MoS_2/WSe_2-PVA 薄膜热光全光调制器(特邀)

王奕方,吴 侃,陈建平

(上海交通大学 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室,上海 200240)

摘 要:全光调制器在全光信号处理和通信等全光应用中起着重要的作用。主要研究了基于MoS_2-PVA 薄膜实现的全光调制器。此外,也验证了 WSe_2-PVA 薄膜也可实现全光调制。该器件利用热光效应,结合偏振干涉实现了全光调制,得到了长时间稳定输出的调制信号。将 980 nm 的脉冲信号作为控制光,MoS_2 或 WSe_2 吸收光产生热量,使薄膜的折射率发生改变,从而改变 1 550 nm 信号光的偏振态,实现 980 nm 控制光对 1 550 nm 光的调制。得到的 MoS_2-PVA 薄膜全光调制器的上升沿时间为 526 μs。

关键词:全光器件; 非线性光学材料; 光开关器件; 相位调制

中图分类号:TN29 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201948.0103003

All-optical thermal modulator based on MoS_2/WSe_2-PVA thin film (invited)

Wang Yifang, Wu Kan, Chen Jianping

(State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: All-optical modulator plays an important role for various all-optical applications in optical communication. An all-optical modulator was mainly investigated based on few-layer molybdenum disulfide (MoS_2)-polyvinyl alcohol (PVA) thin films. In addition, an all-optical modulator based on few-layer tungsten disulfide (WSe_2)-polyvinyl alcohol (PVA) thin film was also demonstrated. The modulator was based on polarization interference and the thermo-optic effect of TMDs-PVA thin film. A long-time stable modulated output was obtained. By absorbing the pump at 980 nm, MoS_2 or WSe_2 generates heat, changes the refractive index of thin film and modifies the polarization of the incident light at 1 550 nm. The obtained thermal all-optical modulator based on MoS_2-PVA thin film has a rise time of 526 μs.

Key words: all-optical devices; nonlinear optical materials; optical switching devices; phase modulation

收稿日期:2018-08-21; **修订日期**:2018-09-24

基金项目:国家自然科学基金(61505105,61535006);北邮开放课题 Open Fund of IPOC(BUPT)

作者简介:王奕方(1996-),女,硕士生,主要从事基于二维材料全光信号处理方面的研究。Email:yifangwang@sjtu.edu.cn

导师简介:吴侃(1983-),男,副教授,博士,主要从事激光器及微波光子学方面的研究。Email:kanwu@sjtu.edu.cn

0 引 言

自 2004 年石墨烯被发现以来，二维材料因其独特的光子和光电特性引起了广大研究工作者的关注[1-3]。许多研究人员已经研究了基于石墨烯的新型光电器件,像光学调制器[4-5]、光开关[6]和起偏器[7]等。自石墨烯被发现之后,过渡金属硫化物(TMDs)[8-10]、拓扑绝缘体(TI)[11]、黑磷(BP)[12-13]等也渐渐出现在研究工作者的视野中。其中过渡金属硫化物(TMDs)因其具有较高的光学非线性和饱和吸收特性已成为研究热点。许多研究人员已经证明了这些 TMDs 可作为可饱和吸收体应用于调 Q 光纤激光器及锁模激光器中[9]。

与此同时，全光信号处理因其具有高带宽和抗电磁干扰等优点日益受到重视，全光方案在全光调制、传感、路由等光通信中发挥着重要作用。基于石墨烯的全光调制器和移相器已有相关报道[4-6]。2017年，笔者所在课题组采用在拉锥光纤上沉积少量硫化钨(WS_2)的方法,并且结合马赫曾得干涉仪(MZI)实现了移相器及全光开关，利用硫化钨材料的热光效应和波长相关吸收获得高控制效率和低信号损耗[14]。然而，由于马赫曾得干涉仪的双臂结构使得该器件对环境干扰较为敏感,导致输出信号稳定性欠佳。

在该工作的基础上，文中基于偏振干涉并利用材料的热光效应作为控制机制，实现了基于 MoS_2/WSe_2-PVA 薄膜的全光调制器。当 980 nm 控制光通过波分复用器进入 MoS_2/WSe_2-PVA 薄膜后,MoS_2/WSe_2 材料吸收控制光,产生热量,通过热光效应改变薄膜的折射率。由于材料在薄膜中分布的不均匀和薄膜本身厚度的不均匀,1 550 nm 信号光的两个正交偏振分量会获得不同的相移，从而改变信号光的偏振态,实现 980 nm 光对 1 550 nm 光的调制。得到的 MoS_2-PVA 全光调制器的上升时间为 526 μs。由于控制光和信号光在同一光束中传输，使得由空气流动或温度变化等环境扰动引起的共模干扰对该器件的影响变得很弱。因此，该器件与之前的 MZI 结构相比对环境扰动较不敏感,输出信号更稳定。此外，采用薄膜形式因其紧凑性在实际应用中也有着很大的优势。基于 MoS_2/WSe_2-PVA 薄膜的全光调制器的实现证明了二维材料 TMDs 在光逻辑、光传感、光路由等全光信号处理领域有着广阔的应用前景。

1 TMDs-PVA 材料的制备

二维材料的制备方法一般可以分成两大类:自上而下和自下而上的方法[15]。自上而下主要是通过打破分子层之间的范德华力将片状材料剥落到单层或多层，主要包括机械剥离、激光减薄和溶液处理等。自下向上的方式则是在分子层面直接合成相应的纳米材料,主要包括化学气相沉积法、分子束外延法、水热法、脉冲磁控溅射法、脉冲激光沉积法和气相硫化法等。在此次实验中主要采用液相剥离法(LPE)制备 TMDs-PVA 材料,该方法作为一种纯物理溶液处理方法，直接采用高强度超声使材料分子层之间产生微气泡,靠这股力量打破范德华力,经超声处理后离心分离,再收集悬浮分层的二维纳米片。在这个过程中，通过控制超声波的强度和离心过程的时间,脱落的纳米片层数大致可以控制,该方法为制备大量的单层和多层二维材料提供了一种简便和低成本的方法而且又无需后续处理加工。

以 MoS_2-PVA 薄膜为例,其制备过程如下:首先将 MoS_2 颗粒和胆酸钠(SC)溶液混合,制成 5 mg/ml 的 MoS_2 溶液,同时准备 50 mg/ml 聚乙烯醇(PVA)水溶液,然后将 2 ml 的 MoS_2 溶液和 10 ml 的聚乙烯醇溶液混合,并且用磁力搅拌机充分混合 24 h。之后用超声波处理混合物溶液 4 h,再从悬浮物中取适量混合物滴到一个干净的培养皿表面 ，在 50 ℃下烘干 3~4 天,得到 MoS_2-PVA 薄膜。

2 实验方案与结果

2.1 MoS_2-PVA 材料吸收特性

制备了材料 MoS_2-PVA 后，为了可以更加充分的将材料应用到光电领域，文中测试材料的吸收特性,如图 1 所示。图 1(a)是将 MoS_2-PVA 薄膜裁剪后的形态图,图 1(b)是将其进一步裁剪成 1 mm×1 mm 大小附着在光纤头尾部的状态图，实验中用两个 FC/APC 光纤头通过法兰盘将其夹持在中间实现光纤到薄膜的耦合。图 1(c)是 MoS_2-PVA 薄膜的吸收特性在不同波长的分布图。可以发现 MoS_2-PVA 薄膜随着波长增加损耗会相应减小。其中该薄膜对 980 nm 控制光的吸收损耗约为 6 dB，对 1 550 nm 信

号光的损耗约为 3.2 dB。这表明 MoS_2–PVA 薄膜对 980 nm 光具有较强吸收，因此实验中利用 MoS_2 的波长相关吸收，选择吸收强的 980 nm 波长作为控制光，吸收弱的 1 550 nm 波长作为信号光，从而在泵浦波长处更高的吸收，以便更好地控制效率，而在信号波长处更弱的吸收以降低损耗，最终获得高控制效率和低信号损耗。

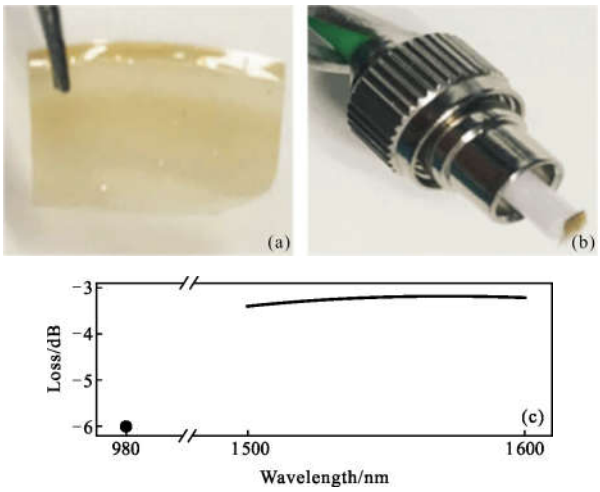

图 1 (a) MoS_2–PVA 薄膜照片；(b) MoS_2–PVA 薄膜转移到光纤头的端面的照片；(c) MoS_2–PVA 薄膜的损耗特性

Fig.1 (a) MoS_2–PVA thin film; (b) MoS_2–PVA film transferred onto a fiber end; (c) Loss of MoS_2–PVA thin film

2.2 基于 MoS_2/WSe_2–PVA 薄膜实现全光调制

图 2 是基于 MoS_2/WSe_2–PVA 薄膜实现全光调制的实验装置图。980 nm 脉冲光作为控制光，1 550 nm连续光作为信号光，两束光的偏振态由偏振控制器(PC)

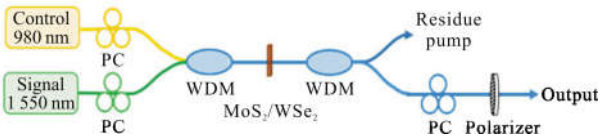

图 2 基于 MoS_2 /WSe_2–PVA 薄膜实现全光调制器的实验装置图

Fig.2 Experimental setup of an all-optical modulator with MoS_2/WSe_2–PVA thin film

控制，通过 980/1550 波分复用器(WDM)合成一束光，入射到经由法兰盘夹在光纤头尾端的 MoS_2/WSe_2–PVA 薄膜上。在 MoS_2/WSe_2–PVA 薄膜之后经过第二个波分复用器，用于滤除多余的 980 nm 泵浦光。第二个波分复用器后，另一个偏振控制器和起偏器用于选择出期望的信号光的偏振状态并输出 1 550 nm 波长的调制脉冲信号。输出的调制脉冲信号用示波器(Aglient DSO9254A 2.5 GHz)和一个光电探测器来测量其时域波形。

器件的工作原理如下：以 MoS_2–PVA 薄膜为例，当注入 980 nm 泵浦脉冲光后，根据热光效应，MoS_2 吸收泵浦光产生热，使 MoS_2–PVA 薄膜的折射率发生改变。而由于材料在薄膜中分布的不均匀和薄膜本身厚度的不均匀性，1 550 nm 信号光的两个正交偏振态经历不同的相移，从而改变 1 550 nm 信号光的偏振态。最后，通过调节光路中的 3 个 PC，实现最佳的控制效率和输出特性。980 nm 脉冲光在光路中的传输损耗约为 10 dB，其中包括 PC 和两个 WDM 的 4 dB 损耗以及 MoS_2 材料的吸收损耗 6 dB。980 nm 脉冲光的重复频率为 50 Hz，方波信号的占空比为 20%，脉宽为 4 ms。980 nm 脉冲光进 MoS_2–PVA 薄膜前的平均功率约为 160 mW。

基于 MoS_2–PVA 薄膜输出的调制脉冲信号的特征如图 3 所示，其中图 3(a)黑色信号为归一化的输出调制信号时域波形，棕色信号为输入的 980 nm 脉冲光，由于热光效应的带宽限制，输出的调制信号的上升沿和下降沿都变的比输入的 980 nm 信号要平缓。图 3(b)黑色信号是单个输出调制信号的放大图，按工程上计算信号功率的 10%~90%的上升时间的

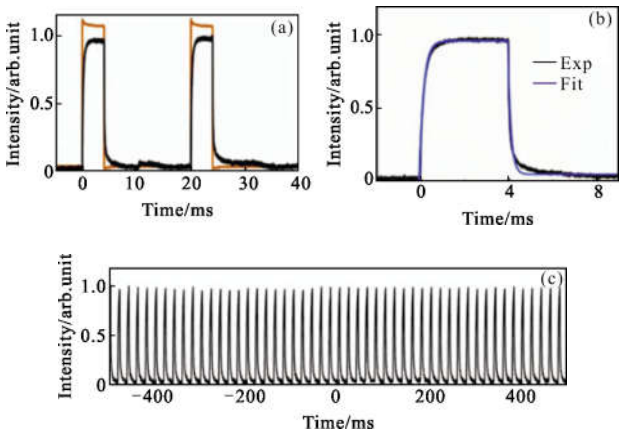

图 3 (a)脉冲的控制光(棕色)和输出信号光(黑色)；(b)关–开–关状态的信号光(黑色)输出的放大图，以及指数拟合(蓝色)；(c)长时间稳定脉冲输出序列

Fig.3 (a) Pulsed control light (brown) and output signal (black); (b) A zoomed view of a single off-on-off transition of the output pulse (black) and exponential fit (blue); (c) A long-term stable output pulse train.

方法得到上升沿时间为 526 μs。通过用指数衰减函数($1-\exp(-t/\tau_r)$)拟合上升沿，$\exp(-t/\tau_f)$拟合下降沿，得到的上升沿时间常数 τ_r=324.5 μs，下降沿时间常数 τ_f=353.1 μs，如图 3(b)蓝色曲线所示。输出调制信号的上升沿时间常数是由 MoS_2 吸收泵浦光产生热量从而使薄膜温度升高这一加热过程决定的，而下降沿时间常数仅仅与 MoS_2-PVA 薄膜的散热过程有关。此外，实验中还研究了输出信号的长期稳定性，如图 3(c)所示，得到了一串长期稳定的脉冲信号。这表明与之前的 MZI 结构[14]相比，采用偏振干涉的方法可以有效地降低环境扰动带来的干扰。

对一个全光调制器而言，开关时间是一个重要的参数。为验证输出的调制脉冲的上升沿时间是由输入脉冲光的加热过程导致的且下降沿时间仅与散热过程有关，实验中输入一组峰值功率相同但占空比不同的脉冲信号，相应得到的调制信号如图 4(a)所示。可以发现，输入占空比不同但峰值功率相同的一组脉冲信号时得到的输出调制信号有着相同的上升沿时间，即当泵浦脉冲的峰值功率相同时，其瞬间产生的热量是一样的。此外，还输入了一组峰值功率不同但平均功率相同的脉冲信号，输出如图 4 (b)所示。脉冲信号的占空比从 10%变到 50%，其相应的峰值功率与占空比成反比关系。图 4(c)和图 4(d)汇总了基于这两组测量结果拟合出的时间常数，从图中可以清晰地发现，当峰值功率相同时，如图 4(c)所示，输出信号的上升沿时间常数基本相同；当峰值功率不同时，如图 4(d)所示，有较低占空比(较高峰值功率)的泵浦脉冲产生的输出脉冲具有较快的上升时间。同时也可以发现输出调制脉冲的下降时间并不随着峰值功率的变化而变化，这也验证了前面所述的原理。

最后将 MoS_2-PVA 薄膜换成 WSe_2-PVA 薄膜，也得到了调制输出。输入的 980 nm 脉冲光重复频率为 500 Hz，方波信号的占空比为 50%。输出脉冲信号如图 5(a)所示，验证了 WSe_2-PVA 薄膜也可实现全光调制。图 5(b)黑色信号是单个输出调制信号的放大图，蓝色曲线是按前面相同的指数拟合得到的曲线。图 5(c)是得到的一串稳定的脉冲信号，验证了偏振干涉的高稳定性。

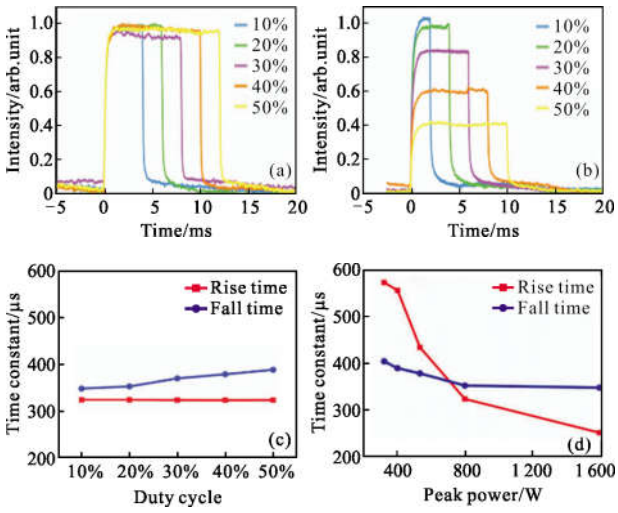

图 4 (a)相同峰值功率不同占空比，及(b)不同峰值功率相同脉冲能量时调制输出波形图；(c)相同峰值功率不同占空比，及(d)不同峰值功率相同脉冲能量时上升沿/下降沿时间常数图

Fig.4 Output signal pulses (a) when the pump pulses have same peak powers and different duty cycles, (b) when the pump pulses have same pulse energies and different peak powers; Time constant of rising edge/falling edge (c) when the pump pulses have same peak powers and different duty cycles, (d) when the pump pulses have same pulse energies and different peak powers

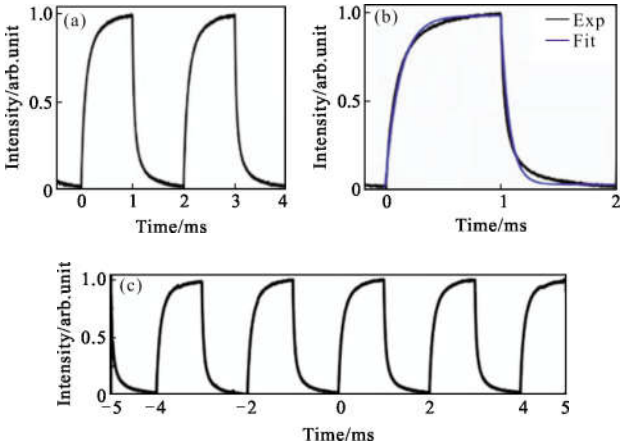

图 5 (a) WSe_2-PVA 薄膜的调制输出信号光；(b) 调制信号光(黑色)输出的放大图，以及指数拟合(蓝色)；(c) 稳定脉冲输出序列

Fig.5 (a) Output signal of WSe_2-PVA thin film; (b) A zoomed view of the output pulse (black) and exponential fit (blue); (c) Stable output pulse train

3 结 论

文中主要研究了基于 MoS_2/WSe_2-PVA 薄膜利用热光效应原理实现的全光调制器。采用偏振干涉的机制，实现全光调制。基于 MoS_2-PVA 薄膜输出调

制信号的上升沿时间为 526 μs，上升沿时间常数为 324 μs。与之前报道的 MZI 结构相比，该器件对环境扰动不敏感，因此能够得到一串长时间稳定输出的脉冲。此外，材料采用薄膜形式具有实现紧凑器件结构的可能性，方便将其应用于实际中。笔者的工作将有益于对二维材料 TMDs 在光子学应用方面的研究，使得二维材料 TMDs 在光逻辑、光传感、光路由等全光信号处理领域具有更广阔的应用前景。

参考文献：

[1] Bonaccorso F, Sun Z, Hasan T, et al. Graphene photonics and optoelectronics[J]. ***Nature Photonics***, 2010, 4: 611-622.

[2] Gong Shuang, Tian Jinrong, Li Kexuan, et al. Advances in new two-dimensional materials and its application in solid-state lasers[J]. ***Chinese Optics***, 2018, 11: 18-30. (in Chinese)
公爽, 田金荣, 李克轩, 等. 新型二维材料在固体激光器中的应用研究进展[J]. 中国光学, 2018, 11: 18-30.

[3] Feng Dejun, Huang Wenyu, Ji Pengyu, et al. Erbium-doped fiber ring cavity pulsed laser based on graphene saturable absorber [J]. ***Opt Precision Eng***, 2013, 21: 1097-1101. (in Chinese)
冯德军, 黄文育, 纪鹏宇, 等. 基于石墨烯可饱和吸收体的掺铒光纤环形腔脉冲激光器 [J]. 光学 精密工程, 2013, 21: 1097-1101.

[4] Li W, Chen B G, Meng C, et al. Ultrafast all-optical graphene modulator[J]. ***Nano Letters***, 2014, 14: 955-959.

[5] Zhou Feng, Jin Xiaofeng. All-fiber graphene electro-absorption modulator[J]. ***Opt Precision Eng***, 2016, 24: 2117-2125. (in Chinese)
周锋, 金晓峰. 全光纤结构的石墨烯电吸收调制器 [J]. 光学 精密工程, 2016, 24: 2117-2125.

[6] Gan X T, Zhao C Y, Wang Y D, et al. Graphene-assisted all-fiber phase shifter and switching [J]. ***Optica***, 2015, 2: 468-471.

[7] Bao Q, Zhang H, Wang B, et al. Broadband graphene polarizer[J]. ***Nature Photonics***, 2011, 5: 411.

[8] Liu W J, Pang L H, Han H N, et al. Tungsten disulphide for ultrashort pulse generation in all-fiber lasers [J]. ***Nanoscale***, 2017, 9: 5806-5811.

[9] Wu K, Zhang X Y, Wang J, et al. WS_2 as a saturable absorber for ultrafast photonic applications of mode-locked and Q-switched lasers[J]. ***Optics Express***, 2015, 23: 11453-11461.

[10] Chu Xueying, Sha Xue, Xu Mingze, et al. Applcation of Raman scattering properties of transition metal dichalcogenides in immunoassays [J]. ***Opt Precision Eng***, 2018, 26: 572-577. (in Chinese)
楚学影, 沙雪, 徐铭泽, 等. 过渡金属二硫化物拉曼散射在免疫检测中的应用[J]. 光学 精密工程, 2018, 26: 572-577.

[11] Yan P G, Lin R Y, Ruan S C, et al. A practical topological insulator saturable absorber for mode-locked fiber laser [J]. ***Scientific Reports***, 2015, 5: 5.

[12] Huang M Q, Wang M L, Chen C, et al. Broadband black-phosphorus photodetectors with high responsivity [J]. ***Advanced Materials***, 2016, 28: 3481-3485.

[13] Luo Z C, Liu M, Guo Z N, et al. Microfiber-based few-layer black phosphorus saturable absorber for ultra-fast fiber laser[J]. ***Optics Express***, 2015, 23: 20030-20039.

[14] Wu K, Guo C S, Wang H, et al. All-optical phase shifter and switch near 1 550 nm using tungsten disulfide (WS_2) deposited tapered fiber[J]. ***Optics Express***, 2017, 25: 17639-17649.

[15] Wu K, Chen B, Zhang X, et al. High-performance mode-locked and Q-switched fiber lasers based on novel 2D materials of topological insulators, transition metal dichalcogenides and black phosphorus: review and perspective (invited)[J]. ***Optics Communications***, 2018, 406: 214-229.