物理学报 Acta Physica Sinica
Chinese Physical Society
Institute of Physics, CAS

基于飞秒激光抽运的石墨烯包裹微光纤波导结构的级联四波混频研究

冯秋燕 姚佰承 周金浩 夏汉定 范孟秋 张黎 吴宇 饶云江

Four-wave-mixing generated by femto-second laser pumping based on graphene coated microfiber structure

Feng Qiu-Yan Yao Bai-Cheng Zhou Jin-Hao Xia Han-Ding Fan Meng-Qiu Zhang Li Wu Yu Rao Yun-Jiang

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 64, 184214 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.184214
在线阅读 View online: http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184214
当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I18

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

一种高双折射高非线性多零色散波长光子晶体光纤
Photonic crystal fibers with high nonlinearity large birefringence and multiple zero dispersion-wavelength
物理学报.2014, 63(13): 134210 http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.134210

中红外色散平坦硫系光子晶体光纤设计及性能研究
Design and performance of mid-IR dispersion in photonic crystal fiber prepared from a flattened chalcogenide glass
物理学报.2014, 63(1): 014210 http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.014210

新型超宽带双芯光子晶体光纤偏振分束器的研究
Novel ultra-broadband polarization beam splitter based on dual-core photonic crystal fiber
物理学报.2013, 62(24): 244202 http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.244202

新型三角芯抗弯曲大模场面积光子晶体光纤
Novel bend-resistant large-mode-area photonic crystal fiber with a triangular-core
物理学报.2013, 62(18): 184215 http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.184215

微纳光纤布拉格光栅折射率传感特性研究
Investigation on the characteristics of micro/nanofiber Bragg grating for refractive index sensing
物理学报.2013, 62(10): 104218 http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.104218

基于飞秒激光抽运的石墨烯包裹微光纤波导结构的级联四波混频研究*

冯秋燕[1)] 姚佰承[1)] 周金浩[2)] 夏汉定[3)] 范孟秋[1)] 张黎[1)]
吴宇[1)†] 饶云江[1)]

1) (电子科技大学通信与信息工程学院, 光纤传感与通信教育部重点实验室, 成都 611731)

2) (电子科技大学微电子与固体电子学院, 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 成都 610054)

3) (电子科技大学光电信息学院, 成都 610054)

(2015 年 3 月 19 日收到; 2015 年 4 月 17 日收到修改稿)

基于石墨烯的光学非线性特性和器件研究正在成为新一代微纳光子器件的一个重要方向. 采用峰值功率为kW量级的飞秒脉冲抽运和P型掺杂石墨烯薄膜包裹的微光纤所构成的复合波导结构, 在1550 nm波段成功激发并观察到级联四波混频现象. 实验结果表明, 这种P型掺杂石墨烯包裹的微光纤复合波导具有非线性系数高、结构紧凑, 可承受高功率和超快响应的特点, 对基于该结构的级联四波混频特性的研究在基于超快光学的多波长光源、光参量放大以及全光再生等领域具有参考价值和应用意义.

关键词: 石墨烯, 微光纤, 三阶非线性, 级联四波混频

PACS: 42.81.Qb, 42.65.Wi, 78.67.Wj, 42.65.Re **DOI:** 10.7498/aps.64.184214

1 引 言

石墨烯是一种由碳原子构成的二维平面结构, 厚度仅为0.4 nm, 具有独特的光子学和电子学特性, 自其诞生以来受到了国内外的广泛关注[1−3]. 例如, 其具有独特的能带结构, 费米能级具有可调谐特性, 同时还具有可饱和光子吸收效应和介电常数可变特性[4,5]. 近年来, 国内外已报道了一系列基于石墨烯的全新光子学器件, 如光电探测器、光热转换器、超快激光器和超敏传感器等[6−9]. 另外, 石墨烯作为一种超薄的柔性材料, 其非常易于和硅基波导和光纤等载体相结合, 这极大地拓展了石墨烯的应用范围, 使基于石墨烯的复合波导器件的实现成为可能[10].

四波混频(four-wave-mixing, FWM), 尤其是级联四波混频在光学领域有着广泛的应用, 如多波长激光、参量放大、色散补偿、超连续谱和全光再生等[11,12]. 2010 年以来, 研究发现石墨烯在极宽的光谱范围内具有独特的超高非线性系数, 是一种理想的光学非线性材料, 非常适用于微纳尺度的光学非线性结构四波混频的激发和器件[13,14]. 通过有效的相位匹配, 已经在石墨烯/硅平面波导和石墨烯/微光纤复合波导结构中相继观察到四波混频现象[15,16]. 尽管如此, 受限于石墨烯材料的衰减特性、复合波导的有效长度和抽运光源的峰值功率, 基于石墨烯的四波混频激发和检测依旧是一个具有挑战性的课题.

本文通过将石墨烯进行深度P型掺杂并将其包裹在微米直径的微光纤上, 形成约5 mm长的石墨烯/微光纤复合波导. 相比于普通的石墨烯材料, P型掺杂的石墨烯波导具有更小的传输损耗, 更有利于在低功率下激发三阶非线性效应. 在此基础上, 使用kW级高峰值功率的飞秒锁模脉冲激光器作为抽运, 我们成功观察到在超快抽运激发下, 基

* 国家自然科学基金 (批准号: 61475032) 和国家自然科学基金重大项目 (批准号: 61290312) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wuyuzju@163.com

© 2015 中国物理学会 Chinese Physical Society

于石墨烯-微光纤复合波导的级联四波混频. 本文研究和揭示了该石墨烯-微光纤复合波导的有效折射率分布和非线性系数, 并通过实验研究其级联四波混频特性. 实验结果表明, 通过飞秒抽运激发, 在石墨烯-微光纤复合波导中产生了级联四波混频效应, 在几纳米的波长失配条件下, 最多获得了2阶斯托克斯光和2阶反斯托克斯光, 其转换效率接近 −60 dB.

2 石墨烯-微光纤复合波导及其高非线性特性

本研究所采用的石墨烯-微光纤复合波导结构如图1所示, 图1(a)和图1(b)分别展示了该结构的3D图和横截面图. 首先, 将普通单模光纤通过熔融拉锥方法制备成直径为微米级的微光纤[17]; 然后, 将P型掺杂的石墨烯薄膜包裹在该微光纤侧面. 当光信号通过该石墨烯-微光纤复合波导时, 与石墨烯材料作用, 利用石墨烯材料的高非线性特性, 当相位匹配条件满足时, 四波混频现象可被激发和观测到.

当光信号沿图1所示的石墨烯/微光纤复合波导传播时, 将以倏逝波形式与石墨烯充分相互作用. 受石墨烯材料的折射率调制作用, 微光纤的倏逝场被显著增强, 更多的倏场波能量在空间上集中到石墨烯薄膜表面[18,19]. 利用有限元方法(FEM)和COMSOL 软件, 图2仿真了在不同直径下, 普通二氧化硅微光纤和石墨烯/微光纤复合波导

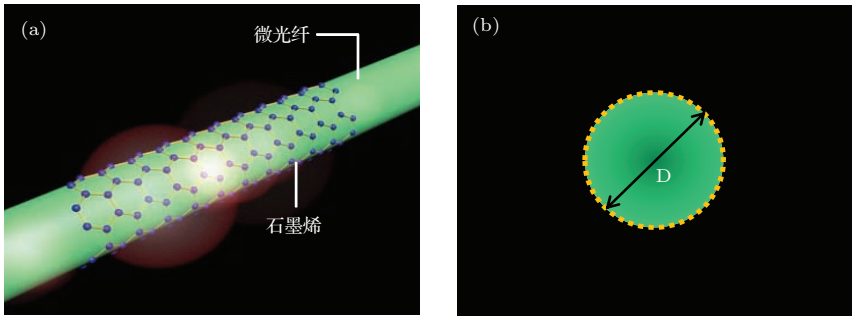

图1 (网刊彩色) 石墨烯-微光纤复合波导示意图 (a) 立体图; (b) 横截面图

Fig. 1. (color online) (a) The schematic diagram of the graphene coated microfiber(GCM); (b) the cross-section.

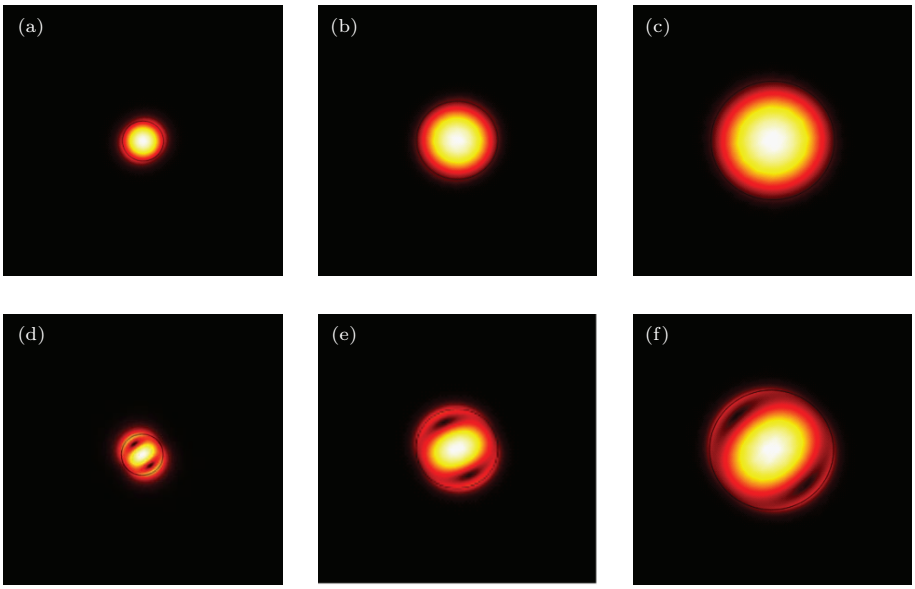

图2 (网刊彩色) 仿真的基模电场强度分布 (a) 微光纤直径2 μm; (b) 微光纤直径5 μm; (c) 微光纤直径10 μm; (d) 石墨烯/微光纤复合波导直径2 μm; (e) 石墨烯/微光纤复合波导直径5 μm; (f) 石墨烯/微光纤复合波导直径10 μm

Fig. 2. (color online) Distribution of HE_{11} mode field: (a) The microfiber with diameter of 2 μm; (b) the microfiber with diameter of 5 μm; (c) the microfiber with diameter of 10 μm; (d) the GCM with diameter of 2 μm; (e) the GCM with diameter of 5 μm; (f) the GCM with diameter of 10 μm.

中1550 nm波段(193 THz)基模电场强度的空间分布. 其中, 图2(a), 图2(b) 和图2(c) 分别给出了直径为2.0, 5.0和10.0 μm的普通二氧化硅微光纤的模场分布; 图2(d), 图2(e)和图2(f)分别给出了直径为2.0, 5.0和10.0 μm 的石墨烯/微光纤复合波导的模场分布. 在仿真中, 石墨烯厚度设置为0.5 nm, 二氧化硅微光纤、P 型掺杂石墨烯和空气包层的折射率分布设置为1.45, 3-i4和1, 仿真中石墨烯的光学等效折射率由石墨烯的电导率决定[20]. 仿真结果证明了石墨烯作为一种具有高折射率的非线性材料, 对导行光倏逝场能量具有调制和吸引作用, 可以有效增强光能量在微光纤波导表面的分布.

相应地, 如图3(a)所示, 在1550 nm波段, 给出了不同尺寸的微光纤和石墨烯/微光纤复合波导的基模(HE_{11})有效折射率, 当半径为1.0 μm时, 微光纤的有效折射率为1.393, 而石墨烯/微光纤复合波导的有效折射率为1.328; 当半径为2.5 μm时, 微光纤的有效折射率为1.445, 而石墨烯/微光纤复合波导的有效折射率为1.442. 随着半径的增加, 石墨烯对微光纤有效折射率的影响随之变小, 这是由于倏逝场分量随微光纤尺寸增加而减小决定的. 当采用半径约5.0 μm的石墨烯/微光纤复合波导作为非线性元件时, 根据图2所示的仿真结果, 可以近似认为在该尺度下石墨烯/微光纤复合波导的有效模场面积和普通微光纤基本相等. 对非线性器件而言, 其非线性系数可定义为[21]

$$\gamma = n_2\omega/(cA_{\rm eff}), \tag{1}$$

其中, n_2为非线性折射率, ω为光频率, c为真空中的光速, $A_{\rm eff}$为有效模场面积. 石墨烯/微光纤复合波导. 相比于普通微光纤, 非线性效应之比可以近似地表示为

$$N_{\rm GCM}/N_{\rm MF} = \frac{\gamma_{\rm gcm}L_{\rm gcm}}{\gamma_{\rm mf}L_{\rm mf}}, \tag{2}$$

其中, $N_{\rm GCM}/N_{\rm MF}$为综合考虑石墨烯/微光纤复合波导与普通微光纤的非线性效应比, $L_{\rm gcm}$和$L_{\rm mf}$分别为石墨烯/微光纤复合波导和普通微光纤的有效长度. 根据已有报道[13,22]论证, 石墨烯的三阶非线性系数大于普通二氧化硅材料的10^5倍, 且微光纤结构以其极小的横截面积, 本身也具有很高的光学非线性特性, 将石墨烯和微光纤结合起来, 还可以实现相互补偿色散, 进而更容易满足相位匹配条件, 产生四波混频现象.

如图3(b)所示, $N_{\rm GCM}/N_{\rm MF}$与微光纤的半径紧密相关, 当微光纤半径选取为约2.5 μm时, 石墨烯/微光纤复合波导具有相对最优化的非线性特性, 最易于四波混频的激发. 另外, 作为具有一定长度的非线性器件, 四波混频的有效激发与波导的损耗相关, 因此考虑石墨烯/微光纤复合波导本身的衰减也十分重要. 在0 dBm宽带光源的激励下, 图3(b)给出了实际测得的总长度都为3 cm的微光纤以及石墨烯/微光纤复合波导的强度谱, 其中, 石墨烯/微光纤复合波导上石墨烯的包裹长度$L_{\rm G}$为5 mm. 可见在1550 nm波段, 该石墨烯包裹微光纤构成的复合波导插入损耗约12 dB, 相比之下同直径的普通微光纤插入损耗约为3.5 dB.

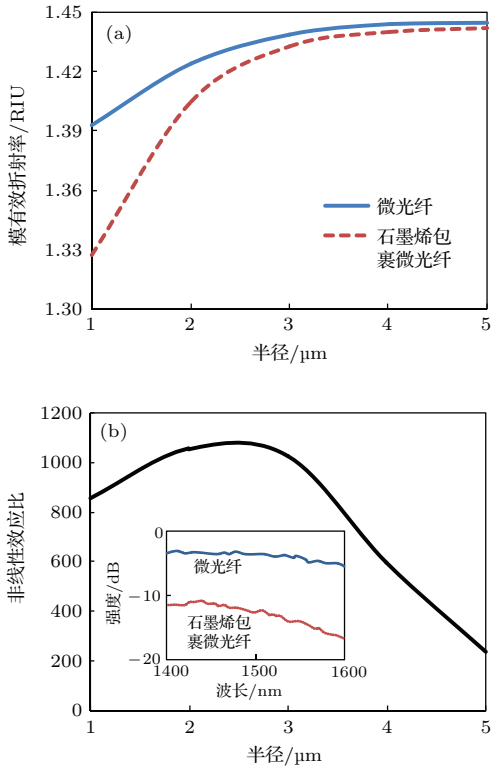

图3 (a)基模有效折射率分布; (b) $N_{\rm GCM}/N_{\rm MF}$, 插图为微光纤和石墨烯/微光纤复合波导各自的插入损耗谱

Fig. 3. (a) The effective refractive index of the HE_{11} mode; (b) $N_{\rm GCM}/N_{\rm MF}$, the inset is the insertion losses of the microfiber and the GCM.

3 器件制备与表征

实验中, 所采用的石墨烯-微光纤复合结构的制备过程如图4(a)所示. 一方面, 首先制备P 型掺杂的石墨烯薄膜. 通过化学气相沉积方法, 在1000 °C高温下将甲烷气体中的碳原子沉积在一层厚度为20 μm的铜箔表面, 形成一层严格单层的石墨烯; 然后, 在石墨烯/铜结构上覆盖一层厚度约为1 μm的柔性聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)薄

膜, 构成PMMA/ 石墨烯/铜三层结构; 再利用氯化铁溶液湿法去除铜层, 并在此过程中将石墨烯P掺杂, 以构成PMMA/P 掺杂石墨烯混合薄膜. 另一方面, 将普通微光纤通过熔融拉锥方法, 制备成直径约5 μm, 长度约3 cm, 高度均匀、表面光滑的微光纤. 将PMMA/P掺杂石墨烯混合薄膜包裹在微光纤上, 最后利用丙酮蒸汽除去PMMA, 就实现了P掺杂的石墨烯/微光纤复合波导的制备. 图4 (b) 给出了该石墨烯/微光纤复合波导的显微镜照片, 石墨烯覆盖在微光纤的左边区域, 当注入633 nm的红光时, 在石墨烯覆盖的区域观察到更强的散射, 这是由石墨烯的倏逝场增强效应引起的. 图4 (c) 展示了该石墨烯的拉曼光谱图, 较低的D峰、极窄的G峰和$2D$ 峰证明了在微光纤上包裹的石墨烯具有很高的质量. 图4 (c) 的插图为所制备的石墨烯/微光纤复合波导的扫描电子显微镜照片, 可见石墨烯包裹区域相比于纯石英区域较暗.

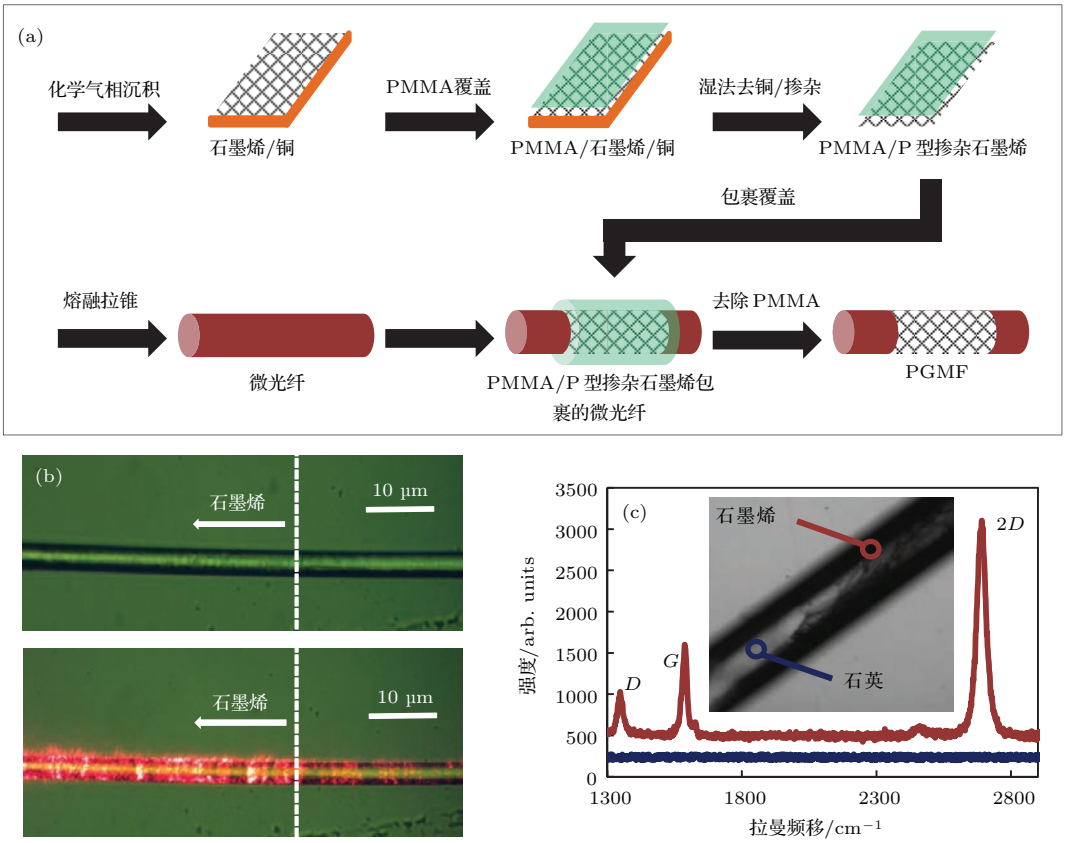

图4 (网刊彩色) 制备和表征 (a) P掺杂石墨烯/微光纤复合波导制备过程; (b) 显微镜照片; (c) 拉曼光谱和扫描电子显微镜照片

Fig. 4. (color online) The fabricationof GCM: (a) The fabrication process of the P-doped GCM; (b) themicroscopepictures; (c) the test result of Raman spectrum and SEM.

4 四波混频实验

采用石墨烯/微光纤复合波导进行四波混频研究的实验系统示意图见图5. 我们采用了功率可调的飞秒光纤激光器作为抽运光, 波长为1562 nm, 脉冲宽度为650 fs, 重复频率为38 MHz, 占空比为40 K. 最大输出平均功率可达15 dBm, 峰值功率约1.26 kW. 同时, 采用了连续可调的窄线宽激光器用作信号光, 平均输出功率为8.7 dBm, 可调波长范围为1540—1560 nm. 信号光和抽运光通过一个1 : 9耦合器合束, 然后将抽运光和信号光一起注入石墨烯/微光纤复合波导中, 以激发四波混频现象, 激发出的斯托克斯光和反斯托克斯光最终被光谱仪 (OSA, ANDO-6173Q, JPN) 接收和观察. 该实验系统中, 两个偏振器分别用于保证抽运和信号光的偏振态一致; 同时考虑在抽运激励下, 光纤中的峰值能量密度已经超过GW/cm^{2}量级, 隔离器和衰减器分别用于保护激光器和光谱仪. 本实验中, 光谱仪对光功率的最低检测极限为−60 dBm, 频域上的分辨率为0.01 nm.

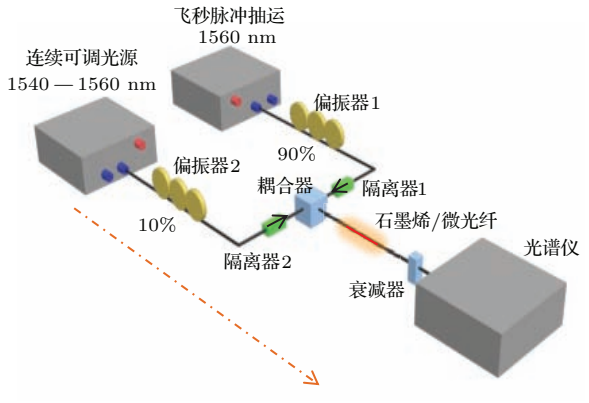

图5 (网刊彩色) 实验系统图

Fig. 5. (color online) The schematic of experimental system.

实验结果如图6所示. 图6(a)是当信号光和抽运光波长失配为12.7 nm时(信号光波长固定在1549.3 nm), 不同抽运功率下的级联四波混频光谱. 当抽运光平均功率为2.1 dBm (峰值功率~64.8 W)时, 没有四波混频现象产生. 随着抽运功率增加, 其与信号光之间的相位失配逐渐减小, 当抽运功率达到6.5 dBm(峰值功率~178.7 W)时, 位于1574.7 nm和1536.6 nm波长处的一阶斯托克斯线和一阶反斯托克斯线开始出现. 当抽运功率增加到14.1 dBm (峰值功率1.03 kW) 时, 光谱上同时可以观察到级联的斯托克斯光(SSB)和反斯托克斯光(ASSB), 此时级联四波混频现象发生.

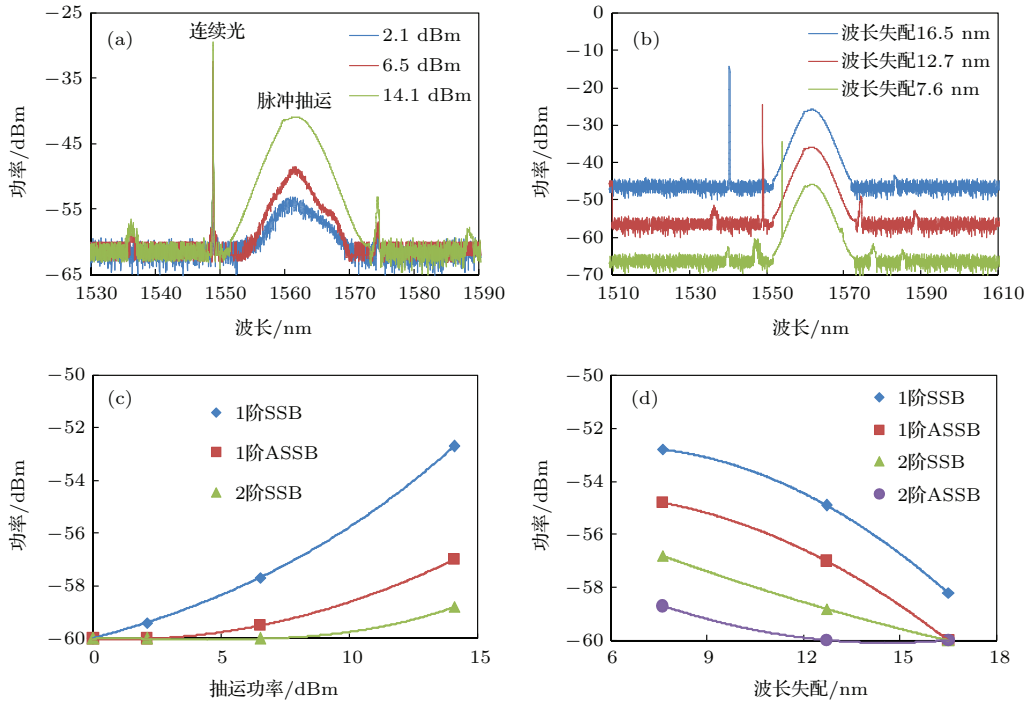

图6 (网刊彩色) 实验结果 (a) 波长失配为12.7 nm时, 抽运平均功率分别为2.1, 6.5和14.1 dBm的四波混频光谱; (b) 抽运平均功率固定为14.1 dBm时, 波长失配分别为7.6, 12.7和16.5 nm所产生的级联四波混频; (c) 新生成的斯托克斯光功率和抽运功率的关系; (d) 新生成的斯托克斯光功率和波长失配的关系

Fig. 6. (color online) Experimental results: (a) Spectra of the FWM under pump power of 2.1, 6.5 and 14.1 dBm with the detuning fixed at 12.7 nm; (b) spectra of the cascaded FWM with detuning of 7.6, 12.7 and 16.5 nm when the pump power is 14.1 dBm; (c) the relationship between the power of Stokes peak and pump power; (d) the relationship between the power of Stokes peak and detuning.

图6(b)显示了飞秒抽运平均功率固定为14.1 dBm时, 调节信号光波长位置获得的级联四波混频光谱. 当信号光波长分别调整到距离飞秒脉冲光谱中心7.6, 12.7和16.5 nm时, 相应的斯托克斯光和反斯托克斯光位置也发生变化. 当波长失配过大, 如16.5 nm时, 只能观察到一阶斯托克斯光, 级联四波混频不能发生. 这是由于该P型掺杂石墨烯/微光纤复合波导在抽运光波长上具有较大的反常色散造成的. 当波长失配继续缩小时, 由于飞秒脉冲抽运本身的频谱宽度较宽, 将会淹没新生成的一阶斯托克斯光.

图6(c)总结了该级联四波混频中, 固定波长失配为12.7 nm, 随着抽运功率增加, 一阶和二阶斯托克斯光以及一阶反斯托克斯光的功率变化. 当抽运功率达到14.1 dBm时, 一阶斯托克斯光(蓝色菱形)、一阶反斯托克斯光(红色方块)和二阶斯托

克斯光(绿色三角形)的功率分别为−53.4, −57和−58.5 dBm. 可见, 相比于高阶分量, 低阶的四波混频分量具有更高的转换效率.

图6(d)则总结了固定抽运功率14.1 dBm, 各个新生成的频率分量功率和波长失配之间的关系. 随着波长失配增加, 各阶斯托克斯和反斯托克斯分量的功率都显著下降. 当波长失配为6.7 nm时, 一阶斯托克斯光(蓝色菱形)、一阶反斯托克斯光(红色方块)、二阶斯托克斯光(绿色三角形)和二阶反斯托克斯光(紫色圆点)的功率分别为−50.8, −54.8, −56.6和−58.7 dBm; 当波长失配增加为16.5 nm时, 仅有一阶斯托克斯光还能被探测到.

在本实验中, 考虑所注入的连续信号光的功率为∼8.7 dBm, 在一阶斯托克斯光上, 我们所实现的最大转换效率为−60 dB. 这一结果可以通过优化光波导结构, 以及增加抽运功率来进一步提升. 另外, 考虑相位匹配条件, 当信号光和抽运光都为脉冲光时, 级联四波混频更容易产生[22]; 当信号光和抽运光都为连续光时[16], 级联四波混频现象难以发生, 因为连续光抽运难以达到级联四波混频所需要的峰值功率. 值得指出的是, 区别于传统的连续光源, 本实验中所采用的抽运光源是飞秒脉冲, 所以由四波混频效应所产生的斯托克斯光和反斯托克斯光也是飞秒脉冲. 这一特性既成功证明了石墨烯/微光纤复合波导结构在超快光学中四波混频的可行性, 也展示出在超快调制、滤波和成像等领域的巨大应用前景.

5 结 论

本文研究了基于P型掺杂的石墨烯包裹的微光纤复合波导在飞秒脉冲激光器抽运下的高阶非线性特性及其级联四波混频现象. 理论分析和实验结果说明, 利用kW级高功率超快脉冲激光器作为抽运, 能够在P型掺杂的石墨烯包裹的微光纤复合波导中有效激发超快的级联四波混频现象. 在注入的抽运光峰值功率为1.03 kW时, 调节波长失配小于10.0 nm, 最多在光谱上可观察到4组新产生的频率分量. 受抽运决定, 该级联四波混频的速度也是飞秒量级. 本文工作对基于石墨烯四波混频的诸多潜在应用, 特别是在超快光学中的应用, 如超快波分复用、相敏放大和全光再生等提供了新的思路和实验依据.

参考文献

[1] Bonaccorso F, Sun Z, Hasan T, Ferrari A C 2010 *Nat. Photon.* **4** 611

[2] Avouris P 2010 *Nano Lett.* **10** 4285

[3] Cheng Y, Yao B C, Wu Y, Wang Z G, Gong Y, Rao Y J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 237805 (in Chinese) [程杨, 姚佰承, 吴宇, 王泽高, 龚元, 饶云江 2013 物理学报 **62** 237805]

[4] Li S J, Gan S, Mu H R, Xu Q Y, Qiao H, Li P F, Xue Y Z, Bao Q L 2014 *New Carb. Met.* **29** 330 (in Chinese) [李绍娟, 甘胜, 沐浩然, 徐庆阳, 乔虹, 李鹏飞, 薛运周, 鲍桥梁 2014 新型炭材料 **29** 330]

[5] Li Z Q, Henriksen E A, Jiang Z, Hao Z, Martin M C, Kim P, Stormer H L, Basov D N 2008 *Nat. Phys.* **4** 532

[6] Youngblood N, Anugrah Y, Ma R, Koester S J, LiM 2014 *Nano Lett.* **14** 2741

[7] Manjavacas A, Thongrattanasiri S, Greffet J J, Abajo F J G D 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 211102

[8] Feng D J, Huang W Y, Jiang S Z, Ji W, Jia D F 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 054202 (in Chinese) [冯德军, 黄文育, 姜守振, 季伟, 贾东方 2013 物理学报 **62** 054202]

[9] Yao B C, Wu Y, Cheng Y, Zhang A Q, Gong Y, Rao Y J, Wang Z G, Chen Y F 2014 *Sen. Actuator B* **194** 142

[10] Li W, Chen B, Meng C, Fang W, Xiao Y, Li X, Hu Z, Xu Y, Tong L, Wang H, Liu W, Bao J, Shen Y 2014 *Nano Lett.* **14** 955

[11] Tong Z, Lundstrom C, Andrekson P A, McKinstrie C J, Karlsson M, Blessing D J, Tipsuwannakul E, Puttnam B J, Toda H, Grüner-Nielsen L 2011 *Nat. Photon.* **5** 430

[12] Kakande J, Slavik R, Parmigiani F, Bogris A, Syvridis D, Nielsen L, Phelan R, Petropoulos P, Richardson D J 2011 *Nat. Photon.* **5** 748

[13] Hendry E, Hale P, Moger J, Savchenko A 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 097401

[14] Zhang Z, Voss P L 2011 *Opt. Lett.* **36** 4569

[15] Gu T, Petrone N, McMillan J F, Zande A, Yu M, Lo G, Kwong D, Hone J, Wong C W 2012 *Nat. Photon.* **6** 554

[16] Wu Y, Yao B C, Cheng Y, Rao Y J, Zhou X Y, Wu B J, Chiang K S 2014 *IEEE Photo. Tech. Lett.* **20** 249

[17] Tong L, Lou J, Mazur E 2004 *Opt. Express* **12** 1025

[18] Yao B C, Wu Y, Zhang A Q, Wang Z G, Rao Y J, Gong Y, Zhang W L, Wang Z N, Chiang K S, Sumetsky M 2014 *Opt. Express* **22** 23829

[19] Yao B C, Wu Y, Zhang A Q, Rao Y J, Wang Z N, Cheng Y, Gong Y, Zhang W L, Chen Y F, Chiang K S 2014 *Opt. Express* **22** 28154

[20] Vakil A, Engheta N 2011 *Science* **332** 1291

[21] Agrawal G P 2009 *Nonlinear Fiber Optics (4th Ed.)* (Singapore: Elsevier) pp35–39

[22] Li Y H, Zhao Y Y, Wang L J 2012 *Opt. Lett.* **37** 3441

Four-wave-mixing generated by femto-second laser pumping based on graphene coated microfiber structure*

Feng Qiu-Yan[1)] Yao Bai-Cheng[1)] Zhou Jin-Hao[2)] Xia Han-Ding[3)] Fan Meng-Qiu[1)]
Zhang Li[1)] Wu Yu[1)†] Rao Yun-Jiang[1)]

1) (*Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communication, Ministry of Education, School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China*)

2) (*State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, School of Microelectronics and Solid-State Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China*)

3) (*School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China*)

(Received 19 March 2015; revised manuscript received 17 April 2015)

Abstract

Nonlinear optics researches of graphene-based four waves mixing (FWM) effect are important for a new generation of photonic devices. Compared with the ordinary graphene materials, the P-doped graphene based hybrid waveguide structure is more conducive to the simulating of the third-order nonlinear effect in low power due to its smaller transmission loss. In this work, we propose a P-doped graphene coated microfiber hybrid waveguide structure for femto-second laser pumping excited FWM. By the simulations, we analyze the HE_{11} mode distribution and the effective refractive index of the silica microfiber and P-doped graphene coated microfiber hybrid waveguide with different fiber diameters at a wavelength of ∼1550 nm. We also implement the fabrication processing and characterize this P-doped graphene coated microfiber hybrid waveguide. In the experiments, we utilize a femto-second laser as the pump laser with a peak power up to kW. As the graphene material and the microfiber contribute to the nonlinearity, the cascade FWM could be obtained. Experimental results demonstrate that when the peak power of the injection pump is fixed at 1.03 kW, by adjusting the detuning in wavelength to the length less than 10.0nm, there are four sets of frequency components that can be observed. In the present paper, we provide the relationship among the detuning in wavelength, the pump power and the the power of Stokes peak. These results indicate that under the condition of a few nanometer detuning wavelength, when the pump power is fixed at 14.1 dBm and the detuning wavelength is 6.7 nm, there are second order Stokes light and the second order anti-Stokes light, which can be observed, here the obtained conversion efficiency is up to −60 dB, which can be improved by optimizing the waveguide structure and increasing the pump power. Meanwhile, this FWM processing is also fast due to the fast pumping laser.

The simulation and experimental results demonstrate that this P-doped graphene coated microfiber hybrid structure has the advantages of highly nonlinearity, compact size and withstanding high power ultrafast laser, showing the important research value and potential applications in fields based on ultrafast optics, such as multi-wavelength laser, phase-sensitive amplification, comb filters and all-optical regeneration.

Keywords: graphene, microfiber, nonlinearity, cascaded fourwaves mixing

PACS: 42.81.Qb, 42.65.Wi, 78.67.Wj, 42.65.Re **DOI:** 10.7498/aps.64.184214

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61475032) and the Major Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61290312).

† Corresponding author. E-mail: wuyuzju@163.com