

石墨烯在光纤激光器中的应用

王凯乐 温增润 黄科汛 陆宝乐 白晋涛

(西北大学光子学与光子技术研究所 710069)

1. 引言

石墨烯是一种由单层碳原子与其相邻原子通过 sp^2 杂化方式紧密堆积成的二维蜂窝状晶格结构的新型碳质材料,已被证实可以应用于近红外及中红外波段的可饱和吸收体材料。目前该材料在光纤激光器中应用广泛,2004年,诺沃肖罗夫(K. Novoselov)等人首次采用机械剥离制备出具有单层结构的二维石墨稀材料,由于其优越的高比表面积、超高载流子迁移率、机械性能好等物理化学特性,已在光电子器件、光学复合材料、传感器等众多领域得到广泛的应用。2009年,石墨烯材料因其制作成本低、恢复时间短、宽带吸收特性及支持高功率等优点开始被研究用做可饱和吸收体。2013年,王(Q. Wang)等人利用石墨烯实现2.1 ps的 $2\ \mu\text{m}$ 锁模激光运转。2015年,邓(J. Deng)等人在单频光纤激光器中利用石墨烯作为可饱和吸收体实现了稳定的单频激光输出。

2. 石墨烯在锁模光纤激光器中的应用

2.1 石墨烯可饱和吸收体的制备

化学气相沉积(CVD)法是石墨烯可饱和吸收体的一种制备方法。将低溶碳量的铜箔作为衬底和催化剂, C_2H_2 气体提供形成石墨烯的碳原子, H_2 为载气,再通入Ar作为辅助气体,在 $1000\ \text{C}$ 的高温 and 铜的催化条件下, C_2H_2 气体裂解生成的碳原子吸附于铜箔表面,逐渐成核排列为岛状,随着反应的持续进

行,更多裂解的岛状石墨烯的边缘吸附生长,最后在 $25\ \mu\text{m}$ 厚的Cu箔上所有的岛状单元扩展合成联系的石墨烯薄膜。生长在铜箔上的石墨烯薄膜根据需要转移到不同的基底上。实验中我们将石墨烯薄膜直接转移到镀有 $1064\ \text{nm}$ 高反膜的平面镜上。具体过程如下:将生长石墨烯的Cu箔浸入预先配置的 $0.05\ \text{g ml}^{-1}\ \text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 溶液中,铜与 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 发生反应生成可溶性的 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$,化学性质稳定的石墨烯则完整的悬浮于溶液中;此时,为了稀释和去除石墨烯表面的蚀刻剂和残留物,用去离子水冲洗石墨烯表面数次,然后,将干净的石墨烯膜转移到高反射镜上,制成石墨烯可饱和吸收镜,最后,在 $45\ \text{C}$ 下干燥半小时。由CVD法生产的石墨烯具有较少的缺陷和较大的面积,因此可以直接用作SA。图1(a)为石墨烯的拉曼光谱,三个明显的特征峰分别位于 $1370\ \text{cm}^{-1}$ 处的D峰, $1578\ \text{cm}^{-1}$ 处的G峰和 $2700\ \text{cm}^{-1}$ 处的2D峰。位于 $1370\ \text{cm}^{-1}$ 处的D带峰值表明石墨烯薄膜中的缺陷很少,此外,IG / I2D的相对强度比约为3,推断为多层石墨烯。结合石墨烯的典型透射光谱(Lambda 950, PerkinElmer)(如图1(b)所示),层数应为4或5。从图中可以看出,石墨烯在 $1064\ \text{nm}$ 附近的透射率约为90%,同时,吸收率约为10%。

2.2 石墨烯可饱和吸收体的锁模光纤激光器

实验原理图和装置图如图2和3所示,采用 $400\ \text{mW}$ 的 $976\ \text{nm}$ 半导体激光器作为泵浦源,泵浦光经由 $976/1064\ \text{nm}$ 波分复用器(WDM)注入谐振腔内,

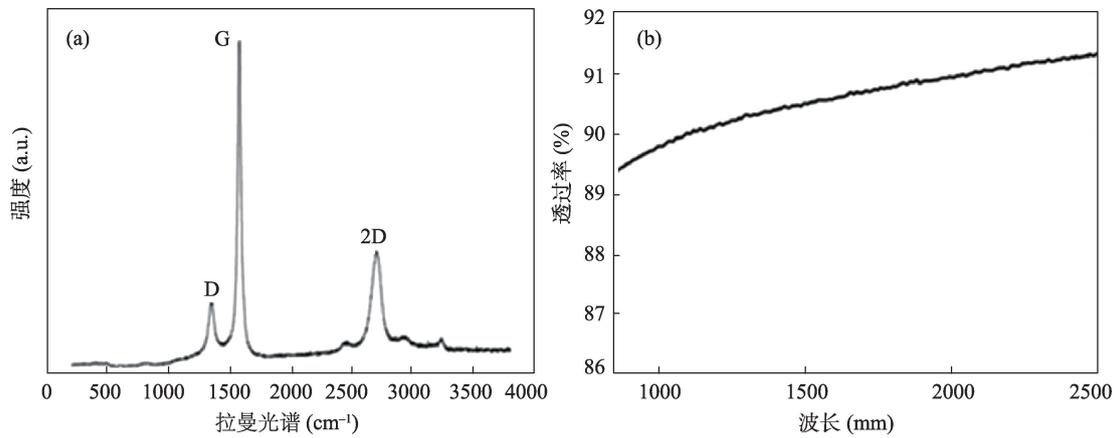


图1 (a) 石墨烯的拉曼光谱;(b) 石墨烯的典型透射谱

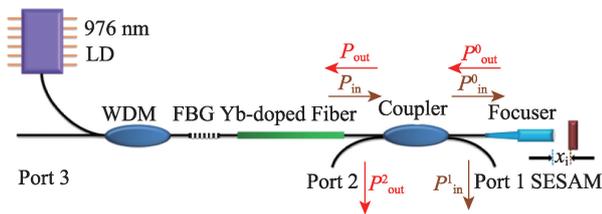


图2 基于石墨烯可饱和吸收镜的调Q光纤激光器实验原理图

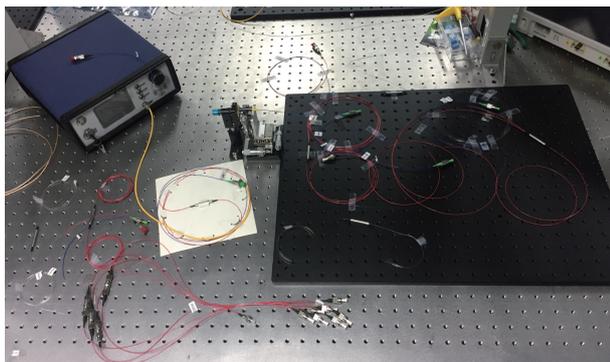


图3 基于石墨烯可饱和吸收镜的调Q光纤激光器实验装置图

线性谐振腔由布拉格光栅(HR > 98.2% @ 1064 nm, 3 dB 谱宽 0.66 nm)和石墨烯可饱和吸收镜组成,腔内增益介质为单模掺镱光纤(YDF, Coractive Yb 501), 30/70 光纤耦合器的两端分别作为脉冲激光的输出端(70%)和输出激光特性监测端(30%),光纤耦合器的一端连接聚焦器,聚焦器的最佳光斑和工作距离分别为 7 μm 和 2.2 mm,聚焦器将传输光汇聚到石墨烯可饱和吸收镜面上,通过调节聚焦器与石墨烯可饱和吸收镜的距离控制传输到可饱和吸收镜面上的激光能量实现调Q脉冲激光的输出,采用带宽为

2.5 GHz (Tektronix DPO7254C)的实时示波器连接 5 GHz 的光电探测头(Thorlabs SIR5)对输出激光的脉冲序列进行实时监测,采用光谱带宽为 2.5 GHz 的光谱分析仪(Tektronix DPO7254C)对输出激光的光谱实时监测。

随着泵浦功率的不断增长,谐振腔开始振荡,激光器阈值为 40 mW,当泵浦功率增加到 56 mW 时,谐振腔内出现自启动调Q脉冲激光,泵浦功率从 60 mW 至 200 mW 均获得稳定的调Q脉冲输出,当泵浦功率超过 200 mW 的时候,调Q脉冲激光瞬间消失变为连续激光输出,但是我们将泵浦功率降到 200 mW 以下后,又恢复为稳定的调Q脉冲激光输出,由此可见,出现该现象的原因是石墨烯可饱和吸收镜的过饱和而不是谐振腔的热效应引起的。

在 100 mW 的泵浦功率下,进一步测试了调Q脉冲激光的脉冲输出序列,从图中我们可以得到对称均匀的高斯形状的脉冲信号,调Q脉冲间隔为 14.9 μs ,重复频率为 66 kHz(如图 4(a)所示);同时我们调Q输出激光的重复频率和脉冲宽度随着泵浦功率的变化关系;随着泵浦功率的增加调Q脉冲激光的重复频率从 52 kHz 到 134 kHz 不断增加,脉冲宽度从 3.32 μs 到 1.56 μs 不断减小(如图 4(b)所示)。我们也测试了该激光器的频谱图和光谱图(如图 5 所示),从图中我们可看出,在脉冲频率为 66 kHz 时,输出激光的信噪比大于 40 dB,表明调Q激光输出处于稳定的区域,同时图 5(a)中我们看到,从 10 kHz

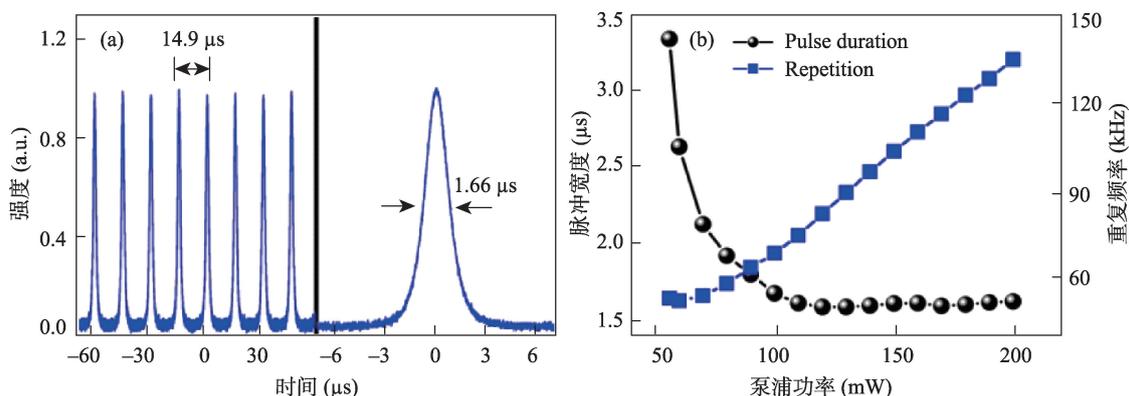


图4 (a) 调Q脉冲激光序列及单脉冲激光; (b) 输出激光重复频率和脉冲宽度随泵浦功率的变化曲线

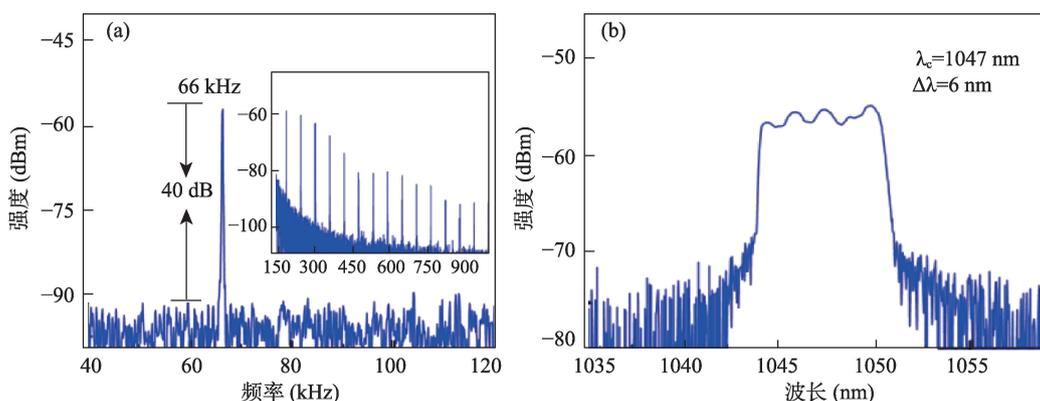


图5 (a) 调Q脉冲激光的重复频率; (b) 输出激光光谱图

到 1 MHz 范围内,基频输出中没有其他频率的激光输出;图 5(b)为脉冲激光输出光谱图。

3. 石墨烯在单频光纤激光器中的应用

机械剥离法是石墨烯可饱和吸收体制备方法中简单、高效、环保的一种方法,我们采用胶带从石墨烯块(纯度大于 99.99%)不断重复剥离石墨烯,然后将 PDMS 膜压在胶带上,通过 PDMS 薄膜将石墨烯转移到 FC/PC 光纤跳线头上。

图 6 和图 7 是单频光纤激光器的实验原理图和装置图,我们采用 980 nm 激光器作为泵浦源,通过 1×2 的 980 / 1060 nm 波分复用器(WDM)将泵浦光注入谐振腔内,谐振腔由布拉格光栅(FBG)和光纤环形镜(LMF)组成,掺镱光纤(INO Yb 501,其模场直径为 6μm,镱离子浓度为 21000ppm)作为增益介质,谐振腔内采用的两个偏振控制器分别用来抑制

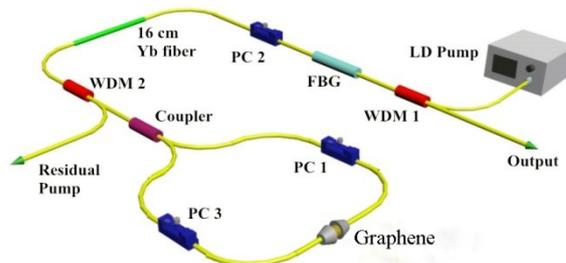


图6 基于石墨烯可饱和吸收体的单频光纤激光器原理图

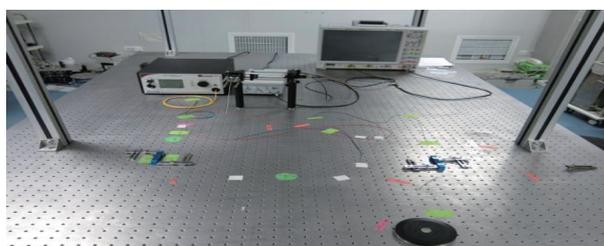


图7 基于石墨烯可饱和吸收体的单频光纤激光器装置图

谐振腔内的空间烧孔效应引起的多模振荡和在环形镜内窄带滤波,3 dB耦合器组成的光纤环形镜形

成一个动态布拉格光栅,在谐振腔内起到一个滤波和反射镜的作用,石墨烯薄膜被插入两个FC/PC光纤连接器之间形成石墨烯可饱和吸收体,石墨烯可饱和吸收体在光纤环形镜内抑制其他模式产生和保证单纵模式振荡。采用带宽为2.5 GHz (Tektronix DPO7254C)的实时示波器连接5 GHz的光电探测头(Thorlabs SIR5)对输出激光的单频信号进行实时监测,采用光谱带宽为2.5 GHz的光谱分析仪(Tektronix DPO7254C)对输出激光的光谱进行测试。

首先我们将泵浦功率增加到适当功率时,从示波器上观察到多纵模激光开始振荡(图8(a)),调整PC1,纵模的数量明显减少,但是单频激光仍然没有出现。此时,石墨烯可饱和吸收体在光纤环形镜内并没有起到可饱和吸收体的作用,继续增加泵浦功率,随着泵浦功率的增加,光纤环形镜内石墨烯可饱和吸收体开始工作,环形镜形成一个动态光栅,通过调节偏振控制器PC2来改变环形镜动态光栅的反射率逐渐起到滤波作用,当泵浦功率增加到

130 mW时,单纵模现象出现(如图8(b)所示)。得到稳定的单频激光输出后,我们对输出单频激光的光谱(图9)和信噪比(如图10所示)分别进行了测试。

4. 结束语

石墨烯属于零带隙单层结构的二维材料,线性吸收从可见光到近中红外区域延伸,并且展现出很小的波长依赖性,已被证实可以应用于不同激光器的光谱范围较宽的可饱和吸收体,由于其优越的高比表面积、超高载流子迁移率、机械性能好等物理化学特性,已在光电子器件、光学复合材料、传感器等众多领域得到广泛的应用。但是制备出商业应用的大面积、高质量、层数可控石墨烯可饱和吸收体材料还需在调制深度、调制带宽、饱和强度等技术方面需要很大的提升。因此,在石墨烯可饱和吸收体器件的应用上,我们希望科研人员在技术和性能方面有待突破解决目前所面临的问题。

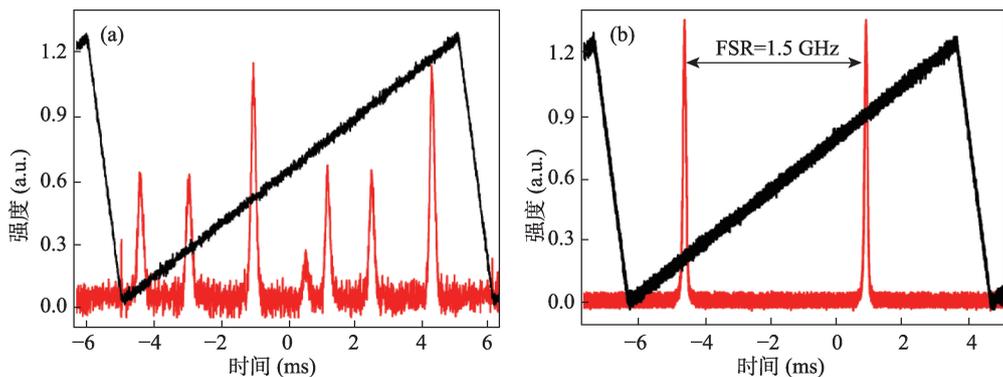


图8 (a) 多纵模激光输出;(b) 单频激光输出

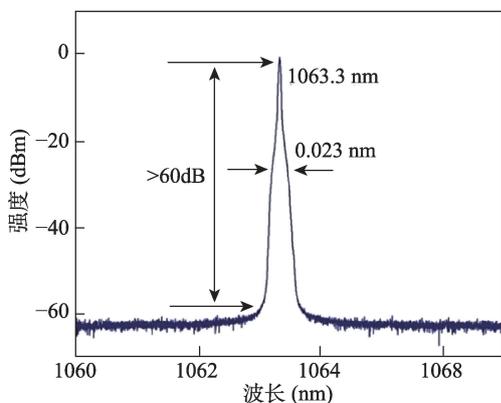


图9 1064 nm单频激光光谱图

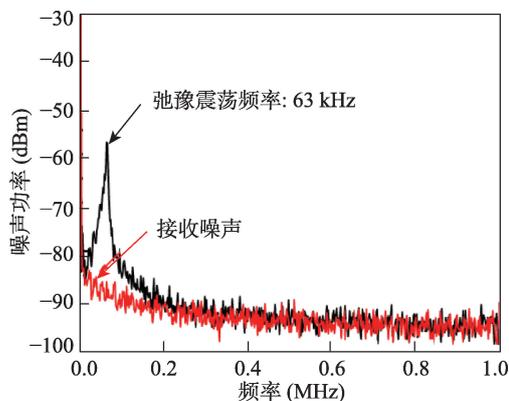


图10 1064 nm单频激光频谱图