

铋烯的可调谐非线性光吸收特性方法研究进展

李冰雪, 潘俊杰, 闫昊, 詹燕燕, 房丹, 李金华

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2024年3月4日; 录用日期: 2024年4月23日; 发布日期: 2024年4月30日

摘要

非线性光学材料由于其独特的非线性光学吸收特性, 被广泛应用于激光调Q、激光锁模、光限幅、全光开关、光通信等一系列非线性光学领域中。非线性光学材料实现饱和吸收特性与反饱和吸收特性之间的转换对设计出多用途的光电子器件尤为重要。但目前非线性光学材料在大多数的应用中仅表现出饱和吸收特性或反饱和吸收特性二者中的一种。这意味着开发能够实现非线性光学材料的饱和吸收特性与反饱和吸收特性之间的可控调谐的方法成为研究热点。在这项工作中, 综述了调谐饱和吸收特性与反饱和吸收特性的方法, 并且提出了一种基于修改氧化程度来调谐铋烯的非线性光学吸收特性的开创性方法, 为其他非线性光学材料的可控调节提供了思路, 对新型光电子器件的设计具有重要而深远的意义。

关键词

非线性光学材料, 饱和吸收特性, 反饱和吸收特性

Research Progress on Tunable Nonlinear Optical Absorption Properties of Bismuthene

Bingxue Li, Junjie Pan, Hao Yan, Yanyan Zhan, Dan Fang, Jinhua Li

School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Mar. 4th, 2024; accepted: Apr. 23rd, 2024; published: Apr. 30th, 2024

Abstract

Nonlinear optical materials are widely used in a series of nonlinear optical fields such as laser Q-switching, laser mode-locking, optical limiting, all-optical switching, and optical communication due to their unique nonlinear optical absorption characteristics. The conversion between saturable absorption characteristics and reverse saturable absorption characteristics of nonlinear optical materials is particularly important for the design of multi-purpose optoelectronic devices.

文章引用: 李冰雪, 潘俊杰, 闫昊, 詹燕燕, 房丹, 李金华. 铋烯的可调谐非线性光吸收特性方法研究进展[J]. 材料科学, 2024, 14(4): 498-509. DOI: 10.12677/ms.2024.144056

However, at present, nonlinear optical materials only show one of the saturated absorption characteristics or reverse saturated absorption characteristics in most applications. This means that the development of a method that can realize the controllable tuning between the saturable absorption characteristics and the reverse saturable absorption characteristics of nonlinear optical materials has become a research hotspot. In this work, the methods of tuning saturable absorption characteristics and reverse saturable absorption characteristics are reviewed, and a groundbreaking method for tuning the nonlinear optical absorption characteristics of bismuthene based on modifying the degree of oxidation is proposed. It provides ideas for the controllable adjustment of other nonlinear optical materials and has important and far-reaching significance for the design of new optoelectronic devices.

Keywords

Nonlinear Optical Materials, Saturable Absorption Characteristics, Reverse Saturable Absorption Characteristics

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

非线性光学领域是自第一台激光器被成功制造以来就引起了人们的极大兴趣的新型领域。1961年, Franken 等用 694 nm 波长的激光穿过石英晶体, 产生了 347 nm 的紫外光, 观测到了二次谐波现象, 标志着非线性光学的诞生[1] [2]。非线性光学可分为: 二阶非线性光学、三阶非线性光学和多阶非线性光学。其中三阶非线性光学中的非线性光吸收特性在光电领域被广泛研究。在强激光的作用下, 介质的吸收系数会随着光强变化而变化, 这就是非线性光吸收的现象。非线性光吸收主要包括饱和吸收特性和反饱和吸收特性。饱和吸收特性表现为介质的吸收系数随着入射光强的增大而减小, 透过率随着入射光强的增大而增大。具有饱和吸收特性的材料可制成可饱和吸收体用在固体或光纤的锁模激光器和调 Q 激光器中[3]。反饱和吸收特性表现为介质的吸收系数随着入射光强的增大而增大, 透过率随着入射光强的增大而减小。具有反饱和吸收特性的材料可应用于激光防护[4]。除此之外, 它们还被应用于光开关、生物成像、数据存储和超快光通信等许多领域[5]-[14]。为了非线性光学材料能够在更广阔的场景中开展更灵活的应用, 就需要根据实际结合饱和吸收和反饱和吸收两种特性[15] [16] [17] [18] [19]。因此, 开发实现非线性光学材料的饱和吸收特性和反饱和吸收特性之间可控切换的方法很有必要。本研究首先概述了可调谐非线性光吸收特性的几种方法, 讨论了它们能够实现非线性光吸收特性可调谐的机理。然后, 提出了一种简单有效的方法, 通过控制氧化程度来改变铋烯的结晶度, 从而实现饱和吸收和反饱和吸收特性之间的可控切换。最后, 我们分享了对这一发展中研究领域的挑战和机遇的看法, 并希望为基础探索和未来发展提供一些启示。

2. 非线性光吸收特性的可调谐方法

2.1. 调整材料尺寸

2012年, Zhang 等人利用纳秒 Z 扫描测量了铋纳米片的宽带非线性光学响应[20]。从结果中发现, 随着平均尺寸从 3 微米减小到 50 纳米, 铋纳米片表现出从饱和吸收到反向饱和吸收的明显转变, 如图 1。尺寸相关的非线性光学行为可能与几个因素有关, 例如量子限制、缺陷、温度、化学成分和带隙。与

大尺寸的锑纳米片相比，小尺寸的锑纳米片中载流子的扩散长度受到限制，从而降低了载流子遇到缺陷的可能性，进而由于陷阱态诱导的超长寿命成分引导的饱和吸收行为就减弱了。此外，小尺寸的锑纳米片中的电子特征可能与大尺寸的锑纳米片中的电子特征不同，电子结构的差异可以有效地诱导不同的激发态动态行为。由于强限制效应和较小尺寸的锑纳米片中可能存在边缘态，激发态吸收占主导地位，从而诱导反饱和和吸收行为。

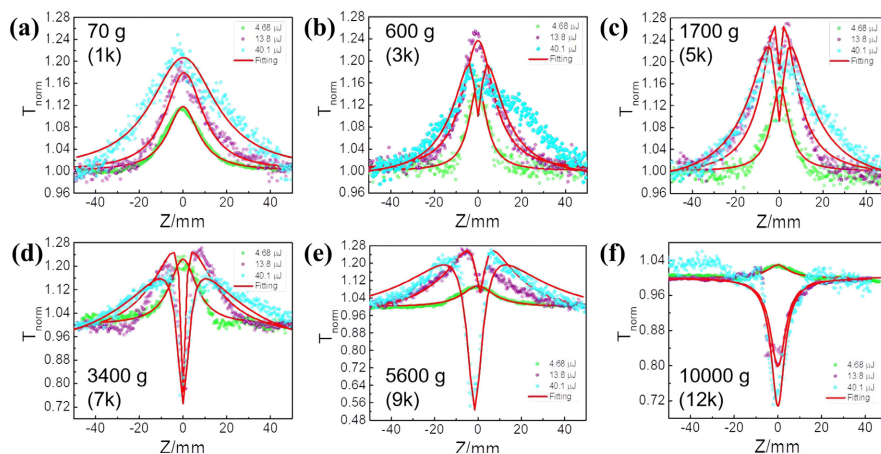


Figure 1. (a~f) Open aperture Z-scan data (symbols) and fitted curves (solid curves) for the samples of the Sb nanosheets dispersions obtained by gradient centrifugation, respectively [20]

图 1. (a~f)通过梯度离心获得的锑纳米片分散体样品的开孔 Z 扫描数据(符号)和拟合曲线(实线) [20]

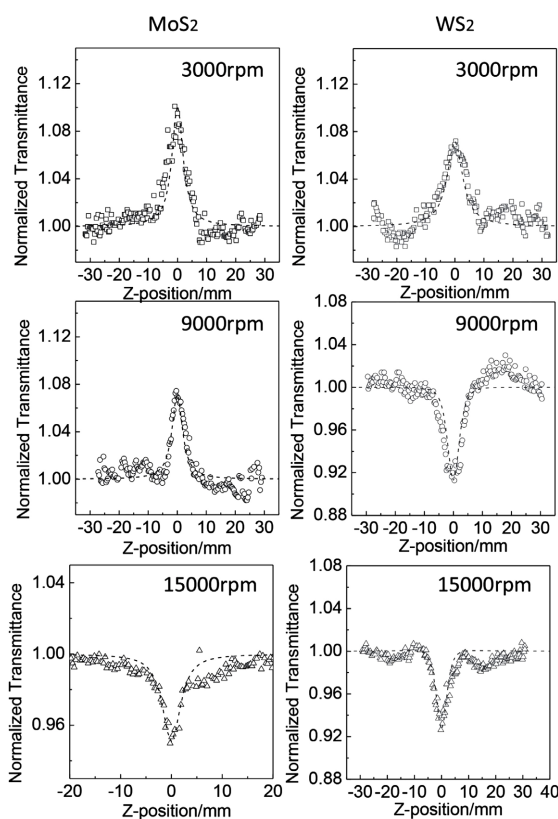


Figure 2. Open aperture Z-scan data [21]

图 2. 开孔 Z 扫描数据[21]

2014年, Zhou等人发现了过渡金属硫化物纳米片(例如 MoS_2 和 WS_2)表现出尺寸依赖性的非线性光吸收特性[21]。如图2, 大于 100 nm 的纳米片表现出饱和和吸收特性, 随着尺寸变小, 当小于 50 nm 时表现出反饱和和吸收特性。其原因同样是不同尺寸的纳米片的电子能带结构不同。反演对称性被破坏使小纳米片的边缘缺陷较大。这些边缘态可以帮助电子转换到更高的能级。随着纳米片尺寸的减小, 边缘原子的比例增加, 因此, 与大尺寸纳米片相比, 能够辅助更多的电子转换到更高能级, 因此观察到反饱和和吸收行为。2020年, Bhavesh 等人在飞秒范围内研究了空心银纳米立方体的尺寸依赖性非线性吸收, 随着尺寸增加, 反饱和吸收行为相对贡献逐渐减小, 饱和吸收逐渐占据主导地位[22]。以上结果可以表明能够通过改变尺寸可以有效地调节非线性光学特性。

2.2. 改变激发波长

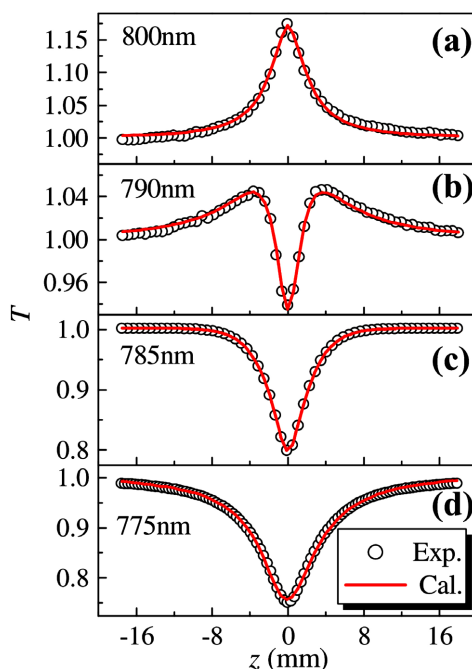


Figure 3. Open aperture Z-scan data [23]

图3. 开孔 Z 扫描数据[23]

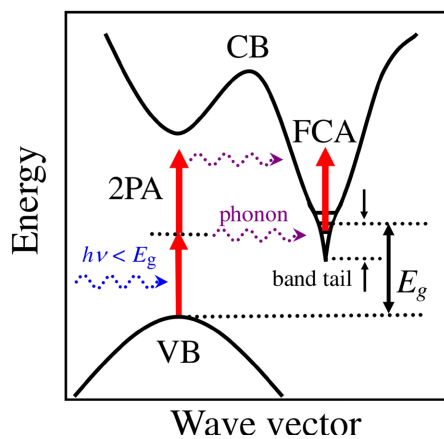


Figure 4. Schematic bandgap diagram showing feasible mechanisms [23]

图4. 显示可行机制的带隙示意图[23]

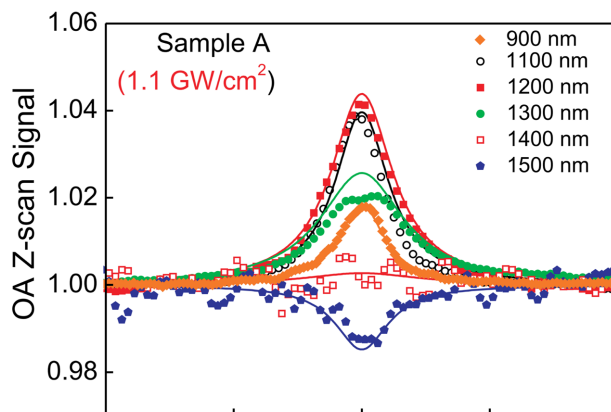


Figure 5. The excitation wavelength-dependent OA Z-scan curves [24]

图 5. 激发波长依赖性的开孔 Z 扫描曲线[24]

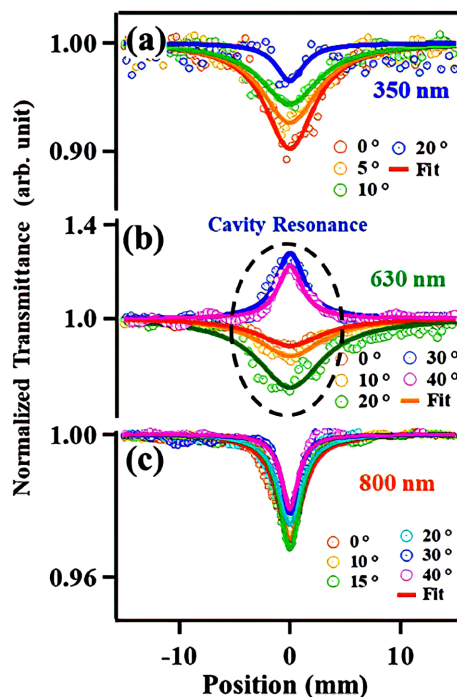


Figure 6. OA Z-scan curves [25]

图 6. 开孔 Z 扫描曲线[25]

2011 年, Ma 等人通过开孔径 Z 扫描方法研究了氢化纳米晶硅, 发现了氢化纳米晶硅的线性光吸收依赖于入射波长, 如图 3。入射波长从 800 到 775 nm 意味着入射辐照度的光子能量从 1.55 变化到 1.60 eV, 略小于样品的带隙。由于氢化纳米晶硅的指数带尾宽度约为 60 meV, 因此带隙以下入射辐照度下的激发电子可能通过声子辅助从价带跃迁到导带尾。如图 4 所示的单光子吸收过程, 导致带尾态吸收饱和, 表现为饱和吸收特性。当入射辐照度的光子能量接近带隙时, 更难以达到吸收饱和, 因为带尾态的数量随着能量的增加而增加。因此, 饱和吸收效应随着入射波长的减小而减弱。同时, 随着入射辐照度的光子能量越接近带隙, 反饱和和吸收效应越明显[23]。2014 年, Ahn 等人使用飞秒 Z 扫描技术在宽近红外光谱范围内测量的 InN 的非线性光学特性[24]。随着入射激光波长从 900 nm 增加到 1500 nm, 非线性吸收实现了从饱和吸收到反饱和和吸收的转变, 如图 5。这种过渡行为的机理解释如下: 当吸收能量略低于带隙

的光子时,带尾态可能首先饱和,并且当样品接近 $z = 0$ 时,由于自由载流子吸收或双光子吸收而导致的反饱和吸收逐渐超过饱和吸收。随着辐照强度变大,反饱和吸收占主导地位。2019年, Xiao 等人利用飞秒 Z 扫描技术研究了 Bi_2Se_3 纳米片的非线性光学性质。随着激发波长从共振吸收增加到非共振吸收,纳米片的非线性吸收从饱和变为反饱和[25]。图 6 所示,2022年, Jitendra 等人通过调整波长实现了对 Bi_2O_3 的非线性光吸收特性进行了调谐,结果同样是随着波长增加出现了反饱和和吸收向饱和吸收的转变[26]。2022年, Xiao 等人研究了硒化镓镉纳米颗粒的非线性光学特性。结果表明,在 400 nm 处表现出饱和和吸收行为,而在 800 nm 处表现出反饱和和吸收行为,这分别归因于单光子吸收和双光子吸收[27]。以上结果可以表明能够通过改变激发波长可以实现非线性光吸收特性的可调谐。

2.3. 调整材料厚度

如图 7 所示,2015年, Li 等人研究了 $\text{Bi}_{3.15}\text{Nd}_{0.85}\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ (BNT) 薄膜中非线性光吸收的可调性[28]。观察到 BNT 薄膜厚度对线性光吸收响应的影响,厚度从 106.8 nm 增加到 139.7 nm,非线性光吸收从饱和和吸收变为反饱和吸收,如图 8。薄膜的厚度变化引起了带隙的变化,厚度越大带隙越小 BNT 薄膜中存在缺陷态,受激电子可以在缺陷态的帮助下从价带跃迁到导带。当薄膜的厚度小,带隙较大时,通过反饱和和吸收过程将电子从缺陷态激发到导带变得困难。这导致缺陷态的吸收饱和并使 BNT 薄膜表现出完全的饱和和吸收行为。随着薄膜的厚度变大,带隙变小,反饱和和吸收过程可以很容易地实现,更多的电子可以传输到导带,反饱和吸收行为占主导地位。2016年, Wang 等人通过使用 800 nm 波长下的飞秒脉冲对 In_2Te_3 薄膜进行开孔 Z 扫描测量[29]。实验结果表明,通过调整 In_2Te_3 薄膜的厚度可以观察到随着薄膜厚度的增加,从饱和和吸收到反饱和和吸收的转变,并提出了一个三能级模型来确定基态吸收和激发态吸收之间的调谐行为和竞争机制,如图 9。非晶态和晶体结构的缺陷态为电子从价带转移到导带提供了新的通道。电子通过吸收激发光子从价带转移到缺陷能级。这些电子动态地滞留在缺陷能级中,从而产生饱和和吸收响应。同时,缺陷能级中的一些电子可以通过吸收备用光子转移到位于导带中的更高激发态,即激发态吸收。从饱和和吸收到反饱和和吸收的转变通常被认为是基态吸收和激发态吸收之间竞争的结果。在较薄的薄膜中,带隙较大,电子很难从缺陷能级转移到导带中的较高态;大多数电子被困在缺陷能级中,从呈现出饱和和吸收特性。相反,较厚的样品中较窄的带隙很容易触发激发态吸收,饱和和吸收行为减弱,反饱和和吸收行为逐渐占主导地位。如图 10,2017年, Sun 等人研究了非线性光吸收的厚度依赖性。随着与有效载流子密度相关的厚度的增加, NiO 纳米片的光学行为从饱和吸收切换到反向饱和和吸收,然后再回到饱和和吸收,这种现象是带内跃迁、泡利阻挡以及三光子带间跃迁和发射之间动态平衡的结果[30]。以上均表明非线性光吸收特性具有厚度依赖性。

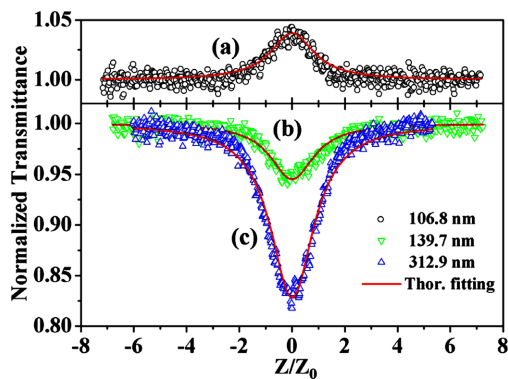


Figure 7. OA Z-scan curves [28]

图 7. 开孔 Z 扫描曲线[28]

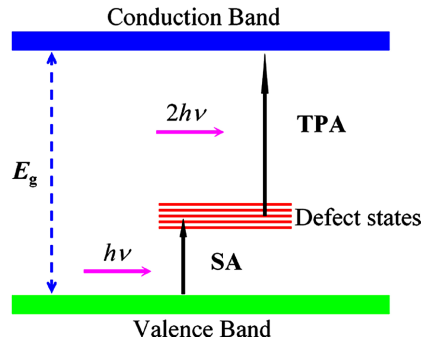


Figure 8. Schematic of three-level model [28]
图 8. 三能级模型示意图[28]

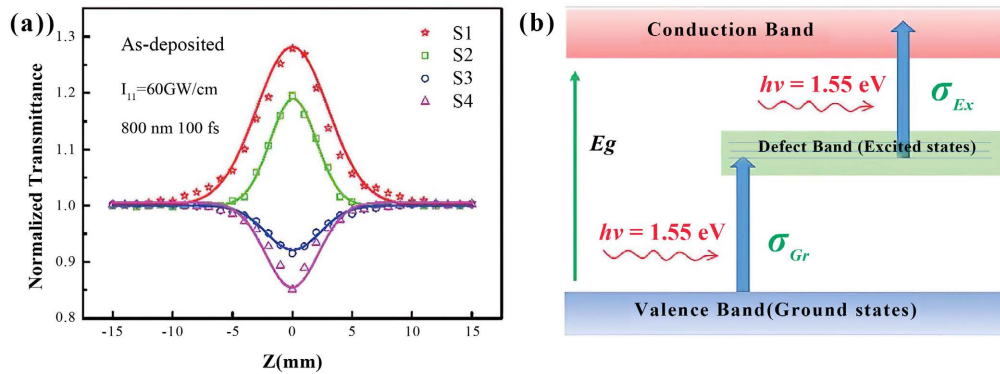


Figure 9. (a) OA Z-scan curves; (b) Schematic of three-level model [29]
图 9. (a) 开孔 Z 扫描曲线; (b) 三能级模型示意图[29]

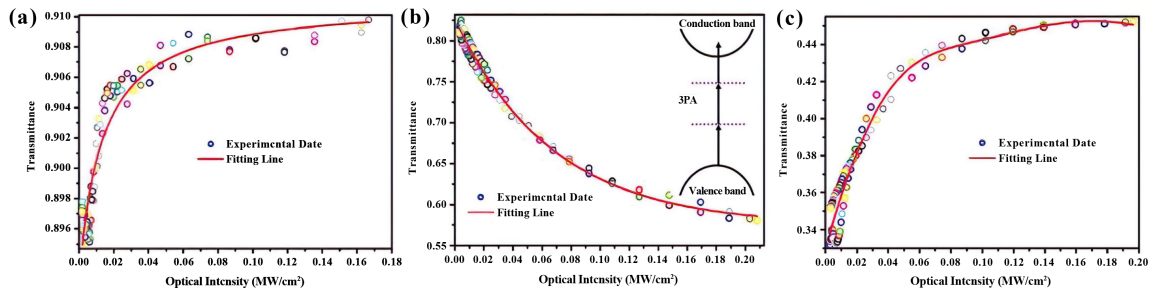


Figure 10. Transmittance as a function of input optical intensity for different film thickness in three typical samples [30]
图 10. 三个典型样品中不同薄膜厚度的透射率与输入光强度的函数关系[30]

2.4. 热处理

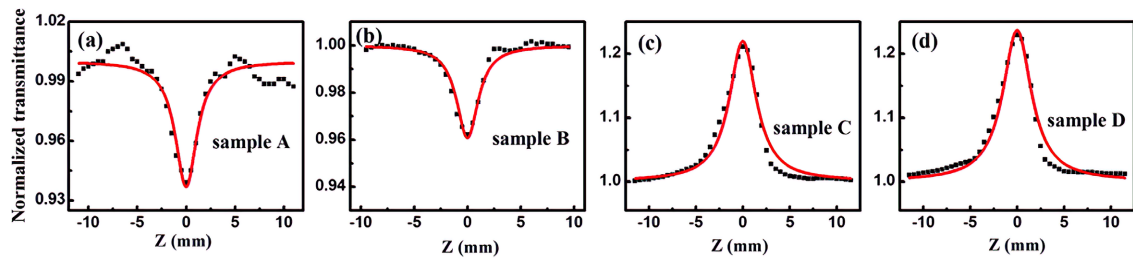


Figure 11. OA Z-scan curves [31]
图 11. 开孔 Z 扫描曲线[31]

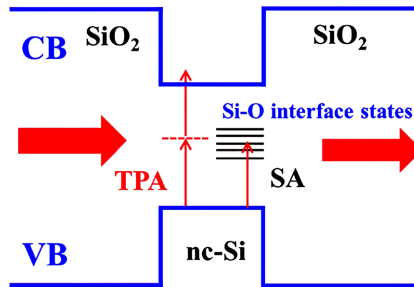


Figure 12. The schematic diagram of non-linear optical response processes [31]
图 12. 非线性光学响应原理图[31]

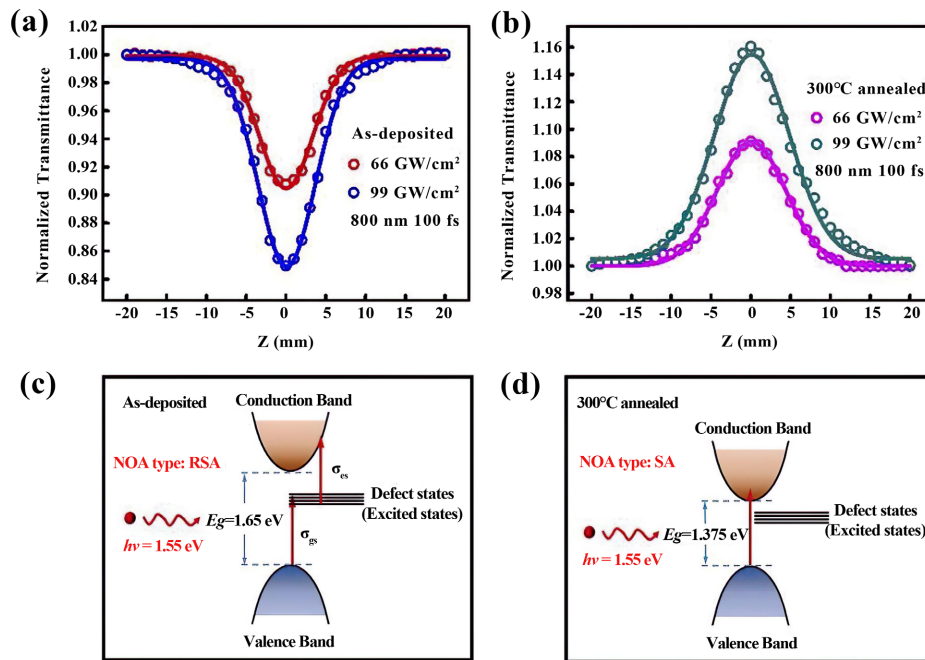


Figure 13. (a) (b) OA Z-scan curves; (c) (d) Schematic of three-level model [32]
图 13. (a) (b) 开孔 Z 扫描曲线; (c) (d) 三能级模型示意图[32]

如图 11 所示, 2014 年, Zhang 等人通过 Z 扫描技术研究了热处理对纳米晶 Si/SiO₂ 多层膜的非线性光学特性的影响[31]。结果表明, 随着热处理温度的升高, 样品的非线性吸收由反饱和和吸收转变为饱和和吸收, 如图 12。图是非线性光学响应过程示意图。解释了该方法的机制: 在相对较低温度下热处理的样品 A 和 B, 双光子吸收过程会引起与自由载流子的非线性光学响应相关的反饱和吸收, 当热处理温度升高时, 形成更多的纳米晶 Si 点, 并且存在于纳米晶 Si 和 SiO₂ 层间的界面区域, 进而辅助单光子吸收过程, 饱和吸收逐渐占主导地位。2019 年, Liu 等人采用开孔 Z 扫描技术和波长 800 nm 的飞秒激光脉冲, 系统研究了 Sb₂Se₃ 薄膜的非线性光学吸收特性[32]。实验结果发现, 热处理后的 Sb₂Se₃ 薄膜从反饱和吸收转变为饱和吸收, 提出了三能级近似模型来解释电子跃迁, 如图 13。Sb₂Se₃ 薄膜的不饱和键导致形成了局部缺陷态。未经过热处理的 Sb₂Se₃ 薄膜具有更多的局部缺陷态, 这些缺陷态有助于电子从价带跃迁到导带。在这种情况下, 电子可以通过吸收激发光子从价带转移到缺陷态。同时, 一些处于缺陷态的电子也可以通过吸收其他光子而转移到导带中更高的激发态, 从而呈现出反饱和吸收特性。热处理会强化结晶、释放不饱和和缺陷。因此, 在热处理后的 Sb₂Se₃ 薄膜中, 电子可以通过吸收激发光子直接从价带转移到导

带，然后导带几乎被占据，泡利阻挡避免了光子的进一步吸收，从而产生饱和吸收响应。以上研究结果说明了热处理对非线性光学特性的影响。

2.5. 调节激光强度

2014年，Ouyang等人研究了MoS₂纳米片阵列薄膜的非线性光学特性。在低激光强度下，薄膜表现出饱和吸收；随着激光强度的增加，就会观察到从饱和吸收到反向饱和吸收的转变[33]。2015年Zheng等人对黑磷纳米片的研究中也发现了在开孔Z扫描测量中观察到随着激光强度的增加从饱和吸收到反饱和吸收的转变[34]。2018年，Tong等人对石墨烯-ZnO纳米复合材料中也看到随着入射强度的增加从饱和吸收到反饱和吸收的变化[35]。2021年，Ma等人通过实验研究了氧化铟锡(ITO)薄膜的非线性光学吸收特性[36]。使用飞秒Z扫描测量技术在1030 nm波长下研究ITO薄膜的非线性光学吸收响应。研究表明，随着入射激光强度的增加，观察到从饱和吸收到反饱和吸收的转换行为，如图14。下面介绍该调谐方法的机理：当入射激光能量小于材料的带隙时，自由电子通过自由载流子吸收发生带内跃迁。此时自由电子浓度小，代表着能够吸收入射光子的自由电子就少，材料的吸收系数就小，透过率大，呈现出饱和吸收特性。而当入射激光能量足够高并且大于材料的带隙时，就会发生与多光子吸收相关的带间跃迁。带间跃迁增加了总自由电子浓度，代表着能够吸收入射光子的自由电子就多，甚至发生三光子吸收或多光子吸收，此时材料的吸收系数就大，透过率小，就会表现出反饱和吸收效应。2023年，Zhang等人对硅量子点/SiO₂多层膜的研究中发现当增加入射激光强度时，由于界面态填充效应，观察到从反饱和吸收特性过程到饱和吸收特性过程的转变[37]。以上研究结果说明了激光强度对非线性光吸收特性的重要作用。

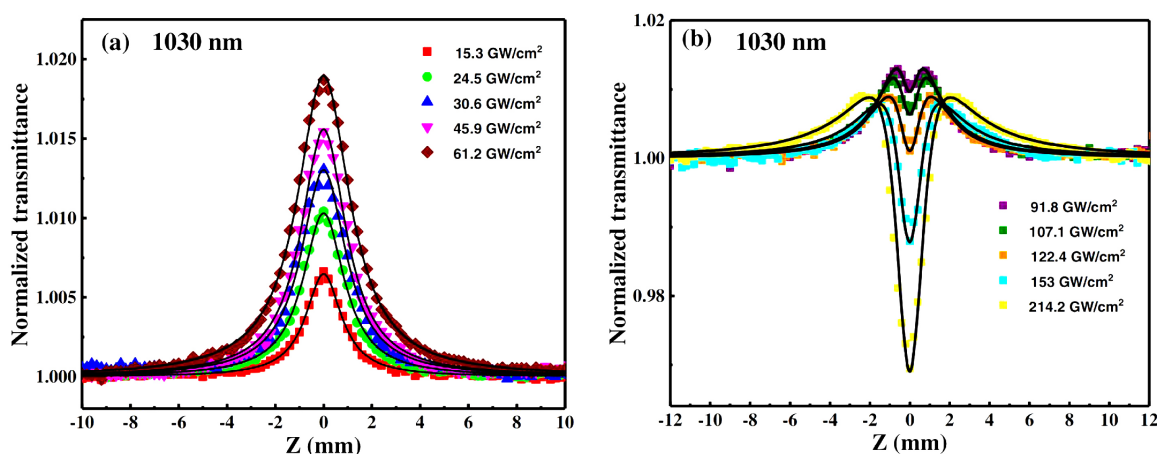


Figure 14. Open aperture Z-scan results of as-deposited ITO films under excitation of 1030 nm at different input fluencies [36]

图 14. 沉积态 ITO 薄膜在不同输入通量下 1030 nm 激发下的开孔 Z 扫描结果[36]

2.6. 掺杂

2019年，Sandeep等人的研究表明银纳米颗粒在共振激发下表现出饱和吸收，在添加聚合物后，表现出反向饱和吸收。对于未添加聚合物的银纳米颗粒，由于在高强度的共振激发下通过带内(占据的 sp → 未占据的 sp)跃迁，发态饱和而产生饱和吸收，如图15的箭头1所示。银纳米颗粒悬浮液中饱和吸收过程的阈值会随着聚合物浓度的增加而增加，这可能是由于聚合物中存在额外的跃迁概率以及银纳米颗粒在400 nm处的单光子跃迁所致。银纳米颗粒中的反饱和吸收可以通过带间同时吸收两个光子而发生(占用的 d → 未占用的 sp，见图15的箭头2)。在400 nm激发下，激发的银纳米颗粒可以通过非辐射途径将

其能量转移到聚合物，这也会降低银纳米颗粒中饱和吸收，反饱和吸收逐渐占主导地位[38]。2022年，Gao 等人在少层黑磷纳米片中掺杂金属银离子来进行其非线性光吸收特性的调谐[39]。结果表明，通过在少层黑磷纳米片中掺杂金属银离子，可以将非线性吸收效应从饱和吸收转变为反饱和吸收，如图 16。这是由于将金属银离子掺杂到少层黑磷纳米片中后，纳米复合材料的带隙受到调节。随着金属银离子含量的增加，这些纳米复合材料的带隙变大，更接近在 800 nm 激光脉冲激发下的共振反饱和和吸收。

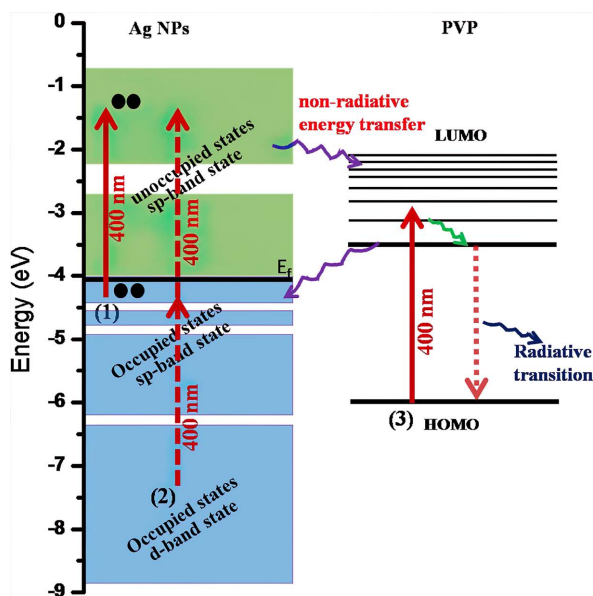


Figure 15. Schematic of electronic excitation [38]

图 15. 电子激发示意图[38]

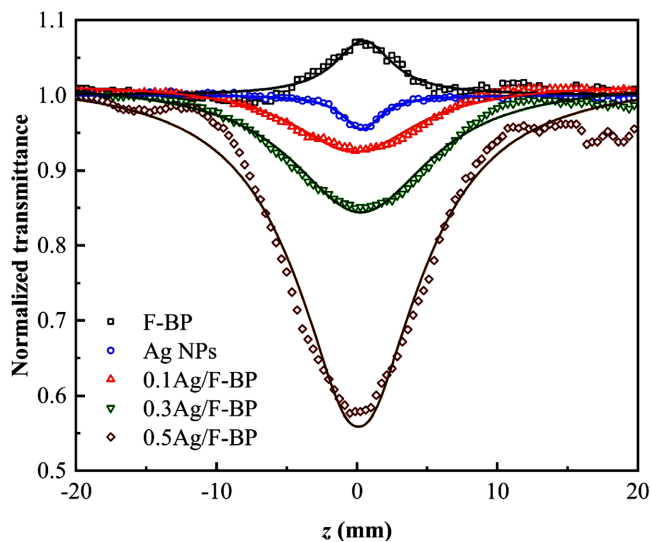


Figure 16. OA Z-scan curves [39]

图 16. 开孔 Z 扫描曲线[39]

3. 结论

以上概述了多种高效且方便的非线性光吸收特性的可调谐方法，涉及了调整尺寸、厚度、掺杂、热处理等技术并详细分析了机制。其中较多被用到的方法有改变激光波长和调节激光强度，这都是从激光

器角度来进行调节, 对于从材料本身出发的调谐方法还有待进一步研究。通过以上几种方法为其他的非线性光学材料的非线性光吸收特性的可调谐的方法提供了启示, 例如可以通过控制铋烯的氧化程度来改变缺陷能级的密度进而实现非线性光吸收特性的可调谐, 通过改变剥离过程中溶液的极性, 可以发现铋烯的氧化程度随着极性的增加而增加。随着氧化程度的增加, 铋烯的非线性吸收特性由饱和吸收转变为反饱和吸收。这是由于氧化而使铋烯具有了更多的缺陷能级, 缺陷能级能够辅助吸收更多光子, 在氧化程度更大的铋烯中, 反饱和吸收占主导地位。总之, 以上几种方法为日后开发新非线性光吸收特性的可控调谐方法提供了研究基础, 为非线性光学材料拓宽了应用领域。饱和吸收特性和反饱和吸收特性的结合在光二极管、全光并行逻辑门、光开关和光功率限制器等超快非线性光学器件中有着巨大的潜力。

参考文献

- [1] Franken, P.A., Hill, A.E., Peters, C.W., *et al.* (1961) Generation of Optical Harmonics. *Physical Review Letters*, **7**, 118-119. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.7.118>
- [2] Barh, A., Rodrigo, P.J., Meng, L., *et al.* (2019) Parametric Upconversion Imaging and Its Applications. *Advances in Optics and Photonics*, **11**, 952-1019. <https://doi.org/10.1364/AOP.11.000952>
- [3] Zhao, C., Wang, Z., Liu, G., *et al.* (2023) Infrared Saturable Absorption Properties of Tungstenene Nanosheets for Passively Q-Switched 1.9 μM Solid-State Laser. *ACS Applied Nano Materials*, **6**, 19499-19507. <https://doi.org/10.1021/acsanm.3c04423>
- [4] Chen, L., Wu, C., Xie, Z., *et al.* (2021) Size-Dependent Nonlinear Optical Properties of $\text{Gd}_2\text{O}_3:\text{Tb}^{3+}$ Scintillators and Their Doped Gel Glasses. *Molecules*, **27**, Article 85. <https://doi.org/10.3390/molecules27010085>
- [5] Yang, Q.Q., Liu, R.T., Huang, C., *et al.* (2018) 2D Bismuthene Fabricated via Acid-Intercalated Exfoliation Showing Strong Nonlinear Near-Infrared Responses for Mode-Locking Lasers. *Nanoscale*, **10**, 21106-21115. <https://doi.org/10.1039/C8NR06797J>
- [6] Navarro, A., Pava-Chipol, J., Martínez-González, C.L., *et al.* (2017) Acoustically-Controlled Optical Kerr Effect Signals in Bimetallic Au-Pt Nanoparticles Embedded in a TiO_2 Thin Film. *Optik*, **130**, 24-31. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.11.042>
- [7] Basyouni, O.H., Abdelfatah, M., El-Khouly, M.E., *et al.* (2021) Facile and Environmentally Friendly Fabrication of Few-Layer Bismuthene by Electrochemical Exfoliation Method for Ultrafast Photonic Applications. *Journal of Alloys and Compounds*, **882**, Article 160766. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160766>
- [8] Cihan, C., Kocabas, C., Demirbas, U., *et al.* (2018) Graphene Mode-Locked Femtosecond Alexandrite Laser. *Optics Letters*, **43**, 3969-3972. <https://doi.org/10.1364/OL.43.003969>
- [9] Wang, Y., Zhang, B., Yang, H., *et al.* (2019) Passively Mode-Locked Solid-State Laser with Absorption Tunable Graphene Saturable Absorber Mirror. *Journal of Lightwave Technology*, **37**, 2927-2931. <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2907654>
- [10] Wang, C., Li, F., Xu, Y., *et al.* (2021) Tin Selenide: A Promising Black-Phosphorus-Analogue Nonlinear Optical Material and Its Application as All-Optical Switcher and All-Optical Logic Gate. *Materials Today Physics*, **21**, Article 100500. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2021.100500>
- [11] Jin, X., Hu, G., Zhang, M., *et al.* (2018) 102 fs Pulse Generation from a Long-Term Stable, Inkjet-Printed Black Phosphorus-Mode-Locked Fiber Laser. *Optics Express*, **26**, Article 12506. <https://doi.org/10.1364/OE.26.012506>
- [12] Zhang, Q., Jin, X., Hu, G., *et al.* (2020) Sub-150 fs Dispersion-Managed Soliton Generation from an All-Fiber Tm-Doped Laser with BP-SA. *Optics Express*, **28**, Article 34104. <https://doi.org/10.1364/OE.403530>
- [13] Lin, H.F., Liu, Z.C., Mu, R.Z., *et al.* (2023) Efficient MoS_2 -Based Passively Q-Switched Nd:GGG Laser at 1.4 μM under in Band Pumping. *Optical Review*, **30**, 537-542. <https://doi.org/10.1007/s10043-023-00836-6>
- [14] Rechtsman, M.C., Zeuner, J.M., Plotnik, Y., *et al.* (2013) Photonic Floquet Topological Insulators. *Nature*, **496**, 196-200. <https://doi.org/10.1038/nature12066>
- [15] Roy, S. and Yadav, C. (2013) Femtosecond All-Optical Parallel Logic Gates Based on Tunable Saturable to Reverse Saturable Absorption in Graphene-Oxide Thin Films. *Applied Physics Letters*, **103**, Article 241113. <https://doi.org/10.1063/1.4846535>
- [16] Anand, B., Podila, R., Lingam, K., *et al.* (2013) Optical Diode Action from Axially Asymmetric Nonlinearity in an All-Carbon Solid-State Device. *Nano Letters*, **13**, 5771-5776. <https://doi.org/10.1021/nl403366d>
- [17] Zhao, C., Zhang, H., Qi, X., *et al.* (2012) Ultra-Short Pulse Generation by a Topological Insulator Based Saturable

- Absorber. *Applied Physics Letters*, **101**, Article 211106. <https://doi.org/10.1063/1.4767919>
- [18] Zhao, C., Zou, Y., Chen, Y., *et al.* (2012) Wavelength-Tunable Picosecond Soliton Fiber Laser with Topological Insulator: Bi₂Se₃ as a Mode Locker. *Optics Express*, **20**, Article 27888. <https://doi.org/10.1364/OE.20.027888>
- [19] Guo, B., Xiao, Q., Wang, S., *et al.* (2019) 2D Layered Materials: Synthesis, Nonlinear Optical Properties, and Device Applications. *Laser & Photonics Reviews*, **13**, Article 1800327. <https://doi.org/10.1002/lpor.201800327>
- [20] Zhang, L., Fahad, S., Wu, H.R., *et al.* (2020) Tunable Nonlinear Optical Responses and Carrier Dynamics of Two-Dimensional Antimonene Nanosheets. *Nanoscale Horizons*, **5**, 1420-1429. <https://doi.org/10.1039/D0NH00262C>
- [21] Zhou, K.G., Zhao, M., Chang, M.J., *et al.* (2015) Size-Dependent Nonlinear Optical Properties of Atomically Thin Transition Metal Dichalcogenide Nanosheets. *Small*, **11**, 694-701. <https://doi.org/10.1002/sml.201400541>
- [22] Dadhich, B.K., Bhattacharya, S., Ballav, S., *et al.* (2020) Femtosecond-Laser-Induced Saturable Absorption and Optical Limiting of Hollow Silver Nanocubes: Implications for Optical Switching and Bioimaging. *ACS Applied Nano Materials*, **3**, 11620-11629. <https://doi.org/10.1021/acsanm.0c02776>
- [23] Ma, Y.J., Oh, J.I., Zheng, D.Q., *et al.* (2011) Tunable Nonlinear Absorption of Hydrogenated Nanocrystalline Silicon. *Optics Letters*, **36**, 3431-3433. <https://doi.org/10.1364/OL.36.003431>
- [24] Ahn, H., Lee, M.T. and Chang, Y.M. (2014) Spectral Dependence of Third-Order Nonlinear Optical Properties in InN. *Applied Physics Letters*, **104**, Article 201904. <https://doi.org/10.1063/1.4878618>
- [25] Xiao, S., Fan, Q., Ma, Y., *et al.* (2019) Reversal in Optical Nonlinearities of Bi₂Se₃ Nanosheets Dispersion Influenced by Resonance Absorption. *Optics Express*, **27**, 21741-21749. <https://doi.org/10.1364/OE.27.021741>
- [26] Acharyya, J.N., Desai, N.R., Gangineni, R.B., *et al.* (2022) Effect of Photonic Cavity Interactions on Femtosecond Multiphoton Optical Nonlinear Absorptions from Bi₂O₃-Based One-Dimensional Photonic Crystal. *ACS Photonics*, **9**, 2092-2100. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.2c00326>
- [27] Xiao, X., Zhu, H., Wang, C., *et al.* (2022) Saturable Absorption and Reverse Saturable Absorption of CdGa₂Se₄ Nanoparticles Determined by Bond Strength. *Physics Letters A*, **449**, Article 128354. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2022.128354>
- [28] Li, S., Zhong, X.L., Cheng, G.H., *et al.* (2015) Nonlinear Optical Absorption Tuning in Bi_{3.15}Nd_{0.85}Ti₃O₁₂ Ferroelectric Thin Films by Thickness. *Applied Physics Letters*, **106**, Article 142904. <https://doi.org/10.1063/1.4917223>
- [29] Wang, J., Jin, F., Cao, X., *et al.* (2016) In₂Te₃ Thin Films: A Promising Nonlinear Optical Material with Tunable Nonlinear Absorption Response. *RSC Advances*, **6**, 103357-103363. <https://doi.org/10.1039/C6RA17352G>
- [30] Sun, B., Zhang, Y., Zhang, R., *et al.* (2017) High-Order Nonlinear Optical Properties Generated by Different Electron Transition Processes of NiO Nanosheets and Applications to Ultrafast Lasers. *Advanced Optical Materials*, **5**, Article 1600937. <https://doi.org/10.1002/adom.201600937>
- [31] Zhang, P., Zhang, X., Xu, J., *et al.* (2014) Tunable Nonlinear Optical Properties in Nanocrystalline Si/SiO₂ Multilayers under Femtosecond Excitation. *Nanoscale Research Letters*, **9**, Article No. 28. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-28>
- [32] Liu, C., Yuan, Y., Cheng, L., *et al.* (2019) Tunable Nonlinear Optical Absorption in Amorphous and Crystalline Sb₂Se₃ Thin Films. *Journal of Alloys and Compounds*, **791**, 753-760. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.03.295>
- [33] Ouyang, Q., Yu, H., Zhang, K., *et al.* (2014) Saturable Absorption and The Changeover from Saturable Absorption to Reverse Saturable Absorption of MoS₂ Nanoflake Array Films. *Journal of Materials Chemistry C*, **2**, 6319-6325. <https://doi.org/10.1039/C4TC00909F>
- [34] Zheng, X., Chen, R., Shi, G., *et al.* (2015) Characterization of Nonlinear Properties of Black Phosphorus Nanoplatelets with Femtosecond Pulsed Z-Scan Measurements. *Optics Letters*, **40**, 3480-3483. <https://doi.org/10.1364/OL.40.003480>
- [35] Tong, Q., Wang, Y.H., Yu, X.X., *et al.* (2018) Nonlinear Optical and Multi-Photon Absorption Properties in Graphene-ZnO Nanocomposites. *Nanotechnology*, **29**, 165706. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aaac13>
- [36] Ma, H., Zhao, Y., Shao, Y., *et al.* (2021) Principles to Tailor the Saturable and Reverse Saturable Absorption of Epsilon-Near-Zero Material. *Photonics Research*, **9**, 678-686. <https://doi.org/10.1364/PRJ.417642>
- [37] Zhang, P., Li, S., Li, D., *et al.* (2023) Quantum Size-Dependent Luminescence and Nonlinear Optical Properties of Silicon Quantum Dots/SiO₂ Multilayer. *Optics & Laser Technology*, **157**, Article 108706. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108706>
- [38] Maurya, S.K., Ganeev, R.A., Rout, A., *et al.* (2019) Influence of PVP Polymer Concentration on Nonlinear Absorption in Silver Nanoparticles at Resonant Excitation. *Applied Physics A*, **126**, Article No. 26. <https://doi.org/10.1007/s00339-019-3208-2>
- [39] Gao, Y., Hu, Y., Rui, G., *et al.* (2022) Tunable Absorptive Nonlinearities of Silver-Modified Few-Layer Black Phosphorous Nanocomposites. *Optik*, **259**, Article 168969. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.168969>