

文章编号:1001-5078(2023)06-0812-10

· 综述与评论 ·

## 二维 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 光电特性及其光电子器件研究进展

赵子扬<sup>1</sup>, 冯琳<sup>1</sup>, 冀婷<sup>1</sup>, 李国辉<sup>1</sup>, 王文艳<sup>1</sup>, 温荣<sup>1</sup>, 冯丽萍<sup>2</sup>, 崔艳霞<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学物理与光电工程学院, 新材料界面科学与工程教育部重点实验室, 新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西太原 030024; 2. 西北工业大学, 材料学院, 凝固技术国家重点实验室, 陕西西安 710072)

**摘要:** 二维(2D)材料由于其超薄的厚度、高度的机械柔性、可调谐的带隙以及易于定制的范德华异质结构, 被广泛应用于通信、红外探测、航空航天以及生物医学等领域。其中 2D  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  作为一种新兴的二维层状材料, 具有独特的晶体结构、优异的光电特性和良好的环境稳定性, 是制备高性能红外光电子器件的优秀候选材料。本文综述了基于 2D  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  材料光电子器件的研究进展。首先, 介绍了 2D  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  的晶体结构、能带结构及其光电特性。然后, 详述了  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  材料的常见制备方法, 包括化学气相沉积法和水热合成法。此外, 综述了  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  材料在场效应晶体管、光电探测器和光开关领域的应用现状。最后, 我们总结了全文, 并对  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  材料的发展进行了展望。

**关键词:** 二维材料;  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ ; 光电特性; 红外探测器; 光电子器件

**中图分类号:** TN213; O436 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2023.06.002

## Research progress on two-dimensional $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ photoelectric characteristics and optoelectronic devices

ZHAO Zi-yang<sup>1</sup>, FENG Lin<sup>1</sup>, JI Ting<sup>1</sup>, LI Guo-hui<sup>1</sup>, WANG Wen-yan<sup>1</sup>,  
WEN Rong<sup>1</sup>, FENG Li-ping<sup>2</sup>, CUI Yan-xia<sup>1</sup>

(1. College of Physics and Optoelectronics, Key Lab of Interface Science and Engineering in Advanced Materials of Ministry of Education, Key Lab of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. State Key Lab of Solidification Processing, College of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Two-dimensional (2D) materials are widely used in communication, infrared detection, aerospace and biomedical due to their ultrathin thickness, high mechanical flexibility, tunable band gap and easily tailored van der Waals heterostructures. Among them, 2D  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  is an emerging two-dimensional material with unique crystal structure, excellent photoelectric characteristics and superior environmental stability, which is an excellent candidate material for preparing high-performance infrared optoelectronic devices. In this paper, the research progress of 2D  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (No. U21A20496; No. 61922060; No. 61775156; No. 61805172; No. 12104334; No. 62174117; No. 61905173); 山西省自然科学基金面上青年基金 (No. 20210302123154; No. 20210302123169); 山西省回国留学人员科研资助项目 (No. 2021-033); 山西浙大新材料研究院基础研究类项目 (No. 2021SX-FR008); 吕梁市高层次科技人才引进专项项目 (No. Rc2020206; No. Rc2020207) 资助。

**作者简介:** 赵子扬 (1997 -), 男, 硕士研究生, 主要从事微纳光电子器件方面的研究。E-mail: 352741589@qq.com

**通讯作者:** 崔艳霞 (1984 -), 女, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事微纳光子与光电子学领域 (包括表面等离子体器件、有机及钙钛矿光电探测器及钙钛矿激光器等) 的研究。E-mail: yanxiacui@tyut.edu.cn

**收稿日期:** 2022-08-25; **修订日期:** 2022-09-22

is reviewed. Firstly, the crystal structure and energy band structure of 2D Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se and its photoelectric properties are introduced. Then, the common preparation methods of Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se materials, including chemical vapor deposition and hydrothermal synthesis, are described in detail. In addition, the current status of applications of 2D Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se materials in field-effect transistors, photo detectors and optical switches are described. Finally, the paper is concluded and an outlook on the development of Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se materials is provided.

**Keywords:** two-dimensional materials; Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se; photoelectric characteristics; infrared detector; optoelectronic devices

## 1 引言

由于具有超薄的原子层厚度、可调谐的能带结构、超大的比表面积及丰富的物理化学性质,二维(two dimensional, 2D)材料在红外光电探测器、发光二极管、太阳能电池及环境催化等领域得到了广泛的应用和研究,并为后摩尔时代器件的制备与集成电路的设计开辟了新的道路。

虽然石墨烯、过渡金属硫化物(TMDCs)、黑磷(BP)等二维材料的独特性能已经被许多研究所证实,但一些固有的不足仍然阻碍着它们的进一步发展。石墨烯在室温下表现出超高的载流子迁移率,但其极小的带隙(单层石墨烯带隙为零)和较低的吸光度限制了其在场效应器件中的应用。TMDCs虽然表现出较大的带隙且具有带隙可调的特点,然而较低的载流子迁移率与较窄的光谱范围限制了它们在光电子器件中的应用。黑磷同时具有可调节的带隙和较高的载流子迁移率,但在环境中的不稳定性在一定程度上阻碍了其在高性能器件方面的应用。相比而言,新兴2D Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se具有可调谐的带隙、优越的环境稳定性和超高的电子迁移率等优异性能。这些突出的性能使其成为制备高性能、低功耗电子和光电子器件的候选材料。

本文中,我们首先系统地对2D Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se的晶体结构、能带结构和光电性质进行了介绍,然后对制备Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se材料的方法进行了详细的介绍。此外,本文对Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se在红外光电探测器、场效应晶体管和光开关领域的研究进展进行了综述。最后,我们对2D Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se材料目前遇到的挑战以及未来的发展进行了简述。

## 2 2D Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 的结构和性质

### 2.1 晶体结构和能带结构

Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 室温下形成四方结构,具有 I4/mmm 的

空间群对称性( $a = b = 3.88 \text{ \AA}$ ,  $c = 12.16 \text{ \AA}$ ),如图1(a)所示,八个Bi原子位于立方体的顶点,  $[\text{Bi}_2\text{O}_2]^{2n+}$  阳离子层和  $[\text{Se}]^{2n-}$  阴离子层通过弱静电相互作用沿  $c$  轴交替堆叠,层厚为  $0.61 \text{ nm}$ ,其层状性质使其非常适合制造低至几层原子厚度的电子器件。与常见的范德瓦尔斯(vdWs)层状材料不同, Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 是离子层状材料。但是 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 仍然表现出典型2D材料的特性,如其带隙和光吸收会随层数的变化而改变<sup>[1]</sup>。Wei等人认为 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 是一种拉链2D材料,并提出了“拉链模型”<sup>[2]</sup>,如图1(b)所示。单层 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 的结构为  $\text{Se}_{0.5}\text{-Bi}_2\text{O}_2\text{-Se}_{0.5}$ ,其顶部和底部均为 Se 原子,通过多个单层的堆叠形成多层结构。对于多层 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se, Se 层是由下一层上表面 50% Se 和上一层下表面 50% Se 接合而成。这种堆叠方式类似于日常生活中的拉链,因此被称为“拉链模型”。在实验中,也确实观察到了 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 薄片中的拉链状结构。并且 Wei 等人通过理论研究表明, Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 的层间作用力大于 MoS<sub>2</sub>、BP 等材料的范德瓦尔斯力,这种独特的晶体结构使得

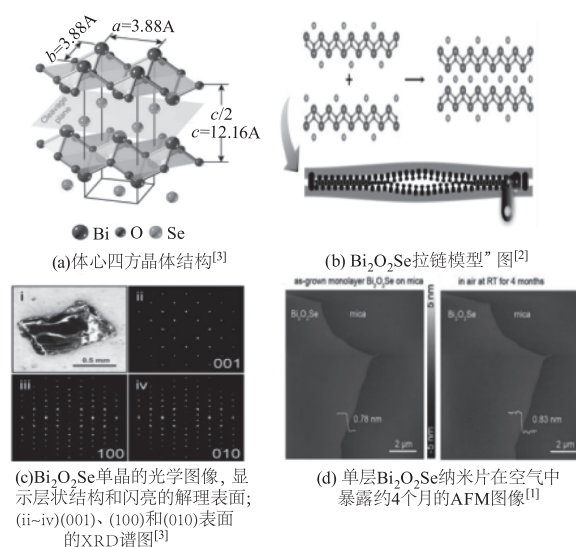


图1 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 的晶体结构

Fig. 1 Lattice structure of Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se

其具有优越的环境稳定性<sup>[3]</sup>。如图 1(d)所示,在 Wu 等人的实验研究中<sup>[1]</sup>,Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 晶体的表面形态和粗糙度即使在空气中暴露数月后也几乎保持不变。Li 等人发现在空气中暴露超过三个月的 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 器件表现出稳定的光响应性能<sup>[4]</sup>。这些结果均表明 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 具有良好的环境稳定性。Li 等人还通过变温测量实验发现,Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 纳米片在 80 ~ 300 K 不同温度下的响应度以及响应时间几乎保持在同一水平,这可能是由于超薄 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 纳米片在其带隙中没有表面陷阱态或浅缺陷能级。

电子能带结构是研究 2D 材料电学性质和光学性质的重要依据。Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 具有中等且可调谐的带隙,ARPES 测量图显示其导带和价带之间存在一个间接带隙,数值为  $0.8 \pm 0.05$  eV<sup>[3]</sup>。Ma 等人利用第一性原理计算得到了 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 的能带结构,如图 2(a)所示<sup>[5]</sup>。具体地,Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 体单晶表现出 0.85 eV 的间接带隙,其导带底 (CBM) 由 O 原子的 2p 轨道和 Bi 原子的 6p 轨道共同贡献,而价带顶 (VBM) 则主要来源于 O 原子的 2p 轨道和 Se 原子的 p 轨道。适当的应变可以使 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 从间接带隙半导体转变为直接带隙半导体<sup>[6]</sup>。由于量子限制效应,Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 从单层到体显示出与层数相关的电子带隙(1.3 ~ 0.8 eV)、电子有效质量(0.20 ~ 0.14 m<sub>0</sub>)和光学带隙(2.0 ~ 1.5 eV)。对于厚度大于八层 (~5 nm)的 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 晶体,其电子能带结构与体相非常接近<sup>[7]</sup>,

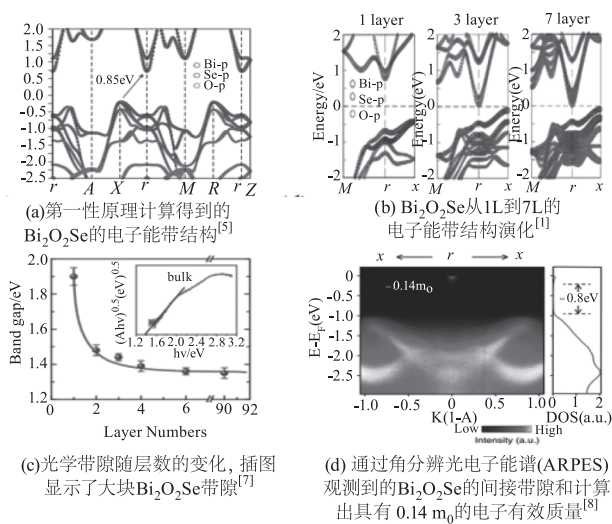


图 2 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 的电子能带结构

Fig. 2 Electronic band structure of Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se

如图 2(c)所示。此外,Wu 等人对 1 ~ 7 层的 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 的电子结构演化进行了计算<sup>[1]</sup>,随着层数的增加,Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 的带隙会逐渐变小,如图 2(b)所示。Yin 等人对 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 晶体进行了角分辨光电子能谱 (ARPES) 测量<sup>[8]</sup>。实验结果表明,Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 表现出约 0.8 eV 的间接带隙,如图 2(d)所示。并且利用 ARPES 测得的实验数据,他们计算出 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 的电子有效质量为 0.14 m<sub>0</sub>,这一数值低于硅的电子有效质量(0.26 m<sub>0</sub>)。这种低有效质量、合适的带隙的优异特性有利于高性能电子器件的制备。

## 2.2 光电特性

2D Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 材料具有高的电子迁移率,在 1.9 K 下,其电子迁移率约为  $28900 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,室温下最大为  $450 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。Wu 等人对 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 纳米片进行了霍尔效应测量<sup>[1]</sup>,室温下样品的霍尔迁移率  $\mu_{\text{app}}$  表现出明显的厚度依赖性。如图 3(a)所示,对于较厚的样品, $\mu_{\text{Hall}}$  保持在  $200 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  左右,但对于小于 6.2 nm 的样品, $\mu_{\text{Hall}}$  则会突然下降。这种厚度依赖的迁移率特性可归因于 2D Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 纳米片中严重的界面/表面散射。

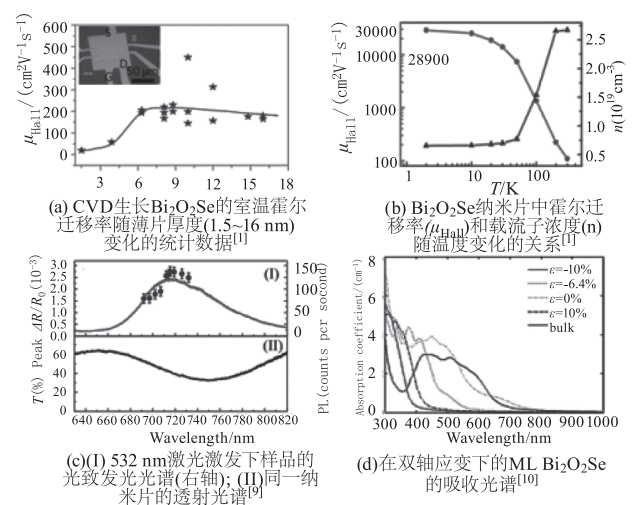


图 3 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 的光电特性

Fig. 3 Photoelectric characteristics of Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se

同时实验表明,Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 材料的电子迁移率与载流子浓度之间成反比,如图 3(b)所示。此外,Li 等人对基于 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 的柔性装置弯曲 500 次后,发现该装置的光响应仍然保持高度稳定性。2D Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 的这些特性表明,它在未来超快、柔性光电器件等领域具有广阔的应用前景。由于 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 材

料具有良好的室温电子迁移率,大尺寸的 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 晶体可作为新型的光伏材料。Liu 等人报道了单层 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 和纳米片的光学性质和光载流子动力学<sup>[9]</sup>。他们利用光致发光(PL)和透射谱研究了 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 纳米片中的直接光学跃迁,图 3(c)中的曲线(I)是样品在 532 nm 激光激发下的 PL 光谱,可知光致发光峰值约为 720nm (1.72 eV),宽度约为 70 nm,这个宽度大约是典型单层 TMD 的两倍。他们把 PL 峰的展宽归因于声子均匀展宽和缺陷非均匀展宽两个方面。此外,单层 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 薄膜表现出强烈的光吸收饱和激子-激子相互作用,其激子扩散系数比纳米板大几倍,表明单层 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 薄膜的传输性能更好,这些优异的性能使其成为一种很有前途的非线性光学材料。此外,Zhang 等人的理论研究表明,应变工程是调节 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 光学性质的一种很有前途的方法<sup>[10]</sup>。如图 3(d)所示,通过对单层 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 施加适当的应变,光响应可以覆盖从紫外到近红外(UV-NIR)的范围,如此宽的响应波段表明 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 材料在近红外光电器件中具有巨大的应用潜力。

### 3 2D Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 的制备方法

制备 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 的方法主要有化学气相沉积法(CVD)和水热合成法两种,下面我们将对这两种方法的研究进展进行详细介绍。

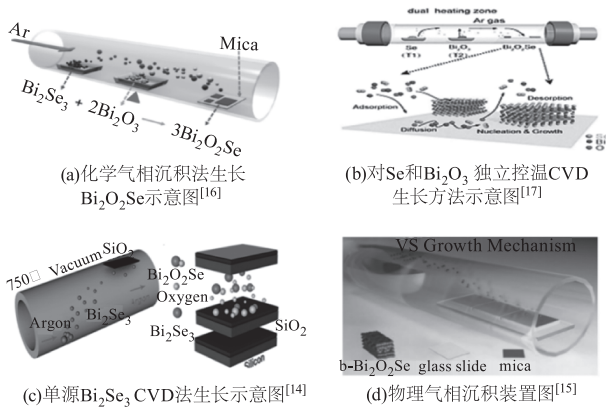
#### 3.1 化学气相沉积法

气相沉积法是制备高质量、大面积二维材料的一种常见方法。该方法具有操作灵活、样品尺寸与形貌可控等优点,所以该方法是目前制备 2D Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 的主流方法。

由于实验设备、环境和需求的不同,不同研究团队给出的生长条件有一定的差别。通过对生长条件(如温度、反应物、压强以及生长时间等)的调控可以制备出不同尺寸、不同形状以及不同厚度的 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 材料。其中衬底温度对生长的影响非常重要,过高和过低都会导致生长出来的样品不理想。当衬底温度相对较低时,前驱体的吸收率相对较高。因此,被吸收的前驱体更有可能在衬底上聚集成核,然后结晶成具有更小畴尺寸和更大成核位点密度的 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 纳米片。相反,当温度

过高时,前驱体的吸收率减小,吸收行为逐渐成为晶体生长的主要步骤,导致 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 纳米片的畴尺寸较小。与 TMDs 中的范德华力相比,Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 层间静电相互作用较强,这会导致 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 倾向于沿垂直方向生长,所以需要选择合适的衬底来减少其垂直生长的趋势,以制备超薄的、大面积的 2D Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 薄膜<sup>[11]</sup>。氟晶云母的 K<sup>+</sup>层和 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 的 Se<sup>2-</sup>层之间存在较强的静电相互作用,会促进 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 的横向生长,所以氟晶云母衬底是生长 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 材料最常用的衬底。

Li 等开发了一种空间限制的 CVD 方法,实现了 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 纳米结构的外延生长<sup>[12]</sup>。通过控制生长温度,可以合成各种形态的 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se。He 等通过把生长温度控制在 650 ~ 700 °C<sup>[4]</sup>,生长时间控制在 10 ~ 30 分钟,制备出了高质量的超薄 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 纳米片,其厚度在 10 nm 以下,横向尺寸在 10 μm 左右。而 Tong 等人用改进的 CVD 法生长出高质量的大面积(400 ~ 32000 μm<sup>2</sup>)的 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 纳米片<sup>[13]</sup>。Wu 等人的研究表明<sup>[7]</sup>,Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 的尺寸可以通过改变生长温度进行调节,如图 4(a)所示,他们在 570 °C 下合成了畴尺寸为 200 μm、厚度范围为 2 ~ 4 层的超光滑大尺寸单晶,并且还实现了厚度仅为 0.9 nm 的单层 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 的生长。一般情况下,都是先将 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 沉积在云母衬底上,然后再将其转移到所需的衬底上制备特定的器件。但是这种转移过程会在一定程度上降低材料的质量。Liang 等提出了一种全新的生长机制<sup>[14]</sup>,如图 4(c)所示,他们利用单源 Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 在二氧化硅(SiO<sub>2</sub>)衬底上直接合成了 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se,从而避免了转移过程。其中 SiO<sub>2</sub> 是非晶态的,在 750 °C 高温下氧-硅键会发生断裂,从而在表面产生氧气。然后氧气与 Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 结合形成 ~ 5 nm 厚度的 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se。用 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 作为前驱体是化学气相沉积法制备 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 最为常见的生长模式。但 Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 双蒸发源的存在使得 Bi 和 Se 的浓度比无法得到合理的控制,从而会影响 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 纳米片的横向生长,不利于获得大尺寸和高质量的样品。Usman Khan 等利用单一蒸发源通过常压气固法(vapor-solid)获得了厚度低至单层的毫米级 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 单晶<sup>[15]</sup>,如图 4(d)所示。

图 4 典型的  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  生长方法Fig. 4 Typical  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  growth method

### 3.2 水热合成法

水热法是一种低成本、低温生长  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  低维结构的简单方法,也被称为复合熔盐法(CMS)。在室温下,Ghosh 等人在碱性溶液( $\text{NaOH}$  和  $\text{KOH}$ )中将  $(\text{SeC}(\text{NH}_2)_2)$  和  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$  混合<sup>[18]</sup>,碱性溶液促进  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$  和  $\text{SeC}(\text{NH}_2)_2$  分别水解生成  $\text{BiONO}_3$  和  $\text{Se}^{2-}$ , $\text{BiONO}_3$  与  $\text{Se}^{2-}$  发生反应生成了  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  纳米片。他们制备得到的  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  薄片的横向尺寸在  $100 \sim 200 \text{ nm}$  之间,大多数薄片的厚度约为  $2 \text{ nm}$ 。随后,Chen 等人以  $\text{LiNO}_3$  和  $\text{KNO}_3$  为复合熔盐,采用共沉淀法合成了  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  晶体<sup>[19]</sup>,如图 5(a)所示。Sun 等人的研究表明了  $\text{LiNO}_3$  中的  $\text{Li}^+$  通过静电力吸附在  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  的  $[001]$  面上<sup>[20]</sup>,阻止了  $\text{Se}$  层与  $\text{BiO}^+$  离子的附着,极大地限制了  $[001]$  方向的生长速率,从而得到具有较薄形貌的纳米片,如图 5(b)所示。当  $\text{LiNO}_3$  浓度越来越高时,限制  $[001]$  方向生长速率的效果会更大。水热法虽然具有操作简单、成本

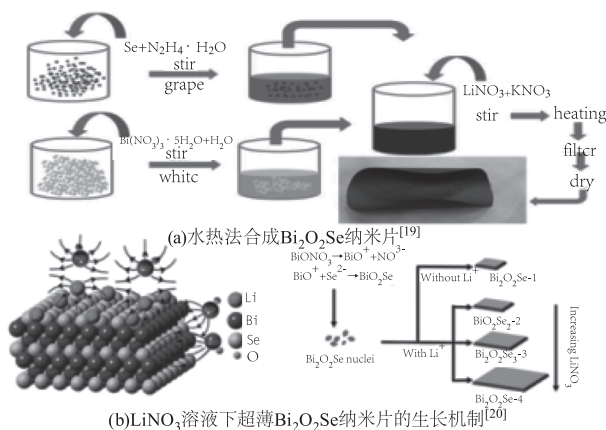


图 5 常用的水热合成法示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the hydrothermal synthesis of  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 

低的优点,但是对样品质量的控制与化学气相沉积法相比还存在一定的差距,所以大部分研究者们还是采用 CVD 法来制备 2D  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  材料。

### 4 基于 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 的电子及光电子器件

2D  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  具有独特的晶体结构、高载流子迁移率和优越的环境稳定性,这些突出的性能使其成为制备高性能电子和光电子器件的候选材料。

#### 4.1 场效应晶体管

场效应晶体管作为现代电子技术的关键元件,已广泛应用于传感器和航空航天等领域。2D  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  由于其优异的电学性质,被认为是未来高速和低功耗场效应晶体管的很有前途的沟道材料。

Xu 等人通过第一性原理的能带结构计算和量子输运模拟对单层/双层  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  与具有不同功函数的六种金属( $\text{Au}$ 、 $\text{Ag}$ 、 $\text{Sc}$ 、 $\text{Ti}$ 、 $\text{Pt}$  和  $\text{Pd}$ )之间的接触类型进行了研究<sup>[21]</sup>。结果表明:双层和  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  与六种金属之间均可以实现 n 型欧姆接触,基于此可以实现高性能的多层  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  场效应管。高的载流子浓度会导致静电栅控制效果较差,阈值电压不合适,不利于制备高性能低功耗器件。Peng 等人利用硒粉和  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  作为蒸发源生长出具有超低载流子浓度的  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  纳米片<sup>[17]</sup>,性能如图 6(a)所示,利用所制得的低载流子浓度样品, $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  场效应晶体管的阈值电压被大大降低,同时快速开关行为得以保持。Fu 等人利用 PS(聚苯乙烯)将云母上的  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  转移到  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  衬底上,制备了背栅调控的场效应管<sup>[22]</sup>。通过调控  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  的载流子浓度,器件的响应度最高可以达到  $10^5 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ ,响应速度可以达到  $100 \mu\text{s}$ 。Wu 等人采用高  $\kappa$  的  $\text{HfO}_2$  作为介电层,基于不同厚度的 2D  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  制作了顶栅场效应晶体管<sup>[1]</sup>,如图 6(b)所示,该器件显示出优异的半导体器件性能,包括高载流子迁移率(室温下为  $-450 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )、高电流开关比  $> 10^6$  和近乎理想的亚阈值摆幅(约  $65 \text{ mV}/\text{dec}^{-1}$ )。并且该场效应晶体管的迁移率表现出明显的厚度依赖性,这种特性可归因于 2D  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  薄片严重的界面/表面散射。此外,他们发现电子迁移率会随着栅极电压  $V_g$  的降低而增加,这可能是电压的降低减少了界

面/表面处的散射,如图 6(c)所示<sup>[1,23]</sup>。Liang 等人基于无转移生长的 2D Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 制备了场效应晶体管<sup>[14]</sup>,其场效应迁移率为  $\sim 70\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,并且拥有  $\sim 10^8$  的高开关比。Tan 等人制备了一种基于石墨烯/Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se vdW 异质结的短沟道场效应晶体管<sup>[24]</sup>,如图 6(d)所示, Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 沟道的宽度为 50 nm,石墨烯则作为漏极和源极,该器件在顶栅电场调制下显示出 n 型特性。他们的研究表明, Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 和石墨烯的功函数相差仅 50 meV,低于 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 与金的功函数差值,这意味着与金电极相比,石墨烯电极可以为 2D Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 引入较低的 vdW 异质结接触电阻,而低的接触电阻对石墨烯和 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 之间的载流子注入是非常有益的。

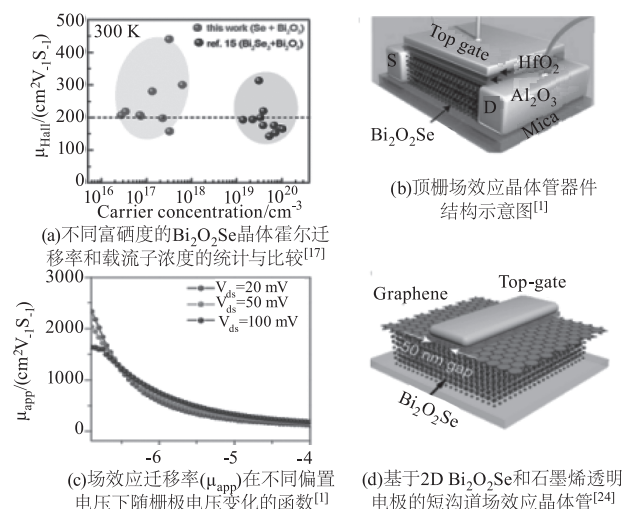


图6 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 晶体的迁移率特性和 FET 示意图

Fig. 6 Mobility properties and FET for Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se crystals

## 4.2 光电探测器

光电探测器是一种将光信号转换为电信号的光电子器件,在红外探测、通信和生物医学等领域有着广泛的应用。与其他 2D 材料相比, Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 具有更高的电子迁移率和更好的稳定性,并且具有非常适合近红外光电探测的 0.8 eV 带隙宽度,研究者们利用 2D Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 制备了很多不同结构的光电探测器<sup>[25]</sup>。

基于 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 的光电导型光电探测器表现出优异的探测性能。Li 等人在云母衬底上生长了 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se,然后蒸镀了 Cr/Au 电极制成了红外光电探测器<sup>[4]</sup>。该探测器在 808 nm 红外激光照射下,表现出  $6.5 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$  的响应度、 $8.3 \times 10^{11}$  Jones 的比探测

率与 2.8 ms 的响应速度。Yin 等利用 Ti/Au 电极制备了超敏感的 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 红外光电探测器<sup>[8]</sup>,其探测波长可拓展到 1700 nm,并且对 1200 nm 的红外光表现出  $65 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$  的响应度,本征光响应时间达到 1 ps。Chen 等人构建了一种蝶型天线辅助的宽带 (IR 到 THz) Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 光电探测器<sup>[26]</sup>。该探测器的电极为对称的蝶形,可起到天线的作用,此蝶形天线可将光子耦合到亚波长沟道中,从而会对太赫兹波段的探测起到一定的增益和敏化作用,如图 7(a)所示。该器件在 IR 和 THz 区域的光响应源于不同的响应机制。在 IR 区域,非平衡载流子是由 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 中的光生电子-空穴对引起的。而在太赫兹区域,光子能量远小于 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 的带隙,因此不会激发电子-空穴对,此时由电磁感应阱通过金属电极注入载流子。室温下,该探测器的响应度在 1550 nm 处达到  $58 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ ,响应时间和噪声等效功率 (NEP) 分别为 476 ns 和  $0.2 \text{ pW} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。Yang 等人制备了多层 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se (30 nm) 光电探测器<sup>[27]</sup>,该探测器具有 850 ~ 1550 nm 范围内超灵敏光响应,响应度、响应时间、EQE 和比探测率分别为  $101 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$  (900 nm)、30 ms、20300 % 和  $1.9 \times 10^{10}$  Jones。他们的研究表明:多层 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 比薄层具有更好的光响应性能,多层 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 的光吸收高于薄层 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se,可以诱导更高的光电流;而且由于其较窄的带隙,多层 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 提供了比薄层 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 更宽的光谱响应。

电极沉积或样品转移过程中产生的不良缺陷或污染物会导致光电探测器的性能下降。在 Liu 等的研究中<sup>[28]</sup>,在探针的辅助下,他们将 Au 电极转移到生长在氟晶云母衬底上的 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 薄膜顶部,避免了传统光刻方法 (紫外光刻或电子束光刻) 带来的污染物,制备了基于 Au/Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 结的高效光电探测器。此外,通过增强 Au/Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 界面和 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 沟道上的电场强度,优化器件退火温度 (消除 MSM 界面处粘附的水/氧),缩小 Au/Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 界面的 van der Waals 间隙,缩短器件沟道长度,器件的整体性能得以提高。该器件的最大光响应度为  $9.1 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ ,器件响应时间可达 36  $\mu\text{s}$ ,并且具有从 360 nm 到 1090 nm 的宽带光谱响应。

基于 Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se 的晶体管型光电探测器也表现出

优异的探测性能。Tong 等人利用 CVD 在云母衬底上构建了  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  顶栅光电晶体管<sup>[13]</sup>。该光电晶体管显示出从 360 到 1800 nm 的宽带光电探测,在 360 nm 处其最大响应度为  $1.08 \times 10^5 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ 。在 405 nm 光照下,顶栅  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  光电晶体管的响应度、EQE 和比探测率分别达到  $5.01 \times 10^4 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ 、 $1.5 \times 10^7\%$  和  $8.2 \times 10^{12}$  Jones。这种优异的性能可归因于光选通、光伏和光热效应的协同作用。对于  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  的响应机制,Yang 等人对光照和局部加热引起的电流进行了详细的研究<sup>[29]</sup>,他们认为  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  光电探测器的主要光响应机理不仅是光电导效应,还有光热效应下热载流子引起的热辐射效应。Chen 等人构建了基于  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  纳米片的三电极光电化学(PEC)型自供电光电探测器<sup>[19]</sup>,该探测器可以在没有外加电压的情况下工作。三电极系统由两个工作电路组成,工作电极和参比电极组成测量电路,用于测量电化学反应过程;工作电极和反电极组成极化电路,用来传递电子形成回路,该器件具有优异的时间稳定性和周期稳定性。

此外,将  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  与其他 2D 材料堆叠在一起构成的异质结构可以大幅度改善光电探测性能。因 2D 材料表面没有阻碍电子传输的悬挂键或者表面态等,并且层与层之间依靠范德瓦尔斯力连接,所以可以避免传统异质结易出现晶格失配的现象,有助于制备理想的范德华异质结构。此外,2D 材料的种类很多,其带隙分布十分广泛,可以覆盖从紫外到远红外波段从而实现红外探测。Yang 等人构建了具有 II 型能带排列的  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}/\text{MoSe}_2$  异质结光电探测器<sup>[30]</sup>。该器件具有从可见光(405 nm)到近红外(808 nm)的宽带检测能力,在 780 nm 处的响应度为  $413.1 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$ ,探测率为  $3.79 \times 10^{11}$  Jones。并且与 2D  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  光电探测器相比,暗电流显著降低。随后,Liu 等人构建了基于  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}/\text{BP}$  van der Waals 异质结的宽带光电探测器<sup>[31]</sup>。该器件表现出 p-n 二极管特性,电流整流比为  $\sim 20$ 。得益于 vdW 异质结可以抑制暗电流并促进载流子的快速分离,该探测器在 700 nm 处的响应度为  $500 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ , $D^*$  达到  $2.8 \times 10^{11}$  Jones,响应时间为 9 ms,比单个 BP (190 ms) 和  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  (180 ms) 器件快 20 多倍。

$\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  在带隙(0.8 eV 或  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ )附近较弱的光响应限制了其在宽红外光谱中的应用。窄带隙半导体(PbS、PbSe、HgSe 等)的胶体量子点(CQDs)具有高消光系数和带隙可调的特性,将它们与 2D 材料相结合,利用异质界面处的光门控效应可以提高响应度。Luo 等人通过在高迁移率 2D  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  上旋涂一层对红外敏感的 PbSe 量子点,制备出一种宽带混合光电探测器<sup>[16]</sup>。

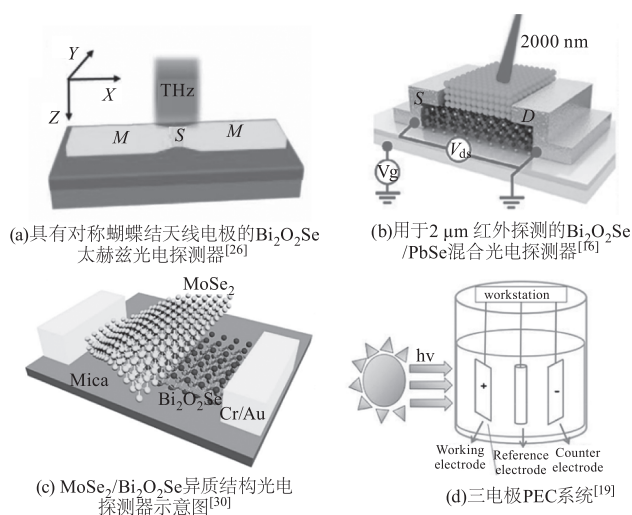


图 7 典型的光电探测器结构

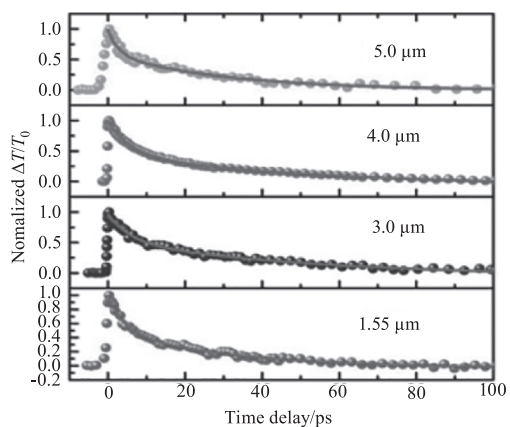
Fig. 7 Typical photodetector configuration

通过 PbSe 胶体量子点(CQDs)对  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  纳米片的敏化,进一步提高了该探测器对红外光的吸收,可实现长达  $2 \mu\text{m}$  的短波红外探测(响应度  $> 10^3 \text{ A} \cdot \text{W}^{-1}$ )。PbSe CQDs 与  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  形成 II 型界面,该界面使 PbSe CQDs 在光照下向  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  注入电荷。与纯  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  相比,PbSe 和  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  之间的 II 型界面带偏移不仅提高了器件的响应度,而且将响应时间提高到约 4 ms,这比 PbSe CQDs 快了约 300 倍。

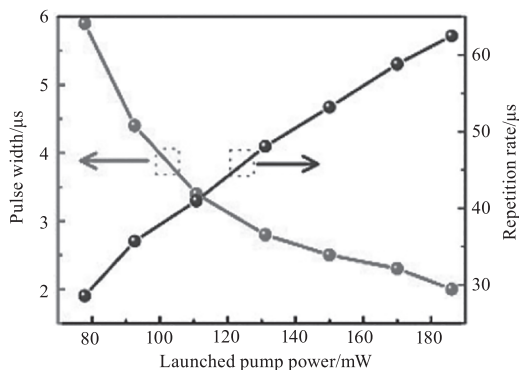
#### 4.3 光开关

脉冲激光可由光开关产生,性能较好的光开关是获得超短脉冲激光的关键。它可以通过在超快时间尺度上切换吸收来产生短脉冲输出。光开关是一种非线性光学器件,也称为无源可饱和吸收体(SA)。在强光下,SA 被漂白,可以使大部分腔内能量通过 SA 到达反射镜,并再次反射回激光腔中;在弱光下,SA 表现出吸收未饱和的特性,其将吸收掉所有入射光,从而将这部分弱光从激光腔中去除,表现了调 Q 锁模的抑制作用。目前中红外脉冲激光

正日益成为生物医学、传感、成像和光通信等科学应用的首选光源。但是限制中红外脉冲激光器的因素之一是缺乏能够产生具有宽带响应脉冲的光开关。Tian 等人的研究表明<sup>[32]</sup>,  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  基饱和吸收体具有  $0.8 \sim 5.0 \mu\text{m}$  的超宽带可饱和非线性光学响应, 如图 8(a) 所示。他们设计了一种以  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  为光开关的波长为  $3.0 \mu\text{m}$  的 Q 开关激光器。当泵浦功率从  $77.9 \text{ mW}$  增加到  $186 \text{ mW}$ , 重复频率从  $28.57 \text{ kHz}$  增加到  $62.5 \text{ kHz}$ , 而脉冲宽度从  $5.9 \mu\text{s}$  单调减少到  $2.0 \mu\text{s}$ , 这非常符合典型的调 Q 特性, 如图 9(b) 所示。尽管该技术类似于石墨烯、黑磷等二维材料, 但基于  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  的光开关在可扩展到更宽波长。此外, Long 等人对 2D 材料异质结可饱和吸收体在激光器中的应用进行了研究<sup>[33]</sup>, 发现异质结的光学互补效应对得到调制深度大、输出脉宽窄、峰值功率高的可饱和吸收体非常有利。因此, 具有优异性能的  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  基异质结可饱和吸收体具有广阔的应用前景。



(a) 探测波长为  $1.55 \sim 5.0 \mu\text{m}$  的  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  的瞬态透过率<sup>[32]</sup>



(b) 脉冲持续时间和脉冲重复率随入射泵浦功率的变化<sup>[32]</sup>

图 8 光开关特性

Fig. 8 Characteristics of optical switch

## 5 总结和展望

$2\text{D Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  材料由于具有高电子迁移率、中等带隙和良好稳定性等优异特性从而获得了广泛的关注和研究。尽管  $2\text{D Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  发展非常迅速, 但对它的探索还处于初级阶段, 仍然面临着一些问题与挑战。首先, 为了满足工业应用的要求, 需要开发一种简便、低成本的制备方法, 来合成厚度可控的晶圆级  $2\text{D Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 。虽然目前采用 CVD 或 MBE 方法可在外延衬底上合成高质量的  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  单晶, 但是此类单晶薄膜的生长严重依赖于钙钛矿氧化物衬底(如 STO 或 LAO), 而这些衬底的价格昂贵且尺寸有限。为了扩大生产规模并降低成本, 在低成本的氟晶云母衬底上获得大面积且高质量的  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  单晶是有利的, 或者直接在  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  衬底上合成大面积的  $2\text{D Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  则更为便捷。其次, 由于材料在转移过程中存在一定的缺陷, 使得制成的器件性能有所下降, 所以优化转移工艺对制备高性能器件也非常关键。最后,  $2\text{D Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  作为一种优异的热电材料, 具有良好的热电转换效率, 并且可以通过掺杂 Cl、Ag、Sb 等元素以及应变工程来提高其热电品质因数, 但是基于  $2\text{D Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  的热电器件却研究甚少, 需要进一步开发。总而言之,  $2\text{D Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  作为一种新型半导体材料, 有望在未来高速红外光电探测器等领域取得广泛的应用。

## 参考文献:

- [1] Wu J, Yuan H, Meng M, et al. High electron mobility and quantum oscillations in non-encapsulated ultrathin semiconducting  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  [J]. Nat Nanotechnol 2017; 12(6): 530 - 534.
- [2] Wei Q, Li R, Lin C, et al. Quasi-two-dimensional Se-terminated bismuth oxychalcogenide ( $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ ) [J]. ACS Nano 2019; 13(11): 13439 - 13444.
- [3] Chen C, Wang M, Wu J, et al. Electronic structures and unusually robust bandgap in an ultrahigh-mobility layered oxide semiconductor,  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  [J]. Sci. Adv., 2018, (4): 8355.
- [4] Li J, Wang Z, Wen Y, et al. High-performance near-infrared photodetector based on ultrathin  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  Nanosheets



- [ J ]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28 (10):1706437.
- [5] Ma X, Chang D, Zhao C, et al. Geometric structures and electronic properties of the  $\text{Bi}_2\text{X}_2\text{Y}$  ( $\text{X}, \text{Y} = \text{O}, \text{S}, \text{Se}, \text{and Te}$ ) ternary compound family: a systematic DFT study [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6(48):13241–13249.
- [6] Huang X, Niu C-Y, Zhang J, et al. Strain-tunable electronic structure, optical response, and high electron mobility of  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  crystals [J]. *APL Materials*, 2019, 7 (8):081110.
- [7] Wu J, Tan C, Tan Z, et al. Controlled synthesis of high-mobility atomically thin bismuth oxyselenide crystals [J]. *Nano Lett*, 2017, 17(5):3021–3026.
- [8] Yin J, Tan Z, Hong H, et al. Ultrafast and highly sensitive infrared photodetectors based on two-dimensional oxyselenide crystals [J]. *Nat Commun*, 2018, 9(1):3311.
- [9] Liu S, Tan C, He D, et al. Optical properties and photocarrier dynamics of  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  monolayer and nanoplates [J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(6):1901680.
- [10] Zhang Y, Gao Q, Han X, et al. Mechanical flexibility and strain engineered-band structures of monolayer  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  [J]. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures* 2020, 116:113728.
- [11] Huan Y, Zhu L, Li N, et al. Controllable syntheses and potential applications of two-dimensional metallic transition metal dichalcogenides [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 66(1):34–52.
- [12] Li J, Wang Z, Chu J, et al. Oriented layered  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  nanowire arrays for ultrasensitive photodetectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114:151104.
- [13] Tong T, Chen Y, Qin S, et al. Sensitive and ultrabroadband phototransistor based on two-dimensional  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  nanosheets [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29 (50):1905806.
- [14] Sagar RUR, Khan U, Galluzzi M, et al. Transfer-free growth of  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  on silicon dioxide via chemical vapor deposition [J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2020, 2 (7):2123–2131.
- [15] Khan U, Luo Y, Tang L, et al. Controlled vapor-solid deposition of millimeter-size single crystal 2D  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  for high-performance phototransistors [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(14):1807979.
- [16] Luo P, Zhuge F, Wang F, et al. PbSe quantum dots sensitized high-mobility  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  nanosheets for high-performance and broadband photodetection beyond 2  $\mu\text{m}$  [J]. *ACS Nano*, 2019, 13(8):9028–9037.
- [17] Wu J, Qiu C, Fu H, et al. Low residual carrier concentration and high mobility in 2D semiconducting  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  [J]. *Nano Lett*, 2019, 19(1):197–202.
- [18] Ghosh T, Samanta M, Vasdev A, et al. Ultrathin free-standing nanosheets of  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ : room temperature ferroelectricity in self-assembled charged layered heterostructure [J]. *Nano Lett*, 2019, 19(8):5703–5709.
- [19] Chen G, Wu J, Wang B, et al. High-performance self-powered photodetector based on  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  nanosheets [J]. *Applied Physics A*, 2020, 126(7):579.
- [20] Sun Y, Ye S, Zhang J, et al. Lithium nitrate-assisted hydrothermal synthesis of ultrathin  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  nanosheets and their photoelectrochemical performance [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(42):14711–14717.
- [21] Xu L, Liu S, Yang J, et al. Pervasive ohmic contacts in bilayer  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ -metal interfaces [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2019, 123(14):8923–8931.
- [22] Fu Q, Zhu C, Zhao X, et al. Ultrasensitive 2D  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  phototransistors on silicon substrates [J]. *Adv Mater*, 2019, 31(1):e1804945.
- [23] Song Y, Li Z, Li H, et al. Epitaxial growth and characterization of high quality  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$  thin films on  $\text{SrTiO}_3$  substrates by pulsed laser deposition [J]. *Nanotechnology*, 2020, 31(16):165704.
- [24] Tan C, Xu S, Tan Z, et al. Exploitation of  $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ /graphene van der Waals heterojunction for creating efficient photodetectors and short-channel field-effect transistors [J]. *InfoMat*, 2019, 1(3):390–395.
- [25] Xu H, Wang P, Chen X, et al. Research progress of two-dimensional semiconductor infrared photodetector (Invi-

- ted) [ J ]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50 ( 1 ):20211017.
- [26] Chen Y, Ma W, Tan C, et al. Broadband Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se photodetectors from infrared to terahertz [ J ]. Advanced Functional Materials, 2021, 31 ( 14 ):2009554.
- [27] Yang H, Chen W, Zheng X, et al. Near-infrared photoelectric properties of multilayer Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se nanofilms [ J ]. Nanoscale Res Lett, 2019, 14 ( 1 ):371.
- [28] Liu X, Li R, Hong C, et al. Highly efficient broadband photodetectors based on lithography-free Au/Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se /Au heterostructures [ J ]. Nanoscale, 2019, 11 ( 43 ): 20707 – 20714.
- [29] Yang H, Tan C, Deng C, et al. Bolometric effect in Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se photodetectors [ J ]. Small, 2019, 15 ( 43 ):e1904482.
- [30] Yang T, Li X, Wang L, et al. Broadband photodetection of 2D Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se-MoSe<sub>2</sub> heterostructure [ J ]. Journal of Materials Science, 2019, 54 ( 24 ):14742 – 14751.
- [31] Liu X, Wang W, Yang F, et al. Bi<sub>2</sub>O<sub>2</sub>Se /BP van der waals heterojunction for high performance broadband photodetector [ J ]. Science China Information Sciences, 2021, 64 ( 4 ):140404.
- [32] Tian X, Luo H, Wei R, et al. An ultrabroadband mid-infrared pulsed optical switch employing solution-processed bismuth oxyselenide [ J ]. Adv Mater, 2018, 30 ( 31 ):e1801021.
- [33] Long H, Hu J W, Wu F G, et al. Ultrafast pulse lasers based on two-dimensional nanomaterial heterostructures as saturable absorber [ J ]. Acta Physica Sinica, 2020, 69 ( 18 ):188101.