超高非线性二维材料复合光纤制造取得新进展

刘益春

东北师范大学物理学院, 长春 130024

New Progress in the Manufacture of Ultrahigh Nonlinear Two-Dimensional Material Hybrid Fiber

Yichun Liu

School of Physics, Northeast Normal University, Changchun 1300024, China.

Email: ycliu@nenu.edu.cn

Published online: December 17, 2020.

图1 二维材料复合光纤制备。(a)两步法化学气相沉积制备 MoS₂ 复合光纤示意图。(b) 50 μm 孔径石英管光纤中 MoS₂ 大单晶光学图像。(c) HF 刻蚀处理光纤后形成的坍塌 MoS₂ 管的莫尔条纹扫描电子显微镜图像。(d) 25 cm 长 MoS₂ 复合光纤样品 Raman 光谱数据统计。

非线性光纤在光通讯、光传感、光学频率转换、超快光纤激光器、光频梳及超连续激光等众多领域展现出重要应用前景¹⁻⁵。然而,目前绝大多数光纤器件都是基于传统的石英光纤,这些光纤仅具有微弱的三阶非线性效应以及接近于零的二阶非线性效应,严重限制了它在非线性光学领域的应用范围。目前,提高光纤非线性效应的方法主要分为两大类:(1)通过优化光纤结构设计,减小光

纤的有效纤芯面积,进而提高光纤非线性⁶⁻⁸。(2)通过对传统石英纤芯进行掺杂(如硫化物等)或者直接生长非石英纤芯(如硅、锗等)来提高光纤非线性效应⁹⁻¹¹。但这两种方法对提升光纤非线性效果有限,且不易规模化生产。因此,开发新型高非线性光纤势在必行。

近年来,二维材料由于其优异的光电特性、超高非线性系数和原子层厚度,迅速掀起了与光纤

图2 二维材料复合光纤的非线性应用。(a) MoS₂ 光纤产生二次谐波和三次谐波示意图。(b–c) MoS₂ 复合光纤产生的二次谐波(b)和三次谐波(c)与平面石英衬底上 MoS₂ 样品以及裸纤的比较。(d)使用 MoS₂ 光纤做饱和吸收体的全光纤锁模激光器结构示意图。(e)激光器输出光谱。(f)激光器输出脉冲的自相关曲线。

光学相结合的交叉学科领域的研究热潮。大量研究工作通过转移或涂覆方式将二维材料和光纤结合,实现光纤的功能化应用,例如四波混频和光电调制。但这种方法一般需要改变光纤结构(例如侧剖和拉锥光纤)来实现材料和倏逝波的耦合,往往会影响光纤的传输能力,产生额外的传输损耗,且不易高质量大规模制备。基于此,北京大学/北京石墨烯研究院刘忠范院士和刘开辉研究员、中国科学院物理研究所白雪冬研究员及其合作者在 *Nature Nanotechnology* 发表了题为“Optical fibres with embedded two-dimensional materials for ultrahigh nonlinearity”的文章¹²,报道了分米级超高非线性二维材料复合光纤的制备进展,利用该二维材料复合光纤实现了超高非线性信号的增强(2–3个量级),并且实现了真正的亚皮秒量级(~500 fs)全光纤锁模激光器,这些应用结果展示了二维材料复合光纤在非线性光学领域的优异性能和应用前景。

基于北京大学/北京石墨烯研究院前期在米级石墨烯光子晶体光纤的工作积累¹³,该研究团队利用两步化学气相沉积法在多种类型光纤孔内壁直接生长二维过渡金属硫族化合物(TMDs),实现了超高非线性二维材料复合光纤的制备(图1)。与石墨烯光纤制备不同,TMDs光纤制备更具挑战性:化学气相沉积生长TMDs过程,过渡金属前驱体多为固态(氧化钼、氧化钨等),其饱和蒸汽压较低,在光纤微结构中无法均匀传质。即使在低压情况

下,也无法保证前驱体在光纤微结构中的有效传输和均匀生长。鉴于此,该研究团队首次提出一种两步化学气相沉积的方法,通过低温预涂覆过渡金属前驱体Na₂MoO₄,并在高温硫化及生长,成功在光纤孔内壁上直接生长出单层MoS₂,并且实现了多种二维TMDs材料及其合金在不同种类规格光纤(空心石英管光纤和光子晶体光纤)中均匀全覆盖生长,长度最长可达25 cm。

TMDs与光纤中传输的光通过倏逝波进行耦合,光纤优异的光波导能力可以大大增加光与物质的相互作用长度,进而提高非线性效应。文章作者分别基于非线性系数的实部和虚部进行了相应的应用研究(图2)。(1)非线性实部:光频转换应用研究,二维材料复合光纤产生了超强的二次和三次谐波,实验结果发现MoS₂复合光纤的非线性信号比平面上MoS₂样品增强~300倍且损伤阈值提高3倍。这为未来设计新型基于光纤的非线性材料提供了一种新的设计思路,结合光纤结构设计的优化,这种新型复合光纤材料有望取代现在常用的非线性晶体,实现非线性光学材料领域重大突破。(2)非线性虚部:全光纤超快脉冲激光研究,利用MoS₂复合光纤作为饱和吸收器,实现了全光纤超快脉冲激光输出,其具有超短脉冲宽度~500 fs,高重复频率~41 MHz,输出功率~6 mW的优异性能。二维材料光纤为全光纤超快脉冲激光器提供了一种新的低成本、高性能且可重复制备的饱和吸收器材料,推进了全光纤锁模激光器的发展和低维

材料关键而重要的应用。

这一工作开创性地将高非线性二维材料与光纤复合, 不仅拓展了二维材料应用领域, 同时为光纤器件功能化研究提供了新思路, 对新型光电子器件相关领域具备示范和引领作用。该工作所展示的方法不仅可以实现二维TMDs材料与光纤有效集成及规模化制备, 同时为新型非线性材料的设计开辟了新领域, 对后续超连续光谱、高次谐波以及基于非线性效应的新型光纤通讯提供了材料支撑。可以预见, 随着未来二维材料生长工艺的不断改进, 同时结合光纤结构设计等, 可以满足各种类型的非线性光学和光纤光学研究需求, 推动二维材料复合光纤在光电、非线性光学等领域的批量制备和功能化应用。

References

- (1) Cotter, D.; Manning, R.; Blow, K.; Ellis, A.; Kelly, A.; Nesses, D.; Phillips, I.; Poustie, A.; Rogers, D. *Science* **1999**, 286, 1523. doi: 10.1126/science.286.5444.1523
- (2) Agrawal, G. P. *J. Opt. Soc. Am. B* **2011**, 28, A1. doi: 10.1364/JOSAB.28.0000A1
- (3) Granzow, N.; Stark, S. P.; Schmidt, M. A.; Tverjanovich, A.; Wondraczek, L.; Russell, P. S. J. *Opt. Express* **2011**, 19, 21003. doi: 10.1364/OE.19.021003
- (4) Markos, C.; Travers, J. C.; Abdolvand, A.; Eggleton, B. J.; Bang, O. *Rev. Mod. Phys.* **2017**, 89, 045003. doi: 10.1103/RevModPhys.89.045003
- (5) Mollenauer, L. F. *Science* **2003**, 302, 996. doi: 10.1126/science.1091168
- (6) Skryabin, D.; Luan, F.; Knight, J.; Russell, P. S. J. *Science* **2003**, 301, 1705. doi: 10.1126/science.1088516
- (7) Dudley, J. M.; Genty, G.; Coen, S. *Rev. Mod. Phys.* **2006**, 78, 1135. doi: 10.1103/RevModPhys.78.1135
- (8) Dudley, J. M.; Taylor, J. R. *Nat. Photon.* **2009**, 3, 85. doi: 10.1038/nphoton.2008.285
- (9) Sazio, P. J.; Amezcua-Correa, A.; Finlayson, C. E.; Hayes, J. R.; Scheidemantel, T. J.; Baril, N. F.; Jackson, B. R.; Won, D.-J.; Zhang, F.; Margine, E. R.; *et al.* *Science* **2006**, 311, 1583. doi: 10.1126/science.1124281
- (10) Abouraddy, A.; Bayindir, M.; Benoit, G.; Hart, S.; Kuriki, K.; Orf, N.; Shapira, O.; Sorin, F.; Temelkuran, B.; Fink, Y. *Nat. Mater.* **2007**, 6, 336. doi: 10.1038/nmat1889
- (11) Eggleton, B. J.; Luther-Davies, B.; Richardson, K. *Nat. Photon.* **2011**, 5, 141. doi: 10.1038/nphoton.2011.309
- (12) Zuo, Y.; Yu, W.; Liu, C.; Cheng, X.; Qiao, R.; Liang, J.; Zhou, X.; Wang, J.; Wu, M.; Zhao, Y.; *et al.* *Nat. Nanotechnol.* **2020**, 15, 987. doi: 10.1038/s41565-020-0770-x
- (13) Chen, K.; Zhou, X.; Cheng, X.; Qiao, R.; Cheng, Y.; Liu, C.; Xie, Y.; Yu, W.; Yao, F.; Sun, Z.; *et al.* *Nat. Photon.* **2019**, 13, 754. doi: 10.1038/s41566-019-0492-5