



基于二维材料的全光器件

徐依全 王聪

All-optical devices based on two-dimensional materials

Xu Yi-Quan Wang Cong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 184216 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200654

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200654>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

空位及氮掺杂二维ZnO单层材料性质:第一性原理计算与分子轨道分析

Properties of vacancies and N-doping in monolayer g-ZnO: First-principles calculation and molecular orbital theory analysis

物理学报. 2019, 68(24): 246301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191258>

二维材料/铁电异质结构的研究进展

Research progress and device applications of multifunctional materials based on two-dimensional film/ferroelectrics heterostructures

物理学报. 2020, 69(1): 017301 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191486>

相干彩虹的形成机制

Formation mechanism of coherent rainbows

物理学报. 2018, 67(18): 184204 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180888>

基于滑动势能面的二维材料原子尺度摩擦行为的量化计算

Quantitative calculation of atomic-scale frictional behavior of two-dimensional material based on sliding potential energy surface

物理学报. 2017, 66(19): 196802 <https://doi.org/10.7498/aps.66.196802>

新型机械解理方法在二维材料研究中的应用

Applications of new exfoliation technique in study of two-dimensional materials

物理学报. 2018, 67(21): 218201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181636>

专题: 低维材料非线性光学与器件

基于二维材料的全光器件*

徐依全 王聪†

(深圳大学物理与光电工程学院, 深圳 518060)

(2020年5月2日收到; 2020年6月9日收到修改稿)

近年通信技术的飞跃, 对光学设备的紧凑性、响应速度、工作带宽和控制效率提出新的挑战. 石墨烯的发现, 使得二维材料飞速发展, 不断涌现出一系列新材料, 如 MXene、黑磷、过渡金属硫化物等. 这些新型二维材料有着出色的非线性光学效应、强光-物质交互作用、超宽的工作带宽. 利用其热光效应、非线性效应并结合光学结构, 能够满足光通信中超快速的需求. 紧凑、超快、超宽将会是未来二维材料全光器件的标签. 本文重点综述基于二维材料的热光效应与非线性效应的全光器件, 介绍光纤型的马赫-曾德尔干涉仪结构、迈克耳孙干涉仪结构、偏振干涉结构以及微环结构, 最后阐述并回顾最新的进展, 分析全光器件面临的挑战和机遇, 提出全光领域的前景与发展趋势.

关键词: 全光器件, 二维材料, 光学非线性效应, 热光效应**PACS:** 42.79.Hp, 81.07.Bc, 78.20.N-, 42.65.-k**DOI:** 10.7498/aps.69.20200654

1 引言

光学调制器件是光学系统中不可或缺的一个重要组成部分, 特别是在光通信行业, 伴随着近几年通信速度呈指数上升, 对光调制器的紧凑性、调制速度、工作带宽和控制效率的要求也迅速上升^[1-6]. 基于电子技术的光调制器在各个领域展现出出色的性能, 大大推进了光通信领域的发展, 并得到广泛应用, 技术已经相当成熟. 于此同时, 它用于信号处理的“瓶颈”也逐渐浮现^[4,7,8]. 这通常是受到了硅结构 RC (电阻-电容) 时间常数的限制, 在 2014 年报道了通过有机分子与硅波导的结合, 突破了这一限制, 工作频率大于 100 GHz^[9], 但在高频工作时仍受限于其他损耗. 由于硅材料不具有高阶非线性^[10], 并且考虑到与 CMOS 技术兼容的必要性, 较新的光电调制器更多地考虑利用自由载流子色散效应 (即等离子体效应). 数十年来, 铌酸

锂光电调制器都是主流产品, 然而, 基于此原理的调制器体积庞大、价格高昂^[11]. 目前最新一代的铌酸锂光电调制器利用马赫-曾德尔干涉仪 (MZI) 原理并成功集成铌酸锂材料, 最大能达到 100 GHz 的工作带宽^[12]. 虽然克服了电压与损耗的冲突, 但仍难以实现复杂功能, 并且铌酸锂工艺匹配度不高, 集成难度较大, 成本较高. 电子技术已逐渐遭遇电子瓶颈、声子瓶颈, 相应的全光调制器在速度方面具有一定的优势, 但在高速调制的同时, 调制深度与功耗一直未能与电光调制器相提并论, 这就限制了全光调制器的应用. 伴随着二维材料的出现, 全光信号处理重新进入人们的视野, 是未来研究的重要方向^[5]. 全光信号处理相关的各种技术中, 全光脉冲整形和全光调制被认为是必不可少的部分. 这一技术的基本概念可以追溯到使用一束光来改变信号光的传播状态 (强度、相位、偏振态等), 这也是光通信网络系统的基石. 其中, 除以光控光为基础外, 全光调制最重要的一点是实现信息的

* 国家重点研发计划 (批准号: 2019YFB2203503)、国家自然科学基金 (批准号: 61435010, 61575089, 61705140, 61805146) 和台北科技大学与深圳大学学术合作专题研究计划 (批准号: 2019007) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gxgewang@163.com

加载、转移,这可以通过一系列全光控制器件实现,例如全光开关、波长转换器等.通过利用二维材料中的非线性效应,全光调制器拥有巨大的潜力,理论上调制速度能达到 50 THz 以上的响应速度^[13].最新的基于等离子体激元波导的全光调制则达到了 3.8 THz 的调制速度^[14].这一成果在实现超小型节能全光调制器件上取得了突破,给予全光领域克服高能耗、低调制深度的信心.到目前为止,已经报道了光纤型^[15]、波导型^[15]以及空间型^[16,17]全光器件,本文将着重介绍其中的光纤型全光调制器件以及全光阈值器.

二维材料优秀的非线性效应与强光-物质相互作用很好地弥补了硅基半导体材料的不足,并且制备难度不高,紧凑的特性使其一经发现就成为光学研究的一大热点,推动了各个学科的发展.自从 2004 年曼切斯特大学的一个小组通过机械剥离法分离出单层原子的石墨^[18],二维材料得到了广泛的关注,这一工作使得 Nocoselov 和 Geim 获得了 2010 年的诺贝尔奖.二维材料的主要特点是材料仅有单层原子厚度,使电子仅可在一个纳米尺度的二维平面自由运动,严格限制了材料载流子和热量的扩散方向^[19,20].同时,二维材料具有优异的量子霍尔效应^[21],超高比表面积^[22],超高的室温载流子迁移率^[18],较高的杨氏模量^[23]、光学透明性^[24]、导电性^[18]和导热性^[25],这些特点使得其表现出独一无二的热学、光学、电学、力学效应,并得到了广泛的关注^[26–29].在石墨稀被报道之后,陆续发现一批新的二维材料,如六方氮化硼 (h-BN)^[30]、二维过渡金属硫化物 (TMDs)^[31–33]、石墨相氮化碳 (g-C₃N₄)^[34,35]、层状金属氧化物^[36,37]、层状双金属氢氧化物 (LDHs)^[37,38]、MXene 材料^[39]等.基于二维材料可饱和吸收效应、热光效应和克尔效应的全光调制也已经取得了一定的成就^[40,41],而目前的光纤型全光器件主要基于材料的热光效应以及可饱和吸收.最经典的二维材料——石墨烯,已广泛应用于许多光子和光电设备,例如取代铜锡氧化物生产触摸屏显示器以及柔性屏^[42]、产生超短脉冲^[43–45]、集成到光子系统中^[46,47]、太赫兹设备^[48]等,其工作带宽涵盖了紫外线、可见光^[49]、红外线^[50–55],范围非常广泛.并且二维材料已经被证明可以兼容各种不同的全光结构,例如基于光纤的系统^[56–59]、基于硅的器件^[50,60,61]和大范围光电探测器^[62].

本文首先回顾二维材料的特性以及制备方式,

并介绍目前实现全光的两类主要机制:热光效应和非线性效应.同时对基于这两类原理的全光器件的研究进展分别进行介绍,并展望未来可能的应用以及研究方向,我们相信二维材料将会改变现有调制、整形方式,大幅提升全光设备性能,开启全光领域的新纪元.

2 二维材料简介

2.1 二维材料特性

石墨烯以 sp² 杂化方式形成蜂窝结构,是由碳原子构成的厚度只有一个原子的单层二维材料(见图 1(a))^[27],其键能与金刚石相当.并且每一个碳原子都只有 3 个 C—C 键相连接,与金刚石的 4 个键相比,强度高了 25% 左右,因此是迄今为止已知的最稳定的材料.作为一个半导体,它具有很独特的零带隙结构以及非线性光学效应^[27].单层的石墨烯在红外到可见光波段对入射光具有 2.3% 的光吸收^[24],并且它利用电门控^[63]、化学掺杂^[64]、几何修整^[65]或机械拉伸^[66]等方法可以打开半导体金属的零带隙,由此可以在光调制器上得到良好的应用.

TMDs 是属于 MX₂ 型的半导体材料,于 2010 年首次通过实验分离^[67,68].其中, M 为过渡金属原子, X 为硫属元素原子,结构如图 1(b)^[27]所示.在体态下, TMD 为间接带隙半导体,具有明显的带隙,但当 TMD 制成单层材料时,它们会由间接带隙半导体转变为直接带隙半导体,其带隙范围在 1—2.5 eV 之间,如图 1(e)^[27],属于近红外到可见光波段.最近几项研究表明, TMD 不仅具有可控带隙和高载流子迁移率,并且表现出三阶非线性光学效应,如宽带饱和吸收效应、双光子吸收和强非线性效应,开拓了在全光调制方面的应用.

黑磷 (BP) 在 20 世纪 10 年代首次合成^[69],并在近几年成功制备单层黑磷^[70],为近期热点的直接带隙半导体材料.它的单层材料被称为磷烯,基本结构是每个磷原子和三个相邻的磷原子由磷原子键结合而成的蜂窝结构,与石墨烯结构相同,如图 1(c)所示^[27].黑磷的皱褶结构使它表现出各向异性的物理性质^[71–74],这一性质使其具有较强的光吸收和光致发光,而且黑磷的带隙可由层数与厚度控制 (0.3—2.2 eV),其带隙如图 1(e)所示^[27],很好地作为石墨烯与 TMDs 材料之间的带隙补充.

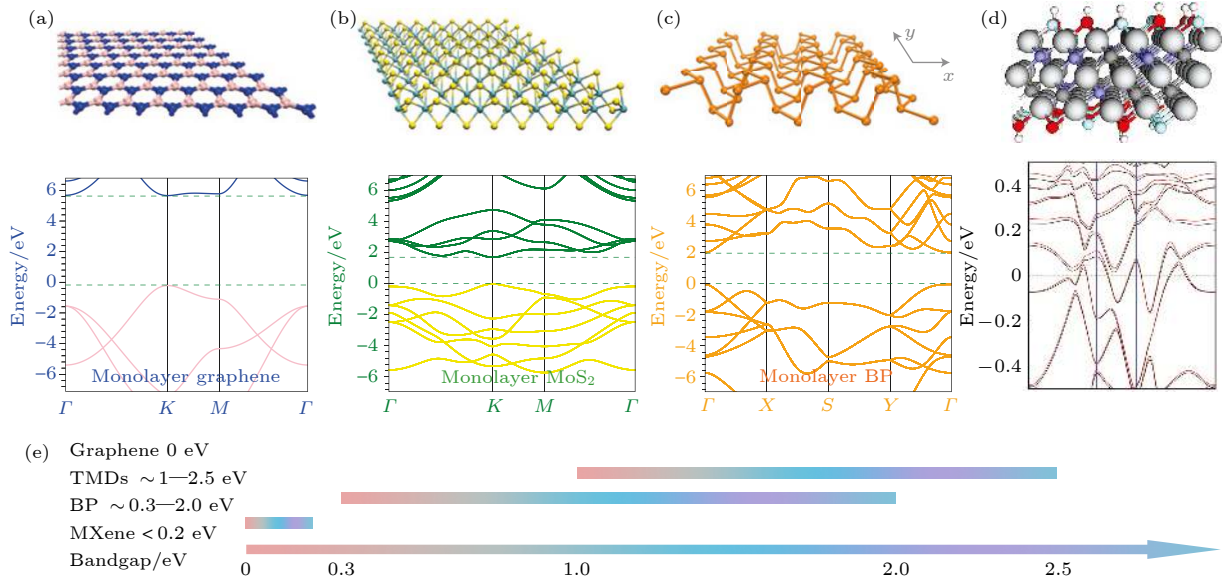


图 1 (a) 石墨烯^[27], (b) TMDs^[27], (c) BP^[27] 和 (d) MXene^[78] 的原子结构及带隙结构; (e) 各材料带隙分布图^[27,78]

Fig. 1. Atomic structures and band structures of (a) graphene^[27], (b) TMDs^[27], (c) BP^[27] and (d) MXene^[78]. (e) Distribution diagram of the bandgap of each material^[27]. Reprinted by permission from Ref. [27]. Copyright Nature Photonics. Reprinted by permission from Ref. [78]. Copyright Advanced Materials.

表 1 二维材料特性总结

Table 1. Properties of different 2D materials.

二维材料种类	能隙/eV	厚度/Å	导热系数/W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	饱和吸收强度 I _s /GW·cm ⁻²	三阶极化率 Imχ ⁽³⁾ /esu	非线性折射率 n ₂ /cm ² ·W ⁻¹	载流子弛豫时间	Ref.
graphene	0	3.35	1600—5300	583	-8.7 × 10 ⁻¹⁵	10 ⁻⁷	200 fs—1 ps	[84—86]
TMDs	1—2	6.04—6.91	19—112	381—590	-(0.145—1.38) × 10 ⁻¹⁴	10 ⁻¹²	1 ps—400 ps	[84, 85]
BP	0.3—2.2	5.24—5.29	6—89	459	-7.85 × 10 ⁻¹⁵	6.8 × 10 ⁻⁹	360 fs—1.36 ps	[84, 89, 87]
MXene	< 0.2	—	298—460	10	10 ⁻¹³	-10 ⁻¹⁶	—	[82, 88]

黑磷所具有的带隙可控、高载流子迁移率、各向异性等特性,在全光调制领域有着巨大潜力.但因为黑磷对氧气和水的敏感性,导致其应用存在一些困难.最近有所突破,人们研究了许多制备方法提高黑磷的稳定性.其中氟化磷已在全光开关和逻辑门上得到了应用^[75,76].

MXene 是一种与石墨烯类似的二维材料^[77],由过渡金属与碳、氮或碳-氮构成主结构,其结构如图 1(d) 所示^[78].它的化学式是 $M_{n+1}X_nT_x$ ($n = 1, 2, 3$), 其中 M 代表了过渡金属, X 代表了碳或者碳-氮, T 代表官能团—O, —OH 和—F. 例如 Ti_2CT_x ^[79], $Ti_3C_2T_x$ ^[80] 和 $Ti_4N_3T_x$ ^[81]. 图 1(e) 展示了 MXene 的带隙分布图^[77], MXene 的带隙与石墨烯接近, 小于 0.2 eV, 并且线性吸收系数为 1%, 非线性吸收效率为 $10^{-21} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-2}$ ^[82]. 相较于其他二维材料, 它具有很强的能量转换效率, 加上较高的光损伤阈值, MXene 的使用更为灵活, 应用前景

广阔^[83].

表 1 总结了石墨烯, TMDs, BP 和 MXene 四种类型的二维材料基本特性^[82,84—89]. 对于二维材料的热光效应, 导热系数是不可忽视的重要参数之一, 其中石墨烯具有相当高的导热系数, 但导热系数受到材料的层数、制备方法等因素的影响较大. 所以高导热系数的二维材料虽更适合应用于热光效应, 但较低导热系数的二维材料仍有优化的空间. 最近, BP 材料展现出了优良的导热系数, 基于 BP 的光学器件上升时间优于石墨烯器件^[90], 并且也有报道证明其热导率有望超越石墨烯^[91]. 对于非线性效应, 从表 1 可以看到, 二维材料均具有优秀的饱和吸收强度. 但非线性可饱和吸收效应的实际效果同样受到各种因素的影响, 比如抽运光功率就会很大程度地影响饱和吸收强度^[82]. 对于其他非线性效应, 最重要的评价参数之一是三阶非线性极化率 $\chi^{(3)}$. 它是一个复数, 其虚部描述了非线性

性吸收、三次谐波和拉曼效应等三频现象, 实部则描述了克尔非线性效应. 在非线效率这一方面, 过渡金属硫化物与碳氮化物更有优势, 它们展现出优于石墨烯与磷烯的表现. 另一方面, 石墨烯与黑磷均具有数百飞秒级的载流子弛豫时间, 这意味着在利用非线性效应实现超快全光器件方面有巨大的潜力. 而非线性折射率实际上体现的是二维材料的线性吸收能力, 这一方面石墨烯与黑磷显得较为弱势.

2.2 二维材料的制备

当前主要有三种二维材料制备方法: 化学气相沉积法 (CVD)、机械剥离法和液相分离法 (LPE). 自从 2004 年用机械剥离法从石墨中剥离出石墨烯以来^[18], 机械剥离法一直作为低成本的二维材料制备方法被广泛使用. 这一方法不仅能制作石墨烯, 还能制作 BP, TIs 等的二维材料^[92-94]. 机械剥离法通常使用透明胶带反复粘贴剥离离散材料表面得到少量的二维材料. 但因为每次粘贴所制备的材料较少, 在需要一定量的二维材料时, 这一方法要重复粘贴, 效率较低.

与机械剥离法较为相似的是 LPE 法. LPE 法是将粉末状的材料与溶剂混合, 通过长时间高强度的超声产生气泡将材料粉碎成单层或者几层的纳米片, 之后离心处理, 使得大尺寸的材料沉入溶剂底部, 小尺寸的纳米材料悬浮在溶剂中, 达到分离纳米材料与未破碎材料的目的^[95,96]. 最后用移液管收集溶剂上层的纳米材料. 这一方法收集的二维材料很难控制层数与尺寸大小, 但是产量高且成本低廉^[97].

相较于机械剥离法和 LPE 法, CVD 法是产生二维材料的重要方法. 通常, 此方法将气态和粉末状的反应物放入管式炉中, 在合适的温度下发生特定的化学反应, 并在管式炉下游的基板上生长二维材料^[98]. 另外, CVD 法能通过修改反应参数严格控制产出的二维材料的尺寸与层数. 高产量与可控制使其成为大规模商业生产的主要方法^[99].

3 基于二维材料热光效应的全光器件

目前基于二维材料热光效应的全光器件可分成谐振设计和非谐振设计. 非谐振设计主要基于马赫-曾德尔干涉仪 (MZI)^[75,90,100-102]、迈克耳孙干涉

仪 (MI)^[103-105] 和偏振干涉仪 (PI)^[106] 三种经典原理. 对于谐振设计本文将讨论微环^[107].

3.1 MZI 结构的全光调制器

此类全光调制器结构与原理基本相同, 目前已报道基于石墨烯^[101]、TMD^[102]、黑磷^[75]、MXene^[100] 以及硼^[90] 的调制器. 实验结果将在本章最后讨论, 本节以 MXene 实验为例.

如图 2(a) 所示是 MZI 全光调制器的典型结构^[100]. 系统由多个耦合器、波分复用器以及一个延时线构成两臂. MXene 材料沉积在上臂两个 980/1550 波分复用器 (WDM1 和 WDM2) 之间的微纳光纤上. 控制光由 WDM1 注入, 经过微纳光纤之后通过 WDM2 反馈. 其中, 微纳光纤具有强倏逝场效应, 使 MXene 材料与控制光充分接触. 而下臂中的延时线用于补偿两臂中的光程差以及光功率. 由于 MXene 在 980 nm 处表现出强吸收, 注入的 980 nm 控制光将被 MXene 吸收并加热材料. 这导致 MXene 温度发生改变, 使得 MXene 与光纤的热光效应相结合, 进而改变上臂中传输的 1550 nm 信号光的相位, 以此达到全光调制的目的. 最后 MZI 结构使上下两路光在合路器中发生干涉, 将信号光的相位变化展现出来并输出干涉谱.

在这一系统中, MXene 沉积的微纳光纤是关键组件. 通过液相分离法合成 MXene $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 之后, 将 MXene 悬浮液滴到微纳光纤侧面, 再通过光沉积法制造 MXene 微纳光纤. 图 2(b) 给出了 MXene $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 纳米片的高放大倍数的高分辨率透射电子显微镜 (HRTEM) 原子晶格结构. 图 2(c) 是沉积长度为 500 μm 的微纳光纤的光学显微图像. 图 2(d) 为 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 和 Ti_3AlC_2 的拉曼光谱图.

实验首先通过注入 1550 nm 附近的放大自发辐射光源 (ASE) 表征系统的调制频谱. 如图 2(a) 所示, 两个输出 (output1 和 output2) 分别可以用 $P_{\text{in}}[1 - \cos(k\Delta L)]/2$ 和 $P_{\text{in}}[1 + \cos(k\Delta L)]/2$ 表示, 其中 P_{in} 为输入功率, k 为传播常数, ΔL 为两臂长度差. 不难看出, 系统两个输出是互补的. 如图 3(a) 所示, 系统两个输出频谱均为梳状且互补, 对两臂微扰产生的相移可以实现很好的消光比. 当使用 980 nm 抽运光作为控制光时, MXene 将会吸收控制光产生热量, 改变微纳光纤的损耗从而使通过上臂的信号光产生相移. 这一相移等效于两臂长度差

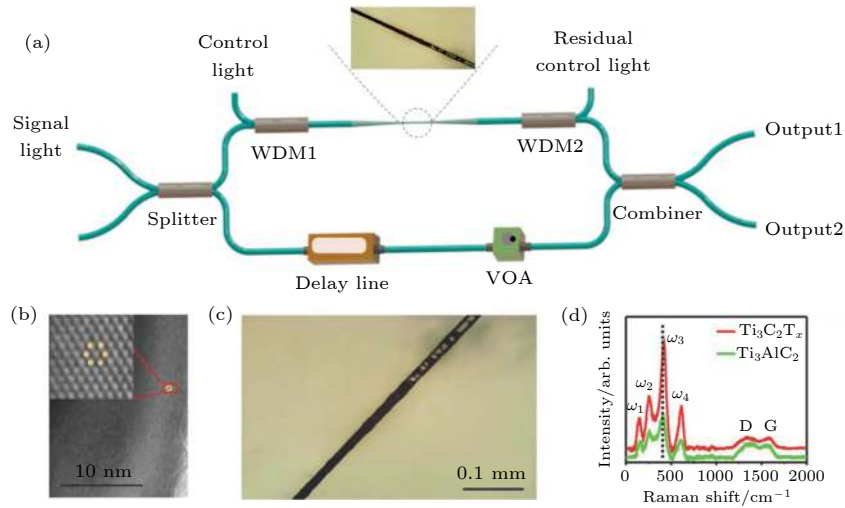


图 2 (a) 基于 MXene 材料的 MZI 全光调制器的实验装置^[100]; (b) MXene $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 纳米片的高放大倍数 HRTEM 原子晶格结构^[100]; (c) 沉积有 MXenes 的微纳光纤的光学显微镜图像^[100]; (d) $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 和 Ti_3AlC_2 的拉曼光谱图^[100]

Fig. 2. (a) Experimental setup of an MZI all-optical modulator based on MXene materials; (b) high-magnification HRTEM atomic lattice structure of MXene nanosheet; (c) optical microscopy image of microfibers deposited with MXenes; (d) Raman spectrum of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ and Ti_3AlC_2 . Reprinted by permission from Ref. [100]. Copyright Advanced Materials.

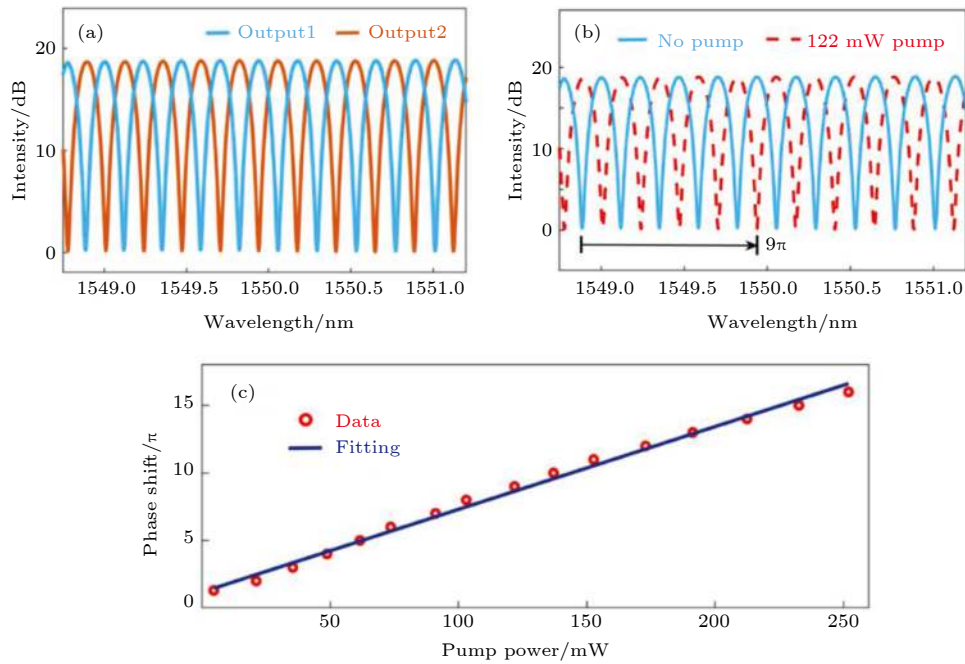


图 3 (a) 两个输出端口的干涉频谱^[100]; (b) 在 122 mW 的控制光 (泵) 功率下的干涉条纹^[100]; (c) 相移与不同控制光功率的关系^[100]

Fig. 3. (a) Interference spectra of two output ports; (b) interference fringes at a control light (pump) power of 122 mW; (c) phase shift versus different control light (pump) powers. Reprinted by permission from Ref. [100]. Copyright Advanced Materials.

的改变, 导致每一自由光谱范围 (FSR) 变化对应 2π 的频谱偏移. 图 3(b) 中的红色虚线表示 4.5FSR 的频谱偏移, 对应于 9π 的相移. 控制光功率与相移之间的关系如图 3(c) 所示, 其控制效率为 $0.074 \pi/\text{mW}$.

若使用 1550 nm 连续激光 (CW) 作为信号光, 图 4(a) 所示的 980 nm 脉冲光作为控制光, 将会得

到一个全光开关系统. 图 4(b) 给出了 120 mW 控制光应用于系统时的输出波形, 可以看到两个输出端口是互补的. 通过使用指数拟合输出的信号光波形可以估计上升时间和下降时间分别为 4.10 和 3.55 ms. 上升下降时间不相等这一现象出现的原因是因为两时间常数所依赖的参数不同. 上升时间长短取决于 MXene 材料吸收控制光改变温度的

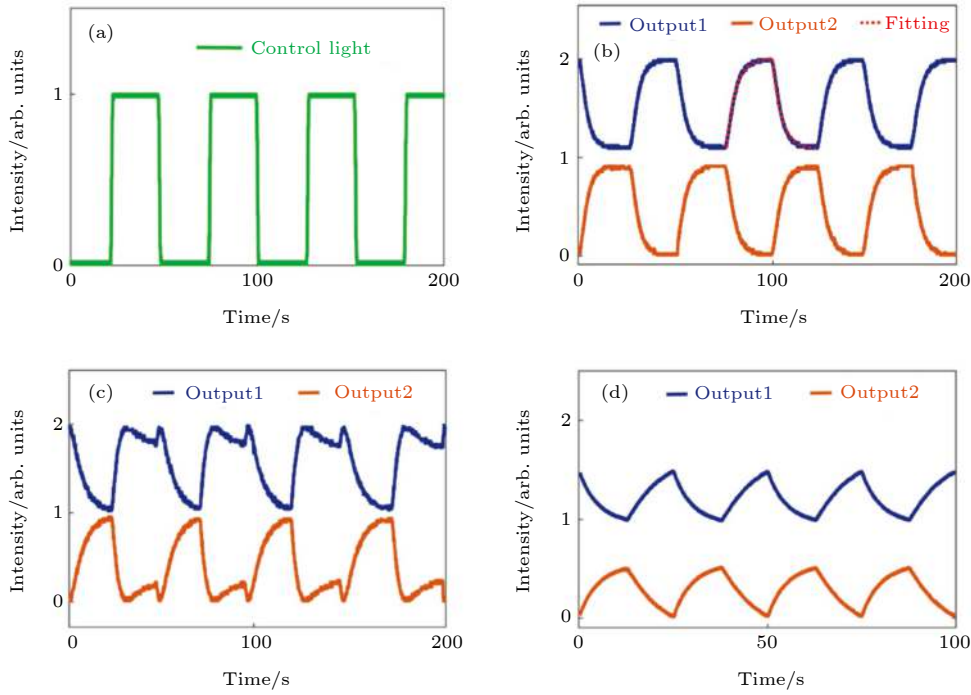


图 4 (a) 980 nm 控制光波形图^[100]; (b) 信号光开关转换及其拟合曲线^[100]; (c) 错误输出^[100]; (d) 信号光为 40 Hz 时的输出^[100]
 Fig. 4. (a) Waveform of the 980 nm control light (pump); (b) signal light switch conversion and its fitting curve; (c) output breaking; (d) waveforms of signal light at 40 Hz. Reprinted by permission from Ref. [100]. Copyright Advanced Materials.

能力, 受到空气对流等环境因素影响. 而下降时间取决于被加热的微纳光纤的散热速度.

对于输出功率与相位的的关系, 可以简化出以下公式:

$$P_{\text{out}} \propto 1 - \cos(\Delta\phi), \quad (1)$$

其中 P_{out} 表示输出功率, $\Delta\phi$ 为控制光引起的相移. 不难看出, 当相移从 0 增加到 π 时, 输出功率将从 0 增加到最大值; 当相移从 π 增加到 2π 时, 输出功率将与相移成反比. 因此输出功率将在控制光的上升沿增大到最大值然后减小, 在控制光的下降沿增大到最大值然后减小到 0, 最终起到光开关的效果. 值得注意的是, 如图 4(c) 所示, 当控制光功率在 120 mW, 但脉冲频率提高时, 输出波形会受到热传导速度的限制而导致如图 4(d) 所示的失真.

3.2 MI 结构的全光调制器

MZI 结构的系统稳定性较差, 对环境扰动敏感, 这一缺陷在 MI 结构的系统中可以得到解决. 如图 5(a) 所示, Wang 等^[104] 提出了一种新的全光开关设计. 与上文提到的 MXene 材料沉积微纳光纤类似, 此系统将通过 LPE 法制备的铋量子点沉积到微纳光纤上得到铋材料微纳光纤. MI 结构的全光开关通过波分复用器将信号光与控制光合路,

再经过耦合器分光. 紧接着控制光与铋量子点的热光效应改变上臂的信号光相位, 之后经调制的信号光从两臂末端反射回耦合器中与未经调制的信号光发生干涉并输出. 末端的法拉第旋转镜 (FRM1 和 FRM2) 用于消除输入输出非正交引起的偏振干涉. 可变光衰减器 (VOA) 则用于调节两臂功率以获得稳定的输出信号.

图 5(b) 所示的控制光输入波形与信号光输出波形的对比表明信号光已被调制. 利用指数拟合估计输出信号光的上升下降时间分别为 1.56 与 1.53 ms, 相同条件下, 比 MZI 结构的全光开关更灵敏. 这个结果是因为 MI 系统中包含反射结构, 控制光与信号光两次通过铋量子点微纳光纤, 提升控制光热光效应的效果并使信号光产生更大的相移, 因此大大缩短了系统响应时间.

从图 5(c) 可以看出, 将 980 nm 的控制光功率固定在 60 mW 并从外部从 50 Hz 调制为 500 Hz 时, 输出信号光的形状从方波逐渐变到三角波, 峰值电压与调整频率成反比. 这两个现象的出现归因于铋沉积微纤维中热传导的缓慢响应.

另外, 微纳光纤本身较为脆弱, 机械强度低, 作为二维材料载体增加了系统的不稳定性. 针对这一问题, Chu 等^[108] 提出一种基于侧抛光双芯光纤

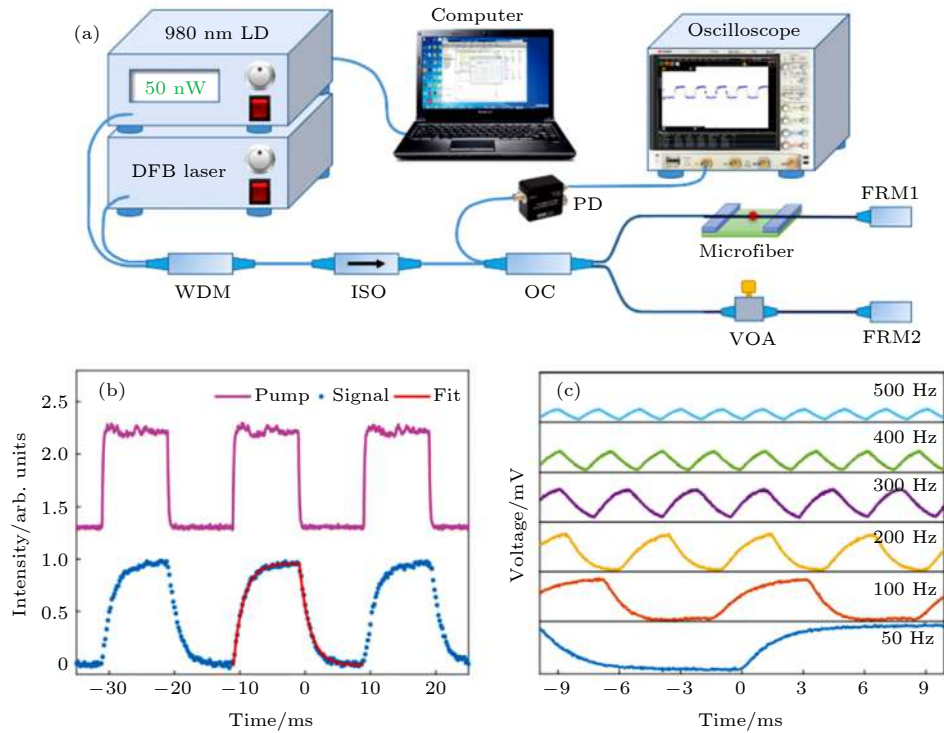


图 5 (a) MI 结构的全光开关实验装置^[104]; (b) 控制光和信号光的波形及拟合曲线^[104]; (c) 控制光调制频率改变时的信号光波形^[104]
 Fig. 5. (a) All-optical switch experimental device with MI structure; (b) waveforms of control light and signal light and their fitting curves; (c) waveforms of signal light when control light modulation frequency changes. Reprinted by permission from Ref. [104]. Copyright Journal of Materials Chemistry C.

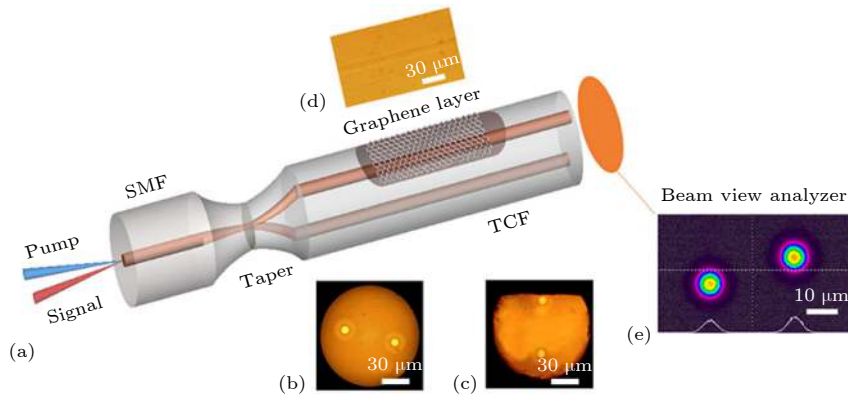


图 6 (a) MI 双芯光纤三维结构示意图^[108]; (b) 双芯光纤横截面^[108]; (c), (d) 双芯光纤抛光区域的横截面和抛光表面^[108]; (e) 双芯光纤输出光强度监视^[108]

Fig. 6. (a) Schematic diagram of the three-dimensional structure of MI twin-core fiber; (b) cross section of twin-core fiber; (c) cross section and (d) polished surface of the polished area of twin-core fiber; (e) twin-core fiber output light intensity monitoring. Reprinted by permission from Ref. [108]. Copyright Optics Letters.

的 MI 结构石墨烯全光调制方案, 其结构见图 6. 此方案显著提高了系统的稳定性, 并且将 MI 系统核心微型化. 实验使用 1550 nm 的信号光, 并使用经机械斩波器调制的 980 nm 抽运光调制信号光. 最终结果显示出 55.8 ms 的上升时间与 15.5 ms 的下降时间. 其中较长的上升时间可以通过抛光更多包层达到扩大石墨烯作用区域的效果来缩短.

3.3 PI 结构的全光开关

PI 结构的全光开关进一步提高了热光效应全光开关的切换速率. 如图 7(a) 所示, PI 结构的全光开关采用 LPE 法合成的二硫化钼 (MoS_2)-聚乙烯醇 (PVA) 薄膜通过 FC/APC 光纤连接器耦合^[106]. 在这个系统中, 980 nm 控制光与 1550 nm 信号光分别经偏振控制器 (PC) 调整获得稳定的输

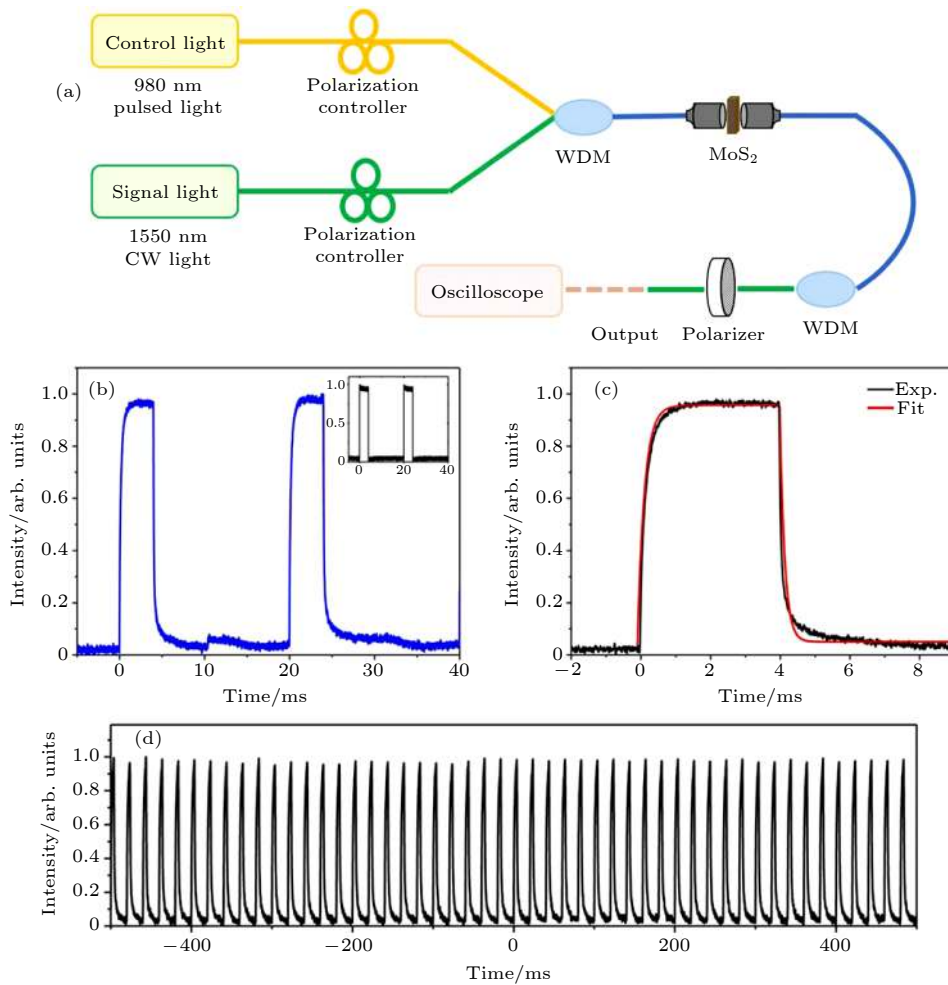


图 7 (a) PI 结构全光调制实验装置^[106]; (b) 信号光波形, 插图: 控制光波形^[106]; (c) 单个全光信号切换以及相应的拟合曲线^[106]; (d) 长期测量的输出信号光^[106]

Fig. 7. (a) PI structure all-optical modulation experimental device; (b) signal light waveform, illustration: control light waveform; (c) single all optical signal switching and corresponding fitting curve; (d) output signal light for long-term measurement. Reprinted by permission from Ref. [106]. Copyright Chinese Optics Letters.

出信号后通过 WDM 合路, 在 MoS₂-PVA 薄膜中产生热光效应之后在第二个 WDM 过滤控制光. 由偏振器选择信号光所需要的偏振态并输出调制后的信号光. 其中 MoS₂-PVA 薄膜夹在两个成角度的 FC/APC 光纤连接器之间.

图 7(b) 给出了系统的调制结果, 即输入的控制光与输出的信号光波形的对比图. 图 7(c) 则是通过指数拟合估计的系统的上升时间与下降时间, 分别为 324.5 和 353.1 μs. 与 MZI 结构和 MI 结构相比, 上升下降时间明显缩短. 这是因为相较于沉积有二维材料的微纳光纤, FC/APC 薄膜耦合方式有更快的热分布, 于是有更快的切换速率. 另外, 从图 7(d) 所示的长期输出脉冲序列可以观察到系统输出稳定. 这是因为在同一条光纤中传播的是两束互不干涉的光, 所以对于环境敏感性远低于

MZI 结构和 MI 结构.

3.4 微环结构的全光开关

本节将介绍基于石墨烯的微环结构全光开关^[107]. 这项工作充分利用了二维材料的紧凑性与灵活性, 缩小了设备体积, 并且有效提高石墨烯的热传导速率, 减少了响应时间.

全光开关的实验装置如图 8(a) 所示, 该装置使用耦合器将控制光与信号光耦合, 通过微纳光纤谐振器 (MFR) 后由另一个耦合器分路, 分别输出控制光与经调制的信号光. 其中, MFR 以利用火焰加热二步拉伸法制备的微纳光纤为基本结构, 一端连接标准光纤, 将其打结后, 使用锥形微纳光纤连接另一端. 之后将 CVD 法生长的石墨烯片干法转移到微纳光纤上, 得到石墨烯包裹的微纳光纤谐

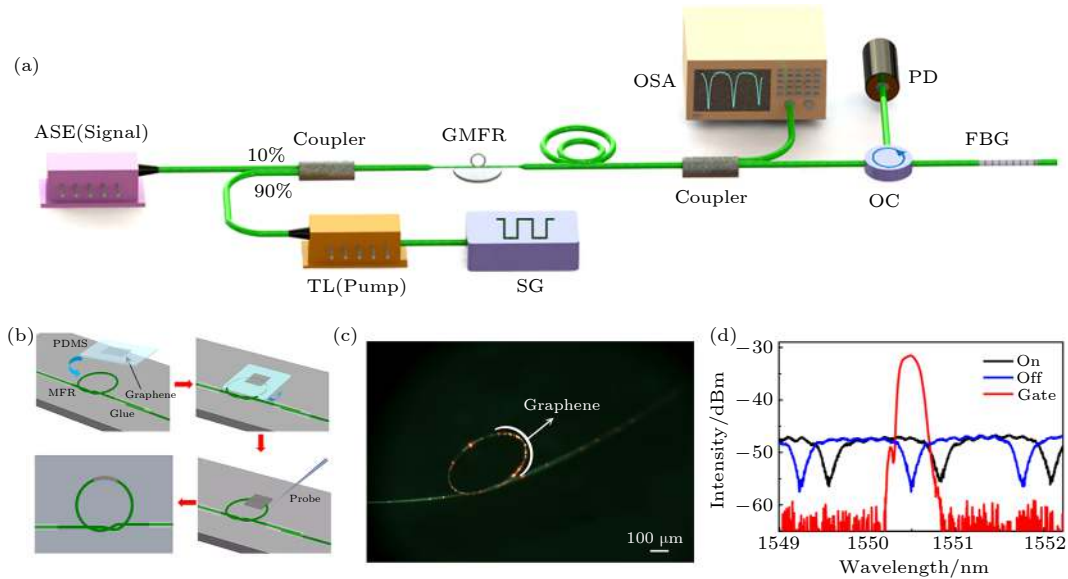


图 8 (a) 基于 MFR 的全光开关实验装置^[107]; (b) GMFR 制备过程^[107]; (c) GMFR 光学显微镜图像^[107]; (d) 控制光开 (黑色) 和控制光关 (蓝色) 的 GMFR 透射光谱, 红线表示 FBG 过滤的反射峰^[107]

Fig. 8. (a) All-optical switch experimental device; (b) GMFR preparation process; (c) GMFR optical microscope image; (d) GMFR transmission spectrum of controlled light on (black) and controlled light off (blue), the red line represents the reflection peak of FBG filtering. Reprinted by permission from Ref. [107]. Copyright Applied Physics Letters.

振器 (GMFR), 这一过程如图 8(b) 所示. 最终成品注入红光后散射的光学显微镜图像如图 8(c) 所示, 其 MFR 周长为 1.35 mm, 直径为 5 μm , 由白色弓形线表示的石墨烯包裹区域的长度为 0.18 mm. 实验采用工作带宽为 400 kHz 的窄带可调激光器 (TL) 作为控制光.

当控制光注入微环时, 部分具有共振波长的控制光将在 GMFR 中循环, 大量光功率被石墨烯片吸收转化为热量. 由于热光效应, 使得微纳光纤的透射谱发生红移. 经过 GMFR 的信号光透射率则会因此改变, 以实现光开关的功能, 并使用光纤布拉格光栅 (FBG, 中心波长: 1550 nm, 3 dB 带宽: 0.25 nm) 过滤后使用光电探测器对信号光进行分析.

为了进一步了解 GMFR 的运作机制, 使用光谱分析仪监测系统输出, 以得到打开 (关闭) 控制光时的透射光谱, 如图 8(d) 所示. 其中黑色为打开控制光时的透射谱, 蓝色为关闭控制光时的透射谱, 红色为经 FBG 过滤的系统输出波形. 打开 (关闭) 控制光时, 得到的系统输出信号光功率为 156 μW (7.28 μW), 即消光比为 13 dB. 最后得到实验输出的信号光与控制光波形对比见图 9, 信号光的上升时间为 294.7 μs , 下降时间为 212.2 μs . 这个结果比其他热光效应器件 (例如基于石墨烯

的 MI 结构全光调制器) 的毫秒级响应时间快 (微秒级), 这是由于小型化的石墨烯片快速散热以及谐振结构提高发热效率, 克服了传统热光效应所要求的长作用长度以及高抽运功率的缺点.

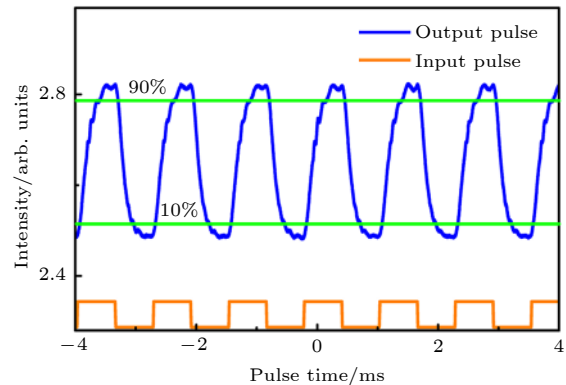


图 9 全光开关的信号光与控制光波形对比^[107]

Fig. 9. Comparison of signal light and control light waveforms of all-optical switches. Reprinted by permission from Ref. [107]. Copyright Applied Physics Letters.

本章的最后, 对表 2 所列基于二维材料的热光效应的全光器件的最新进展进行对比^[75,90,100–109]. 目前 MZI 结构的全光器件已对石墨烯、 WS_2 、MXene、磷烯和硼进行研究. 值得注意的是, 研究结果表明硼表现出较快的响应时间和优异的热光效应响应, 获得了 0.48 ms 的上升时间及 0.69 ms 的下降时间^[90]. 在这四种二维材料中, 石墨烯表

表 2 基于二维材料热光效应的全光纤器件总结

Table 2. Comparison of all-fiber devices based on two-dimensional material thermo-optic effect.

全光器件结构	二维材料类型	耦合形式	上升时间	下降时间	消光比/dB	控制效率/ $\pi \cdot \text{mW}^{-1}$	Ref.
MZI	graphene	MF	4.00 ms	1.40 ms	20	0.091	[101]
	Mxene	MF	4.10 ms	3.55 ms	18.53	0.061	[100]
	phosphorene	MF	2.50 ms	2.10 ms	17	0.029	[75]
	boron	MF	0.48 ms	0.69 ms	10.5	0.01329	[90]
	WS ₂	MF	7.30 ms	3.50 ms	15	0.0174	[102]
MI	antimonene	MF	3.20 ms	2.90 ms	25	0.049	[103]
	bismuthene	MF	1.56 ms	1.53 ms	25	0.076	[104]
	MXene	MF	2.30 ms	2.10 ms	27	0.034	[105]
	graphene	SPTCF	55.80 ms	15.50 ms	7	0.0102	[108]
PI	MoS ₂	TF	324.5 μs	353.1 μs	10	NA	[106]
micro-ring	graphenen	MF	294.7 μs	212.2 μs	13	0.115	[107]
	MXene	MF	306 μs	301 μs	12.9	0.196	[109]

注: MF, microfiber. TF, Thin film. SPTCF, side-polished twin-core fiber.

现出最高的控制效率, 每毫瓦抽运功率能产生 0.091π 的相移^[101]. 对于 MI 结构, 有铋、铋、MXene 和石墨烯四种二维材料的研究. 这一结构中普遍的高消光比归功于能使信号光与二维材料进行两次相互作用, 其中 MXene 的消光比高达 27 dB^[105], 而铋材料则在响应速度方面有较好的表现^[104]. 另外, 侧抛光的双芯光纤与 MI 结构契合度很高, 取代微纳光纤作为二维材料的载体将能有效提高系统的稳定性以及减小系统体积^[108]. PI 结构的全光器件表现出很快的响应时间, 上升时间为 324.5 μs , 并且抗干扰能力强, 但是消光比低^[107]. 对于谐振结构, 由于易于制造、低成本、微纳光纤易集成以及符合调制所需的自由光谱范围, GMFR 可能会扩展全光设备 (例如滤波器和慢光延迟线) 的使用范围. 此外, 由于 GMFR 的紧凑型封装和对石墨烯热光效应的增强作用, 它可以作为一个高性能平台应用于光纤传感器、非线性光学器件和超快调制器.

基于热光效应的全光调制器中的响应时间差异可以大概地从两个方面讨论, 一是不同的二维材料, 二是不同的系统. 根据表 2 分成两种, 即相同材料不同系统以及相同系统不同材料之间进行比较. 显然相对于不同材料, 不同系统之间的差异显得更大. 而相同二维材料的热光效应效率相同, 热导系数则不尽相同. 但二维材料的状态不同, 热导系数也会改变, 并且可以通过调整结构定向优化, 换句话说, 系统结构对响应时间的影响更为重要. 在系统相同材料不同时, 热光效应与热导系数共同

影响响应时间. 控制光功率相同时, 更强的热光效应将会在短时间产生更多的热量. 最终响应时间的极限则由导热系数决定, 更高的导热系数意味着更大的温度变化, 更短的响应时间. 热光效应与克尔非线性等其他效应相比, 尽管由于热传导速率的限制, 响应时间为微秒到毫秒, 但它们驱动器件所需要的抽运峰值功率更低. 当需要长时间保持状态时, 将会减少能量消耗. 因此, 热光全光器件是全光器件家族中必不可少的成员.

4 基于二维材料非线性效应的全光器件

全光控制另一重要机制是非线性效应中的可饱和吸收效应和光学克尔效应. 可饱和吸收效应是一个由价带耗尽, 导带填充和超快速带内载流子弛豫引起的过程^[110], 由输入功率相关的光吸收表现出来 (即随光强度的增加吸收减少). 光学克尔效应是一种三阶非线性光学效应, 其特征是在外加光场影响下, 介质某个极化方向产生正比于光强的折射率变化, 包括自相位调制^[111] (例如 Shao 等^[112] 利用碳纳米管自相位调制, 实现了时间常数 55 μs , 响应带宽 7 kHz 的全光调制)、自聚焦^[113] 和调制不稳定性^[114]. 本章将从三个方面进行介绍: 一是基于二维材料可饱和吸收效应用于抑制噪声的全光阈值器件; 二是基于克尔效应的全光调制器; 三是四波混频的应用.

4.1 基于可饱和吸收效应的全光阈值器

全光阈值器主要用于改善信号光质量, 提高信噪比. 从理论上讲, 基于可饱和吸收效应的全光阈值器是利用二维材料的可饱和吸收效应、低线性吸收和宽吸收带宽, 吸收相对低强度的噪声光, 而高强度的光将直接通过, 因此能过滤低功率的噪声, 信号光以较低的功率损失通过. 近年来对二维材料的研究表明, 二维材料具有很强的光-物质交互能力和非线性效应. 制作稳定性好、效率高的全光阈值器则需要利用二维材料的非线性效应 [76,115,116]. 目前已报道的几种全光阈值器的设计, 例如, 铌酸锂的二次谐波效应 (SHG) 的全光阈值器 [117]、基于黑磷的分布式反馈半导体激光器中的交叉增益调制效应的光学阈值器 [116] 等, 都有稳定性差的缺陷. 本节将介绍基于铋-微纳光纤结构的全光阈值器.

为研究铋的光-物质相互作用, Song 等 [76] 利用 LPE 法合成少层铋材料并沉积在微纳光纤上, 再通过飞秒脉冲激光测量与表征铋的可饱和吸收非线性特性. 具体的做法是放大激光光源后, 在光源光路上使用可变光衰减器连续地调整入射光的功率. 测量光路则由耦合器分为两个光路, 一路耦合铋沉积的微纳光纤并连接光功率计, 另一路则作为参考光连接与另一路相同的光功率计. 飞秒脉冲

测量的结果证明少层铋沉积的微纳光纤是有效的可饱和吸收体, 可用于超脉冲的全光阈值器.

图 10(a) 所示为全光阈值器实验装置示意图, 脉冲光源由锁模光纤激光器提供, 而 1 GHz 射频调制的低功率光作为噪声源 [76], 他们的波形分别为图 10(b) 和图 10(c). 混合噪声与脉冲光后, 脉冲波形如图 10(d) 所示. 使用耦合器将混合光分成两个光路, 一条路径耦合铋沉积的微纳光纤, 一条路径直接连接光功率计监控输入光功率. 当混合光注入系统时, 由于脉冲光的透射率比噪声高, 噪声的衰减更强, 所以通过系统之后, 噪声将被吸收, 脉冲光的信噪比得到提高. 如图 11(a) 和图 11(b) 所示为穿过铋沉积微纳光纤之前与之后的光脉冲 [76]. 可以看出, 通过铋沉积微纳光纤之后的光脉冲信噪比有明显的提高. 而无沉积的微纳光纤接入系统中重复实验时, 没有改善光脉冲信噪比的现象.

为进一步研究不同输入光功率下的可饱和吸收, Song 等 [76] 采用掺铒光纤放大器和可变光衰减器组合调整输入光功率. 实验结果显示, 随着输入光功率逐渐增加到 10 mW, 信噪比增强保持不变, 为 12 dB 左右. 铋样品在输入光功率为 10 mW 时将达到饱和, 并且最高信噪比增强为 12 dB. 最后, 实验通过每 8 h 测量一次输出波形验证了该系统较高的稳定性.

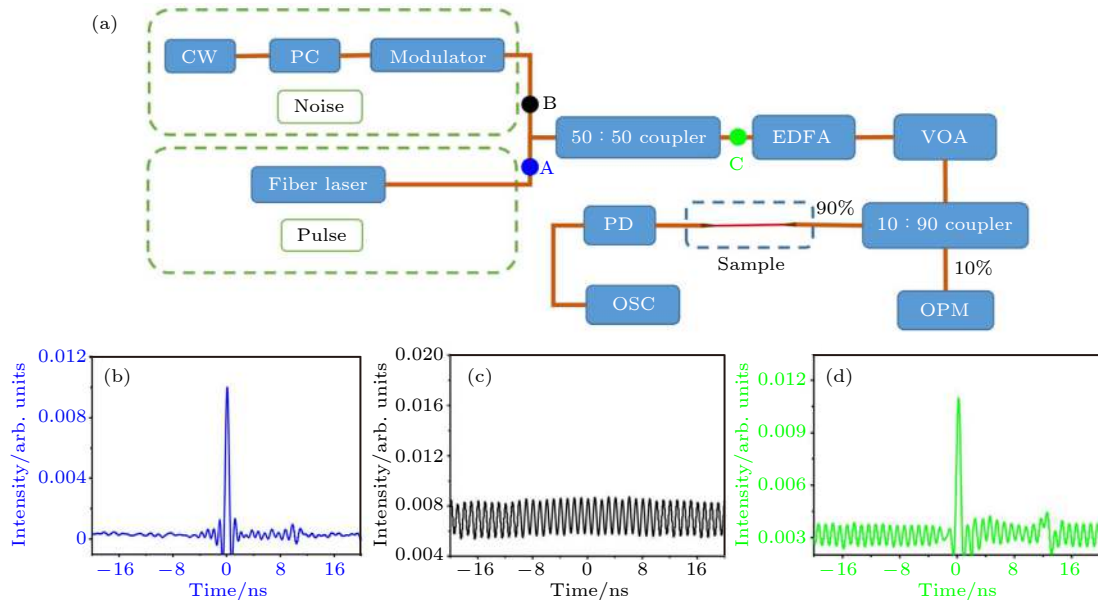


图 10 (a) 基于铋材料微纳光纤的全光阈值器实验装置 [76]; (b) 光纤激光源脉冲的波形 [76]; (c) 噪声脉冲的波形 [76]; (d) 光纤激光源和噪声源合并后的脉冲波形 [76]

Fig. 10. (a) Experimental diagram of all-optical thresholder; (b) pulse profile of fiber laser source; (c) noise pulse tracking; (d) merged pulse trajectory includes fiber laser source and noise source. Reprinted by permission from Ref. [76]. Copyright 2D Materials.

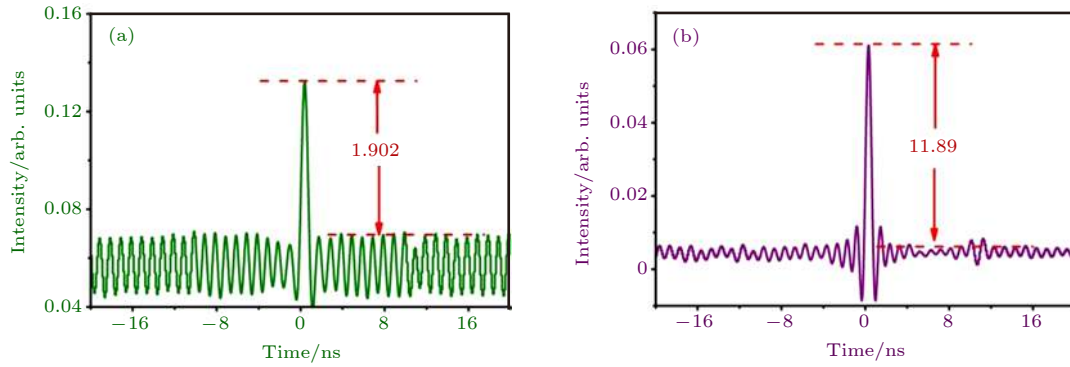


图 11 (a) 光脉冲穿过锑材料微纳光纤之前的波形^[76]; (b) 光脉冲穿过锑材料微纳光纤之后的波形^[76]

Fig. 11. (a) Waveform of light pulse before passing through antimony micro-nano fiber; (b) waveform of light pulse after passing through micro-nano fiber of antimony material. Reprinted by permission from Ref. [76]. Copyright 2D Materials.

4.2 基于光学克尔效应的全光调制器

光学克尔效应是非线性光学的一个重要分支. 本节将介绍 MZI 结构基于光学克尔效应的全光石墨烯相位调制器^[118]. 调制器的结构如图 12(a) 所示, 调制过程与上文所述类似, 信号光注入系统后

被分成 90:10 两臂, 两个可变光衰减器微调两臂功率. 控制光从上臂经 WDM 与信号光合路经过包裹石墨烯的微纳光纤 (GCM), 产生自相位调制. GCM 是通过将 CVD 制备的石墨烯片包裹在微纳光纤上制作而成^[119], 其光学显微镜图像如图 12(b) 所示. 可以清晰地看到石墨烯片包裹微纳

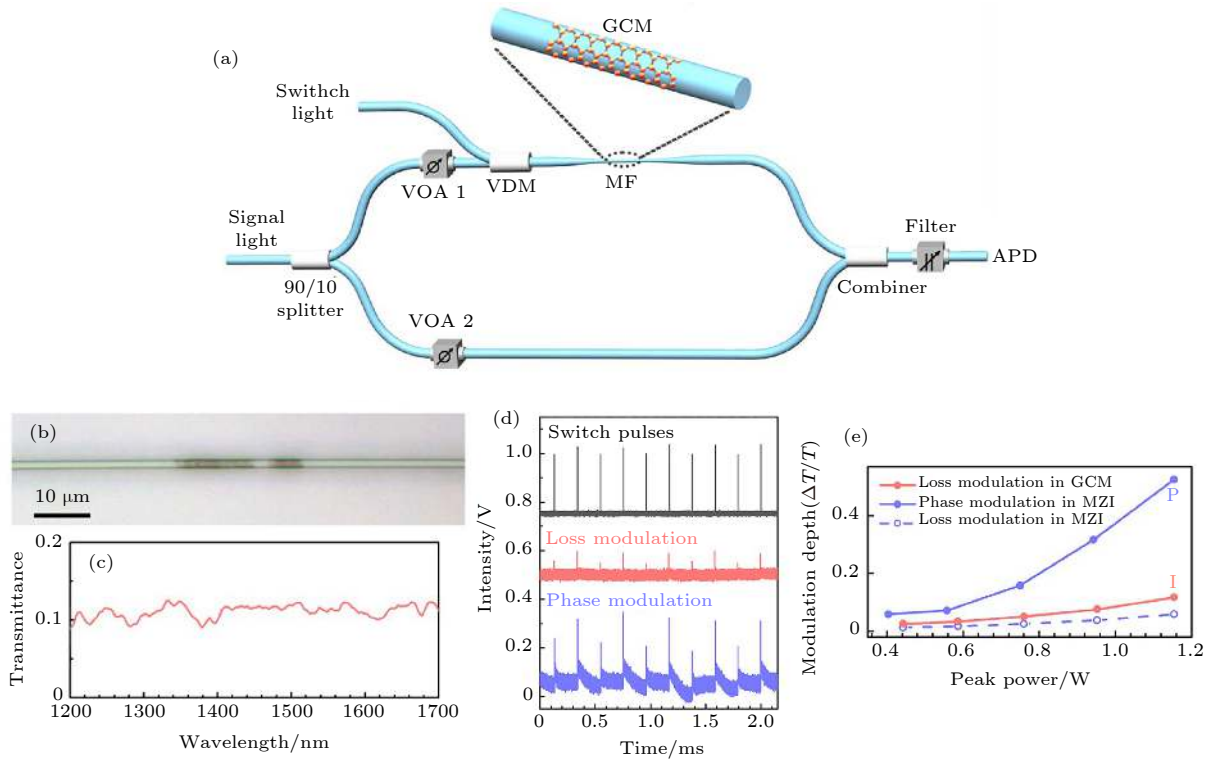


图 12 (a) 基于石墨烯光克尔效应的全光相位调制器实验装置^[118]; (b) GCM 的光学显微镜图像^[118]; (c) GCM 的传输频谱^[118]; (d) 顶部: 成对的开关脉冲; 中部: GCM 的光纤的脉冲调制信号; 底部: 包含 GCM 的 MZI 脉冲调制信号^[118]; (e) 对于包含 GCM 的损耗调制 (红色实线), MZI 调制器相位调制 (红色实线) 以及 MZI 的损耗调制 (蓝色虚线) 的输出信号的 MD 与峰值开关功率的关系^[118]

Fig. 12. (a) Experimental device of all-optical phase modulator based on graphene optical Kerr effect; (b) optical microscope image of GCM; (c) transmission spectrum of GCM; (d) top: paired switching pulses; middle: pulse modulation signal of GCM fiber; bottom: MZI pulse modulation signal containing GCM; (e) for loss modulation including GCM (solid red line), MZI modulator phase modulation (solid red line) and MZI loss modulation (blue dotted line) output signal modulation depth and peak switching power relationship. Reprinted by permission from Ref. [118]. Copyright Optica.

光纤. 其中石墨烯是多层结构, 目的是为了获得更强的非线性效应并降低损耗^[120]. 其包裹的长度为 20 μm , 线性透射率 (OT) 表征结果如图 12(c) 所示. 其中, GCM 的 OT 在 10% 左右波动是由于光纤耦合器的散射损耗. 而通过使用 MZI 结构, 可以使系统的 OT 提高到 19%. MZI 结构具有更高的调制深度 (MD) 与透射率优势.

实验中使用 1550 nm 的 CW 光作为信号光, 波长 1064 nm, 带宽 4.8 Hz 的光脉冲作为控制光, 如图 12(d) 中的黑线所示. 通过控制开关光, 研究证明 GCM 工作时由于石墨烯的非线性效应同时对信号光的强度和相位进行调制, 并且主要受到可饱和吸收效应的影响. 因此, 为了避免可饱和吸收对实验结果的影响, 在 MZI 结构的基础上将注入两臂的信号光功率比改为 90:10. 实际上, 系统输出的信号光中只有一半信号光通过 GCM, 尽可能地减小了可饱和吸收效应产生的强度调制的影响, 图 12(d) 红线所示为损耗产生的调制, 蓝线为相位调制. 从图 12(e) 可以看到, 随着抽运功率的提高,

调制器的损耗被很好地控制了, 并且功率与 MD 成正比. 其中, 蓝线是相位调制所能达到的 MD. 红线与虚线分别是 GCM 和 MZI 的损耗所产生的 MD. 结合图 12(d), 可知这一系统相位调制起主导作用. 于是系统输出就是经光学克尔效应相位调制的信号光.

最终实验输出的波形如图 13(a)–(c) 所示, 轮廓与图 12(d) 所示控制光基本一致, 显然是由于光学克尔效应导致的折射率改变引起的相位调制, 达到皮秒级别的时间响应. 但上升与下降时间受限于石墨烯不可避免的热光效应, 分别为 3 和 100 μs . 总之, 基于二维材料光克尔效应的相位调制器具有很快的时间响应以及理想的 MD, 并且这一结构可以通过增加石墨烯包层的长度进一步提高 MD, 但这意味着 OT 将会降低, 石墨烯的损耗很大程度地限制了 OT 与 MD 的优化. 此外, 相位调制的结果依赖于 MZI 两臂的初始相位差, 即工作点的设置, 这一点使其可达到调整响应速度, 甚至负调制的效果, 较为灵活. 在 MD 和灵活性方面, 基于二维材料非线性效应的调制器中, 光克尔效应的相位调制器优势较为明显.

4.3 基于四波混频的波长转换

除利用二维材料光克尔效应以及可饱和吸收以外, 四波混频 (FWM) 也是全光调制的一个有效方式. 石墨烯、TMDs 等众多二维材料在 FWM 中具有很高的可行性. 但石墨烯的弱吸收^[121], TMDs 在可见光范围内的光响应限制了它们的应用. 在这方面, BP 除稳定性较差外, 带隙可调将特别适合于光通信设备. 本节将介绍一个基于 BP 的四波混频波长转换器^[122].

系统耦合方式为上文介绍的具有二维材料涂层的微纳光纤, 其结构如图 14(a) 所示. 该研究使用 1550.70 nm 的分布式反馈半导体激光器作为信号光, 使用 PC1 调整信号光偏振态, 最大化通过 10 GHz LiNbO₃ 强度调制器之后的输出功率. 另一个来自 1552.35 nm 外腔激光器的可调连续光用作抽运光. 这两束光分别经 PC2 和 PC3 对齐后通过 3 dB 耦合器合路. 为使 FWM 的结果更直观地得到体现, 经高功率掺铒光纤放大器与光学带通滤波器放大之后再经过具有 BP 涂层的微纳光纤并在其中发生 FWM 效应产生新波长的经调制光. 最后使用光谱分析仪分析结果, 如图 14(b) 所示.

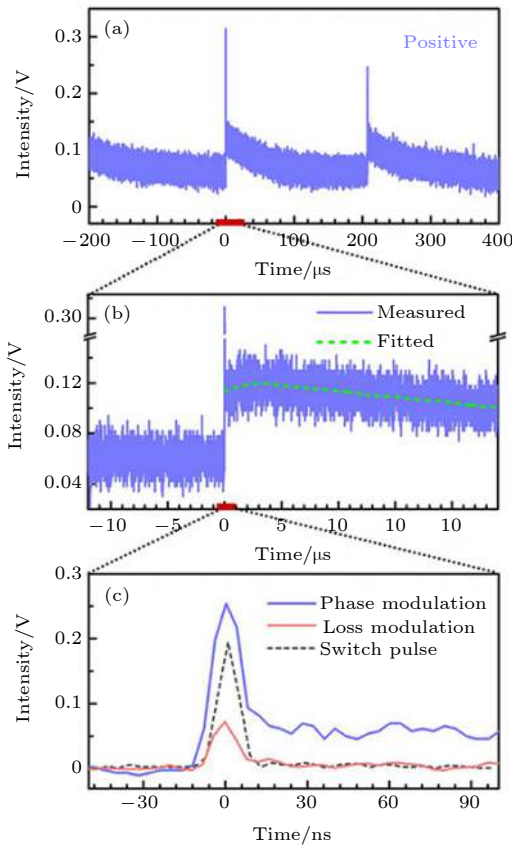


图 13 输出信号光在不同时间范围内的波形^[118]

Fig. 13. Waveforms of the output signal light in different time ranges. Reprinted by permission from Ref. [118]. Copyright Optica.

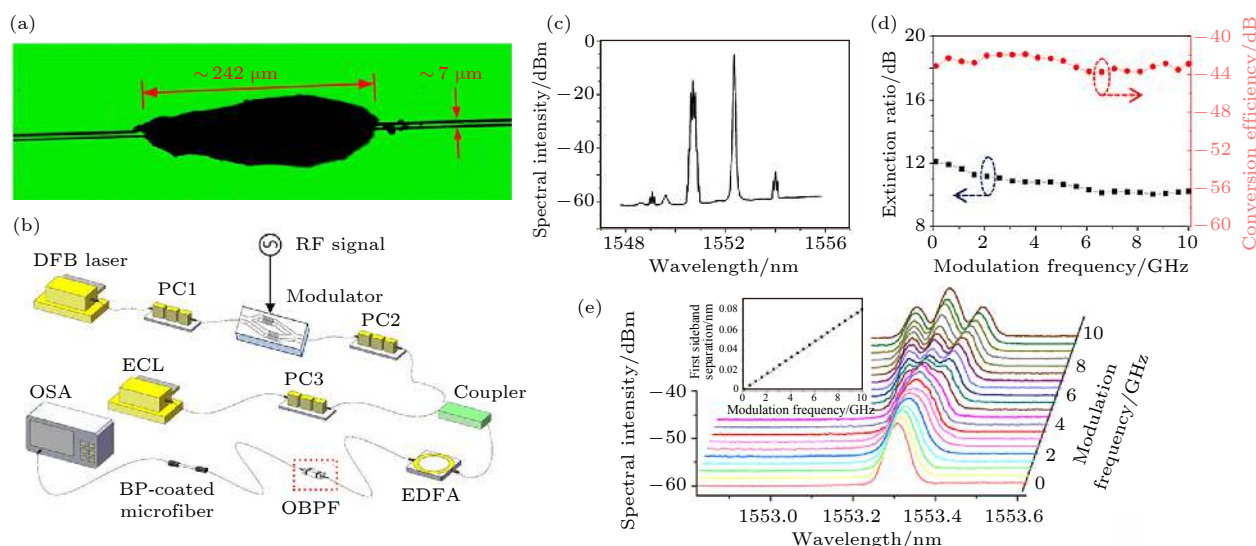


图 14 (a) 具有 BP 涂层的微纳光纤光学显微镜图像^[122]; (b) 基于 BP 四波混频的波长转换器示意图^[122]; (c) 系统输出光谱图^[122]; (d) 不同 RF 频率下的消光比和转换效率^[122]; (e) 不同 RF 频率下对应的 FWM 光频谱细节^[122]

Fig. 14. (a) Optic microscope image of BP-coated microfiber; (b) schematic diagram of wavelength converter based on BP four-wave mixing; (c) system output spectrum; (d) extinction ratio and conversion at different RF frequencies efficiency; (e) details of the corresponding FWM optical spectrum at different RF frequencies. Reprinted by permission from Ref. [122]. Copyright Acs Photonics.

输出光谱如图 14(c) 所示, 分别在 1549.05 和 1554.0 nm 处产生了经转换的光. 可以注意到光谱峰的不平整, 这是在信号光中的可调射频 (RF) 信息. 新转换出的光光谱峰与信号光具有高度相似性, 这代表信息被成功加载调制. 由于光学带通滤波器的存在, 这一结果排除了系统中的其他非线性效应引起的 FWM, 比如由 BP 微纳光纤与掺铒光纤放大器产生的自发辐射放大. Zheng 等^[122] 已完整地论证了系统中 BP 的关键作用与良好的稳定性. 但当抽运光波长变化时, 由于走离效应, 输出光将会失谐, 相位不匹配, 导致转换效率降低. 图 14(d) 与图 14(e) 给出的分别是 RF 频率步进到 10 GHz 时的消光比和频谱变化, 可以看到转换效率几乎不变地保持在大概 -42.9 dB, 消光比则从 12 dB 减小到 10 dB. 在这一过程中, 随着信号光频率的提高, 输出的新的转换波频谱也随之变宽变清晰. 消光比的变化主要是由于掺铒光纤放大器中的非线性效应. 此外, 在高频率信号光下, FWM 频谱不具有高阶信号, 这是因为信号过弱以至于光谱分析仪的精度不足以检测到. 同时, 高阶弱信号被自发辐射的噪声阻塞, 进一步加大检测难度. 也是因为这个原因, Zheng 等^[122] 没有对系统的误码率进行讨论.

这项工作证明了信号光中的信息可以通过二维材料的 FWM 效应加载到新产生的 FWM 光中,

未来可以考虑优化结构, 进一步提高 FWM 转换效率. 总之, 所有的测试结果表明, 这种新型的非线性光学器件可以用于全光信号处理扩展通信频段, 并具有相当高的稳定性. 未来可以尝试寻找一个光通信频段内的, 具有 BP 特性但更稳定的材料应用于这一系统进一步地优化.

不同于热光响应的缓慢响应, 基于非线性效应的全光器件利用二维材料优秀的非线性特性, 达到了更快的响应速度并且功耗更低, 产生的热量也更低, 是目前实现全光信号处理的主要器件. 表 3 总结了基于不同二维材料非线性效应的全光器件^[116,118,122–128], 包括全光调制器^[118,122–124]、全光开关^[116,125] 以及波长转换器^[122–124,126–128]. 其中全光开关也即全光强度调制器, 多通过二维材料饱和效应实现, 其调制速度受到控制光频率的限制, 基本没有响应时间, 是最有希望达到二维材料理论速度限制的一种调制器, 也是目前调制速度最快的调制器. 对于克尔效应与四波混频, 因为石墨烯的弱吸收, 其光操纵能力有限, 并且损伤阈值低, 不适合用于这一类型的调制器. 而 TMDs 的光响应波段通常在可见光范围内, 这限制了其在光通信频段中的应用. 至于 BP^[129,130], 尽管它具有可控带隙, 但是它受到弱稳定性的高度限制^[131,132], 通常需要通过离子掺杂或用其他层状材料涂覆来增加其稳定性^[133]. 虽然已成功应用于此种类型的调制器, 但

表 3 基于不同二维材料非线性效应的全光器件总结
Table 3. Comparison of all-optical devices based on nonlinear effects of different two-dimensional materials.

非线性效应类型	二维材料类型	耦合形式	上升时间	下降时间	消光比/dB	调制深度/%	控制效率 $\pi\cdot\text{mW}^{-1}$	转换效率/dB	调谐范围/nm	Ref.
SA	graphene	MF	~ 0	~ 0	—	73.08, 79.11, 81.38 (1310 nm, 1550 nm, 1610 nm)	—	—	—	[125]
	BP	MF	~ 0.2 ns	~ 0.4 ns	—	4.7	—	—	—	[116]
Kerr effect	graphene	MF	3 μs	100 μs	—	—	—	—	—	[118]
	bismuthine	MF	—	—	22	—	—	—	—	[123]
	Topological insulators	MF	—	—	14	—	0.0125	—	—	[124]
	BP	MF	—	—	26	—	0.0081	—	—	[122]
	antimonene	MF	—	—	12	—	0.0071	126	—	[122]
FWM	bismuthine	MF	—	—	17	—	—	-65	4	[123]
	Topological insulators	MF	—	—	—	—	—	-34	6.4	[124]
	BP	MF	—	—	10	—	—	-60	3	[122]
	antimonene	MF	—	—	13	—	—	-65	5.5	[126]
	MXene	MF	—	—	13	—	—	-59	5	[127]
	graphene	MF	—	—	13	—	—	-59	5	[128]

注: MF, microfiber. SA, saturable absorption. FWM, four-wave-mixing.

成本较高, 制备复杂. 全光相位调制器多基于克尔效应, 也称为克尔相移器. 其控制效率较高, 系统稳定, 能有效地降低成本与功耗. 四波混频对信息的复制较为完整. 四波混频与克尔效应均需要很高的抽运光功率, 对设备要求较高, 而输出的光信号强度却微弱, 甚至光谱仪无法检测. 提高输出光功率又是与系统的插入损耗互斥的, 距离实际应用仍存在很大改进空间. 另外, 还有相干吸收效应, Rao 等^[134] 基于石墨烯在 Sagnac 干涉仪中达到了 80% 的调制效率.

5 讨论与总结

实际上, 石墨烯的生产已经逐渐由实验室中合成少量薄膜开始, 逐渐发展到大规模制作^[135]. 在可以预见的未来, 二维材料大规模合成, 制作成本进一步降低, 将能应用于多种光学设备, 如基于二维材料的全光信号处理作为逻辑运算单元^[136,137] 应用到人工智能系统^[138-142]、超灵敏传感器、超高密度数据存储等. 二维材料的紧凑性及机械灵活性很好地迎合各种器件高度集成化微型化的需求. 除了制备工艺的不断成熟, 新的二维材料也不断被报道, 如钙钛矿^[143-145]、氧化石墨烯^[146,147]、拓扑绝缘体^[93,148,149] 等, 它们在全光调制中的应用仍然有待

开发, 二维材料的研究只是刚刚开始.

对于光学调制器, 传统电光调制器达到了 30 GHz 以上的输出^[61], 已经逼近物理极限, 渐渐不能满足日益增长的需求. 于是越来越多的研究期望在全光系统中寻找解决方案. 从全光控制器件和二维材料的结合方式看, 目前二维材料与全光控制器件耦合的载体主要有三种: 微纳光纤、光纤耦合器以及波导. 微纳光纤具有强倏逝场, 很好地契合二维材料的强光-物质相互作用, 并且体积较小, 灵活, 对全光纤系统兼容性好; 光纤耦合器通常是利用光沉积将二维材料沉积在接头纤芯, 这一方式操作简单, 但体积较大, 沉积效果不佳, 适合初步测试系统以及表征材料特性; 波导结构是最有潜力的结构, 体积小, 与现代工艺兼容, 并且小体积的二维材料表现出卓越的光学性质, 比如石墨烯的损耗大小与作用面积成反比, 更小体积的石墨烯能有更高的 MD 与 OT. 由于二维材料体积小、损耗小, 抽运光将能使用更低的功率, 热效应所造成的延时也能大幅缩短 (即有更快的响应速度). 并且与业界微型化的需求方向是一致的.

从全光器件的结构看, 分为非谐振设计 (MZI 结构、MI 结构和 PI 结构) 与谐振设计 (微环谐振器). 非谐振设计主要是利用光的干涉原理实现光开关与光调制的功能. MZI 结构的调制器将信号

光分为两臂, 二维材料只存在于其中一臂, 很好地减少了对信号光功率的吸收损耗, 比起单一光路的损耗调制器有更高的 OT 与 MD, 同时也降低了对控制光功率的要求. MI 结构则是 MZI 结构的改良版, 改善了 MZI 结构的不稳定性. 由于存在反射结构使得信号光与控制光能通过二维材料两次, 提高了热光效应的效率, 所以能大大缩短响应时间, 同时有更好的 MD 和 OT. PI 结构是非谐振设计中最优秀的结构, 具有 MZI 结构和 MI 结构的优点的同时, 最大程度地避免了环境的干扰, 系统稳定性最佳. 而谐振设计较非谐振设计更为优秀, 微环谐振器的存在, 使得二维材料体积能够尽可能地小. 这意味着有更高的 OT、更快的响应时间, 并且很适合集成到波导, 实现低控制光功率的调制, 将会是未来全光控制器件结构发展的一个重要方向.

从全光器件的原理看, 目前主要利用二维材料的热光效应以及非线性效应. 热光效应理论体系完善, 二维材料所具有的高热导率, 应用于相位调制有比较好的表现, 并且有良好的调制深度, 但容易受到环境干扰, 响应时间受散热速度的限制. 非线性效应较为丰富, 还有很多研究的空间. 其中可饱和吸收效应是最成熟的调制方式, 其具有很宽的工作带宽、快速的响应和微型尺寸. 大量工作已使得基于此原理的器件性能稳定增长, 尤其是超快脉冲的产生. 光学克尔效应对实现复杂功能较为友好, 拥有不逊色于可饱和吸收效应的响应速度, 但会受到热光效应的干扰波动.

目前全光调制要与电门控竞争的关键在于解决调制深度不足以及能耗过高问题. 在调制深度方面, 可以考虑采用相位调制的方式, 只要致力于产生足够的相移, 调制深度就相当于消光比; 在能耗方面, 通过优化结构, 采用类似于微环谐振器, 集成波导等, 尽可能地缩小二维材料的体积, 就可以大大降低能耗. 解决这两个问题, 二维材料的全光控制优势将会相当明显. 因此将来应更多地往高度集成光波导的方向发展. 此外, 热光效应对环境温度的敏感性也可作为全光系统集成温度传感芯片的一个研究方向.

全光信号处理不仅为光电子学带来了光对光直连的方便, 它使得许多新概念设备成为了可能, 并应用到全光路由和逻辑门^[2,78]、光学计算、光子人工智能和光学神经网络、中红外和太赫兹生物传感等领域, 彻底改变人们对于光子学的认知. 但全

光控制器件的应用仍然存在许多挑战, 例如, 没有实现弱光控制强光、结合光开关与光放大的功能; 二维材料的高吸收损耗难以避免, 导致 MD 和 OT 较电光调制低并且需要毫瓦级的功率消耗等. 总之, 距离实现光通信中的应用还有很大的困难. 笼统地说, 电光和全光调制区别是用电场或者光场的手段对光学介质的特性进行调控, 进而影响光的强度、相位、偏振等特性. 电光调制主要是用两种方式: 电加热材料改变折射率, 结合干涉仪结构, 实现相位调制. 另一种方式是利用电致材料吸收变化, 实现光的强度调制. 而全光调制的方式较多, 特别是利用材料的非线性特性, 可优先实现高速调制, 波长转化技术也易于拓展通信容量. 虽然基于二维材料的全光调制器表现出了优秀的工作带宽以及响应速度, 但遗憾的是没有一整套的全光系统方案, 研究全光控制器件不得不考虑与现有工艺、电子系统的兼容性, 为全光控制领域的发展带来不小的挑战. 目前可以从两个方向突破: 1) 二维材料与微纳光子器件结合, 有望实现高速低功耗光调制器. 如二维材料与等离子体结合, 实现了消光比为 3.5 dB, 响应时间小于 100 fs, 功耗为 35 fJ 的全光开关^[14]; 二维材料与微环谐振腔结合^[150–152], 实现了百纳秒级的效应时间以及 $0.164\pi/\text{mW}$ 的谐振效率^[153]. 2) 探索具有超快载流子驰豫的新型二维材料, 例如磷化镓^[154]等.

总之, 本文基于二维材料的热光效应和非线性效应, 回顾了全光器件的研究现状, 然后讨论了全光器件的挑战和机遇. 总体而言, 基于 2D 材料的全光控制已引起了极大的关注, 接连取得突破, 有望保持高速发展. 期望在未来, 全光控制器件会成为各种全光系统的基石, 推动科学进步.

感谢张晗教授的帮助与指导.

参考文献

- [1] Koos C, Vorreau P, Vallaitis T, et al. 2009 *Nat. Photonics* **3** 216
- [2] Willner A E, Khaleghi S, Chitgarha M R, et al. 2014 *J. Lightwave Technol.* **32** 660
- [3] Bigo S, Leclerc O, Desurvire E 1997 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **3** 1208
- [4] Slavik R, Parmigiani F, Kakande J, et al. 2010 *Nat. Photonics* **4** 690
- [5] Hu X, Wang A, Zeng M, et al. 2016 *Sci. Rep.-UK* **6** 32911
- [6] Koos C, Jacome L, Poulton C, et al. 2007 *Opt. Express* **15** 5976

- [7] Patel N S, Rauschenbach K A, Hall K L 1996 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **8** 1695
- [8] Wang J, Kahn J M 2004 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **16** 1397
- [9] Alloatti L, Palmer R, Diebold S, et al. 2014 *Light-Sci. Appl.* **3** e173
- [10] Soref R A, Bennett B R 1987 *IEEE J. Quantum Electron.* **23** 123
- [11] Wooten E L, Kissa K M, Yi-Yan A, et al. 2000 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **6** 69
- [12] Wang C, Zhang M, Chen X, et al. 2018 *Nature* **562** 101
- [13] Grinblat G, Abdelwahab I, Nielsen M P, et al. 2019 *ACS Nano* **13** 9504
- [14] Ono M, Hata M, Tsunekawa M, et al. 2020 *Nat. Photonics* **14** 37
- [15] Almeida V R, Barrios C A, Panepucci R R, et al. 2004 *Nature* **431** 1081
- [16] Hu X, Jiang P, Ding C, et al. 2008 *Nat. Photonics* **2** 185
- [17] Volz T, Reinhard A, Winger M, et al. 2012 *Nat. Photonics* **6** 605
- [18] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. 2004 *Science* **306** 666
- [19] Novoselov K S, Jiang D, Schedin F, et al. 2005 *Proc. Natl Acad. Sci. U.S.A.* **102** 10451
- [20] Zhang H 2015 *ACS Nano* **9** 9451
- [21] Zhang Y B, Tan Y W, Stormer H L, et al. 2005 *Nature* **438** 201
- [22] Stoller M D, Park S, Zhu Y, et al. 2008 *Nano Lett.* **8** 3498
- [23] Lee C, Wei X, Kysar J W, et al. 2008 *Science* **321** 385
- [24] Nair R R, Blake P, Grigorenko A N, et al. 2008 *Science* **320** 1308
- [25] Balandin A A, Ghosh S, Bao W, et al. 2008 *Nano Lett.* **8** 902
- [26] Fiori G, Bonaccorso F, Iannaccone G, et al. 2014 *Nat. Nanotechnol.* **9** 768
- [27] Xia F, Wang H, Xiao D, et al. 2014 *Nat. Photonics* **8** 899
- [28] Koppens F H L, Mueller T, Avouris P, et al. 2014 *Nat. Nanotechnol.* **9** 780
- [29] Cepellotti A, Fugallo G, Paulatto L, et al. 2015 *Nat. Commun.* **6** 6400
- [30] Pakdel A, Bando Y, Golberg D 2014 *Chem. Soc. Rev.* **43** 934
- [31] Huang X, Zeng Z, Zhang H 2013 *Chem. Soc. Rev.* **42** 1934
- [32] Tan C, Zhang H 2015 *Chem. Soc. Rev.* **44** 2713
- [33] Lv R, Robinson J A, Schaak R E, et al. 2015 *Accounts Chem. Res.* **48** 56
- [34] Zhi C, Bando Y, Tang C, et al. 2009 *Adv. Mater.* **21** 2889
- [35] Zhang J, Chen Y, Wang X 2015 *Energy Environ. Sci.* **8** 3092
- [36] Osada M, Sasaki T 2009 *J. Mater. Chem.* **19** 2503
- [37] Ma R, Sasaki T 2015 *Accounts Chem. Res.* **48** 136
- [38] Wang Q, O'Hare D 2012 *Chem. Rev.* **112** 4124
- [39] Naguib M, Mochalin V N, Barsoum M W, et al. 2014 *Adv. Mater.* **26** 992
- [40] Wang C, Wang Y Z, Jiang X T, et al. 2019 *Laser Phys. Lett.* **16** 651076
- [41] Wang C, Liu J, Zhang H 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 188101 (in Chinese) [王聪, 刘杰, 张晗 2019 *物理学报* **68** 188101]
- [42] Bae S, Kim H, Lee Y, et al. 2010 *Nat. Nanotechnol.* **5** 574
- [43] Bao Q, Zhang H, Wang Y, et al. 2009 *Adv. Funct. Mater.* **19** 3077
- [44] Song Y, Jang S, Han W, et al. 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 511225
- [45] Tan W D, Su C Y, Knize R J, et al. 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 311063
- [46] Hasan T, Sun Z, Wang F, et al. 2009 *Adv. Mater.* **21** 3874
- [47] Sun Z, Hasan T, Torrisi F, et al. 2010 *ACS Nano* **4** 803
- [48] Sun D, Divin C, Rioux J, et al. 2010 *Nano Lett.* **10** 1293
- [49] Polat E O, Kocabas C 2013 *Nano Lett.* **13** 5851
- [50] Liu M, Yin X, Ulin-Avila E, et al. 2011 *Nature* **474** 64
- [51] Lee C C, Mohr C, Bethge J, et al. 2012 *Opt. Lett.* **37** 3084
- [52] Baylam I, Cizmeciyan M N, Ozharar S, et al. 2014 *Opt. Lett.* **39** 5180
- [53] Liu M, Yin X, Zhang X 2012 *Nano Lett.* **12** 1482
- [54] Lee E J, Choi S Y, Jeong H, et al. 2015 *Nat. Commun.* **6** 6851
- [55] Lee C, Suzuki S, Xie W, et al. 2012 *Opt. Express* **20** 5264
- [56] Martinez A, Sun Z 2013 *Nat. Photonics* **7** 842
- [57] Luo Z, Wu D, Xu B, et al. 2016 *Nanoscale* **8** 1066
- [58] Martinez A, Yamashita S 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 411184
- [59] Li W, Chen B, Meng C, et al. 2014 *Nano Lett.* **14** 955
- [60] Gao Y, Shiue R, Gan X, et al. 2015 *Nano Lett.* **15** 2001
- [61] Phare C T, Lee Y D, Cardenas J, et al. 2015 *Nat. Photonics* **9** 511
- [62] Schall D, Neumaier D, Mohsin M, et al. 2014 *ACS Photonics* **1** 781
- [63] Wang F, Zhang Y, Tian C, et al. 2008 *Science* **320** 206
- [64] Zanella I, Guerini S, Fagan S B, et al. 2008 *Phys. Rev. B* **77** 734047
- [65] Han M Y, Oezylmaz B, Zhang Y, et al. 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 206805
- [66] Ni Z H, Yu T, Lu Y H, et al. 2008 *ACS Nano* **2** 2301
- [67] Mak K F, Lee C, Hone J, et al. 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 136805
- [68] Splendiani A, Sun L, Zhang Y, et al. 2010 *Nano Lett.* **10** 1271
- [69] Bridgman P W 1914 *J. Am. Chem. Soc.* **36** 1344
- [70] Wang X, Lan S 2016 *Adv. Opt. Photonics* **8** 618
- [71] Yuan H, Liu X, Afshinmanesh F, et al. 2015 *Nat. Nanotechnol.* **10** 707
- [72] Xia F, Wang H, Jia Y 2014 *Nat. Commun.* **5** 4458
- [73] Wang X, Jones A M, Seyler K L, et al. 2015 *Nat. Nanotechnol.* **10** 517
- [74] Li D, Jussila H, Karvonen L, et al. 2015 *Sci. Rep.-UK* **5** 15899
- [75] Wang Y, Zhang F, Tang X, et al. 2018 *Laser Photonics Rev.* **12** 1800016
- [76] Song Y, Liang Z, Jiang X, et al. 2017 *2D Mater.* **4** 450104
- [77] Anasori B, Lukatskaya M R, Gogotsi Y 2017 *Nat. Rev. Mater.* **2** 16098
- [78] Jhon Y I, Koo J, Anasori B, et al. 2017 *Adv. Mater.* **29** 1702496
- [79] Naguib M, Mashtalir O, Carle J, et al. 2012 *ACS Nano* **6** 1322
- [80] Ying Y, Liu Y, Wang X, et al. 2015 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **7** 1795
- [81] Urbankowski P, Anasori B, Makaryan T, et al. 2016 *Nanoscale* **8** 11385
- [82] Jiang X, Liu S, Liang W, et al. 2018 *Laser Photonics Rev.* **12** 1700229
- [83] Li R, Zhang L, Shi L, et al. 2017 *ACS Nano* **11** 3752
- [84] Liu B, Zhou K 2019 *Prog. Mater. Sci.* **100** 99
- [85] Wang K, Feng Y, Chang C, et al. 2014 *Nanoscale* **6** 10530
- [86] Demetriou G, Bookey H T, Biancalana F, et al. 2016 *Opt. Express* **24** 13033
- [87] Wang K, Szydłowska B M, Wang G, et al. 2016 *ACS Nano* **10** 6923
- [88] Ronchi R M, Arantes J T, Santos S F 2019 *Ceram. Int.* **45**

- 18167
- [89] Zheng X, Chen R, Shi G, et al. 2015 *Opt. Lett.* **40** 3480
- [90] Guo Q, Wu K, Shao Z, et al. 2019 *Adv. Opt. Mater.* **7** 1900322
- [91] Zhou H, Cai Y, Zhang G, et al. 2017 *NPJ 2D Mater. Appl.* **1** 14
- [92] Sotor J, Sobon G, Abramski K M 2014 *Opt. Express* **22** 13244
- [93] Lee J, Koo J, Jhon Y M, et al. 2014 *Opt. Express* **22** 6165
- [94] Sotor J, Sobon G, Macherzynski W, et al. 2014 *Laser Phys. Lett.* **11** 55102
- [95] Zeng Z, Yin Z, Huang X, et al. 2011 *Angew. Chem. Int. Ed.* **50** 11093
- [96] Aharon E, Albo A, Kalina M, et al. 2006 *Adv. Funct. Mater.* **16** 980
- [97] Hernandez Y, Nicolosi V, Lotya M, et al. 2008 *Nat. Nanotechnol.* **3** 563
- [98] Xia H, Li H, Lan C, et al. 2014 *Opt. Express* **22** 17341
- [99] Reina A, Jia X, Ho J, et al. 2009 *Nano Lett.* **9** 30
- [100] Wu Q, Chen S, Wang Y, et al. 2019 *Adv. Mater. Technol.-US* **4** 1800532
- [101] Gan X, Zhao C, Wang Y, et al. 2015 *Optica* **2** 468
- [102] Wu K, Guo C, Wang H, et al. 2017 *Opt. Express* **25** 17639
- [103] Wang Y, Huang W, Wang C, et al. 2019 *Laser Photonics Rev.* **13** 1800313
- [104] Wang Y, Huang W, Zhao J, et al. 2019 *J. Mater. Chem. C* **7** 871
- [105] Wang C, Wang Y, Jiang X, et al. 2019 *Adv. Opt. Mater.* **7** 1900060
- [106] Wang Y, Wu K, Chen J 2018 *Chin. Opt. Lett.* **16** 20003
- [107] Wang Y, Gan X, Zhao C, et al. 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 171905
- [108] Chu R, Guan C, Bo Y, et al. 2020 *Opt. Lett.* **45** 177
- [109] Wu Q, Huang W, Wang Y, et al. 2020 *Adv. Opt. Mater.* **8** 1900977
- [110] Xing G, Guo H, Zhang X, et al. 2010 *Opt. Express* **18** 4564
- [111] Wu Y, Wu Q, Sun F, et al. 2015 *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **112** 11800
- [112] Shao Z, Wu K, Chen J 2020 *Chin. Opt. Lett.* **18** 60603
- [113] Shen M, Ruan L, Wang X, et al. 2011 *Phys. Rev. A* **83** 45804
- [114] Eliasson B, Liu C S 2016 *New J. Phys.* **18** 53007
- [115] Ge Y, Zhu Z, Xu Y, et al. 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1701166
- [116] Zheng J, Tang X, Yang Z, et al. 2017 *Adv. Opt. Mater.* **5** 1700026
- [117] FEJER M M, MAGEL G A, JUNDT D H, et al. 1992 *IEEE J. Quantum Electron.* **28** 2631
- [118] Yu S, Wu X, Chen K, et al. 2016 *Optica* **3** 541
- [119] Wu X, Yu S, Yang H, et al. 2016 *Carbon* **96** 1114
- [120] Zhang F, Han S, Liu Y, et al. 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 91102
- [121] Xia F, Farmer D B, Lin Y, et al. 2010 *Nano Lett.* **10** 715
- [122] Zheng J, Yang Z, Si C, et al. 2017 *ACS Photonics* **4** 1466
- [123] Wang K, Zheng J, Huang H, et al. 2019 *Opt. Express* **27** 16798
- [124] Chen S, Miao L, Chen X, et al. 2015 *Adv. Opt. Mater.* **3** 1769
- [125] Liao Y, Feng G Y, Zhou H, et al. 2018 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **30** 661
- [126] Song Y, Chen Y, Jiang X, et al. 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1701287
- [127] Song Y, Chen Y, Jiang X, et al. 2019 *Adv. Opt. Mater.* **7** 1801777
- [128] Wu Y, Yao B, Cheng Y, et al. 2014 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **26** 249
- [129] Liu H, Neal A T, Zhu Z, et al. 2014 *ACS Nano* **8** 4033
- [130] Wood J D, Wells S A, Jariwala D, et al. 2014 *Nano Lett.* **14** 6964
- [131] Island J O, Steele G A, van der Zant H S J, et al. 2015 *2D Mater.* **2** 11002
- [132] Doganov R A, O'Farrell E C T, Koenig S P, et al. 2015 *Nat. Commun.* **6** 6647
- [133] Ohtsubo Y, Perfetti L, Goerbig M O, et al. 2013 *New J. Phys.* **15** 33041
- [134] Rao S M, Heitz J J F, Roger T, et al. 2014 *Opt. Lett.* **39** 5345
- [135] Li X, Cai W, An J, et al. 2009 *Science* **324** 1312
- [136] Wu K, Soci C, Shum P P, et al. 2014 *Opt. Express* **22** 295
- [137] Wu K, Garcia De Abajo J, Soci C, et al. 2014 *Light-Sci. Appl.* **3** e147
- [138] Rajbenbach H, Fainman Y, Lee S H 1987 *Appl. Opt.* **26** 1024
- [139] O'Brien J L 2007 *Science* **318** 1567
- [140] Caulfield H J, Dolev S 2010 *Nat. Photonics* **4** 261
- [141] Appeltant L, Soriano M C, Van der Sande G, et al. 2011 *Nat. Commun.* **2** 468
- [142] Woods D, Naughton T J 2012 *Nat. Phys.* **8** 257
- [143] Chung I, Lee B, He J, et al. 2012 *Nature* **485** 486
- [144] Lee M M, Teuscher J, Miyasaka T, et al. 2012 *Science* **338** 643
- [145] Kim H, Lee C, Im J, et al. 2012 *Sci. Rep.-UK* **2** 591
- [146] Dikin D A, Stankovich S, Zimney E J, et al. 2007 *Nature* **448** 457
- [147] Sobon G, Sotor J, Jagiello J, et al. 2012 *Opt. Express* **20** 19463
- [148] Moore J E 2010 *Nature* **464** 194
- [149] Zhang H, Liu C, Qi X, et al. 2009 *Nat. Phys.* **5** 438
- [150] Dash A, Palanchoke U, Gely M, et al. 2019 *Opt. Express* **27** 34094
- [151] Qiu C, Yang Y, Li C, et al. 2017 *Sci. Rep.-UK* **7** 17046
- [152] Gao Y, Zhou W, Sun X, et al. 2017 *Opt. Lett.* **42** 1950
- [153] Yuhan Y, Kangkang W, Shan G, et al. 2020 *Nanophotonics-Berlin* 20190510
- [154] Grinblat G, Nielsen M P, Dichtl P, et al. 2019 *Sci. Adv.* **5** w32626

SPECIAL TOPIC—Nonlinear optics and devices of low-dimensional materials

All-optical devices based on two-dimensional materials*Xu Yi-Quan Wang Cong[†]*(College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)*

(Received 2 May 2020; revised manuscript received 9 June 2020)

Abstract

The leap in communication technology in recent years has brought new challenges to the compactness, modulation speed, working bandwidth and control efficiency of modulation equipment. The discovery of graphene has led the two-dimensional materials to develop rapidly, and a series of new materials have continuously emerged, such as MXene, black phosphorus, transition metal sulfides, etc. These new two-dimensional materials have excellent nonlinear optical effects, strong light-matter interaction, and ultra-wide working bandwidth. Using their thermo-optic effect, nonlinear effect and the combination with optical structure, the needs of ultra-fast modulation in optical communication can be met. Compact, ultra-fast, and ultra-wide will become the tags for all-optical modulation of two-dimensional materials in the future. This article focuses on all-optical devices based on thermo-optical effects and non-linear effects of two-dimensional materials, and introduces fiber-type Mach-Zehnder interferometer structures, Michelson interferometer structures, polarization interferometer structures, and micro-ring structures. In this paper, the development status of all-optical devices is discussed from the perspectives of response time, loss, driving energy, extinction ratio, and modulation depth. Finally, we review the latest developments, analyze the challenges and opportunities faced by all-optical devices, and propose that all-optical devices should be developed in the direction of ring resonators and finding better new two-dimensional materials. We believe that all-optical devices will maintain high-speed development, acting as a cornerstone to promote the progress of all-optical systems.

Keywords: all-optical devices, two-dimensional material, optical nonlinear effect, thermo-optic effect**PACS:** 42.79.Hp, 81.07.Bc, 78.20.N-, 42.65.-k**DOI:** [10.7498/aps.69.20200654](https://doi.org/10.7498/aps.69.20200654)

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2019YFB2203503), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61435010, 61575089, 61705140, 61805146), and the “National” Taipei University of Technology-Shenzhen University Joint Research Program, China (Grant No. 2019007).

[†] Corresponding author. E-mail: gxgcwang@163.com