

Research Progress of Two-Dimensional Material Hybrid Fiber Modulators

Kaifeng Lin ^{1,†}, Ding Zhong ^{2,†}, Jiahui Shao ^{1,†}, Kaihui Liu ^{1,3,*}, Jinhuan Wang ^{3,*}, Yonggang Zuo ^{4,*}, Xu Zhou ^{5,6,*}

¹ State key Laboratory of Artificial Microstructure and Mesoscopic Physics, Academy for Advanced Interdisciplinary Studies, Peking University, Beijing 100871, China.

² Department of Physics, Renmin University of China, Beijing 100872, China.

³ State key Laboratory of Artificial Microstructure and Mesoscopic Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China.

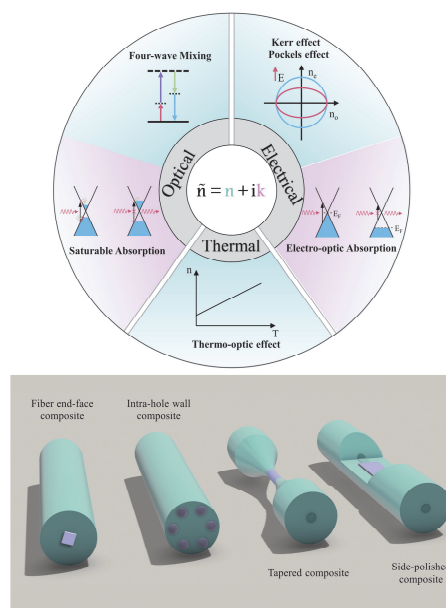
⁴ The Key Laboratory of Unconventional Metallurgy, Ministry of Education, Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650031, China.

⁵ Guangdong Provincial Key Laboratory of Quantum Engineering and Quantum Materials, School of Physics, South China Normal University, Guangzhou 510631, China.

⁶ Guangdong-Hong Kong Joint Laboratory of Quantum Matter, Frontier Research Institute for Physics, South China Normal University, Guangzhou 510631, China.

Abstract: Communication technology has been rapidly advancing and widely applied in various fields, and optical fiber communication has become the fundamental basis of modern information communication, thanks to its high capacity and low loss. Optical modulators, which are essential devices in optical fiber communication systems, are typically based on bulk crystal electrical and optoelectronic devices. However, these devices have a drawback that they affect the quality of light in high-density transmission processes, thereby limiting the potential of optical fiber communication to achieve high-speed and high-capacity performance. To overcome this dilemma, researchers have been devoted to developing all-fiber devices capable of modulating, amplifying and detecting optical signals without interrupting the optical fiber transmission process. In recent years, many new types of optical fibers with different structures have been designed and fabricated. Among them, two-dimensional materials are exciting considerable attention in the field of optical modulation due to their unique properties that enhance the interaction between light and matter. Optical fiber-type modulators based on two-dimensional material hybrid fibers are expected to bring new opportunities for optical fiber communication.

In this article, we will introduce various methods of combining two-dimensional materials with different structures of optical fibers, such as fiber end-face composites, hole inner-wall composites, tapered composites and side-polished composites structures. These methods can effectively integrate the advantages of both two-dimensional materials and optical fibers, and create novel optical modulators with high performance and functionality. We will also present some examples of optical modulators based on two-dimensional material hybrid fibers, including MoS₂-based all-optical wavelength modulators, graphene-based electro-optical absorption modulators, and MXene-based thermo-optical phase



Received: June 13, 2023; Revised: July 28, 2023; Accepted: July 31, 2023; Published online: August 8, 2023.

[†]These authors contributed equally to this work.

*Corresponding authors. Emails: xuzhou2020@m.scnu.edu.cn (X.Z.); science_zyg@163.com (Y.Z.); jinhuan_wang@163.com (J.W.); khliu@pku.edu.cn (K.L.). The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (52102044, 52203331) and Guangzhou Basic and Applied Basic Research Projects (202201010395).

国家自然科学基金(52102044, 52203331)和广州市基础与应用研究项目(202201010395)资助

© Editorial office of *Acta Physico-Chimica Sinica*

modulators. These devices can modulate the wavelength, intensity or phase of optical signals by exploiting the optical, electrical or thermal properties of two-dimensional materials. The modulation of optical signals is achieved by changing the real and imaginary parts of the refractive index of two-dimensional materials through external optical, electric or thermal fields.

In addition, we will summarize the modulation principles, processes and applications of two-dimensional material hybrid fiber modulators in different domains, such as all-optical, electro-optical, and thermo-optical. We will compare their advantages and disadvantages with conventional optical modulators based on bulk crystal devices, and explore their potential for improving the performance and efficiency of optical fiber communication systems. Finally, we will discuss the opportunities and challenges faced by the field of two-dimensional material hybrid fibers, and take a look at the perspectives for future research directions and developments.

Key Words: Optical fiber; Two-dimensional material; Modulator; Two-dimensional material hybrid fiber; All-optical modulation; Electro-optic modulation; Thermo-optic modulation

二维材料复合光纤调制器件研究进展

林凯风^{1,†}, 钟叮^{2,†}, 邵嘉惠^{1,†}, 刘开辉^{1,3,*}, 王金焕^{3,*}, 左勇刚^{4,*}, 周旭^{5,6,*}

¹ 北京大学前沿交叉学科研究院, 人工微结构与介观物理国家重点实验室, 北京 100871

² 中国人民大学物理学系, 北京 100872

³ 北京大学物理学院, 人工微结构与介观物理国家重点实验室, 北京 100871

⁴ 昆明理工大学冶金与能源工程学院, 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 昆明 650031

⁵ 华南师范大学物理学院, 广东省量子调控工程与材料重点实验室, 广州 510006

⁶ 华南师范大学物理前沿科学研究院, 粤港量子物质联合实验室, 广州 510006

摘要: 随着通信技术的快速发展和广泛应用, 光纤通信以其高容量和低损耗的优势, 已成为现代信息通信的基础。在光纤通信系统中, 光调制器是实现光信号调制的关键器件之一, 通常基于块状晶体的电学和光电子学器件。然而, 这类器件会影响光在高密度传输过程中的质量, 限制了光纤通信实现高速和高容量性能的潜力。为了解决这个问题, 研究人员一直致力于开发全光纤器件, 可以在不中断光纤传输过程的情况下对光信号进行调制、放大和检测。近年来, 设计和制造了许多具有不同结构的新型光纤。其中, 二维材料在光调制领域引起了人们的广泛关注, 因为它们具有可以增强光与物质之间相互作用的独特性质。基于二维材料复合光纤的光纤型调制器有望为光纤通信带来新的机遇。在本文中, 我们将介绍将二维材料与不同结构的光纤进行复合的各种方法, 例如光纤端面复合、孔内壁复合、拉锥复合和侧剖复合。这些方法可以有效地整合二维材料和光纤的优势, 创造出具有高性能和功能性的新型光调制器。我们还将举例介绍一些基于二维材料复合光纤的光调制器, 例如基于MoS₂的全光波长调制器、基于石墨烯的电光吸收调制器和基于MXene的热光相位调制器。这些器件可以通过利用二维材料的光学、电学或热学性质来调制光信号的波长、强度或相位。这些器件可以通过改变二维材料折射率的实部和虚部来实现对光信号的调制。此外, 我们还将总结二维材料复合光纤调制器在不同领域(如全光、电光和热光)的调制原理、过程和应用。我们将与基于块状晶体器件的传统光调制器进行优缺点比较, 并讨论它们在提高光纤通信系统性能和效率方面的潜力。最后, 我们将讨论二维材料复合光纤领域所面临的机遇和挑战, 并提出未来研究方向和发展前景。

关键词: 光纤; 二维材料; 调制器; 二维材料复合光纤; 全光调制; 电光调制; 热光调制

中图分类号: O649

1 引言

通信技术伴随着人类社会的发展而不断演进。从最早的口耳相传、驿马飞鸽, 到后来的电报电话, 再到如今信息时代的互联网和移动通信, 人们目睹了通信技术的蓬勃发展和巨大影响。随着

科技的飞速发展, 各种应用如4K直播、远程医疗、万物互联和人工智能等迅速兴起, 推动网络数据的互联规模呈指数级增长。在信息时代的快速发展下, 传统的通信方式已经无法满足日益增长的数据传输需求, 人们迫切需要一种具有更低传输

损耗和更高带宽的通信介质来应对这一挑战。光纤是一种具有极低传输损耗和宽波段的优良光波导,已经被广泛应用于长距离、高速和大容量的数据传输¹。因此,以光纤为载体,通过传输光子进行互联的光通信技术正在逐渐成为当代信息通讯的基础²。

光纤通信系统一般包含信源、调制器、载波源、光纤、光放大器、光中继器、检测器(解调器)、信号处理器和信宿等部分。其中调制器、载波源、中继器和解调器等往往基于电学和光电子学器件。当光通过这些器件的时候,其高速和宽带传输过程会被打断,这不利于光纤通信的高速和高容量发展。因此,人们一直致力于在光纤通信系统中采用全光纤器件,以确保光信号在光纤传输过程中的调制、放大和探测不会中断。例如,目前的光通信系统中,光调制器和光纤作为分立的两个单元,为了实现信号的转换和传输,需要使用耦合装置将它们连接起来,这增加了系统的复杂性和成本,并可能引入额外的损耗和信号失真³。为了解决这些问题,可将光调制器与光纤复合成为全光纤型调制器,实现高效的光耦合,降低信号损耗和失真,提高系统的性能和可靠性。然而,传统的光纤结构和体材料特点限制了光调制器与光纤的全光纤化复合。因此,寻找新型的光纤结构与材料,探索全光纤型调制器的复合方法成为当前一个新兴且重要的研究方向(图1)。

近年来,以石墨烯为代表的二维原子晶体材料在光调制领域引起广泛关注⁴⁻²⁰,为全光纤型器件的发展提供新的设计思路与策略,同时也带来机遇与挑战²¹⁻²⁷。二维材料在光调制方面具有天然优势:(1)二维材料种类繁多,结构丰富,具备与体材料迥异的新奇光电性能,应用场景更加丰富²⁸;(2)二维材料的光学响应范围广,可覆盖紫外至太赫兹波段,因此能够实现宽频带的光学调制。这意味着二维材料可以在不同波长范围内对光信号进行有效的控制,满足多种光通信和光信息处理的需求²⁹;(3)由于二维材料具有较高载流子迁移率,因而具备极快的调制速度。例如,石墨烯的室温迁移率超过 $15000\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ³⁰,低温(1.5 K)迁移率高达 $150000\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ³¹。而目前电子信息产业最常用的低掺杂硅的室温迁移率仅有 $1350\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ³²。这意味着二维材料对外界作用的响应时间非常短,可用于实现高速光信号调制以及高效率光通信和光信息处理;(4)二维材料具有较高的光学非线性极化率,与之关联的多种非线性效应可用于各种光调制过程。这意味着二维材料

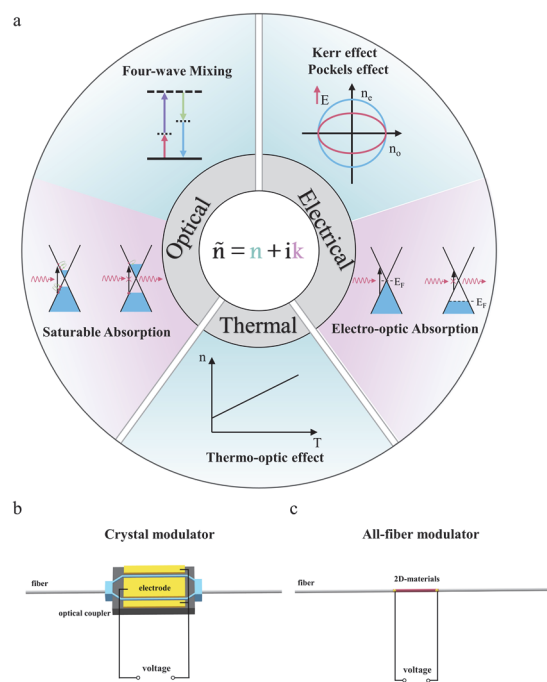


图1 光调制手段及原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical modulation methods and principles.

(a) Schematic diagram of common light modulation methods (all-optical, electro-optic, and thermo-optic modulation). (b) Schematic diagram of crystal modulator. (c) Schematic diagram of all-fiber modulator.

在与光进行相互作用过程中可以实现高效的光信号控制,降低能耗和成本³³⁻³⁶;(5)二维材料大多为层状材料,其中,层内由化学键连接,层间由弱范德华力相互作用。这种特性使得二维材料容易剥离成厚度只有原子级的单层或少层薄片结构。凭借原子级厚度的结构有利于与其他光学和电学结构复合,避免了晶格失配问题,拥有广泛的应用潜力(图2)。所以,二维材料可与其他材料或器件进行灵活的组合,实现多功能和多结构的光学调制器件³⁷。综上,二维材料在光调制方面具有宽频带、高速、高效和灵活易集成的特点。

二维材料的光调制过程与其复折射率($\tilde{n} = n + ik$)密切相关。其中,实部 n 决定了光在介质中的传播过程,对应于对光的色散和相位调制;虚部 k 决定了光在介质中的吸收过程,对应于对光幅值的调制。通过改变外部环境中的光场、电场和温度等因素可以调控二维材料的复折射率^{18,29}。基于二维材料的光学调制方法大致可分为三类(图1a):光激发法、栅压调控法和温度控制法。这三种方法分别对应全光调制、电光调制和热光调制。全光调制和电光调制可以通过改变载流子分布来调节复折射率的虚部,进而影响光的吸收,实现光的幅值调制。另外,非线性光学参量过程利用复折射率的实部

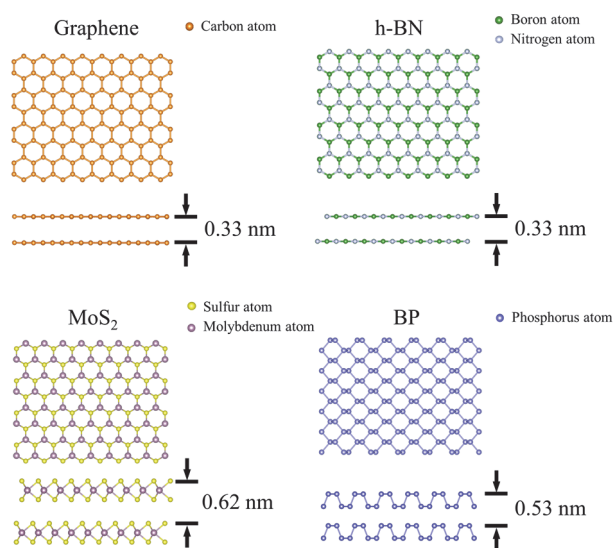


图2 常见二维材料示意图
Fig. 2 Schematic diagram of common two-dimensional materials.

实现频率调控。电光普克尔效应和电光克尔效应利用复折射率的实部实现相位调制。与电学和光学调制过程相比，二维材料本身的热光调制过程较弱。因此，二维材料的热光调制过程常常将热量传导至波导或衬底，改变整个结构的折射率，之后再通过干涉或谐振结构最终实现对信号光的相位调制。所以基于二维材料出色的光调制性能，可以

将其与不同结构的光纤进行复合，实现低损耗、宽波段和高速度的全光纤光调制器(图1b, c)。

从20世纪末到21世纪初，光纤结构的设计与制造技术经历了蓬勃发展，各种新型光纤如侧剖光纤(Side-Polished Fiber, SPF)、光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)和微纳光纤(Micro-nano Fiber, MF)等相继诞生³⁸⁻⁴³。这些新型光纤结构在光学传输模式、色散和非线性效应等方面各具独特优势，拓展了光纤的应用领域。基于各种不同光纤结构，二维材料能够以不同方式与其进行复合以实现光的调制(如图3所示)。(1)端面复合是将二维材料转移或生长在光纤端面上的一种简单且常见的复合方式。大部分采用普通单模或者多模光纤进行端面复合，且光纤端面作为天然的平面可以较好兼容微纳加工工艺，制作各种复杂光学结构和电学结构。这种复合方式可以最大限度地减少二维材料对光传输模式的影响。然而，其局限性在于光与二维材料的相互作用距离被限制在二维材料厚度的纳米量级(例如石墨烯层间距为0.33 nm、六方氮化硼的层间距为0.33 nm、二硫化钼的层间距为0.62 nm、黑磷的层间距为0.53 nm)，导致其绝对调制深度往往比较小^{27,44}。(2)侧剖复合和拉锥复合方式是先精确加工制备特定尺寸的侧剖光纤或拉锥微纳光纤，然后将二维材料

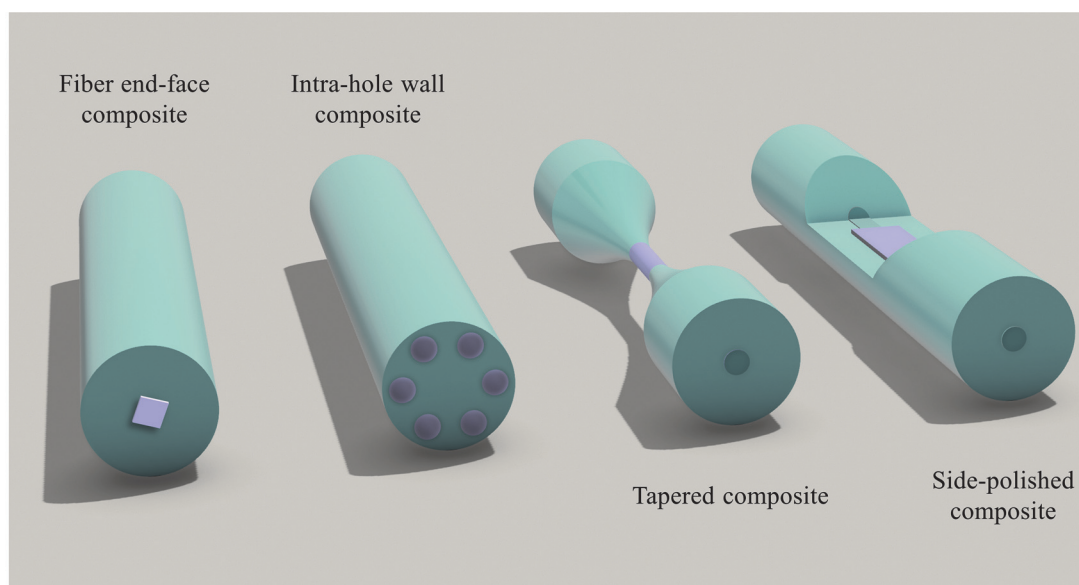


图3 常见二维材料复合光纤体系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of common two-dimensional material hybrid fiber system.

In the figure, the light green represents the cladding of the optical fiber, the dark green represents the core of the optical fiber, and the purple represents the transferred or grown two-dimensional materials. “Fiber end-face composite” refers to the two-dimensional materials being transferred or grown on the end-face of a regular optical fiber. “Intra-hole wall composite” refers to the two-dimensional materials being grown or filled within the void of a holey optical fiber. “Tapered composite” refers to the two-dimensional materials being transferred or grown in the tapered region. “Side-polished composite” refers to the two-dimensional materials being transferred or grown on the side-polished plane.

生长或转移至光纤的侧剖面或拉锥区域。在这种复合方式中,光通过纤芯进行传输,并通过倏逝场与二维材料相互作用。这种相互作用的强度取决于二维材料在光传输方向上的几何尺寸(通常为微米量级),可以显著增强光与物质之间的相互作用强度。然而,侧剖复合和拉锥复合的制备工艺相对复杂,难以实现大规模制备⁴⁵⁻⁴⁸。(3)孔内壁复合方式是通过化学气相沉积(Cheical Vapor Deposition, CVD)等方法在光子晶体光纤、反谐振光纤或毛细管等光纤的空气孔内壁上生长二维材料。原子级厚度的二维材料既不会破坏光纤传输模式,又可以赋予光纤更多二维材料的奇特物性,与多孔或空心结构一同实现传统光纤或传统二维材料无法实现的独特功能。然而,这种复合方法受限于光纤空气孔的微小尺寸,其内部生长的二维材料的尺寸和质量面临巨大挑战,仍有待提高⁴⁹⁻⁵³。

本文综述了采用以上不同种类的二维材料复合光纤在全光、电光和热光调制领域的过程与应用。全光调制方面,我们将介绍基于折射率虚部的被动锁模与全光开关、超连续光谱展宽与偏振控制,以及基于折射率实部的光学参量转换过程。电光调制方面,我们将介绍基于折射率虚部的电致光吸收效应和基于实部的电光克尔与电光普克尔效应。随着二维材料复合光纤领域的不断发展,我们可以期待在光通信光信息处理等领域中出现更多创新和多功能的全光纤器件,为人类社会的通信技术和科技发展带来更大的推动力。

2 二维材料复合光纤全光调制

近些年,基于二维材料复合光纤的全光调制过程逐渐引起人们的关注和研究,它有望在下一代超速率、超低功耗的光通信系统中发挥重要作用,为实现信号处理的全光通信提供一种全新的设计思路 and 理念。目前,全光调制器研究主要包括可饱和吸收体(Saturable Absorber, SA)^{27,44}、全光开关⁵⁴、光学参量转换器⁵⁰和偏振控制器⁴⁶等多种器件领域。这些器件主要利用二维材料的强非线性光学响应,尤其是与三阶非线性极化率相关的光学过程,而非线性极化率可用复折射率和非线性系数进行表示。其中,三阶非线性极化率的虚部 $\text{Im}(\chi^{(3)})$ 在基于吸收的全光调制中起着关键作用,例如实现激光器被动锁模的可饱和吸收效应。而实部 $\text{Re}(\chi^{(3)})$ 则负责非线性参量过程,如四波混频和三次谐波产生^{29,55}。这些全光调制器具有宽带宽、快速响应和小型尺寸的特点,使其适用于紧凑、集成的全光学调制应用。

2.1 被动锁模器与全光开关

根据信号光由自身或其他光束进行调制,基于吸收的全光调制过程可分为被动调制和主动调制,分别对应于可饱和吸收器和全光开关两种类型。

可饱和吸收器是指具有对入射光的吸收率随着入射功率的增大而减小,直至达到饱和现象的材料。它是一种利用非线性效应产生超短脉冲的被动光调制器件,常用于实现锁模激光输出。在被动锁模过程中,可饱和吸收器对入射脉冲的峰值部分具有较高的透过率,而脉冲边沿部分的透过率较低。入射光多次经过可饱和吸收器,脉冲不断变窄,直到与群速度色散引起的脉冲展宽达到平衡,从而形成脉冲宽度在皮秒或飞秒量级的超短脉冲。锁模光纤激光器输出的超短脉冲还具有较高的峰值功率,在光通信^{56,57}、材料加工^{58,59}、光频梳^{60,61}、光谱学^{62,63}等领域广泛应用。

传统的可饱和吸收器通常是分子束外延生长的半导体可饱和吸收镜(Semiconductor Saturable Absorption Mirror, SESAM)⁶⁴,它广泛应用于半导体激光器、超快光纤激光器和固体激光器中。然而,半导体可饱和吸收镜也有其自身的局限性,包括恢复时间长(皮秒级)、窄带工作($< 100 \text{ nm}$)、体积较大和制作工艺复杂^{18,53,55}。此外,半导体可饱和吸收镜为晶体状,在超快光纤激光器中需要与光纤通过耦合器在自由空间耦合,采用透镜等分立的光学元件。这种“光纤-耦合器-晶体-耦合器-光纤”的结构往往导致较高的传输损耗和较大的封装体积⁶⁵。因此,全光纤型可饱和吸收器一直是被动锁模光纤激光器的研究方向和目标。

二维材料具有明显的可饱和吸收特性(图4a),当一束光子能量大于带隙的光入射二维材料时,价带电子吸收入射光子被激发到导带中,在亚皮秒内,光生载流子很快被热化,建立热费米-狄拉克分布,热化的载流子被带内散射效应冷却,最终通过电子-空穴复合达到平衡的载流子分布。这一过程是发生在低强度光激发下的线性吸收过程,光子被吸收,透射率降低。在高激发强度下,光生载流子使导带和价带边缘附近的态被填充,由于泡里阻塞效应阻碍了对光的进一步吸收,大量光子透过,透射率增大。与常见的半导体可饱和吸收镜与碳纳米管相比,二维材料具有宽工作波段特性、超短弛豫时间和可控调制深度等优点^{44,66-68}。此外,二维材料易与光纤复合的特点对于构建全光纤锁模激光器具有重要意义^{69,70}。基于二维材料的全光纤可饱和吸收器,根据二维材料与光纤的

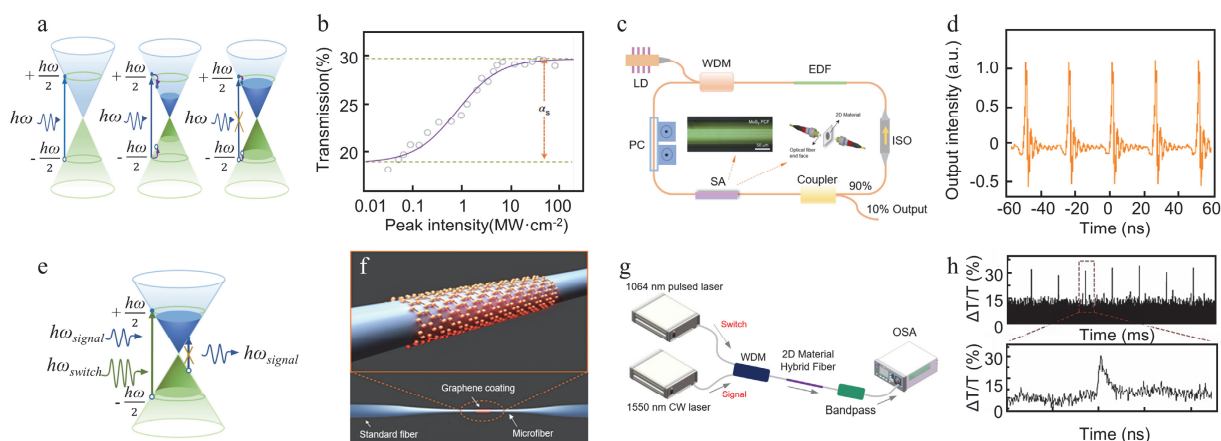


图4 二维材料复合光纤被动锁模和全光开关

Fig. 4 Passive mode-locker and all-optical switch of two-dimensional material hybrid fiber.

- (a) Absorption of light in graphene. When light is incident on graphene, the electrons from the valence band first absorb the incident photons and are excited into the conduction band. The photogenerated carriers thermalize and cool down within sub-picoseconds until an equilibrium carrier distribution could be finally approached through electron-hole recombination. At high excitation intensity, the photogenerated carriers cause the states near the edge of the conduction and valence bands to fill, which would block further absorption because of the Pauli blocking effect.
- (b) Transmittance of the MoS₂-PCF for $\alpha_s \approx 10\%$ and saturation peak intensity of $0.8 \text{ MW}\cdot\text{cm}^{-2}$.⁵⁰ (c) Schematic of all-fiber mode-locked laser with two-dimensional material hybrid fiber as an SA. Insert shows the side view of MoS₂-PCF and the schematic of optical fiber end face coated with graphene film.⁵⁰ (d) Output pulse train of all-fiber mode-locked laser with MoS₂-PCF as an SA (with $\sim 24 \text{ ns}$ interval, $\sim 41 \text{ MHz}$ repetition rate).⁵⁰
- (e) Schematic of signal light modulated by switch light in graphene. A signal light is incident on graphene and experiences significant attenuation due to absorption. When a switch light with higher photon energy is introduced, it excites carriers and shifts the absorption threshold of graphene to higher frequency through Pauli blocking of interband transitions, thus resulting in a much lower attenuation of the signal light.
- (f) Schematic of a graphene-clad microfiber all-optical modulator.⁵⁴ (g) Schematic of a 1550 nm CW beam modulated by 1064 nm pulse beam in a graphene-clad microfiber. (h) Top: pulses switched out from a 1550 nm CW beam in a graphene-clad microfiber by a 1064 nm pump pulse train. Bottom: time profile of a switched-out pulse.⁵⁴ (b, c, d) Adapted with permission from Ref. 50, Copyright 2020 Nature Publishing Group.

(f, h) Adapted with permission from Ref. 54, Copyright 2014 ACS Publications.

耦合方式大致可分为端面复合^{27,44}、侧抛或拉锥复合⁷¹和孔内壁复合^{72,73}。

根据二维材料的制备工艺和输出激光的参数要求, 需要选择合适的二维材料和光纤的耦合方式以实现最佳匹配。2009年, Bao等人最早将石墨烯薄膜转移在光纤端面作为可饱和吸收器, 实现了在1565 nm通讯波段的锁模光纤激光器, 脉冲宽度为756 fs, 重复频率为1.79 MHz⁴⁴。随后不久, Sun等人将石墨烯与聚乙烯醇(PVA)溶液混合制成50 μm 厚的复合材料, 并用光纤法兰将其夹在两根光纤跳线之间。通过这种方式, 他们获得了脉冲持续时间更短(约464 fs)的脉冲序列, 并在多个波长下测量了饱和吸收曲线, 证实了石墨烯的可饱和吸收特性²⁷。

随后, 各种二维材料被应用于不同配置的锁模激光器, 以优化激光的输出参数, 包括脉冲持续时间、重复频率和输出功率等。2015年, Sotor等人设计了一种使用石墨烯作为可饱和吸收器的掺铒光纤脉冲激光器, 成功将脉冲持续时间缩短至88 fs⁷⁴。为了实现更高的脉冲重复频率, 人们通常

会采用较短的激光谐振腔体设计。Martinez等人报道了一种基于10 mm长的光纤法布里-珀罗腔和石墨烯可饱和吸收器的锁模激光器, 重复频率可达9.67 GHz⁷⁵。

除了石墨烯, 其他二维材料如过渡金属硫族化合物(Transition Metal Dichalcogenides, TMD)^{50,76,77}、拓扑绝缘体^{78–80}、黑磷^{81–83}和GaSe^{84,85}也被用于锁模激光器以实现更大的调制深度或更高的激光损伤阈值, 以便实现高功率超短脉冲输出。2020年, 刘忠范院士团队通过两步CVD法在PCF中生长MoS₂。他们成功制备了具有较高调制深度(10%)和饱和峰强($0.8 \text{ MW}\cdot\text{cm}^{-2}$)的MoS₂-PCF可饱和吸收器, 其性能与常规半导体可饱和吸收镜相当(图4b)。利用该可饱和吸收器, 他们构建了全光纤锁模激光器(图4c), 输出功率6 mW, 脉冲宽度500 fs, 重复频率41 MHz(图4d)⁵⁰。此外, Lee等人将黑磷转移至侧抛光纤作为可饱和吸收器, 成功抑制了热损伤, 并获得了平均功率为214 mW, 脉冲宽度为805 fs的激光脉冲⁸⁶。

不同种类二维材料制作的可饱和吸收器在应

用波长范围上存在差异。石墨烯可饱和吸收器主要用于产生波长在0.8至2.9 μm 之间的脉冲光。然而, 由于石墨烯在可见光与短波近红外光范围表现出相对较大的饱和通量, 限制了其在该范围内的适用性⁷⁰。与石墨烯不同, TMD和黑磷表现出有限的共振吸收带隙。TMD通常在可见光范围内显示共振吸收⁸⁷, 而黑磷则在近红外和中红外范围内表现出共振吸收⁸¹。因此, 这些材料在这些波长范围内提供了替代石墨烯可饱和吸收器的解决方案。例如, 可用于全光纤脉冲激光输出的TMD⁸⁷和黑磷⁸⁸可饱和吸收器已经分别在可见光和近红外范围内展示了潜力, 这为未来可见光(甚至紫外)和近红外范围内的脉冲光纤激光源提供了可能性。

与SESAM相比, 二维材料复合光纤作为可饱和吸收器用于脉冲激光的产生具有显著优势。首先, 二维材料复合光纤可饱和吸收器具有宽广的工作波长范围, 适用于多种波长的激光器, 例如1 μm ^{89,90}、1.55 μm ^{44,73}、2 μm ^{91,92}以及3 μm ⁹³。其次, 二维材料具有较短的弛豫时间, 二维材料中的载流子可以在飞秒或皮秒的时间尺度内弛豫。但是也存在一些问题, 例如饱和流量比SESAM更高, 损伤阈值更低等^{18,94}。因此, 二维材料适用于产生超短持续时间(接近或甚至小于100 fs^{74,95})和宽调谐波长的激光器, 而SESAM更适用于具有低阈值、高功率激光器。此外, 与分子束外延制备的SESAM相比, 二维材料可饱和吸收器更易通过静电掺杂, 化学掺杂等方式调控, 而且可以通过机械剥离、液相剥离、化学气相沉积等多种方法制备, 易与光纤和波导等光子结构集成。综上, 二维材料复合光纤可饱和吸收器在脉冲激光的产生方面具备巨大优势⁸⁹⁻⁹³。

除了被动锁模所使用的可饱和吸收器, 全光调制中的主动光调制器或全光开关也逐渐受到人们的关注。全光开关是一种通过介质的非线性光学效应来实现光调制光的器件。近年来, 基于二维材料的电光调制器利用电调谐费米能级实现了电控光, 然而它们的工作带宽受到驱动电路响应速度的限制, 往往被限制在10 GHz量级。相比之下, 全光开关的响应时间仅受材料固有载流子弛豫时间的限制, 因此可以实现更大的带宽(> 100 GHz)⁹⁶。因此, 全光开关作为一种全光调制方案, 没有电-光-电转换的过程, 其工作功耗更低, 在高带宽、低功耗等方面具有巨大潜力。

全光开关通过利用具有高光子能量(短波长)的开关光对具有低光子能量(长波长)的信号光进

行调制, 实现了信号光吸收的“开”和“关”的调控。当信号光入射二维材料时, 材料吸收部分信号光导致其衰减, 透过率降低。然而, 当引入光子能量高于二维材料费米能级两倍的开关光时, 它将激发电子从价带跃迁至导带, 而带间跃迁引发的泡利阻塞效应应将吸收阈值转移到更高的能量区域导致信号光的衰减减少, 透过率增大(图4e)。全光开关的关键性能指标包括响应时间、阈值功率、调制深度和插入损耗等。

由于二维材料与光纤的容易复合且开关光引起的折射率变化很小, 光纤的波导模式不会明显改变, 因此人们研制了结构紧凑的二维材料复合光纤全光开关。在2013年, Liu等人在低折射率的MgF₂基底上使用聚二甲基硅氧烷(PDMS)支撑的石墨烯覆盖了直径为8 μm 的微纳光纤表面, 制作出了调制速度为1 MHz、调制深度为13 dB、插入损耗为15 dB的全光开关⁹⁷。然而, 由于石墨烯与光之间的相互作用不够充分, 该结构实现高调制深度需要较高功率的开关光和信号光。在2014年, Li等人报道了一种采用石墨烯包覆微纳光纤的全光调制器, 其中双层石墨烯包覆在腰直径约为1 μm 、长度为2 mm的单模微纳光纤上(图4f)⁵⁴。当1.55 μm 的连续信号光和1.06 μm 的脉冲开关光(< 5 ns, 2.4 kHz)经过石墨烯包覆微纳光纤时(图4g), 在开关光脉冲持续期间, 信号光的吸收损耗减小, 从而切换出纳秒级的信号脉冲, 实现了对信号光的有效调制(图4h)。由于石墨烯的光激发载流子的弛豫时间仅有几皮秒⁶⁶, 因此所测得的响应时间约为2.2 ps, 对应于高斯脉冲的最大调制速率约为200 GHz。石墨烯包覆微纳光纤全光开关具有较大的调制深度(38%)和高饱和吸收峰值阈值功率(40 W)。为了降低饱和吸收的阈值, 2015年, Meng等人制作了基于掺杂石墨烯的聚合物纳米光纤, 其饱和吸收阈值为1.3 W。可以通过使用1064 nm波长的纳秒脉冲光作为开关光, 对1550 nm的信号光进行全光调制⁹⁸。通过增加光与石墨烯之间的相互作用强度, Chen等人制作了立体石墨烯微纳光纤结构, 其相互作用长度为12 mm, 调制深度为7.5 dB, 但插入损耗较高⁹⁹。通过进一步优化光纤和石墨烯的几何形状, 可以在调制深度和插入损耗之间实现良好的平衡。除了微纳光纤, 侧抛光纤也已被应用于全光开关。2016年, Zhang等人将旋涂聚乙烯醇缩丁醛(PVB)的石墨烯膜附着在侧抛光纤上, 相互作用长度为5 mm, 制作了具有极低插入损耗(< 1 dB)的全光调制器, 其调制深度为9 dB, 速度达到0.5 THz¹⁰⁰。

除石墨烯之外的其他二维材料也可以作为有效的全光开关材料,例如,2017年,Zhang等人设计了一种将MoSe₂与微纳光纤复合的全光开关,用405和980 nm的开关光控制1550 nm的信号光,改变开关光功率,信号光分别获得约2和30 dB的相对功率变化¹⁰¹。原则上,在激发波长与二维材料带隙共振时有潜力实现有效的全光有源调制,如利用异质石墨烯-光纤微腔中的电控光频梳。通过改变原子厚石墨烯的费米能级,同时实现了可调吸收,可控 Q 因子⁶¹。利用TMD实现可见光调制,或者利用黑磷实现中红外光调制¹⁰²。

在过去的10年中,基于二维材料复合光纤的全光开关取得了很大的进展,实现了高调制深度,超短响应时间和低开关阈值。全光开关的调制速度仅受到开关光频率的限制,响应时间较短一般为皮秒量级,是最有希望达到二维材料理论速度极限的一种调制器。期望在未来二维材料复合光纤全光开关会成为光通信等领域的基石。

2.2 光学参量转换与超连续光谱展宽

全光信号调制在当代光通信领域展现出巨大的潜力^{103,104},作为其中一种关键的非线性功能器件,光学参量转换器的工作原理与材料的二阶和三阶非线性效应密切相关。非线性光学材料通过诸如倍频、和频、差频和四波混频等效应输出波长与入射光不同的光。基于光纤的光学参量转换器主要是利用光纤的高非线性效应来实现的。人们已经利用色散位移光纤、光子晶体光纤等光纤的四波混频(Four Wave Mixing, FWM)¹⁰⁵、交叉相位调制¹⁰⁶和Raman散射效应¹⁰⁷实现了波长转换,并证明其具有超快的响应速度和宽的工作带宽等特点,但是要求光纤具有高非线性效应。二维材料复合光纤具有比光纤更高的非线性折射率和更宽的工作波长范围,并且具备兼容性和稳定性的特点,因此在作为高效光学参量转换器方面具有巨大的潜力^{50,108}。

由于石英光纤的原子结构的中心对称性,理论上是没有光纤二阶非线性过程产生。二维材料,例如TMD、GaSe,具有非常强的二次谐波产生(SHG)、和频产生(SFG)和差频产生(DFG)等二阶非线性效应。通过将二维材料与光纤进行复合,可以将二维材料的这些非线性过程赋予光纤,也可以通过光纤的高品质波导增强光与二维材料相互作用产生更强的非线性光学效应^{45,50,108}。例如,2019年,Chen等人对WS₂复合拉锥光纤中的SHG响应进行了系统研究,获得了比未转移WS₂的拉锥光纤高20倍以上的SHG信号强度,并证明了应变

可以有效地调控WS₂复合拉锥光纤中的SHG¹⁰⁹。为了进一步提高转换效率和获得更强的SHG信号,2020年,刘忠范院士团队在25 cm长的空心光纤中生长了单层MoS₂,并测试了其SHG和三次谐波产生(THG)效应(图5a)。相比于熔融石英基底上的单层MoS₂,MoS₂-空芯光纤的SHG和THG效应均增强了约300倍,能量转换效率有潜力达到10⁻⁴到10⁻³数量级(图5b)⁵⁰。然而,空心光纤一般具有较大的模场面积以获得低的传输损耗,且光束能量主要集中在空心区域,二维材料功能层处的光能量密度较低,限制了光和物质相互作用强度,从而限制了转换效率。因此,Ngo等人于2022年将单层MoS₂生长在长度为3.5 mm的悬芯光纤表面,与裸纤进行比较,结果显示当输入功率分别为20和80 mW时,MoS₂复合悬芯光纤的SHG转换效率分别增加了1113倍和600倍¹¹⁰。此外,相较于TMD等二维材料,GaSe具有更强的二阶非线性效应³⁵,能够获得更高的转换效率,并在可见光到太赫兹波长范围内实现有效的光学频率转换¹¹¹。2020年,Jiang等人在微纳光纤上沉积了少层GaSe纳米片,由于微纳光纤的强倏逝场和GaSe的超高二阶非线性效应,仅使用亚毫瓦连续光激光器就能有效地实现SHG和SFG,并在1500–1620 nm的波长范围内实现波长调谐。与裸纤相比,复合了GaSe的微纳光纤的SHG强度提高了4个数量级以上¹⁰⁸。

基于三阶非线性效应的四波混频是指由两个或三个波长之间相互作用产生两个或一个新波长的现象,是相位敏感的参量过程。四波混频是二维材料复合光纤的另一个重要应用,并广泛应用于光学参量转换、光学参量放大和超连续谱等现代光学领域(图5c)¹¹²。2012年,Xu等人将石墨烯转移到光纤的端面,利用四波混频实现了参量转换,转换效率达到-30 dB¹¹³。随后,2014年,Wu等人采用附着石墨烯膜的微纳光纤,在接触长度为10 mm的情况下,将四波混频效率提高至-28 dB,并在1550 nm附近实现了4.5 nm的波长调谐¹¹⁴。2015年,同一团队优化了微纳光纤的直径和接触距离等参数,采用改进的石墨烯/微纳光纤混合波导,使用波长为1.55 μ m的高功率脉冲激光作为泵浦源,实现了多阶级联的四波混频。他们使用可调谐的连续波信号光,在跨越15 nm以上的范围内产生了数十条级联的四波混频信号(图5d),信号光和泵浦光的失谐范围可从0调谐到5 nm,转换效率高达-20 dB¹¹⁵。然而,石墨烯的低损伤阈值可能限制其在强光与物质相互作用的光学参量转换器中的应用。因此,人们开始使用其他二维材料与光纤结

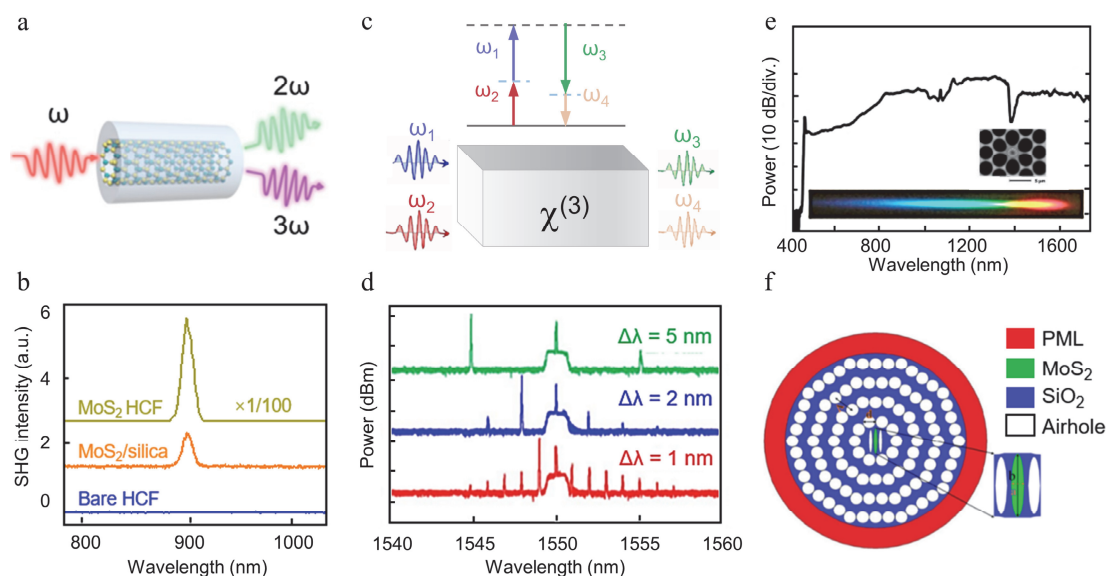


图5 二维材料复合光纤光学参量转换和超连续光谱展宽

Fig. 5 Optical parametric conversion and supercontinuum generation of two-dimensional material hybrid fiber.

(a) Greatly enhanced SHG and THG in a MoS₂-hollow capillary fiber⁵⁰. (b) SHG spectra of a MoS₂-HCF, MoS₂ on a flat, fused silica substrate (MoS₂/silica), and a bare HCF (hollow capillary fiber, HCF) under 1800 nm excitation. In the 25-cm-long MoS₂-HCF, SHG can be enhanced by ≈ 300 times compared with monolayer MoS₂/silica⁵⁰. (c) Schematic of Four Wave Mixing principle. (d) Spectra of cascaded FWMs of graphene-coated microfiber for the detuning of 1 nm (red), 2 nm (blue), and 5 nm (green), respectively¹²⁰. (e) Experimental spectra measured for a launched power of 45 W in a long tapered GeO₂-doped-core PCF. Insert shows SEM image of the GeO₂-doped PCF with a close-up in the core region¹³⁷.

(f) Systematic of decahedron PCF with MoS₂ filled elliptical core¹⁴⁰.

(a, b) Adapted with permission from Ref. 50, Copyright 2020 Nature Publishing Group. (d) Adapted with permission from Ref. 120,

Copyright 2015 Chinese Laser Press. (e) Adapted with permission from Ref. 137, Copyright 2009 Optica Publishing Group.

(f) Adapted with permission from Ref. 140, Copyright 2021, Elsevier.

合来实现基于四波混频的光学参量转换。例如，使用黑磷¹¹⁶、铋烯¹¹⁷、锑烯¹¹⁸、MXene (化学通式为M_{n+1}X_nTx，其中n=1–3，M为过渡金属，如Ti、Zr、V、Mo等；X代表C或N元素，Tx为表面基团，通常为–OH、–O、–F或–Cl)¹¹⁹、拓扑绝缘体¹²⁰等材料。其中，Chen等人使用了二维拓扑绝缘体Bi₂Te₃，该材料具有比石墨烯更大的非线性克尔系数。他们利用光学沉积法在微纳光纤上涂覆Bi₂Te₃，实现了基于四波混频的光学参量转换，具有更宽的调谐范围(6.4 nm)和转换效率(–34 dB)，且损伤阈值高于20 dBm¹²⁰。

二维材料复合光纤光学参量转换器具有易于与现有通信基础设施复合的优势，可实现高性能频率调制，并在全光信号处理、变频光纤激光光源和光纤传感器等领域广泛应用。

超连续光谱是指当超短脉冲泵浦光入射到非线性光学材料中时，由于多种非线性效应共同作用，导致原始泵浦光的光谱显著展宽的现象⁴⁰。1976年，Lin和Stolen首次在光纤中获得了超连续光谱输出，他们使用10 ns激光泵浦20 m长的石英光纤，在泵浦光的长波长侧产生了180 nm的超连

续光¹²¹，从此光纤成为产生超连续光谱的常用介质之一。在正常色散区内，光纤主要通过自相位调制、四波混频等非线性效应获得相干性良好的超连续光谱；而在反常色散区内，还可以通过高阶孤子的形成、分裂和色散波等方式迅速实现更大范围的光谱展宽。

然而，传统的石英光纤难以将零色散点调控到小于1.3 μm，因此难以利用波长在1 μm左右具有高峰值功率的激光器。为解决这个问题，1996年，Knight等人发明了PCF¹²²。由于PCF具有色散¹²³和非线性¹²⁴可调的特性，并能在宽带范围内保持单模传输，因此成为产生超连续光谱的优良介质¹²⁵。2000年，Ranka等人首次利用零色散波长为767 nm的长度为75 cm的PCF，在790 nm处用100 fs、0.8 nJ的脉冲泵浦光产生了390至1600 nm的超连续光谱¹²⁶。人们通常通过两种方式调制PCF以产生超连续光谱：一种是改变PCF的几何形状，例如改变空气孔的大小和孔间距，结合拉锥光纤和级联光纤等方法^{127,128}；另一种方式是改变PCF的材料组成，例如在二氧化硅PCF纤芯中加入氟^{129,130}、碲¹³¹、锗¹³²等元素进行掺杂(图5e)，或者在PCF孔

洞内填充气体¹³³、水¹³⁴等来提高PCF的非线性系数并获得适当的色散曲线。

此外,人们发现将二维材料与光纤结合可以提高非线性系数,促进超连续光谱的展宽。例如,2021年,Upadhyay等人理论上提出了一种名为十边形PCF的新型结构,在中心椭圆芯内填充了具有高非线性特性的MoS₂(图5f)¹³⁵。通过模拟验证,该结构具有超高的非线性系数($9.68 \times 10^5 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$)、适当的色散曲线和较低的损耗,被认为可用于产生超连续光谱。2022年,Ahmad等人在双弧形光纤上沉积了SnTe,获得了非线性系数为 $2787.9 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 、长度仅为0.11 cm的碲化锡-双弧形光纤,可以产生221.52 nm的超连续光谱展宽¹³⁶。如果将PCF作为衬底,在其孔洞内承载具有高非线性系数的二维材料,可以增加光与材料相互作用的长度,在不破坏原有传输模式的前提下降低超连续光谱产生的阈值功率,并实现跨越多个倍频程的超连续光谱的输出。

2.3 偏振控制

光偏振器是光通信系统中重要的组成部分之一,具有重要的应用价值。相比传统的晶体和薄膜类偏振器件,光纤偏振器具有重量轻、体积小、消光比高以及与光纤系统兼容性强等优点。传统的光纤偏振器一般基于单偏振光纤¹³⁷或利用外部材料,如双折射电介质^{138,139}和等离子体金属^{140,141}与光纤的非对称偏振耦合。然而,这些偏振器通常具有相对较窄的操作带宽和高损耗,限制了它们的应用潜力。

近年来,石墨烯和TMD等二维材料的光学各向异性 and 宽带响应已经被广泛认识,并已用于实现光学偏振器件^{142,143}。其中,基于石墨烯的光纤偏振器具有灵活的结构设计和高消光比等优势,使其在偏振器件领域具有巨大的应用潜力。在本征态下,石墨烯只吸收与石墨烯平面平行的部分光的电场分量(TM模式)。同时,通过光纤结构的设计或改变覆盖在光纤上的介质材料的折射率,可以改变与石墨烯方向平行和重叠的电场,从而影响TM模式或TE模式的输出^{144,145}。这种基于石墨烯的光纤偏振器具有很大的潜力,并且可以根据应用需求进行结构设计,从而实现了对光纤中不同偏振模式的选择和调控。这为光纤通信系统和光纤传感器等领域提供了新的可能性和机会。

Bao等人设计了一种基于石墨烯复合侧剖光纤的TE偏振模输出的偏振器,在1550 nm波长处实现了27 dB的高偏振消光比⁴⁶。通过构建“金属电极-电介质-石墨烯”的三层结构给石墨烯施加电

压改变其切向电场,实现偏振消光比和输出偏振态的调控(图6a)。输出光强的角度依赖分布图表明:无石墨烯的情况下,该石墨烯光纤输出为圆偏振光;有石墨烯时其输出明显的线偏振光(图6b)。2015年,Yao等人利用相同结构的偏振器设计了产生相干脉冲的随机激光器,该脉冲光纤激光器的单偏振脉冲序列消光比高达41 dB¹⁴⁶。Zhang等人¹⁴⁷将石墨烯和一种高折射率的聚乙烯醇缩丁醛(PVB)依次沉积在侧抛光纤上,抛光区域到纤芯的距离为1 μm 。其中,PVB可将侧抛表面的倏逝场从纤芯位置“拉拽”出来,明显增强了光和石墨烯相互作用强度。当入射波长为1550 nm时,该结构具有较大的偏振消光比(37.5 dB)。Li等人采用了类似器件结构,将100 nm厚的黄金沉积到侧抛光纤上的石墨烯涂层,侧抛区距离纤芯6 μm ,在入射光波长1550 nm处实现了27 dB的偏振器的消光比¹⁴⁸。

与侧抛光纤相比,微纳光纤具有更强的倏逝场。He等人将石墨烯涂覆在微纳光纤的锥区表面,并将其放置在低折射率的MgF₂底座中间以保护光纤¹⁴⁹。仿真结果表明,在微纳光纤的锥区半径小于1 μm 时,该石墨烯光纤可用作TE模输出的光纤偏振器。例如,当锥区半径为0.8 μm ,锥区长度为3.5 mm时,偏振消光比可达到27 dB。在此基础上,Zhou设计了一种可切换输出TE模或TM模的偏振器(图6c)¹⁵⁰。通过四个电极调节在石墨烯层的水平和垂直方向的电压以调节费米能级,一定费米能级下,在水平方向上TM模的损耗总是大于TE模的损耗(图6d),在垂直方向上TE模的损耗总是大于TM模的损耗(图6e),可以实现在TE和TM模式之间可切换输出的偏振器。仿真结果表明,偏振器在长度为2.5 mm时实现了17 dB以上的消光比。Kou等人通过将微纳光纤环绕在石墨烯片覆盖的棒上制作成了偏振器件。与拉锥光纤上转移石墨烯的方法相比,这种器件制备方法更加简单,且光与石墨烯相互作用距离更长¹⁵¹。其偏振原理是,平行于石墨烯平面的光吸收较强,而垂直于石墨烯平面的光吸收则很低,这样的偏振选择吸收效应可实现线偏振态输出的效果。同时,理论上可以通过在多线圈的螺旋结构下增加光纤和石墨烯的相互作用长度。当单线圈结构时,在1310 nm处的偏振消光比约为5 dB,在1550 nm处的消光比约为8 dB。通过使用更长的光纤形成双线圈结构或多线圈结构,可以增加光纤和石墨烯的接触,从而增加消光比。

石墨烯复合偏振光纤具有制作简单、与光纤系统兼容性强和结构灵活等优点,在全光纤平台上光电器件中开辟了广阔的前景。除了石墨烯外,

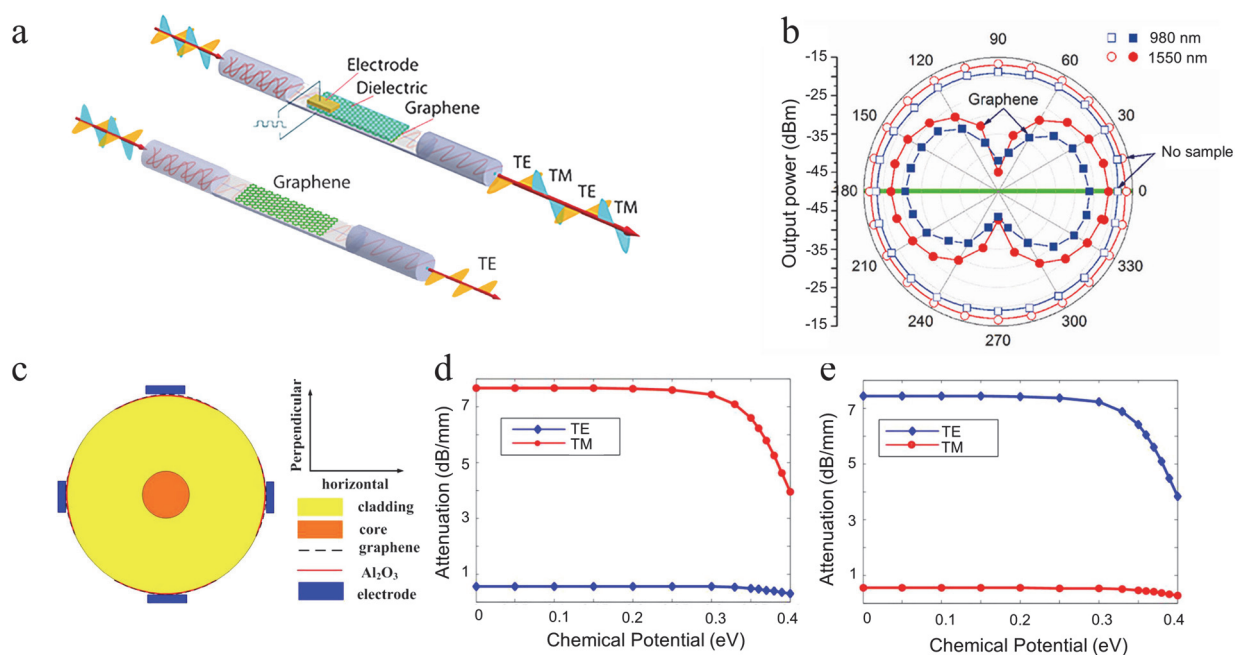


图6 二维材料复合光纤偏振控制

Fig. 6 Polarization of control two-dimensional material hybrid fiber.

(a) Schematic model of a polarizer based on graphene hybrid fiber. Only the TE mode can pass through the device and TE or TM mode can be regulated by applying electric field¹⁷¹. (b) Polar image of output power measured at 980 and 1550 nm¹⁷¹. (c) The schematic view of the proposed device. The whole structure is configured on the microfiber whose surface is surrounded by the thin layer of graphene at four sides, which is referenced to the four-electrodes structure¹⁵⁰. (d) Attenuation of TE mode and TM mode under different chemical potentials in horizontal direction¹⁵⁰. (e) Attenuation of TE mode and TM mode under different chemical potentials in perpendicular direction¹⁵⁰.

(a, b) Adapted with permission from Ref. 171, Copyright 2012 American Chemical Society.

(c, d, e) Adapted with permission from Ref. 150, Copyright 2018 IOP publishing.

其他强各向异性2D材料如黑磷^{152,153}和ReS₂^{154,155}也是极佳的偏振器件候选材料。

3 二维材料复合光纤电光调制

在传统的光纤通信系统中，电光调制器的结构通常由光波导和电极组成。光波导常采用具有较强电光效应的铁电体，如铌酸锂^{143,156}、钛酸钡¹⁵⁷等。其工作原理是将光纤耦合进波导中，在连接波导的电极上施加与携带信息相对应的电压，以改变光波导中的折射率，从而实现对输出光强度等参数的调制。近年来，在电光调制领域，二维材料复合光纤展现出其重要性和巨大潜力。通过将二维材料的高响应速度和强电光效应与光纤的低损耗和易集成性的特点相结合，为光通信、光电子以及全光纤激光器等领域提供了引人注目的解决方案。本节将重点讨论二维材料复合光纤在电光调制中的关键优势，并探讨其在实际应用中的前景。

作为最具代表性的二维材料之一，石墨烯因其对光的吸收能力可通过对载流子数量的调控而改变，在电光调制领域备受瞩目。石墨烯对光吸收

的机理包含两个过程，通常使用Kubo公式进行描述：

$$\sigma = \sigma_{\text{intra}} + \sigma_{\text{inter}} \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{intra}} = \frac{je^2}{\pi\hbar^2(\omega - j\tau_1^{-1})} \times \left[\int_0^\infty \varepsilon \left(\frac{\partial f_D(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} - \frac{\partial f_D(-\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \right) d\varepsilon \right] \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{inter}} = \frac{-je^2(\omega - j\tau_2^{-1})}{\pi\hbar^2} \times \left[\int_0^\infty \frac{f_D(-\varepsilon) - f_D(\varepsilon)}{(\omega - j\tau_2^{-1})^2 - 4\left(\frac{\varepsilon}{\hbar}\right)^2} d\varepsilon \right] \quad (3)$$

$$f_D(\varepsilon) = \left[e^{\frac{(\varepsilon - E_F)}{k_B T}} + 1 \right]^{-1} \quad (4)$$

其中， σ_{intra} 和 σ_{inter} 分别代表石墨烯带内与带间的电导率， ω 是入射光子的角频率， $\hbar$ 是简约普朗克常量， τ_1 和 τ_2 分别是带内和带间跃迁弛豫时间， T 为温度， E_F 是石墨烯的费米能级且可以由外加偏置电压来进行调控，如下式：

$$\mu_c = \hbar v_F \sqrt{\frac{\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r}{ed} |V_G - V_D|} \quad (5)$$

其中， v_F 是费米速度， ε_0 是真空介电常数， ε_r 是电

介质的介电常数, d 是电介质的厚度, e 是单位电荷量, $|V_G - V_D|$ 为外加偏置电压。

根据上述方程可以发现, 石墨烯利用电致光吸收效应, 通过施加外部偏置电压可以实现对其费米能级的调控, 导致石墨烯的光电导发生变化, 进而引起其复折射率的虚部发生改变。这个过程可以直接影响石墨烯对光的吸收特性, 从而有效地实现对光幅值的精确调制。因此, 可以利用这种机制来实现对光信号强度的精细控制, 如图7a所示, 为电光调制提供一种可行的解决方案。

利用上述原理, 2015年Yeom团队成功制备了一种基于石墨烯复合侧剖光纤的电光调制光纤锁模激光器⁴⁷。该研究将石墨烯转移到光纤侧剖面并利用滴涂离子液体覆盖石墨烯层。当施加栅压时, 离子液体/石墨烯界面形成双电层, 高电容性的双电层导致石墨烯费米能级显著变化, 从而改变了石墨烯的吸收特性。该器件在低电压(3 V)下实现了90%的相对电光调制深度。因此, 通过电压控制, 该光纤激光器实现了连续光、调Q锁模和被动锁模等三种功能。在此基础上, 2020年Yeom团队将调

制波长范围从1560 nm附近拓宽至532–1950 nm波段, 并在长波长区域表现出更高的电光调制效率, 最大达到286.3% V^{-1} , 为全光纤电光调制增加了更多的应用场景¹⁵⁸。

上述研究中采用的体系均为侧剖光纤, 其中石墨烯与纤芯泄露出的倏逝波相互作用, 但由于相互作用距离仅为微米量级, 难以实现高的绝对调制深度。因此, 2019年, 刘忠范院士团队首次采用化学气相沉积方法在米级长度的PCF内生长石墨烯。然后将离子液体完全填充在石墨烯光纤孔洞中(图7b)⁵²。填充离子液体不仅可以形成双电层, 实现对石墨烯费米能级的调控, 还可增加模场面积, 将石墨烯与光的相互作用从5 $dB \cdot cm^{-1}$ 提升至24 $dB \cdot cm^{-1}$ 。该器件在低栅压(2 V)下显示出宽带响应(1150–1600 nm)和较大调制深度(1550 nm下20 $dB \cdot cm^{-1}$), 如图7c所示。这为全光纤系统的大规模生产开辟了新的方向。

基于此, 2020年, 刘忠范院士团队在理论上设计了一种PCF内石墨烯/hBN/石墨烯夹层的全光纤电光调制器¹⁵⁹。该调制器在保证宽带响应(1260–

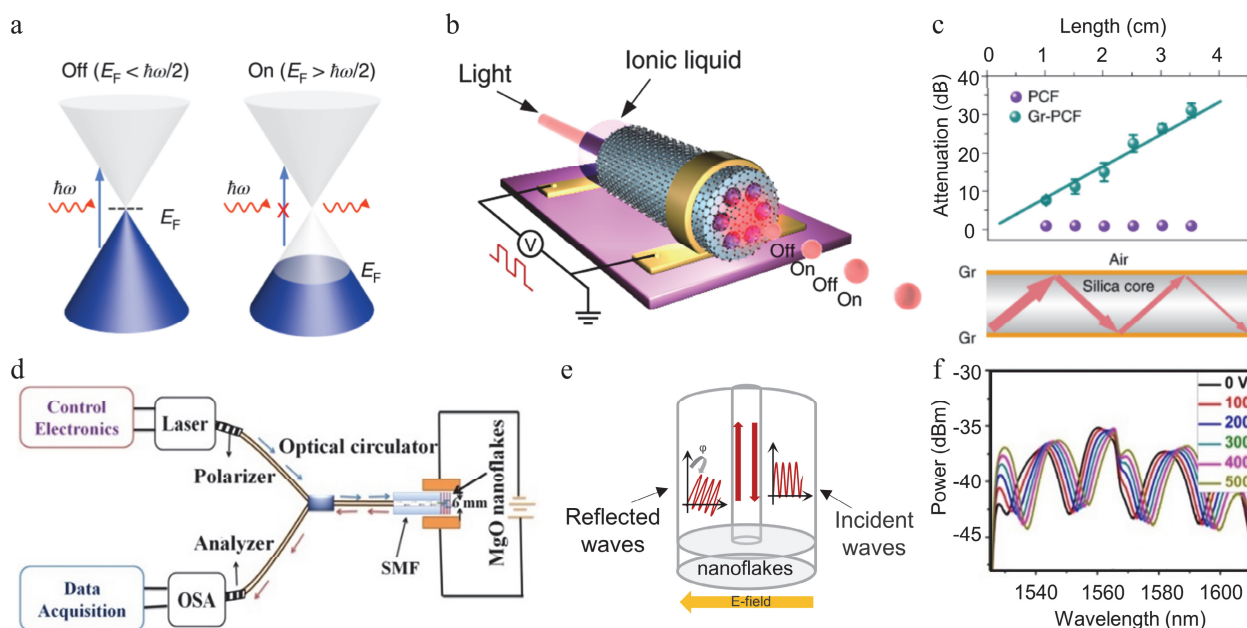


图7 二维材料复合光纤电光调制

Fig. 7 Two-dimensional material hybrid fiber electro-optic modulation.

(a) Schematic of a Gr-PCF-based electro-optic modulator⁵². (b) The ionic liquid-gating tunes the graphene's Fermi level and switches on and off the optical absorption in the graphene. When $E_F = \hbar\omega/2$, graphene absorbs (does not absorb) light, and the modulator is working in the 'off' ('on') state for light transmission⁵². (c) Top, measured optical attenuation of light propagation in the bare PCF (purple dots) and Gr-PCF (cyan dots) with different fiber lengths. Bottom, schematic of light attenuation with multiple reflections during its propagation along the Gr-PCF core⁵². (d) Schematic 2D MgO nanoflake integrated optical fiber-based electro-optic modulator¹⁷³. (e) Plane of polarization of the linearly polarized beam phase change by $\pi/8$ after reflection from MgO nanoflakes on a cylindrical fiber end surface in a perpendicular electric field¹⁷³. (f) Optical response of an output spectrum in terms of a wavelength shift under the external electric field¹⁷³.

(a, b, c) Adapted with permission from Ref. 52, Copyright 2019 Nature Publishing Group.

(d, e, f) Adapted with permission from Ref. 173, Copyright 2020 Optical Society of America.

1700 nm)和大调制深度(1550 nm下42 dB·mm⁻¹)的同时,将调制速度从16 Hz提升至100 MHz。这为全光纤系统提供了一种全新的设计思路。

上述石墨烯复合光纤电光调制器包含集成的电极电路部分,涉及电容、电阻、寄生电阻和寄生电容等。因此,调制速率受限于电路结构的RC常数,通常最高只能达到几GHz。然而,石墨烯在理论上具备500 GHz调制速率的潜力,基于电学的结构已很难再突破高百吉赫兹量级。为了突破速率限制,2018年Song团队提出了一种基于石墨烯复合微纳光纤的高速行波全光纤电光调制器¹⁶⁰。该调制器在低电压(4.9 V)和低光损耗(1.6 dB)的条件下,实现了82 GHz的高调制速率。

调节石墨烯的费米能级可以改变其对光的吸收,同时也能够影响其激发出的太赫兹等离子激元的频率¹⁶¹。在2022年,Yao等人成功将石墨烯复合到侧剖光纤中,并通过差频技术实现了全光激发石墨烯太赫兹等离子激元⁴⁵。随后,通过调节栅压,精确地控制差频的相位匹配,实现了对石墨烯等离子激元在宽频带内(0–50 THz)不同频率响应的可调节性。这项研究为基于二维材料复合光纤的太赫兹领域提供了新的理解,为高速集成光电计算开辟了新的道路。

除了石墨烯,其他二维材料也可以与光纤复合,用于电光调制,并将调制带宽拓宽至可见光波段。在2020年,Sazio团队在反谐振光纤内沉积了MoS₂,通过施加1500 V的电压,实现了在744 nm处的最大调制深度为3.52 dB¹⁶²。尽管该方法对电压的要求较高,但展示了在可见光波段具备良好的全光纤电光调制和操作潜力。

在二维材料复合光纤电光调制领域,除了通过调节偏压来改变材料折射率虚部以实现幅度调制外,还可以利用电光克尔效应或电光普克尔效应实现相位调制。电光克尔效应中,材料的折射率变化与外加电场的平方成二次关系,而电光普克尔效应则与外加电场成线性关系。电光普克尔效应是二阶非线性效应,在破缺中心反演对称性的材料体系中才会存在。由于电光调制中的折射率实部变化通常较小,因此这些效应一般在光纤干涉环形腔中得到应用。

铌酸锂是一种具有优异电光效应的铁电材料,被誉为光学领域的“硅基半导体”,但是其块体形态的电光调制器需要高电压驱动和大尺寸结构,限制了其应用。2015年Rao等人¹⁶³将铌酸锂纳米颗粒涂在Y型耦合光纤的分支处,首次制成了基于纳米铌酸锂的光纤电光调制器。当施加电压时,

由于铌酸锂纳米颗粒涂层的折射率改变,输入的光信号会在Y型耦合光纤的分支处偏向一个输出端口,而另一个输出端口则几乎没有输出。可以利用电压的开关来控制输出端口的光信号强度,从而实现光信号的开关。这为集成电子学提供了一种实用的电光调制和开关解决方案。

2020年Rao等人在此基础上,制备了一种由二维氧化镁(MgO)纳米片与实心光纤复合而成的电光调制器,其结构示意图如图7d所示¹⁶⁴。当外加电场作用于MgO纳米片时,利用电光效应使其折射率椭球发生变形,从而引起双折射现象(图7e)。当垂直入射到光纤端面的光在MgO纳米片上反射后,会发生偏折,并在干涉腔内产生波长位移(图7f)。这是首次实验验证了二维MgO纳米片在近红外电光调制和开关领域的应用潜力,其线性波长位移灵敏度高达12.87 pm·V⁻¹。相比之前基于铌酸锂纳米颗粒复合光纤电光调制的2.07 pm·V⁻¹有了更高的灵敏度,此外MgO也比铌酸锂具有更高的折射率、更低的损耗和更好的热稳定性,所以这一工作为基于新型二维金属氧化物的复合光纤电光调制器的设计和开发提供了新的思路。

综上,在二维材料中,由于其原子层厚度的结构特性,电子在垂直于二维平面的方向上受到强烈限制,并且具有相对较低的态密度。这使得二维材料对能带结构和由电光效应引起的折射率变化对外部电场非常敏感。因此,利用二维材料进行光调制可以实现更低的功耗和更好的调制深度。然而,在制备二维材料复合光纤的过程中,引入电极的步骤相对较为复杂,而且器件工艺也较为繁琐。为了扩大二维材料复合光纤的应用场景,优化制备工艺显得尤为重要。通过改进制备工艺,我们可以更高效地制备二维材料复合光纤,从而使其在电光调制方面得到更广泛的应用。这将为相关领域带来巨大的潜力和机遇。

4 二维材料复合光纤热光调制

热光效应是指材料的折射率随温度发生明显变化的过程,材料折射率的微小变化可以通过Mach-Zehnder干涉仪或结型谐振结构(MKR)实现对信号光的强度或相位调制。基于电光效应的器件通常采用类似电容的配置,制造流程复杂且产率较低,限制了其在大规模光互连中的应用。考虑到硅材料具有较大的热光系数($1.8 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$),热光调制器在硅光子学中得到了广泛应用^{165–170}。

值得注意的是,二维材料在室温下具有良好的导热性能,例如石墨烯的导热系数高达5300

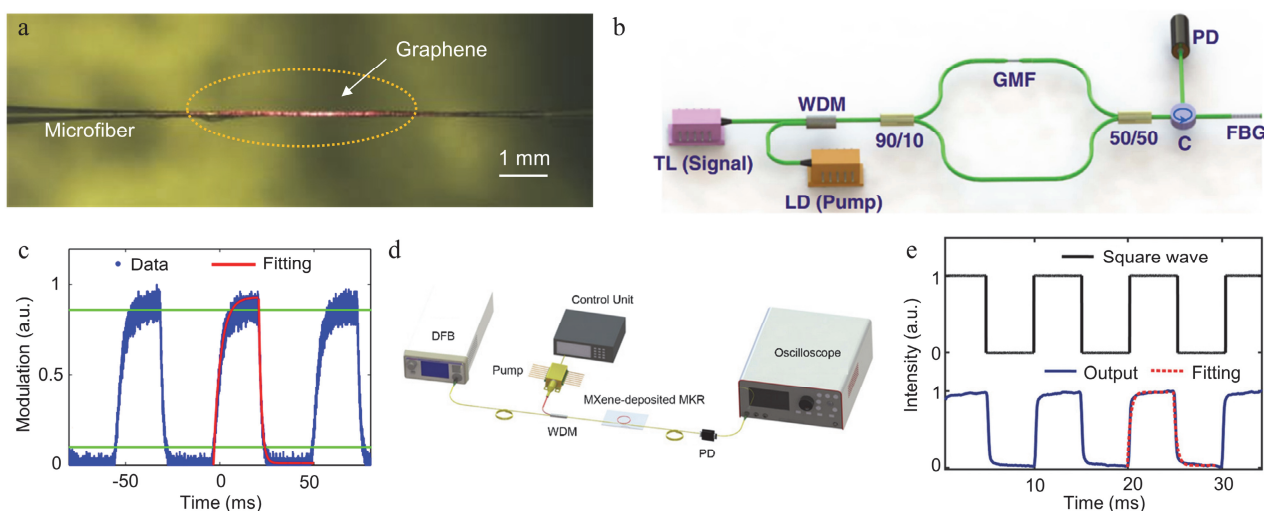


图8 二维材料复合光纤热光调制

Fig. 8 Two-dimensional material hybrid fiber thermal-optic modulation.

(a) Optical microscope images of the tapered microfiber after graphene transfer¹⁶⁴. (b) Schematic of the experimental setup for measuring the phase shift in MZI¹⁶⁴. (c) Temporal response of the thermol-optical modulator¹⁶⁴. (d) Experimental configuration of thermol-optical modulator based on the MXene-deposited MKR¹⁶⁸. (e) Waveforms of 980 nm pump light (top) and output single light (bottom) and its fitting curve¹⁶⁸.

(a, b, c) Adapted with permission from Ref. 164, Copyright 2015 The Optical Society.

(d, e) Adapted with permission from Ref. 168, Copyright 2020 Wiley-VCH.

$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 比砷化镓高出约100倍¹⁷¹, 具有快速传热的能力。以石墨烯为例, 当施加100 mW的电功率时, 可以引起约12 °C的快速温度变化¹⁷²。因此, 石墨烯辅助的热光调制器成为电容类调制器的理想替代方案。例如, Gan等人提出了一种利用石墨烯光纤进行热光调制的方法¹⁷³。将石墨烯复合微纳光纤插入Mach-Zehnder干涉仪的一只臂中, 通过石墨烯与微纳光纤(图8a)的倏逝场相互作用产生焦耳热, 实现强度调制(图8b)。结果表明, 在5.3 mW的980 nm泵浦光作用下, 观察到干涉条纹出现0.024 nm的蓝移, 表明泵浦光在5 mm长的光纤中引起了 0.51π 的相移。当泵浦光功率增加到230 mW时, 相移达到最大值 21π , 响应时间的上升时间为4 ms, 下降时间为1.4 ms(图8c)。除了石墨烯, 其他二维材料如 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$ ¹⁷⁴、 WS_2 ¹⁷⁵和BP¹⁷⁶也已被应用于基于Mach-Zehnder干涉仪的热光开关。

相较于Mach-Zehnder干涉仪, 基于光纤的结型谐振结构具有诸多优点, 如低损耗、易于制造等。近期, Wu等人采用MXene材料(Ti_2CTx)在结型谐振环上进行沉积, 设计了一种热光调制器(图8d)¹⁷⁷。在材料沉积后, 器件的损耗增加, 导致总透射光谱减少。此外, 沉积后的MXene材料会引起结型谐振结构的有效折射率和谐振环直径变化, 从而导致共振波长发生变化, 模式由耦合状态变为临界耦合状态, 导致最大消光比发生变化。实验测得的自由光谱范围(FSR)为0.53 nm, 消光比为

12.9 dB, 转换效率为 $0.196 \pi\cdot\text{mW}^{-1}$ 。与Mach-Zehnder干涉仪类似, 该热光调制器件中也可实现相位调制。通过测量输出信号波形, 观察到调制周期为10 ms, 占空比为50% (图8e)。这与泵浦光相一致, 表明信号光已经成功地被泵浦光进行调制。

基于二维材料的热光调制器受限于热扩散的速度, 导致其相较全光、电光调制器响应速度较慢, 但其在实现紧凑、简单和灵活的复合光纤系统器件方面具有重要作用。热光调制器适用于那些不需要高调制速度的应用。此外, 通过对结构的进一步发展和改进, 以及对具有优异热性能的二维材料的探索, 可以提高热光调制器的性能。

5 总结与展望

本文系统梳理和总结了二维材料复合光纤在光调制领域的研究进展。根据不同的调制原理, 可将其分为全光调制、电光调制和热光调制, 本文详细阐述了二维材料与光纤复合的方法, 以及它们的光调制过程原理和应用。首先, 针对二维材料复合光纤的全光调制, 我们进一步细分为基于复折射率实部的光学参量转换, 以及基于复折射率虚部的被动锁模、全光开关、超连续光谱展宽和偏振控制。我们总结了全光调制的特点, 即调制速度快, 但受材料吸收的限制, 导致绝对调制深度较低。然后, 对于二维材料复合光纤的电光调制, 我们将其分为基于复折射率实部的电光普克尔效应

与电光克尔效应和基于复折射率虚部的电致光吸收效应。我们总结了电光调制的特点,其绝对调制深度高,但受光纤微纳加工兼容性的限制,导致工艺繁琐和器件结构复杂。最后,对于二维材料复合光纤的热光调制,我们重点介绍了基于温度改变复折射率的热光效应。我们总结了热光调制的特点,即器件简单易于集成,但受热扩散时间尺度较长(微秒至毫秒级)的限制,导致调制速度相对较慢。

近年来,随着具有多种功能的光纤与性能优异的二维材料的不断融合,带来了一系列挑战和机遇,对于二维材料复合光纤器件的制备工艺可以考虑以下几个方面:(1)首先,二维材料与光纤的复合主要通过转移和直接生长方法实现。转移方法方面,人们应避免湿法转移引入杂质影响调制效果,干法转移方法则需要提高制备效率和成品率。光纤表面或孔内壁直接生长二维材料的方法的主要挑战在于光纤本身二氧化硅材质缺乏催化性不利于二维材料生长以及光纤的非晶特性导致形核率低的问题,所以需要发展二维材料的单晶尺寸和晶畴大小稳定可控的制备方法以及二维材料复合光纤的表征技术。(2)其次,由于通过CVD高温生长的二维材料复合光纤易受损,需要探索更温和的生长环境或更耐高温的光纤材质。(3)最后,目前绝大多数工作仍基于单一材料与光纤的复合。可以探索在光纤上转移或生长异质结构,以实现更出色的调制性能和更多的功能。为了推动二维材料复合光纤的实际应用和性能提升,我们认为未来的发展方向可以从以下几个方面着手。

(1)首先,目前很多研究仅停留在理论设计、概念验证或原型阶段,其真正使用时的性能距替代传统器件还比较遥远。所以,在未来的发展中应多考虑其实际应用所面临的具体问题,以更好地解决目前传统器件所存在的痛点问题。这样可以提高器件的可靠性和可重复性。(2)其次,光纤本身是一种可以批量化控制的体系,然而与二维材料复合的手段绝大多数并不可以批量化实现。所以,在设计器件的过程中应尽量减少工艺流程并且提高制作过程的产品良率。这样可以降低器件的成本和复杂度。(3)最后,很多二维材料受环境影响很大,常见的比如黑磷与TMD等材料在空气中十分不稳定。所以,在设计器件时应考虑封装或制作保护层等手段以提高器件的稳定性。这样可以拓展器件的功能和应用范围。

全光纤系统是未来发展的一个重要趋势。二维材料凭借其独特物性,在与光纤复合形成的二

维材料复合光纤及其器件中表现出非常出色的性能。随着对光通信和光信息处理需求不断增长,全光纤器件有望成为满足高速、高带宽数据传输需求的关键技术。在光纤结构方面,侧剖光纤、光子晶体光纤和微纳光纤等各种新型光纤的出现为光纤的应用领域带来了广阔的发展空间。这些不同结构的光纤可以与二维材料以多种方式复合,实现低损耗、宽波段和高速度的全光纤光调制器。端面复合、侧剖复合和孔内壁复合是常见的复合方式,它们各自具有独特的特点和适用范围。随着制备技术的不断进步,我们可以预期在光纤领域将会出现更多创新和多功能的全光纤器件,推动全光纤系统的广泛应用和普及。

当谈及全光纤器件的未来发展方向时,我们可以想象一个美妙的未来景象:在某一天,所有光纤器件都将变为全光纤型的二维材料光纤器件。这些器件涵盖了传感器、调制器、激光器、探测器、光限制器、偏振器、相位延迟器、光频梳、光栅等众多功能。通过将这些功能集成在一根光纤之中,我们能够实现更为高效和紧凑的光通信以及光信息处理系统。这一愿景令人激动,激发着人们的无限想象力和创造力,它展现了未来全光纤器件的无限潜力。无论是用于传感应用、调制光信号,还是用于产生高质量的激光光源,这些全光纤型的二维材料光纤器件将引领着通信技术的革命。同时,它们的集成设计将实现了空间和能源的高效利用,为光通信和光信息处理领域带来革命性的突破。

本综述为全光纤调制器的材料、结构和原理的发展提供了有益的参考,旨在推动二维材料复合光纤在光调制领域的应用和发展。通过持续的创新和探索,我们期望科学家们能够实现更高性能、更可靠的全光纤光通信系统,以满足不断增长的通信需求,促进人类社会的进一步发展。

Author Contributions: Kaifeng Lin, Writing – Abstract, Introduction, Electro-optic modulation, Summary and prospect. Typesetting figure – 1,2,3,7, Correction format; Ding Zhong, Writing – Polarization control, Thermo-optical modulation. Typesetting figure – 6,8; Jiahui Shao, Writing – Passive mode locking and all-optical switch, Optical parameter conversion and supercontinuum spectrum broadening. Typesetting figure – 4,5; Kaihui Liu, Validation, Conceptualization, Funding Acquisition; Jinhuan Wang, Supervision, Polish, Modify format; Yonggang Zuo, Supervision, Polish, Modify format; Xu Zhou, Conceptualization, Funding Acquisition, Supervision, Polish, Modify format.

References

- (1) Kao, K. C.; Hockham, G. A. *IEE Proc.-J Optoelectron.* **1986**, *133*, 191. doi: 10.1049/ip-j.1986.0030
- (2) Shi, W.; Tian, Y.; Gervais, A. *Nanophotonics* **2020**, *9*, 4629. doi: 10.1515/nanoph-2020-0309
- (3) Chen, J.-H.; Xiong, Y.-F.; Xu, F.; Lu, Y.-Q. *Light Sci. Appl.* **2021**, *10*, 78. doi: 10.1038/s41377-021-00520-x
- (4) Chang, C.; Chen, W.; Chen, Y.; Chen, Y. H.; Chen, Y.; Ding, F.; Fan, C. H.; Fan, H. J.; Fan, Z. X.; Gong, C.; *et al. Acta Phys. -Chim. Sin.* **2021**, *37*, 2108017. [常诚, 陈伟, 陈也, 陈永华, 陈雨, 丁峰, 樊春海, 范红金, 范战西, 龚成, 等. 物理化学学报, **2021**, *37*, 2108017.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202108017
- (5) Guinea, F.; Peres, N. M. R.; Novoselov, K. S.; Geim, A. K.; Castro Neto, A. H. *Rev. Mod. Phys.* **2009**, *81*, 109. doi: 10.1103/RevModPhys.81.109
- (6) Tan, C.; Cao, X.; Wu, X.-J.; He, Q.; Yang, J.; Zhang, X.; Chen, J.; Zhao, W.; Han, S.; Nam, G.-H.; *et al. Chem. Rev.* **2017**, *117*, 6225. doi: 10.1021/acs.chemrev.6b00558
- (7) Novoselov, K. S.; Mishchenko, A.; Carvalho, A.; Castro Neto, A. H. *Science* **2016**, *353*, 6298. doi: 10.1126/science.aac9439
- (8) Naguib, M.; Mochalin, V. N.; Barsoum, M. W.; Gogotsi, Y. *Adv. Mater.* **2014**, *26*, 992. doi: 10.1002/adma.201304138
- (9) Manzeli, S.; Ovchinnikov, D.; Pasquier, D.; Yazyev, O. V.; Kis, A. *Nat. Rev. Mater.* **2017**, *2*, 17033. doi: 10.1038/natrevmats.2017.33
- (10) Liu, H.; Neal, A. T.; Zhu, Z.; Luo, Z.; Xu, X.; Tomanek, D.; Ye, P. D. *ACS Nano* **2014**, *8*, 4033. doi: 10.1021/nn501226z
- (11) Fiori, G.; Bonaccorso, F.; Iannaccone, G.; Palacios, T.; Neumaier, D.; Seabaugh, A.; Banerjee, S. K.; Colombo, L. *Nat. Nanotechnol.* **2014**, *9*, 768. doi: 10.1038/nnano.2014.207
- (12) Butler, S. Z.; Hollen, S. M.; Cao, L.; Cui, Y.; Gupta, J. A.; Gutierrez, H. R.; Heinz, T. F.; Hong, S. S.; Huang, J.; Ismach, A. F.; *et al. ACS Nano* **2013**, *7*, 2898. doi: 10.1021/nn400280c
- (13) Britnell, L.; Ribeiro, R. M.; Eckmann, A.; Jalil, R.; Belle, B. D.; Mishchenko, A.; Kim, Y. J.; Gorbachev, R. V.; Georgiou, T.; Morozov, S. V.; *et al. Science* **2013**, *340*, 1311. doi: 10.1126/science.1235547
- (14) Mak, K. F.; Shan, J.; *Nat. Photonics* **2016**, *10*, 216. doi: 10.1038/nphoton.2015.282
- (15) Xu, X.; Zhang, Z.; Qiu, L.; Zhuang, J.; Zhang, L.; Wang, H.; Liao, C.; Song, H.; Qiao, R.; Gao, P.; *et al. Nat. Nanotechnol.* **2016**, *11*, 930. doi: 10.1038/nnano.2016.132
- (16) Xu, X.; Zhang, Z.; Dong, J.; Yi, D.; Niu, J.; Wu, M.; Lin, L.; Yin, R.; Li, M.; Zhou, J.; *et al. Sci. Bull.* **2017**, *62*, 1074. doi: 10.1016/j.scib.2017.07.005
- (17) Wang, L.; Xu, X.; Zhang, L.; Qiao, R.; Wu, M.; Wang, Z.; Zhang, S.; Liang, J.; Zhang, Z.; Zhang, Z.; *et al. Nature* **2019**, *570*, 91. doi: 10.1038/s41586-019-1226-z
- (18) Yu, S.; Wu, X.; Wang, Y.; Guo, X.; Tong, L. *Adv. Mater.* **2017**, *29*, 1606128. doi: 10.1002/adma.201606128
- (19) Bonaccorso, F.; Sun, Z.; Hasan, T.; Ferrari, A. C. *Nat. Photonics* **2010**, *4*, 611. doi: 10.1038/nphoton.2010.186
- (20) Wang, Z.; Qiao, J.; Zhao, S.; Wang, S.; He, C.; Tao, X.; Wang, S. *InfoMat* **2021**, *3*, 1110. doi: 10.1002/inf2.12236
- (21) Meng, S.; Kong, T.; Ma, W.; Wang, H.; Zhang, H. *Small* **2019**, *15*, 1902691. doi: 10.1002/smll.201902691
- (22) Liu, W.; Liu, M.; Liu, X.; Wang, X.; Deng, H.-X.; Lei, M.; Wei, Z.; Wei, Z. *Adv. Opt. Mater.* **2020**, *8*, 1901631. doi: 10.1002/adom.201901631
- (23) Liu, M.; Wei, Z.-W.; Luo, A.-P.; Xu, W.-C.; Luo, Z.-C. *Nanophotonics* **2020**, *9*, 2641. doi: 10.1515/nanoph-2019-0564
- (24) He, J.; Tao, L.; Zhang, H.; Zhou, B.; Li, J. *Nanoscale* **2019**, *11*, 2577. doi: 10.1039/c8nr09368g
- (25) Mao, D.; Wang, H.; Zhang, H.; Zeng, C.; Du, Y.; He, Z.; Sun, Z.; Zhao, J. *Nat. Commun.* **2021**, *12*, 6712. doi: 10.1038/s41467-021-26872-x
- (26) Chen, H.; Wang, C.; Ouyang, H.; Song, Y.; Jiang, T. *Nanophotonics* **2020**, *9*, 2107. doi: 10.1515/nanoph-2019-0493
- (27) Sun, Z.; Hasan, T.; Torrisi, F.; Popa, D.; Privitera, G.; Wang, F.; Bonaccorso, F.; Ba Sko, D. M.; Ferrari, A. C. *ACS Nano* **2010**, *4*, 803. doi: 10.1021/nn901703e
- (28) Xia, F.; Wang, H.; Xiao, D.; Dubey, M.; Ramasubramaniam, A. *Nat. Photonics* **2014**, *8*, 899. doi: 10.1038/nphoton.2014.271
- (29) Sun, Z.; Martinez, A.; Wang, F. *Nat. Photonics* **2016**, *10*, 227. doi: 10.1038/nphoton.2016.15
- (30) Novoselov, K. S.; Geim, A. K.; Morozov, S. V.; Jiang, D.; Katsnelson, M. I.; Grigorieva, I. V.; Dubonos, S. V.; Firsov, A. A. *Nature* **2005**, *438*, 197. doi: 10.1038/nature04233
- (31) Zhang, Z.; Ding, M.; Cheng, T.; Qiao, R.; Zhao, M.; Luo, M.; Wang, E.; Sun, Y.; Zhang, S.; Li, X.; *et al. Nat. Nanotechnol.* **2022**, *17*, 1258. doi: 10.1038/s41565-022-01230-0
- (32) Baccarani, G.; Ostojia, P. *Solid-State Electron.* **1975**, *18*, 579. doi: 10.1016/0038-1101(75)90036-2
- (33) Klimmer, S.; Ghaebi, O.; Gan, Z.; George, A.; Turchanin, A.; Cerullo, G.; Soavi, G. *Nat. Photonics* **2021**, *15*, 837. doi: 10.1038/s41566-021-00859-y
- (34) Hong, H.; Wu, C.; Zhao, Z.; Zuo, Y.; Wang, J.; Liu, C.; Zhang, J.; Wang, F.; Feng, J.; Shen, H.; *et al. Nat. Photonics* **2021**, *15*, 510. doi: 10.1038/s41566-021-00801-2
- (35) Zhou, X.; Cheng, J.; Zhou, Y.; Cao, T.; Hong, H.; Liao, Z.; Wu, S.; Peng, H.; Liu, K.; Yu, D. *J. Am. Chem. Soc.* **2015**, *137*, 7994. doi: 10.1021/jacs.5b04305

- (36) Autere, A.; Jussila, H.; Dai, Y.; Wang, Y.; Lipsanen, H.; Sun, Z. *Adv. Mater.* **2018**, *30*, 1705963. doi: 10.1002/adma.201705963
- (37) Huang, Y.; Pan, Y.-H.; Yang, R.; Bao, L.-H.; Meng, L.; Luo, H.-L.; Cai, Y.-Q.; Liu, G.-D.; Zhao, W.-J.; Zhou, Z.; *et al. Nat. Commun.* **2020**, *11*, 2453. doi: 10.1038/s41467-020-16266-w
- (38) Tseng, S.-M.; Chen, C.-L. *Appl. Opt.* **1992**, *31*, 3438. doi: 10.1364/AO.31.003438
- (39) Knight, J. C.; Broeng, J.; Birks, T. A.; Russell, P. S. J. *Science* **1998**, *282*, 1476. doi: 10.1126/science.282.5393.1476
- (40) Russell, P. J. S. **2003**, *299*, 358. doi: 10.1126/science.1079280
- (41) Tong, L. M.; Gattass, R. R.; Ashcom, J. B.; He, S. L.; Lou, J. Y.; Shen, M. Y.; Maxwell, I.; Mazur, E. *Nature* **2003**, *426*, 816. doi: 10.1038/nature02193
- (42) Gao, S.-f.; Wang, Y.-y.; Ding, W.; Jiang, D.-l.; Gu, S.; Zhang, X.; Wang, P. *Nat. Commun.* **2018**, *9*, 2828. doi: 10.1038/s41467-018-05225-1
- (43) Xu, P.; Cui, B.; Bu, Y.; Wang, H.; Guo, X.; Wang, P.; Shen, Y. R.; Tong, L. *Science* **2021**, *373*, 187. doi: 10.1126/science.abh3754
- (44) Bao, Q.; Zhang, H.; Wang, Y.; Ni, Z.; Yan, Y.; Shen, Z. X.; Loh, K. P.; Tang, D. Y. *Adv. Funct. Mater.* **2009**, *19*, 3077. doi: 10.1002/adfm.200901007
- (45) Li, Y.; An, N.; Lu, Z.; Wang, Y.; Chang, B.; Tan, T.; Guo, X.; Xu, X.; He, J.; Xia, H.; *et al. Nat. Commun.* **2022**, *13*, 3138. doi: 10.1038/s41467-022-30901-8
- (46) Bao, Q.; Zhang, H.; Wang, B.; Ni, Z.; Lim, C. H. Y. X.; Wang, Y.; Tang, D. Y.; Loh, K. P. *Nat. Photonics* **2011**, *5*, 411. doi: 10.1038/nphoton.2011.102
- (47) Lee, E. J.; Choi, S. Y.; Jeong, H.; Park, N. H.; Yim, W.; Kim, M. H.; Park, J.-K.; Son, S.; Bae, S.; Kim, S. J.; *et al. Nat. Commun.* **2015**, *6*, 6851. doi: 10.1038/ncomms7851
- (48) Ouyang, T.; Lin, L.; Xia, K.; Jiang, M.; Lang, Y.; Guan, H.; Yu, J.; Li, D.; Chen, G.; Zhu, W.; *et al. Opt. Express* **2017**, *25*, 9823. doi: 10.1364/oe.25.009823
- (49) Wang, X. Y.; Cheng, Y.; Xue, G. D.; Zhou, Z. Q.; Zhao, M. Z.; Ma, C. J.; Xie, J.; Yao, G. J.; Hong, H.; Zhou, X.; *et al. Acta Phys. -Chim. Sin.* **2023**, *39*, 2212028. [王晓愚, 程阳, 薛国栋, 周子琦, 赵孟泽, 马超杰, 谢瑾, 姚光杰, 洪浩, 周旭, 等. 物理化学学报, **2023**, *39*, 2212028.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202212028
- (50) 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
- (51) Shang, N. Z.; Cheng, Y.; Ao, S.; Tuerdi, G.; Li, M. W.; Wang, X. Y.; Hong, H.; Li, Z. H.; Zhang, X. Y.; Fu, W. Y.; *et al. Acta Phys. -Chim. Sin.* **2022**, *38*, 2108041. [尚念泽, 程熠, 敖申, 姑力米热, 李梦文, 王晓愚, 洪浩, 李泽晖, 张晓艳, 符汪洋, 等. 物理化学学报, **2022**, *38*, 2108041.] doi: 10.3866/PKU.WHXB202108041
- (52) Chen, K.; Zhou, X.; Cheng, X.; Qiao, R.; Cheng, Y.; Liu, C.; Xie, Y.; Yu, W.; Yao, F.; Sun, Z.; *et al. Nat. Photonics* **2019**, *13*, 754. doi: 10.1038/s41566-019-0492-5
- (53) Zhou, X.; Deng, Q.; Yu, W.; Liu, K.; Liu, Z. *Adv. Funct. Mater.* **2022**, *32*, 2202282. doi: 10.1002/adfm.202202282
- (54) Li, W.; Chen, B.; Meng, C.; Fang, W.; Xiao, Y.; Li, X.; Hu, Z.; Xu, Y.; Tong, L.; Wang, H.; *et al. Nano Lett.* **2014**, *14*, 955. doi: 10.1021/nl404356t
- (55) Zhang, M.; Wu, Q.; Chen, H.; Zheng, Z.; Zhang, H. *2D Mater.* **2021**, *8*, 12003. doi: 10.1088/2053-1583/abafab
- (56) Liang, C.; Lee, K. F.; Levin, T.; Chen, J.; Kumar, P. *Opt. Express* **2006**, *14*, 6936. doi: 10.1364/OE.14.006936
- (57) Knox, W. H. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **2000**, *6*, 1273. doi: 10.1109/2944.902178
- (58) Huang, H.; Yang, L.-M.; Liu, J. *Appl. Opt.* **2012**, *51*, 2979. doi: 10.1364/AO.51.002979
- (59) Gattass, R. R.; Mazur, E. *Nat. Photonics* **2008**, *2*, 219. doi: 10.1038/nphoton.2008.47
- (60) Diddams, S. A. J. *Opt. Soc. Am. B-Opt. Phys.* **2010**, *27*, B51. doi: 10.1364/JOSAB.27.000B51
- (61) Qin, C.; Jia, K.; Li, Q.; Tan, T.; Wang, X.; Guo, Y.; Huang, S.-W.; Liu, Y.; Zhu, S.; Xie, Z.; *et al. Light Sci. Appl.* **2020**, *9*, 185. doi: 10.1038/s41377-020-00419-z
- (62) Sorokin, E.; Sorokina, I. T.; Mandon, J.; Guelachvili, G.; Picqué, N. *Opt. Express* **2007**, *15*, 16540. doi: 10.1364/OE.15.016540
- (63) Huang, H.; Yang, L.-M.; Liu, J. In *Femtosecond Fiber-Laser-Based, Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*, Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosives (CBRNE) Sensing XIII, SPIE: Baltimore, 2012; pp. 835817–835819.
- (64) Keller, U.; Weingarten, K. J.; Kartner, F. X.; Kopf, D.; Braun, B.; Jung, I. D.; Fluck, R.; Honninger, C.; Matuschek, N.; derAu, J. A. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **1996**, *2*, 435. doi: 10.1109/2944.571743
- (65) Jiang, T.; Yin, K.; Wang, C.; You, J.; Ouyang, H.; Miao, R.; Zhang, C.; Wei, K.; Li, H.; Chen, H.; *et al. Photonics Res.* **2020**, *8*, 78. doi: 10.1364/PRJ.8.000078
- (66) Dawlaty, J. M.; Shivaraman, S.; Chandrashekar, M.; Rana, F.; Spencer, M. G. *Appl. Phys. Lett.* **2008**, *92*. doi: 10.1063/1.2837539
- (67) Kumar, S.; Anija, M.; Kamaraju, N.; Vasu, K. S.; Subrahmanyam, K. S.; Sood, A. K.; Rao, C. N. R. *Appl. Phys. Lett.* **2009**, *95*, 191911. doi: 10.1063/1.3264964
- (68) Liu, J.; Wu, S. D.; Yang, Q. H.; Wang, P. *Opt. Lett.* **2011**, *36*, 4008. doi: 10.1364/ol.36.004008

- (69) Popa, D.; Sun, Z.; Hasan, T.; Torrisi, F.; Wang, F.; Ferrari, A. C. *Appl. Phys. Lett.* **2011**, *98*, 073106. doi: 10.1063/1.3552684
- (70) Martinez, A.; Sun, Z. *Nat. Photonics* **2013**, *7*, 842. doi: 10.1038/nphoton.2013.304
- (71) Song, Y.-W.; Jang, S.-Y.; Han, W.-S.; Bae, M.-K. *Appl. Phys. Lett.* **2010**, *96*, 51122. doi: 10.1063/1.3309669
- (72) Lin, Y.-H.; Yang, C.-Y.; Liou, J.-H.; Yu, C.-P.; Lin, G.-R. *Opt. Express* **2013**, *21*, 16763. doi: 10.1364/OE.21.016763
- (73) Cheng, Y.; Yu, W.; Xie, J.; Wang, R.; Cui, G.; Cheng, X.; Li, M.; Wang, K.; Li, J.; Sun, Z.; *et al.* *ACS Photonics* **2022**, *9*, 961. doi: 10.1021/acsp Photonics.1c01823
- (74) Sotor, J.; Pasternak, I.; Krajewska, A.; Strupinski, W.; Sobon, G. *Opt. Express* **2015**, *23*, 27503. doi: 10.1364/OE.23.027503
- (75) Martinez, A.; Yamashita, S. *Appl. Phys. Lett.* **2012**, *101*, 041118. doi: 10.1063/1.4739512
- (76) Yan, P.; Liu, A.; Chen, Y.; Chen, H.; Ruan, S.; Guo, C.; Chen, S.; Li, I. L.; Yang, H.; Hu, J.; *et al.* *Opt. Mater. Express* **2015**, *5*, 479. doi: 10.1364/OME.5.000479
- (77) Mao, D.; Wang, Y.; Ma, C.; Han, L.; Jiang, B.; Gan, X.; Hua, S.; Zhang, W.; Mei, T.; Zhao, J. *Sci. Rep.* **2015**, *5*, 7965. doi: 10.1038/srep07965
- (78) Liu, H.; Zheng, X.-W.; Liu, M.; Zhao, N.; Luo, A.-P.; Luo, Z.-C.; Xu, W.-C.; Zhang, H.; Zhao, C.-J.; Wen, S.-C. *Opt. Express* **2014**, *22*, 6868. doi: 10.1364/OE.22.006868
- (79) Yan, P.; Lin, R.; Chen, H.; Zhang, H.; Liu, A.; Yang, H.; Ruan, S. *IEEE Photonics Technol. Lett.* **2015**, *27*, 264. doi: 10.1109/LPT.2014.2361915
- (80) Sotor, J.; Sobon, G.; Abramski, K. M.; *Opt. Express* **2014**, *22*, 13244. doi: 10.1364/OE.22.013244
- (81) Chen, Y.; Jiang, G.; Chen, S.; Guo, Z.; Yu, X.; Zhao, C.; Zhang, H.; Bao, Q.; Wen, S.; Tang, D.; *et al.* *Opt. Express* **2015**, *23*, 12823. doi: 10.1364/OE.23.012823
- (82) Jin, X.; Hu, G.; Zhang, M.; Hu, Y.; Albrow-Owen, T.; Howe, R. C. T.; Wu, T. C.; Wu, Q.; Zheng, Z.; Hasan, T. *Opt. Express* **2018**, *26*, 12506. doi: 10.1364/OE.26.012506
- (83) Sotor, J.; Sobon, G.; Macherzynski, W.; Paletko, P.; Abramski, K. M. *Appl. Phys. Lett.* **2015**, *107*, 051108. doi: 10.1063/1.4927673
- (84) Yu, Q.; Liu, F.; Zhang, Y.; Deng, H.; Shu, B.; Zhang, J.; Yi, T.; Dai, Y.; Fan, C.; Su, W.; *et al.* *Adv. Photonics Res.* **2023**, *4*, 2200283. doi: 10.1002/adpr.202200283
- (85) Li, Y.; Zhao, X.; Zhang, H.; Li, M.; *Infrared Phys. Technol.* **2019**, *96*, 325. doi: 10.1016/j.infrared.2018.11.014
- (86) Lee, D.; Park, K.; Debnath, P. C.; Kim, I.; Song, Y.-W.; *Nanotechnology* **2016**, *27*, 365203. doi: 10.1088/0957-4484/27/36/365203
- (87) Luo, Z.; Wu, D.; Xu, B.; Xu, H.; Cai, Z.; Peng, J.; Weng, J.; Xu, S.; Zhu, C.; Wang, F.; *et al.* *Nanoscale* **2016**, *8*, 1066. doi: 10.1039/C5NR06981E
- (88) Song, H.; Wang, Q.; Zhang, Y.; Li, L.; *Opt. Commun.* **2017**, *394*, 157. doi: 10.1016/j.optcom.2017.01.016
- (89) Zhao, L. M.; Tang, D. Y.; Zhang, H.; Wu, X.; Bao, Q.; Loh, K. P. *Opt. Lett.* **2010**, *35*, 3622. doi: 10.1364/OL.35.003622
- (90) Dou, Z.; Song, Y.; Tian, J.; Liu, J.; Yu, Z.; Fang, X. *Opt. Express* **2014**, *22*, 24055. doi: 10.1364/OE.22.024055
- (91) Sobon, G.; Sotor, J.; Pasternak, I.; Krajewska, A.; Strupinski, W.; Abramski, K. M. *Opt. Mater. Express* **2015**, *5*, 2884. doi: 10.1364/OME.5.002884
- (92) Jung, M.; Lee, J.; Koo, J.; Park, J.; Song, Y.-W.; Lee, K.; Lee, S.; Lee, J. H. *Opt. Express* **2014**, *22*, 7865. doi: 10.1364/OE.22.007865
- (93) Zhu, G.; Zhu, X.; Wang, F.; Xu, S.; Li, Y.; Guo, X.; Balakrishnan, K.; Norwood, R. A.; Peyghambarian, N. *IEEE Photonics Technol. Lett.* **2015**, *28*, 7. doi: 10.1109/LPT.2017.2478836
- (94) Hader, J.; Yang, H. J.; Scheller, M.; Moloney, J. V.; Koch, S. W. *J. Appl. Phys.* **2016**, *119*, 053102. doi: 10.1063/1.4941350
- (95) Cafiso, S. D. D. D.; Ugoletti, E.; Schmidt, A.; Petrov, V.; Griebner, U.; Agnesi, A.; Cho, W. B.; Jung, B. H.; Rotermund, F.; Bae, S.; *et al.* *Opt. Lett.* **2013**, *38*, 1745. doi: 10.1364/ol.38.001745
- (96) Sasikala, V.; Chitra, K. J. *Opt.* **2018**, *47*, 307. doi: 10.1007/s12596-018-0452-3
- (97) 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. *Laser Phys. Lett.* **2013**, *10*, 065901. doi: 10.1088/1612-2011/10/6/065901
- (98) Meng, C.; Yu, S.-L.; Wang, H.-Q.; Cao, Y.; Tong, L.-M.; Liu, W.-T.; Shen, Y.-R. *Light Sci. Appl.* **2015**, *4*, e348. doi: 10.1038/lsa.2015.121
- (99) Chen, J.-H.; Zheng, B.-C.; Shao, G.-H.; Ge, S.-J.; Xu, F.; Lu, Y.-Q. *Light Sci. Appl.* **2015**, *4*, e360. doi: 10.1038/lsa.2015.133
- (100) Zhang, H.; Healy, N.; Shen, L.; Huang, C. C.; Hewak, D. W.; Peacock, A. C. *Sci. Rep.* **2016**, *6*, 1. doi: 10.1038/srep23512
- (101) Zhang, D.; Guan, H.; Zhu, W.; Yu, J.; Lu, H.; Qiu, W.; Dong, J.; Zhang, J.; Luo, Y.; Chen, Z. *Opt. Express* **2017**, *25*, 28536. doi: 10.1364/OE.25.028536
- (102) Soklaski, R.; Liang, Y.; Yang, L.; Tran, V. *Phys. B* **2014**, *89*, 235319. doi: 10.1103/PhysRevB.89.235319
- (103) Willner, A. E.; Khaleghi, S.; Chitgarha, M. R.; Yilmaz, O. F. *J. Lightwave Technol.* **2013**, *32*, 660. doi: 10.1109/JLT.2013.2287219
- (104) Koos, C.; Vorreau, P.; Vallaitis, T.; Dumon, P.; Bogaerts, W.; Baets, R.; Esembeson, B.; Biaggio, I.; Michinobu, T.; Diederich, F. *Nat. Photonics* **2009**, *3*, 216.

- doi: 10.1038/nphoton.2009.25
- (105) Inoue, K. *J. Lightwave Technol.* **1992**, *10*, 1553.
doi: 10.1109/50.184893
- (106) Ohlen, P.; Olsson, B. E.; Blumenthal, D. J. P. *IEEE Photonics Technol. Lett.* **2000**, *12*, 522. doi: 10.1109/68.841273
- (107) Dahan, D.; Bilenca, A.; Eisenstein, G. *Opt. Lett.* **2003**, *28*, 634.
doi: 10.1364/OL.28.000634
- (108) Jiang, B.; Hao, Z.; Ji, Y.; Hou, Y.; Yi, R.; Mao, D.; Gan, X.; Zhao, J.; *Light Sci. Appl.* **2020**, *9*, 63.
doi: 10.1038/s41377-020-0304-1
- (109) Chen, J.-H.; Tan, J.; Wu, G.-X.; Zhang, X.-J.; Xu, F.; Lu, Y.-Q. *Light Sci. Appl.* **2019**, *8*, 8.
doi: 10.1038/s41377-018-0115-9
- (110) Ngo, G. Q.; Najafidehaghani, E.; Gan, Z.; Khazaei, S.; Siems, M. P.; George, A.; Schartner, E. P.; Nolte, S.; Ebendorff-Heidepriem, H.; Pertsch, T.; *et al. Nat. Photonics* **2022**, *16*, 769.
doi: 10.1038/s41566-022-01067-y
- (111) Guo, J.; Xie, J.-J.; Li, D.-J.; Yang, G.-L.; Chen, F.; Wang, C.-R.; Zhang, L.-M.; Andreev, Y. M.; Kokh, K. A.; Lanski, G. V.; *et al. Light Sci. Appl.* **2015**, *4*, e362. doi: 10.1038/lsa.2015.135
- (112) Gai, X.; Choi, D.-Y.; Madden, S.; Luther-Davies, B. *Opt. Express* **2012**, *20*, 13513. doi: 10.1364/OE.20.013513
- (113) Xu, B.; Martinez, A.; Yamashita, S. *IEEE Photonics Technol. Lett.* **2012**, *24*, 1792. doi: 10.1109/LPT.2012.2210035
- (114) Wu, Y.; Yao, B.; Cheng, Y.; Rao, Y.; Gong, Y.; Zhou, X.; Wu, B.; Chiang, K. S. *IEEE Photonics Technol. Lett.* **2013**, *26*, 249.
doi: 10.1109/LPT.2013.2291897
- (115) Wu, Y.; Yao, B. C.; Feng, Q. Y.; Cao, X. L.; Zhou, X. Y.; Rao, Y. J.; Gong, Y.; Zhang, W. L.; Wang, Z. G.; Chen, Y. F.; *et al. Photonics research (Washington, DC)* **2015**, *3*, A64.
doi: 10.1364/PRJ.3.000A64
- (116) Zheng, J.; Yang, Z.; Si, C.; Liang, Z.; Chen, X.; Cao, R.; Guo, Z.; Wang, K.; Zhang, Y.; Ji, J. *ACS Photonics* **2017**, *4*, 1466.
doi: 10.1021/acsp Photonics.7b00231
- (117) Wang, K.; Zheng, J.; Huang, H.; Chen, Y.; Song, Y.; Ji, J.; Zhang, H. *Opt. Express* **2019**, *27*, 16798. doi: 10.1364/OE.27.016798
- (118) Song, Y.; Chen, Y.; Jiang, X.; Liang, W.; Wang, K.; Liang, Z.; Ge, Y.; Zhang, F.; Wu, L.; Zheng, J. *Adv. Opt. Mater.* **2018**, *6*, 1701287.
doi: 10.1002/adom.201701287
- (119) Song, Y.; Chen, Y.; Jiang, X.; Ge, Y.; Wang, Y.; You, K.; Wang, K.; Zheng, J.; Ji, J.; Zhang, Y. *Adv. Opt. Mater.* **2019**, *7*, 1801777.
doi: 10.1002/adom.201801777
- (120) Chen, S.; Miao, L.; Chen, X.; Chen, Y.; Zhao, C.; Datta, S.; Li, Y.; Bao, Q.; Zhang, H.; Liu, Y. *Adv. Opt. Mater.* **2015**, *3*, 1769.
doi: 10.1002/adom.201500347
- (121) Lin, C.; Stolen, R. H. *Appl. Phys. Lett.* **1976**, *28*, 216.
doi: 10.1063/1.88702
- (122) Knight, J. C.; Birks, T. A.; Russell, P. S.; Atkin, D. M. *Opt. Lett.* **1996**, *21*, 1547. doi: 10.1364/ol.21.001547
- (123) Mogilevtsev, D.; Birks, T. A.; Russell, P. S. *Opt. Lett.* **1998**, *23*, 1662. doi: 10.1364/ol.23.001662
- (124) Saitoh, K.; Koshiba, M. *Opt. Express* **2004**, *12*, 2027.
doi: 10.1364/OPEX.12.002027
- (125) Liu, K.; Liu, J.; Shi, H. X.; Tan, F. Z.; Wang, P. *Opt. Express* **2014**, *22*, 24384. doi: 10.1364/oe.22.024384
- (126) Ranka, J. K.; Windeler, R. S.; Stentz, A. J. *Opt. Lett.* **2000**, *25*, 25.
doi: 10.1364/ol.25.000025
- (127) Stark S P, P. A. J. N. *J. Opt. Soc. Am. B-Opt. Phys.* **2009**, *3*, 592.
doi: 10.1364/JOSAB.27.000592
- (128) Guo, C.; Ruan, S.; Yan, P.; Pan, E.; Wei, H. *Opt. Express* **2010**, *18*, 11046. doi: 10.1364/OE.18.011046
- (129) Wang, F.; Wang, K.; Yao, C.; Jia, Z.; Wang, S.; Wu, C.; Qin, G.; Ohishi, Y.; Qin, W. *Opt. Lett.* **2016**, *41*, 634.
doi: 10.1364/OL.41.000634
- (130) Jiang, X.; Joly, N. Y.; Finger, M. A.; Babic, F.; Wong, G. K. L.; Travers, J. C.; Russell, P. S. *J. Nat. Photonics* **2015**, *9*, 133.
doi: 10.1038/nphoton.2014.320
- (131) Domachuk, P.; Wolchover, N. A.; Cronin-Golomb, M.; Wang, A.; George, A. K.; Cordeiro, C. M.; Knight, J. C.; Omenetto, F. G. *Opt. Express* **2008**, *16*, 7161. doi: 10.1364/oe.16.007161
- (132) Kudlinski, A.; Bouwmans, G.; Vanvincq, O.; Quiquempois, Y.; Le Rouge, A.; Bigot, L.; Melin, G.; Mussot, A. *Opt. Lett.* **2009**, *34*, 3631. doi: 10.1364/OL.34.003631
- (133) Kottig, F.; Novoa, D.; Tani, F.; Gunendi, M. C.; Cassataro, M.; Travers, J. C.; Russell, P. S. *J. Nat. Commun.* **2017**, *8*, 813.
doi: 10.1038/s41467-017-00943-4
- (134) Bethge, J.; Husakou, A.; Mitschke, F.; Noack, F.; Griebner, U.; Steinmeyer, G.; Herrmann, J. *Opt. Express* **2010**, *18*, 6230.
doi: 10.1364/OE.18.006230
- (135) Upadhyay, A.; Singh, S.; Sharma, D.; Taya, S. A. *Mater. Sci. Eng. B-Adv. Funct. Solid-State Mater.* **2021**, *270*, 115236.
doi: 10.1016/j.mseb.2021.115236
- (136) Ahmad, H.; Salleh, M. F.; Zaini, M. K. A.; Yusoff, N.; Reduan, S. A.; Ismail, M. F. *IEEE J. Quantum Electron.* **2022**, *58*, 1.
doi: 10.1109/JQE.2022.3175490
- (137) Chen, J.-H.; Chen, Y.; Luo, W.; Kou, J.-L.; Xu, F.; Lu, Y.-Q. *Opt. Express* **2014**, *22*, 17890.
doi: 10.1364/OE.22.017890
- (138) Kerbage, C.; Steinvurzel, P.; Reyes, P.; Westbrook, P. S.; Windeler, R. S.; Hale, A.; Eggleton, B. J. *Opt. Lett.* **2002**, *27*, 842.
doi: 10.1364/OL.27.000842
- (139) Qian, W.; Zhao, C.-L.; Wang, Y.; Chan, C. C.; Liu, S.; Jin, W. *Opt.*

- Lett.* **2011**, *36*, 3296. doi: 10.1364/OL.36.003296
- (140) Lee, H. W.; Schmidt, M. A.; Tyagi, H. K.; Sempere, L. P.; Russell, P. S. J. *Appl. Phys. Lett.* **2008**, *93*, 111102. doi: 10.1063/1.2982083
- (141) Lee, H. W.; Schmidt, M. A.; Russell, P. S. J. *Opt. Lett.* **2012**, *37*, 2946. doi: 10.1364/OL.37.002946
- (142) Kim, J. T.; Choi, C.-G. *Opt. Express* **2012**, *20*, 3556. doi: 10.1364/OE.20.003556
- (143) Sathiyar, S.; Ahmad, H.; Chong, W. Y.; Lee, S. H.; Sivabalan, S. *IEEE Photonics J.* **2015**, *7*, 1. doi: 10.1109/JPHOT.2015.2499543
- (144) de Oliveira, R. E. P.; de Matos, C. J. S. *Sci. Rep.* **2015**, *5*, 16949. doi: 10.1038/srep16949
- (145) Liu, M.; Yin, X.; Ulin-Avila, E.; Geng, B.; Zentgraf, T.; Ju, L.; Wang, F.; Zhang, X. *Nature* **2011**, *474*, 64. doi: 10.1038/nature10067
- (146) Yao, B.; Rao, Y.; Wang, Z.; Wu, Y.; Zhou, J.; Wu, H.; Fan, M.; Cao, X.; Zhang, W.; Chen, Y. *Sci. Rep.* **2015**, *5*, 18526. doi: 10.1038/srep18526
- (147) Zhang, H.; Healy, N.; Shen, L.; Huang, C. C.; Aspiotis, N.; Hewak, D. W.; Peacock, A. C. J. *Lightwave Technol.* **2016**, *34*, 3563. doi: 10.1109/JLT.2016.2581315
- (148) Li, W.; Yi, L.; Zheng, R.; Ni, Z.; Hu, W. *Photonics Res.* **2016**, *4*, 41. doi: 10.1364/PRJ.4.000041
- (149) He, X.; Zhang, X.; Zhang, H.; Xu, M. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **2013**, *20*, 55. doi: 10.1109/JSTQE.2013.2270278
- (150) Zhou, F.; Du, W. *J. Opt.* **2018**, *20*, 035401. doi: 10.1088/2040-8986/aaa6fa
- (151) Kou, J.-L.; Chen, J.-H.; Chen, Y.; Xu, F.; Lu, Y.-Q. *Optica* **2014**, *1*, 307. doi: 10.1364/OPTICA.1.000307
- (152) Xia, F.; Wang, H.; Jia, Y. *Nat. Commun.* **2014**, *5*, 4458. doi: 10.1038/ncomms5458
- (153) Yuan, H.; Liu, X.; Afshinmanesh, F.; Li, W.; Xu, G.; Sun, J.; Lian, B.; Curto, A. G.; Ye, G.; Hikita, Y. *Nat. Nanotechnol.* **2015**, *10*, 707. doi: 10.1038/nnano.2015.112
- (154) Cui, Y.; Lu, F.; Liu, X.; *Sci. Rep.* **2017**, *7*, 1. doi: 10.1038/srep43909
- (155) Liu, E.; Fu, Y.; Wang, Y.; Feng, Y.; Liu, H.; Wan, X.; Zhou, W.; Wang, B.; Shao, L.; Ho, C.-H. *Nat. Commun.* **2015**, *6*, 6991. doi: 10.1038/ncomms7991
- (156) Wang, C.; Zhang, M.; Stern, B.; Lipson, M.; Loncar, M. *Opt. Express* **2018**, *26*, 1547. doi: 10.1364/oe.26.001547
- (157) Abel, S.; Eltes, F.; Ortmann, J. E.; Messner, A.; Castera, P.; Wagner, T.; Urbonas, D.; Rosa, A.; Gutierrez, A. M.; Tulli, D.; *et al. Nat. Mater.* **2019**, *18*, 42-+. doi: 10.1038/s41563-018-0208-0
- (158) Park, N. H.; Ha, S.; Chae, K.; Park, J. Y.; Yeom, D. I. *Nanophotonics* **2020**, *9*, 4539. doi: 10.1515/nanoph-2020-0327
- (159) Cheng, X.; Zhou, X.; Tao, L.; Yu, W.; Liu, C.; Cheng, Y.; Ma, C.; Shang, N.; Xie, J.; Liu, K.; *et al. Nanoscale* **2020**, *12*, 14472. doi: 10.1039/D0NR03266B
- (160) Xu, K.; Xie, Y. Q.; Xie, H. C.; Liu, Y. J.; Yao, Y.; Du, J. B.; He, Z. Y.; Song, Q. H. *J. Lightwave Technol.* **2018**, *36*, 4730. doi: 10.1109/jlt.2018.2864606
- (161) Dolleman, R. J.; Hsu, M.; Vollebregt, S.; Sader, J. E.; van der Zant, H. S. J.; Steeneken, P. G.; Ghatkesar, M. K. *Appl. Phys. Lett.* **2019**, *115*, 053102. doi: 10.1063/1.5111086
- (162) Lewis, A. H.; De Lucia, F.; Belardi, W.; Huang, C.-C.; Hayes, J. R.; Poletti, F.; Hewak, D. W.; Sazio, P. J. A. In *Composite Material Hollow Core Anti-Resonant Fiber Electromodulators: Exploring the Optical FET Response*, Conference on Optical Components and Materials XVII, San Francisco, CA, 2020, Feb. 4–6; San Francisco, CA, 2020.
- (163) Rao, C. N.; Sagar, S. B.; Harshitha, N. G.; Aepuru, R.; Premkumar, S.; Panda, H. S.; Choubey, R. K.; Kale, S. N. *Opt. Lett.* **2015**, *40*, 491. doi: 10.1364/ol.40.000491
- (164) Rao, C. N.; Pawar, D.; Nakate, U. T.; Aepuru, R.; Gui, X.; Mangalaraja, R. V.; Kale, S. N.; Suh, E.-k.; Liu, W.; Zhu, D.; *et al. Opt. Lett.* **2020**, *45*, 4611. doi: 10.1364/ol.393796
- (165) Nedeljkovic, M.; Stanković, S.; Mitchell, C. J.; Khokhar, A. Z.; Reynolds, S. A.; Thomson, D. J.; Gardes, F. Y.; Littlejohns, C. G.; Reed, G. T.; Mashanovich, G. Z. *IEEE Photonics Technol. Lett.* **2014**, *26*, 1352. doi: 10.1109/LPT.2014.2323702
- (166) Densmore, A.; Janz, S.; Ma, R.; Schmid, J. H.; Xu, D.-X.; Delâge, A.; Lapointe, J.; Vachon, M.; Cheben, P. *Opt. Express* **2009**, *17*, 10457. doi: 10.1364/OE.17.010457
- (167) Gan, F.; Barwicz, T.; Popovic, M.; Dahlem, M.; Holzwarth, C.; Rakich, P.; Smith, H.; Ippen, E.; Kartner, F. In *Maximizing the Thermo-Optic Tuning Range of Silicon Photonic Structures*, 2007 Photonics in Switching, IEEE: San Francisco, 2007; pp. 67–68.
- (168) Dong, P.; Qian, W.; Liang, H.; Shafiiha, R.; Feng, D.; Li, G.; Cunningham, J. E.; Krishnamoorthy, A. V.; Asghari, M. *Opt. Express* **2010**, *18*, 20298. doi: 10.1364/OE.18.020298
- (169) Dong, P.; Shafiiha, R.; Liao, S.; Liang, H.; Feng, N.-N.; Feng, D.; Li, G.; Zheng, X.; Krishnamoorthy, A. V.; Asghari, M. *Opt. Express* **2010**, *18*, 10941. doi: 10.1364/OE.18.010941
- (170) Guo, Y.; Han, B.; Du, J.; Cao, S.; Gao, H.; An, N.; Li, Y.; An, S.; Ran, Z.; Lin, Y.; *et al. Research* **2021**, *2021*, 5612850. doi: 10.34133/2021/5612850
- (171) Bao, Q.; Loh, K. P. *ACS Nano* **2012**, *6*, 3677. doi: 10.1021/nn300989g
- (172) Kim, J. T.; Chung, K. H.; Choi, C.-G. *Opt. Express* **2013**, *21*, 15280. doi: 10.1364/OE.21.015280
- (173) Gan, X.; Zhao, C.; Wang, Y.; Mao, D.; Fang, L.; Han, L.; Zhao, J. *Optica* **2015**, *2*, 468. doi: 10.1364/OPTICA.2.000468

- (174) Wang, C.; Peng, Q.-Q.; Fan, X.-W.; Liang, W.-Y.; Zhang, F.; Liu, J.; Zhang, H. *Chin. Phys. B* **2018**, *27*, 094214. doi: 10.1088/1674-1056/27/9/094214
- (175) Wu, K.; Guo, C.; Wang, H.; Zhang, X.; Wang, J.; Chen, J. *Opt. Express* **2017**, *25*, 17639. doi: 10.1364/OE.25.017639
- (176) Wang, Y.; Zhang, F.; Tang, X.; Chen, X.; Chen, Y.; Huang, W.; Liang, Z.; Wu, L.; Ge, Y.; Song, Y.; *et al.* *Laser Photonics Rev.* **2018**, *12*, 1800016. doi: 10.1002/lpor.201800016
- (177) Wu, Q.; Huang, W.; Wang, Y.; Wang, C.; Zheng, Z.; Chen, H.; Zhang, M.; Zhang, H. *Adv. Opt. Mater.* **2020**, *8*, 1900977. doi: 10.1002/adom.201900977