注：国家自然科学基金（No. 51672103）；吉林省科技厅项目（No. 20170101111JC）
摘要：本征氧化锌紫外是目前制备紫外光电探测器件较好的材料，所以近年来人们利用掺杂后的氧化锌半导体材料制备紫外光电探测器件做了很多工作，而纳米结构的半导体材料具有表面积大和特征尺寸的可调节性的优点，随着一维纳米材料，纳米线、纳米棒和二维纳米材料，纳米薄膜，制备工艺的发展，氧化锌基纳米结构的半导体材料引起人们的广泛关注。本文重点介绍了基于一维和二维氧化锌基纳米结构紫外光电探测器件的研究现状，并对未来的研究重点做了简单介绍。
关键词：紫外光电探测器件；氧化锌；一维纳米结构；二维纳米结构
中图分类号：O472　　文献标识码：A　　文章编号：1006-883X(2020)10-0007-09
收稿日期：2020-09-11

氧化锌基纳米结构紫外光电探测器件发展与展望

李宇星　杨小天　初学峰　迟耀丹
吉林建筑大学电气与计算机学院 吉林省建筑电气综合节能重点实验室，吉林长春 130118

一、引言

作为光电传感领域中重要的光电子器件，紫外光电探测器件具有将紫外光信号转化为电信号的能力，一般是用宽禁带半导体材料制备而成，如 ZnO、TiO_2、金刚石、GaN 等 [1-5]。近几年，纳米结构的半导体材料得到迅速的发展，具有高表面积与体积比，传输时间短，响应速度快的优点，相比于其他结构的材料具有明显的优势，已经有多种纳米结构半导体应用到了光电探测器件中。

在纳米结构半导体材料中，本征氧化锌（ZnO）是紫外光电检测领域主流的纳米材料之一。它是一种典型直接宽带隙氧化物半导体材料，如表 1 所示。本征 ZnO 的禁带宽度为 3.37eV，十几年前人们就对本征氧化锌材料开始了研究，而近些年，通过研究在氧化锌中掺杂来改变材料的禁带宽度，使得材料的光电性能更好，成为研究的主流之一。

二、光电探测器件的重要参数

性能好的光电探测器件通常满足五点要求，即高灵敏度、高信噪比、良好的光谱选择性、快速性和高稳定性 [7]。将在黑暗条件一定偏压下的电流值定义为光电探测器件的暗电流，相应地，在光照条件相同偏压下在产生的电流值称为光电流。

表 1 ZnO 的基本参数 [6]

性质	参数
分子量	81.389
密度（g/cm^3）	5.64
熔点（℃）	1975
电导率（Ω.cm）	10
线性膨胀系数（k^{-1}）	4.75（a 轴）2.92（c 轴）
比热（cal/g.℃）	0.125
热电常数（mV/K）	1200（300k）
莫氏硬度	4.5
热导率（W/cm.K）	1.16（Zn 表面），1.10（O 表面）
带隙（eV）	3.37（300k）
激子束缚能（meV ）	60
辐射阻抗（MeV）	2

在黑暗条件下的光电探测器件被定义为“关”状态，在光照条件下的光电探测器件被定义为“开”状态。开关状态之间的电流比（光电流和暗电流之比）揭示了光电探测器件的灵敏度。开关比越高，光电探测器件的灵敏度越好。

由于光电流与光生载流子浓度有关，光功率密度和有效照射面积在一定程度上会影响光电流，所以在评估光电探测器件的性能时应考虑这些因素的影响[8]。在有效的照明面积下，引入响应率（R），它表示探测器件中光电流除以入射光功率[9]，并且可以通过以下公式计算：

$$R=\frac{I_{ph}}{PS} \tag{1}$$

其中，I_{ph} —器件的光电流；

P —入射功率密度；

S —有效照明面积。

根据公式（1），我们可以通过测量每个波长的光电流值就可以求得光电探测器件的响应率。

外量子效率（EQE）是反映光电探测器件性能的另外一个重要参数，它反映了光电转换效率，被定义为循环中的载流子数除以入射光子数，并且可以如下计算：

$$EQE=\frac{R_{\lambda}hc}{e\lambda}\times 100\% \tag{2}$$

其中，R_{λ} —计算在一定波长下的响应率；

e —电子电荷；

λ —入射光的波长；

h —普朗克常数；

c —光速。

因为 EQE 反映了光电转换效率，所以其值通常以百分比表示。在传统情况下，单光子激发只能产生单电子空穴对，这意味着其值总是小于百分之百。然而，当光子的能量远高于半导体的带隙时，某些特殊光电子器件中的多激子产生效应导致单光子激发产生两个或多个激子，这些器件的 EQE 值可以超过 100％[10-12]。

增益（Gain）也是反映光电探测器件性能的一个重要参数，定义为收集的载流子数除以吸收的光子数。以硒（Se）纳米线光电探测器件为例，利用外加偏压将 Se 纳米线中激发态的空穴从阴极转移到阳极，用典型的时间量程 $\tau_{transit}$ 表示。电子仍然被 Se 晶体中的空穴捕获（用典型的时间量程 $\tau_{lifetime}$ 表示）。由于材料中的电荷守恒导致空穴一旦到达阳极，阴极就会补充空穴。这个过程会一直持续到空穴与捕获的电子重新结合。因此，在 Se 纳米线中多重空穴循环单电子空穴的光生作用，从而获得高增益。如上所述，可以通过以下公式计算光电导增益[13]：

$$Gain=\frac{\tau_{lifetime}}{\tau_{transit}} \tag{3}$$

其中，$\tau_{lifetime}$ —载流子的寿命；

$\tau_{transit}$ —载流子在电极之间的传输时间。

与 EQE 相比，当电极间距离小于载流子的平均自由程时，增益可以达到 1。

低暗电流意味着微弱的噪声信号，而暗电流低的光电探测器件对微弱的光信号具有较高的灵敏度，因此，在评估光电探测器件性能方面也起着重要作用。光电探测器件的灵敏度也用归一化检测率（D^*）来表征[14]，可以表示为：

$$D^*=\frac{R_{\lambda}}{(2qJ_d)^{\frac{1}{2}}} \tag{4}$$

其中，q —元素电荷；

J_d —暗电流密度。

响应速度是决定某些材料或装置能否适用于实际生活的一个重要参数。我们通常使用上升时间（当光被开启时，最大光电流从 10% 增加到 90% 的时间）和衰减时间（当光被关闭时，最大光电流从 90% 衰减到 10% 的时间）来反映响应速度。快速光检测需要较短的上升和衰减时间（<1s）。为了构建高性能的光电探测器件，敏感材料和器件结构的选择至关重要。由于纳米材料半导体的响应速度快，在新一代光电器件中得到了广泛的应用。

三、氧化锌基纳米结构紫外光电探测器件的研究现状

纳米结构的优点很多，它的比表面积较大，允许更好的结构与缩小器件的兼容性[15]，纳米结构的光电探测器件是紫外光电探测器领域最重要的研究对象之

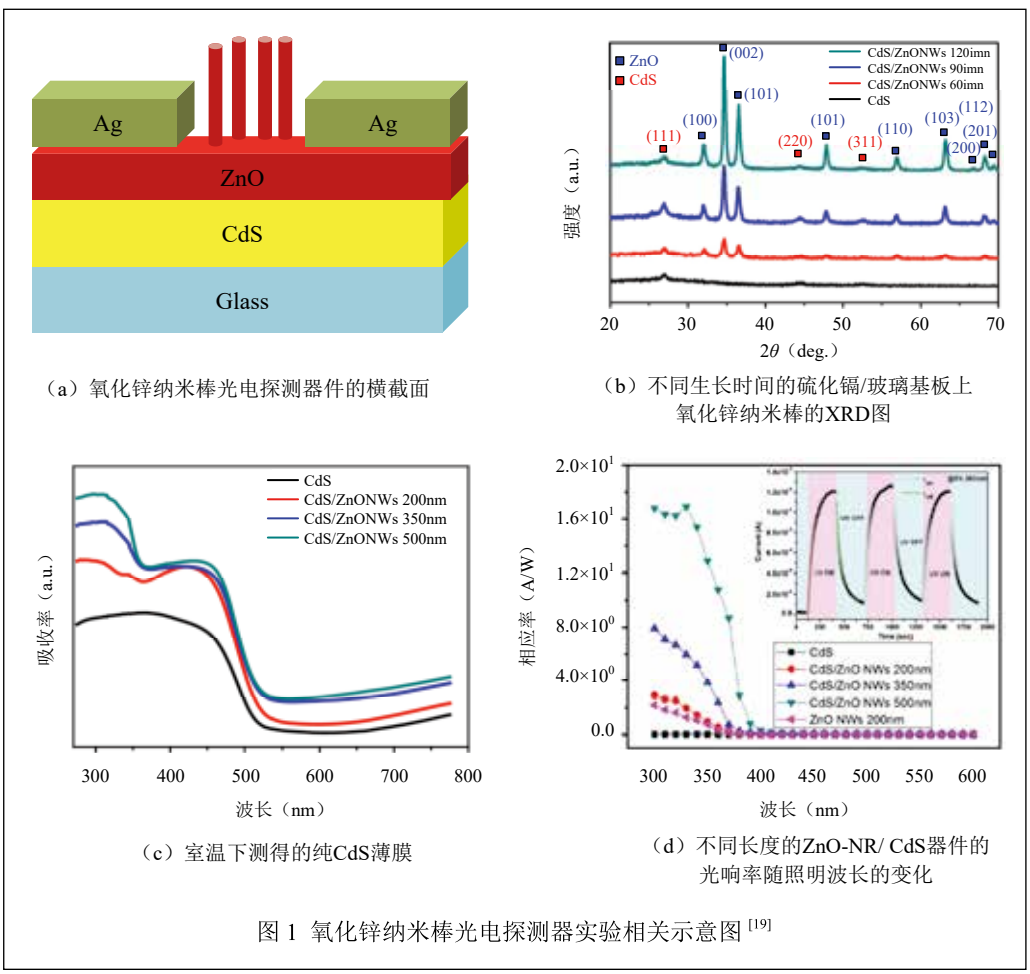
一。按照形态和尺度分类，纳米结构可以分为：零维纳米结构，纳米颗粒；一维纳米结构，纳米线（NW）、纳米棒（NR）等；二维纳米结构，纳米薄膜等。本节对不同氧化锌基纳米结构光电探测器件的性能优劣作了介绍。

1、一维氧化锌基纳米结构紫外光电探测器件的研究现状

人们普遍认为，一维金属氧化物纳米结构是在纳米级尺度的基础上探索大量结构性质的新现象并研究其潜在应用的理想系统[16]，有望在作为互连单元和功能单元的纳米尺寸的电子、光电、电化学和机电设备中发挥重要作用[17]。在各种一维金属氧化物纳米结构中氧化锌是应用最广泛的一种[18]，在纳米技术和器件中有着广阔的应用前景，所以深入地了解一维氧化锌纳米结构的研究现状是作为研究和开发实际应用的前提。

在本小节中，我们首先给出两个近年来关于一维氧化锌纳米结构光电探测器件的相关的应用，然后探究基于氧化锌纳米结构的光电探测器件应用的研究现状，包括实验中氧化锌的结构、表征、性能等，并概括总结了最近十年的一部分重要的研究成果。

2017 年，LAM K T 等人[19]采用化学镀液沉积法（Chemical Bath Deposition，CBD）在玻璃衬底上沉积了 20min、30min 和 40min 的各种形态的硫化镉（CdS）薄膜，作者采用两步法制备了不同长度的 200nm、350nm 和 500nm 氧化锌纳米棒。然后，将具有光刻胶保护的叉指电极的样品随后浸入硝酸锌，去除器件叉指电极表面的光阻，完成了氧化锌纳米棒光电探测器件的制备，其横截面如图 1（a）所示。图 1（b）显示了不同生长时间的硫化镉 / 玻璃基板上生长氧化锌纳米棒具有多晶结构，随着氧化锌纳米棒生长时间的延长，X 射线衍射峰（100）、（002）、（101）、（102）、（110）、（103）、（200）、（112）和（201）的强度增加，CdS（111）、（220）和（311）的峰值没有明显增加。



（a）氧化锌纳米棒光电探测器件的横截面

（b）不同生长时间的硫化镉/玻璃基板上氧化锌纳米棒的XRD图

（c）室温下测得的纯CdS薄膜

（d）不同长度的ZnO-NR/ CdS器件的光响率随照明波长的变化

图 1 氧化锌纳米棒光电探测器实验相关示意图[19]

图 1（c）可以看出，280nm~370nm 之间的紫外光吸收范围对氧化锌纳米棒有贡献。随着氧化锌厚度的增加，吸收强度增大。

图 1（d）显示了合成的 ZnO-NR/ CdS 异质结构器件的光响应与光波长呈函数关系。可以看出，当光波长从 300nm 增加到 400nm 时，其响应会降低。证明氧化锌纳米棒是可以用作制备紫外线光电探测器件的材料。当入射波长为 350nm，外加偏压 5V 时，我们发现，随着氧化锌纳米棒长度的增加响应度逐渐增大。可以预期，这种器件可以制造高灵敏度和柔性的光电器件，也可能在低光成像传感器上得到应用。

2019 年 A. AMANY 等

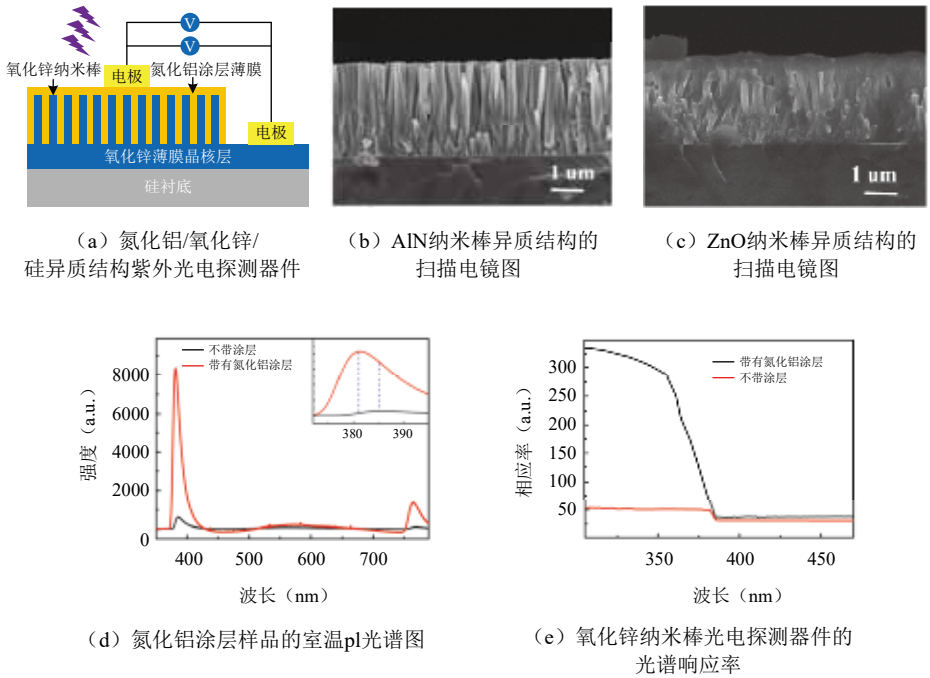
人[20]通过射频磁控溅射在硅衬底上沉积了非常薄的氧化锌薄膜晶核层。然后，采用水热法制备了3μm氧化锌纳米棒，最后通过溅射在氧化锌纳米棒上沉积0.7μm氮化铝（AlN），制备了氮化铝/氧化锌/硅异质结构紫外光电探测器件，如图2（a）所示。

AlN/ZnO-NR异质结构的扫描电镜图像如图2（b）和2（c）所示，氮化铝涂层样品的室温pl光谱如图2（d）所示。结果表明，在氮化铝涂层后，紫外光发射强度明显提高了近一个数量级。图2（e）显示了氧化锌纳米棒光电探测器在5V偏压，300nm~500nm范围的电流信号下测量的光谱响应率，可以发现，采用氮化铝涂层后紫外分光光度计的光电流有了明显的提高。表明在AlN涂层后，氧化锌纳米棒光电探测器件的紫外发光增强，这证实了氧化锌纳米棒在高效紫外或蓝光发射材料中的优势。

应该指出的是，在过去几年中，一维氧化锌纳米结构的光电探测器件应用已经取得了巨大的进展，与其特性相关的研究论文发表许多。在这里，我们将近几年报道的氧化锌纳米结构的光电探测器件特性的一部分结果进行汇总，以及相应的检测波长和光电探测器件性能的简要描述制成表格，如表2所示。

2、二维氧化锌基纳米结构紫外光电探测器件的研究现状

二维（2D）材料是伴随着2004年曼切斯特大学Geim小组成功分离出单原子层的石墨材料—石墨烯而提出的，具有载流子迁移率



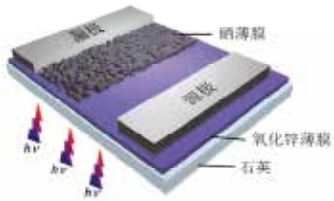
（a）氮化铝/氧化锌/硅异质结构紫外光电探测器件　（b）AlN纳米棒异质结构的扫描电镜图　（c）ZnO纳米棒异质结构的扫描电镜图

（d）氮化铝涂层样品的室温pl光谱图　（e）氧化锌纳米棒光电探测器件的光谱响应率

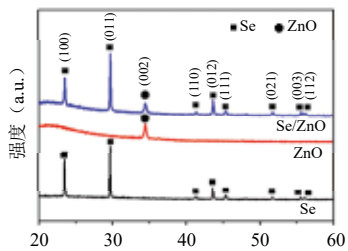
图2 氮化铝/氧化锌/硅异质结构紫外光电探测器件实验数据示意图[20]

表2 一维氧化锌纳米结构光电探测器件性能

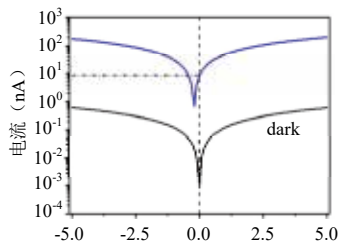
一维纳米结构	探测光 (nm; μW/cm²)		偏压 (V)	暗电流 (nA)	光电流 (μA)	开光比	上升时间 (s)	下降时间 (s)	相应率 (A/W)	参考文献
ZnO - 纳米线	-		2	2	520	260000	-	-	-	[21]
ZnS-ZnO 双轴纳米带	320		5	303	17.76	5.86	<0.3	1.5	-	[22]
石墨烯/氧化锌纳米线/石墨烯	紫外光；500000		3	-	-	800	0.7	0.5	-	[23]
Ag/ZnO 纳米线	365nm		-0.5	0.00217	5210	2400.92	4	36	-	[24]
ZnO	紫外光	25	0.5	63.2	0.66	11	(29.2nA-1.55μA) 100	(-63.2nA) 120	-	[25]
		35			0.92	15				
		70			1.55	23				
Zn 纳米线	357;8.5		1	-	-	-	450	100	1.4×10^4	[26]
Si/ZnO	365;3.2		-	-	2-45	-	-	-	0.38	[27]
NiO/ZnO 纳米棒	365		-	-2700	-450	165.7	12.7	6.4	-	[28]
NiO/ZnO 纳米棒	365;0.0025		-5	-4550	-18.27	4.01	-	-	-	[29]
带有 Al 纳米棒的 ZnO 纳米棒	325		5	-	-	-	0.03	0.035		[30]
ZnO 纳米棒阵列							0.8	0.85		
纳米棒							2.9	57		



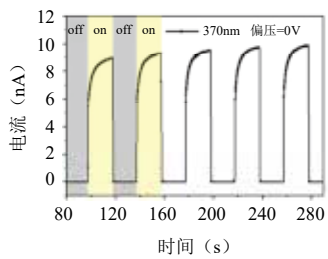
（a）Se/ZnO混合薄膜
紫外光电探测器件结构图



（b）Se、ZnO和Se/ZnO 混合膜的XRD图



（c）黑暗和370nm紫外光照明条件下
光电探测器件的I–V特性



（d）Se/ZnO在0V偏压下在370nm紫
外光照射下周期性开/关时的I-T曲线

图 3 硒 / 氧化锌混合薄膜紫外光电探测器件实验数据示意图 [31]

高、线性能谱强的优点，随后二维纳米材料引起了人们极大的兴趣。二维氧化锌纳米薄膜具有均匀、致密、光滑等优点，并且利于工业生产。因此，人们对二维氧化锌纳米结构光电探测器件生产及应用依然保持着高度的热情。所以，深入了解二维氧化锌纳米结构的研究现状具有重要的意义。

本小节，我们将给出近年来两个关于二维氧化锌纳米结构光电探测器件相关的例子，然后报告基于二维氧化锌纳米结构的光探测器件应用的研究现状，包括实验中器件的结构、表征、性能等，并概括总结了最近十年的一部分研究成果。

2016 年 Kai Hu 等人 [9] 制备了氧化锌薄膜，然后将基板退火至 150℃ ~ 550℃或更高温度。然后在半覆盖制备好的氧化锌薄膜上生长硒微晶薄膜，制备硒 / 氧化锌混合薄膜。两个铟电极分别分布在氧化锌和硒薄膜上，制备的结构示意图如图 3（a）所示。

如图 3（b）所示，显示了 Se、ZnO 和 Se/ZnO 混合膜的 XRD 图案。纯硒样品的所有峰均与硒匹配良好，晶格参数为 $a=b=4.364$Å 和 $c=4.959$Å。位于 34.5Å 的 ZnO 薄膜的尖峰被分配给 ZnO 的（002）平面，晶格参数为 $a=b=3.250$Å 和 $c=5.207$Å。这证实了成功制备混合硒 / 氧化锌薄膜。

图 3（c）显示了在黑暗和 370nm 紫外光照射下硒 / 氧化锌结构的饱和电流 - 电压（I-V）曲线，发现在 370nm 紫外光照射下，光电流增加了 2 个数量级多。

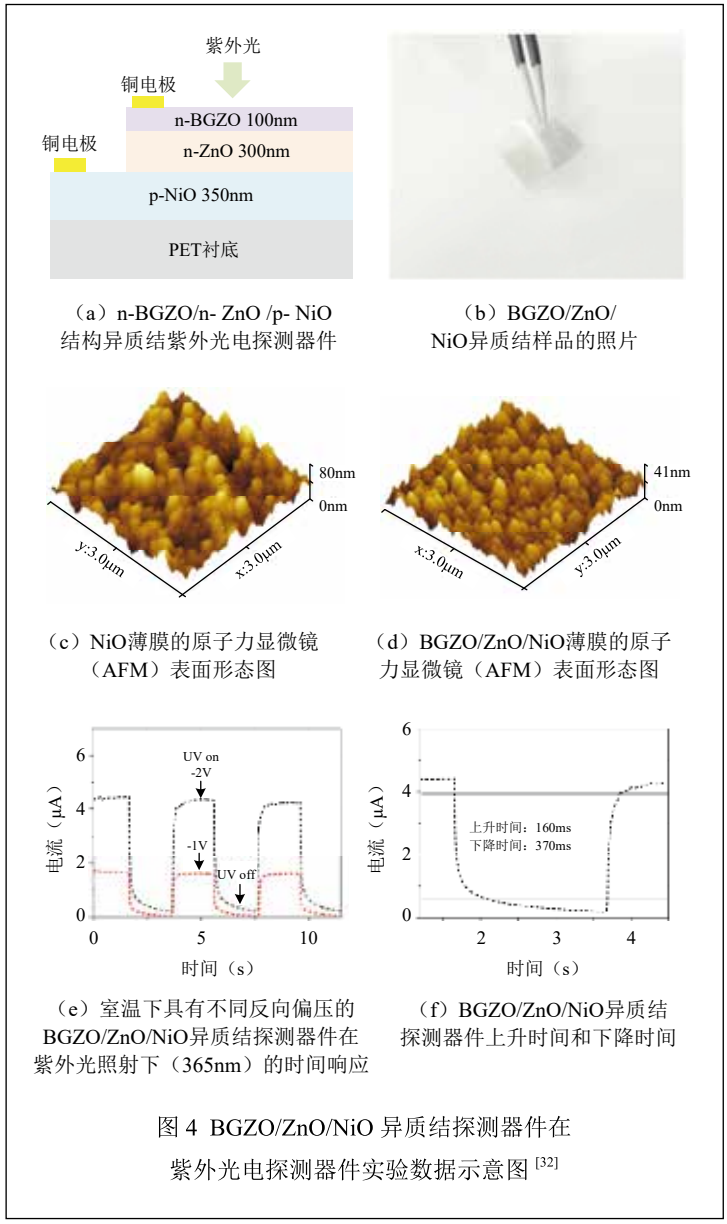
图 3（d）可以看出该装置具有很高的稳定性和可重复性。在 0.85mW/cm^2、370nm 紫外线照射下的五个开关周期下，零偏压下的输出电流从打开紫外光的瞬间几乎为零，上升到 6nA，而在关闭紫外光的瞬间几乎衰减为零。为了确定零偏压下的暗电流，实验还给出了半对数图上 I-T 曲线的一个周期，暗电流约为 1pA，而光电流达到 10nA，显示出 10^4 的高开 / 关比和 2.65mA/W 的响应率。实验还测量了单周期的脉冲响应，显示了这个氧化锌紫外探测器的上升时间为 0.69ms，衰减时间为 13.5ms，比纯氧化锌薄膜的光电探测器快得多。本文的研究结果为制备高灵敏度、高信噪比、高光谱选择性、高速度、高稳定性的 ZnO 基 P-N 结紫外光电探测器件提供了一条捷径，为该类高性能多功能光电探测器件的未来应用奠定了坚实的基础。

2019 年 A. AMANY 等人 [20] 采用射频磁控溅射技术在柔性聚对苯二甲酸乙二醇酯（Flexible Polyethylene Terephthalate，PET）衬底上制备了厚度约 350nm 的氧化镍（NiO）薄膜，在 NiO 薄膜上用射频磁控溅射技术制备了厚度约为 300nm 的本征氧化锌薄膜，最终制备了约 100nm 厚的高掺量硼镓共掺氧化锌（BGZO）薄膜。用电子

束蒸发法在 BGZO 和 NiO 薄膜上沉积了 Au 电极（厚度约 100nm），完成了 n-BGZO/n-ZnO/p-NiO 异质结紫外光电探测器件的制备，装置示意图如图 4（a）所示。图 4（b）显示了 BGZO/ZnO/NiO 异质结样品的照片，在柔性聚酯基片上制备的异质结可大幅度弯曲。

图 4（c）和（d）的原子力显微镜（AFM）图片中可以看出薄膜致密、均匀、光滑。室温下具有不同反向偏压的 BGZO/ZnO/NiO 异质结探测器件在紫外光照射下（365nm）的时间响应如图 4（e）所示。无论偏压是 -1V 还是 -2V，探测器件都会做出响应。对紫外光的敏感度（光电流 / 暗电流）明显高于 20。随着反向偏压的增加，探测器件显示出更宽的耗尽层和更高的紫外线光电流。如图 4（f）所示，上升时间和下降时间分别约为 160ms 和 370ms。下降时间比上升时间长得多，作者认为上升时间可能是由于在 UV 光关闭后氧化膜中氧气缺陷相关陷阱所捕获的载流子释放缓慢造成的。

我们将近年来报道的一部分关于二维氧化锌纳米结构的光电探测器件特性的结果进行汇总，以及相应检测波长和光电探测器件性能的简要描述制成表格，如表 3 所示。



（a）n-BGZO/n- ZnO /p- NiO 结构异质结紫外光电探测器件

（b）BGZO/ZnO/NiO异质结样品的照片

（c）NiO薄膜的原子力显微镜（AFM）表面形态图

（d）BGZO/ZnO/NiO薄膜的原子力显微镜（AFM）表面形态图

（e）室温下具有不同反向偏压的BGZO/ZnO/NiO异质结探测器件在紫外光照射下（365nm）的时间响应

（f）BGZO/ZnO/NiO异质结探测器件上升时间和下降时间

图 4 BGZO/ZnO/NiO 异质结探测器件在紫外光电探测器件实验数据示意图 [32]

四、结论与展望

本文综述了近年来氧化锌基纳米结构紫外光电探测器件的研究进展，通过研究发现，随着一维、二维氧化锌纳米材料的制备，以及器件结构的优化，这类探测器件的光电性能有所提高，与传统的光探测器件相比，他们的开关比较高，上升时间和衰减时间较短，具备灵敏度高和相应速度快的优势。虽然纳米结构氧化锌紫外光电探测器件具有优异的光电性能和器件性能，但在材料制备、器件制作、灵敏性和稳定性等方面还存在一定的挑战。

（1）纳米材料制备：纳米材料是制备的里程碑，氧化锌纳米结构合成中涉及的生长动力学和热力学是极其复杂的，在不同的生长条件下假定了不同的机理。尽管已对合成高质量氧化锌纳米结构做出了全面的努力，但其制备工作仍然存在重大挑战。

（2）器件制作：在传统的“取放”方法中，首先从最初生长的基板上收集气相合成工艺制备的纳米结构，然后在溶液中稀释后随机分散在绝缘基板上。为了使金属与纳米结构接触，需要使用诸如光刻、电子束光刻或聚焦离子束等复杂技术。毫无疑问，这一过程复杂、耗时且不经济，因此妨碍了实际路线的发展。

表 3 二维氧化锌纳米结构光电探测器件性能

二维纳米结构		探测光（nm; μW/cm²）	偏压（V）	暗电流（μA）	光电流（mA）	开关比	上升时间（s）	下降时间（s）	响应率（A/W）	参考文献
掺镓氧化锌	带有缓冲层	365; 2	5	23	2.26	98.26	-	-	1125	[33]
	不带缓冲层			28	0.81	28.9				
铟镓 -ZnO		-	5	-	-	10^4	-	-	-	[34]
CdS/ZnO	紫外光		0.01	10.4	-	-	-	-	-	[35]
			0.02	15.4						
			0.05	31						
	白光		0.01	4.81						
			0.02	8.58						
			0.05	19.7						
ZnO		365; 1.8	5	20	1.3	65	26	18	788	[36]
掺钛氧化锌		365; 2	5	0.0061	0.11268	18472.13			0.0513	[37]
ZnO 薄膜		-	-	-	-	1.5	-	47	-	[38]
退火薄膜						1.7		21		
纳米颗粒（NPs）		-	-	-	-	-	紫外光 -2 白光 -4 绿光 -4	紫外光 -121 白光 >200 绿光 -93	-	[39]
纳米薄片（NSs）							紫外光 -2 白光 -4 绿光 -5	紫外光 -10 白光 -8 绿光 -10		
纳米花（NFs）							紫外光 -15 白光 -18 绿光 -10	紫外光 -15 白光 -20 绿光 -10		
ZnO /rGO		365	5	-	-	22	12.5	136	-	[40]

通过一种简单有效的方法构造一个设备仍然是一个巨大的挑战。此外，由于器件的性能在很大程度上取决于纳米结构与电极之间欧姆接触的质量，因此建立可靠、稳定的接触是一项迫切需要特别关注的任务。

（3）灵敏度、选择性和稳定性：下一代光电探测器将需要在灵敏度、选择性和稳定性方面进行重大改进，以满足未来在各种领域的需求。虽然一维氧化锌纳米结构近年来在各个方面取得很大的进展，但其选择性和稳定性仍然存在巨大的挑战。

（4）功能探测器件：光电探测器件的发展与微电子技术的发展是同步的，在微电子技术中，平面电子技术的设计趋势影响着光电探测器元件的结构。其中一个主要目标是设计能够很容易地集成到现代电子制造技术中的纳米探测器，满足实际生活的需求。

参考文献

[1] BOLTAR K O, BURLAKOV I D, PONOMARENKO V P, et al. Solid-state Photoelectronics of the Ultraviolet Range[J]. Journal of Communications Technology and Electronics, 2016, 61(10): 1175-1185.

[2] MOU W, ZHAO L, CHEN L, et al. GaN-based Schottky Barrier Ultraviolet Photodetectors with Graded Doping on Patterned Sapphire Substrates[J]. Solid-State Electronics, 2017, 133: 78-82.

[3] MONROY E, OMNÈS F, CALLE F. Wide-bandgap Semiconductor Ultraviolet Photodetectors[J]. Semiconductor Science and Technology, 2003, 18(4): R33.

[4] LIANG F X, ZHANG D Y, WANG J Z, et al. Highly Sensitive UVA and Violet Photodetector Based on Single-layer Graphene-TiO 2 Heterojunction[J]. Optics Express, 2016, 24(23): 25922-25932.

[5] YUE Q, SHAO Z, CHANG S, et al. Adsorption of Gas

Molecules on Monolayer MoS 2 and Effect of Applied Electric Field[J]. Nanoscale Research Letters, 2013, 8(1): 425.
[6] 刘阳 . 氧化锌纳米阵列紫外探测增强效应研究 [D]. 武汉 : 华中科技大学 , 2016.
[7] TENG F, HU K, OUYANG W, et al. Photoelectric Detectors Based on Inorganic p-Type Semiconductor Materials[J]. Advanced Materials, 2018, 30(35): 1-39.
[8]F. P. GARCÍA DE ARQUER, A. ARMIN, P. MEREDITH, E. H. SARGENT. Solution-processed semiconductors for next-generation photodetectors[J]. Nat. Rev. Mater, 2017, 2(3): 16100.
[9] HU K, CHEN H, JIANG M, et al. Broadband Photoresponse Enhancement of a High-Performance t-Se Microtube Photodetector by Plasmonic Metallic Nanoparticles[J]. Advanced Functional Materials, 2016, 26(36): 6641-6648.
[10] A J NOZIK. Nanophotonics: Making the Most of Photons[J]. Nat. Nanotechnol, 2009, 4(9): 548.
[11] R D SCHALLER, V M AGRANOVICH, V I KLIMOV. Effect of Electronic Structure on Carrier Multiplication Efficiency: Comparative Study of PbSe and CdSe Nanocrystals[J]. Nat. Phys, 2005, 87(25): 253102.
[12] SEMONIN O E, LUTHER J M, CHOI S, et al. Peak External Photocurrent Quantum Efficiency Exceeding 100% Via MEG in a Quantum Dot Solar Cell [J]. Science, 2011, 334, 1530-1533.
[13] G KONSTANTATOS, M BADIOLI, L GAUDREAU, et al. Hybrid Graphene-Quantum Dot Phototransistors With Ultrahigh Gain[J]. Nat. Nanotechnol, 2012, 7, 363.
[14] KONSTANTATOS G, SARGENT E H. Nanostructured materials for photon detection[J]. Nature nanotechnology, 2010, 5(6): 391.
[15] 张翔晖 . 氧化钨和氧化锌一维纳米线阵列的制备和光电器件的研究 [D]. 武汉 : 华中科技大学 , 2014.
[16] ZHAI T, FANG X, LIAO M, et al. A Comprehensive Review of One-Dimensional Metal-Oxide Nanostructure Photodetectors[J]. Sensors, 2009, 9(8): 6504-6529.
[17] XIA Y N, YANG P D, SUN Y G, et al. One-dimensional Nanostructures: Synthesis, Characterization and Applications[J]. Adv. Mater. 2003, 15(5): 353-389.
[18] WEI TIAN, HAO LU, LIANG LI. Nanoscale Ultraviolet Photodetectors Based on One-Dimensional Metal Oxide Nanostructures[J]. Nano Research, 2014, 8(2): 382-405.
[19] LAM K T, HSIAO Y J, JI L W, et al. High-sensitive Ultraviolet Photodetectors Based on ZnO Nanorods/CdS Heterostructures[J]. Nanoscale Research Letters, 2017, 12(1): 31.
[20] AMANY A, WANG D B, WANG J Z, et al. Enhanced the UV Response of AlN Coated ZnO Nanorods Photodetector[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 776: 111-115.
[21] ATES E S, KUCUKYILDIZ S, UNALAN H E. Zinc Oxide Nanowire Photodetectors with Single-walled Carbon Nanotube Thin-film Electrodes[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2012, 4(10): 5142-5146.
[22] HU L, YAN J, LIAO M, et al. An Optimized Ultraviolet-a Light Photodetector with Wide‐range Photoresponse Based on ZnS/ZnO Biaxial Nanobelt[J]. Advanced Materials, 2012, 24(17): 2305-2309.
[23] FU X W, LIAO Z M, ZHOU Y B, et al. Graphene/ZnO Nanowire/Graphene Vertical Structure Based Fast-response Ultraviolet Photodetector[J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(22): 223114.
[24] TZENG S K, HON M H, LEU C. Improving the Performance of a Zinc Oxide Nanowire Ultraviolet Photodetector by Adding Silver Nanoparticles[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2012, 159(4): H440-H443.
[25] YAO I C, TSENG T Y, LIN P. ZnO Nanorods Grown on Polymer Substrates as UV Photodetectors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2012, 178: 26-31.
[26] ZHANG H, BABICHEV A V, JACOPIN G, et al. Characterization and Modeling of a ZnO Nanowire Ultraviolet Photodetector with Graphene Transparent Contact[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114(23): 234505.
[27] AL-HARDAN N H, JALAR A, HAMID M A A, et al. A Wide-band UV Photodiode Based on n-ZnO/p-Si Heterojunctions[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 207: 61-66.
[28] DAI W, PAN X, CHEN S, et al. Honeycomb-like NiO/ZnO Heterostructured Nanorods: Photochemical Synthesis, Characterization, and Enhanced UV Detection Performance[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2014, 2(23): 4606-4614.
[29] KO Y H, NAGARAJU G, YU J S. Wire-shaped Ultraviolet Photodetectors Based on a Nanostructured NiO/ZnO Coaxial p-n Heterojunction Via Thermal Oxidation and Hydrothermal Growth Processes[J]. Nanoscale, 2015, 7(6): 2735-2742.
[30] LU J, XU C, DAI J, et al. Improved UV Photoresponse of ZnO Nanorod Arrays by Resonant Coupling with Surface Plasmons of Al Nanoparticles[J]. Nanoscale, 2015, 7(8): 3396-3403.
[31] GRIGORYEV L V, KULAKOV S V, NEFEDOV V G, et al. Optical and Photoelectrical Properties of Nanostructured Thin ZnO Films for UV-sensors[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2017.
[32] HUANG J, LI B, HU Y, et al. Transparent p-NiO/n-ZnO Heterojunction Ultraviolet Photodetectors Prepared on Flexible Substrates[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 362: 57-61.

[33] SHINDE S S, RAJPURE K Y. High-performance UV Detector Based on Ga-doped Zinc Oxide Thin Films[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(22): 9595-9599.
[34] CHEN W T, ZAN H W. High-performance Light-erasable Memory and Real-time Ultraviolet Detector Based on Unannealed Indium-gallium-zinc-oxide Thin-film Transistor[J]. IEEE Electron Device Letters, 2012, 33(1): 77-79.
[35] ZOU Z, XIE C, ZHANG S, et al. CdS/ZnO Nanocomposite Film and its Enhanced Photoelectric Response to UV and Visible Lights at Low Bias[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2013, 188: 1158-1166.
[36] INAMDAR S I, RAJPURE K Y. High-performance Metal-semiconductor-metal UV Photodetector Based on Spray Deposited ZnO Thin Films[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 595: 55-59.
[37] SHEWALE P S, LEE N K, LEE S H, et al. Ti Doped ZnO Thin Film Based UV Photodetector: Fabrication and Characterization[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 624: 251-257.
[38] GHOSH S P, DAS K C, TRIPATHY N, et al. Ultraviolet Photodetection Characteristics of Zinc Oxide Thin Films and Nanostructures[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2016.
[39] KHOKHRA R, BHARTI B, LEE H N, et al. Visible and UV Photo-detection in ZnO Nanostructured Thin Films Via Simple Tuning of Solution Method[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 15032.
[40] YANG T, SUN B, NI L, et al. The Mechanism of Photocurrent Enhancement of ZnO Ultraviolet Photodetector by Reduced Graphene Oxide[J]. Current Applied Physics, 2018, 18(8): 859-863.

Development and Prospect of Nano ZnO Based UV Photodetectors

LI Yu-xing, YANG Xiao-tian, CHU Xue-feng, CHI Yao-dan, WANG Chao

(*Jilin University of Construction, School of Electrical and Computer, Jilin Province Key Laboratory of Building Electrical Energy Conservation, Changchun* 130118, *China)*

Abstract: Intrinsic zinc oxide ultraviolet is a good material for the preparation of ultraviolet photodetectors. In recent years, a lot of work has been done in the preparation of ultraviolet photodetectors using doped ZnO semiconductor materials. However, nanostructured semiconductor materials have the advantages of large surface area and adjustable characteristic size. With the development of one-dimensional nano materials, nanowires, nanorods and two-dimensional nanometers, many researches have been carried out Materials, nano films, the development of preparation technology, ZnO based nanostructured semiconductor materials have attracted extensive attention. In this paper, the research status of one-dimensional and two-dimensional ZnO based nanostructured UV photodetectors is mainly introduced, and the future research focus is briefly introduced.

Key words: UV Photodetector; Zinc oxide; One-dimensional nanostructure; Two-dimensional nanostructure

作者简介

李宇星：吉林建筑大学，研究生，研究方向为微电子学。
通信地址：吉林省长春市吉林建筑大学
邮编：yangxiaotian@jlju.edu.cn
邮箱：1106715983@qq.com
杨小天：吉林师范大学，教授二级，研究方向为微电子学。
初学峰：吉林建筑大学，讲师，研究方向为微电子学。
迟耀丹：吉林建筑大学，教授，研究方向为电子信息。