引用格式：DAI Zijie，KANG Lixing，GONG Cheng，et al. Exploration of $PtSe_2$ Thin Film Based on Time-resolved Terahertz Spectroscopy (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica，2021，50(8)：0850206
戴子杰，康黎星，龚诚，等. $PtSe_2$薄膜的时间分辨太赫兹光谱特性研究(特邀)[J]. 光子学报，2021，50(8)：0850206

$PtSe_2$薄膜的时间分辨太赫兹光谱特性研究（特邀）

戴子杰[1,2,4]，康黎星[3]，龚诚[1,2]，刘政[3]，刘伟伟[1,2]
（1 南开大学 现代光学研究所，天津 300350）
（2 天津市微尺度光学信息技术科学重点实验室，天津 300350）
（3 南洋理工大学 材料科学与工程学院，新加坡 639798）
（4 江苏大学 微纳光电子与太赫兹技术研究院，江苏 镇江 212013）

摘　要：基于时间分辨太赫兹光谱技术，研究了不同厚度的二硒化铂($PtSe_2$)薄膜在太赫兹波段的光学特性。实验结果表明，当泵浦光功率从0增强至2 540 μJ/cm^{2}时，11 nm-$PtSe_2$薄膜的电导率逐渐增大，透射太赫兹信号强度减小；而197 nm-$PtSe_2$薄膜的电导率逐渐减小，透射太赫兹信号强度增大。由此构造的光控太赫兹调制器件的调制速度约为14 ps，工作带宽为0.2～1.8 THz，调制深度为15%～35%。研究证明$PtSe_2$薄膜材料在高速光控太赫兹器件领域具有应用潜力。

关键词：太赫兹；时间分辨；超快；二硒化铂；太赫兹调制
中图分类号：O437　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3788/gzxb20215008.0850206

Exploration of $PtSe_2$ Thin Film Based on Time-resolved Terahertz Spectroscopy (Invited)

DAI Zijie[1,2,4], KANG Lixing[3], GONG Cheng[1,2], LIU Zheng[3], LIU Weiwei[1,2]
(1 *Institute of Modern Optics*, *Nankai University*, *Tianjin* 300350, *China*)
(2 *Tianjin Key Laboratory of Micro-scale Optical Information Science and Technology*, *Tianjin* 300350, *China*)
(3 *School of Materials Science and Engineering*, *Nanyang Technological University*, *Singapore* 639798, *Singapore*)
(4 *Institude of Micro-nano Optoelectronics and Terahertz Technology*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang*, *Jiangsu* 212013, *China*)

Abstract: Utilizing the time-resolved terahertz spectroscopy, the optical property of platinum selenide ($PtSe_2$) thin films with different thicknesses in terahertz band are investigated experimentally. As the applied pump fluences increase from 0 to 2 540 μJ/cm^2, the conductivity of 11 nm-$PtSe_2$ film increases and further leading to the attenuation of the transmitted terahertz wave. Conversely, the conductivity of 197 nm-$PtSe_2$ film decreases with the enhanced pump fluences that induces the increase of the transmitted terahertz wave. These characters enable $PtSe_2$ thin film to be a photoactive terahertz modulator, which shows an ultrafast (～14 ps) and broadband (0.2～1.8 THz) modulation (15%～35%) of terahertz waves. The research provides a potential $PtSe_2$-based platform to the active and ultrafast photonic devices at terahertz frequencies.

Key words: Terahertz; Time-resolved; Ultrafast; Platinum selenide; Terahertz modulation
OCIS Codes: 300.6495; 230.4110; 320.7080; 310.6845

基金项目：国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(No.12061131010)，国家自然科学基金面上项目(No.12074198)
第一作者：戴子杰(1993—)，男，博士研究生，主要研究方向为太赫兹光谱技术。Email: 1120160088@mail.nankai.edu.cn
导师(通讯作者)：刘伟伟(1976—)，男，教授，博士，主要研究方向为超快光学，太赫兹科学与技术。Email: liuweiwei@nankai.edu.cn
收稿日期：2021-06-02；**录用日期**：2021-07-09

0 引言

近年来，得益于超快光学和光电子学的迅猛发展，太赫兹波（Terahertz，THz）逐渐由电磁波谱中的“Gap”成为研究热点，在光谱分析、无损检测、无线通信和生物成像等领域都极具应用前景[1-5]。作为一种非接触式相干探测手段，太赫兹光谱分析技术能够同时获取样品的振幅与相位信息，进而提取其折射率、介电常数、电导率等光/电学参数[6-7]。此外，结合光学泵浦-探测技术构造的时间分辨太赫兹光谱，还可用于监测样品中的光生载流子动力学过程，在半导体[8]、钙钛矿[9]、纳米线[10]、拓扑材料[11]、二维过渡金属硫族化合物[12]等新材料研究中发挥重要作用。

二维过渡金属硫族化合物（Transition Metal Dichalcogenides，TMDCs）是一类通式为MX_2的材料[13]，其中M是过渡金属元素（Mo，W等），X为硫族元素（S，Se等）。目前，已经有数十种TMDCs材料被理论预测[14]，但相关实验工作主要集中在VIB族过渡金属元素，例如MoS_2、$MoSe_2$、WS_2和WSe_2等，而其它族TMDCs材料报道相对较少。二硒化铂（$PtSe_2$）是一种新兴的10B族贵金属TMDCs材料，具有可调节的能带宽度[15]、较高的载流子迁移率以及较好的环境稳定性[16]，在光电器件领域应用前景广阔，主要包括：1）基于$PtSe_2$的光电探测器，例如，2018年，ZENG L等构造了$PtSe_2$/GaAs异质结光电探测器[17]，其响应中心波长为650～810 nm，灵敏度为262 mA/W，响应速度为5.5 μs。2020年，陈红云等报道了一种基于$PtSe_2$/TiO_2纳米棒阵列的肖特基结紫外光电探测器，能实现对简单紫外图像的成像，并且器件置于空气中5周以后仍可稳定工作[18]。2）基于$PtSe_2$的锁模/Q-开关超短脉冲激光器，作为可饱和吸收体，$PtSe_2$薄膜已成功应用于光纤激光器[19]、固体激光器[20]以及波导激光器[21]中，能产生重频高达GHz，脉宽飞秒量级，覆盖波长1～2 μm的超快激光脉冲。3）基于$PtSe_2$的传感器，这类器件利用$PtSe_2$材料的电学参数对外界激励敏感特性，已成功应用于光学、压力[22]、湿度（H_2O）[23]以及气体（CO，CO_2，NO，NO_2，NH_3等）[24]传感中，例如，WAGNER S等将$PtSe_2$作为气体通道[25]，实现了0.1～10 ppm的NO_2浓度检测，并且传感器具有较快的响应时间（7.4～38.7 s）。但目前$PtSe_2$在光电领域的研究主要集中在紫外至近红外波段，其在太赫兹波段还鲜有报道。2020年，JAKHAR A等报道了多层$PtSe_2$薄膜组成的太赫兹调制器[26]，其工作频段为0.1～1 THz，在1 W/cm^{2}连续光激励下的调制深度为32.7%，但无法实现时间分辨探测，且$PtSe_2$薄膜材料光控调制的物理机制有待于进一步澄清。

基于此，本文借助时间分辨太赫兹光谱技术，研究了4种不同厚度（11 nm，52 nm，100 nm，197 nm）的$PtSe_2$薄膜样品在泵浦光（0～2 540 μJ/cm^2）辐照下的电导率参数及其太赫兹透过特性，并探究其在光控太赫兹调制器件中的潜在应用。

1 $PtSe_2$薄膜制备及表征

采用气相硒化法制备$PtSe_2$薄膜样品，具有工艺流程简单、反应温度低、制备时间短、样品幅面大且均匀性好等优势，主要流程包括：1）通过热蒸发镀膜（Univex 250）工艺，在洁净的石英基底（20 mm ×20 mm× 1 mm）上蒸镀Pt膜；2）在Pt膜上表面通入Se蒸汽，在400℃条件下进行硒化反应生成$PtSe_2$。如图1所示，制备得到4种不同厚度的$PtSe_2$薄膜样品，分别记为S1、S2、S3和S4，需要说明的是，石英基底一半留白作为参考组，一半生长$PtSe_2$膜作为样品组，可以消除因基底片厚度差异而导致的实验误差[27]。

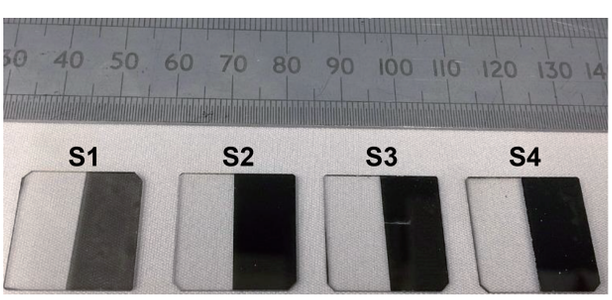

图1 硒化工艺制备的不同厚度$PtSe_2$薄膜样品

Fig. 1 $PtSe_2$ thin films with different thicknesses fabricated by selenization process

为了保证$PtSe_2$薄膜质量，对其进行一系列的表征测试。图2(a)为样品S1的原子力显微成像(Asylum Research Cypher)，选取的观察窗口大小为50 μm×50 μm，薄膜表面结构致密，生长$PtSe_2$薄膜的区域颜色较深，而没有长$PtSe_2$薄膜的区域颜色较浅，且二者存在明显的分界线，进一步通过AFM测得分界线的起伏变化(插图)，得到S1厚度约为11 nm；类似地，测得S2、S3和S4样品的厚度分别为52 nm、100 nm和197 nm。接着，对$PtSe_2$样品进行拉曼光谱表征(Horiba Jobin Yvon HR800)，如图2(b)所示，光谱存在两个明显的拉曼峰，分别位于180.6 cm^{-1}和208.8 cm^{-1}处，对应E_g与A_{1g}这两种拉曼活性模式[28]可以由图2(c)定性解释：其中E_g描述的是平面内振动模式，此时Se原子沿着$PtSe_2$层内朝着相同方向运动(黑色箭头)；而A_{1g}描述的是平面外振动模式，此时Se原子沿着$PtSe_2$层外朝着相反方向运动(蓝色箭头)。此外，还测得$PtSe_2$薄膜样品的吸收光谱(LAMBDA 950)，并采用Tauc-plot法得到其禁带宽度值，如图2(d)所示，S1、S2、S3和S4的带隙值分别为0.406 eV、0.251 eV、0.023 eV和0，说明随着$PtSe_2$薄膜厚度增加，其金属性逐渐增强。

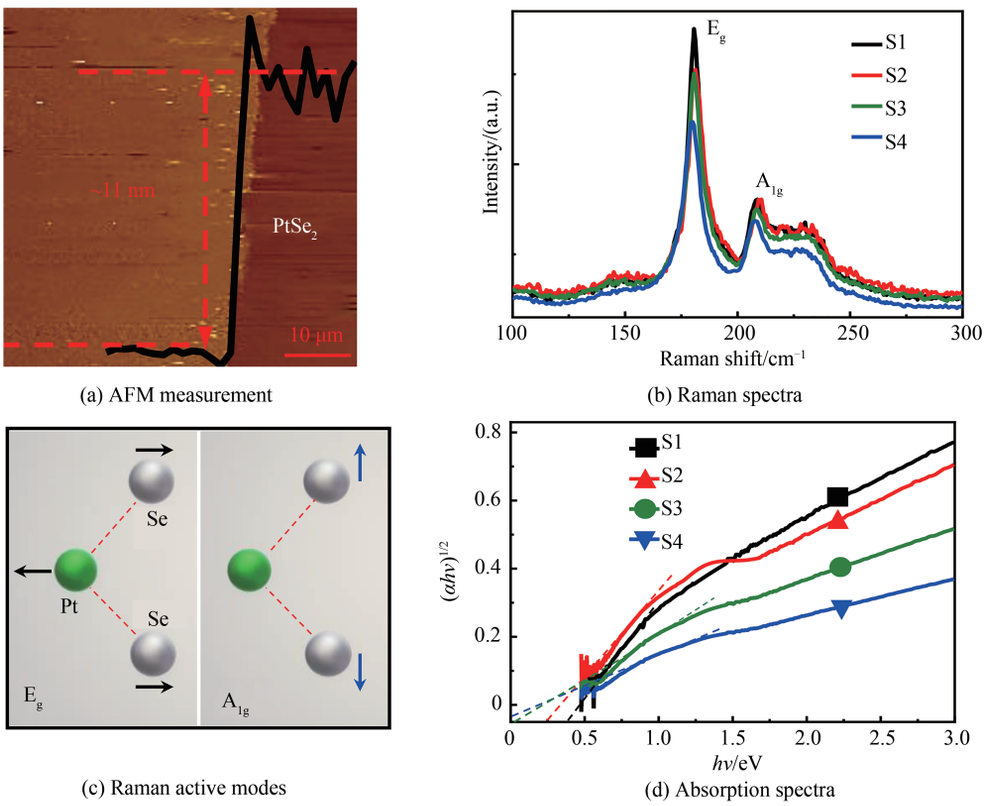

图2　$PtSe_2$薄膜材料表征

Fig. 2　Characterization of $PtSe_2$ thin film

2　实验结果及分析

实验使用基于ZnTe晶体的时间分辨太赫兹光谱系统，如图3所示，掺钛蓝宝石激光器(Astrella, Coherent)产生中心波长为800 nm、单脉冲能量为6 mJ、脉宽为35 fs、重复频率为1 kHz的飞秒激光脉冲并辐照在ZnTe晶体，利用其光整流效应和电光效应，实现太赫兹脉冲的辐射及探测。在此基础上，由分束器BS(70∶30)引出一束泵浦光辐照在样品上，当其光子能量(1.55 eV)高于待测样品的禁带宽度时，材料内部会产生光生载流子，通过光学延迟线Delay 2精确控制太赫兹脉冲与泵浦飞秒脉冲之间的时间延迟，可以监测光生载流子产生、弛豫及复合的全过程。需要说明的是，样品处泵浦光和太赫兹的光斑直径分别约为10 mm和7 mm，以保证均匀的泵浦光辐照；在测试过程中，通过中性密度衰减片(Attenuator)改变泵浦光功率(0～2 540 μJ/cm^2)，并保持太赫兹信号强度不变。此外，为了消除水蒸气对太赫兹的吸收损耗，实验系统通入干燥氮气循环。

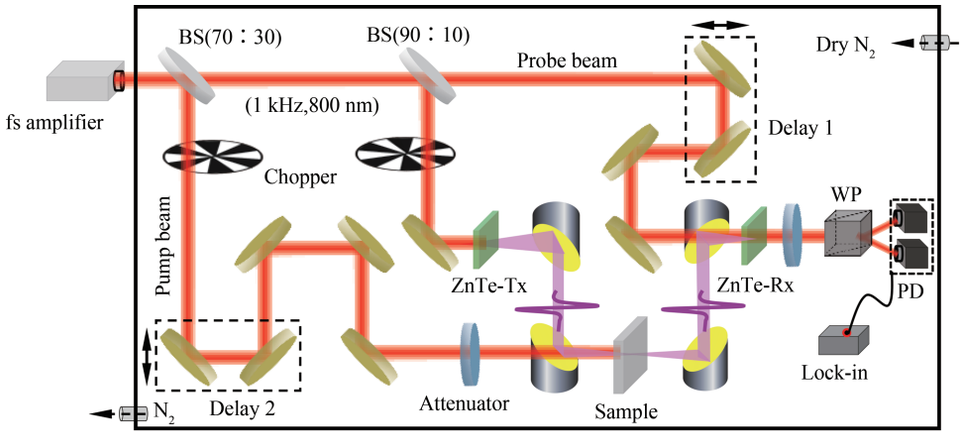

图3 时间分辨太赫兹光谱系统装置示意图

Fig. 3 Experimental setup of the time-resolved terahertz spectroscopy

图4(a)为$PtSe_2$薄膜样品的光泵浦太赫兹探测示意图，首先测得不加泵浦光时，空气(Air)、基底(Quartz)和样品S1、S4的透射太赫兹信号强度，如图4(b)所示。接着，将泵浦光功率设定为0、635 μJ/cm²、1 250 μJ/cm²

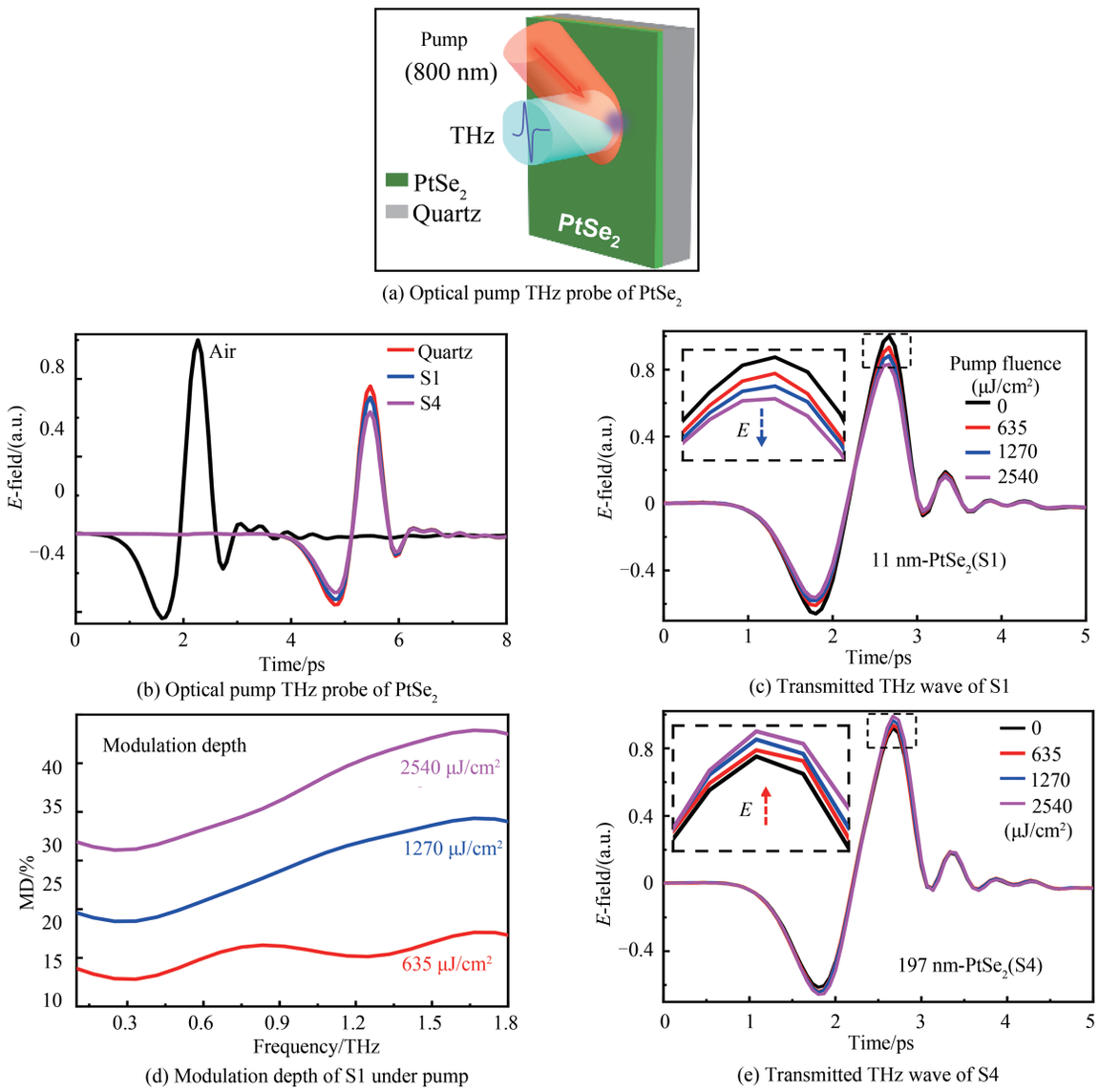

图4 改变泵浦光功率时，$PtSe_2$(S1，S4)薄膜透射太赫兹信号的时域波形和调制深度

Fig. 4 The transmitted THz temporal wave and modulation depth of $PtSe_2$ thin films (S1，S4) under varying pump fluences

和2 540 μJ/cm²，测得S1样品对应的透射太赫兹时域波形如图4(c)所示，随着泵浦光功率的增强，太赫兹信号幅值逐渐减小，并进一步采用调制深度（Modulation Depth, MD）定量描述其强度调制效应，即

$$\mathrm{MD}(\omega)=\frac{E_{\mathrm{No_Pump}}(\omega)-E_{\mathrm{Pump}}(\omega)}{E_{\mathrm{No_Pump}}(\omega)} \tag{1}$$

式中，$E_{\mathrm{No_Pump}}(\omega)$和$E_{\mathrm{Pump}}(\omega)$分别表示有、无泵浦光辐照时太赫兹时域信号（图4(c)）的傅里叶变换频谱。由此，得到图4(d)所示的MD曲线，结果表明：1)$PtSe_2$样品的工作带宽为0.2～1.8 THz，能实现宽带调制；2)以1 THz处的MD为例，其数值逐渐增大，分别为15%（635 μJ/cm²）、25%（1 250 μJ/cm²）和33%（2 540 μJ/cm²）。类似地，由于52 nm和100 nm厚的$PtSe_2$薄膜具有半导体特性，其透射太赫兹信号也随泵浦光功率增强而减小；为了衡量MD变化的剧烈程度，定义平坦度[29] $F=\mathrm{MD}_{\max}-\mathrm{MD}_{\min}$，其中$\mathrm{MD}_{\max}$，$\mathrm{MD}_{\min}$分别为调制深度的峰值、谷值，由此得到不同泵浦光功率下调制深度的平坦度分别为4.8%（635 μJ/cm²）、10.6%（1 250 μJ/cm²）、12.3%（2 540 μJ/cm²）。值得一提的是，图4(e)为相同泵浦条件下197 nm-$PtSe_2$薄膜的透射太赫兹信号，其强度变化与S1样品相反，即随泵浦光的增强而缓慢增大。综上，通过增加$PtSe_2$薄膜的厚度，实现两种截然相反的光控太赫兹强度调制效果。

为进一步探究$PtSe_2$薄膜光控太赫兹调制效应的来源，表征了样品的电导率值[12,30]，即

$$\tilde{T}(\omega)=\frac{\tilde{E}_{\mathrm{Sam}}(\omega)}{\tilde{E}_{\mathrm{Sub}}(\omega)}=\frac{1+n_{\mathrm{Sub}}}{1+n_{\mathrm{Sub}}+Z_0\tilde{\sigma}(\omega)d} \tag{2}$$

$$\tilde{\sigma}(\omega)=\frac{n_{\mathrm{Sub}}+1}{Z_0 d}\left[\frac{1-\tilde{T}(\omega)}{\tilde{T}(\omega)}\right] \tag{3}$$

式中，$\tilde{E}_{\mathrm{Sam}}(\omega)$、$\tilde{E}_{\mathrm{Sub}}(\omega)$分别为太赫兹波透过$PtSe_2$样品和石英基底后的频谱，$n_{\mathrm{Sub}}$为基底的折射率，$d$为薄膜厚度，$Z_0=377\ \Omega$表示真空中的阻抗。据此，可以得到样品在太赫兹波段的电导率$\tilde{\sigma}(\omega)$实部如图5(a)～(d)所示。当泵浦光功率从0增强至2 540 μJ/cm²时，S1薄膜的电导率σ_{PtSe_2}由3.80×10^4 S/m(@1.0 THz)增加至7.79×10^4 S/m，从而导致透射THz信号强度减小；S2、S3现象与S1类似，不再赘述；而S4薄膜的电导率σ_{PtSe_2}由2.62×10^5 S/m(@1.0 THz)逐渐减小至2.36×10^5 S/m，从而导致透射THz信号强度增大。综上，通过泵浦光调控$PtSe_2$薄膜的电导率，进而实现光控太赫兹强度调制的功能，但由于电导率的变化量较小，对应的强度调制现象比较微弱。接下来，固定Delay1至太赫兹信号最强处，扫描Delay2，即进行光泵浦太赫兹探测，并定义差分透过率为

$$-\Delta T/T=(T_{\mathrm{No_Pump}}-T_{\mathrm{Pump}})/T_{\mathrm{No_Pump}} \tag{4}$$

式中，T_{Pump}、$T_{\mathrm{No_Pump}}$分别表示有、无泵浦光辐照样品时太赫兹波的透过率。由图5(e)和(f)可得，对于S1样品，$-\Delta T/T>0$，即$T_{\mathrm{No_Pump}}>T_{\mathrm{Pump}}$，且数值逐渐增大，说明透射太赫兹信号强度随泵浦光功率增强而逐渐减小，与图4(c)中的测试结果一致。此外，使用双指数衰减函数拟合载流子的弛豫复合过程，即

$$y(t)=y_0+A_1\mathrm{e}^{-t/\tau_1}+A_2\mathrm{e}^{-t/\tau_2} \tag{5}$$

式中，τ_1和τ_2分别表示两种不同的指数式衰减过程所对应的时间常数[31]。如表1所示，为拟合相关系数$R^2\geqslant98\%$时对应的最佳拟合参数，注意到$\tau_1<\tau_2$，可见存在较快和较慢两个衰减过程，其中$\tau_1\approx2$ ps，对应光生载流子达到热平衡前的弛豫过程；$\tau_2\approx12$ ps，对应热平衡态以后的光生载流子寿命[12]。而对于S4样品，$-\Delta T/T<0$，即$T_{\mathrm{No_Pump}}<T_{\mathrm{Pump}}$，且数值逐渐增大，说明透射太赫兹信号强度随泵浦光功率增强而逐渐增大，该现象与S1样品相反，与图4(e)中的测试结果一致。2019年，WANG J等采用1 040 nm-光泵浦光探测技术，报道了$PtSe_2$薄膜时的差分透过率特性与本文研究结果相符[32]，因此197 nm-$PtSe_2$的太赫兹反向调制机制可定性解释为泡利阻塞以及自由载流子吸收。此外，泵浦探测结果表明，$PtSe_2$薄膜具有超快的光响应（≈14 ps），对于高速太赫兹光控调制器件的研究及其无线通信具有重要意义。

通过测量$-\Delta T/T$的符号变化，也可以判断$PtSe_2$薄膜样品对太赫兹波的调制特性。图6为$PtSe_2$薄膜的$-(\Delta T/T)_{\mathrm{Max}}$值(@2540 μJ/cm²)随样品厚度（11 nm，52 nm，100 nm和197 nm）的变化趋势，二者呈现较好的线性关系（$R^2\approx99\%$）。因此，当$-\Delta T/T=0$时（五角星拟合点），可以估算出$PtSe_2$薄膜由半导体态向金属态转变时的临界厚度为～155 nm，即$PtSe_2$薄膜对太赫兹调制特性反向的厚度临界点。

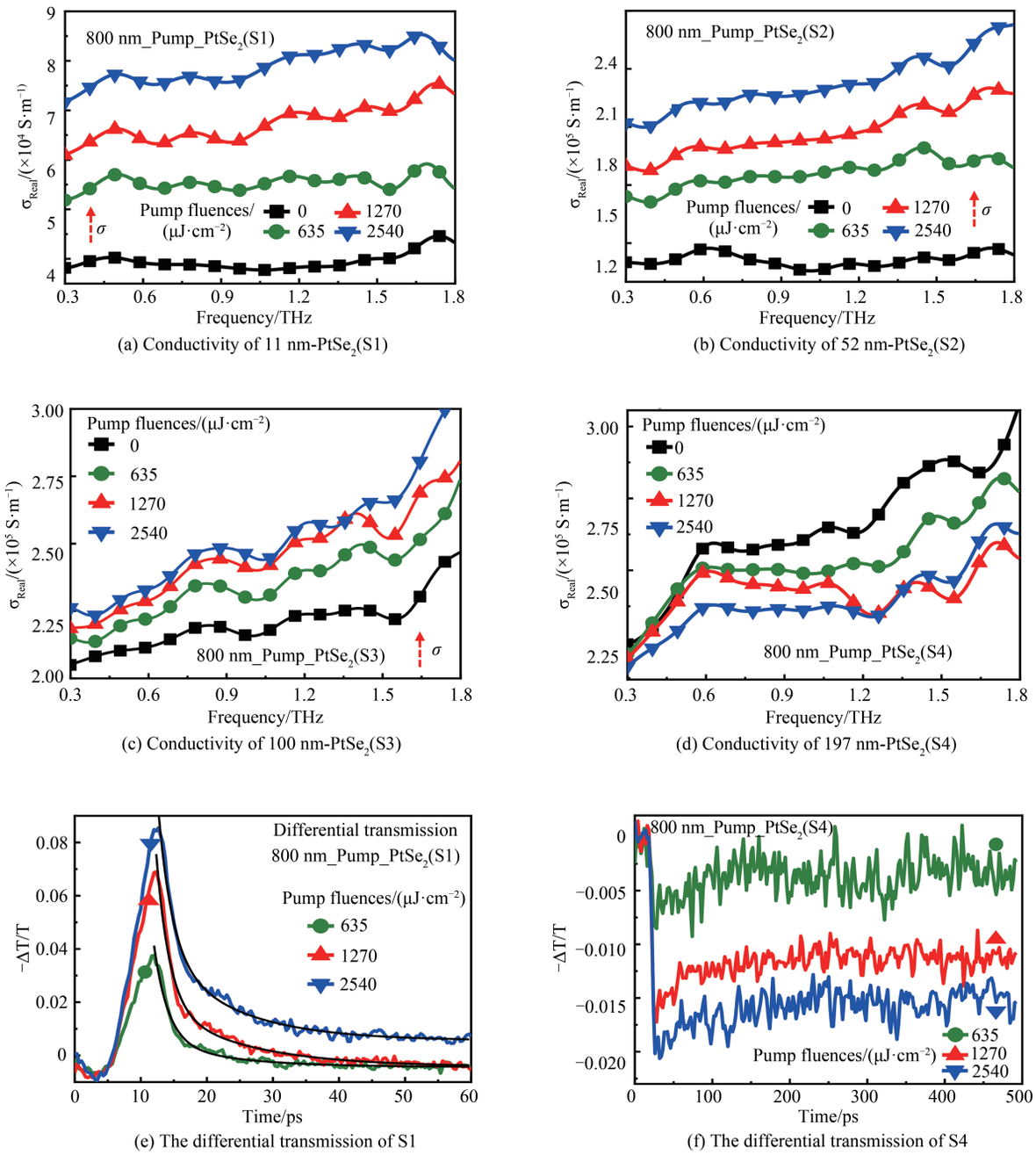

图5 $PtSe_2$(S1，S2，S3和S4)薄膜样品的电导率和时间分辨差分透过率测试(S1和S4)

Fig. 5 The conductivity of $PtSe_2$ thin film (S1, S2, S3 and S4) and the time-resolved differential transmission measurement (S1 and S4)

表1 使用双指数衰减函数拟合11 nm-$PtSe_2$薄膜(S1)的载流子复合过程

Table 1 Bi-exponential decay fitting of 11 nm-$PtSe_2$ (S1) for relaxation time

Pump power/(μJ•cm^{-2})	τ_1/ps	τ_2/ps	Correlation coefficient R^2
635	2.15±0.19	11.01±2.84	0.98
1 270	1.99±0.14	12.88±1.79	0.99
2 540	2.12±0.18	11.16±1.23	0.99

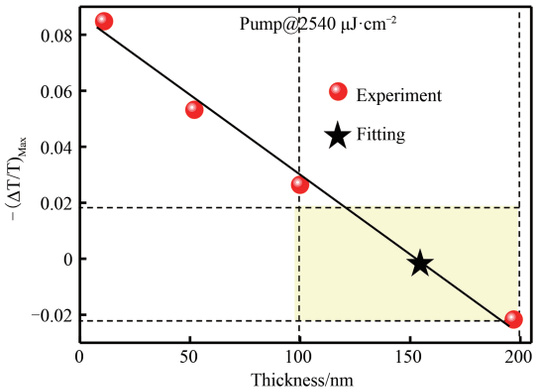

图6　$PtSe_2$薄膜的差分透过率$-\Delta T/T$(@2540 μJ/cm²)随厚度的变化趋势

Fig. 6　The thickness dependent differential transmission $-\Delta T/T$ (@2540 μJ/cm²) of $PtSe_2$ thin films

3　结论

本研究利用时间分辨太赫兹时域光谱系统，分析了11 nm、52 nm、100 nm、197 nm厚的$PtSe_2$薄膜样品在太赫兹波段的光/电学特性，验证其在光控太赫兹调制器件中的潜在应用。改变施加在样品上的泵浦光功率（0～2 540 μJ/cm²），测得厚度为11 nm、52 nm和100 nm的$PtSe_2$薄膜的电导率随泵浦光增强而增大，导致透射太赫兹信号强度减小；而厚度为197 nm的$PtSe_2$薄膜的电导率随泵浦光增强而减小，使得透射太赫兹信号强度增大。实验结果表明，$PtSe_2$薄膜的调制速度快（～14 ps），工作带宽宽（0.2～1.8 THz），调制深度为15%～35%，薄膜由半导体态向金属态转变的临界厚度为～155 nm。研究结果一方面证明了$PtSe_2$材料在高速光控太赫兹器件领域的应用前景，另一方面，所采用的时间分辨太赫兹光谱技术具有通用性，未来有望用于更多的TMDCs材料分析中。

参考文献

[1] DAI Zijie, SU Qiang, LU Dan, et al. A combined experimental and theoretical study on the terahertz vibrations of water vapors[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2019, 214: 277-284.

[2] LI Shuai, DAI Zijie, GAO Xiang, et al. Low-loss terahertz waveguide and its imaging application[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2019, 38(1): 68-73.
李帅，戴子杰，高翔，等. 低损耗太赫兹波导及其成像应用[J]. 红外与毫米波学报，2019，38(1)：68-73.

[3] KOENIG S, LOPEZ D, ANTES J, et al. Wireless sub-THz communication system with high data rate[J]. Nature Photonics, 2013, 7(12): 977-981.

[4] GONG Qihuang, ZHAO Wei. Ultrafast science to capture ultrafast motions[J]. Ultrafast Science, 2021, 2021: 9765859.

[5] YANG Xiuwei, ZHANG Dehai, LIU Siyu, et al. Terahertz nondestructive detection of the hidden layer in multilayer medium[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(3): 0312001.
杨秀蔚，张德海，刘锶钰，等. 多层介质中隐含层的太赫兹无损检测[J]. 光子学报，2021，50(3)：0312001.

[6] DUVILLARET L, GARET F, COUTAZ L. A reliable method for extraction of material parameters in terahertz time-domain spectroscopy[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1996, 2(3): 739-746.

[7] E Yiwen, ZHANG Liangliang, TCYPKIN Anton, et al. Broadband THz sources from gases to liquids[J]. Ultrafast Science, 2021, 2021: 9892763.

[8] LUI H, HEGMANN A. Ultrafast carrier relaxation in radiation-damaged silicon on sapphire studied by optical-pump-terahertz-probe experiments[J]. Applied Physics Letters, 2001, 78(22): 3478-3480.

[9] KUMAR A, SOLANKI A, MANJAPPA M, et al. Excitons in 2D perovskites for ultrafast terahertz photonic devices[J]. Science Advances, 2020, 6(8): eaax8821.

[10] BAXTER B, SCHMUTTENMAER A. Conductivity of ZnO nanowires, nanoparticles, and thin films using time-resolved terahertz spectroscopy[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2006, 110(50): 25229-25239.

[11] DAI Zijie, MANJAPPA M, YANG Yunkun, et al. High mobility 3D dirac semimetal (Cd_3As_2) for ultrafast photoactive terahertz photonics[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(17): 2011011.

[12] SRIVASTAVA K, CHATURVEDI A, MANJAPPA M, et al. MoS_2 for ultrafast all-optical switching and modulation of THz fano metaphotonic devices[J]. Advanced Optical Materials, 2017, 5(23): 1700762.

[13] MANZELI S, OVCHINNIKOV D, PASQUIER D, et al. 2D transition metal dichalcogenides[J]. Nature Reviews

Materials, 2017, 2(8): 1-15.

[14] ATACA C, SAHIN H, CIRACI S. Stable single-layer MX2 transition-metal oxides and dichalcogenides in a honeycomb-like structure[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2012, 116(16): 8983-8999.

[15] ZHANG W, QIN J, HUANG Z, et al. The mechanism of layer number and strain dependent bandgap of 2D crystal $PtSe_2$[J]. Journal of Applied Physics, 2017, 122(20): 205701.

[16] ZHAO Y, QIAO J, YU Z, et al. High-electron-mobility and air-stable 2D layered $PtSe_2$ FETs[J]. Advanced Materials, 2017, 29(5): 1604230.

[17] ZENG H, LIN S, LI Z, et al. Fast, self-driven, air-Stable, and broadband photodetector based on vertically aligned $PtSe_2$/GaAs heterojunction[J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(16): 1705970.

[18] CHEN Hongyun, LU Yu, LI Chen, et al. Multilayer $PtSe_2$/TiO_2 NRs Schottky Junction for UV Photodetector[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(20): 2025001
陈红云, 鲁玉, 李辰, 等. 多层 $PtSe_2$/TiO_2纳米棒肖特基结紫外光电探测器[J]. 光学学报, 2020, 40(20): 2025001.

[19] ZHANG K, FENG M, REN Y, et al. Q-switched and mode-locked Er-doped fiber laser using $PtSe_2$ as a saturable absorber[J]. Photonics Research, 2018, 6(9): 893-899.

[20] YUAN J, MU H, LI L, et al. Few-layer platinum diselenide as a new saturable absorber for ultrafast fiber lasers[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(25): 21534-21540.

[21] LI Z, LI R, PANG C, et al. 8.8 GHz Q-switched mode-locked waveguide lasers modulated by $PtSe_2$ saturable absorber[J]. Optics Express, 2019, 27(6): 8727-8737.

[22] WAGNER S, YIM C, MCEVOY N, et al. Highly sensitive electromechanical piezoresistive pressure sensors based on large-area layered $PtSe_2$ films[J]. Nano Letters, 2018, 18(6): 3738-3745.

[23] PAWAR S, LATE J. Temperature-dependent Raman spectroscopy and sensor applications of $PtSe_2$ nanosheets synthesized by wet chemistry[J]. Beilstein Journal of Nanotechnology, 2019, 10(1): 467-474.

[24] SAJJAD M, MONTES E, SINGH N, et al. Superior gas sensing properties of monolayer $PtSe_2$[J]. Advanced Materials Interfaces, 2017, 4(5): 1600911.

[25] BOLAND S, COILEAIN Ó, WAGNER S, et al. $PtSe_2$ grown directly on polymer foil for use as a robust piezoresistive sensor[J]. 2D Materials, 2019, 6(4): 045029.

[26] JAKHAR A, KUMAR P, MOUDGIL A, et al. Optically pumped broadband terahertz modulator based on nanostructured $PtSe_2$ thin films[J]. Advanced Optical Materials, 2020, 8(7): 1901714.

[27] HONG T, LEE M, SON H, et al. Terahertz conductivity of reduced graphene oxide films[J]. Optics Express, 2013, 21(6): 7633-7640.

[28] YIM C, LEE K, MCEVOY N, et al. High-performance hybrid electronic devices from layered $PtSe_2$ films grown at low temperature[J]. ACS Nano, 2016, 10(10): 9550-9558.

[29] LU Weitao, ZHANG Shuxian, YANG Wenge, et al. A novel de-noising algorithm based on un-decimated wavelet packet transform[J].Chinese Space Science and Technology, 2014, 34(3): 46-52.
路伟涛, 张书仙, 杨文革, 等. 基于非抽取小波包变换的信号滤波算法[J]. 中国空间科学技术, 2014, 34(3): 46-52.

[30] NEU J, SCHMUTTENMAER C A. Tutorial: An introduction to terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS)[J]. Journal of Applied Physics, 2018, 124(23): 231101.

[31] CAO Liping, CHEN Zhandong, WU Qiang, et al. Effect of annealing on transient photoluminescence properties of microstructured black silicon[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0530001
曹丽萍, 陈战东, 吴强, 等. 退火对微构造黑硅光致发光瞬态性质的影响[J]. 光学学报, 2015, 35(5):383-388.

[32] WANG L, ZHANG S, MCEVOY N, et al. Nonlinear optical signatures of the transition from semiconductor to semimetal in $PtSe_2$[J]. Laser & Photonics Reviews, 2019, 13(8): 1900052.

Foundation item: Projects of International (Regional) Cooperation and Exchanges of National Natural Science Foundation of China (No.12061131010), National Natural Science Foundation of China (No.12074198)