidi (A), 2017, 214(5): 1600590.

[21] Joyce H J, Boland J L, Davies C L, et al. A review of the electrical properties of semiconductor nanowires: insights gained from terahertz conductivity spectroscopy [J]. Semicond. Science Technology, 2016, 31(10): 103003.1-103003.21.

[22] Porte H P, Uhd J P, Daghestani N, et al. Ultrafast release and capture of carriers in InGaAs/GaAs quantum dots observed by time-resolved terahertz spectroscopy[J]. Appl. Phys. Lett., 2009, 94(26): 262104.

作者简介：

陈涛涛(1996—)，男，陕西省人，硕士生，主要研究方向为太赫兹光谱；

江玉海(1969—)，男，河南省南阳市人，博士，研究员，教授，博士生导师，主要从事原子分子纳米材料光物理的实验和理论研究。