

文章编号: 1005-5630(2022)06-0044-08

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2022.006.007

SnSe₂ 薄膜的载流子与声子动力学研究

叶 斌, 游冠军

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 基于自建的超快抽运探测实验系统, 研究了化学气相沉积法生长的 SnSe₂ 薄膜的超快载流子与声子动力学。对 SnSe₂ 薄膜随抽运能量密度变化的载流子弛豫过程的测量结果表明该薄膜具有超快的载流子热化过程和皮秒至纳秒时间尺度的复合过程。伴随着光生载流子的超快激发和能量弛豫, SnSe₂ 薄膜发生晶格热化, 产生了特定频率的相干声学声子。通过分析声学声子振荡信号随抽运能量密度变化的规律, 揭示了 SnSe₂ 薄膜产生的相干声学声子的特性。研究结果对 SnSe₂ 薄膜在光电器件领域的应用研究具有一定的参考价值。

关键词: 抽运探测; 二硒化锡; 载流子动力学; 相干声学声子

中图分类号: O 433 **文献标志码:** A

Carrier and phonon dynamics study of SnSe₂ thin films

YE Bin, YOU Guanjun

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The ultrafast carrier and phonon dynamics of SnSe₂ thin films grown by chemical vapor deposition are investigated based on a self-built ultrafast pump-probe experimental system. By measuring the carrier relaxation process of the SnSe₂ thin films with the variation of pumping energy density, the results showed that the thin films had an ultrafast carrier thermalization process and a composite process on the picosecond to nanosecond time scale. Accompanied by the ultrafast excitation and energy relaxation of photogenerated carriers, the SnSe₂ thin films underwent lattice thermalization and generated coherent acoustic phonons of specific frequencies. The properties of the coherent acoustic phonons generated by the SnSe₂ thin films were revealed by analyzing the variation of the acoustic phonon oscillation signal with the pumping energy density. The results of this study provide reference value for the study of the application of SnSe₂ thin films in the field of optoelectronic devices.

Keywords: pump-probe; SnSe₂; carrier dynamics; coherent acoustic phonons

收稿日期: 2022-03-18

作者简介: 叶斌(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为超快光谱技术。

E-mail: 923805321@qq.com

通信作者: 游冠军(1979—), 男, 副教授, 研究方向为近场光学显微技术与超快光谱技术。

E-mail: youguanjun@126.com

引 言

随着超快飞秒脉冲激光技术的飞速发展, 激光与半导体材料的相互作用机制已经逐渐成为这个领域的热点^[1-2]。超快抽运探测技术作为其中最为重要的探测手段, 可以用来研究物质被光激发后的能量弛豫过程, 以及相干声子的动力学过程。1986年, Thomsen等^[3]首次在半导体和金属膜中利用抽运探测技术探测到了相干声子。从此, 各种材料中声波脉冲或相干声子的产生与测量逐渐依赖于抽运探测技术。国内外研究人员已在一系列固体薄膜材料中通过抽运探测技术探测到了相干声学声子, 并深入研究了相干声学声子的产生和传播特性^[4-10]。

在不同材料体系中, 超快激光脉冲激发相干声学声子的物理机制不尽相同。对于半导体超晶格, 阱层里光生载流子产生的应力可激发布里渊区中心具有 B₂ 对称模式的声学声子^[11]。对于金属薄膜和纳米颗粒, 一般认为电子和晶格的超快热化导致呼吸模式或伸展模式声学声子的产生^[12], 且由于薄膜厚度或纳米颗粒较小, 声子传播受限形成驻波。2011年, 张郑兵等^[13]研究了 Fe/Si 薄膜中相干声学声子动力学, 用经典的阻尼谐振函数拟合量化了声学声子的频率、振幅和退相时间, 并系统研究了它们随抽运脉冲能量密度的依赖关系, 认为相干声学声子的驱动力主要来源于电子热应力的贡献。2012年, Jin等^[14]用超快反射光谱法研究了 La 和 Nb 共掺杂的多铁性 BiFeO₃ 薄膜的相干纵向声学声子, 认为其产生机制与铁电极化有关, 并归因于瞬态光致伸缩效应。2019年, Yan等^[15]实时观测胶体 SnSe₂ 范德华纳米片中的超快载流子和声子动力学, 研究发现, 超短激光脉冲可以驱动耦合电子跃迁的相干平面外晶格运动, 这表明强电子-声子耦合跃迁发生在 SnSe₂ 薄膜中。2021年, Li等^[16]利用超快抽运探测光谱系统地研究了化学气相沉积 (chemical vapor deposition, CVD) 生长的 PdSe₂ 薄膜中的光载流子动力学以及厚度相关的层间相干声子模式。经 780 nm 光激发后, 在 PdSe₂ 薄

膜中发现了两种低频声子模式。频率较高的模式为层间呼吸模式, 频率较低的模式为驻波模式, 且两种模式的频率均随薄膜层数的增加而降低, 并计算得出声学声子声速。同年, Huo等^[17]研究了机械剥离的 PdSe₂ 薄膜样品的载流子和声子动力学研究, 认为形变势能机制主导了相干声学声子的形成。

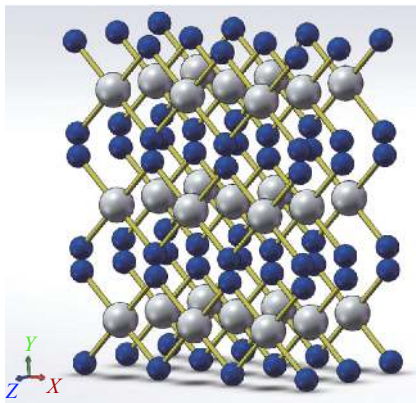
合成 SnSe₂ 的各种元素在地壳中含量非常丰富, 其制作成本也比较低。层状 SnSe₂ 薄膜还具有非常优异的光电特性, 在光电子器件应用上具有非常大的优势。本文将用超快抽运探测技术研究借助 CVD 生长的 SnSe₂ 薄膜的瞬态吸收信号, 根据实验测试结果进行分析, 重点探讨 SnSe₂ 载流子弛豫过程和相干声学声子产生的特性及物理机制。

1 样品表征、实验装置及探测原理

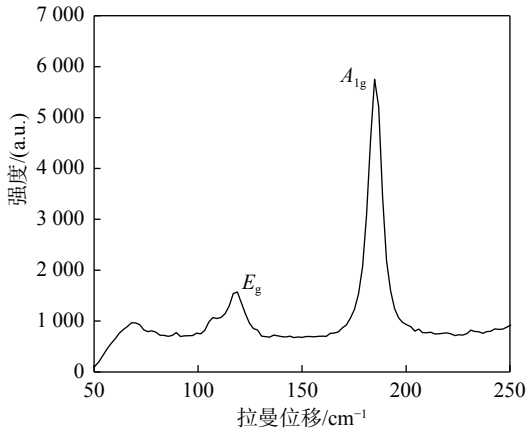
1.1 样品表征

测试的 SnSe₂ 薄膜由二维新材料深圳有限公司采用化学气相沉积法制备。以氧化亚锡 SnO(99.999%)作为锡源, 以 Se(99.9999%)作为硒源, 使用双温区管式炉作为生长设备, 300 sccm 氩气和 30 sccm 氢气作为生长载气。蓝宝石基底放在 SnO 下方 5 cm 处, 温度约为 500 °C, 然后 SnO 和 Se 分别放置在 550 °C 的高温区和 250 °C 的低温区, 生长 10 min, 得到厚度为 5 nm 的多晶薄膜^[18](目前 CVD 方法无法合成大面积的单晶薄膜)。初始制备的 SnSe₂ 薄膜不含氧, 但是放在空气中表面氧含量会逐渐增多。场效应晶体管测试表明 SnSe₂ 薄膜偏金属特性, 所含载流子浓度很高。SnSe₂ 是 IV-VI 族元素化合物硒化物 N 型半导体, 属于间接带隙半导体, 间接带隙为 0.714 eV。Cheng等^[19-20]曾对脉冲激光沉积方法合成的较厚 SnSe₂ 薄膜进行了 X 射线衍射光谱测试, 表明了 SnSe₂ 薄膜的结晶方向为 (001)、(003)和(004)的峰值对应于六角结构。图 1(a)所示为 SnSe₂ 的晶格结构侧视图, SnSe₂ 的晶格结构为类似于 CdI₂ 的六方纤锌矿结

构,属于 P-3ml 空间群,它的每一个 Sn 原子与相近的 6 个 Se 原子形连接。原子间堆叠次序为一层 Sn 原子叠在两层 Se 原子之间,原子层借助弱的范德华力堆叠为层状的类似于“三明治”型结构。图 1(b)所示为 SnSe₂ 薄膜在 532 nm 激发下的拉曼光谱结果,可以看到两个拉曼峰位置 118.8 cm⁻¹ 和 184.8 cm⁻¹ 分别对应拉曼光谱面内振动模式 E_g 和拉曼光谱层间振动模式 A_{1g}^[21],与已有的文献报道结果近似,符合 SnSe₂ 的样品特征。



(a) SnSe₂ 的晶格结构示意图



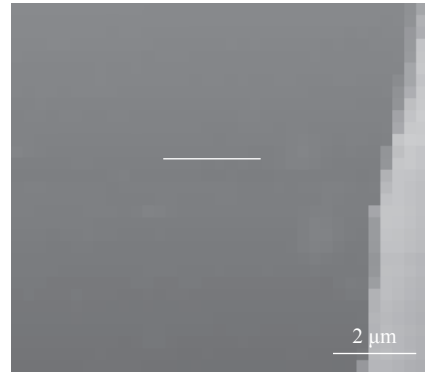
(b) SnSe₂ 在 532 nm 激发下的拉曼光谱

图 1 SnSe₂ 的晶格结构和 SnSe₂ 薄膜的拉曼光谱 (532 nm)

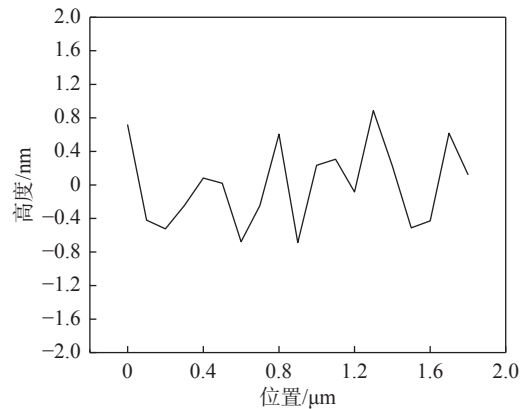
Fig. 1 Lattice structure and Raman spectrum of SnSe₂ excited at 532 nm

另外 SnSe₂ 薄膜为连续薄膜,为了精确测量 SnSe₂ 薄膜的厚度以及其表面形貌,通过原子力显微镜 (atomic force microscopy, AFM) 成像测试,扫描区域为 10 μm×10 μm,实验结果如图 2(a)所示,大部分区域亮暗程度一致,表明

其表面均匀。图 2(a)所示白线选取的平面位置上的 SnSe₂ 薄膜各点高度如图 2(b)所示,可以看到 SnSe₂ 薄膜表面的粗糙度范围在 -1~1 nm,表明薄膜表面平整度很高。



(a) SnSe₂ 薄膜的 AFM 成像图



(b) AFM 图中 SnSe₂ 表面粗糙度

图 2 SnSe₂ 薄膜的 AFM 成像图与粗糙度信息

Fig. 2 AFM image and flatness information of SnSe₂ thin film

1.2 实验装置

本实验使用的钛宝石飞秒激光器主要参数如下:输出中心波长为 800 nm,重复频率为 1000 Hz,脉冲宽度为 35 fs。抽运探测系统简要实验装置如图 3 所示。飞秒激光脉冲从激光器发出后,进入实验主光路,经过第一个分束镜后被分为两束光(抽运光和探测光),抽运光强度高于探测光强度。其中一束抽运光经过电动控制延迟线实现时间延迟,经过斩波器后被调制为 380 Hz,再经过倍频晶体产生倍频效应后,抽运光波长变为 400 nm,然后经过滤波片,最后通过焦距为 15 cm 的透镜聚焦后斜入射到 SnSe₂ 样品表面。光斑直径大小为 500 μm。另一束探测光经过一

系列的反射镜增加可调节光程后, 通过焦距为 20 cm 的透镜直聚焦到样品同一位置, 光斑直径大小为 250 μm 。此时探测光强度约为抽运光强度的十分之一, 这部分光路中还需要通过添加蓝宝石晶体非线性效应实现白光探测。在瞬态透射率测量中, SnSe₂ 薄膜在 400 nm 抽运光激发下, 改变抽运光能量密度, 用 580 nm 探测光探测其产生的瞬态吸收信号。

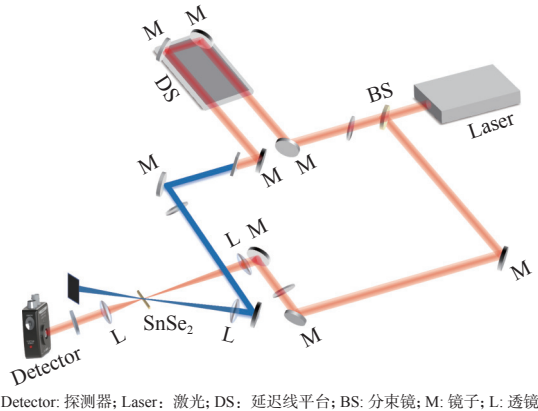


图3 基于放大器的抽运探测系统

Fig. 3 Pump probe system based on amplifier

1.3 探测原理

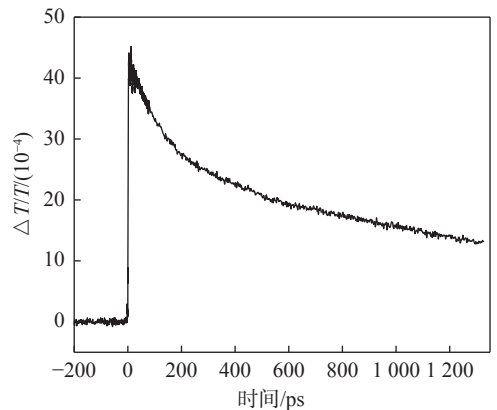
声子作为晶格振动的能量量子, 其能量是量子化的, 与电磁波的光子相似, 是固体材料中一种重要的元激发^[22]。固体材料产生的声子主要有两大类, 分别是声学声子和光学声子。一般情况下, 光学声子的频率要大于声学声子的频率, 频率范围在 GHz~THz。另外根据偏振方向和波矢方向的不同, 相干声学声子还可以分为横向声学声子和纵向声学声子。

实验用到的 400 nm 抽运光, 其光子能量为 3.1 eV, 要大于 SnSe₂ 薄膜的间接带隙(0.714 eV)。当波长为 400 nm 的抽运光入射时, SnSe₂ 薄膜被激发产生载流子。载流子通过多种形式将携带的多余的能量转移到晶格中, 并且这些载流子会朝着能带的边缘弛豫。由于热载流子的快速冷却, SnSe₂ 薄膜晶体内部晶格在吸收能量后会致使其温度急剧升高, 产生热应力。这些应力又促使 SnSe₂ 薄膜中相干声学声子的产生。并且 SnSe₂ 薄膜的局部介电常数也随之改变, 其折射率变得不连续。因此, 可通过探测 SnSe₂ 薄膜透

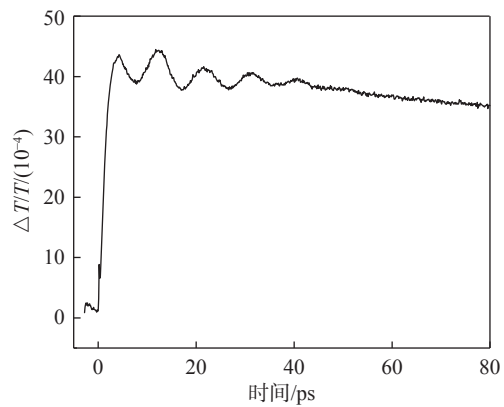
射率强度随延迟时间的变化曲线, 研究其载流子弛豫过程和产生的声子振荡机理。

2 结果与讨论

如图 4(a)所示, 这是 SnSe₂ 薄膜在 400 nm 抽运光激发下, 探测波长为 580 nm 的瞬态吸收测试结果。结合 Shi 等^[23]对 MoS₂ 载流子动力学的详细研究, 抽运光入射到 SnSe₂ 薄膜中, 载流子在几十飞秒的时间内吸收光子能量瞬间跃迁到最高能级, 随后材料内部通过缺陷态捕获、电子-声子散射、激子间复合和激子-激子湮灭等逐渐弛豫到基态。如图 4(b)所示为从图 4(a)中提取的前 80 ps 的振荡信号, 振荡信号持续大概 50 ps。由此可见 SnSe₂ 薄膜在被激发后, 介质折射率被调制, 由此形成类似于声波的传递, 产生声子振荡, 传递能量。



(a) SnSe₂ 薄膜的载流子弛豫信号



(b) 前 80 ps 的声子振荡信号

图4 SnSe₂ 的载流子弛豫信号及前 80 ps 的声子振荡

Fig. 4 Carrier relaxation signal of SnSe₂ and phonon oscillation in the first 80 ps

图 5(a)所示为 SnSe₂ 薄膜在 400 nm 抽运光激发下, 不同抽运能量密度(0.14~1.44 mJ/cm²)时, 关于延迟时间的瞬态吸收信号, 可以发现随着抽运能量密度的升高, 实际测试的信号与背景信号的比值 $\Delta T/T$ 的峰值会逐渐升高。其中图 5(b)所示为从图 5(a)中提取的前 70 ps 在不同抽运能量密度下关于延迟时间的瞬态吸收信号。

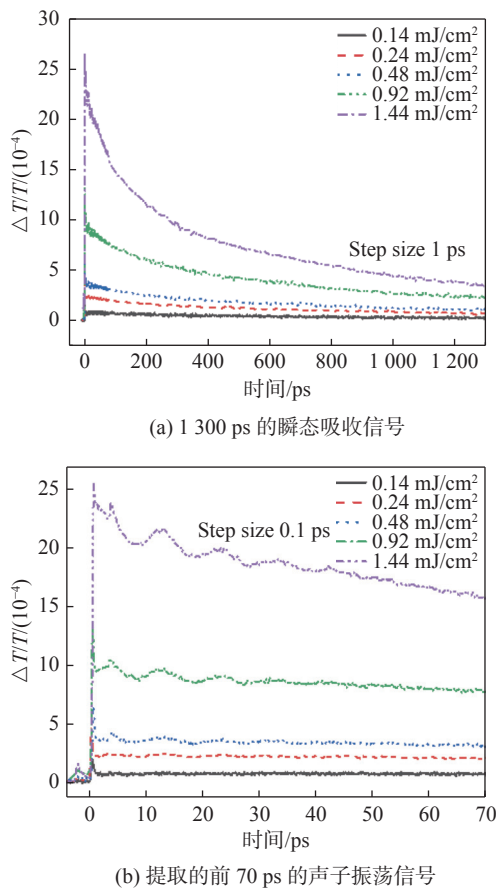


图 5 SnSe₂ 薄膜在不同抽运能量密度下载流子与声子动力学过程

Fig. 5 Carrier and phonon dynamics of SnSe₂ films at different energy densities

从 SnSe₂ 薄膜的瞬态吸收信号中可以发现, 声子振荡存在于载流子弛豫过程中。晶格的热化过程实质上是载流子和声子相互作用的过程, 这个过程在载流子-载流子散射发生之后几乎同时发生。载流子多余的能量将被转移到晶格中, 因此晶格将逐渐升温和热化。随后一段时间内, 载流子和晶格之间将处于热平衡状态。在此过程中, 载流子的温度变化也会导致薄膜样品的透射

率或反射率变化。可以用一组衰减指数函数对图 5(a)所示 SnSe₂ 薄膜整个弛豫过程进行拟合, 从中可以找到时间延迟的电子和声子的规律, 拟合式如下:

$$\Delta T/T \propto T_e + T_{CAP} = \sum_{i=1}^2 A_{ei}e^{-t/\tau_{ei}} + A_{ph}e^{-t/\tau_{ph}} \cos[(\omega + \beta t)t + \phi] \quad (1)$$

式中: τ_{ei} 描述的是第*i*个组分中电子的衰减时间; τ_{ph} 描述的是声子振荡的时间; A_{ei} 是第*i*个组分中电子弛豫过程中的振幅; A_{ph} 描述的是声子振荡的幅度; ϕ 描述的是初相位; ω 描述的是相干声学声子振荡的角频率; β 描述的是啁啾系数。用电子项 T_e 对抽运光能量密度为 0.92 mJ/cm²下整个弛豫过程进行拟合, 拟合结果如图 6 所示。图中黑色虚线为实验结果, 红色实线为拟合结果, 插图放大了 0~20 ps 的声子振荡信号。此外可以观察到在 4 ps 处存在一个突出峰信号, 猜测可能源于 SnSe₂ 薄膜后表面反射的泵浦光导致的二次激发效应。

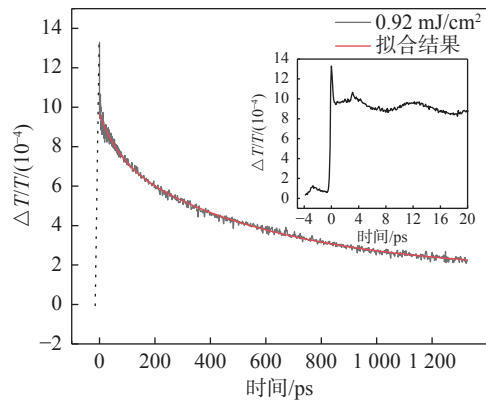
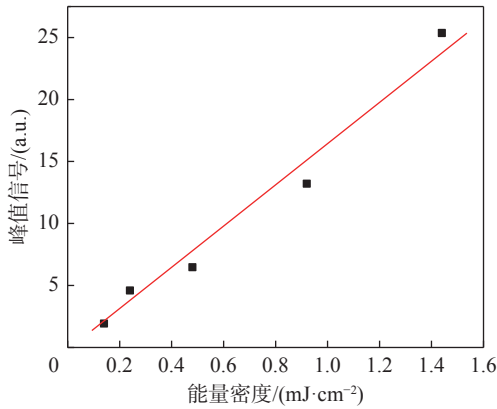


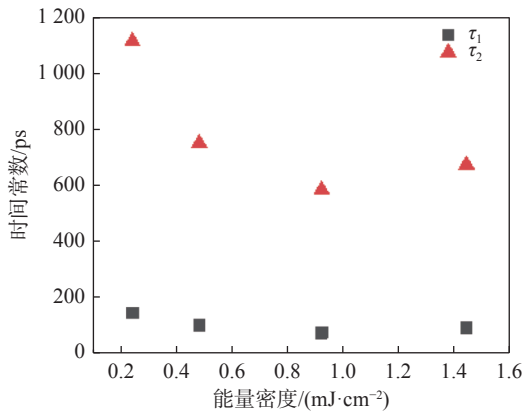
图 6 抽运能量密度为 0.92 mJ/cm² 下 $\Delta T/T$ 信号及拟合结果

Fig. 6 $\Delta T/T$ signal and fitting results for a pumping energy density of 0.92 mJ/cm²

如图 7(a)所示, 对瞬态吸收峰值点进行拟合, 发现其呈线性上升趋势, 这说明随着抽运功率的提高, 光致吸收增强, 光激发载流子浓度呈线性增加。如图 7(b)所示, 可以看到随着抽运能量密度的增加, 电子的快过程和慢过程的时间常数均减少。快过程弛豫时间常数 τ_1 从 142 ps



(a) 瞬态吸收信号峰值随时间变化图



(b) 弛豫信号对应的快慢弛豫时间常数

图 7 SnSe₂ 薄膜在不同抽运能量密度下峰值信号和时间常数拟合

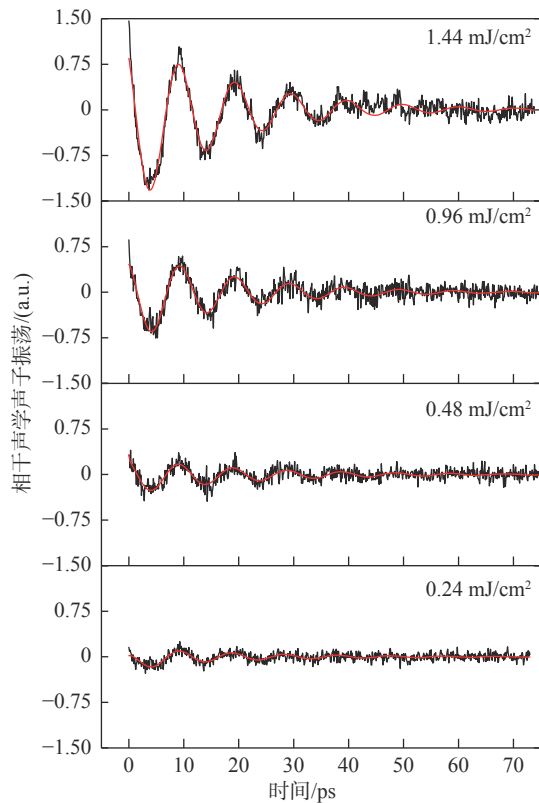
Fig. 7 Peak signal and time constant fitting of SnSe₂ films at different pumping energy densities

减小至 90 ps, 将这个过程归因于热化载流子复合、电子-声子散射以及激子形成的过程, 也可能是由于载流子浓度的提高导致热平衡化加快, 进而使得载流子的散射率也增加。慢过程弛豫时间常数 τ_2 从 1116 ps 减小至 674 ps, 可以归因于激子间的复合和激子间的湮灭过程^[24]。

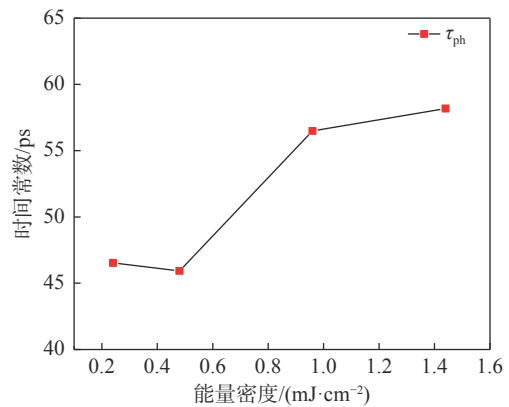
随后从图 5(a) 的原始数据中减去背景噪声信号, 提取得到 SnSe₂ 薄膜的声子振荡信号。如图 8(a) 所示, 黑色曲线为 SnSe₂ 薄膜在抽运能量密度分别为 0.24 mJ/cm²、0.48 mJ/cm²、0.96 mJ/cm²、1.44 mJ/cm² 下减去背景信号的原始振荡信号, 红色曲线为声子项 T_{CAP} 通过指数阻尼振荡拟合得到的相干声学声子的振荡信号。此外可以看到图 8(a) 中 SnSe₂ 薄膜的振荡信号持续衰减, 并且它们的衰减周期持续时间在 50 ps 的

内保持相同。图 8(b) 是提取的声子振荡寿命(时间常数)随能量密度变化曲线图, 可以发现声子寿命均在 45 ps 以上, 且随着抽运能量密度逐渐升高, 声子寿命在总体上呈现上升趋势; 图 8(c) 是声子振荡振幅与抽运能量密度的依赖关系曲线, 可见抽运能量密度越高, 激发产生的声子振荡振幅的也越高。

进一步研究 SnSe₂ 薄膜的相干声学声子的振



(a) SnSe₂ 薄膜分别在不同抽运能量密度下的相干声学声子的振荡信号 (黑色曲线) 以及拟合结果 (红色曲线)



(b) SnSe₂ 薄膜分别在不同抽运能量密度下的声子寿命

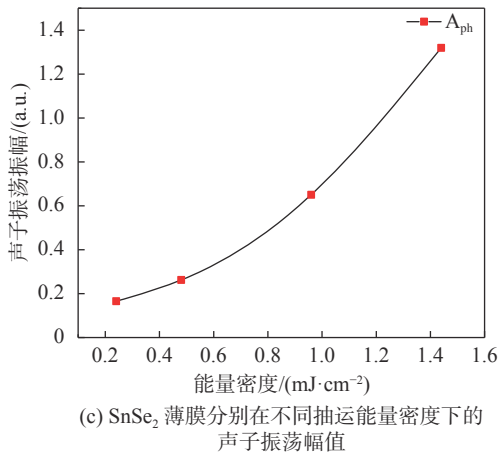


图 8 SnSe₂ 薄膜在不同抽运能量密度下的声子振荡系列拟合结果

Fig. 8 SnSe₂ series fitting results of thin films at different pumping energy densities

荡频率，对图 8(a)提取的拟合振荡信号进行傅里叶变换，得到图 9 所示傅里叶变换后的频谱曲线。图 9 描述了在不同抽运能量密度下的峰值频率，可以得出 SnSe₂ 薄膜在不同抽运能量密度下具有一个相同的振荡频率约 0.1054 THz。

由这些结果推断该 SnSe₂ 薄膜在 400 nm 光激发下产生的相干声学声子为低频连续介质弹性波。抽运光激发材料产生热应力波干扰薄片中的透射应力波，形成驻波^[25]。SnSe₂ 薄膜的一个表面是自由的，但另一个表面与硬熔融石英接触。基于驻波模型，在近似零位移边界条件下，其声

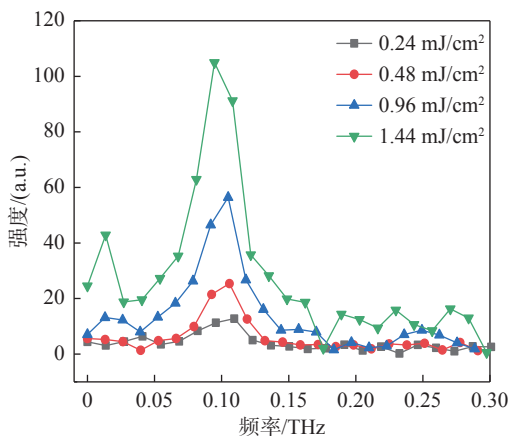


图 9 SnSe₂ 薄膜在不同抽运能量密度下的相干声学声子振荡信号经过快速傅里叶变换曲线

Fig. 9 Fast Fourier transform curve of coherent acoustic phonon oscillation signals of SnSe₂ film under different pump power densities

学声子声速 v 只与薄膜材料的厚度 d 和振荡周期 T 有关^[26]，可以描述为：

$$T = \frac{4d}{v} \quad (2)$$

因此可以得出 5 nm 的 SnSe₂ 薄膜的相干声学声子传播速度 $v = 2.108 \times 10^3$ m/s，而根据 Trachenko 等^[27]的理论计算得出的目前物体中传播最快的声速为 $v_{\max} = 3.610 \times 10^4$ m/s，计算出的 SnSe₂ 薄膜中相干声学声子传播速度低于理论固体中传播的最大声速。

3 结 论

本文利用光抽运探测透射率测量技术研究了 CVD 生长的 SnSe₂ 薄膜的超快载流子动力学和声子动力学过程，更好地分析了 SnSe₂ 薄膜的微观物理光学性质。SnSe₂ 薄膜中产生的相干声学声子应源于抽运光激发后热载流子的快速冷却使晶格温度急剧升高产生的热应力。对提取的不同抽运能量密度下的声子振荡进行傅里叶变换，得到 SnSe₂ 薄膜单一的振荡频率在 105.4 GHz (0.1054 THz)，频率一致性非常高，计算出其相干声学声子的声子寿命及其声子传播速度。SnSe₂ 薄膜超快载流子动力学过程及其相干声学声子的研究为提供了大量的超快微观物理过程信息，对研究薄膜材料的结构、性质具有重要的参考意义，同时也为超快声开关、声子激光器、声子腔等的光学器件的研究制作提供了重要的数据参考价值。

参考文献：

- [1] BORN C, SOREL M, YU S Y. Linear and nonlinear mode interactions in a semiconductor ring laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2005, 41(3): 261 – 271.
- [2] YIN X B, YE Z L, CHENET D A, et al. Edge nonlinear optics on a MoS₂ atomic monolayer[J]. *Science*, 2014, 344(6183): 488 – 490.
- [3] THOMSEN C, GRAHN H T, MARIS H J, et al. Surface generation and detection of phonons by

- picosecond light pulses[J]. *Physical Review B*, 1986, 34(6): 4129 – 4138.
- [4] LIM D, AVERITT R D, DEMSAR J, et al. Coherent acoustic phonons in hexagonal manganite LuMnO₃[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(23): 4800 – 4802.
- [5] MATSUDA O, WRIGHT O B, HURLEY D H, et al. Coherent shear phonon generation and detection with ultrashort optical pulses[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(6): 095501.
- [6] ROSSIGNOL C, RAMPNOUX J M, PERTON M, et al. Generation and detection of shear acoustic waves in metal submicrometric films with ultrashort laser pulses[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(16): 166106.
- [7] MILLER J K, QI J, XU Y, et al. Near-bandgap wavelength dependence of long-lived traveling coherent longitudinal acoustic phonons in GaSb-GaAs heterostructures[J]. *Physical Review B*, 2006, 74(11): 113313.
- [8] WU S, GEISER P, JUN J, et al. Long-lived, coherent acoustic phonon oscillations in GaN single crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(4): 041917.
- [9] WEN Y C, CHOU L C, LIN H H, et al. Efficient generation of coherent acoustic phonons in (111) InGaAs/GaAs multiple quantum wells through piezoelectric effects[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(17): 172102.
- [10] BABILOTTE P, RUELLO P, MOUNIER D, et al. Femtosecond laser generation and detection of high-frequency acoustic phonons in GaAs semiconductors[J]. *Physical Review B*, 2010, 81(24): 245207.
- [11] YAMAMOTO A, MISHINA T, MASUMOTO Y, et al. Coherent oscillation of zone-folded phonon modes in GaAs-AlAs superlattices[J]. *Physical Review Letters*, 1994, 73(5): 740 – 743.
- [12] PARK H, WANG X, NIE S, et al. Mechanism of coherent acoustic phonon generation under nonequilibrium conditions[J]. *Physical Review B*, 2005, 72(10): 100301(R).
- [13] 张郑兵, 马小柏, 金钻明, 等. Fe/Si 薄膜中相干声学声子的光激发研究 [J]. *物理学报*, 2012, 61(9): 097401.
- [14] JIN Z M, XU Y, ZHANG Z B, et al. Strain modulated transient photostriction in La and Nb codoped multiferroic BiFeO₃ thin films[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(24): 242902.
- [15] YAN T W, HAN Y P, FU Q, et al. Ultrafast carrier relaxation in SnSe_x (x=1, 2) thin films observed using femtosecond time-resolved transient absorption spectroscopy[J]. *Optical Materials*, 2020, 108: 110440.
- [16] LI D, FU J B, SUO P, et al. Layer dependent interlayer coherent phonon dynamics in PdSe₂ films[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(19): 191105.
- [17] HUO C F, WEN R, YAN X Q, et al. Thickness-dependent ultrafast charge-carrier dynamics and coherent acoustic phonon oscillations in mechanically exfoliated PdSe₂ flakes[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2021, 23(36): 20666 – 20674.
- [18] ZHOU X, GAN L, TIAN W M, et al. Ultrathin SnSe₂ flakes grown by chemical vapor deposition for high-performance photodetectors[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(48): 8035 – 8041.
- [19] CHENG C, LI Z Q, DONG N N, et al. Tin diselenide as a new saturable absorber for generation of laser pulses at 1μm[J]. *Optics Express*, 2017, 25(6): 6132 – 6140.
- [20] YU P, YU X C, LU W L, et al. Fast photoresponse from 1T tin diselenide atomic layers[J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(1): 137 – 145.
- [21] ZHANG Y H, SHI Y, WU M M, et al. Synthesis and surface-enhanced Raman scattering of ultrathin SnSe₂ nanoflakes by chemical vapor deposition[J]. *Nanomaterials*, 2018, 8(7): 515.
- [22] 黄昆, 韩汝琦. 固体物理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1988: 561.
- [23] SHI H Y, YAN R S, BERTOLAZZI S, et al. Exciton dynamics in suspended monolayer and few-layer MoS₂ 2D crystals[J]. *American Chemical Society*, 2013, 7(2): 1072 – 1080.
- [24] 吴鑫程, 刘凡, 金钻明, 等. ReS₂ 薄膜的超快载流子动力学和太赫兹发射研究 [J]. *光学仪器*, 2022, 44(1): 35 – 41.
- [25] CHEN X, ZHANG S F, WANG L, et al. Direct observation of interlayer coherent acoustic phonon dynamics in bilayer and few-layer PtSe₂[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(12): 12001416.
- [26] GLINKA Y D, BABAKIRAY S, JOHNSON T A, et al. Acoustic phonon dynamics in thin-films of the topological insulator Bi₂Se₃[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(16): 165703.
- [27] TRACHENKO K, MONSERRAT B, PICKARD C J, et al. Speed of sound from fundamental physical constants[J]. *Science Advances*, 2020, 6(41): eabc8662.