

专题: 低维材料非线性光学与器件

低维半导体材料在非线性光学领域的研究进展*

白瑞雪¹⁾²⁾ 杨珏晗¹⁾ 魏大海¹⁾ 魏钟鸣^{1)†}

1) (中国科学院半导体研究所, 半导体超晶格国家重点实验室, 北京 100083)

2) (中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

(2020年2月11日收到; 2020年3月10日收到修改稿)

自从第一台红宝石激光器发明以来, 研究人员将目光集中到激光这种普通光源达不到的强光上, 由此发现了非线性光学材料以及一系列丰富多彩的相关特性——饱和吸收、反饱和吸收和非线性折射等, 并将其运用到光电子器件、光开关器件和光通信当中. 同时, 随着工业生产对于器件集成度需求的提升, 以普通三维材料为基础的器件已经难以达到应用要求, 低维半导体器件的兴起将有望解决这个问题. 所以, 将非线性光学与低维半导体材料相结合是未来发展的重要趋势, 量子点、量子线激光器和放大器的涌现也印证了这一点. 本文通过对准零维量子点材料、准一维纳米线材料和二维纳米材料非线性光学前沿工作进行总结, 为今后的研究提供参考. 但是, 低维材料由于稳定性、填充比例较低等问题, 还需要进一步的研究以满足实用需求.

关键词: 非线性光学, 低维半导体, 量子点, 激光器

PACS: 42.65.-k, 03.67.Hk, 42.55.Px

DOI: 10.7498/aps.69.20200206

1 引言

非线性光学是研究介质在强光下产生的现象. 所以, 非线性光学又称为强光光学. 通常, 假设在各向同性材料中具有瞬时介电响应, 则感应极化强度和电场强度之间的关系可以表示为

$$P(t) = \epsilon_0(\chi^{(1)}E(t) + \chi^{(2)}E^2(t) + \chi^{(3)}E^3(t) + \dots), \quad (1)$$

其中, E 为电场强度, ϵ_0 为真空介电常数, $\chi^{(1)}$ 为线性极化率, $\chi^{(2)}$ 为二阶非线性极化率, $\chi^{(3)}$ 为三阶非线性极化率. 从阶数上来分, 二阶非线性光响应主要有线性电光效应、光整流效应、和频^[1]和差频产生、二次谐波产生 (second harmonic generation, SHG)^[2]、参量变换、参量放大与振荡等; 三阶非线性光响应主要包括光致非线性折射率效应 (光克尔效应^[3]、自聚焦、自相位调制)、三次谐波产生 (third harmonic generation, THG)^[4]、四波混频 (four-wave-mixing, FWM)^[5]、双光子吸收 (two-photon

absorption, TPA)^[6,7]和受激拉曼散射 (stimulated Raman scattering, SRS)^[8]. 二阶非线性光响应发生在没有反演中心的材料中, 而三阶非线性可以发生在任何材料当中. 随着现代纳米制造技术的不断发展, 研究者对亚波长尺度下的非线性光学的兴趣也在不断增加. 但是, 纳米材料的小体积限制了它们与光场的相互作用, 需用量子限制效应或局部表面等离子体激元产生的强烈近场所提供的高振荡器强度来补偿.

近年来, 低维材料的非线性光学在激光器^[9,10]、光开关^[11]和光限幅器^[12]等光学器件当中得到发展. 量子阱结构在非线性光学的理论研究^[13]占有一席之地, 并且被应用于外腔面发射激光器^[14,15]中. 低维半导体常被用作饱和吸收体^[16], 饱和吸收 (saturable absorption, SA) 是一种与 $\chi^{(3)}$ 的虚部有关的现象, 强光“漂白”材料, 造成强光处的吸收率降低. 与可饱和吸收不同, 反饱和吸收的特点是吸收系数随入射光强的增大而增大^[17], 主要针对

* 国家自然科学基金 (批准号: 61622406) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zmwei@semi.ac.cn

人眼和光学仪器的防护. 近年来, 有关光限幅效应的研究包括自聚焦 [18]、自散焦 [19]、反饱和吸收 [20]、TPA [21] 等. 在一维材料领域, 碳纳米管作为早期准一维材料常作为饱和吸收体被应用于激光器, 现在使用的碳纳米管通常会经过表面修饰, 使得碳纳米管的性能有更大的提高. 在二维材料领域, 2004 年 Geim 等 [22] 通过机械剥离的方法获得了石墨烯, 吸引了世人的关注, 打破了二维半导体不能单独存在的理论, 二维材料在层内由较强的共价键连接, 而层间则由较弱的范德瓦耳斯键连接, 这种独特的结构易于制备原子级厚度的材料. 石墨烯具有超快的载流子动力学和较高的三阶非线性极化率 [23,24], 它已被广泛用于光子器件, 包括饱和吸收体 [25–27]、光学调制器 [28,29]、光电探测器 [30] 和光开关 [31] 当中. 介电介质中探测光束的克尔非线性信号可以用来在石墨烯 [32] 和介电介质界面产生表面等离子体激元, 受控的表面等离子体激元在纳米光子学、光伏器件和等离子体发生器中有重要的作用. 在石墨烯表面进行一些修饰, 例如添加金属光栅结构 [33] 有助于引起石墨烯光吸收的增强, 同时导致在该石墨烯结构中太赫兹等离激元和入射光发生强烈耦合而产生太赫兹等离极化激元. 除石墨烯之外, 近年来非线性光学在其他二维材料如拓扑绝缘体 (topological insulator, TI) [34]、过渡金属二硫化物 (transi-

tion metal dichalcogenides, TMDs) [35–38]、黑磷 (black phosphorus, BP) [39,40] 等材料体系中取得很大的进展. 非线性光学纳米材料在生物检测 [41,42] 领域也有重要的用途. 随着分子束外延技术 (molecular beam epitaxy, MBE) 和金属有机物化学气相沉积 (metal-organic chemical vapor deposition, MOCVD) 技术的发展, 范德瓦耳斯异质结、半导体量子点结构、超晶格被用作非线性光学器件, 尤其是在半导体激光器当中. 同等的情况下, 由于有着更多的受限维度, 半导体量子线和量子点可以极大地提升激光器的性能指标. 近些年, 非线性光响应被在很多方面有着新颖的应用, 比如在排列 TMDs 材料异质结构的晶格 [43] 上面发挥了重要的作用. 图 1 所示为少层石墨烯在调制器、光开关、光纤等器件和设备的重要应用和物理性质 [44–47].

本文首先从准一维碳纳米管入手, 重点概述单壁碳纳米管的制备方法和作为饱和吸收体在激光器上的运用, 最后概述为提升性能研究者们对碳纳米管的修饰工作. 在二维材料方面, 着重于石墨烯及其异质结系统、TMDs 和氮组二维材料的光学物理性质和实际应用. 在零维材料量子点系统中, 选择近几年最新研究的材料体系并加以归纳总结. 低维材料由于特殊的物理性质在非线性光领域有着非常广泛的应用, 推动了非线性光研究的发展.

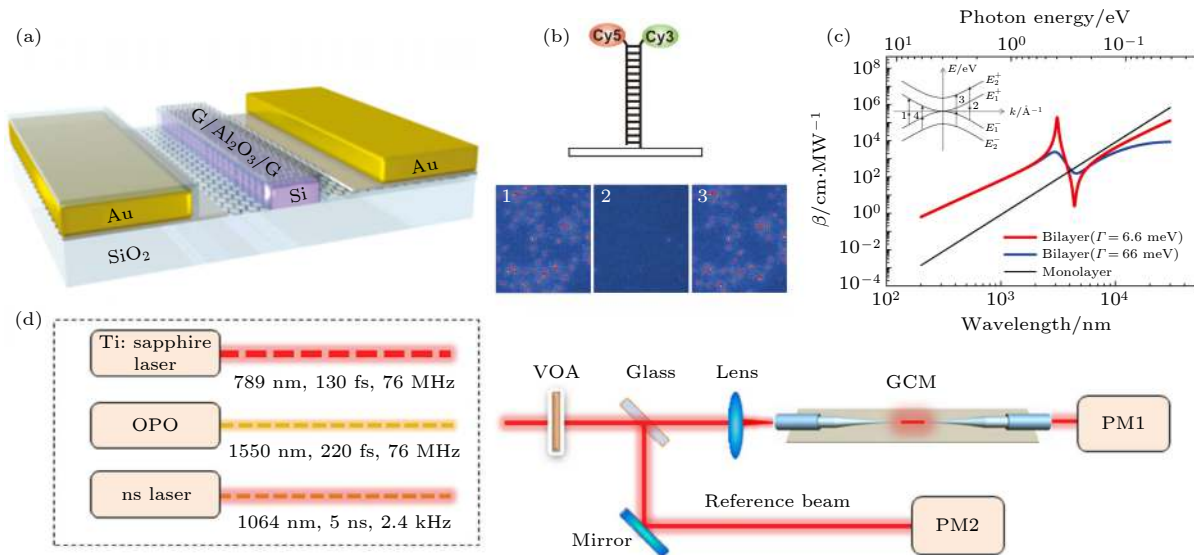


图 1 (a) 双层石墨烯调制器结构示意图 [44]; (b) 单分子光开关示意图 [45]; (c) 双层石墨烯双光子吸收和双层石墨烯 4 个可能的过渡 [46]; (d) 用于石墨烯包裹的光纤 (GCM) 透射率测量的实验装置 [47]

Fig. 1. (a) Schematic of the structure for the double layer graphene modulator (reproduced with permission [44], Copyright 2012 American Chemical Society); (b) single-molecule optical switch (reproduced with permission [45], Copyright 2005 American Physical Society); (c) two-photon absorption in bilayer graphene and four possible transitions in bilayer graphene (reproduced with permission [46], Copyright 2011 American Chemical Society); (d) experimental setup for transmittance measurements of GCMs (reproduced with permission [47], Copyright 2014 American Chemical Society).

2 碳纳米管和二维材料非线性光响应

2.1 碳纳米管

按照石墨烯片的层数,碳纳米管可分为单壁碳纳米管 (single-walled carbon nanotube, SWCNT) 和多壁碳纳米管 (multi-wall carbon nanotube, MWCNT), SWCNT 由石墨烯卷曲而成,并且在顶端具有端盖,通常直径为 1 nm 左右,管长通常约为 1 μm ,可以看作是准一维碳纳米线.典型的 SWCNT 直径为 0.7—1.5 nm,对应的吸收峰波长为 1—2 μm .由于沿管轴存在的离域 π 电子态 [48],其具有出色的非线性光学特性,例如饱和吸收、双光子吸收和光限幅,在电子和光学器件的小型化方面有着重要的作用 [49].迄今为止,SWCNT 已被广泛用作全光开关设备,脉冲激光器的饱和吸收体和光限幅设备 [48].

SWCNT 的制备过程中,一般需要过渡金属元

素 Co 和 Ni 来与碳达到联合冷凝的效果.在不要其产量的情况下,使用 1:1 混合的 Co 和 Ni 也可以做催化剂.电弧法和激光法 [50] 是碳纳米管生长的两种最基本的方法.2019 年, Gladush 等 [51] 采用悬浮催化剂化学气相沉积的方法制备.在 CO 的气氛下,热反应区的催化剂颗粒上生长出了 SWCNTs.在反应区的出口,SWCNTs 由一层过滤网收集,形成具有随机取向的半导体金属纳米管薄膜,薄膜的厚度由收集时间控制.通过调整纳米管的平均直径使得 S_{11} 吸收峰可和钕激光器的增益谱相匹配.单壁碳纳米管饱和吸收体 [52] (single-wall carbon nanotubes saturable absorbers, SWCNT-SA) 作为半导体基超快激光器和限幅器的潜在替代品受到了广泛的关注.图 2(a) 和图 2(d) 为用于测量碳纳米管非线性光学性质的设备示意图 [53,54],图 2(b) 和图 2(c) 为基于单壁碳纳米管饱和吸收体的激光器装置示意图和单壁碳纳

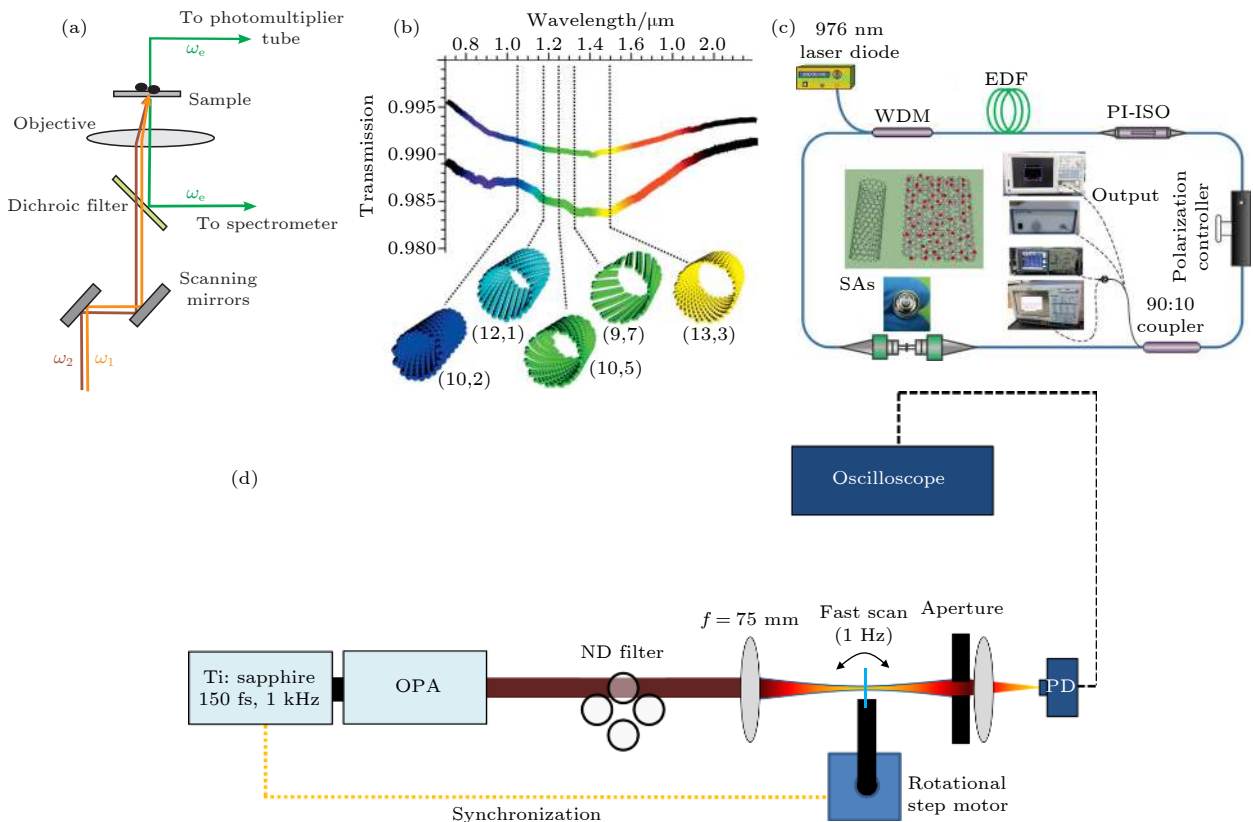


图 2 (a) 相干非线性光学响应测量装置图 [53]; (b) 可饱和的透射 SWCNT 的透射光谱 [55]; (c) 基于单壁碳纳米管饱和吸收体的超快激光器装置图 [56]; (d) Z 扫描系统装置图 [54]

Fig. 2. (a) Schematic of coherent nonlinear optical response measurement setup (reproduced with permission [53], Copyright 2010 The American Physical Society); (b) transmission spectra of transmissive SWCNT saturable absorbers (reproduced with permission [55], Copyright © 2010 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim); (c) experimental setup of the ultrafast-laser based on SWCNT SAs (reproduced with permission [56], Copyright 2016 Springer Nature); (d) schematic diagram of the Z-scan setup (reproduced with permission [54], Copyright 2019, Springer Nature).

米管透射光谱图^[55,56].

半导体可饱和吸收镜^[57](semiconductor saturable absorber mirror, SESAM) 必须采用非常复杂的外延工艺制备, 以减少吸收层的恢复时间. 相比传统半导体可饱和吸收镜来说, 由于有着成熟的旋涂工艺, 生产 SWCNT-SA 的成本要低得多. 此外, SWCNT-SA^[58] 适用于新型宽带饱和吸收体, 具有更短的恢复时间, 可以沉积在更多的衬底材料上, 既可以制备反射式又可以制备透射式 SWCNT-SA, 后者在半导体合成工艺中一直是一个难点. 2018 年, Pan 等^[59] 使用 SWCNT 作为锁模飞秒激光器的饱和吸收体, 分别在无外部压缩和有外部压缩的情况下, 在 2081 nm 处分别产生短至 83 fs 和 76 fs 的脉冲. 在 102 MHz 的重复频率下, 平均功率总计为 67 mW. SWCNT 光学特性可以通过电化学掺杂在近红外区域显著改变^[51], 在掺杂条件下, 态的填充改变了材料的非线性光学响应, 从而抑制了光吸收, 可以应用于控制脉冲产生激光器. 在 2 V 的外加电压下, 原材料的光致漂白逐渐降低, 最后甚至可以转化为光吸收. 在此基础上, 一种可调谐式的光纤耦合饱和吸收体被设计出来. 将此设备安装在全偏振保持光纤激光器中, 可通过调节栅极电压来研究电控脉冲激光状态的可行性. 2019 年, 北京大学 Li 等^[60] 报道了在亚纳米级碳纳米管和 800 nm 脉冲的条件下的非线性光电子发射行为: 强场光发射产生了与入射光波形同步的阿秒 (10^{-18} s) 级电子脉冲. 结果显示载流子包络相敏发射电流得到极大的改善, 在调制电流为 2 nA 的情况下, 调制深度达到了 100%. 通过计算可以表明, 这种现象是由于价带光发射与电荷相互作用的结果, 非线性动力学可以通过改变纳米管的带隙来调节. 2019 年, Shi^[48] 等合成并提纯了纯半导体单壁碳纳米管 (semiconducting single-walled carbon nanotube, s-SWCNT). 与普通 SWCNT 相比, s-SWCNT 具有较低的饱和强度和较低的双光子吸收系数, s-SWCNT 的调制深度高达 8.6%, 这些参数将确保 s-SWCNT 在脉冲激光器中充当出色的饱和吸收体. 与早期的作为溶剂的 SWCNT 非线性光学研究不同的是, 有研究将不溶性 SWCNT 与酞菁染料 (phthalocyanines, Pcs) 混合后在 PMMA 中制成薄膜^[61]. 通过使用开孔径 Z 扫描系统测定确定了其线性吸收系数 α_0 、非线性吸收系数 β 、饱和通量 F_{sat} 和吸收截面系数 κ 等参数, 结果

显示 α_0 , F_{sat} , β 和 κ 分别为 17.2 cm^{-1} , 17.61 J/cm^2 , $8.70 \times 10^{-6} \text{ cm/W}$ 和 12.49, 所以这种薄膜相对于以前的 SWCNT 来讲更适合应用于光限幅器.

2.2 石墨烯及其异质结

石墨烯和类石墨烯二维纳米材料具有优异的物理化学性质, 打开了人们对于纳米材料的认知^[62,63]. 目前, 通过化学方法合成的少层石墨烯横向尺寸可以达到几纳米^[64–66], 为基于石墨烯的纳米级非线性光学器件提供了新的平台. 由于线性零带隙结构^[62,67], 石墨烯显示出独特的电学性质, 例如高达 $10^6 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的载流子迁移率和反常量子霍尔效应等现象. 石墨烯独特的电学性质使得其在光学领域也得到重视, 即便石墨烯只有原子薄, 它也可以吸收可观的入射光. 零带隙、线性结构和无质量的狄拉克费米子使石墨烯显示出极强的光耦合性质. 这种宽带线性度导致了石墨烯的光谱响应范围^[68,69] 从红外到可见光再到紫外, 但值得注意的是, 在长波长条件下石墨烯具有更小的饱和强度, 石墨烯饱和强度最低可达 0.04 mW/cm^2 ^[70]. 石墨烯中的二阶非线性由于反演对称被禁止, 所以三阶非线性成为主导, 例如 THG^[71–73]、FWM^[53,74]、光学克尔效应^[46,75–77]、自相位调制^[78,79]. 石墨烯的三阶非线性差别非常大, 可以通过栅控掺杂和化学势位移改变几个数量级^[80,81]. 石墨烯具有低非饱和吸收损耗, 可用于激光器的饱和吸收体. 随着厚度的变化, 其调制深度可以在 66.5%—6.2% 的宽范围内变化. 与纳米管相比, 它的饱和吸收可以在更低的饱和阈值下实现. 石墨烯与传统材料例如 GaAs^[82] 相比有着更好的光吸收、更低的饱和强度和更高的光载流子密度. 本征石墨烯不具有强烈的光-物质相互作用, 而石墨烯光子晶体纤维有着很强的可调节光-物质相互作用^[83]. 通过抑制分子流动的低压化学气相沉积 (low pressure chemical vapor deposition, LPCVD) 的生长方式, 可以得到长达 0.5 m 的石墨烯光子晶体纤维, 使新型光纤设备成为可能, 例如, 电调谐锁模全光纤激光器、门控式波长无关非线性波长转换器、可调节带宽偏振器和光学限制器. 作为等离激元材料, 掺杂电子的石墨烯可支持长寿命的等离激元激发, 该激发可以与光进行有效耦合, 并且可以通过改变电荷载流子

的密度进行主动调谐^[84–89]. 在这种材料中也观察到了强烈的固有非线性^[53,71,77], 可以通过等离子体激发进一步增强^[90,91]. 本征石墨烯并不具有 SHG, 而类似的机制可能导致纳米石墨烯产生前所未有的强烈 SHG 和 THG^[92]. 2015 年, Cox 等^[93] 研究了掺杂石墨烯中的非线性光波耦合, 提出了一种利用掺杂石墨烯纳米岛支持的等离激元来优化多频光场之间波混合的方案. 将上述掺杂石墨烯的非线性极化率与金属粒子^[94] 进行比较, 在同等横向尺寸下, 石墨烯的非线性极化率优于纳米金属粒子. 2018 年, Yumoto 等^[95] 使用太赫兹泵-太赫兹探针光谱法研究强磁场下单层石墨烯中的超快太赫兹非线性. 在这项工作中观察到的超快非线性光学响应反映了经 Landau 量化的 Dirac 电子的独特性质, 即非等距 Landau 能级和大电偶极矩. 因此, 以 $\Omega_R > \omega$ 为特征的强光-物质耦合机制可以在几十 kV/cm 的太赫兹电场下实现.

2015 年 Zhao 等^[96]、Jiang 等^[97] 分别将 MoS₂/石墨烯异质结系统运用于激光器中, 这种结构将石墨烯的宽带响应和超快弛豫与 MoS₂ 的强的光-物

质相互作用结合起来. 在光纤激光器中, 调 Q 最大输出功率为 2.16 mW, 脉冲重复率 21.9 kHz, 脉冲能量 98.6 nJ, 最短脉冲持续时间为 9.31 μ s. 抽运功率为 80 mW 时, 锁模重复率为 3.47 MHz, 信噪比为 53.7 dB, 显示出很好的锁模稳定性. 在固体激光器中, 层状 2D MoS₂/石墨烯饱和吸收体可以产生稳定的超短脉冲, 在锁模激光器中实现了高达 1 GHz 的重复频率. 较高的重复频率导致较低的脉冲能量, 这使得饱和吸收体更难饱和, 同时也避免了损伤, MoS₂/石墨烯基饱和吸收体由于其低的饱和强度而适用. 对于被动调 Q 激光器来讲, 当抽运功率从 2.75 W 增加到 3.77 W 时, 平均输出功率从 67 mW 增加到 148 mW, 脉冲宽度从 60.2 ns 单调下降到 24.8 ns, 而脉冲重复率从 7.9 kHz 上升到 24.0 kHz. 在目前报道的二维材料调 Q 激光器中^[98–102], 24.8 ns 的脉冲宽度达到了最佳水平. 图 3 所示为基于石墨烯-Bi₂Te₃ 异质结的饱和吸收体的实际应用, 光学跃迁和拉曼光谱图^[103].

使用液相剥离法制作的石墨烯/BP^[104] 异质结结构在非线性光学和超快光子学中显示出很好的性能. 将这种异质结系统运用于掺 Er 的光纤激光

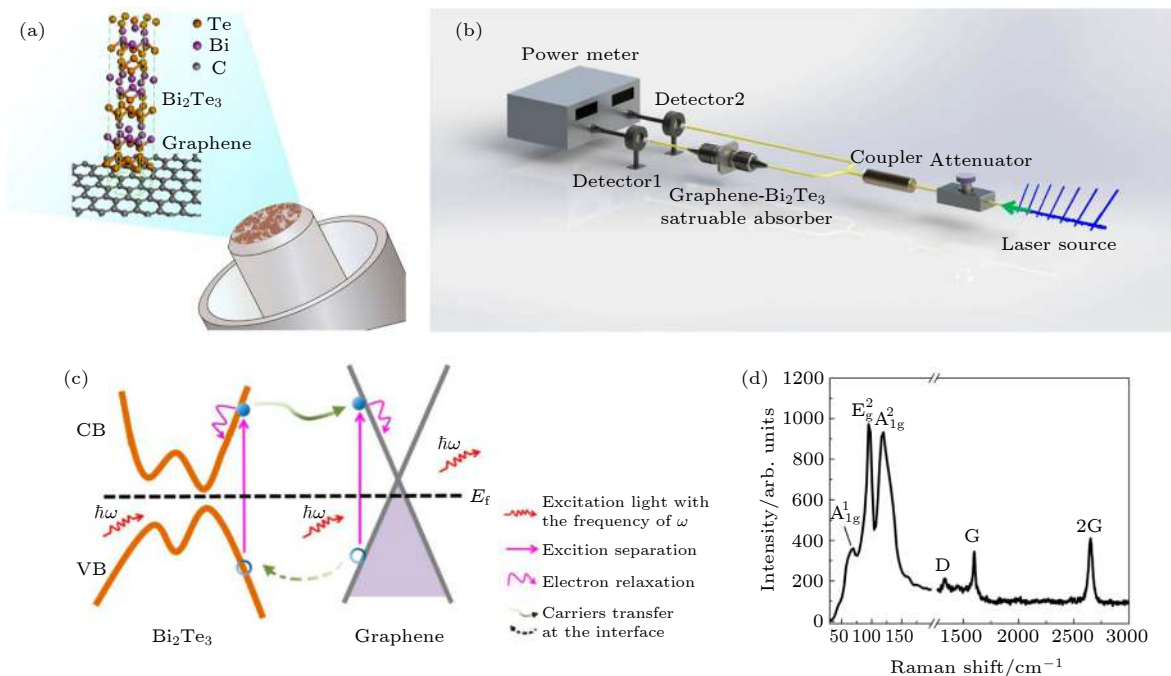


图 3 基于石墨烯-Bi₂Te₃ 异质结的饱和吸收体^[103] (a) 光纤连接器端面上的石墨烯-Bi₂Te₃ 异质结构示意图; (b) 双探测器测量实验装置的示意图; (c) 石墨烯-Bi₂Te₃ 异质结构中光学跃迁的示意图; (d) 石墨烯-Bi₂Te₃ 异质结构的拉曼光谱

Fig. 3. Saturable absorber based on graphene-Bi₂Te₃ heterojunction (reproduced with permission^[103], Copyright 2015, American Chemical Society): (a) Schematic of graphene-Bi₂Te₃ heterostructure on the end-facet of fiber connector; (b) schematic diagram of the twin-detector measurement experimental setup; (c) schematic diagram showing the optical transitions in graphene-Bi₂Te₃ heterostructure; (d) Raman spectrum of the graphene-Bi₂Te₃ heterostructure.

器当中可以产生 148 fs 的稳定超短脉冲.

2.3 TMDs

层状 TMDs 的 d 轨道电子相互作用使其从半导体到电荷密度波再到超导体的多种物理特性得到充分展示. 因其卓越的机械、电子和光学特性 (非线性光吸收、散射、光限幅等)^[105] 在光电器件中受到广泛的关注^[106–109]. TMDs 的光学性质高度依赖于它们的厚度, 由于介电屏蔽效应的降低, 当其维度从三维体材料降低到二维材料时, 会经历由间接带隙到直接带隙的转变, 以 MoS₂ 为例, 体 MoS₂ 为间接带隙半导体, 带隙为 1.29 eV, 单层 MoS₂ 为直接带隙半导体, 带隙为 1.8 eV. 不同的单层 TMDs

材料的带隙从 1.57–2.0 eV 不等. 单层的 TMDs 材料具有高载流子迁移率, 直接带隙和良好的机械和光电性能. 对于其非线性光学性质, 当材料维度下降为二维时, MoS₂, TiS₂, WS₂, WSe₂, MoSe₂ 等材料的 SHG^[110–112] 增长显著. 图 4 所示为 TMDs 的非线性光学现象^[35,113–115].

在 MoS₂ 的报道中, 只有奇数层的 TMDs 材料才具有 SHG, 偶数层不具有此性质^[116], 这是因为在 2H 堆叠的 TMDs 中, 偶数层的反演对称性恢复^[111]. 但是, 在偶数层的材料中还是有较微弱的 SHG 被观察到^[117]. 在从单层到 5 层的 MoS₂ 二次谐波强度的测量中可以发现, 奇数层 MoS₂ 的二次谐波强度要比偶数层强得多, 在单层、三层和五层

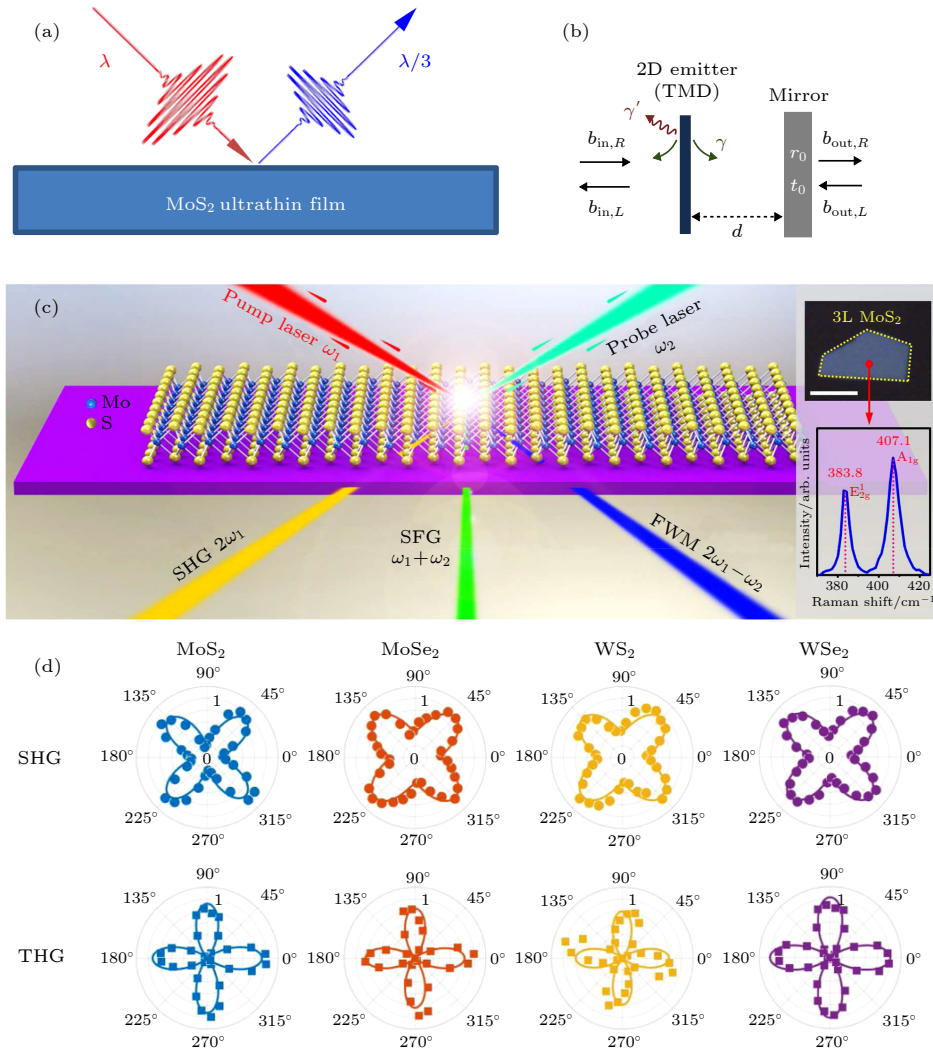


图 4 (a) MoS₂ 中的 THG^[113]; (b) 2D (TMD) 光发射器^[114]; (c) 少层 MoS₂ 不同的非线性光学现象^[35]; (d) SHG 和 THG 的极坐标图^[115]

Fig. 4. (a) Third harmonic generation in MoS₂ (reproduced with permission^[113], Copyright 2014 American Chemical Society); (b) 2D (TMD) optical emitter (reproduced with permission^[114], Copyright 2018 American Physical Society); (c) different nonlinear optical phenomenon of few-layer MoS₂ (reproduced with permission^[35], Copyright 2016, American Chemical Society); (d) polar plots of normalized SHG and THG (reproduced with permission^[115], Copyright 2018 American Physical Society).

的 MoS₂ 中, 二次谐波强度随着层数的增加而单调下降. 单层 MoS₂ 的二次谐波强度是体材料的 400 多倍^[118], 单层 TMDs 材料 SHG 强烈的依赖其晶向^[112,119]. 除层数依赖以外, 不同制备方法得到的 MoS₂ 的非线性光学表现不尽相同^[120], 用机械剥离法得到的 MoS₂ 单层 TPA 系数约为 $(1.88 \pm 0.21) \times 10^3$ cm/GW, 而采用 CVD 生长的单层材料的 TPA 系数则为 $(1.04 \pm 0.15) \times 10^3$ cm/GW. TiS₂^[121] 与石墨烯有着类似的零带隙晶体结构, 这种特殊的结构使它对于从可见光到中红外宽光谱范围内都有可饱和吸收特性. 并且, 相比石墨烯, TiS₂ 有着更好的非线性光响应. 通过宽带 Z 扫描系统测试发现, 石墨烯在波长 1550 nm 的激光下非线性吸收系数 β 为 10 cm/GW^[122], 而利用典型胶体化学方法生长的 TiS₂ 在波长 400 nm 的激光下的 β 可以达到 $-(4.28 \pm 0.21) \times 10^4$ cm/GW. 通过光学沉积的 TiS₂ 在 1.56 μ m 时显示出很强的非线性光响应, 在掺 Er 的光纤激光器中使用基于 TiS₂ 的饱和吸收体可在 1.56 μ m 时得到稳定的锁模和调 Q. 在反饱和吸收的领域, 间接带隙半导体 WSe₂^[17] 薄层纳米片在飞秒级激光器的照射下 ($E_{\text{laser}} > E_{\text{B}}$) 会显示出很高的反饱和吸收特性, 这是因为由声子湮灭和光子吸收造成的光子声子辅助型的反斯托克斯跃迁. MoTe₂^[123] 纳米片厚度在 100 nm 时, $\text{Im}\chi^{(3)}$ 大约在 10^{-11} esu, 表现出饱和吸收特性; 而当其厚度降低到 30 nm 时, $\text{Im}\chi^{(3)}$ 的值约在 9.96×10^{-11} esu, 表现出反饱和吸收的特性. 由此可见, TMDs 的非线性光学性质有着强烈的层依赖特性.

2.4 黑磷、铋烯和铋烯

氮族元素的单层, 包括 BP、砷烯、铋烯和铋烯, 具有 0.36—2.62 eV 的宽禁带宽度, 决定了其从近红外到可见光的发光波长和宽带光响应的优势, 而且, 单层载流子迁移率^[124] 可以达到几千 $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. BP 是一种新型层状二维材料, 因其超高的迁移率 (高达 $1000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)^[125,126]、层依赖的光电性能^[127]、独特的各向异性^[128,129] 吸引了人们的关注. 通过调节 BP 的层数可以调整其带隙由体材料的 0.3 eV 到单层的 1.5 eV, 补充了石墨烯零带隙和 TMDs 的宽带隙 (1.8 eV) 之间的间隔. 这种带隙可调的性质有利于它作为光电器件, 在近红外和中红外领域用途广泛. 通过液相剥离, 可得

到约为 17 层的 BP 薄层^[130], 带隙为 0.515 eV^[131]. 薄层 BP 在 400 nm 和 800 nm 飞秒激光的激发下都显示出可饱和吸收特性, 在皮秒激发下, BP 在 1562 nm 和 1930 nm 波段也表现出 SA 性质. 使用 Z 扫描技术研究薄层 BP 的超快非线性光学响应^[132], 飞秒激光激发饱和强度和归一化调制深度分别为 (455.3 ± 55) GW/cm² 和 27.6% (400 nm); (334.6 ± 43) GW/cm² 和 12.4% (800 nm)^[133]. BP-PMMA 在皮秒激光下的饱和强度和归一化调制深度分别为 18.54 MW/cm² 和 19.5% (1563 nm); 4.56 MW/cm² 和 16.1% (1930 nm). 证明了少层 BP 是优秀的非线性光学材料, 特别在长波长范围内, 具有宽带宽工作能力. 但是, BP 的直接带隙敏感的依赖于层数, 要求使用大面积薄层的 BP, 而液相剥离方法暂时还无法满足这样的要求. 同时 BP 的长期稳定性和低损伤阈值等问题也有待解决.

铋因其长期稳定的光电性能, 成为现在重要的非线性光学材料. 基于少层铋烯的光子学器件有望成为下一代光通信器件. 使用液相外延法^[134] 生长薄层铋烯, 当其下降到原子级厚度时, 铋烯由半金属变为间接带隙半导体, 单层铋烯禁带宽度高达 2.28 eV. 单层铋烯发生拉应变时, 由间接带隙半导体变为直接带隙半导体. 铋烯具有长期稳定的可饱和吸收性质, 其调制深度为 10.5%, 饱和强度为 0.26 GW/cm², 非饱和损耗为 19.1%. 将其覆盖在 Au 镜上可以作为反射型饱和吸收体装置. 3—6 nm 的少层铋烯纳米片具有非常好的非线性吸收性能, 作为饱和吸收体可实现单波长和双波长的输出, 稳定同步双波长输出的双峰分别在 1561.3 nm 和 1562.7 nm, 差频为 0.17×10^{12} Hz, 属于太赫兹波段, 为太赫兹的发展提供了光源技术. 少层的铋烯也可以制备在微光纤上, 这种装置可以作为全光克尔开关, 其消光比高达 12 dB, 调制高速信号波长转换频率高达 18 GHz.

尽管铋烯具有很好的稳定性, 但其间接带隙的特征使得它在光电响应方面的性能要比直接带隙半导体略逊一筹^[106]. 同作为 VA 族的铋在电子运输, 半金属键结合和本征自旋轨道耦合方面具有很好的性质^[135]. 图 5(a) 和图 5(b) 所示为铋导带载流子的开关和信号及其叠加原理^[124], 图 5(c) 为 BP 调 Q 光纤激光器输出的偏振特性^[127], 图 5(d) 为磷烯透射率与飞秒激光强度之间的关系实验点和拟合曲线^[104], 其中饱和强度和调制深度分别

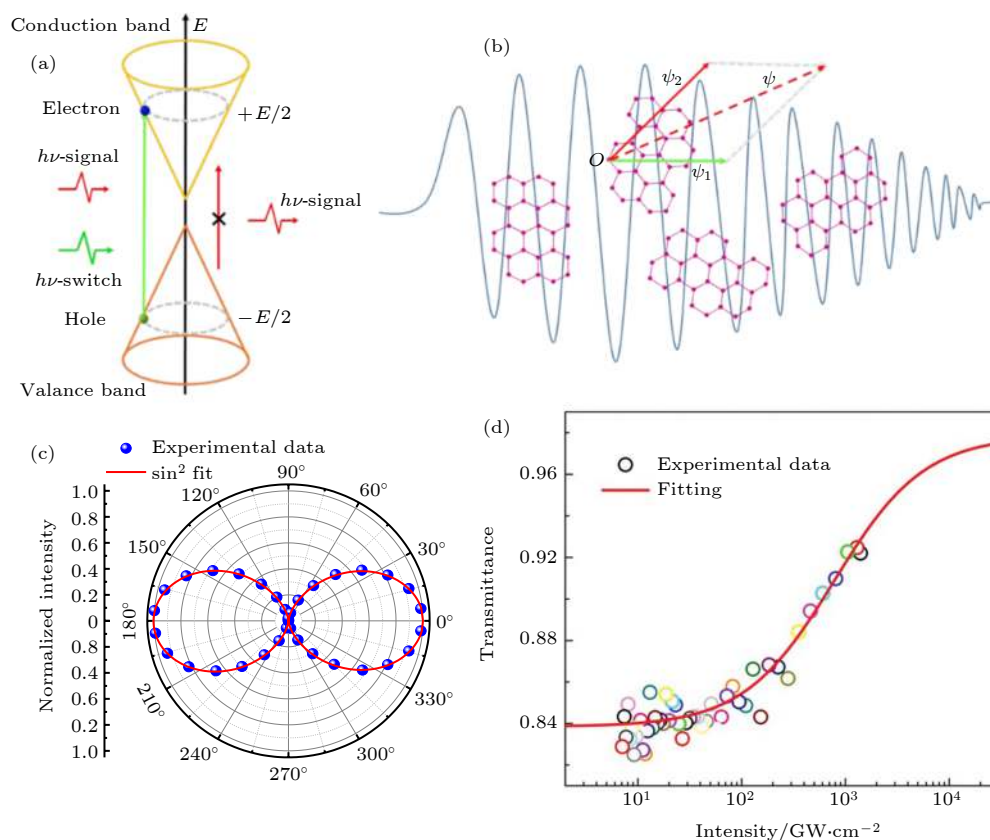


图 5 (a) 铋的线性色散价和导带中载流子的开关和信号^[124]; (b) 开关和信号的叠加原理^[124]; (c) BP 调 Q 光纤激光器输出偏振特性^[127]; (d) 磷烯的透射率与飞秒激光强度之间的关系^[104]

Fig. 5. (a) Switch and signal of carriers in the linearly dispersive valence and conduction bands of bismuthine (reproduced with permission^[124], Copyright 2017, American Chemical Society); (b) superposition principle of switch and signal light (reproduced with permission^[124], Copyright 2017, American Chemical Society); (c) output polarization characteristics of BP Q -switched fiber laser (reproduced with permission^[127], Copyright 2015, Springer Nature); (d) relationship between transmittance of the phosphorene dispersions and intensity of the femtosecond laser (reproduced with permission^[104], Copyright 2015 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim).

为 $774.4 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 14.2% 。

2017 年, Lu 等^[136] 通过声化学剥离的手段成功获得高质量 β 相少层的铋烯, 其平均厚度约在 3 nm , 横向尺寸为 $2 \mu\text{m}$, 沿 $[001]$ 轴观察的 β 相铋的结构, 根据菱形 A7 结构的 (111) 晶面间距, 观察到的晶格条纹的相距为 0.237 nm . 经过理论计算铋具有厚度依赖的能带结构, 当从体材料下降到二维材料时, 其带隙从 0 到 0.55 eV 发生变化, 表明铋可以应用于太赫兹、中红外到可见光. 使用 Z 扫描技术和空间相位调制测量技术对非线性光吸收和折射参数进行表征, 通过拟合实验数据, 发现调制深度在 800 nm 处约为 2.68% , 在 400 nm 处约为 2.51% , 通过与 BP 比较, 其调制深度相对较低. 利用其强烈的非线性折射特征可以实现基于空间交叉相位调制的两种不同光束的全光开关. 少层铋的吸收率随着入射光的强度增加线性增加, 根

据上述理论和实验分析, 可以实现以铋烯为基的饱和吸收体. 这种微光纤器件在电信波段的光调制深度为 2.03% , 饱和强度为 $30 \text{ MW}/\text{cm}^2$. 通过对激光参数的优化, 可产生 1559.18 nm 为中心的 652 fs 的光脉冲. 在可见光波段处观测铋色散的衍射环, 测得其非线性折射率为 $10^{-6} \text{ cm}^2/\text{W}$. 通过将铋烯饱和吸收体制成激光器, 飞秒级脉冲激光可直接调制并产生.

3 量子点非线性光响应

量子点 (quantum dot, QD) 是可以使用物理或化学方法生长的纳米晶体结构, 是光子学中广泛应用的重要介质, 是一种具有很好光学性质的准零维半导体材料, 由于尺寸效应, 量子点显示出对电子和空穴的强烈限制. 因此, 由于其电子和光学特

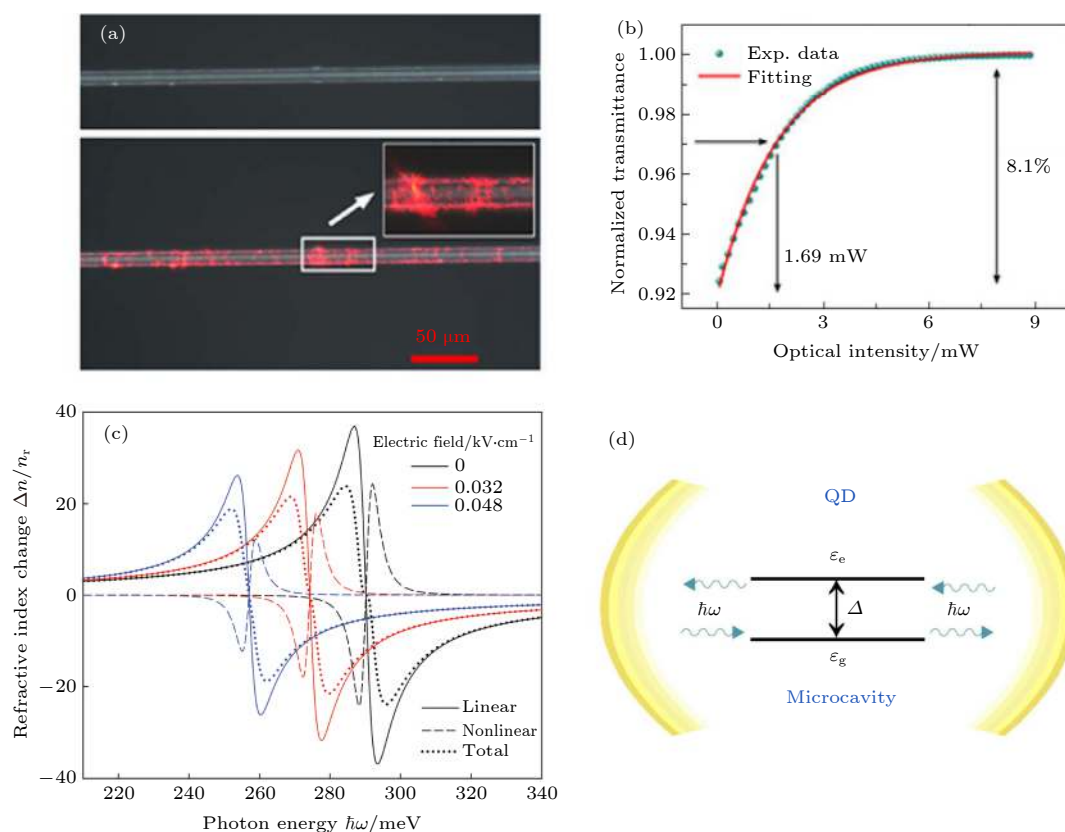


图 6 (a) 沉积有黑磷量子点的微纤维照片^[138]; (b) 黑磷量子点饱和吸收体 SA 特征^[138]; (c) 线性、非线性和总折射率变化随光子能量的变化 (对于 $0s-1p$ 跃迁)^[139]; (d) 微腔中的非对称量子点作为非线性光学元件^[140]

Fig. 6. (a) Photograph of the microfiber deposited with PQDs, (b) saturable absorption property of the PQD-SA device (reproduced with permission^[138], Copyright 2017 Springer Nature); (c) the linear, nonlinear and total refractive index changes with photon energy for $0s-1p$ transitions (reproduced with permission^[139], Copyright 2011 American Institute of Physics); (d) asymmetric quantum dot in a microcavity as a nonlinear optical element (reproduced with permission^[140], ©2012 American Physical Society).

性的灵活性, 可以通过选择系统中的精确尺寸和浓度来控制, 因此非线性光学特性在 QD 介质中有望得到极大的增强^[137]. 本节主要介绍量子点的三阶非线性光学效应及其应用, 以及使用 Z 扫描技术对三阶非线性光学参数 (即三阶极化率的实部和虚部) 进行测量. 图 6^[138-140] 为量子点的非线性光学特征和非对称量子点的非线性光学元件.

3.1 量子点作为饱和吸收体在激光器中的应用

二维材料例如石墨烯, BP 和 MoS_2 曾经是双波长被动调 Q 光纤激光器热门的候选材料^[141], 具有超快恢复时间和宽带饱和吸收的优点^[142-144], 但是, 一直以来, 低损伤阈值和固有不稳定性一直是这类器件的问题. 2016 年, Zhang 等^[138] 利用液相剥离的方法合成了平均尺寸为 (2.6 ± 0.9) nm 的超小尺寸黑磷量子点 (phosphorene quantum dot,

PQD). 通过将 PQD 与微纤维渐逝光场耦合, 基于 PQD 饱和吸收体具有超快的非线性可饱和吸收特性, 光学电信频段的调制深度为 8.1%. 基于全光纤 PQD 饱和吸收体的集成, 连续波被动锁模掺 Er 激光腔可提供稳定的自启动脉冲, 脉冲持续时间为 0.88 ps, 且腔重复频率为 5.47 MHz. 使用液相剥离技术制备 PQD, 需对体 BP 进行超声浴处理^[126], 即把 BP 进行研磨后放入 NMP 溶液再进行超声, 将悬浮液以 7000 r/min 的速度离心, 以除去未脱落的磨碎的大块 BP 颗粒. 将上清液以 12000 r/min 离心 20 min, 以分离合成后的 PQD. 基于微纤维的 PQD 饱和吸收体在 1560 nm 光谱区域的饱和吸收表明, 该器件可用于引入光纤激光器腔的自幅调制.

IV-VI 量子点拥有多重激子产生和大激子玻尔半径^[145], 已受到广泛关注. Lee 等^[146] 报道了以 PbS 量子点薄膜饱和吸收体的被动调 Q 1.55 μm

光纤激光器. 此后, 以 PbS QD 为基础的饱和吸收体的掺 Er^[147,148] 光纤激光器得到证实. 使用包裹 PbS QD 的超细纤维作为 SA 的被动调 Q 掺 Er 光纤激光器, 当抽运功率从 205 mW 增加到 457 mW 时, 调 Q 脉宽从 6.9 μ s 降低至 3.5 μ s, 重复频率从 65.44 kHz 增加到 123 kHz, 并具有 33.08 dB 的信噪比. 但胶体 QD 有荧光间歇性, 即开/关闪烁, 俄歇重组和表面陷阱等缺陷, 为了解决这些问题, QD 通常由配体或宽禁带壳层包裹, 具有更厚壳层的 QD 显示出带边发射的改进的光致发光量子产率^[149]. 2019 年, Fu 等^[150] 将 PbS/CdS 分别为芯/壳的量子点饱和吸收体运用于掺 Nd 的光纤激光器中. 当抽运功率为 230 mW, 分辨率为 0.05 nm 时, 记录光谱的中心峰为 1066.082 nm, 位于量子点的吸收峰中, 结果证明 PbS/CdS 量子点饱和吸收体的饱和极化强度为 7.6 MW/cm², 调制深度为 4.1%, 由于 CdS 壳的保护, PbS 表现出很好的光化学稳定性, 最大平均输出功率为 7.88 mW, 最小脉冲宽度为 235.7 ns, 在 110—230 mW 的抽运功率范围内, 可以实现稳定的调 Q. 2017 年, Mahyuddin 等^[151] 实现了 CdSe 量子点饱和吸收体在调 Q 锁模双包层掺 Yb 光纤激光器中的应用. 对于调 Q, 在 970—1200 mW 抽运功率范围内产生稳定的脉冲, 重复频率和脉冲宽度分别为 24.5—40.5 kHz 和 6.8—3.7 μ s. 当调谐激光腔的偏振态时, 可在 310—468 mW 的抽运功率范围内实现锁模, 重复频率为 14.5 MHz, 脉冲宽度为 3.5 ps.

2019 年, Wang 等^[152] 报道了 1550 nm InAs/GaAs 半导体量子点饱和吸收镜 (quantum dots semiconductor saturated absorption mirror, QD-SESAM) 在双波长被动调 Q 掺 Er 光纤激光器中的应用. InAs/GaAs QD-SESAM 通过 MBE 生长在 GaAs (100) 面上, 在大于 180 mW 抽运功率后可获得双波长调 Q 激光, 平均输出功率为 2.2 mW, 两中心波长为 1532 nm 和 1546 nm, 间距为 14 nm. 随着激光抽运功率的增加, 饱和吸收体逐渐饱和, 导致谐振腔损耗迅速降低. QD-SESAM 的吸收波长范围由量子点中的 In 的比例决定, 这为 QD-SESAM 以及相关的调 Q 激光器或锁模激光器的设计和制造提供了很大的灵活性.

3.2 量子点在光限幅器和光开关中的应用

基于吸收、折射和散射分别有三种不同的光限

幅器. 由于吸收高能量, 基于吸收的光限幅器比基于折射的光限幅器更容易损坏. 当颗粒半径较小时, 基于散射的光学限制作用相对较弱. 有机物和无机物都被广泛用于光限幅器当中, 例如 Pcs^[153] 和 QDs^[154]. 光限幅材料对于保护感光材料免于受到强激光束的侵害非常重要^[154]. 要求用于光限幅的材料具有一些理想的非线性光学特性, 比如大的非线性吸收系数和快速的响应时间, 以提供高效的光学限制. 量子点作为一种准零维材料, 近年来在光限幅方面也吸引了人们的注意.

2019 年, Yan 等^[155] 通过在氮气的气氛下使用减压的方式制备 PbSe 量子点, 基于 PbSe 量子点的折射式的光限幅器通过将光线折射出传输路径以实现光学限制. 利用 Z 扫描技术获得了不同掺杂浓度的 PbSe 量子点掺杂薄膜在 405 nm 处的非线性折射率和热光系数. 随着掺杂浓度的增加, Z 扫描曲线的峰/谷变得更高/更深. 由于存在非线性吸收, 从而抑制了峰值并提高了透射率的谷值, 闭孔 Z 扫描曲线显示为不对称. 随着输入光辐射的增加, 掺杂样品的折射率降低, 这使光束更发散并保持剩余的光强度稳定. PbSe 量子点具有从可见光到近红外波段的显著吸收, 从而可以在整个吸收带中进行光学限制. PbSe 量子点的整个吸收带中实现热自散焦, 该吸收带覆盖了从紫外到大约 1300 nm 的近红外带.

近年来, 胶体 CdSe 量子点因其发光的尺寸依赖特性和非线性光学吸引了科学家的注意^[156–160]. 2016 年, Valligatla 等^[161] 通过化学合成的方式制备 CdSe 量子点, 在透射电子显微镜下测量得到自然结晶的 CdSe 胶体 QD 直径在 3 nm. 可见光-红外收光谱表明吸收带出现在 574 nm. 通过 Z 扫描技术以 532 nm、10 Hz 重复频率、6 ns 脉冲测量了 CdSe 量子点的光强依赖非线性吸收和非线性折射. 随着光强的增加, 非线性吸收从 SA 转换为 RSA. 热非线性会引起负非线性折射, 并且会随着输入强度的增加而减小. SA 可以归因为基态漂白效应, RSA 是通过吸收第二个光子将激发电子从较低的导带激发到较高的导带实现的, 此过程又被称为激发态吸收 (excited state absorption, ESA). 在输入光强高于 0.12 GW/cm² 时, CdSe QD 由 SA 转变为 RSA. CdSe QD 的非线性光学开关行为和反向饱和吸收使它成为全光学器件和光限幅应用的良好选择^[162,163].

量子点独特的光电性质可以用来调节液晶的光限幅特性^[164]. 有研究将通过动力生长^[165]法生长的 CdSe 量子点掺杂进液晶中, 使用调 Q Nd:YAG 激光器的单束 Z 扫描技术探索了样品的非线性光学特性, 测得三阶极化率 $\text{Im}\chi^{(3)}$ 和非线性折射率 n_2 的值分别为 10^{-11} esu 和 10^{-10} m²/W, 所研究系统的各向同性光学极限阈值为 1.57 J/cm², 非线性光学吸收会随着掺杂浓度的增加而显著增强.

由半导体量子点和纳米金属粒子组成的混合系统已被证明有很多应用^[166–170]. 引起人们关注的领域有超快速光学开关机制. 2015 年, 针对典型参数系统 CdSe QD 和 Au 纳米粒子复合物组成的耦合系统中研究了基态和单激子态之间种群反转中的光开关的计算证明了由少周期脉冲序列引起的超快激子种群动力学. 在实际应用中, 可以将半导体 QD 和金属纳米粒子混合系统用作光开关和光调制器.

4 总结与展望

本文从不同的材料体系出发, 分别讨论了碳纳米管、石墨烯、TMDs、氮族元素的单层材料以及量子点结构在非线性光学领域的研究进展. 不同的材料有不同的非线性光学特性, 由于蜂窝状结构的对称性, 碳纳米管和石墨烯都不具有二阶非线性, 而像 TMDs、TI 却具有很大的二阶非线性. 碳纳米管、石墨烯和其他二维材料中均可以表现出强烈的三阶非线性. 在碳纳米管、石墨烯等低维材料中, 折射率变化与入射光强度有关, 并且光吸收的变化对吸收边附近波长的光的折射率有强烈的影响. 作为饱和吸收体来讲, 分离碳纳米管的恢复时间约为 30 ps, 而石墨烯的恢复时间要比碳纳米管快的多, 约为 0.1 ps^[171]. 但有报道显示, 石墨烯的饱和吸收强度要比碳纳米管高^[172], 石墨烯饱和吸收体在太赫兹和微波波段的饱和强度要低的多, 所以相比碳纳米管, 石墨烯饱和吸收体更适合工作在长波长范围. 但是, 石墨烯无带隙的特点限制了它在强光-物质相互作用设备中的用途, MoS₂/石墨烯异质结的出现很好的解决了这个问题. 在 TMDs 的报道中, MoSe₂ 在 720–810 nm 具有最短的恢复时间 0.15 ps, 较低的饱和强度 2.5 MW/cm², 适合工作在可见光到近红外波长范围. 同时, 在 TMDs

当中, 与 BP 结构相似的 PtSe₂^[173] 要比 BP 稳定得多. 在 BP、锑烯和铋烯的报道中, 在近红外到可见光波段 BP 具有最低的饱和强度和超快的恢复时间^[174]. 半导体量子点由于其独特的尺寸而拥有较高的非线性折射率系数 n_2 , 数量级在 10^{-10} – 10^{-2} cm/W 之间. 在可见光范围内, CdSe 和 CdS 量子点是非常好的光限幅材料, 而在近红外波段, PbSe 和 PbS 则表现更好.

自从 2009 年石墨烯用于超快脉冲激光器以来, 越来越多的二维材料开始用于饱和吸收体. 虽然此后对于碳纳米管饱和吸收体的报道仍然在增加, 但涨幅逐渐趋于平缓, 并且重点多在于对于碳纳米管进行修饰. 虽然原子级厚度的二维材料具有体材料无法比拟的光学非线性^[175–178], 但其也有缺点, 如将其与传统的光学振荡器相比时会发现由于在波长范围内的填充比例较小, 二维半导体的非线性光学性能并不理想. 为了充分利用二维材料在非线性光学方面的潜力, 必须有效的避免由于亚纳米级别厚度引起的相互作用问题.

可以预测, 在未来将有更多的低维材料被应用于非线性光领域. 随着合成和制备技术的不断发展, 基于低维半导体与有机材料进行杂化将形成更多新颖的异质结结构和系统. 比如可以用纳米银和 Pcs 对碳纳米管进行修饰, 使得单壁碳纳米管的非线性光学性能得到很大的提升. 在二维材料方面, 通过控制生长出的单层材料在性能方面与体材料有着很大的不同. 当二维材料的厚度下降为单层时, 一些在体材料时为间接带隙半导体的材料变为直接带隙; 而有些材料会发生带隙变宽的情况, 在宽的波长范围内可以应用. 半导体的微结构有比体材料更好的非线性光学性质, 这些优异的性质有助于延续半导体的摩尔定律, 提升集成电子设备的可用性, 使得电子信号处理的速度和效率不断提高. 有理由相信低维材料的非线性光学会很快用于集成光学领域.

参考文献

- [1] Zhang Y, Huang D, Shan Y, Jiang T, Zhang Z, Liu K, Shi L, Cheng J, Sipe J E, Liu W T, Wu S 2019 *Phys. Rev. Lett.* **122** 047401
- [2] Meza U R, Mendoza B S, Mochán W L 2019 *Phys. Rev. B* **99** 125408
- [3] Savostianova N A, Mikhailov S A 2018 *Phys. Rev. B* **97** 165424

- [4] Hipolito F, Pedersen T G 2018 *Phys. Rev. B* **97** 035431
- [5] Hannes W R, Trautmann A, Stein M, Schäfer F, Koch M, Meier T 2020 *Phys. Rev. B* **101** 075203
- [6] Li Q 2020 *Chin. Phys. B* **29** 14204
- [7] Qiao J, Chuang M Y, Lan J C, Lin Y Y, Sung W H, Fan R, Wu M Y, Lee C Y, Chen C H, Liu H 2019 *J. Mater. Chem. C* **7** 7027
- [8] Ling J, Miao X, Sun Y, Feng Y, Zhang L, Sun Z, Ji M 2019 *ACS Nano* **13** 14033
- [9] Ding R, Chang J, Kong C, Shi S, Dai R 2020 *Chin. J. Lumin.* **41** 63 (in Chinese) [丁蓉, 常建华, 孔春霞, 石少杭, 戴瑞 2020 *发光学报* **41** 63]
- [10] Liu J S, Li X H, Guo Y X, Qyyum A, Shi Z J, Feng T C, Zhang Y, Jiang C X, Liu X F 2019 *Small* **15** 1902811
- [11] Wells L M, Kalliakos S, Villa B, Ellis D J P, Shields A J 2019 *Phys. Rev. Appl.* **11** 061001
- [12] Li W, Zheng C, Guo Q, Chen W 2018 *Appl. Opt.* **57** 9183
- [13] Ozturk O, Ozturk E, Elagoz S 2019 *Chin. Phys. Lett.* **36** 067801
- [14] Qiu X L, Wang S S, Zhang X J, Zhu R J, Zhang P, Guo Y Y, Song Y R 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 114204 (in Chinese) [邱小浪, 王爽爽, 张晓健, 朱仁江, 张鹏, 郭于鹤洋, 宋晏蓉 2019 *物理学报* **68** 114204]
- [15] Zhang J Y, Zhang J W, Zeng Y G, Zhang J, Ning Y Q, Zhang X, Qin L, Liu Y, Wang L J 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 054204 (in Chinese) [张继业, 张建伟, 曾玉刚, 张俊, 宁永强, 张星, 秦莉, 刘云, 王立军 2020 *物理学报* **69** 054204]
- [16] Bao Q, Zhang H, Wang Y, Ni Z, Yan Y, Shen Z X, Loh K P, Tang D Y 2009 *Adv. Funct. Mater.* **19** 3077
- [17] Tian X, Wei R, Guo Q, Zhao Y J, Qiu J 2018 *Adv. Mater.* **30** 1801638
- [18] Ahmad N, Alshehri A M, Ibrahim A 2020 *Opt. Commun.* **461** 125266
- [19] Luo X Q, Li Z Z, Li T F, Xiong W, You J Q 2018 *Opt. Express* **26** 32585
- [20] Yamashita S 2019 *APL Photonics* **4** 034301
- [21] Monisha M, Priyadarshani N, Durairaj M, Girisun T C S 2020 *Opt. Mater.* **101** 109775
- [22] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, Jiang D, Zhang Y, Dubonos S V, Grigorieva I V, Firsov A A 2004 *Science* **306** 666
- [23] Cheng J L, Vermeulen N, Sipe J 2014 *New J. Phys.* **16** 053014
- [24] Hafez H A, Kovalev S, Tielrooij K J, Bonn M, Gensch M, Turchinovich D 2020 *Adv. Opt. Mater.* **8** 1900771
- [25] Martinez A, Sun Z 2013 *Nature Photon.* **7** 842
- [26] Wang X F, Zhang J H, Gao Z Y, Xia G Q, Wu Z M 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 114209 (in Chinese) [王小发, 张俊红, 高子叶, 夏光琼, 吴正茂 2017 *物理学报* **66** 114209]
- [27] Mo J, Feng G Y, Yang M C, Liao Y, Zhou H, Zhou S H 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 214201 (in Chinese) [莫军, 冯国英, 杨莫愁, 廖宇, 周昊, 周寿桓 2018 *物理学报* **67** 214201]
- [28] Dalir H, Xia Y, Wang Y, Zhang X 2016 *Acs Photonics* **3** 1564
- [29] Yu S, Wu X, Chen K, Chen B, Guo X, Dai D, Tong L, Liu W, Shen Y R 2016 *Optica* **3** 541
- [30] Koppens F, Mueller T, Avouris P, Ferrari A, Vitiello M, Polini M 2014 *Nature Nanotech.* **9** 780
- [31] Ni G, Wang L, Goldflam M, Wagner M, Fei Z, McLeod A, Liu M, Keilmann F, Özyilmaz B, Neto A C 2016 *Nature Photon.* **10** 244
- [32] Bakhtawar, Haneef M, Bacha B A, Khan H, Atif M 2018 *Chin. Phys. B* **27** 114215
- [33] Zhao C, Qie Y, Yu Y, Ma R, Qin J, Liu Y 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 067801 (in Chinese) [赵承祥, 郗媛, 余耀, 马荣荣, 秦俊飞, 刘彦 2020 *物理学报* **69** 067801]
- [34] Leykam D, Chong Y D 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 143901
- [35] Li D, Xiong W, Jiang L, Xiao Z, Rabiee Golgir H, Wang M, Huang X, Zhou Y, Lin Z, Song J, Ducharme S, Jiang L, Silvain J F, Lu Y 2016 *ACS Nano* **10** 3766
- [36] Ling W J, Xia T, Dong Z, Liu Q, Lu F P, Wang Y G 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 114207 (in Chinese) [令维军, 夏涛, 董忠, 刘勃, 路飞平, 王勇刚 2017 *物理学报* **66** 114207]
- [37] Xie Y, Zhang S, Li Y, Dong N, Zhang X, Wang L, Liu W, Kislyakov I M, Nunzi J M, Qi H, Zhang L, Wang J 2019 *Photonics Res.* **7** 762
- [38] Liu J, Li X, Feng J, Zheng C, Wang Y, Wang A, Liu X 2020 *Ann. Phys.* **532** 1900454
- [39] Zhang M, Wu Q, Zhang F, Chen L, Jin X, Hu Y, Zheng Z, Zhang H 2019 *Adv. Opt. Mater.* **7** 1800224
- [40] Qin Z, Hai T, Xie G, Ma J, Yuan P, Qian L, Li L, Zhao L, Shen D 2018 *Opt. Express* **26** 8224
- [41] Mouras R, Bagnaninchi P, Downes A, Elfick A 2013 *J. Raman Spectrosc.* **44** 1373
- [42] Wu X, Dou C, Xu W, Zhang G, Tian R, Liu H 2019 *Chin. Phys. B* **28** 14204
- [43] Liu K, Zhang L, Cao T, Jin C, Qiu D, Zhou Q, Zettl A, Yang P, Louie S G, Wang F 2014 *Nat. Commun.* **5** 4966
- [44] Liu M, Yin X, Zhang X 2012 *Nano Lett.* **12** 1482
- [45] Bates M, Blosser T R, Zhuang X 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 108101
- [46] Yang H, Feng X, Wang Q, Huang H, Chen W, Wee A T S, Ji W 2011 *Nano Lett.* **11** 2622
- [47] Li W, Chen B, Meng C, Fang W, Xiao Y, Li X, Hu Z, Xu Y, Tong L, Wang H, Liu W, Bao J, Shen Y R 2014 *Nano Lett.* **14** 955
- [48] Shi J, Chu H, Li Y, Zhang X, Pan H, Li D 2019 *Nanoscale* **11** 7287
- [49] Noimark S, Colchester R J, Blackburn B J, Zhang E Z, Alles E J, Ourselin S, Beard P C, Papakonstantinou I, Parkin I P, Desjardins A E 2016 *Adv. Funct. Mater.* **26** 8390
- [50] Thess A, Lee R, Nikolaev P, Dai H, Petit P, Robert J, Xu C, Lee Y H, Kim S G, Rinzler A G 1996 *Science* **273** 483
- [51] Gladush Y, Mkrtchyan A A, Kopylova D S, Ivanenko A, Nyushkov B, Kobtsev S, Kokhanovskiy A, Khagai A, Melkumov M, Burdanova M, Staniforth M, Lloyd Hughes J, Nasibulin A G 2019 *Nano Lett.* **19** 5836
- [52] Dong X Z, Yu Z H, Tian J R, Li Y L, Dou Z Y, Hu M T, Song Y R 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 034202 (in Chinese) [董信征, 于振华, 田金荣, 李彦林, 窦志远, 胡梦婷, 宋晏蓉 2014 *物理学报* **63** 034202]
- [53] Hendry E, Hale P J, Moger J, Savchenko A K, Mikhailov S A 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 097401
- [54] Sohn B U, Choi J W, Ng D K T, Tan D T H 2019 *Sci. Rep.* **9** 10364
- [55] Cho W B, Yim J H, Choi S Y, Lee S, Schmidt A, Steinmeyer G, Griebner U, Petrov V, Yeom D I, Kim K, Rotermund F 2010 *Adv. Funct. Mater.* **20** 1937
- [56] Li X, Wu K, Sun Z, Meng B, Wang Y, Wang Y, Yu X, Yu X, Zhang Y, Shum P P, Wang Q J 2016 *Sci. Rep.* **6** 25266
- [57] Wen N, Li L, Zong N, Tu W, Liu K, Wang Z, Bo Y, Peng Q, Cui D, ZuYan X 2019 *Appl. Opt.* **58** 8900
- [58] Lü Y, Wei C, Zhang H, Kang Z, Qin G, Liu Y 2019 *Photonics Res.* **7** 14
- [59] Pan Z, Wang Y, Zhao Y, Kowalczyk M, Sotor J, Yuan H, Zhang Y, Dai X, Cai H, Bae J E 2018 *Opt. Lett.* **43** 5154

- [60] Li C, Chen K, Guan M, Wang X, Zhou X, Zhai F, Dai J, Li Z, Sun Z, Meng S 2019 *Nat. Commun.* **10** 1
- [61] Yuksek M, Kaya E Ç, Karabulutlu N, Kaya A A, Karabulut M, Elmali A 2019 *Opt. Mater.* **91** 326
- [62] Bonaccorso F, Sun Z, Hasan T, Ferrari A C 2010 *Nature Photon.* **4** 611
- [63] Zhang H, Cai X, Hao Z, Ruan Z, Lu J, Cai J 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 218103 (in Chinese) [张辉, 蔡晓明, 郝振亮, 阮子林, 卢建臣, 蔡金明 2017 物理学报 **66** 218103]
- [64] Denk R, Hohage M, Zeppenfeld P, Cai J, Pignedoli C A, Söde H, Fasel R, Feng X, Müllen K, Wang S, Prezzi D, Ferretti A, Ruini A, Molinari E, Ruffieux P 2014 *Nat. Commun.* **5** 4253
- [65] Zhang H, Li J, Lv W, Yang H, Tang C, Gu C, Li J 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 217301 (in Chinese) [张慧珍, 李金涛, 吕文刚, 杨海方, 唐成春, 顾长志, 李俊杰 2017 物理学报 **66** 217301]
- [66] Lin K X, Li D S, Ye Y, Jiang W G, Ye Z G, Qin Q, Zou W 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 246802 (in Chinese) [林奎鑫, 李多生, 叶寅, 江五贵, 叶志国, Qin Qinghua, 邹伟 2018 物理学报 **67** 246802]
- [67] Koppens F H L, Chang D E, García de Abajo F J 2011 *Nano Lett.* **11** 3370
- [68] Nair R R, Blake P, Grigorenko A N, Novoselov K S, Booth T J, Stauber T, Peres N M R, Geim A K 2008 *Science* **320** 1308
- [69] Mak K F, Sfeir M Y, Wu Y, Lui C H, Misewich J A, Heinz T F 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 196405
- [70] Zheng Z, Zhao C, Lu S, Chen Y, Li Y, Zhang H, Wen S 2012 *Opt. Express* **20** 23201
- [71] Kumar N, Kumar J, Gerstenkorn C, Wang R, Chiu H Y, Smirl A L, Zhao H 2013 *Phys. Rev. B* **87** 121406
- [72] Hong S Y, Dadap J I, Petrone N, Yeh P C, Hone J, Osgood R M 2013 *Phys. Rev. X* **3** 021014
- [73] Säynätjoki A, Karvonen L, Riikonen J, Kim W, Mehravar S, Norwood R A, Peyghambarian N, Lipsanen H, Kieu K 2013 *ACS Nano* **7** 8441
- [74] Ciesielski R, Comin A, Handloser M, Donkers K, Piredda G, Lombardo A, Ferrari A C, Hartschuh A 2015 *Nano Lett.* **15** 4968
- [75] Dremetsika E, Dlubak B, Gorza S P, Ciret C, Kockaert P 2016 *Opt. Lett.* **41** 3281
- [76] Vermeulen N, Castelló Lurbe D, Cheng J, Pasternak I, Krajewska A, Ciuk T, Strupinski W, Thienpont H, Van Erps J 2016 *Phys. Rev. Appl.* **6** 044006
- [77] Zhang H, Virally S, Bao Q, Kian Ping L, Massar S, Godbout N, Kockaert P 2012 *Opt. Lett.* **37** 1856
- [78] Gu T, Petrone N, McMillan J F, Van der Zande A, Yu M, Lo G Q, Kwong D L, Hone J, Wong C W 2012 *Nature Photon.* **6** 554
- [79] Wu R, Zhang Y, Yan S, Bian F, Wang W, Bai X, Lu X, Zhao J, Wang E 2011 *Nano Lett.* **11** 5159
- [80] Jiang T, Huang D, Cheng J, Fan X, Zhang Z, Shan Y, Yi Y, Dai Y, Shi L, Liu K 2018 *Nature Photon.* **12** 430
- [81] Yadav R K, Anceesh J, Sharma R, Abhirammath P, Maji T K, Omar G J, Mishra A K, Karmakar D, Adarsh K V 2018 *Phys. Rev. Appl.* **9** 044043
- [82] Wang F, Zhang Y, Tian C, Girit C, Zettl A, Crommie M, Shen Y R 2008 *Science* **320** 206
- [83] Chen K, Zhou X, Cheng X, Qiao R, Cheng Y, Liu C, Xie Y, Yu W, Yao F, Sun Z, Wang F, Liu K, Liu Z 2019 *Nature Photon.* **13** 754
- [84] Ju L, Geng B, Horng J, Girit C, Martin M, Hao Z, Bechtel H A, Liang X, Zettl A, Shen Y R, Wang F 2011 *Nature Nanotech.* **6** 630
- [85] Fei Z, Andreev G O, Bao W, Zhang L M, McLeod A S, Wang C, Stewart M K, Zhao Z, Dominguez G, Thieme M, Fogler M M, Tauber M J, Castro Neto A H, Lau C N, Keilmann F, Basov D N 2011 *Nano Lett.* **11** 4701
- [86] Chen J, Badioli M, Alonso González P, Thongrattanasiri S, Huth F, Osmond J, Spasenović M, Centeno A, Pesquera A, Godignon P, Zurutuza Elorza A, Camara N, García de Abajo J, Hillenbrand R, Koppens F H L 2012 *Nature* **487** 77
- [87] Fei Z, Rodin A S, Andreev G O, Bao W, McLeod A S, Wagner M, Zhang L M, Zhao Z, Thieme M, Dominguez G, Fogler M M, Neto A H C, Lau C N, Keilmann F, Basov D N 2012 *Nature* **487** 82
- [88] Yan H, Li X, Chandra B, Tulevski G, Wu Y, Freitag M, Zhu W, Avouris P, Xia F 2012 *Nature Nanotech.* **7** 330
- [89] Fang Z, Wang Y, Schlather A E, Liu Z, Ajayan P M, García de Abajo F J, Nordlander P, Zhu X, Halas N J 2014 *Nano Lett.* **14** 299
- [90] Mikhailov S A 2011 *Phys. Rev. B* **84** 045432
- [91] Gullans M, Chang D E, Koppens F H L, García de Abajo F J, Lukin M D 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 247401
- [92] Cox J D, García de Abajo F J 2014 *Nat. Commun.* **5** 5725
- [93] Cox J D, García de Abajo F J 2015 *ACS Photonics* **2** 306
- [94] Kauranen M, Zayats A V 2012 *Nature Photon.* **6** 737
- [95] Yumoto G, Matsunaga R, Hibino H, Shimano R 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 107401
- [96] Jiang Y, Miao L, Jiang G, Chen Y, Qi X, Jiang X, Zhang H, Wen S 2015 *Sci. Rep.* **5** 16372
- [97] Zhao G, Hou J, Wu Y, He J, Hao X 2015 *Adv. Opt. Mater.* **3** 937
- [98] Wang R, Liu Y, Man J, Xiang X, Hao W, Tian Y, Bai J, Ren Z 2017 *Opt. Quant. Electron.* **49** 137
- [99] Gao L, Huang W, Zhang J D, Zhu T, Zhang H, Zhao C J, Zhang W, Zhang H 2014 *Appl. Opt.* **53** 5117
- [100] Xia H, Li H, Lan C, Li C, Du J, Zhang S, Liu Y 2015 *Photonics Res.* **3** A92
- [101] Lin J, Hu Y, Chen C, Gu C, Xu L 2015 *Opt. Express* **23** 29059
- [102] Rashid F A A, Azzuhri S R, Salim M A M, Shaharuddin R A, Ismail M A, Ismail M F, Razak M Z A, Ahmad H 2016 *Laser Phys. Lett.* **13** 085102
- [103] Mu H, Wang Z, Yuan J, Xiao S, Chen C, Chen Y, Chen Y, Song J, Wang Y, Xue Y, Zhang H, Bao Q 2015 *ACS Photonics* **2** 832
- [104] Guo Z, Zhang H, Lu S, Wang Z, Tang S, Shao J, Sun Z, Xie H, Wang H, Yu X, Chu P K 2015 *Adv. Funct. Mater.* **25** 6996
- [105] Khan Z R, Shkir M, Ganesh V, AlFaify S, Yahia I S, Zahran H Y 2018 *J. Electron. Mater.* **47** 5386
- [106] Zhang S, Yan Z, Li Y, Chen Z, Zeng H 2015 *Angew. Chem. Int. Ed.* **54** 3112
- [107] Liu H, Neal A T, Ye P D 2012 *ACS Nano* **6** 8563
- [108] Ge Y, Chen S, Xu Y, He Z, Liang Z, Chen Y, Song Y, Fan D, Zhang K, Zhang H 2017 *J. Mater. Chem. C* **5** 6129
- [109] Tan C, Cao X, Wu X, He Q, Yang J, Zhang X, Chen J, Zhao W, Han S, Nam G H, Sindoro M, Zhang H 2017 *Chem. Rev.* **117** 6225
- [110] Li Y, Rao Y, Mak K F, You Y, Wang S, Dean C R, Heinz T F 2013 *Nano Lett.* **13** 3329
- [111] Zeng H, Liu G, Dai J, Yan Y, Zhu B, He R, Xie L, Xu S, Chen X, Yao W, Cui X 2013 *Sci. Rep.* **3** 1608
- [112] Malard L M, Alencar T V, Barboza A P M, Mak K F, Maria

- de Paula A 2013 *Phys. Rev. B* **87** 201401
- [113] Wang R, Chien H C, Kumar J, Kumar N, Chiu H Y, Zhao H 2014 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **6** 314
- [114] Wild D S, Shahmoon E, Yelin S F, Lukin M D 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 123606
- [115] Autere A, Jussila H, Marini A, Saavedra J R M, Dai Y, Säynätjoki A, Karvonen L, Yang H, Amirsolaimani B, Norwood R A, Peyghambarian N, Lipsanen H, Kieu K, García de Abajo F J, Sun Z 2018 *Phys. Rev. B* **98** 115426
- [116] Säynätjoki A, Karvonen L, Rostami H, Autere A, Mehravar S, Lombardo A, Norwood R A, Hasan T, Peyghambarian N, Lipsanen H, Kieu K, Ferrari A C, Polini M, Sun Z 2017 *Nat. Commun.* **8** 893
- [117] Wen X, Xu W, Zhao W, Khurgin J B, Xiong Q 2018 *Nano Lett.* **18** 1686
- [118] Li Y 2016 *Probing the Response of Two-dimensional Crystals by Optical Spectroscopy* (New York: Springer International Publishing) pp46–52
- [119] Kumar N, Najmaei S, Cui Q, Ceballos F, Ajayan P M, Lou J, Zhao H 2013 *Phys. Rev. B* **87** 161403
- [120] Xie Y, Zhang S, Zhang X, Dong N, Kislyakov I M, Luo S, Chen Z, Nunzi J M, Zhang L, Wang J 2019 *Chin. Opt. Lett.* **17** 081901
- [121] Ge Y, Zhu Z, Xu Y, Chen Y, Chen S, Liang Z, Song Y, Zou Y, Zeng H, Xu S, Zhang H, Fan D 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1701166
- [122] Kumar S, Anija M, Kamaraju N, Vasu K S, Subrahmanyam K S, Sood A K, Rao C N R 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 191911
- [123] Quan C, He M, He C, Huang Y, Zhu L, Yao Z, Xu X, Lu C, Xu X 2018 *Appl. Surf. Sci.* **457** 115
- [124] Lu L, Wang W, Wu L, Jiang X, Xiang Y, Li J, Fan D, Zhang H 2017 *ACS Photonics* **4** 2852
- [125] Low T, Roldán R, Wang H, Xia F, Avouris P, Moreno L M, Guinea F 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 106802
- [126] Koenig S P, Doganov R A, Schmidt H, Neto A H C, Özyilmaz B 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 103106
- [127] Li D, Jussila H, Karvonen L, Ye G, Lipsanen H, Chen X, Sun Z 2015 *Sci. Rep.* **5** 15899
- [128] Liu H, Neal A T, Zhu Z, Luo Z, Xu X, Tománek D, Ye P D 2014 *ACS Nano* **8** 4033
- [129] Qiao J, Kong X, Hu Z X, Yang F, Ji W 2014 *Nat. Commun.* **5** 4475
- [130] Sun X, Nie H, He J, Zhao R, Su X, Wang Y, Zhang B, Wang R, Yang K 2018 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **24** 1
- [131] Tran V, Soklaski R, Liang Y, Yang L 2014 *Phys. Rev. B* **89** 235319
- [132] Zhang H, Lu S B, Zheng J, Du J, Wen S C, Tang D Y, Loh K P 2014 *Opt. Express* **22** 7249
- [133] Lu S B, Miao L L, Guo Z N, Qi X, Zhao C J, Zhang H, Wen S C, Tang D Y, Fan D Y 2015 *Opt. Express* **23** 11183
- [134] Gibaja C, Rodriguez San Miguel D, Ares P, Gómez Herrero J, Varela M, Gillen R, Maultzsch J, Hauke F, Hirsch A, Abellán G, Zamora F 2016 *Angew. Chem. Int. Ed.* **55** 14345
- [135] Ito S, Feng B, Arita M, Takayama A, Liu R Y, Someya T, Chen W C, Iimori T, Namatame H, Taniguchi M, Cheng C M, Tang S J, Komori F, Kobayashi K, Chiang T C, Matsuda I 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 236402
- [136] Lu L, Liang Z, Wu L, Chen Y, Song Y, Dhanabalan S C, Ponraj J S, Dong B, Xiang Y, Xing F, Fan D, Zhang H 2018 *Laser Photonics Rev.* **12** 1700221
- [137] Rostami A, Rasooli Saghai H 2007 *Microelectron. J.* **38** 342
- [138] Du J, Zhang M, Guo Z, Chen J, Zhu X, Hu G, Peng P, Zheng Z, Zhang H 2017 *Sci. Rep.* **7** 42357
- [139] Kirak M, Yılmaz S, Şahin M, Gençaslan M 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 094309
- [140] Savenko I G, Kibis O V, Shelykh I A 2012 *Phys. Rev. A* **85** 053818
- [141] Liu L, Zheng Z, Zhao X, Sun S, Bian Y, Su Y, Liu J, Zhu J 2013 *Opt. Commun.* **294** 267
- [142] Popa D, Sun Z, Hasan T, Torrisi F, Wang F, Ferrari A C 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 073106
- [143] Kim H, Cho J, Jang S Y, Song Y W 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 021104
- [144] Martinez A, Fuse K, Yamashita S 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 121107
- [145] Sun X, Dai R, Chen J, Zhou W, Wang T, Kost A R, Tsung C K, An Z 2014 *Opt. Express* **22** 519
- [146] Lee Y W, Chen C M, Huang C W, Chen S K, Jiang J R 2016 *Opt. Express* **24** 10675
- [147] Sun X, Zhou B, Zou C, Zhao W, Huang Q, Li N, Wang T, Mou C, Wang T, Kost A R 2018 *Appl. Opt.* **57** 3231
- [148] Liu L, Sun X, Zhao W, Zhou B, Huang Q, Zou C, Mou C 2018 *Opt. Fiber Technol.* **46** 162
- [149] Hines M A, Guyot Sionnest P 1996 *J. Phys. Chem.* **100** 468
- [150] Fu S, Zhang S, Li J, Bai Z, Wu T, Man Z 2019 *Appl. Opt.* **58** 3036
- [151] Mahyuddin M B H, Latiff A A, Rusdi M F M, Irawati N, Harun S W 2017 *Opt. Commun.* **397** 147
- [152] Wang X, Zhu Y J, Jiang C, Guo Y X, Ge X T, Chen H M, Ning J Q, Zheng C C, Peng Y, Li X H, Zhang Z Y 2019 *Opt. Express* **27** 20649
- [153] Dini D, Calvete M J F, Hanack M 2016 *Chem. Rev.* **116** 13043
- [154] Sanusi K, Stone J M, Nyokong T 2015 *New J. Chem.* **39** 1665
- [155] Yan J, Shen X, Xu Z, Chen G, Zhang H, Cheng C 2019 *Opt. Laser Technol.* **120** 105693
- [156] Wei T C, Mokkapati S, Li T Y, Lin C H, Lin G R, Jagadish C, He J H 2018 *Adv. Funct. Mater.* **28** 1707175
- [157] Kubheka G, Achadu O, Mack J, Nyokong T 2017 *New J. Chem.* **41** 12319
- [158] George J, Sajan D, Alex J, Aravind A, Vimitha G, Chitra R 2018 *Opt. Laser Technol.* **105** 207
- [159] Tolbin A Y, Savelyev M S, Gerasimenko A Y, Tomilova L G 2016 *Chem. Phys. Lett.* **661** 269
- [160] Saravanan M, Sabari Girism T C, Vimitha G 2018 *J. Mol. Liq.* **256** 519
- [161] Valligatla S, Haldar K K, Patra A, Desai N R 2016 *Opt. Laser Technol.* **84** 87
- [162] Nyk M, Szeremeta J, Wawrzynczyk D, Samoc M 2014 *J. Phys. Chem. C* **118** 17914
- [163] Nyk M, Wawrzynczyk D, Szeremeta J, Samoc M 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 041102
- [164] Praseetha K P, Divyasree M C, John V N, Chandrasekharan K, Varghese S 2019 *J. Mol. Liq.* **273** 497
- [165] Nguyen V L, Nguyen D C, Hirata H, Ohtaki M, Hayakawa T, Nogami M 2010 *Adv. Nat. Sci. Nanosci.* **1** 035012
- [166] Vasa P, Wang W, Pomraenke R, Lammers M, Lienau C 2013 *Nature Photon.* **7** 128
- [167] Kurtze H, Yakovlev D R, Reuter D, Wieck A D, Bayer M 2012 *Phys. Rev. B* **85** 195303
- [168] Hatéf A, Sadeghi S M, Fortin Deschênes S, Boulais E, Meunier M 2013 *Opt. Express* **21** 5643
- [169] Antón M A, Carreño F, Melle S, Calderón O G, Singh M R 2012 *Phys. Rev. B* **86** 155305

- [170] Li J B, Kim N C, Cheng M T, Zhou L, Hao Z H, Wang Q Q 2012 *Opt. Express* **20** 1856
- [171] Dawlaty J M, Shivaraman S, Chandrashekhara M, Rana F, Spencer M G 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 042116
- [172] Lee C C, Miller J M, Schibli T R 2012 *Appl. Phys. B* **108** 129
- [173] Wang L, Zhang S, McEvoy N, Sun Y, Huang J, Xie Y, Dong N, Zhang X, Kislyakov I M, Nunzi J M, Zhang L, Wang J 2019 *Laser Photonics Rev.* **13** 1900052
- [174] Wang Y, Huang G, Mu H, Lin S, Chen J, Xiao S, Bao Q, He J 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 091905
- [175] Sun Z, Martinez A, Wang F 2016 *Nature Photon.* **10** 227
- [176] Soh D B S, Hamerly R, Mabuchi H 2016 *Phys. Rev. A* **94** 023845
- [177] Soh D B S, Rogers C, Gray D J, Chatterjee E, Mabuchi H 2018 *Phys. Rev. B* **97** 165111
- [178] Autere A, Jussila H, Dai Y, Wang Y, Lipsanen H, Sun Z 2018 *Adv. Mater.* **30** 1705963

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

Research progress of low-dimensional semiconductor materials in field of nonlinear optics*

Bai Rui-Xue¹⁾²⁾ Yang Jue-Han¹⁾ Wei Da-Hai¹⁾ Wei Zhong-Ming^{1)†}

1) (*State Key Laboratory of Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

2) (*College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 11 February 2020; revised manuscript received 10 March 2020)

Abstract

Since the first ruby laser was invented, researchers have focused their attention on how to achieve a strong laser light source, which cannot be produced by the ordinary light sources. Since then, the rich and colorful characteristics of nonlinear optical materials have been discovered, such as the saturation absorption, reverse saturation absorption and nonlinear refraction. They are applied to optoelectronic devices, optical switching devices and optical communication. At the same time, with the increase of the requirements for device integration performance in industrial production, ordinary three-dimensional devices are difficult to meet the production requirements, and the advent of low-dimensional semiconductor devices effectively solves this problem. Therefore, the combination of nonlinear optics and low-dimensional semiconductor materials is a general trend. The emergence of quantum dots, quantum wire lasers, and amplifiers confirms this. In this paper, we summarize the frontier work on nonlinear optics by selecting several special low-dimensional structures and several materials, providing some references for future research. However, due to the fact that the instability and low filling ratio of low-dimensional materials remain to be improved, further relevant research is still required.

Keywords: nonlinear optics, low-dimensional semiconductor, quantum dots, laser

PACS: 42.65.-k, 03.67.Hk, 42.55.Px

DOI: 10.7498/aps.69.20200206

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61622406).

† Corresponding author. E-mail: znwei@semi.ac.cn