

MoS₂ 纳微薄膜激光非线性透射的调控研究

王沅倩 林才纺 张景迪 何军 肖思

Research on the controllable nonlinear laser transmission properties of MoS₂ nano-micron film

Wang Yuan-Qian Lin Cai-Fang Zhang Jing-Di He Jun Xiao Si

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 034214 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.034214

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034214>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I3>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

LiNbO₃ 晶体界面非线性表面波的研究

Study on nonlinear surface waves along the boundary of LiNbO₃ crystals

物理学报.2015, 64(1): 014204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.014204>

色散条件下各向同性光纤中拉曼增益对光脉冲自陡峭的影响

Effect of Raman gain on the self-steepening characteristic in isotropic fibers

物理学报.2014, 63(21): 214207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.214207>

通信波长频率一致纠缠光源的频谱测量

Measurement of the spectral properties of the coincident-frequency entangled biphoton state at optical communication wavelength

物理学报.2014, 63(19): 194206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194206>

在远离光子晶体光纤零色散波长的正常色散区入射飞秒脉冲产生四波混频及孤子效应的实验研究

Experimental research of four-wave mixing and soliton effects in a photonic crystal fiber pumped femtosecond pulses at the wavelength located normal dispersion regime away from the zero dispersion point

物理学报.2014, 63(16): 164206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.164206>

MoS₂ 溶液的波长选择性光限幅效应研究

Wavelength selective optical limiting effect on MoS₂ solution

物理学报.2014, 63(14): 144204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.144204>

MoS₂纳微薄膜激光非线性透射的调控研究*

王沅倩 林才纺 张景迪 何军 肖思†

(中南大学物理与电子学院先进材料超微结构与超快过程研究所, 长沙 410083)

(中南大学超微结构与超快过程湖南省重点实验室, 长沙 410083)

(2014年6月12日收到; 2014年7月30日收到修改稿)

超短飞秒脉冲激光(脉冲时间 < 40 fs)有独特的热效应机理,但尚无针对其设计的光限幅保护膜.本文采用易于产业化的离散-旋涂法制备了MoS₂纳微薄膜(厚度150—200 nm).光限幅测试结果表明,针对超短脉冲激光,此纳微薄膜在低光强下增透,高光强下减透(光限幅);且能通过改变入射波长,调控其光限幅阈值,可用于聚光太阳能电池的效率增强和损伤保护.利用此方法,对已商用的砷化镓太阳能电池进行涂膜,发现转换效率降低 < 3%,但损伤阈值提高 > 50%.

关键词: 二硫化钼, 超短飞秒脉冲激光, 波长选择, 光限幅

PACS: 42.65.-k, 78.66.-w

DOI: 10.7498/aps.64.034214

1 引言

脉冲激光由于其时间宽度短、峰值功率高等优点,已广泛用于超高速光通讯^[1,2]、纳米科学^[3-5]、国防和生物医学^[6-10]等领域.2014年4月,美国宇航局的月球激光通信演示(LLCD)使用了脉冲激光束从月球向地球传输数据,其下载速度(622 Mb/s)比之前最好的无线电系统还快6倍,能量损耗却小于四分之一^[1].但因为脉冲激光瞬间功率大,功率密度高,需要考虑其热效应对接收器件的热损伤影响.

连续或纳秒激光导致的热熔或热力损伤弛豫时间均在纳秒和皮秒量级^[11].当激光脉冲时间与电子-声子耦合时间(飞秒量级)相当或更小时,非平衡热效应会出现,温度的变化将满足双温度(TTM)模型,温度下降速度约为传统傅里叶(Fourier)模型的两倍^[12].超短飞秒脉冲激光(脉冲时间 < 40 fs)是商业化的最短脉冲激光,聚焦的光斑更小而且聚焦功率密度更大.2014年5月,Mitsuhiro的研究组利用聚焦的近红外飞秒脉冲激光的特殊热损伤原理,在细胞壁上打洞,从而直接将

药物引入细胞^[7].但目前尚没有针对超短飞秒脉冲激光特殊热损伤机理设计的光限幅薄膜.

MoS₂由一层Mo原子和上下两层S原子堆积而成,层与层之间通过较弱的范德华力作用结合,具有类似石墨烯的层状结构,已逐渐成为广泛研究的新型纳米薄膜材料之一^[13-21],在许多方面的应用已经得到广泛研究,如小信号放大器^[13]、晶体管^[14-16]、逻辑电路^[17,18]、生物医学^[19,20]等等,具有成熟的制备和生产工艺.已有报道MoS₂的动力学过程有小于1 ps的快过程分量(慢过程分量约几百ps),这说明MoS₂有可能与超短脉冲激光进行飞秒级的相互作用^[21],但目前没有利用MoS₂纳微材料制备可产业化生产的光限幅保护膜的报道.

本文针对超短飞秒脉冲激光特殊的热损伤机理,利用拥有飞秒量级动力学过程的MoS₂作为原料^[22],采用易于产业化的离散-旋涂法制备了厚度约为150—200 nm的薄膜,并进行了表征.光限幅测试结果表明,针对超短脉冲激光,此纳微薄膜在低光强下增透,高光强下减透(光限幅);并能通过改变入射波长,调节其光限幅阈值,拥有新颖的光学特性.为了证明其实用价值,对已商用的砷化镓

* 国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 11104356, 11204112)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: sixiao@csu.edu.cn

太阳能电池进行涂膜,发现其涂膜后转换效率降低<3%,但损伤阈值提高>50%.

2 实验

2.1 纳微薄膜的制备和表征

称取少量 MoS_2 粉末与四氢呋喃(THF)溶剂配制成溶液,用KQ-300DE型数控超声波清洗器进行震荡,震荡完成后用TG20离心机在1500 r/min的条件下离心.取中层溶液,就得到了所需 MoS_2 悬浮溶液.图1(a)为 MoS_2 原始粉末的扫描电镜样图.图1(b)为离心后 MoS_2 薄片扫描电镜样图,从图中可以看出制备的 MoS_2 薄片宽度为10—20 μm .插图图为 MoS_2 薄片的光学显微镜样图,表面有明显的彩色干涉条纹,这是由于等倾干涉导致的.彩色条纹形状规则,证明制备的纳微薄膜表面平整[23].通过原子力显微镜测试,测得薄膜厚度为150—200 nm.

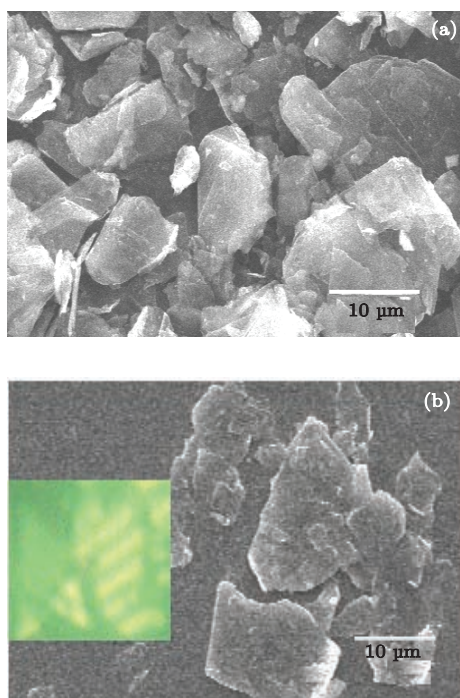


图1 (a) MoS_2 粉末的扫描电镜样图; (b) 离心后 MoS_2 薄膜扫描电镜样图(插图图为 MoS_2 薄膜光学显微镜样图)

选取普通玻璃和已商用的砷化镓太阳能电池作为基底,用旋涂法对其涂膜.图2(a)左右两侧分别为涂膜前和后的对比照片(黑色方块为砷化镓太阳能电池,透明大方块的为玻璃片).从图可以看出,用 MoS_2 悬浮溶液制备的纳微薄膜分布均匀,没有明显颜色,透明度很高.图2(b)为以普通玻璃为

基底的 MoS_2 纳微薄膜对应的吸收光谱,分别为含基底的 MoS_2 薄膜、基底(玻璃)以及纯 MoS_2 的吸收谱线,从图中可以看出 MoS_2 纳微薄膜的线性吸收谱在可见波段没有特征吸收峰,不会影响低光强下白光的透过率,可以制成普适的宽区域保护膜.

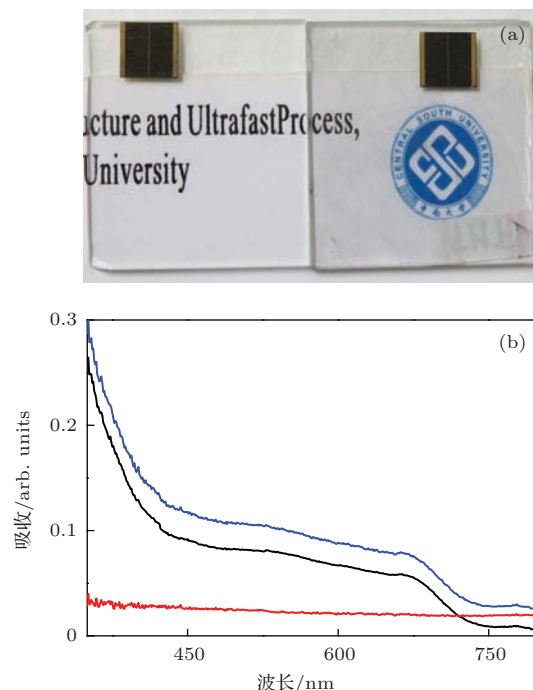


图2 (a) 涂与未涂 MoS_2 纳微薄膜的玻璃和砷化镓太阳能电池对比照片; (b) 以玻璃为基底制备的 MoS_2 纳微薄膜的吸收谱(从上至下分别为基底+ MoS_2 , 基底, 纯 MoS_2)

2.2 纳微薄膜的光限幅测试

采用波长可调的飞秒脉冲激光作为光源,利用连续可调的衰减片改变入射光强,测量涂了 MoS_2 纳微薄膜的玻璃片的透过率变化.测试中采用光源为Spectra-Physics公司的飞秒激光再生放大器,测试波长为530 nm, 630 nm和760 nm,重复频率2 kHz,脉冲宽度38 fs.收集探头为OPHIR公司的PD10-V2-ROHS,可测范围190—1100 nm.

图3为玻璃基底上 MoS_2 纳微薄膜在波长为530 nm, 630 nm和760 nm的超短飞秒脉冲激光照射下,透过率随入射光强的变化(因为线性透过率包括玻璃基底的透过率,因此采用了归一化透过率表示方法).实验前已验证对应相同变化强度的入射激光,作为基底的玻璃的透过率没有任何变化,不具备光限幅或光增透效应,光强依赖特性来自于 MoS_2 薄膜的贡献.

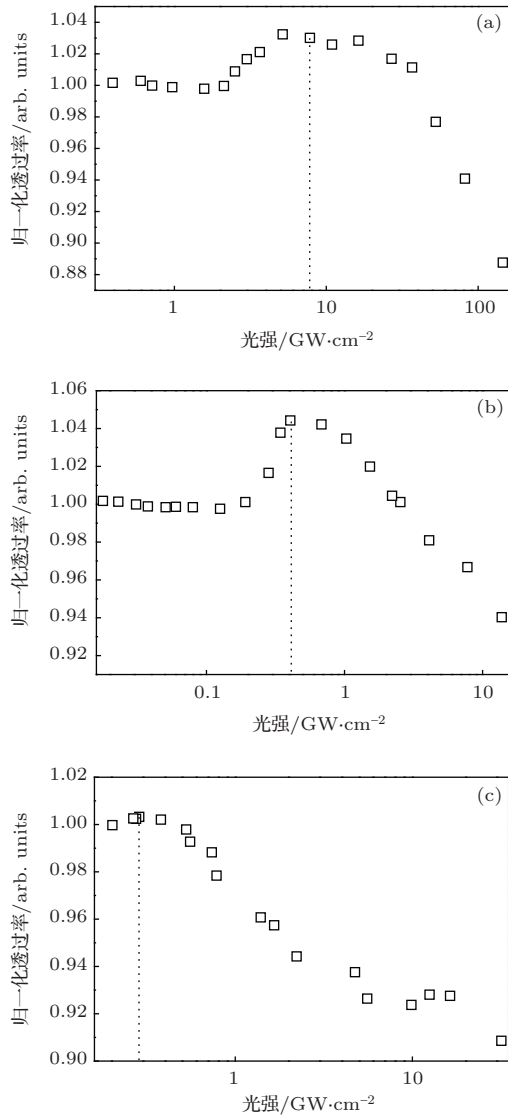


图3 MoS₂ 纳微薄膜在不同波长下透射率随入射光强的变化(图中虚线对应光强为 I_P) (a) 530 nm (线性透射率为 82.2%, $I_P = 7.8 \text{ GW/cm}^2$); (b) 630 nm (线性透射率为 73.1%, $I_P = 0.42 \text{ GW/cm}^2$); (c) 760 nm (线性透射率为 85.7%, $I_P = 0.29 \text{ GW/cm}^2$)

2.3 结果讨论

由图3可以看出,在可见波段530 nm的超短飞秒脉冲激光照射下,随着光强逐渐增大,小光强下归一化透射率首先增大到103%左右,表现为光增透;然后大光强下逐渐减小到88%,表现为光限幅.聚光太阳能电池的特性之一是入射光强越大,转换效率越高,但也有对应的损伤光强阈值,超过损伤阈值,则电池将受到不可逆或可逆的损伤.这个在小光强下增透、大光强下限幅的特性对砷化镓之类的聚光太阳能电池非常实用.

将制备的MoS₂薄膜透射率最大值对应的光强设定为最佳工作光强(I_P),目前在530 nm波段, I_P

对应大小为7.8 GW/cm².如果能调控MoS₂纳微薄膜的 I_P 值与砷化镓聚光太阳能电池的损伤阈值大致重合(即损伤阈值 = I_P),则入射光强度小于损伤阈值(或 I_P)时,对入射的强光(或飞秒级光脉冲)增透,能充分提高聚光太阳能电池的接收光能和转换效率;当光强变得太大,超过了损伤阈值(或 I_P),则对入射的强光(或飞秒级光脉冲)减透,保护太阳能电池不被损坏.因此,这个特性有很好的实用价值,但需要调控 I_P 值等于太阳能电池的损伤阈值.

变化入射飞秒激光波长,在630 nm的脉冲激光照射下,归一化透射率的变化规律和530 nm时比较类似,对应的最大归一化透射率为104%左右,最小归一化透射率为94%,但 I_P 值变化(减小)为0.42 GW/cm².在760 nm的脉冲激光照射下,小光强情况时,透射率的上升阶段已经不明显, I_P 约为0.29 GW/cm².随着光强增加,归一化透射率降低为91%.这说明我们可以通过调节入射波长,控制 I_P 值的大小.虽然,通过入射波长调控,意义不是很大,但仍说明 I_P 值确实可以通过某种形式进行调控,使其大致符合聚光太阳能电池的损伤阈值.

通过玻璃基底上MoS₂纳微薄膜的变波长光限幅测试,得知可以通过调节入射光强与最佳工作光强(I_P 值)的关系,来调控膜的光增透或光限幅效应,从而提高太阳能电池的转换效率(能量)或提高损伤阈值.虽然,目前限幅的比例都在10%左右,但考虑到MoS₂膜的厚度只有150—200 nm,我们可以通过增加多层膜来提高其效率.

3 砷化镓电池涂膜研究

选取转化效率为31.13%的砷化镓太阳能电池,对其进行MoS₂涂膜,并对比测试涂膜前后,其在白光下电池转换效率和飞秒激光损伤阈值.

图4(a)为砷化镓太阳能电池涂膜前后在标准白光光源照射下的*I-V*曲线,可以看出,涂膜前后的*I-V*曲线几乎重合,计算得到涂膜后转换效率为30.05%,仅减小3%.

根据所选砷化镓太阳能电池的光谱响应特性,在530及630 nm波段附近量子效率只有15%左右,而在780 nm附近量子效率增强为92%,为电池的主要工作波段;且在780 nm的激光照射下,所选砷化镓电池未涂膜之前的损伤阈值如图4(b)黑色圆点所示,约为0.258 GW/cm².此光强阈值和对应780 nm波长的 I_P (如图3(c)所示,约为

0.29 GW/cm²)基本一致,因此涂膜后在此波段可以达到低光强(低于损伤阈值)增透、最大程度提高转换效率,且高光强(大于损伤阈值)限幅、保护太阳能电池的效果.因此选用波长为780 nm的超短飞秒脉冲激光分别对涂膜和未涂膜的二硒化钨太阳能电池片进行照射(每次照射持续时间为15 min,两次照射时间间隔为10 min,以便消除热效应积累),然后利用电压电流测试系统测试其转化效率,之后再提高激光光强继续照射.如此,可以得到如图4(b)所示,电池转换效率随照射激光强度变化的曲线.当接受激光照射后,电池转换效率开始下降并无法恢复,就可以认为电池已被强光损伤.从图4(b)可以看出,飞秒脉冲激光照射后,未涂膜电池的损伤阈值为0.258 GW/cm²,涂膜后电池的损伤阈值约为0.39 GW/cm²,提高51%左右.

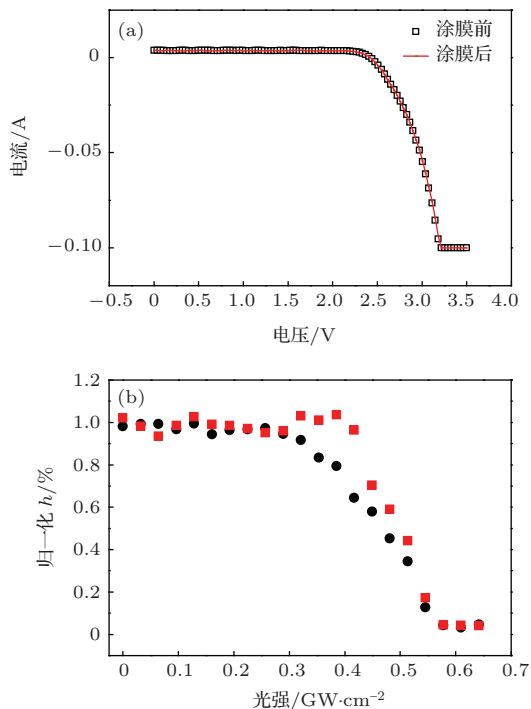


图4 (a) 二硒化钨太阳能电池涂膜前和涂膜后在标准白光源照射下的 I - V 曲线; (b) 涂膜和未涂膜的二硒化钨太阳能电池在飞秒脉冲激光照射下转化效率随光强的变化曲线(圆形为涂膜前,正方形为涂膜后)

4 结 论

采用易于产业化的离散-旋涂法制备了MoS₂纳微薄膜,其光限幅测试结果表明,针对超短脉冲激光,此纳微薄膜在低光强下增透,高光强下减透(光限幅);并能通过改变入射波长,调节其光限幅阈值(最佳工作光强),对成本较高的二硒化钨等聚光太阳能电池有很好的增强转换效率和提高损伤阈

值的作用.利用此方法,对已商用的二硒化钨太阳能电池进行涂膜,发现转换效率降低<3%,但损伤阈值提高>50%,证明有比较好的实用价值.

参考文献

- [1] Boroson D M, Robinson B S, Murphy D V, Buriac A, Khatri F, Kovalik J M, Sodnik Z, Cornwell D M 2014 *Proc. SPIE* **8971** 89710S
- [2] Murphy D V, Kinsky J E, Grein M E, Schulein R T, Willis M M, Lafon R E 2014 *Proc. SPIE* **8971** 89710V
- [3] Peng N N, Huo Y Y, Zhou K, Jia X, Pan J, Sun Z R, Jia T Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 094201 (in Chinese) [彭娜娜, 霍燕燕, 周侃, 贾鑫, 潘佳, 孙真荣, 贾天卿 2013 物理学报 **62** 094201]
- [4] Wang F, Jiang H B, Gong Q H 2014 *Chin. Phys. B* **23** 014201
- [5] Naima B, Abdelkader C, Mokhtaria D, Fodil H 2014 *Chin. Phys. B* **23** 016103
- [6] Zeng Y, Pan Z H, Zhao F L, Qin M, Zhou Y, Wang C S 2014 *Chin. Phys. B* **23** 024212
- [7] Mitsuhashi T, Terakawa M 2014 *J. Biomed. Opt.* **19** 015003
- [8] Terakawa M, Tsunoi Y, Mitsuhashi T 2012 *Int. J. Nanomed.* **7** 2653
- [9] Terakawa M, Mitsuhashi T, Shinohara T, Shimizu H 2013 *Opt. Express* **21** 12604
- [10] Terakawa M, Tanaka Y 2011 *Opt. Lett.* **36** 2877
- [11] Zhang H Y, Wu S G 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5314 (in Chinese) [张红鹰, 吴师岗 2007 物理学报 **56** 5314]
- [12] Anisimov S I, Kapeliovich B L, Perel' Man T L 1974 *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **66** 776
- [13] Radisavljevic B, Whitwick M B, Kis A 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 043103
- [14] Sarkar D, Liu W, Xie X, Anselmo A C, Mitragotri S, Banerjee K 2014 *ACS Nano* **8** 3992
- [15] Yin Z Y, Li H, Li H, Jiang L, Shi Y M, Sun Y H, Lu G, Zhang Q, Chen X D, Zhang H 2012 *ACS Nano* **6** 74
- [16] Radisavljevic B, Radenovic A, Brivio J, Giacometti V, Kis A 2011 *Nat. Nanotechnol.* **6** 147
- [17] Radisavljevic B, Whitwick M B, Kis A 2011 *ACS Nano* **5** 9934
- [18] Radisavljevic B, Whitwick M B, Kis A 2013 *ACS Nano* **7** 3729
- [19] Farimani A B, Min K, Aluru N R 2014 *ACS Nano* **8** 7914
- [20] Liu K, Feng J, Kis A, Radenovic A 2014 *ACS Nano* **8** 2504
- [21] Lai Z P 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 056801 (in Chinese) [赖占平 2013 物理学报 **62** 056801]
- [22] Kumar N, He J Q, He D W, Wang Y S, Zhao H 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 133702
- [23] Gao L, Ni G X, Liu Y, Liu B, Castro Neto A H, Loh K P 2014 *Nature* **505** 190

Research on the controllable nonlinear laser transmission properties of MoS₂ nano-micron film^{*}

Wang Yuan-Qian Lin Cai-Fang Zhang Jing-Di He Jun Xiao Si[†]

(Institute of Super-microstructure and Ultrafast Process in Advanced Materials, Department of Physics and Electronics, Central South University, Changsha 410083, China)

(Hunan Key Laboratory for Super-Microstructure and Ultrafast Process, Central South University, Changsha 410083, China)

(Received 12 June 2014; revised manuscript received 30 July 2014)

Abstract

Ultrashort femtosecond pulse laser (pulse duration < 40 fs) has a unique mechanism of thermal effects, but there is no optical limiting protection film designed for it. In our article, MoS₂ nano-micron films (thickness 150–200 nm) are prepared by spin-coating method. Optical limiting test results show that for the ultrashort pulse laser, this film shows increasing transparency at low light intensity, while it shows decreasing transparency at a higher light intensity (optical limiting). It is capable of changing the optical limiting threshold by changing the incident wavelength which can be used for transparency enhancement and protection against damage of concentrator solar cells. Using this method to have a commercial GaAs solar cells coated found the conversion efficiency reduction < 3%, but the damage threshold increase > 50%.

Keywords: molybdenum disulfide, ultrashort femtosecond pulse laser, wavelength selective, optical limiting

PACS: 42.65.-k, 78.66.-w

DOI: [10.7498/aps.64.034214](https://doi.org/10.7498/aps.64.034214)

^{*} Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11104356, 11204112).

[†] Corresponding author. E-mail: sixiao@csu.edu.cn