动态综述

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021101901

基于氧化锌的紫外探测器研究进展

况 丹[1]，卞曙光[2*]，徐 爽[1]，刘 斌[1]，刘贤文[1]，喻志农[1*]

（1. 北京理工大学 光电学院 北京市混合现实与先进显示技术工程研究中心 薄膜与显示实验室，北京 100081；2. 科技部高技术中心，北京 100044）

摘 要： 氧化锌(ZnO)是一种天然的宽禁带半导体材料，其理论上的禁带宽度为3.37 eV，近年来已经成为制备紫外探测器件的热门材料之一。然而，由于ZnO材料的本征缺陷，直接制备的紫外探测器件总是存在响应率低、暗电流大、响应速度慢等问题。为了获得更好的紫外探测性能，各种可行的器件改善和修饰方法被提出。文章从元素掺杂、表面修饰和异质结构造等三个方面评述了提升ZnO紫外探测器件性能的典型方法，分析了这些方法存在的问题，并展望了未来高性能紫外探测器的发展方向。

关键词： 氧化锌；紫外探测器；元素掺杂；表面修饰；异质结构造

中图分类号： TN23 **文章编号：** 1001－5868(2022)01－0100－10

Research Progresses of Ultraviolet Photodetector Based on Zinc Oxide

KUANG Dan[1], BIAN Shuguang[2], XU Shuang[1], LIU Bin[1], LIU Xianwen[1], YU Zhinong[1]

(1. Thin Film & Display Laboratory, Beijing Engineering Research Center for Mixed Reality and Advanced Display Technology, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, CHN; 2. High Technology Center of the Ministry of Science and Technology, Beijing 100044, CHN)

Abstract: Zinc oxide (ZnO) is a natural semiconductor with a theoretical bandgap of 3.37 eV. It has become one of the most popular materials in the application of ultraviolet photodetectors in recent years. However, due to the intrinsic defects of ZnO, the directly prepared ZnO ultraviolet photodetectors always display low responsivity, high dark current and slow response speed. To obtain the better performance of ultraviolet photodetectors, various feasible methods for performance improvement and modification are proposed. In this paper, the typical methods to improve the performance of ZnO ultraviolet photodetectors are reviewed from the three aspects of element doping, surface modification and hetero-structure construction, the existing problems of these methods are pointed out and the potential development of high-performance ultraviolet photodetectors in the future is prospected.

Key words: ZnO; ultraviolet photodetectors; elements doping; surface modification; hetero-structure construction

0 引言

ZnO是一种呈白色或淡黄色的晶体，具有三种不同的晶体结构，分别为立方岩盐矿结构、立方闪锌矿结构和六方纤锌矿结构。其中，六方纤锌矿结构是ZnO最常见和最稳定的晶体结构。ZnO材料有两种形态：薄膜材料[1-3]和纳米材料[4-6]，其中纳米材料具有更大的比表面积和更高的结晶度。常见的ZnO材料制备方法有化学气相沉积[7-9]、水热法[10-12]和溶胶-凝胶法[13-15]等。

紫外探测器在军事、工业、环境、消防、净水、空

收稿日期：2021－10－19.

基金项目：国家自然科学基金项目(61874009).

* **通信作者：**卞曙光，喻志农

E-mail： jeanbsg@htrdc.com；znyu@bit.edu.cn

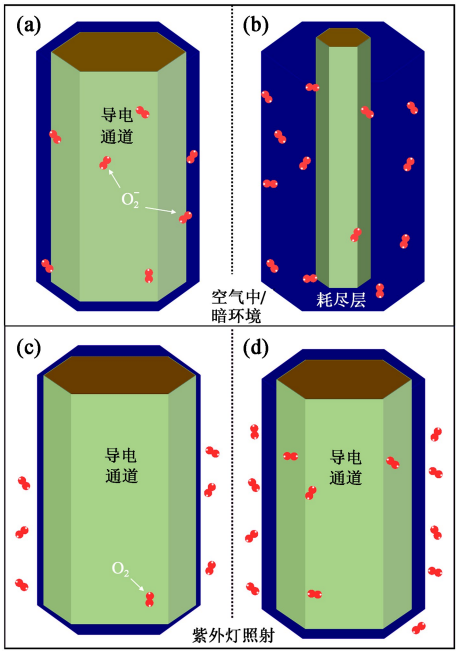
间等领域都有广泛的应用需求。在紫外探测器材料中，ZnO 是研究最多的材料之一。因为它具有宽的直接带隙（3.37 eV），室温下的激子结合能为 60 meV，且可展现出压电性、热释电性。这些性质使得 ZnO 紫外探测器有着巨大的发展和应用潜力。

尽管 ZnO 有许多优点，但在制备过程中，缺乏控制其固有缺陷的手段，为器件的实际应用带来了阻碍。由于固有缺陷的存在，单纯的 ZnO 紫外探测器件的性能较差，具体表现为暗电流大、响应率低、响应速度慢，无法满足实际应用需要。为了获得高性能的 ZnO 紫外探测器，可以从器件结构和材料制备两个角度对器件性能进行调控。本文根据近年有关高性能 ZnO 紫外探测器的报道，将从材料制备角度调控器件性能的方法分为三类：元素掺杂、表面修饰和异质结构造，对其中的典型例子进行了评述和总结，并对未来高性能 ZnO 紫外探测器的发展进行了展望。

1　元素掺杂

通过元素掺杂，可以调节 ZnO 的性质，提升紫外探测器的性能。常见的掺杂元素有银（Ag）、铝（Al）、铜（Cu）、镁（Mg）、镓（Ga）、钴（Co）、铁（Fe）、铟（In）、锂（Li）等。除了单元素掺杂外，多元素掺杂也可以实现 ZnO 材料的调节和器件性能的改善。最常见的元素掺杂是 In 和 Ga 共掺 ZnO[7]，另外还有 Co 和 Ni 共掺[12]，Mg 和 Be 共掺[16]等。

2016 年，Lupan 等[17]报道了采用电子束沉积方法制备 Ag 元素掺杂 ZnO 纳米线，实现了单根 ZnO 纳米线的氢气传感器和紫外探测器的性能提升。紫外探测器表现出快速的响应和恢复时间（0.98 s/0.87 s）。Ag 作为受主掺入，降低了材料中的施主密度，增加了 ZnO 纳米线的 Debye 长度。另外，掺杂 Ag 使材料的氧缺陷增加，更多的表面空穴陷阱使得体缺陷与表面缺陷比率降低，表面缺陷密度的增加进而带来材料的界面势垒增加。图 1 是基于离子吸附模型的探测机理说明。2020 年，Shen 等[18]采用水热法制备了不同浓度的 Ag 掺杂 ZnO 微纳光纤紫外探测器，并讨论了 Ag 元素的掺杂浓度对器件性能的影响。结果表明，掺 Ag 可以提升器件的灵敏度，4%浓度的 Ag 掺杂 ZnO 紫外传感器表现出较高的灵敏度：4.33×10^{-5} mW/cm^2。可以看出，Ag 掺杂可以改变 ZnO 的缺陷密度，改善器件性能。



ZnO 纳米线　　ZnO：Ag 纳米线

图 1　单根 ZnO 和 ZnO：Ag 纳米线在室温下的紫外探测机理示意图[17]

n 型 ZnO 通常具有高电阻特性，Al 掺杂 ZnO 常被用于透明导电电极的研究。Al^{3+} 的离子半径为 0.051 nm，小于 Zn^{2+}（0.074 nm），是一种适合的 ZnO 掺杂剂，也可以用于改善 ZnO 紫外探测器的电学和光学性能。2017 年，Wang 等[10]采用水热法在玻璃基底上制备了掺 Al 的 ZnO 纳米棒阵列紫外探测器。器件在 1 V 偏压下，实现了光暗电流比为 1.4×10^3，响应率为 181 A/W，并通过低频噪声测试获得了 1.17×10^{-11} W 的等效噪声功率和 4.03×10^{12} Jones 的探测率。与 ZnO 相比，ZnO：Al 性能的提高主要是由于 Al 原子的掺杂促进了光生电子的产生。

研究证明，过渡金属掺杂 ZnO 可以获得室温铁磁特性，使材料能够调节能级和表面态，从而导致 ZnO 纳米结构的电学和光学特性的变化。Co 是一种过渡金属，Shabannia[19]于 2018 年通过化学水浴沉积制备了掺 Co 的 ZnO 纳米棒阵列，在 5 V 偏压下获得了响应率为 8.76 A/W，光暗电流比为 250，响应时间为 0.229 和 0.276 s。2020 年，Kim 团队[12]在 150 ℃水热法下实现了 Co 和 Ni 共掺杂 ZnO 纳米棒阵列，器件响应率为 137 A/W，光暗电流比为 135，响应时间为 2.2 和 3.7 s。可以看出，Co 掺杂对 ZnO 器件的研究仍处于初级阶段，元素掺杂水平和器件性能调控仍有待进一步研究。

ZnO本质上是一种n型半导体,这是由于锌的空隙或氧空位的存在,制备稳定和可复制的p型ZnO仍有难度。元素掺杂是实现p型ZnO制备的重要途径。目前已知最适合ZnO p型掺杂的掺杂剂是Ⅴ族元素,包括氮(N),磷(P),砷(As),锑(Sb)。2014年,Hsu等[20]报道了p型Cu掺杂ZnO/n型ZnO同质结纳米线紫外光电探测器,不仅成功制备了p型ZnO,还实现了ZnO p-n结在紫外探测器件的应用。在1 400和1 700 ℃的高温反应下ZnO纳米线中的Cu含量分别为1.93%和3.01%。Cu掺杂增加了ZnO的电离氧空位,降低了纳米线的电导率。然而紫外探测器的光电性能仍有待提高。2018年Shabannia[21]报道了采用化学水浴沉积法在聚萘二甲酸乙二醇酯(PEN)衬底上合成垂直排列的Cu掺杂ZnO纳米棒。在5 V偏压下,Cu掺杂ZnO纳米棒光电探测器的光暗电流比为219,在365 nm紫外光下的响应时间和恢复时间分别为0.317和0.212 s。Fe元素也可以掺杂ZnO。2014年,Chey等[22]报道了水热法Fe掺杂ZnO,实现了器件响应率为2.33 A/W,时间响应为5 s。2017年Salah等[23]采用喷雾热解技术在玻璃基板上沉积了不同比例的掺Li ZnO薄膜。PL测试表明,材料的光致发光强度随着Li掺杂浓度的增加而增加,薄膜中缺陷的密度则随着Li掺杂浓度的增加而降低。这几种元素的掺杂虽然在一定程度上提升了器件性能,但目前仍缺乏对掺杂器件性能改善的系统研究和深入探讨。

2020年,Young等[24]采用化学沉积工艺在柔性PEN基板上制备了高密度掺Ga ZnO纳米棒紫外探测器。在1 V偏压下,掺杂Ga后,器件的光暗电流比由8.5提高到570.2。文中提到,在这些金属掺杂剂中,Ga是一种很好的选择,因为与Al—O(0.27 nm)和In—O(0.21 nm)的共价键长度相比,Ga—O的共价键长度(0.192 nm)与Zn—O的共价键长度(0.197 nm)相当;Ga(0.062 nm)和Zn(0.074 nm)的离子半径几乎相同。基于这些原子参数和键合特性,ZnO晶格的畸变可以忽略不计。因此,Ga掺杂引起的ZnO纳米棒结构晶格变形最小,且Ga掺杂后的低缺陷密度也有望抑制电子复合。但是,实验器件中的时间响应特性较差。

Mg对ZnO的掺杂在各种金属元素掺杂中是最常见的。ZnMgO(ZMO)具有与纯ZnO相同的材料优势,而且理论上其带隙从3.37 eV(ZnO)到7.8 eV(MgO)可连续调节,覆盖UVA(320～400 nm)、UVB(280～320 nm)和UVC(200～280 nm)区域,这为制备ZMO波长可调紫外(200～400 nm)光电器件提供了可能。根据Mg掺杂含量的不同,ZMO的晶相可以分为立方岩盐ZMO(cubic ZMO,c-ZMO)、纤锌矿ZMO(wurtzite ZMO,w-ZMO)和混相ZMO(mixed-phase ZMO,m-ZMO)。w-ZMO的研究结果已较为成熟,很多研究都将w-ZMO作为基础材料进行其他的扩展研究[25-26]。虽然w-ZMO光电探测器通常具有较大的响应率,但其暗电流也相对较高。相比之下,c-ZMO光电探测器具有低暗电流和低响应性。而且,在没有缓冲层的情况下,高掺杂率的c-ZMO会发生相分离,带隙在280～300 nm的单纯的c-ZMO很难获得。2015年,Fan等[27]利用等离子体辅助分子束外延技术成功地在a-Al_2O_3上制备了单光吸收边可调谐的m-ZMO薄膜,并分析了c-ZMO,w-ZMO和m-ZMO衬底之间的相互作用。基于m-ZMO薄膜的紫外光探测器在−3 dB下截止波长为335～275 nm。其中截止波长为330 nm(m-$Z_{0.67}M_{0.33}O$),320 nm(m-$Z_{0.59}M_{0.41}O$)和280 nm(m-$Z_{0.39}M_{0.61}O$)的器件在40 V时的暗电流分别为78,11和4 pA。峰值响应率分别为434,89.8和3.7 A/W。从共振拉曼光谱中可以看出,c-ZMO和w-ZMO之间的晶界是m-ZMO光电探测器高性能的主要原因。图2是混相ZnMgO的界面状态和能带图解。除了常见的探测器性能参数,器件的噪声参数也是研究重点之一。2018年,Young等[28]在MZO纳米棒光电探测器上进行低频电流噪声测量,在黑暗和紫外光照射下均观察到$1/f$噪声。另外,基于UVC波段的MZO紫外探测器也是

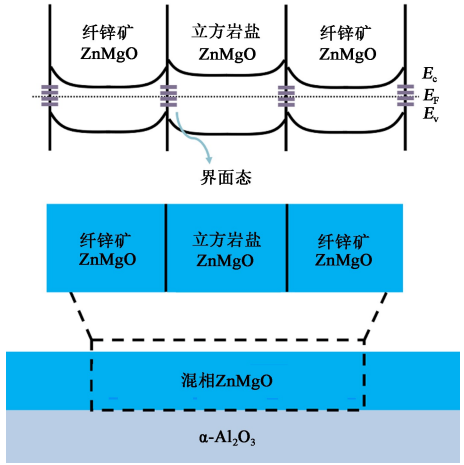


图2 混相ZnMgO的界面状态和能带图解[27]

一个研究热点。2018 年，Azhar 等[29]采用气相输运合成 MZO 纳米线阵列实现了选择性 UVC 探测。热处理后的样品在 UVA 下光电导率受到抑制，而在 UVC 下光电导率保持不变。O_2 退火过程导致与热扰动相关的氧缺陷增加。虽然关于 Mg 掺杂 ZnO 的研究有很多，但是要实现高掺杂，对制备条件的温度要求仍然很高，且由于高掺杂很容易出现相分离，对器件性能的稳定性难以把控，所以 MgZnO 在高性能紫外探测器中的应用仍需更多探索。

在多元金属元素共掺杂 ZnO 中，最具代表性的是 In-Ga-ZnO[7,30]。三种金属元素的化学计量比对材料性质和器件性能的影响尤为显著。In-Ga-ZnO 材料为高迁移率薄膜晶体管的发展提供了动力。最佳 Ga 浓度和超晶格结构可能会调节载流子浓度，同时降低氧空位浓度，从而改善晶体管的性能。一般来说，超晶格纳米线是光电探测器的首选活性通道材料，因为它们具有独特的能带结构和能带排列，从而能够更有效地分离和收集光生载流子。2019 年，Li 等[7]成功地利用 InGaZnO 晶体纳米线阵列通道制备了高性能透明紫外探测器（如图 3）。基于最佳 Ga 浓度（即 $In_{1.8}Ga_{1.8}Zn_{2.4}O_7$），单根纳米线器件表现出优秀的响应率（$1.95\times10^5$ A/W）和外量子效率（EQE）（9.28×10^7 %）。器件的上升时间和衰减时间分别为 0.93 和 0.2 s。此外，所获得的纳米线还可以在玻璃基板上制作成大规模的平行阵列，从而实现完全透明的紫外光探测器。可以看出 IGZO 共掺材料在紫外探测领域具有巨大潜力，但其紫外响应波段的范围仅局限于 UVA。

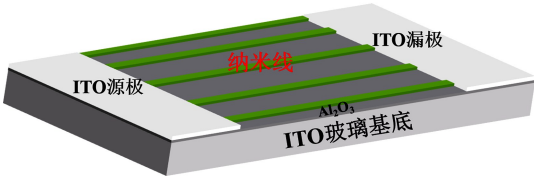


图 3　InGaZnO 晶体纳米线阵列全透明紫外探测器结构[7]

2　表面修饰

表面等离子体是金属纳米粒子的一种独特性质，已被广泛应用于提高光电器件的性能。总得来说，表面等离子体的构建是利用各种沉积技术，在材料表面形成金属纳米颗粒层，表面的金属纳米颗粒可以增强入射光子的散射，使更多的光子到达基板，从而增强光子的吸收，这为 ZnO 紫外探测器的性能提高提供了一种新的思路。常见的金属纳米颗粒有铂（Pt）、银（Ag）、金（Au）等。2014 年，Tian 等[31]采用射频磁控溅射技术在石英衬底上生长了高质量的 ZnO 薄膜，并在该薄膜上制备了紫外探测器。在器件表面溅射金属 Pt 纳米粒子，使光电探测器的响应率从 0.836 A/W 提高到 1.306 A/W。ZnO 薄膜的吸收在紫外波段有部分增强，这表明 Pt 纳米颗粒表面等离子体发生了共振，增强了入射光的散射，使得更多的光散射在 ZnO 薄膜上，从而增强了光吸收。这在提高光电探测器的性能方面起着关键作用。并且时域有限差分法仿真结果也证实了吸收增强的结论。2016 年，Sarkar 等[13]报道了在 ZnO 薄膜上沉积 Ag 纳米岛，由于存在局域表面等离子体效应，构成的 Ag－ZnO 紫外探测器的光致发光和光响应特性得到增强。2015 年，Shao 团队[32]采用介电电泳（Dielectrophoresis，DEP）法将溶液中的 Au 纳米粒子吸引到 ZnO 纳米线的表面，研究表明，Au 纳米粒子在 ZnO 纳米线表面的 DEP 吸附显著提高了 ZnO 纳米线紫外探测器的响应率和响应速度。用 Au 纳米粒子修饰 ZnO 纳米线后，ZnO 纳米线表面产生了大量的局部肖特基接触，器件的暗电流下降，光电流增加，恢复时间从 22 s 降低到 1.5 s。这里的 Au 粒子与 ZnO 纳米线形成的肖特基势垒是器件响应时间减少的原因，在其他的表面等离子体修饰中未被报道。2020 年，Li 等[33]制备了 ZnO/Au/MgZnO/SiO_2 夹层结构的双波长紫外探测器，并着重研究了 Ag 纳米粒子局域表面等离子体的影响。结果表明，Ag 纳米粒子位置的修饰对双波长紫外探测器的性能有显著影响。与在探测器表面装饰 Ag 纳米粒子相比，在 MgZnO 和 ZnO 薄膜之间嵌入 Ag 纳米粒子可以显著改善由 MgZnO 和 ZnO 引起的双峰响应。通过计算双层（MgZnO 和 ZnO）的响应增强比，结果表明，MgZnO 的增强比 ZnO 的增强比高。这是由于与 MgZnO 能量匹配的局域表面等离子优于 ZnO。MgZnO/Au/Ag NPs/ZnO 夹层结构的紫外探测器具有较高的响应率和抑制比（达 10^3）。

与金属粒子有关的表面修饰提升 ZnO 紫外探测器性能，主要是基于表面等离子体共振增强入射光散射的机制。总体来说，金属修饰主要调制的是器件的电流特性，改善了器件的光暗电流比，对时间响应的改善较弱。为了提升器件的时间特性，还需

对其他修饰材料进行探索。在有机物修饰 ZnO 基紫外探测器中，石墨烯无疑是最受关注的材料之一。石墨烯是一种由单层碳原子组成的紧密排列的二维蜂窝状晶格，是目前最热门的材料之一。由于具有高导电性、超高迁移率和高透明度等物理特性，石墨烯目前已成功应用于各种 ZnO 纳米结构上，包括光伏器件、高灵敏度柔性气体传感器、透明柔性场发射器件和超级电容等。这里将介绍有关石墨烯修饰 ZnO 紫外光探测的研究现状。用透明导电的石墨烯修饰 ZnO，可以在光吸收和电子输运方面产生协同效应，从而提高器件性能。2017 年，Duan 等[34]制备的一种基于石墨烯/ZnO：Al 纳米棒阵列结构的肖特基紫外探测器。该光电探测器具有稳定的肖特基势垒，在紫外光照射下不会消失，这是实现自供电器件的关键。提高肖特基势垒稳定性的关键是两步表面处理工艺。结果表明，自供电光电探测器的紫外-可见光抑制比约为 1×10^2，响应率为 0.039 A/W，上升时间为 37 μs，衰减时间为 330 μs。2017 年，Gong 等[35]直接在石墨烯场效应晶体管沟道上打印 ZnO 量子点，制备了紫外探测器，如图 4 是 ZnO 量子点上阻挡电荷转移的 Zn(Ac)壳移除前后的能带图以及对 ZnO 量子点与石墨烯之间电荷转移的影响。器件由于 ZnO 量子点的强量子约束和石墨烯的高电荷迁移率的结合而具有很高的光电导增益。其中高性能的关键是有一个干净的范德华界面，这促进了在紫外照明下 ZnO 量子点到石墨烯的有效电荷转移。器件的响应率为 9.9×10^8 A/W，光电导增益为 3.6×10^9，探测率为 1×10^{14} Jones。这一结果揭示了范德华界面在 ZnO 量子点/石墨烯光电探测器中影响光电过程的关键作用[35]。2019 年，Cook 等[15]将 ZnO 溶胶凝胶前驱体和石墨烯纳米片(GnPs)混合到复合油墨中，涂覆于加热的 SiO_2/Si 衬底上，形成 ZnO/GnP 块状异质结的光电探测器。在 20 mM GnP 浓度下，当入射紫外功率为 2.2 μW、偏压为 5 V 时，响应率达到 2.2 A/W。相比于采用滴铸工艺的器件响应率 0.13 mA/W，气溶胶打印的器件响应率为 0.5 A/W，喷墨打印的 ZnO/GnP 性能提升主要归功于 ZnO/GnP 的异质结与改进的界面使载流子的分离和电荷输运更高效。

可以看出，在 ZnO 紫外探测器中引入石墨烯，可以有效地提高紫外探测器件的电流响应和时间响应。这与石墨烯超高的电子迁移率有关。另外石墨烯和 ZnO 之间的界面状态对器件的电学性能也有很大影响。

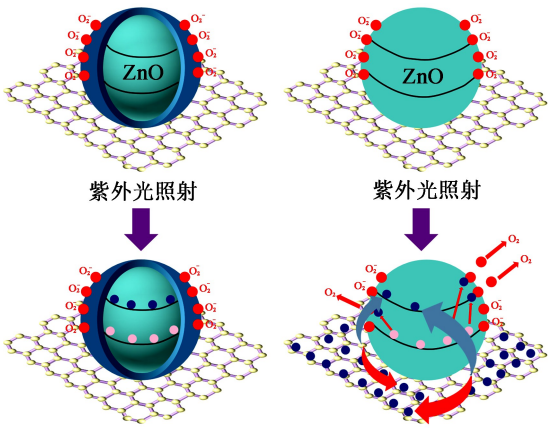


图 4 在石墨烯场效应晶体管沟道上打印 ZnO 量子点紫外探测器示意图[35]

除了石墨烯之外，还有一些其他的有机物被用来修饰 ZnO 紫外探测器，也实现了很好的探测效果。2018 年，Yang 等[36]制备了 $CH_3NH_3PbCl_3$/ZnO 紫外光电探测器。$CH_3NH_3PbCl_3$ 与 ZnO 之间的光诱导电子转移以及 $CH_3NH_3PbCl_3$ 在 ZnO 薄膜上的高结晶性是器件性能提升的主要原因。器件的响应率和响应时间分别为 1.47 A/W 和～1.2 s。2018 年，Zhang 等[37]在氧化铟锡涂层的 PET 基片上制备了柔性紫外探测器，通过控制活性层的微结构和厚度来实现光响应。纳米复合活性层由 ZnO 纳米颗粒和宽带隙共轭聚合物 F8T2 组成(如图 5)。在 15 V 偏压下，光电探测器的 EQE 在 360 nm 光照下达到 2 170%，510 nm 光照下达到 220%，且 EQE 峰值的半高宽均小于 20 nm。而且器件在拉伸和压缩弯曲后表现出良好的光响应稳定性，响应速度基本不变。2019 年，Chen 等[38]在 ZnO 纳米线和栅介质之间引入一层薄薄的聚 2-乙烯萘(PVN)，利用 PVN 层中捕获电子产生的静电场来消耗缺陷诱导的载流子，成功地将暗电流从 2.2×10^{-9} A 降至 1.6×10^{-14} A。器件获得了较大的光暗电流比(大于 10^7)、高的响应率(高于 10^6 A/W)和超高的探测率(高于 10^{18} Jones)。2019 年，Zheng 等[39]基于 ZnO 制备了可以通过调节电荷产生位置来有效调节响应谱，从而获得明显的电荷收集效率的器件。ZnO/PTAA 光电器件的紫外响应的半高宽小于 25 nm，且表现出高的光暗电流比(4 650@－1 V)、高响应率(0.1 A/W)以及高响应速度(小于 5 μs)。

可以看出，选择适合的有机材料用于 ZnO 基紫

外探测器修饰可获得很好的性能，如窄带光谱响应、极低的暗电流等，并且有机材料的修饰无需高温，在制备柔性器件上具有优势。

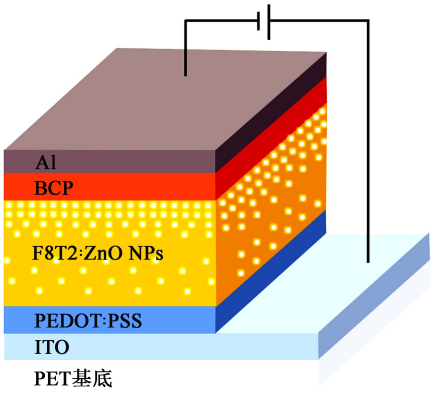


图 5　基于宽禁带共轭聚合物和 ZnO 纳米颗粒的柔性窄带紫外探测器结构图[37]

3　异质结构造

构建异质结是一种有效的调节 ZnO 紫外探测器性能的方法，它可以结合不同功能材料的优点，实现器件性能的有效调节。目前，常用的与 ZnO 构造异质结的材料有氮化铝(AlN)、氮化镓(GaN)、氧化镓(Ga_2O_3)、二氧化钛(TiO_2)、氧化锌镁(MgZnO)、二硫化钼(MoS_2)、氧化镍(NiO)等。这些材料都在不同程度上优化了 ZnO 基紫外探测器的光电特性，特别是响应率和响应速度。2019 年，You 等[40]采用气相输运法和磁控溅射法制备了 ZnO/AlN 核壳纳米线，获得了双紫外波段探测器(如图 6)。在紫外光(325 nm)照射下，ZnO/AlN 核壳纳米线光电探测器的响应率为 2.05×10^4 A/W，响应速度为 28 ms，光暗电流比为 1.1×10^4。在 193 nm 紫外光照射下，光暗电流比为 300，响应率为 381 A/W。

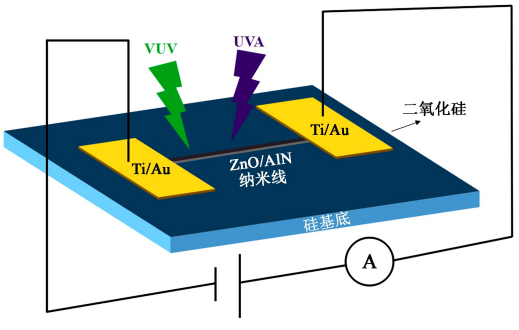


图 6　单根 ZnO/AlN 纳米线光电探测器示意图[40]

2017 年，Wu 等[41]基于晶格匹配，利用激光分子束外延实现了高质量的 β-Ga_2O_3/Ga：ZnO 异质结紫外探测器，该器件可在自供电模式下工作，响应率为 0.763 mA/W，光暗电流比为～127，上升/衰减时间分别为 0.179 和 0.272 s。2017 年，Zhao 等[42]采用一步化学气相沉积法合成了高度结晶的单根 ZnO/Ga_2O_3 核壳异质结构纳米线，并将其制成自供电的日盲光探测器，ZnO/Ga_2O_3 的截止波长为 266 nm。该器件在 251 nm 处表现出超高的响应率(9.7 mA/W)，在零偏压下的紫外/可见抑制比($R_{251\ nm}/R_{400\ nm}$)为 6.9×10^2，上升时间小于 100 μs，衰减时间小于 900 μs。2019 年，You 等[43]采用气相输运法制备了垂直排列的 ZnO 纳米线阵列，并通过溅射法制备了 20 nm 厚的 Ga_2O_3 壳层，形成了 ZnO/Ga_2O_3 纳米线阵列，可实现自驱动的日盲光电探测器。该器件表现出了优异的光敏特性，光暗电流比为 2.64×10^4，探测率为 6.11×10^{12} Jones，在 254 nm 及 0 V 下的响应率为 137.9 mA/W，上升时间接近 28.9 μs，下降时间接近 85.7 μs。这可以归因于独特的核壳纳米结构以及 ZnO 与 Ga_2O_3 界面处可以快速分离光生载流子的内置电场。图 7 展示了 ZnO/Ga_2O_3 核壳纳米线在 0 V 偏压下的能带图。

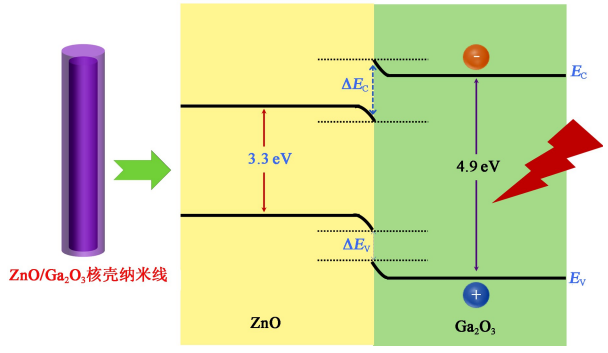


图 7　ZnO/Ga_2O_3 核壳纳米线在 0 V 偏压下的能带图[43]

2020 年 Goswami 等[44]利用等离子体辅助分子束外延技术在硅衬底上生长垂直排列的 GaN 纳米塔，与 ZnO 纳米棒构成异质结，并在表面修饰 Au 纳米粒子，设计了一种高响应的紫外光电探测器。该器件获得了高的响应率、探测率以及外量子效率，分别为 7 042 A/W，1.84×10^{14} Jones 和 2.7×10^6%。2020 年，Zhu 等[9]采用等离子体辅助分子束外延技术在蓝宝石衬底上生长了高质量的 p-GaN 薄膜，然后采用金属有机化学气相沉积技术在 p-GaN 表面沉积了 n-ZnMgO 层。p-GaN/n-ZnMgO 异质结光电探测器在零偏置电压下，362 nm 处的峰值响应率为 196 mA/W。器件上升

时间和衰减时间分别为 1.7 和 3.3 ms。

2018 年，Ning 等[45]通过磁控溅射在 ZnO 纳米颗粒上沉积 MoS_2 薄层，实现了一种高性能的 ZnO-MoS_2 核壳纳米柱阵列光电探测器。ZnO 纳米颗粒具有较强的光阱效应，大大提高了薄层 MoS_2 的吸光能力。结果表明，ZnO 纳米颗粒/MoS_2 核壳阵列光电探测器表现出从紫外到可见光和近红外的宽带响应。与 ZnO/MoS_2 平面异质结相比，ZnO 纳米颗粒/MoS_2 光电探测器的光电流提高了 60 倍。2019 年，Zhou 等[46]对有无修饰 ZnO 量子点的 MoS_2 单分子层光电探测器进行了比较研究。与单分子层 MoS_2 光电探测器相比，单分子层 ZnO 量子点/MoS_2 混合器件具有更快的响应速度（分别为 1.5 和 1.1 s）、更宽的光响应范围（深紫外-可见）、更强的可见光响应能力，大于 0.084 A/W 的响应率和 1.05×10^{11} Jones 的探测率。这是在接触界面形成Ⅰ型异质结构，大量载流子由 ZnO 量子点注入 MoS_2 中的结果。2020 年，Zhang 等[47]提出通过构建二维 MoS_2 薄片/一维 ZnO 纳米线的异质结构来实现高性能光电探测器。将一维 ZnO 集成到 p 型或 n 型 MoS_2 上，形成二维 MoS_2/一维 ZnO 混合异质结构光探测器，不仅拓宽了器件的光响应范围，而且提高了响应率和响应时间。在 365 nm 光照下，p-MoS_2/n-ZnO PDs 的响应率、外量子效率和响应时间分别高达 24.36 A/W，8.28×10^3 %和 0.9 s。在 532 nm 光照下，响应率为 0.35 A/W，外量子效率为 80.9%，响应时间为 140 ms。

2017 年 Fan 等[48]在 Ag/ZnMgO/ZnO 垂直结构上实现了自供电的紫外光电探测器。采用 ZnO 外延层作为 ZnMgO 生长的缓冲层。由于 Ag/ZnMgO 和 ZnMgO/ZnO 界面的内置电场，器件表现出明显的自供电特性。在 0 V 时，该器件在 275 nm 处的峰值响应率为 16 mA/W，响应速度为 24 μs 的上升时间和 300 μs 的衰减时间。2021 年，本研究组[49]采用水热法和射频磁控溅射法合成了 ZnO/ZnMgO 核壳纳米棒阵列，并将其构造为双紫外波长光电探测器。在 254 和 365 nm 光照下，光暗电流比分别为 3.66×10^4 和 4.33×10^4。在 245 nm 下的上升时间为 4.186 s，衰减时间为 4.352 s，365 nm 下的上升时间为 1.217 s，衰减时间为 1.397 s。该核壳纳米结构器件的优异性能得益于界面区内建电场的形成和壳层包覆 ZnMgO 的钝化效果。

2013 年，Ni 等[50]制备了 n-ZnO/p-NiO 核壳纳米线阵列紫外探测器。器件在 370 nm 处具有窄带光谱响应。2014 年，Kim 等[51]制备了具有高外量子效率（25300%）的 p-NiO/n-ZnO 异质结紫外光电探测器。采用溶液法制备的 NiO 薄膜和 ZnO 薄膜分别作为 p 型和 n 型材料。探测器的高增益是由于在 NiO 薄膜中的光生空穴在 ITO/NiO 界面发生了界面陷阱诱导的电荷注入。2020 年，Wei 等[52]采用化学水浴沉积制备了基于 NiO 纳米片/ZnO：Al 纳米棒阵列异质结的自供电紫外二极管。在前驱体溶液中加入 Al^{3+} 离子对 ZnO 纳米棒的晶体质量、光学和电学性能进行了改性。ZnO：0.5%Al 纳米棒异质结器件表现出一个狭窄的紫外光谱选择性，在 0 V 偏压，378 nm 0.2 mW/cm^2 下响应率为 85.12 mA/W，探测率为 1.74×10^{12}，响应速度为～2 ms。NiO/ZnO 异质结大的内建电场为光生载流子的分离和转移提供了强大的驱动力，减少了载流子的复合，从而提高了自驱动异质结器件的光响应性能。

2015 年，Zhang 等[53]采用水热法在 FTO 上合成了 TiO_2 纳米线阵列，并用结晶法制备 ZnO 对其进行修饰。基于 TiO_2/ZnO 异质结制备的紫外探测器具有较高的光电性能，光暗电流比可达 4 个数量级。异质结内建电场促进了电子空穴对的分离，产生了大的光电流和高响应率（150 A/W）。2018 年，Hsu 等[54]分别采用光化学、溶胶凝胶和水热方法在玻璃基底上依次制备了 Au 纳米粒子、TiO_2 纳米片和 ZnO：Y 纳米线。Au 纳米粒子/TiO_2 纳米片/ZnO：Y 纳米线的光暗电流比为 1 786，器件响应速度得到提高。2020 年 Asib 等[55]以 TiO_2 为种子层，采用水热法制备了 ZnO 纳米棒阵列。TiO_2：ZnO 纳米棒紫外传感器与 TiO_2 和 ZnO 纳米棒相比，更小的 ZnO 纳米棒体积和 TiO_2 种子层的组合使得器件吸收紫外光的效率提升，对紫外光的响应速度更快，响应率更高（0.17 A/W）。2020，Zhou 等[56]采用静电纺丝和脉冲激光沉积相结合的方法成功合成了大面积水平排列的 ZnO 纳米管（ZNT）、TiO_2 纳米管（TNT）、TiO_2-ZnO 核壳纳米管（TZNT）和 ZnO-TiO_2 核壳纳米管（ZTNT）（如图 8）。这些样品的光致发光（PL）光谱表明，TiO_2 层的加入大大降低了光致载流子在异质结纳米管中的复合。在基于上述样品制备的光探测器中，取向 ZTNT 的器件具有最佳的紫外响应和较短的响应恢复时间。此外，在加热条件下，ZTNT 和 TZNT 的器件性能进一步提高。在光功率密度为 4.9 mW/cm^2、偏压为 1 V 的

365 nm 紫外辐射条件下，ZTNT 的光暗电流比、响应率、探测度和外部量子效率分别为 388，450 μA/W，1.1×10^{10} Jones 和 0.15%。

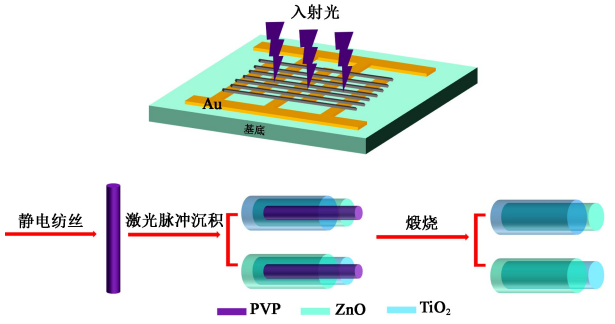


图 8　TiO_2 和 ZnO 核壳结构紫外探测器的对比[56]

4　展望

ZnO 作为最具代表性和最受关注的第三代半导体材料，其优异的物理化学特性、易获得的原料来源、良好的晶体结构使其在许多应用领域都有着巨大的发展前景和研究潜力。就紫外探测领域而言，如何克服 ZnO 自身的固有缺陷，使器件具有高响应率、低暗电流、快响应速度，多方面提升器件性能是目前研究需要解决的问题。元素掺杂、表面修饰以及异质结构造是改善 ZnO 基紫外探测器最常见的方式。不同元素与 ZnO 的掺杂可以使探测器的性能得到不同程度、不同类型的改善，包括缺陷调控、电子浓度、p 型 ZnO、能带调节等。掺杂工艺和元素配比是提升器件性能的关键。然而，目前对不同元素的掺杂工艺仍处于发展阶段，如过渡金属元素的掺杂虽然可以使 ZnO 获得室温铁磁特性，但实际的掺杂工艺和在紫外探测领域的应用仍有待深入研究；p 型 ZnO 的制备和研究仍然是一个难点，元素掺杂为获得稳定可靠的 p 型 ZnO 提供了可能性，但仍需要更多的研究和发展；Mg 掺杂 ZnO 可以对材料禁带进行灵活地调节，这极大地扩展了 ZnO 基紫外探测器的探测光谱，然而高 Mg 掺杂却不易实现，因此需要更加深入材料制备工艺的探索和元素掺杂机理的研究。包括多种的金属纳米颗粒，超高迁移率的石墨烯以及其他有机物在内，表面修饰使 ZnO 基紫外探测器的性能得到提升和拓展，而其中应重点关注器件的界面构造。局域表面等离子体共振效应增强了入射光的散射，提高了材料对紫外光的入射效率，有效地提升了器件的电流特性；石墨烯对 ZnO 的修饰在光吸收和电子输运方面产生协同效应，优化了器件电流特性和时间响应；多样的有机物修饰不仅扩展了 ZnO 基紫外探测器的性能，例如窄光谱响应、暗电流抑制等，还为 ZnO 基紫外探测器的柔性发展拓宽了道路。如何改进界面接触获得良好的界面构造是表面修饰提升器件性能的前提。通过结合不同的功能材料与 ZnO 形成异质结来优化器件性能的关键是界面势垒的形成。合适的界面结构形成的内建电场可以促进光生载流子的快速分离和转移，进而实现器件的响应率和响应时间的优化和改进。然而，两种材料如何制备异质结以及如何构造内建电场需要对材料能带的匹配和接触势垒的性质进行分析和研究。由此可知，单个改善 ZnO 基紫外探测器性能方法在全面提升器件性能和制备材料工艺方面有着许多挑战，多种改善手段的匹配和融合或许将是进一步突破 ZnO 基紫外探测器性能局限的方向之一。

参考文献：

[1] Duan Y, Cong M, Jiang D, et al. ZnO thin film flexible UV photodetectors: Regulation on the ZnO/Au interface by piezo-phototronic effect and performance outcomes[J]. Advanced Materials Interfaces, 2019, 6(16): 201900470.

[2] Xuan Z, Jiang D, Yang X, et al. Voltage-dependent responsivity of ZnO Schottky UV photodetectors with different electrode spacings[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 284: 12-16.

[3] Zhao X, Jiang D, Zhao M, et al. Avalanche effect and high external quantum efficiency in MgZnO/Au/ZnO sandwich structure photodetector[J]. Advanced Optical Materials, 2021, 9(8): 2002023.

[4] Pimentel A, Nunes D, Duarte P, et al. Synthesis of long ZnO nanorods under microwave irradiation or conventional heating [J]. The J. of Physical Chemistry C, 2014, 118(26): 14629-14639.

[5] Mishra Y K, Modi G, Cretu V, et al. Direct growth of freestanding ZnO tetrapod networks for multifunctional applications in photocatalysis, UV photodetection, and gas sensing[J]. ACS Appl. Materials & Interfaces, 2015, 7(26): 14303.

[6] Deka Boruah B, Misra A. Energy efficient hydrogenated-zinc oxide nanoflakes for high performance self powered ultraviolet photodetector[J]. ACS Appl. Materials & Interfaces, 2016, 8(28): 18182-18188.

[7] Li F, Meng Y, Dong R, et al. High-performance transparent ultraviolet photodetectors based on InGaZnO superlattice nanowire arrays[J]. ACS Nano, 2019, 13(10): 12042-12051.

[8] Young S J, Liu Y H, Chang S J, et al. Fabrication of silicon dioxide by photo-chemical vapor deposition to decrease detector current of ZnO ultraviolet photodetectors[J]. ACS Omega,

2020, 5(42): 27566-27571.

[9] Zhu Y, Liu K, Ai Q, et al. A high performance self-powered ultraviolet photodetector based on a p-GaN/n-ZnMgO heterojunction[J]. J. of Materials Chemistry C, 2020, 8(8): 2719-2724.

[10] Wang Z H, Yu H C, Yang C C, et al. Low-frequency noise performance of Al-doped ZnO nanorod photosensors by a low-temperature hydrothermal method [J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2017, 64(8): 1-7.

[11] Santoshkumar B, Kalyanaraman S, Thangavel R, et al. Experimental and theoretical analyses of the nonlinear optical effects in magnesium and copper co-doped zinc oxide nanorods [J]. J. of Alloys and Compounds, 2018, 734: 275-281.

[12] Ajmal H, Khan F, Nam K, et al. Ultraviolet photodetection based on high-performance Co-Plus-Ni doped ZnO nanorods grown by hydrothermal method on transparent plastic substrate[J]. Nanomaterials, 2020, 10(6): 10061225.

[13] Sarkar A, Gogurla N, Bhaktha B N S, et al. Plasmonic enhanced optical characteristics of Ag nanostructured ZnO thin films[J]. Materials Research Express, 2016, 3(4): 046403.

[14] Rana V S, Rajput J K, Pathak T K, et al. Multilayer MgZnO/ZnO thin films for UV photodetectors[J]. J. of Alloys and Compounds, 2018, 764: 724-729.

[15] Cook B, Gong M, Corbin A, et al. Inkjet-printed imbedded graphene nanoplatelet/zinc oxide bulk heterojunctions nanocomposite films for ultraviolet photodetection[J]. ACS Omega, 2019, 4(27): 22497-22503.

[16] Su L, Liu Q, Zhu Y, et al. Post-annealed structural relaxation and phase evolution of quaternary alloy BeMgZnO [J]. ACS Appl. Electronic Materials, 2019, 1(10): 2061-2068.

[17] Lupan O, Cretu V, Postica V, et al. Silver-doped zinc oxide single nanowire multifunctional nanosensor with a significant enhancement in response [J]. Sensors & Actuators B: Chemical, 2016, 223: 893-903.

[18] Shen T, Wang J, Xia Z, et al. Ultraviolet sensing characteristics of Ag-doped ZnO micro-nano fiber [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 307: 111989.

[19] Shabannia R. High-sensitivity UV photodetector based on oblique and vertical Co-doped ZnO nanorods[J]. Materials Lett., 2018, 214: 254-256.

[20] Hsu C L, Gao Y D, Chen Y S, et al. Vertical p-type Cu-doped ZnO/n-type ZnO homojunction nanowire-based ultraviolet photodetector by the furnace system with hotwire assistance[J]. ACS Appl. Materials & Interfaces, 2014, 6 (6): 4277-4285.

[21] Shabannia R. A high photocurrent gain in UV photodetector based on Cu doped ZnO nanorods on PEN substrate[J]. J. of Materials Science: Materials in Electronics, 2018, 29(14): 11646-11652.

[22] Chey C O, Masood A, Riazanova A, et al. Synthesis of Fe-doped ZnO nanorods by rapid mixing hydrothermal method and its application for high performance UV photodetector [J]. J. of Nanomaterials, 2014: 1-9.

[23] Salah M, Azizi S, Boukhachem A, et al. Structural, morphological, optical and photodetector properties of sprayed Li-doped ZnO thin films[J]. J. of Materials Science, 2017, 52(17): 10439-10454.

[24] Young S J, Liu Y H, Shiblee M, et al. Flexible ultraviolet photodetectors based on one-dimensional gallium-doped zinc oxide nanostructures[J]. ACS Appl. Electronic Materials, 2020, 2(11): 3522-3529.

[25] Lee C T, Lin H Y, Tseng C Y. Nanomesh electrode on MgZnO-based metal-semiconductor-metal ultraviolet photodetectors[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 13705.

[26] Li Y, Kuang D, Gao Y, et al. Titania: Graphdiyne nanocomposites for high-performance deep ultraviolet photodetectors based on mixed-phase MgZnO [J]. J. of Alloys and Compounds, 2020, 825: 153882.

[27] Fan M M, Liu K W, Chen X, et al. Mechanism of excellent photoelectric characteristics in mixed-phase ZnMgO ultraviolet photodetectors with single cutoff wavelength[J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2015, 7(37): 20600-20606.

[28] Young S J, Liu Y H. Low-frequency noise properties of MgZnO nanorod ultraviolet photodetectors with and without UV illumination-ScienceDirect[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 269: 363-368.

[29] Azhar E A, Vanjaria J, Ahn S, et al. Vapor-transport synthesis and annealing study of $Zn_xMg_{1-x}O$ nanowire arrays for selective, solar-blind UV-C detection [J]. ACS Omega, 2018, 3(5): 4899-4907.

[30] Zhou H T, Li L, Chen H Y, et al. Realization of a fast-response flexible ultraviolet photodetector employing a metal-semiconductor-metal structure InGaZnO photodiode[J]. RSC Advances, 2015, 5: 87993-87997.

[31] Tian C, Jiang D, Li B, et al. Performance enhancement of ZnO UV photodetectors by surface plasmons[J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2014, 6: 2162-2166.

[32] Ding H, Shao J, Ding Y, et al. One-dimensional Au-ZnO heteronanostructures for ultraviolet light detectors by a two-step dielectrophoretic assembly method [J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2015, 7: 12713-12718.

[33] Li M, Zhao M, Jiang D, et al. Optimizing the performance of ZnO/Au/MgZnO/SiO_2 sandwich structured UV photodetectors by surface plasmons in Ag nanoparticles[J]. Appl. Phys. A, 2020, 126: 03486.

[34] Duan L, He F, Tian Y, et al. Fabrication of self-powered fast-response ultraviolet photodetectors based on graphene/ZnO : Al nanorod-array-film structure with stable Schottky barrier[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9 (9): 8161.

[35] Gong M, Liu Q, Cook B, et al. All-printable ZnO quantum dots/graphene van der Waals heterostructures for ultrasensitive detection of ultraviolet light[J]. ACS Nano, 2017, 4(4): 4114-4123.

[36] Yang J, Liu K, Cheng Z, et al. An investigation of interface effect on the performance of $CH_3NH_3PbCl_3$/ZnO UV photodetectors[J]. ACS Appl. Materials & Interfaces, 2018, 10(40): 34744-34750.

[37] Zhang, Xiaoyu, Zheng E, Esopi M R, et al. Flexible narrowband ultraviolet photodetectors with photomultiplication based on wide band gap conjugated polymer and inorganic nanoparticles[J]. ACS Appl. Materials & Interfaces, 2018, 10: 24064-24074.

[38] Chen T, Gao X, Zhang J Y, et al. Ultrasensitive ZnO nanowire photodetectors with a polymer electret interlayer for minimizing dark current[J]. Advanced Optical Materials, 2020, 8(4): 1901289.1-1901289.7.

[39] Zheng M, Xu Y, Wang X, et al. ZnO-based ultraviolet photodetectors with tunable spectral responses[J]. Physica Status Solidi (RRL)-Rapid Research Lett., 2019, 13: 201900441.

[40] You D, Xu C, Zhao J, et al. Single-crystal ZnO/AlN core/shell nanowires for ultraviolet emission and dual-color ultraviolet photodetection[J]. Adv. Opt. Materials, 2019, 7(6): 1801522.1-1801522.8.

[41] Wu Z P, Jiao L, Wang X, et al. A self-powered deep-ultraviolet photodetector based on an epitaxial Ga_2O_3/Ga：ZnO heterojunction[J]. J. of Materials Chemistry C, 2017, 5: 8688-8693.

[42] Zhao B, Wang F, Chen H, et al. An ultrahigh responsivity ($9.7\ mA \cdot W^{-1}$) self-powered solar-blind photodetector based on individual ZnO-Ga_2O_3 heterostructures[J]. Adv. Functional Materials, 2017, 27: 201700264.

[43] You D, Xu C, Zhao J, et al. Vertically aligned ZnO/Ga_2O_3 core/shell nanowire arrays as self-driven superior sensitivity solar-blind photodetectors[J]. J. of Materials Chemistry C, 2019, 7: 3056-3063.

[44] Goswami L, Aggarwal N, Singh M, et al. GaN nanotowers grown on Si(111) and functionalized with Au nanoparticles and ZnO nanorods for highly responsive UV photodetectors[J]. Appl. Nano Mater., 2020, 3(8): 8104-8116.

[45] Ning L, Jiang T, Shao Z, et al. Light-trapping enhanced ZnO-MoS_2 core-shell nanopillar arrays for broadband ultraviolet-visible-near infrared photodetection[J]. J. of Materials Chemistry C, 2018, 6: 7077-7084.

[46] Zhou Y H, Zhang Z B, Xu P, et al. UV-visible photodetector based on Ⅰ-type heterostructure of ZnO-QDs/monolayer MoS_2[J]. Nanoscale Research Lett., 2019, 14(1): 364.

[47] Zhang J, Liu Y, Zhang X, et al. High-performance ultraviolet-visible light-sensitive 2D-MoS_2/1D-ZnO heterostructure photodetectors[J]. Chemistry Select., 2020, 5(11): 3438-3444.

[48] Fan M M, Liu K W, Chen X, et al. A self-powered solar-blind ultraviolet photodetector based on a Ag/ZnMgO/ZnO structure with fast response speed[J]. RSC Advances, 2017, 7(22): 13092-13096.

[49] Kuang D, Cheng J, Li X, et al. Dual-ultraviolet wavelength photodetector based on facile method fabrication of ZnO/ZnMgO core/shell nanorod arrays[J]. J. of Alloys and Compounds, 2020, 860: 157917.

[50] Ni P N, Shan C X, Wang S P, et al. Self-powered spectrum-selective photodetectors fabricated from n-ZnO/p-NiO core-shell nanowire arrays[J]. J. of Materials Chemistry C, 2013, 1(29): 4445-4449.

[51] Kim D Y, Ryu J, Manders J, et al. Air-stable, solution-processed oxide p-n heterojunction ultraviolet photodetector[J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2014, 6(3): 1370-1374.

[52] Wei C, Xu J, Shi S, et al. The improved photoresponse properties of self-powered NiO/ZnO heterojunction arrays UV photodetectors with designed tunable Fermi level of ZnO[J]. J. of Colloid and Interface Science, 2020, 577: 279-289.

[53] Zhang D, Gu X, Jing F, et al. High performance ultraviolet detector based on TiO_2/ZnO heterojunction[J]. J. of Alloys and Compounds, 2015, 618: 551-554.

[54] Hsu C L, Wu H Y, Fang C C, et al. Solution-processed UV and visible photodetectors based on Y-doped ZnO nanowires with TiO_2 nanosheets and Au nanoparticles[J]. ACS Appl. Energy Materials, 2018, 1: 2087-2095.

[55] Namaa B, Fsha B, Kaea D, et al. Developing high-sensitivity UV sensors based on ZnO nanorods grown on TiO_2 seed layer films using solution immersion method[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 302: 111827.

[56] Zhou M, Wu B, Zhang X, et al. Preparation and UV photoelectric properties of aligned ZnO-TiO_2 and TiO_2-ZnO core-shell structured heterojunction nanotubes[J]. ACS Appl. Materials & Interfaces, 2020, 12: 38490-38498.

作者简介：

况　丹(1994—)，女，江西省宜春市人，博士研究生，主要研究方向为宽禁带半导体材料的制备及其在紫外探测中的应用；

卞曙光(1964—)，男，山东省莒南市人，博士，高级工程师，主要研究领域为新材料技术及新型显示技术；

喻志农(1968—)，男，湖北省潜江市人，博士，教授，博士生导师，主要研究领域为薄膜技术、显示技术，以及新型光电材料与器件。