

基于石墨烯的宽带全光空间调制器

莫军 冯国英 杨莫愁 廖宇 周昊 周寿桓

Graphene-based broadband all-optical spatial modulator

Mo Jun Feng Guo-Ying Yang Mo-Chou Liao Yu Zhou Hao Zhou Shou-Huan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 214201 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180307

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180307>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I21>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[拓扑半金属材料的单晶生长研究进展](#)

Research progress of single crystal growth for topological semimetals

物理学报.2018, 67(12): 128102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180796>

[层状二硫化钼研究进展](#)

Recent progress of two-dimensional layered molybdenum disulfide

物理学报.2016, 65(1): 018102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.018102>

[直拉法晶体生长过程非稳态流体热流耦合](#)

Thermo-fluid coupling of unsteady flow in Czochralski crystal growth

物理学报.2015, 64(20): 208102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.208102>

[定向凝固过程中枝晶侧向分枝生长行为与强制调控规律](#)

Growth behaviors and forced modulation characteristics of dendritic sidebranches in directional solidification

物理学报.2015, 64(14): 148101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.148101>

[Pr_{1-x}Ce_xB₆ 阴极材料的原位反应合成及性能研究](#)

Synthesis and properties of multiple boride Pr_{1-x}Ce_xB₆ cathodes by reactive spark plasma sintering

物理学报.2012, 61(22): 228104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.228104>

基于石墨烯的宽带全光空间调制器*

莫军¹⁾ 冯国英^{1)†} 杨莫愁¹⁾ 廖宇¹⁾ 周昊¹⁾ 周寿桓¹⁾²⁾

1)(四川大学电子信息学院, 激光微纳工程研究所, 成都 610064)

2)(华北光电技术研究所, 北京 100015)

(2018年2月7日收到; 2018年7月4日收到修改稿)

提出了单层石墨烯包裹微纳光纤的全光空间调制. 石墨烯作为可饱和吸收体包裹在通过二氧化碳激光器加热制备的微纳光纤上, 当信号光沿着微纳光纤传输时部分光将以倏逝场的形式沿着微纳光纤表面传递, 并与石墨烯产生作用被吸收. 同时将波长为808 nm的抽运光从空间垂直入射到石墨烯包裹的微纳光纤处, 依据石墨烯的优先吸收特性, 通过抽运光控制石墨烯对信号光的吸收, 实现了宽带全光空间调制. 在1095 nm波长处获得最大调制深度约为6 dB, 调制带宽约为50 nm, 调制速率约为1.5 kHz. 空间全光调制器具有输出信号光“干净”的特点. 与传统石墨烯微纳光纤全光调制器相比, 输出端不需要对抽运光进行光学滤波而直接获得已调信号. 该复合波导全光空间调制器以更为灵活、高效的方式打开了微纳超快信号处理的大门.

关键词: 石墨烯, 微纳光纤, 全光调制, 空间调制

PACS: 42.25.Bs, 42.30.Lr

DOI: 10.7498/aps.67.20180307

1 引言

石墨烯作为一种新颖的二维材料, 具有奇特的光电特性^[1-3], 被称为“超级材料”, 获得了广泛的关注和应用, 已经在生物医学^[4]、机械^[5]和锁模激光器^[6]等方面有了报道. 由于石墨烯具有零带隙线性能带结构^[7], 因而具有超宽的工作频带(300—6000 nm), 并在宽带超连续谱全光光纤内调制器^[8]和超宽带吸波器^[9]上得到了实现. 石墨烯电子具有线性的能量-动量关系, 与二维狄拉克费米子的电子输运特性类似^[10]. 石墨烯的光生载流子产生-复合的时间只有几个皮秒($\tau = 1.67$ ps), 具有超快的弛豫过程^[11,12], 为实现超快全光调制器提供了可能. 单层石墨烯对可见光以及近红外波段光垂直的吸收率仅为2.3%^[13], 为了在低功率下实现调制, 把石墨烯与半导体工艺结合, 在低功率下实现了1 dB的调制深度^[14]. 但是由于硅或锗

中载流子参与调制过程, 因而调制速率受到了限制. 已经报道的全光调制器获得了28 dB的调制深度^[15], 测得了超快的时间响应(2.2 ps)^[16], 理论上可达500 GHz的调制速率, 远远高于石墨烯的电光调制^[17,18]速率(1.2 GHz).

本文创新地提出了单层石墨烯包裹微纳光纤全光空间调制(all-optical space modulation, AOSM), 与现有的石墨烯包裹微纳光纤(graphene-clad microfiber, GCM)不同, 抽运光与信号光不在同一传输通路上, 低功率信号光通过标准单模通信光纤的一端输入, 通过复合波导时被石墨烯吸收并从另一端输出. 具有高功率的抽运光从空间垂直入射到复合波导处, 形成开关信号控制石墨烯对信号光的吸收, 实现AOSM. 调制过程中抽运光与信号光通过不同的光路, 在单模光纤的另一端获得了“干净”的调制信号, 因而不需要在输出端进行光学滤波, 使得该AOSM器更为经济、灵活.

* 国家自然科学基金(批准号: 11574221)和国家高技术研究发展计划(JG2011105)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: guoing_feng@scu.edu.cn

2 相关理论与器件制备

根据麦克斯韦方程组可以严格求解在微纳光纤中的电磁矢量. 由于光纤的柱对称性, 柱坐标系下的电磁场分量 E_r, E_φ, E_z 和 H_r, H_φ, H_z 存在以下关系:

$$\begin{cases} E_t = \frac{j}{\omega^2 \mu_0 \varepsilon - \beta^2} (-\omega \mu_0 \hat{z} \times \nabla_t H_z + \beta \nabla_t E_z), \\ H_t = \frac{j}{\omega^2 \mu_0 \varepsilon - \beta^2} (-\omega \mu_0 \hat{z} \times \nabla_t H_z + \beta \nabla_t E_z), \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\omega = 2\pi/T$, T 为电磁场周期; μ_0 为介质的真空磁导率; ε 为电容率; β 为纵向传播常数. 可以先求出电磁场的纵向分量 (E_z, H_z), 再运用 (1) 式得其他四个横向分量. 纵向分量的亥姆霍兹方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \varphi^2} \\ + \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} + n^2 k_0^2 E_z = 0, \\ \frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \varphi^2} \\ + \frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2} + n^2 k_0^2 H_z = 0, \end{cases} \quad (2)$$

其中 $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空中的波数, λ 为波长. 在纤芯与包层中, n 是不同的, 将 n_1 和 n_2 分别代替 (2) 式中的 n , 就可以得到纤芯与包层的对应方程, 当方程组 (2) 满足光纤的边界条件时, 可得到 E_z 和 H_z 的场方程. 应用分离变量法, 方程组 (2) 的解为

$$\begin{pmatrix} E_z \\ H_z \end{pmatrix} = R(r) \Phi(\varphi) Z(z), \quad (3)$$

其中 $Z(z) = \exp(-j\beta z)$ 为传播因子. 由于圆柱的对称性, 关于 φ 的解应具有沿圆周方向驻波状态的变化形式:

$$\Phi(\varphi) = \begin{bmatrix} \sin(l\Phi) \\ \cos(l\Phi) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

$R(r)$ 在纤芯和空气包层中满足著名的 Bessel 方程:

$$\begin{cases} \frac{d^2 R(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR(r)}{dr} \\ + \left(n_1^2 k_0^2 - \beta^2 - \frac{l^2}{r^2} \right) R(r) = 0, \quad r \leq a, \\ \frac{d^2 R(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR(r)}{dr} \\ + \left(n_2^2 k_0^2 - \beta^2 - \frac{l^2}{r^2} \right) R(r) = 0, \quad r \geq a, \end{cases} \quad (5)$$

其中 n_1 和 n_2 分别为纤芯和包层的折射率, l 为 φ 方向上电场变化的周期数.

方程组 (5) 有两个特解:

$$R(r) = \begin{cases} \frac{AJ_l(U\rho)}{J_l(U)} \quad (\rho \leq 1), \\ \frac{AK_l(W\rho)}{K_l(W)} \quad (\rho \geq 1), \end{cases} \quad (6)$$

式中, $U = \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta^2} \cdot a$, $W = \sqrt{\beta^2 - n_2^2 k_0^2} \cdot a$, $\rho = r/a$; J_l 和 K_l 分别表示 l 阶第一类、第二类变型 Bessel 函数. (6) 式的意义是, 在光纤芯层中场是振荡衰减的, 而在包层中场以近似指数的速度衰减.

根据关系式 (1), (3), (4), (6) 可以得出纤芯和包层中的 6 个电磁分量表达式, 再根据光纤边界上的连续条件, 可以得到关系式:

$$\begin{bmatrix} \frac{\omega \mu_0 B}{U} & \frac{\omega \mu_0 B}{W} \\ \frac{\omega \varepsilon_0 n_1^2 A}{U} & \frac{\omega \varepsilon_0 n_1^2 B}{w} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{J'_l(U)}{J_l(U)} \\ \frac{K'_l(W)}{K_l(W)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \beta l \left(\frac{1}{U^2} + \frac{1}{W^2} \right), \quad (7)$$

式中 A 和 B 分别为电场和磁场纵向分量的常系数. 将 (7) 式进一步运算得到特征方程:

$$\begin{aligned} & l^2 \left[\frac{1}{U^2} + \frac{1}{W^2} \right] \left[\frac{n_1^2}{U^2} + \frac{n_2^2}{W^2} \right] \\ & = \left[\frac{1}{U} \frac{J'_l(U)}{J_l(U)} + \frac{1}{W} \frac{K'_l(W)}{K_l(W)} \right] \\ & \times \left[\frac{n_1^2}{U} \frac{J'_l(U)}{J_l(U)} + \frac{n_1^2}{W} \frac{K'_l(W)}{K_l(W)} \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

由于 U 和 W 满足关系式 $U^2 = (n_1^2 - n_2^2) k_0^2 a^2 - W^2 = V^2 - W^2$, 因此, (8) 式是关于 U 或 W 单变量的超越方程. 图 1 给出了在直径为 7 μm 的微纳光纤中, 3 个不同波长的基模功率归一化场强分布以及光斑图. 从图 1 可以看出, 在微纳光纤中心位置, 长波光斑强度要小于短波. 随着离微纳光纤中心越来越远, 由图 1 内插图可知, 长波长在边界处的倏逝场强于短波, 且光斑强度强于短波. 因此长波能量更容易泄漏到微纳光纤外.

本文中微纳光纤采用二氧化碳激光器加热法制备而成, 微纳光纤的直径约为 7 μm , 长度约为 1 cm. 将聚甲基丙烯酸甲酯 (polymethyl methacrylate, PMMA) 旋涂在铜基石墨烯膜 (Graphene Supermarket, ^{13}C graphene on Cu foil) 上, 通过石墨烯湿法转移, 将石墨烯/PMMA 薄膜覆盖到微纳光纤上. 自然晾干 1 h 后将样品 PMMA/石墨烯/微纳

光纤在 80 °C 的环境中烘烤 30 min 以上. 用丙酮溶解掉 PMMA 后, 清洁样品, 得到所需要的 GCM 复合波导结构. 在光学显微镜下, 观测到覆盖的石墨烯/PMMA 长度约为 800 μm (图 2 (b) 内插图).

采用波长范围为 1047—1096 nm 的放大自发辐射宽谱光源 (amplified spontaneous emission, ASE) 作为输入, 通过光谱分析仪 (Yokogawa, AQ6370D) 获得 ASE 光源经纯微纳光纤、GCM 的

整个输出光谱 (图 2 (a)). 从图 2 (a) 可以看出, 在覆盖石墨烯前后, 输出光谱的能量发生了明显变化, 这是由于石墨烯对倏逝波的强吸收造成的. 图 2 (b) 给出了覆盖石墨烯前后透过率的变化, 可以看出纯微纳光纤的透光率约为 90%, 通过 GCM 后透光率变约为 15%, 同时会发现纯微纳光纤的透光率呈振荡状, 是由于传导光纤内的基模与高阶模式相互干涉引起的 [19–21].

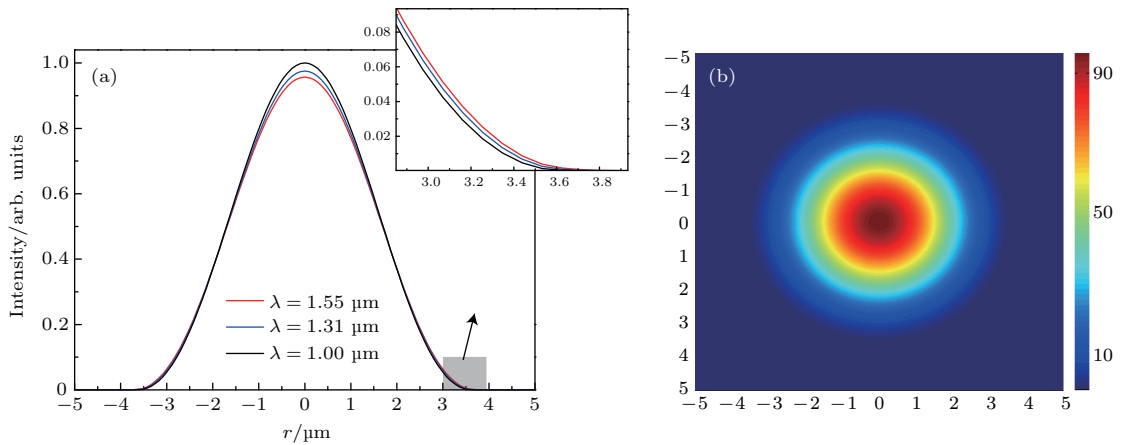


图 1 微纳光纤中基模模场分布 (a) 及光斑图 (b)

Fig. 1. Distribution of fundamental mode (a) and spot pattern (b) in microfiber.

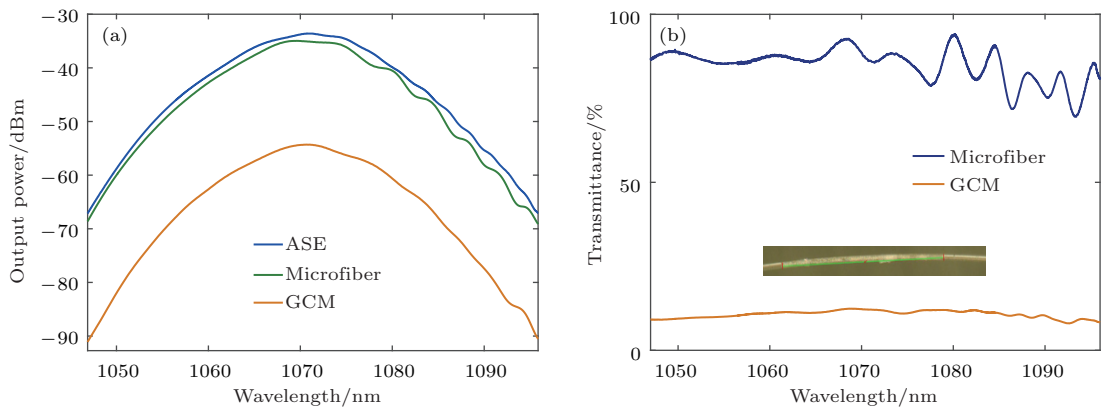


图 2 石墨烯包裹微纳光纤前后, ASE 的输出光谱和透光率对比图 (a) ASE 源、纯微纳光纤、GCM 的输出光谱; (b) 纯微纳光纤和 GCM 的透光率 (内插图为 PMMA/石墨烯膜包裹的微纳光纤实物图)

Fig. 2. Comparison of the output spectra and transmittance of the ASE before and after the graphene encapsulated microfiber: (a) Output spectra of ASE and ASE via pure microfiber and GCM; (b) transmittance of ASE via microfiber and GCM (the inset shows PMMA/graphene layer wrapped microfiber).

3 实验结果和讨论

实验中波长为 808 nm 的传统低功率激光二极管作为抽运光, 宽谱 ASE 作为信号光实现 AOSM, 系统结构如图 3 所示. ASE 输出功率限定为 7.7 mW, 808 nm 的抽运光经光纤输出后, 通过透镜聚焦垂直入射到 GCM 表面上. 信号光通

过 GCM 后, 输出光谱直接通过光谱分析仪 (Yokogawa, AQ6370D) 获得.

图 4 给出了 GCM 和 AOSM 结构示意图对比图. 从图 4 可以看出, 当复合波导结构为 GCM 时, 抽运光与信号光共同在复合波导内部传播, 其输出端得到的信号包含信号光和抽运光; 当复合波导结构改变为 AOSM 后, 抽运光通过空间垂直作用于 AOSM 上, 由于抽运光与信号光作用时光路分离, 因此在输

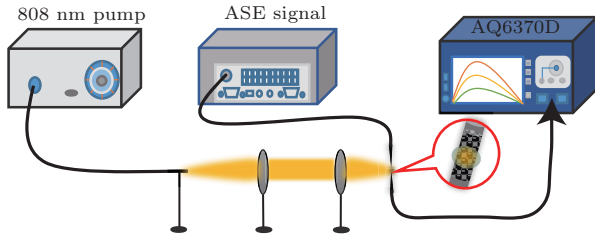


图3 基于 GCM 宽带 AOSM 器结构图

Fig. 3. Structure diagram of broadband AOSM based on GCM.

出端得到的信号只包含信号光. 于是, 利用复合波导 AOSM 实现全光调制时, 在输出端不需要再对抽运光与信号光进行分离, 有效地保证了信号光的完整性和系统的灵活性. 同时在 AOSM 方式下, 为了从实验上观察抽运光是否耦合进信号光传输的光路, 在 808 nm 抽运光输出功率为 569 mW, 信号光输入功率为 7.7 mW 的条件下, 通过光谱仪在输出端测得输出光谱 (图 4). 实验结果表明, 输出端没有 808 nm 的抽运光, 只有信号光 ASE 在光纤中

传输.

改变 808 nm 抽运光功率大小, 观察宽谱信号光经过 GCM 后的输出光谱 (图 5(a)). GCM 处的垂直入射光斑直径约为 100 μm , 随着抽运光能量的增加, 信号光输出能量也逐渐增加, 且输出波形保持不变, 表明石墨烯与光波作用时与波长无关. 当抽运光垂直照射到 GCM 复合波导时, 石墨烯吸收光子, 产生光生载流子由价带跃迁到导带, 当抽运光的强度增加时, 激发更多的光生载流子, 导带中载流子浓度增加, 根据泡利不相容原理, 会引起石墨烯对信号光吸收的漂白 [15]. 实验中抽运光输出功率为 569 mW 时, 在 1095 nm 波长处可以获得 6.2 dB 的调制深度. 图 5(b) 给出了 4 个不同波长, 在不同抽运功率作用下的调制深度. 从图 5(b) 可以看出, 调制深度与抽运功率呈线性关系, 信号光波长越长调制深度越大, 这可以用波长越长, 倏逝场越强, 与石墨烯作用越强来解释.

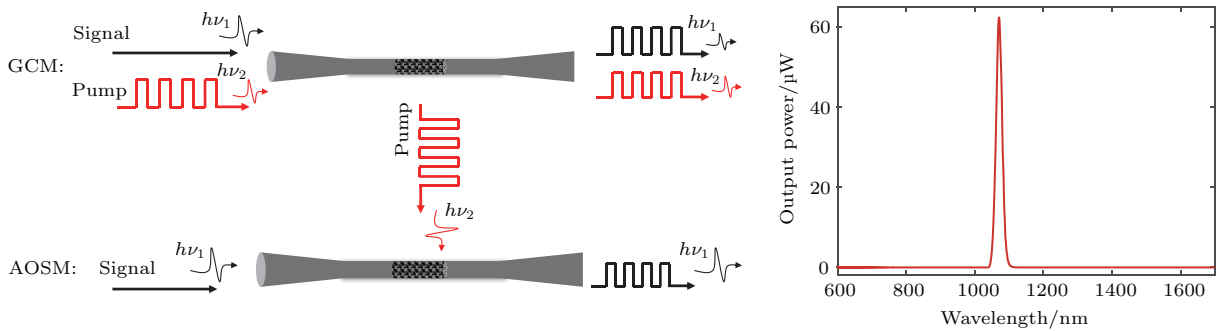


图4 GCM 和 AOSM 结构示意图与 AOSM 输出光谱

Fig. 4. Schematic diagram of GCM and AOSM and output spectrum of AOSM.

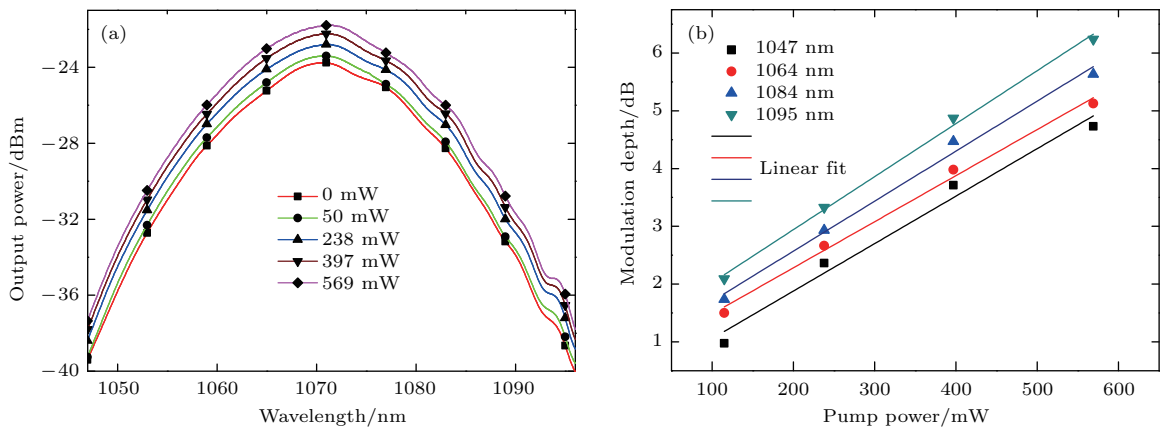


图5 宽带 AOSM 测试 (a) 宽谱信号光经 GCM 后输出光谱随抽运光功率的变化; (b) 不同波长信号光调制深度与抽运功率的关系

Fig. 5. Broadband AOSM test: (a) Output spectra variations of broad-spectrum signal light passing through GCM with pump optical power; (b) relationship between signal light modulation depth and pump power at different wavelengths.

为了观察时域上的调制现象, 在抽运光路上安放斩波器, 得到抽运脉冲(500 Hz, 1.5 kHz). 输出端直接通过光电转换器 (Therlabs, PDA8A/M) 连接到示波器(ROHDE & SCHWARTZ, RTO1024) 上, 得到的时域响应图如图6所示. 基于石墨烯的空间抽运全光调制器, 抽运光直接与石墨烯作用, 不会受到石墨烯光学长度的影响,

所以其调制速率仅受到石墨烯的载流子的弛豫时间影响, 理论上可以达到500 GHz的调制速率.

图7给出了当调制频率为500 Hz, 抽运光和信号光功率分别变化时信号光的时域波形. 从图7可以看出, 输出信号光同时受到ASE和抽运光输出能量的影响, 石墨烯具有优先吸收特性.

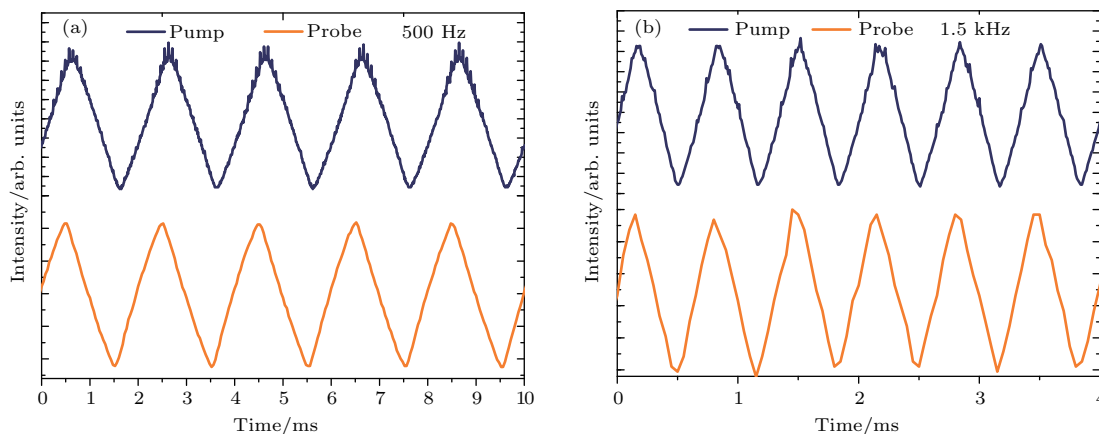


图6 抽运光频率为500 Hz (a), 1.5 kHz (b)时的AOSM

Fig. 6. AOSM at pump light frequencies of 500 Hz (a), 1.5 kHz (b).

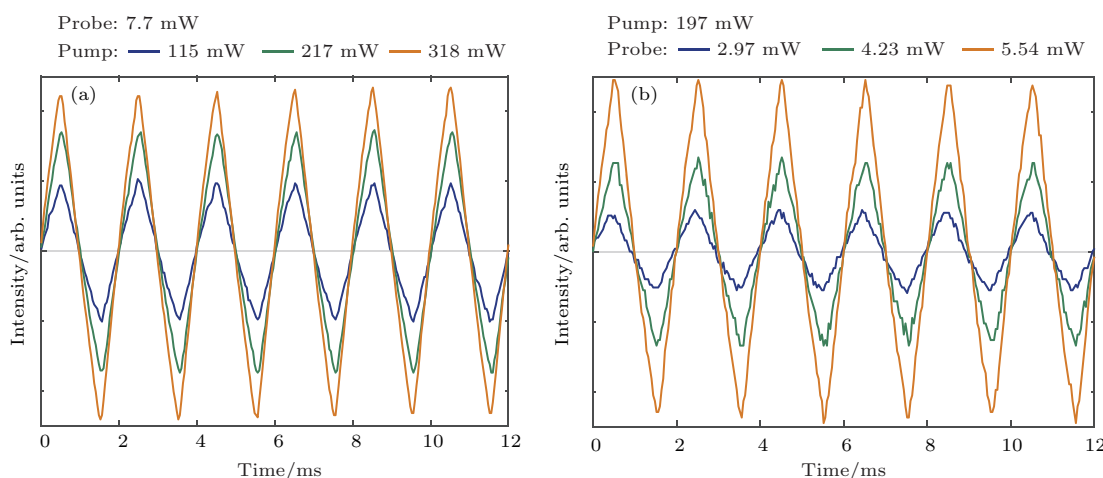


图7 信号光时域变化 (a) 信号光输入功率固定在7.7 mW时, 信号光输出随抽运光功率变化的输出曲线; (b) 抽运光垂直入射功率固定在197 mW时, 信号光输出随信号光功率变化的输出曲线

Fig. 7. Time domain variation of signal light: (a) Variation of signal light output with the pump light power when signal light input power is fixed at 7.7 mW; (b) variation of signal light output with signal light power when pump light vertical incident power is fixed in 197 mW.

4 结 论

利用二氧化碳激光器加热制备得到微纳光纤, 在其表面包裹单层石墨烯得到GCM复合波导结构, 实现了石墨烯对信号光的强吸收作用. 抽运光通过空间垂直入射到复合波导形成开关信

号, 控制石墨烯对信号光的吸收, 实现了宽谱信号(1047—1096 nm)的AOSM, 在1095 nm波长处获得最大调制深度约为6 dB, 调制速率约为1.5 kHz. 采用空间调制方式, 避免了抽运光与信号光光路的重叠, 输出端可得到纯净的调制光. 同时由于抽运光是从空间垂直入射, 不用考虑覆盖石墨烯长度对调制的影响, 调制时间只与石墨烯的弛豫时间

有关. AOSM方式的提出和实现, 将微纳光纤全光调制与高速全光纤信号处理系统更紧密地结合在一起.

参考文献

- [1] Avouris P 2010 *Nano Lett.* **10** 4285
- [2] Bonaccorso F, Sun Z, Hasan T, Ferrari A C 2010 *Nature Photon.* **4** 611
- [3] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, Jiang D, Zhang Y, Dubonos S V, Grigorieva I V, Firsov A A 2004 *Science* **306** 666
- [4] Liu W, Sun C, Liao C, Lin C, Li H, Qu G, Yu W, Song N, Yuan C, Wang Z 2016 *J. Agric. Food Chem.* **64** 5909
- [5] Rafiee M A 2011 *Graphene-based Composite Materials* (New York: Rensselaer Polytechnic Institute)
- [6] Bao Q, Han Z, Yu W, Ni Z, Yan Y, Shen Z X, Loh K P, Ding Y T 2009 *Adv. Funct. Mater.* **19** 3077
- [7] Guinea F, Katsnelson M I, Geim A K 2010 *Nat. Phys.* **6** 30
- [8] Liao Y, Feng G Y, Mo J, Zhou S H 2017 *Spectrosc. Spect. Anal.* **37** 3621 (in Chinese) [廖宇, 冯国英, 莫军, 周寿桓 2017 光谱学与光谱分析 **37** 3621]
- [9] Jiang Y N, Wang Y, Ge D B, Li S M, Cao W P, Gao X, Yu X H 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 054101 (in Chinese) [姜彦南, 王扬, 葛德彪, 李思敏, 曹卫平, 高喜, 于新华 2016 物理学报 **65** 054101]
- [10] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, Jiang D, Katsnelson M I, Grigorieva I V, Dubonos S V, Firsov A A 2005 *Nature* **438** 197
- [11] Dawlaty J M, Shivaraman S, Chandrashekhara M, Rana F 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 042116
- [12] Sun D, Wu Z K, Divin C, Li X, Berger C, de Heer W A, First P N, Norris T B 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 157402
- [13] Chen Y L, Feng X B, Hou D D 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 187301 (in Chinese) [陈英良, 冯小波, 侯德东 2013 物理学报 **62** 187301]
- [14] Yu L, Zheng J, Xu Y, Dai D, He S 2014 *ACS Nano* **8** 11386
- [15] Liu Z B, Feng M, Jiang W S, Xin W, Wang P, Sheng Q W, Liu Y G, Wang D N, Zhou W Y, Tian J G 2013 *Laser Phys. Lett.* **10** 065901
- [16] Li W, Chen B, Meng C, Fang W, Xiao Y, Li X, Hu Z, Xu Y, Tong L, Wang H 2014 *Nano Lett.* **14** 955
- [17] Liu M, Yin X, Ulin-Avila E, Geng B, Zentgraf T, Ju L, Wang F, Zhang X 2011 *Nature* **474** 64
- [18] Gao Y, Shiue R J, Gan X, Li L, Cheng P, Meric I, Wang L, Szep A, Walker D, Hone J 2015 *Nano Lett.* **15** 2001
- [19] Cassidy D T, Johnson D C, Hill K O 1985 *Appl. Opt.* **25** 328
- [20] Lacroix S, Bourbonnais R, Gonthier F, Bures J 1986 *Appl. Opt.* **25** 4421
- [21] Gonthier F, Bures J, Black R J, Lacroix S 1988 *Opt. Lett.* **13** 395

Graphene-based broadband all-optical spatial modulator*

Mo Jun¹⁾ Feng Guo-Ying^{1)†} Yang Mo-Chou¹⁾ Liao Yu¹⁾
Zhou Hao¹⁾ Zhou Shou-Huan¹⁾²⁾

1) (*Institute of Laser and Micro/Nano Engineering, College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China*)

2) (*North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China*)

(Received 7 February 2018; revised manuscript received 4 July 2018)

Abstract

In this paper, the all-optical spatial modulation of monolayer graphene-coated microfiber is proposed. Graphene is used as a saturable absorber wrapped on the microfiber produced by heating the carbon dioxide laser. When the signal light travels along the microfiber, part of the light will pass along the surface of the microfiber in the form of an evanescent field, and it will be absorbed by the graphene. Simultaneously we shoot the 808 nm pump light into the micro-nanofiber wrapped by the graphene vertically from the space. According to graphene characteristic of preferential absorption, the absorption of the signal light is controlled by the pump light, thus the broadband all-optical space modulation is realized. In a conventional graphene microfiber all-optical modulator, signal light and pump light are generally input into a microfiber via a coupler. However, the mode of operation of pump light and graphene in all-optical spatial modulation are different from those of the traditional modulation, the pump light works on the graphene outside the microfiber, which realizes the separation of the pump light and the signal light. The output signal does not need to be optically filtered for the pump light to obtain the modulated signal. The output signal light of the spatial all-optical modulator has the characteristics of “clean”. We also verify this in experiment. In addition, the pump light is vertically incident from space, the effect of the graphene length on the modulation is not considered and the modulation time is only related to the relaxation time of graphene, which is helpful in improving the response time. Modulation experiments include static spectral modulation and dynamic frequency modulation. In the static spectral modulation, the broad spectrum signal has a maximum modulation depth of 6 dB at 1095 nm when the pump power is 569 mW. The relationship among pump power, wavelength and modulation depth is also analyzed. The higher the pump power, the higher the modulation depth will be; with the same pump power, the modulation depth of long wave length is higher than that of short wave. In the dynamic modulation experiment with the modulation bandwidth ~ 50 nm and the modulation rate ~ 1.5 kHz, the influence of pump light and signal light on output dynamic signal are studied, the feasibility of all-optical space modulation based on graphene is verified experimentally. The composite waveguide of all-optical spatial modulator opens the door to micro-nano ultrafast signal, processing in a more flexible and efficient way.

Keywords: graphene, microfiber, all-optical modulation, spatial modulation

PACS: 42.25.Bs, 42.30.Lr

DOI: 10.7498/aps.67.20180307

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11574221) and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. JG2011105).

† Corresponding author. E-mail: guoing_feng@scu.edu.cn