

低维Bi₂Se₃材料光电领域应用的研究进展

相婉亭, 房丹*, 方铉, 王登魁, 闫昊, 王勇, 范杰, 邹永刚, 王晓华*

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2025年4月4日; 录用日期: 2025年5月19日; 发布日期: 2025年5月27日

摘要

Bi₂Se₃作为一种典型的拓扑绝缘体材料, 具有独特的晶体结构和优异的光电特性, 与传统导体和绝缘体不同, Bi₂Se₃在强自旋轨道耦合作用下, 其表面存在特殊的量子态, 不同自旋的电子呈反向运动, 在众多材料中脱颖而出, 近年来已成为新型光电材料领域的研究热点, 广泛应用于光电探测、太阳能电池等众多光电子领域, 因此对Bi₂Se₃的光电特性进行深入探究具有重要意义, 基于此本文综述了Bi₂Se₃材料在光电领域的研究进展, 详细阐述了其在光电探测器、太阳能电池、非线性光学和自旋光电子学四个层面所展现的独特性能, 并对未来Bi₂Se₃在光电子领域的应用与研究进行了展望。

关键词

Bi₂Se₃, 光电特性, 探测器

Research Progress on Optoelectronic Properties of Bi₂Se₃ Materials

Wanting Xiang, Dan Fang*, Xuan Fang, Dengkui Wang, Hao Yan, Yong Wang, Jie Fan, Yonggang Zou, Xiaohua Wang*

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

Received: Apr. 4th, 2025; accepted: May 19th, 2025; published: May 27th, 2025

Abstract

As a typical topological insulator material, Bi₂Se₃ has a unique crystal structure and excellent optoelectronic properties, different from traditional conductors and insulators, Bi₂Se₃ has a special quantum state on its surface under the strong spin-orbit coupling, and the electrons of different spins are in reverse motion, which stands out among many materials, and in recent years, it has become a research hotspot in the field of new optoelectronic materials, and is widely used in many optoelectronic fields such as photoelectric detection and solar cells. Therefore, it is of great signifi-

*通讯作者。

cance to conduct an in-depth exploration of the photoelectric characteristics of Bi_2Se_3 . In this paper, the research progress of Bi_2Se_3 materials in the field of optoelectronics is reviewed, and its unique properties in photodetectors, solar cells, nonlinear optics and spin optoelectronics are elaborated, and the future application and research of Bi_2Se_3 in the field of optoelectronics are prospected.

Keywords

Bi_2Se_3 , Optoelectronic Characteristics, Detectors

Copyright © 2025 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

在当今快速发展的光电技术领域，新型材料的探索与应用始终是推动科技进步的关键动力。近年来，随着对半导体二维材料研究的不断深入， Bi_2Se_3 作为一种具有独特物理特性的材料，逐渐成为研究人员关注的焦点。不仅因其拓扑绝缘体的特性在基础物理研究中占据重要地位，更因其优异的光电性能在光电领域展现出巨大的应用潜力[1]-[4]。 Bi_2Se_3 在外观上呈黑色结晶状，由V、VI族元素组成，熔点为710°C，具有传统的规则六角晶体结构，分子密度为6.82 g/cm³，属于铋系硫属化合物中的其中一种，具有0.3 eV的带隙，空间群为 D^5_{3d} 。其独特的电子结构和带隙特性以及对宽波段光信号的灵敏响应，使其在高性能光电探测器的开发中备受青睐。因此探究 Bi_2Se_3 材料在光电领域的应用与研究方法具有重要意义。本文首先对 Bi_2Se_3 材料在光电领域的研究进展展开深入讨论，通过讨论分析，提出可以提升 Bi_2Se_3 材料光电性能的几种方法，并对 Bi_2Se_3 材料未来在光电领域的研究进行展望。

2. Bi_2Se_3 材料光电特性研究进展

2.1. 引言

近年来，对 Bi_2Se_3 材料在光电领域的研究取得了重要进展[5]-[8]，本章节将分别介绍 Bi_2Se_3 材料在光电探测器、太阳能电池、非线性光学、自旋光电子学以上四个领域进行阐述。

2.2. 光电探测器

2016年Zhang等人报道了关于 Bi_2Se_3 硅异质结构宽带光电探测器的研究，器件光电流随光强增加而显著增加，光谱响应范围从紫外到近红外。并且在光开关下表现出良好的稳定性和可重复性，光电流开关比高达 1.55×10^5 。器件对脉冲光的响应速度非常快，上升时间为2.5 μs，下降时间为5.5 μs。光响应度最高达到24.28 A/W，探测率最高达到 4.39×10^{12} Jones。由于 Bi_2Se_3 /硅异质结构在界面处形成了一个内建电场，这个电场可以有效分离光生电子-空穴对，减少载流子的复合，从而提高器件的光响应度。并且 Bi_2Se_3 /硅异质结构具有特殊界面，有助于载流子的高效传输[9]。

2018年Wang等人报道了关于高质量二维 Bi_2Se_3 薄片的制备及其在红外探测中的应用研究，通过实验成功合成了亚毫米级别的 Bi_2Se_3 薄片，横向尺寸为0.2~0.4 μm，厚度最薄达到3 nm。为了研究制备的 Bi_2Se_3 薄片光电性能，设计了一种新型光通信波段光电探测器如图1(a~b)所示，采用波长为1456 nm的激光光源对制备的探测器进行测试，图1(c)给出了在黑暗条件下和功率密度为142.93 mW/cm²的激光照射下，探测器的I-V特性曲线，并通过在1 V的偏压下每20秒打开、关闭一次激光器光源手动测量了探测

器的时间响应如图 1(d)所示, 图 1(d)中插图给出了器件的一个光响应周期, 探测器上升时间和衰减时间分别为 0.54 秒和 0.52 秒, 计算了探测器的探测率为 3.3×10^{10} Jones。测试结果表明制备的 Bi_2Se_3 器件可以在激光器打开和关闭的情况下实现高导通和低导通状态之间的可逆转换, 并且在每个光响应周期之间偏差很小, 证明了光电探测器的高稳定性和可重复性。

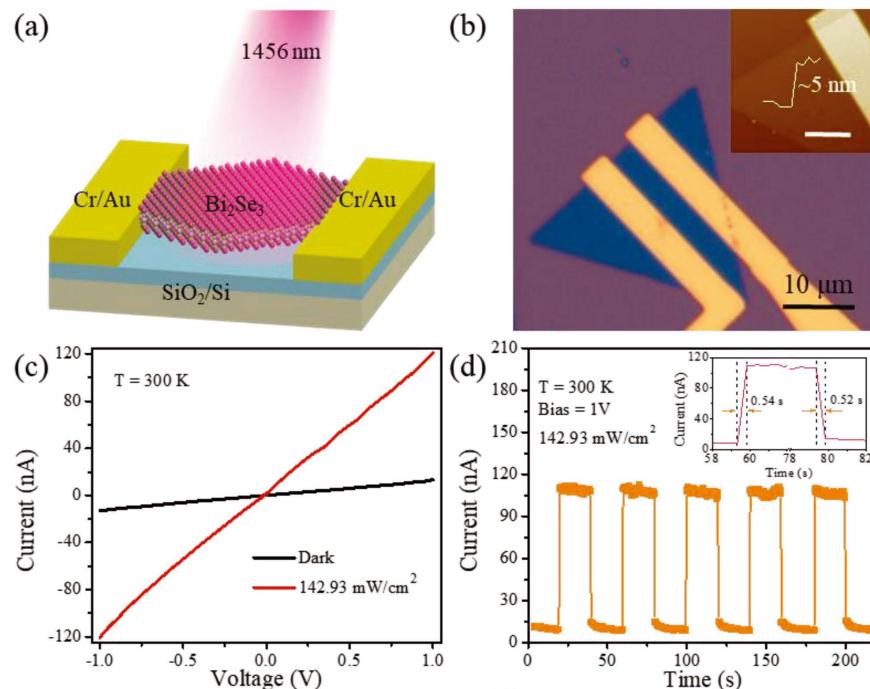


Figure 1. (a) Schematic diagram of the Bi_2Se_3 photodetector; (b) OM image of the detector; (c) Detector I-V curve; (d) Detector I-t curve [10]

图 1. (a) Bi_2Se_3 光电探测器示意图、(b) 探测器 OM 图像、(c) 探测器 I-V 曲线、(d) 探测器 I-t 曲线[10]

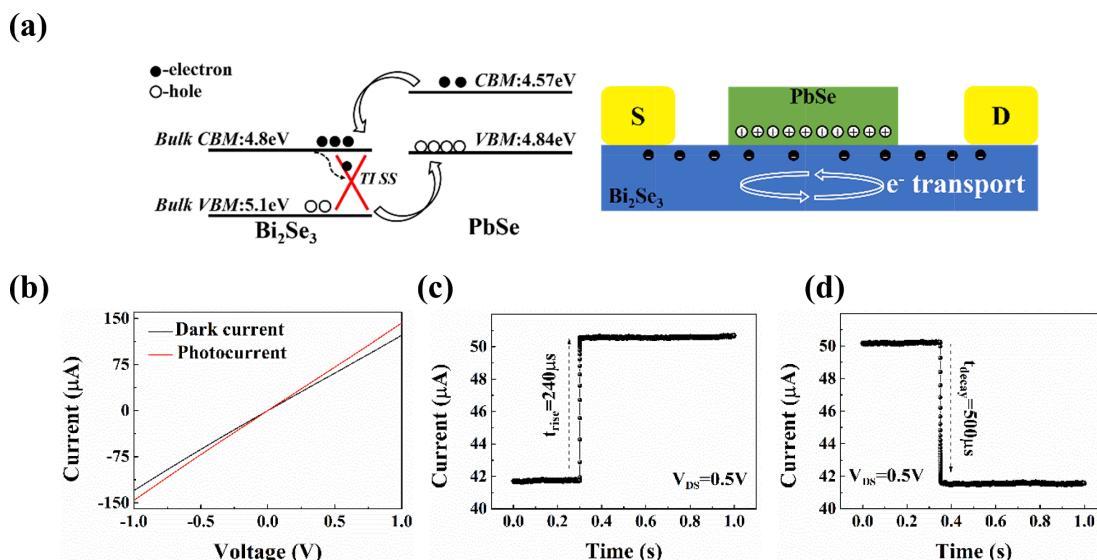


Figure 2. (a) Schematic diagram of the band arrangement of the Bi_2Se_3 - PbSe heterojunction and Preparation of process diagrams; (b) Detector I-V characteristic curves; (c-d) Detector I-t rise and fall curves [11]

图 2. (a) Bi_2Se_3 - PbSe 异质结能带排列和光沉积过程示意图、(b) 探测器 I-V 特性曲线、(c-d) 探测器 I-t 上升、下降曲线[11]

2022 年 Ren 等人报道了基于 Bi_2Se_3 -PbSe 异质结的高性能红外光探测器的研究，通过制造一种基于光栅效应的 Bi_2Se_3 -PbSe 异质结光电探测器，如图 2(a)给出了异质结能带排列和载流子运输机制，在间隙宽度相似的情况下，光生 EHP 同时被 Bi_2Se_3 和 PbSe 中的入射红外光子激发。在界面势垒内建电场的驱动下，PbSe 中电子转移到 Bi_2Se_3 ，而 Bi_2Se_3 中的空穴注入 PbSe，实现了光生 EHP 的空间分离以及 Bi_2Se_3 -PbSe 异质界面不同侧相反光载流子的积累，从而有效抑制了 Bi_2Se_3 中光生载流子的快速复合。由于其表面态诱导的快速电荷输运通道，这些电子可以在 Bi_2Se_3 通道中再循环多次。即使在单个光子的激发下，电极也会收集到多个载流子。因此使其具有优异的光敏性。如图 2(b)给出了在黑暗条件和光照下探测器的 I-V 特性曲线， Bi_2Se_3 -PbSe 器件表现出欧姆特性。在偏压为 0.5 V 下的时间响应曲线如图 2(c~d)所示，上升时间和下降时间为 $240 \mu\text{s}$ 和 $500 \mu\text{s}$ ，并且计算得出探测器的响应率为 31.4 A/W ，这些测试结果表明所制备的 Bi_2Se_3 /PbSe 光栅探测器具有快速响应。

2023 年 Cho 等人报道了高质量 Bi_2Se_3 薄膜的制备以及其在红外光探测器中的应用研究。分别在图案化蓝宝石衬底(PSS)上生长了 Bi_2Se_3 薄膜和在平面 Al_2O_3 衬底上生长了 Bi_2Se_3 薄膜，并制备出基于两种不同条件下制备的 Bi_2Se_3 光电探测器，使用红外激光照射对制备的器件性能进行测试。如图 3 所示对两组器件进行了 I-t 测试，以 5 秒的间隔打开、关闭红外激光束。观察到在相同条件下， Bi_2Se_3 /PSS 的光电流比 $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的光电流高约 45 倍。 $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{PSS}$ 器件表现出更快的光开关特性，上升时间 $\tau_r = 26.0 \text{ ms}$ ，下降时间 $\tau_f = 47.0 \text{ ms}$ ，与 $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 器件相比， $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{PSS}$ 光电流明显更高，光开关速度更快，稳定性更高。这种光开关特性是由于 $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{PSS}$ ($\mu = 1.270 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$) 和 $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ($\mu = 6.049 \times 10^1 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$) 之间的霍尔迁移率差异造成的。此外，所制备的器件即使在连续切换后依然性能稳定，这是由于其相对平滑的光生载流子分离和传输，显示出高可靠性。通过 ELOG 机制减少晶格失配引起的晶体缺陷，从而提高了 PSS 上形成的 Bi_2Se_3 层的高结晶度。

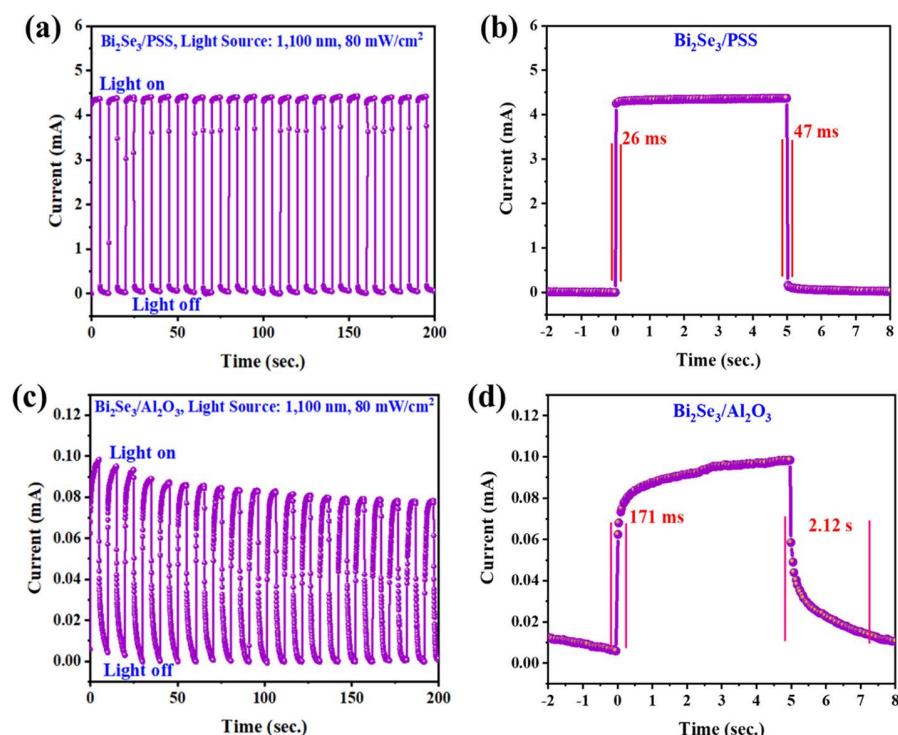


Figure 3. I-t characteristic curves of (a~b) $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ detector、(c~d) $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{PSS}$ detector under 1100 nm light source [12]

图 3. 1100 nm 光源下(a~b) $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 探测器，(c~d) $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{PSS}$ 探测器 I-t 特性曲线[12]

2.3. 太阳能电池

2022 年 Mendhea 等人报道了一篇通过在 CdS 纳米线上装饰 Bi_2Se_3 纳米颗粒，构建核壳结构，并应用于光电化学太阳能电池的研究。如图 4(a)给出了核壳纳米异质结构形成的器件结构示意图。研究人员通过在 CdS 纳米线上沉积 Bi_2Se_3 纳米颗粒，显著提高了太阳能电池的光电转换效率。如图 4(b~c)给出了 CdS 纳米线器件和在 CdS 纳米线沉积 Bi_2Se_3 纳米颗粒后的器件在黑暗条件下和模拟阳光下光电流密度 - 电压特性曲线(J-V)、外部量子效率(EQE)曲线，在黑暗条件下，所制备的器件显示出标准的二极管特性，整个化学制备的光阳极在模拟阳光照射下对光电压做出响应，从根本上说是平衡的载流子复合条件以及光负极与电解质反应机理界面，与光激发电荷载流子的形成直接相关。与 CdS 纳米线相比，经过 15 次循环优化后的 CdS 纳米线/ Bi_2Se_3 纳米颗粒的器件 EQE 提高至 19.68%，光电流密度为 1.72 mA/cm^2 。 Bi_2Se_3 纳米颗粒在 CdS 纳米线上集成后器件的增强可能是由于吸收边的增加以及在其界面上获得良好的异质结，从而增强了生成的电子 - 空穴对的收集。电流密度的增加是由于电子 - 空穴复合可能性低，导致界面电子转移和电子注入快速。

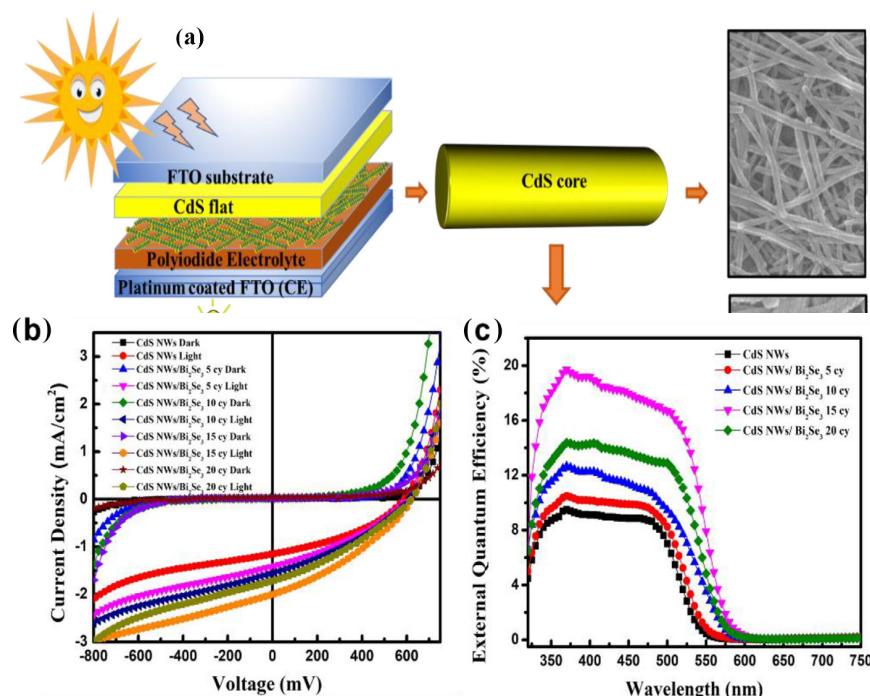


Figure 4. (a) Schematic diagram of the structure of the core-shell nano heterostructure device; (b) J-V characteristic curve of the device; (c) External quantum efficiency of CdS nanowires and CdS nanowires/ Bi_2Se_3 after different cycle optimization [13]

图 4.(a) 核壳纳米异质结构器件结构示意图、(b) 器件 J-V 特性曲线、(c) 不同循环优化后 CdS 纳米线、CdS 纳米线/ Bi_2Se_3 外部量子效率[13]

2023 年 Abdolhay 等人报道了一篇关于 $\text{Cu}/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 核壳纳米结构对钙钛矿太阳能电池光学性能的影响。通过数值模拟，在钙钛矿太阳能电池吸收层中引入 $\text{Cu}/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 核壳纳米结构，研究了不同参数(如 Cu 纳米球半径、 Bi_2Se_3 壳厚度、纳米球周期性排列和吸收层厚度)对光吸收和光谱响应的影响。如图 5(a-b) 分别给出了未涂覆的 Cu 纳米结构、涂覆了 35 nm 的 Bi_2Se_3 的 $\text{Cu}/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 纳米结构的钙钛矿太阳能电池消光、散射和吸收截面光谱与波长关系曲线，从图 5(a)可以得出，在波长 300 nm~600 nm 处可以发现两个消光峰，峰值集中在 332 nm 和 542 nm 处，这是由于等离子体与带间跃迁阈值重叠以及 Cu-NS 的局域表

面等离子体共振引起的。从图 5(b)可以得到与 Cu 纳米结构相比, 峰的位置蓝移了 6.8 nm (从 530.881 nm 到 524.102 nm), 消光截面提高了约 3.5 倍, 这是由于金属核与壳相互作用, 共振波长和消光截面峰值随着壳厚度的增加而变化。Cu/Bi₂Se₃ 核壳结构不仅提高了光吸收效率, 还提高了纳米结构的稳定性。

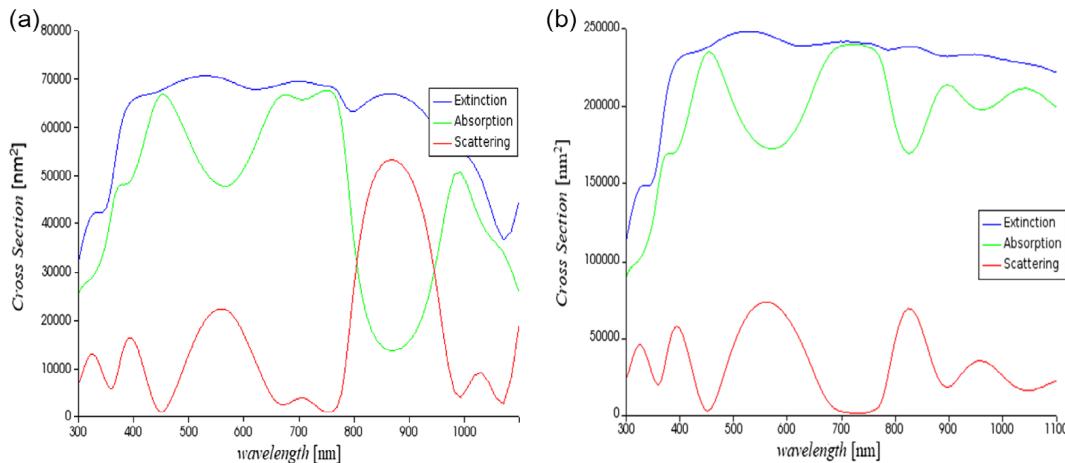


Figure 5. (a) Cu nanostructure, (b) Cu/Bi₂Se₃ nanostructure perovskite solar cell extinction, absorption, scattering cross section and wavelength curve [13]

图 5. (a) Cu 纳米结构、(b) Cu/Bi₂Se₃ 纳米结构太阳能电池消光、吸收、散射截面与波长曲线图[13]

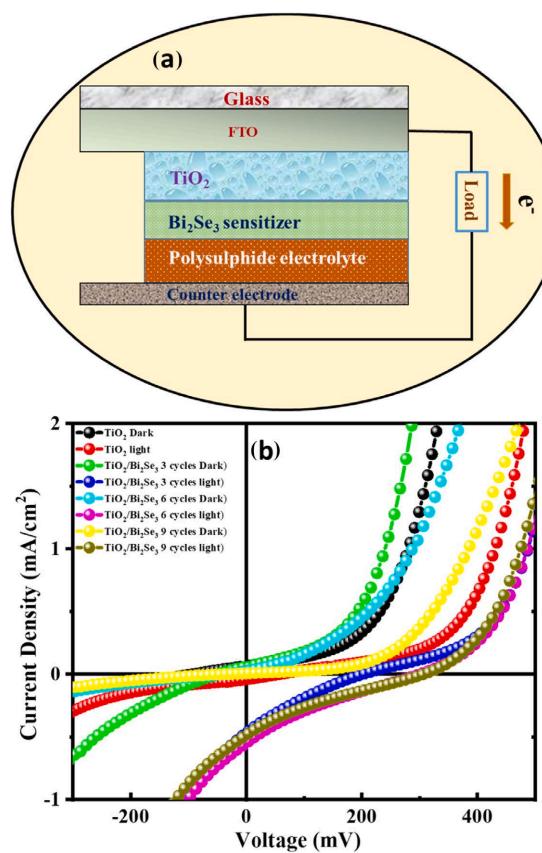


Figure 6. (a) Schematic diagram of solar cell device fabrication; (b) J-V characteristic curves of ion layer adsorption deposition devices with different orders [14]

图 6. (a) 太阳能电池器件制造示意图; (b) 不同次数离子层吸附沉积器件 J-V 特性曲线[14]

2025 年 Baviskar 等人报道了一种新型基于 Bi_2Se_3 纳米颗粒的第三代极薄吸收体太阳能电池的研究。通过在 TiO_2 上沉积 Bi_2Se_3 纳米颗粒，探索了这种异质结构对光电化学(PEC)性能的影响。如图 6(a)给出了制备的太阳能电池器件结构示意图，图 6(b)给出了在黑暗条件下和光源照射下，器件的电流密度 - 电压(J-V)特性曲线，可以看出在黑暗条件下，J-V 特性曲线没有表现出明显的活性，并清楚地揭示了异质结的形成。 Bi_2Se_3 是敏化剂的理想候选者，它可以增强可见光区域的光捕获能力，并显著提高整个区域的电子空穴对的产生在光源照射下。FTO/ TiO_2 光阳极的 J-V 特性曲线的光电流很小，对于 3 次、6 次、9 次离子层吸附循环沉积器件光转换效率分别为 0.038%、0.057%、0.063%。9 次循环沉积的器件具有更好的光电转换效率，但开路电压略有降低。由于填充有 TiO_2 多孔体的 Bi_2Se_3 纳米颗粒的聚结增加，开路电压的降低不仅阻断了多孔结构内液体电解质的接触，还减少了光电极的总表面积。

2.4. 非线性光学

2023 年 Xing 等人报道了一篇基于 Bi_2Se_3 薄膜的高损伤阈值器件的制备及其在光纤激光器中的应用研究。如图 7 给出了厚度为 100 nm 和 200 nm 的 Bi_2Se_3 薄膜非线性光学特性曲线。发现 100 nm 厚的 Bi_2Se_3 薄膜的调制深度为 46.5%，饱和光强度达到 1.38 MW/cm^2 ，非饱和损耗仅为 3.86%，200 nm 厚的 Bi_2Se_3 薄膜的调制深度为 21.06%，饱和强度为 1.98 MW/cm^2 ，非饱和损耗仅为 4.09%。在饱和条件下测量两个 Bi_2Se_3 薄膜的 SA 器件的插入损耗，得到插入损耗分别为 0.1709 dB 和 0.1813 dB。这与晶体的透光率随着晶体厚度的增加而降低的理论相一致。这种高透过率特性显著减少了激光与材料相互作用时的能量损失，从而提高了激光器的能量转换效率。高透过率还意味着材料在高能量激光照射下产生的热量更少，从而显著提高了材料的损伤阈值。这一特性使得 Bi_2Se_3 薄膜能够在锁模光纤激光器中高效地调制激光脉冲，实现稳定的锁模状态。

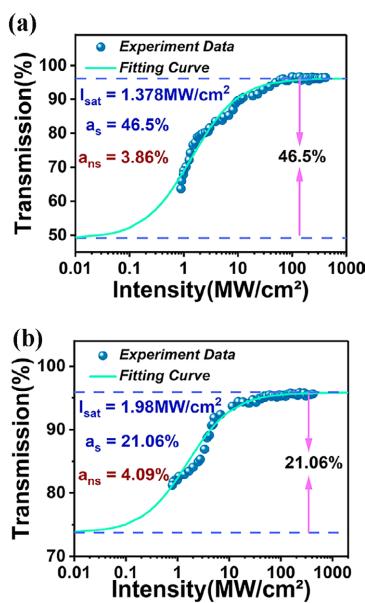


Figure 7. Nonlinear optical characteristics curves of 100 nm

and 200 nm Bi_2Se_3 films [15]

图 7. 100 nm、200 nm Bi_2Se_3 薄膜非线性光学特性曲线[15]

2023 年 Karimbana-Kandy 等人报道了一篇关于 Bi_2Se_3 薄膜的厚度依赖性三阶非线性光学特性的研究，并通过实验优化其在不同波长下的光学非线性行为。研究结果表明， Bi_2Se_3 薄膜的非线性光学性能与

其厚度以及退火温度密切相关，且在特定厚度下表现出显著的饱和吸收特性。在 515 nm 激发波长和 1030 nm 激发波长下的最大非线性吸收系数分别为 -5.01×10^{-7} m/W 和 -2.12×10^{-7} m/W。如图 8(a~b) 给出了不同退火温度下厚度均为 30 nm 的 Bi₂Se₃ 薄膜开孔 Z 扫描曲线和非线性吸收系数，可以发现 Bi₂Se₃ 薄膜的非线性光学性能随着退火温度的升高而增加，在退火温度在 190°C 左右结晶的情况下达到最大值。当结晶温度升高到 200°C 以上时，非线性光学响应有所减弱，这是因为在高于 200°C 的温度下退火时薄膜表面开始劣化。

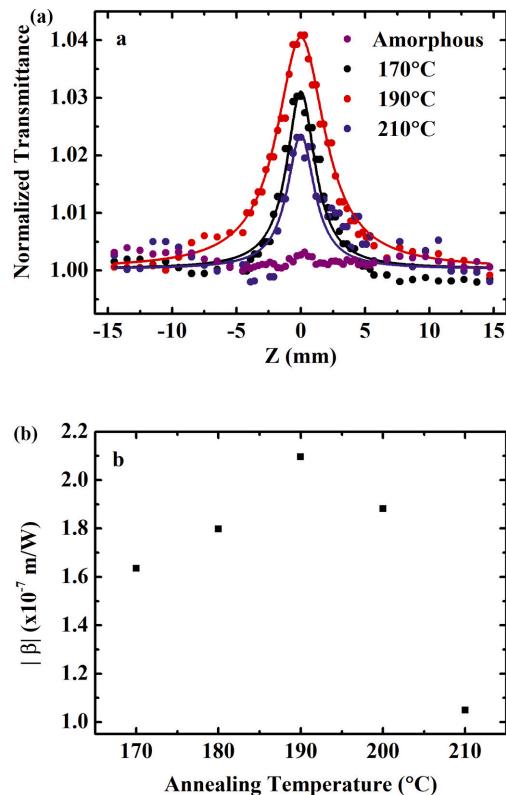


Figure 8. The nonlinear absorption coefficient of Bi₂Se₃ films with different annealing temperatures (a) and open-pore Z-scan curves (b) Nonlinear absorption coefficient [16]
图 8. 不同退火温度 Bi₂Se₃ 薄膜(a) 开孔 Z 扫描曲线；(b) 非线性吸收系数[16]

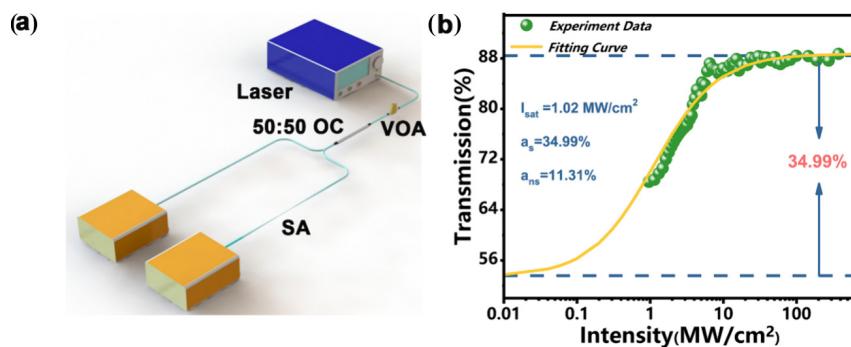


Figure 9. (a) Diagram of test setup, (b) Characterization of nonlinear optical properties of Bi₂Se₃/SA [17]
图 9. (a) 测试装置图、(b) Bi₂Se₃/SA 非线性光学特性表征图[17]

2024 年 Jiang 等人报道了一篇关于 Bi₂Se₃、Bi₂Te₃ 和 BiSbTeSe₂ 的非线性光学特性及其在超快脉冲激

光中的应用研究。通过制备光电调制器件，比较了材料的非线性光学特性。在该研究中使用自制的 1550 nm、250 fs、75 MHz 激光器作为检测激光源，测试装置图如图 9(a)所示，图 9(b)可以发现 Bi_2Se_3 的调制深度为 34.99%，饱和光强度达到 1.02 MW/cm^2 ，非饱和损耗仅为 11.31%，这些测试结果表明 Bi_2Se_3 具有显著的非线性吸收能力以及较低的固有吸收损耗，有助于提高器件的能量效率和损伤阈值。并且在光纤激光器中，基于 Bi_2Se_3 的可饱和吸收体(SA)实现了 221 fs 的超短脉冲宽度和 70.3 dBm 的高信噪比，最大输出功率达到 30.1 mW。

2.5. 自旋光电子学

2018 年 Yu 等人报道了关于拓扑绝缘体 Bi_2Se_3 中由线偏振光诱导的逆自旋霍尔效应的研究，并探讨了其在不同温度下的特性。使用波长 1064 nm、功率 250 mW 的激光器作为光源，通过半波片调整光的偏振方向，垂直照射样品。光电流通过两个 Ti/Au 欧姆接触收集，通过改变光斑位置和偏振角度，测量不同条件下的光电流，并分析其与偏振角度的依赖关系。结果表明，ALPGE 电流与光斑位置的依赖关系呈正弦分布，而 ISHE 电流则表现出余弦分布。在低温下，ISHE 电流的变化与杂质和缺陷有关，这些杂质和缺陷对自旋轨道耦合有显著影响。随着温度的升高，光诱导的动量各向异性增强，而自旋横向力和 LPGE 电流则表现出先增加后减少的趋势。通过归一化处理，发现自旋横向力随温度线性减少，而 LPGE 电流的变化则更为复杂，可能与高温下的库仑杂质或声子散射有关。如图 10(a~b)给出了在 77 K 温度下 Bi_2Se_3 中 L_1 、 L_2 分量的空间分布图(其中实线为根据方程拟合结果，圆圈为实验数据)。

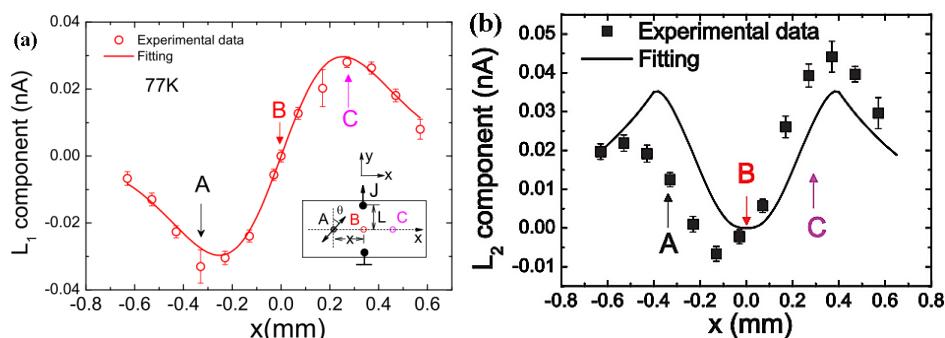


Figure 10. Spatial distribution of (a) L_1 , (b) L_2 components in Bi_2Se_3 at 77 K [18]

图 10. 77 K 温度下 Bi_2Se_3 中(a) L_1 、(b) L_2 分量的空间分布[18]

2021 年 Meyer 等人报道了关于金属接触对拓扑绝缘体 Bi_2Se_3 纳米线中自旋极化光电流的影响。如图 11 给出了接触处自旋累积的两步过程。描绘了自旋极化电子的偏转以及左右接触边缘的不对称性。采用波长为 785 nm 的二极管激光器，通过线性偏振器和可旋转四分之一波片控制光的偏振态，激光以 45° 入射角照射样品表面。采用锁相技术测量光电流，通过改变波片的旋转角度(从 0° 到 360° ，步长为 6°)来扫描样品表面，并记录不同偏振态下的光电流和反射光强度。结果表明在金属接触附近，自旋极化电流显著增强，并在接触边缘附近达到极值。这种增强可能与自旋 Nernst 效应有关，即横向温度梯度导致自旋相反的电子分离。通过改变金属接触的几何形状和位置，可以调控自旋极化电流的分布和强度。

2023 年 Hua 等人报道了关于拓扑绝缘体 Bi_2Se_3 中的自旋极化光电流及其在电场调控下行为的研究。通过使用 405 nm 激光以 35° 入射角斜向照射 Bi_2Se_3 器件，旋转四分之一波片调整光的偏振态，测量不同偏振下的光电流。结果表明在无外加偏压的情况下， Bi_2Se_3 表面态的光电流表现出明显的偏振依赖性，符合 CPGE 的特征。光电流随四分之一波片角度 α 的变化呈现周期性变化，说明自旋极化电流的存在。在高光子能量激发下，观测到自旋极化电子向其他导带的跃迁，这表明在动量空间中电子的分布受到光偏振

和电场的调控。如图 12(a~b)给出了纵向电场下 CPGE 的能量动量带图, 当施加负栅极电压时, 费米能级会向下移动。在表面态中占据的自旋极化电子的激发率会更高。在正栅极偏压下, 费米能级会上升。更多的体电子驻留在导带中, 这是由于体载流子和激发的自旋向上电子之间的泡利阻塞和散射, 导致自旋极化电子的激发率降低。

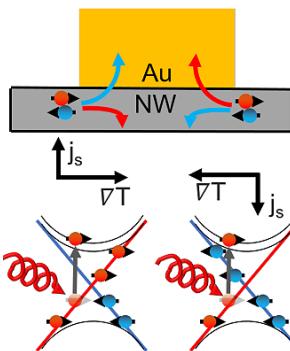


Figure 11. Schematic diagram of the process of spin accumulation [19]

图 11. 自旋累积的过程示意图[19]

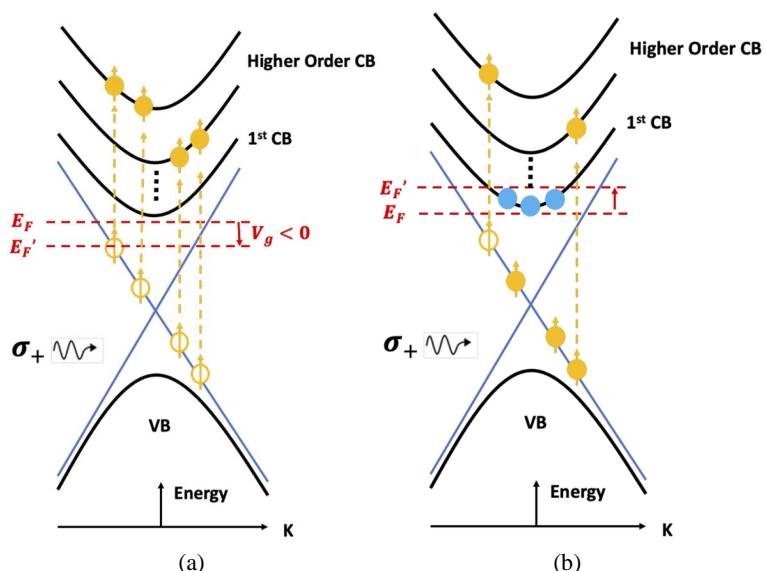


Figure 12. Belt diagram of (a) energy, (b) momentum of CPGE under longitudinal electric field [20]

图 12. 纵向电场下 CPGE (a)能量、(b)动量带图[20]

3. 结论

本文综述了 Bi_2Se_3 材料在光电领域的应用进展, 重点探讨了其在光电探测器、太阳能电池、非线性光学和自旋光电子学中的性能提升方法。例如与单质 Bi_2Se_3 结构光电探测器相比, 可以通过构建 Bi_2Se_3 异质结构光电探测器来提高器件的响应度和探测率, 优化器件响应时间、拓宽器件探测范围等性能; 在太阳能电池研究中, 通过设计 Bi_2Se_3 纳米颗粒核壳结构可显著提高光电转换效率; 在非线性光学研究中, 可以通过在制备 Bi_2Se_3 材料过程中, 调控材料厚度或对 Bi_2Se_3 材料进行后退火处理来提高其非线性光学性能; 最后可以通过引入缺陷或掺杂手段来提高 Bi_2Se_3 材料的自旋光电子学性能。这些研究为 Bi_2Se_3 材

料在新型光电子器件中的应用提供了重要思路和理论基础，通过优化 Bi₂Se₃ 材料电子结构、设计材料器件结构，有助于未来进一步提升 Bi₂Se₃ 材料的光电性能。

参考文献

- [1] Roy, D.P., Zhang, H.K., Ju, J., Gomez-Dans, J.L., Lewis, P.E., Schaaf, C.B., et al. (2016) A General Method to Normalize Landsat Reflectance Data to Nadir BRDF Adjusted Reflectance. *Remote Sensing of Environment*, **176**, 255-271. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.01.023>
- [2] Zhang, J., Zhang, Y., Wu, X., Guan, R., Li, J., Gao, C., et al. (2020) High-Pressure Topological Transport Study of Bi₂Se₃ Single Crystal. *Applied Surface Science*, **507**, Article ID: 145052. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.145052>
- [3] Sharma, S., Kumar, S., Kumar, A., Shimada, K. and Yadav, C.S. (2022) Electronic Transport Studies of Ag-Doped Bi₂Se₃ Topological Insulator. *Journal of Applied Physics*, **132**, Article ID: 105108. <https://doi.org/10.1063/5.0102131>
- [4] Paul, S., Ghosh, J., Hossain, M.T., Hasebe, H., Sugimoto, H., Fujii, M., et al. (2022) Interfacial Charge Transfer Induced Enhanced Near-Infrared Photoluminescence and Enhanced Visible Photodetection in Two-Dimensional/Zero-Dimensional Bi₂Se₃/CsPbBr₂I Heterojunctions with Type-I Band Alignment. *The Journal of Physical Chemistry C*, **126**, 16721-16731. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.2c04160>
- [5] Sharma, A., Bhattacharyya, B., Srivastava, A.K., Senguttuvan, T.D. and Husale, S. (2016) High Performance Broadband Photodetector Using Fabricated Nanowires of Bismuth Selenide. *Scientific Reports*, **6**, Article No. 19138. <https://doi.org/10.1038/srep19138>
- [6] Patel, N.F., Bhakhar, S.A., Jagani, H.S., Solanki, G.K. and Pataniya, P.M. (2023) Synthesis, Characterization and Optoelectronic Application of Bi₂Se₃ Thin Film Prepared by Thermal Evaporation Technique. *Optical Materials*, **136**, Article ID: 113403. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.113403>
- [7] Noureen, S., Rehman, S.U., Batool, S.M., Ali, J., Zhang, Q., Batool, S.S., et al. (2024) Tailoring Bi₂Se₃ Topological Insulator for Visible-Nir Photodetectors with Schottky Contacts Using Liquid Phase Exfoliation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **16**, 8158-8168. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c15315>
- [8] Lin, G., Veeramalai, C.P., Wang, J., Zhou, H., Wang, Y. and Li, C. (2024) Bi₂Se₃ Nanosheets Prepared by Solvothermal Method for High Performance NIR Photodetector. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **694**, Article ID: 134090. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.134090>
- [9] Zhang, H., Zhang, X., Liu, C., Lee, S. and Jie, J. (2016) High-Responsivity, High-Detectivity, Ultrafast Topological Insulator Bi₂Se₃/Silicon Heterostructure Broadband Photodetectors. *ACS Nano*, **10**, 5113-5122. <https://doi.org/10.1021/acsnano.6b00272>
- [10] Wang, F., Li, L., Huang, W., Li, L., Jin, B., Li, H., et al. (2018) Submillimeter 2D Bi₂Se₃ Flakes toward High-Performance Infrared Photodetection at Optical Communication Wavelength. *Advanced Functional Materials*, **28**, Article ID: 1802707. <https://doi.org/10.1002/adfm.201802707>
- [11] Ren, Y., Li, Y., Li, W., Zhao, S., Chen, H. and Liu, X. (2022) High Sensitivity and Fast Response Infrared Detector Fabricated with the Bi₂Se₃-PbSe Heterojunction. *Applied Surface Science*, **584**, Article ID: 152578. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.152578>
- [12] Cho, H.D., Lee, J., Kim, D.Y., Chung, S.Y. and Lee, J. (2023) Enhanced Photoresponse of High Crystalline Bi₂Se₃ Thin-Films Using Patterned Substrates. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **15**, 22274-22281. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c02501>
- [13] Abdolhay, A., Kashaninia, A. and Banihashemi, M. (2023) Effect of a Metal-Semiconductor Hetero Nanostructure of Cu/Bi₂Se₃ on Optical Properties of Perovskite Solar Cells. *Physica Status Solidi (B)*, **260**, Article ID: 2200482. <https://doi.org/10.1002/pssb.202200482>
- [14] Baviskar, V.S., Jadhav, C.D., Salunkhe, D.B., Narkhede, N.M. and Patil, G.P. (2025) Enhancing 3G ETA Solar Cells with Novel Bi₂Se₃ Nanoparticles Synthesized on TiO₂: Impact of Immersion Cycles on PEC Performance. *Next Energy*, **6**, Article ID: 100190. <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2024.100190>
- [15] Xing, X., Liu, Y., Han, J., Liu, W. and Wei, Z. (2023) Preparation of High Damage Threshold Device Based on Bi₂Se₃ Film and Its Application in Fiber Lasers. *ACS Photonics*, **10**, 2264-2271. <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.2c01375>
- [16] Karimbana-Kandy, A., Lemarchand, F., Campos, A., Cabié, M., Perrin-Pellegrino, C., Lumeau, J., et al. (2023) Optimization of the Thickness Dependent Third Order Optical Nonlinearities of 2D Bi₂Se₃ Layers. *Optical Materials*, **143**, Article ID: 114211. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.114211>
- [17] Jiang, Y., Xing, X., Zhu, P., Wang, K., Zhang, Z., Liu, Q., et al. (2024) Nonlinear Optical Properties of the Topological Material Bi₂Se₃ Family for the Application of an Ultrafast Pulse Laser Based on the Occupied and Unoccupied Band Structures. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, **15**, 11419-11427. <https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.4c02600>

- [18] Yu, J., Zeng, X., Zhang, L., Yin, C., Chen, Y., Liu, Y., *et al.* (2018) Inverse Spin Hall Effect Induced by Linearly Polarized Light in the Topological Insulator Bi₂Se₃. *Optics Express*, **26**, 4832-4841. <https://doi.org/10.1364/oe.26.004832>
- [19] Meyer, N., Geishendorf, K., Walowski, J., Thomas, A. and Münzenberg, M. (2020) The Impact of Metallic Contacts on Spin-Polarized Photocurrents in Topological Insulator Bi₂Se₃ Nanowires. *Applied Physics Letters*, **117**, Article ID: 262401. <https://doi.org/10.1063/5.0019044>
- [20] Hua, C. and Huang, J. (2023) Electric Field-Dependent Photoexcited Spin-Polarized Electron Transport in Bi₂Se₃ Topological Insulator. *AIP Advances*, **13**, Article ID: 125116. <https://doi.org/10.1063/5.0174624>