

声表面波紫外光探测器的研究进展

殷长帅, 周剑, 刘翊, 吴建辉, 熊硕, 段辉高

引用本文:

殷长帅, 周剑, 刘翊, 等. 声表面波紫外光探测器的研究进展[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(7): 1433–1445.

YIN Chang-shuai, ZHOU Jian, LIU Yi, et al. Research progress of surface acoustic wave ultraviolet detectors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(7): 1433–1445.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/OPE.20202807.1433>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

柔性声表面波器件的波模式分析

Analysis on wave mode of flexible surface acoustic wave devices

光学精密工程. 2016, 24(6): 1328–1334 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162406.1328>

Parylene增强型声表面波传感器及其温度响应

Parylene-enhanced SAW sensor and its temperature response

光学精密工程. 2017, 25(12): 3048–3055 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172512.3048>

紫外光阴极辐射灵敏度的测量误差

Measurement errors of ultraviolet photocathode radiant sensitivity

光学精密工程. 2017, 25(6): 1425–1432 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172506.1425>

面向空间引力波探测的弱光探测器性能检测与分析

Preliminary test of performance detection and analysis of weak-light detector for space gravitational wave detection

光学精密工程. 2019, 27(8): 1710–1718 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192708.1710>

无人机巡检电力线放电的紫外探测及定位

Ultraviolet detection and positioning method for unmanned aerial vehicle patrol of power line discharge

光学精密工程. 2019, 27(11): 2296–2304 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192711.2296>

文章编号 1004-924X(2020)07-1433-13

声表面波紫外光探测器的研究进展

殷长帅¹, 周 剑^{1*}, 刘 翊², 吴建辉¹, 熊 硕¹, 段辉高¹

(1. 湖南大学 机械与运载工程学院 汽车车身设计与制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082;

2. 国家先进轨道交通装备创新中心, 湖南 株洲 412000)

摘要: 基于声表面波技术的紫外探测器具有响应速度快、灵敏度高、制作简单且可以无线无源监测等众多优势, 成为近年来紫外探测领域的研究热点。本文根据紫外敏感薄膜分类综述了声表面波紫外探测的研究进展, 剖析了声表面波紫外探测敏感机理, 阐述了氮化镓、掺杂氮化镓、氧化锌、掺杂氧化锌、纳米结构氧化锌、氮化铝等敏感膜的材料特点、制备加工及其紫外探测器性能等。分析了近年来新型声表面波紫外传感器的研究状况, 展望了声表面波紫外探测的未来发展趋势与挑战。

关键词: 声表面波; 紫外探测; 氮化镓; 氧化锌

中图分类号: TN23 **文献标识码:** A **doi:** 10. 37188/OPE. 20202807. 1433

Research progress of surface acoustic wave ultraviolet detectors

YIN Chang-shuai¹, ZHOU Jian^{1*}, LIU Yi², WU Jian-hui¹, XIONG Shuo¹, DUAN Hui-gao¹

(1. *State Key Laboratory of Automotive Body Design and Manufacturing, School of Mechanical and Transportation Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;*

2. *National Innovation Center of Advanced Rail Transit Equipment, Zhuzhou 412000, China)*

** Corresponding author, E-mail: jianzhou@hnu.edu.cn*

Abstract: Ultraviolet (UV) detectors based on the Surface Acoustic Wave (SAW) technology have become an active field of research owing to their advantages such as fast response, high sensitivity, simple fabrication, and wireless passive monitoring. In this study, the progress in the research of SAW UV detection, based on the classification of UV-sensitive films, was reviewed. The sensitive mechanism of SAW UV detection was analyzed and the characteristics, preparations, and UV performances of gallium nitride, doped gallium nitride, zinc oxide, doped zinc oxide, nanostructured zinc oxide, aluminum nitride, and other sensitive membrane materials were presented. This work also demonstrated the latest advancements in SAW UV sensors and their prospects in future development trends and challenges.

Key words: surface acoustic wave; ultraviolet detection; GaN; ZnO

收稿日期: 2019-11-04; 修订日期: 2020-01-15.

基金项目: 湖南省重点研发项目 (No. 2019GK2111, No. 2018GK2044)

1 引言

紫外光,也叫紫外线(Ultraviolet,UV),是指在电磁波谱中的 10~400 nm 波长范围的一段辐射波,按照波长范围可分为长波紫外(UVA,波长 400~320 nm)、中波紫外(UVB,波长 320~280 nm)、短波紫外(UVC,波长 280~200 nm)和远紫外光(波长 200~10 nm)^[1]。紫外线探测器是将一种形式的紫外电磁辐射信号转换成另一种易被接收处理信号形式的传感器。近年来,随着工业进程的加快,环境遭受的破坏越来越严重,地球大气层出现了巨大的臭氧层空洞,越来越多的紫外线照射到地球表面,对人类的健康构成了威胁,因此对紫外线的检测与防护就显得十分重要,紫外探测技术应运而生。随着紫外探测技术的发展,目前紫外探测器在空间天文望远镜、军事导弹预警、非视距保密光通信、海上破雾引航、高压电晕监测、野外火灾遥感及生化检测等领域具有广泛的应用前景^[2]。

常用的紫外线探测器主要有三种:(1)光电真空探测器,如光电倍增管、像增强型 CCD(ICCD)和背照式 CCD(BCCD)等;(2)光电导探测器,如 GaN 基和 AlGaIn 基光电导探测器等;(3)光伏探测器,如 Si, SiC, GaN P-N 结合肖特基势垒光伏探测器以及 CCD^[3-4]。近年来,基于声表面波技术(Surface Acoustic Wave, SAW)的紫外探测器(光-声-电效应)由于具有微型化、响应速度快、灵敏度高、数字输出、制作简单且可以无线无源监测等众多优势,成为紫外探测领域的研究热点。本文分析了声表面波紫外探测敏感机理,综述了声表面波紫外探测的国内外研究进展,展望了声表面波紫外探测的发展趋势与挑战。

2 声表面波紫外探测原理

SAW 指在弹性体自由表面产生并沿着表面传播的各种模式的波,包括瑞利波(Rayleigh wave)、勒夫波(Love wave)、水平剪切波(SH-SAW)、弯曲平板波(Flexural plate wave)、 S_0 兰姆波(Zero-order Symmetrical Lamb Wave, S_0 -LW)和斯通利波(Stoneley wave)等^[5]。SAW 器

件主要由压电基底材料和相互交错的金属薄膜叉指状换能器(Interdigital Transducer, IDT)组成,如图 1(a)所示。在 IDT 电极一端(输入叉指换能器)加入高频电信号,压电材料的表面就会产生机械振动并同时激发出与外加电信号频率相同的表面声波,这种表面声波会沿基板材料表面传播。如果在 SAW 传播途径上再制作一对 IDT 电极(输出叉指换能器),则可将 SAW 检测并使它转换成电信号^[6]。基于声表面波的紫外探测器是属于光-声-电三种物理场相互耦合的一种器件。当紫外光照射 SAW 器件,使得 SAW 器件的频率或相位发生偏移,通过探测频率、相位的偏移可以反推出紫外光强弱,这就是 SAW 紫外探测的原理。

目前,还没有一个非常完美的理论模型来解释 SAW 器件在紫外光照射下频移的物理根源,但是 SAW 紫外探测器的工作原理通常认为是基于声-电效应。声电效应是指半导体材料中,声波与自由载流子的相互作用所产生的各种物理效应。在无紫外光照下,SAW 器件声波在输入、输出换能器之间传播,由于压电基板材料具有逆压电效应,机械形变会导致材料极化,使得沿衬底表面传播的声波随之产生电势和电场。当 SAW 器件的敏感材料(通常为半导体材料)在被比敏感材料的截止波长短的紫外光照射时,敏感材料的价带电子被激发到导带中,材料表面会产生自由电子-空穴对(光生载流子)。这些光生自由载流子能够改变材料表面的电导率以及声波原始产生的电场,使得传播的 SAW 特性发生改变(如声速变化、频率偏移),如图 1(b)所示。当紫外光源关闭时,光生载流子的复合过程使声电效应减弱,进而恢复初始状态^[4,7-8]。2004 年,Palacios 等通过合理设计方案实现了远程收集和测量基于 GaN 薄膜 SAW 的光生载流子,如图 2 所示,验证了光-声-电三者的关系。该研究在输入端产生的声波将薄膜上产生的光生载流子打乱使它重新组合,部分载流子被声波扫描带到集电极,引起电场的变化,通过改变输入射频功率的大小来改变声波的强弱,在输出端检测出电流的变化趋势,可以得出声波与光生载流子相互作用的强度^[9]。

在声电效应机理下,由敏感薄膜产生的光生载流子与 SAW 器件表面产生声电耦合作用,从

而导致器件传输特性的变化,SAW 器件声波传播速度偏移(Δv)与插入损耗偏移($\Delta\Gamma$)以及相位的变化由式(1)决定^[4]:

$$\begin{cases} \Delta v/v_0 = \frac{k^2}{2} \cdot \frac{1}{1+(\sigma/\sigma_m)^2} \\ \Delta\Gamma = k^2 \frac{\pi}{\lambda} \cdot \frac{\sigma/\sigma_m}{1+(\sigma/\sigma_m)^2}, \\ \Delta\varphi = \frac{\Delta v}{v_0} \cdot \frac{2\pi L}{\lambda} \end{cases} \quad (1)$$

其中: v_0 为原始的声波传播速度, k^2 为有效的机电耦合系数, λ 为声波波长, L 为延迟线的长度, σ 和 σ_m 分别为材料的固有电导和表面电导。

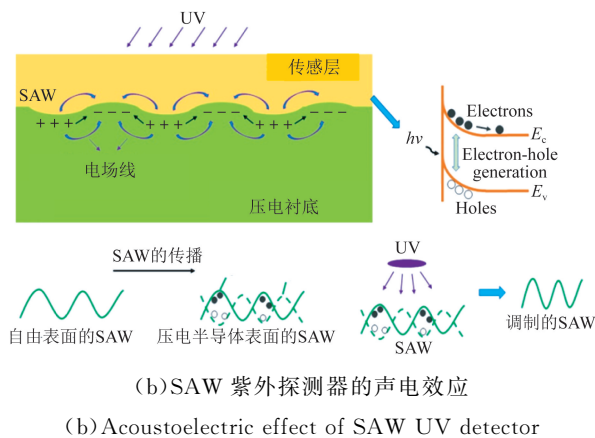
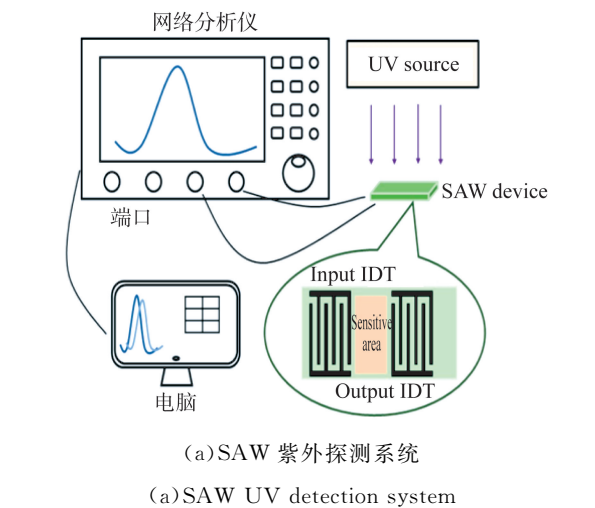
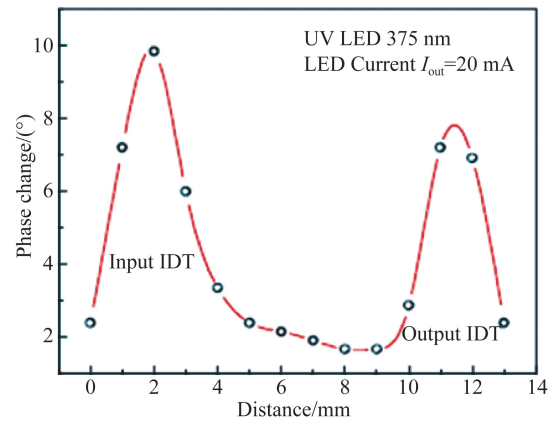


图 1 SAW 紫外探测器^[4]

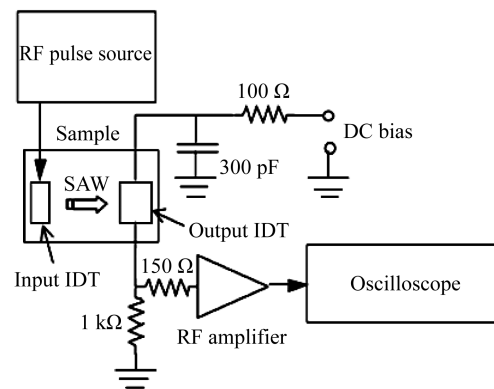
Fig. 1 SAW UV detector^[4]

另一个角度解释基于 SAW 的紫外探测器的机理是光电容效应。Ciplys 和 Chivukula 等发现紫外光照射 IDT 区域对 SAW 传输的影响要远大于相同尺寸区域光照两个 IDT 之间的声波传播

路径区域,这个现象没法用上述声电效应解释。他们提出了一种基于光电容效应的新机制,并证明了紫外诱导的 IDT 电容变化对声表面波信号相位变化的影响。他们认为紫外光引起的相位变化应归因于光电容效应引起的 IDT 阻抗的变化,随着传感层中光激发载流子密度的增加,金属(叉指电极)-半导体(敏感膜)结的耗尽宽度减小,导致 IDT 电容增大。因此,可以通过 UV 照射改变 IDT 区域的电容来控制 SAW 相位,这种传感器对 UV 引起的传播特性的扰动非常敏感^[10-11]。



(a) SAW 相位相对于沿 SAW 传播路径的距离的变化
(a) Changes in SAW phase relative to distance along SAW propagation path



(b) 观察 SAW 引起的高频电阻调制效果的装置^[10-11]
(b) Device for observing high-frequency resistance modulation effect caused by SAW^[10-11]

图 2 基于 GaN 薄膜 SAW 的光生载流子测量装置
Fig. 2 Measurement of photo-generated carriers based on GaN-film SAW

综述可以得出,基于 SAW 的紫外探测器的机理主要为:(1)SAW 声波传播区域在紫外光照

射下产生光生载流子,载流子与声波的声电效应导致 SAW 频率的偏移;(2) IDT 区域的光电容效应。

由于 SAW 器件的敏感薄膜对紫外辐射敏感,其薄膜性能的好坏直接影响着紫外探测器件的性能优劣,因此,本文从敏感薄膜的机理分类剖析 SAW 紫外探测的研究进展。

3 氮化镓类薄膜的声表面波紫外探测器

3.1 氮化镓声表面波紫外探测

氮化镓(GaN)是一种直接带隙的宽禁带 n 型半导体材料,禁带宽度为 3.39 eV,具有高热导率、高硬度、高熔点等特性^[6]。早在二十世纪六七十年代,研究者开始对 GaN 的光电特性进行研究,但其研究工作一直没有得到很好的成果,主要受困于两大难题:(1)没有合适的单晶衬底材料(蓝宝石衬底与 GaN 的晶格失配度很高);(2)无法实现 GaN 的 p 型掺杂^[12]。1986 年,日本研究人员 Amano 首次利用 AlN 缓冲层来外延制备 GaN 薄膜,大大地提高了膜的质量,得到了光滑无裂缝的高质量 GaN 薄膜^[13]。1989 年,研究人员通过低能电子束辐照处理,用 Mg 掺杂 GaN 实现了不同的 p 型传导,首次报道了 GaN p-n 结 LED 的特性^[14]。由于 GaN 的两大难题被研究人员解决,因此对 GaN 的研究工作也迅速地发展起来。目前,制备不同类型的 GaN 材料的方法很多,如脉冲激光沉积法^[15]、电化学技术^[16]、热丝化学气相沉积^[17]等。

2001 年,Cipllys 等首次提出了基于 GaN 薄膜的 SAW 器件在紫外探测上的应用^[18]。该研究通过实验得出换能器区域对紫外辐射灵敏度及导致声波相位变化,但并未明确地解释换能器区域影响频率和相位变化的原因。2002 年,Cipllys 等证明了 GaN 基声表面波换能器在紫外照射下,由于声波与光电导电子的相互作用导致了 SAW 速度降低从而引起了谐振器频率的降低^[19]。2008 年,Chen 等制备了 AlN/GaN/蓝宝石多层结构的 SAW 紫外振荡器,与在 GaN/蓝宝石上制造的器件相比,性能大大提高,灵敏度可达到 $4.2 \times 10^{-6}/(\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2})$,并有望开发深紫外传感器^[20]。

3.2 高性能 GaN 类 SAW 紫外探测器

为改善紫外敏感薄膜的光电性能,研究者在 GaN 的基础上,提出采用 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 三元合金压电薄膜,该薄膜相较于 GaN 薄膜具有更好的压电性能,通过改变 x 的值(Al 含量)调节压电薄膜的禁带宽度,使该三元合金的禁带带宽在 3.4~6.2 eV 之间变化,提高整个器件的探测范围。通过调整 Al 的含量改变传感器的带隙宽度,即有^[10]:

$$E_g = 6.13x + 3.42(1-x) - bx(1-x), \quad (2)$$

其中: E_g 的单位为 eV, 6.13 eV 表示的是 AlN 室温下的带隙值,3.42 eV 表示的是 GaN 室温下的带隙值, b 是弯曲参数,与制造工艺有关, x 为 Al 的摩尔分数, x 一般小于 1。由于制造 AlGa_N 薄膜使用的方法不尽相同,导致 b 值不同,因此, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 得到的带隙宽度最好时其 Al 含量也不尽相同。

与纯 GaN 的 SAW 紫外探测器不同,基于三元合金 AlGa_N 的 SAW 紫外敏感器件在波长 300 nm 以下的紫外辐射响应良好。2004 年,Cipllys 等报道了基于 AlGa_N 的 SAW 紫外敏感器件,在 254 nm 紫外辐射下,器件的最大频移达到了 10 kHz^[10]。2006 年,该研究小组通过试验发现基于 AlGa_N 的 SAW 紫外探测器对更短的波长紫外线表现良好,与基于 GaN 的紫外探测器相比,AlGa_N 基的紫外探测器具有良好的波长选择性^[21]。Koh 等将压电薄膜做成 AlGa_N/(Al、Ga)N/Al₂O₃ 层状结构的 SAW 器件^[22]。此结构对波长小于 280 nm 的紫外光十分灵敏,其灵敏度主要取决于 AlGa_N 层的厚度,当厚度增大时(不超过 100 nm),薄膜的电导率会增加,这样有利于光生载流子的产生,可提高器件的灵敏度。

在制备 GaN 薄膜时,往往会有一些杂质(如 O、Si 等),这将导致 GaN 显示出 n 型导电性,影响器件性能,因此近年来,除了掺杂 Al 金属外,其他金属物质掺杂在 GaN 中也有报道。相较于 Al 而言,其它 Fe, Cr, Zn 等金属元素对深电子(O^{2-})的捕获能力更强,可以提高 GaN 的电阻率,从而改善 SAW 器件的性能。Fan 等制备的掺杂 Fe 的 GaN 薄膜 SAW 紫外探测器,该器件在 UV 照射下表现出很大的透射特性变化,在停止辐射后展示出非常低的恢复率,表明了掺杂 Fe 的 GaN 薄膜具有持久的光电导率^[23]。

4 氧化锌类薄膜的声表面波紫外探测器

4.1 氧化锌薄膜的基本概述

同 GaN 一样,氧化锌(ZnO)也是一种宽带隙的薄膜材料,其带隙在 300 K 下为 3.437 eV,截止波长约为 365 nm,具有大的激子结合能(氧化锌 60 meV),与 GaN 等其他宽带隙材料相比,具有化学和热稳定性好、原料易得、电子迁移率高、成本低等优点,有利于制备高性能的声表面波紫外探测器。

ZnO 压电薄膜应用于高性能 SAW 器件,要求压电薄膜具有高 c 轴择优取向,结晶性能好,表面粗糙度低、较大的电阻率和压电系数等^[6]。ZnO 薄膜的制备工艺简单,方法多样,可以采用电子束蒸发^[24]、磁控溅射^[26]、化学气相沉积(CVD)^[27]、脉冲激光沉积(PLD)^[28]等方法制备。由于 ZnO 薄膜较 GaN 薄膜易于制备,因此,基于 ZnO 薄膜敏感层的 SAW 紫外探测器的研究工作较多,主要又可分为三个方面:(1)不同基板材料下的 SAW 紫外探测器;(2)类 MgZnO 薄膜的 SAW 紫外探测器;(3)ZnO 纳米结构的高灵敏度

SAW 紫外探测器。

4.2 不同基板材料下的 SAW 紫外探测器

通过前述公式(1)可以看出,改变机电耦合系数可以使 SAW 的传播特性变化,而改变 ZnO 的基板材料就可以改变机电耦合系数,且十分容易做到,因此,基于 ZnO 薄膜的声表面波紫外探测器的研究工作是从基板材料开始的。常用的基板材料有 LiNbO₃^[29]、蓝宝石^[30]、石英^[31]和 Si^[32]等。由于 LiNbO₃ 具有较大的机电耦合系数和不同的切向(XY, XZ),因此被较早地用于 SAW 紫外探测的研究,但其温度稳定性差,不适宜作为高温探测(如火焰探测)的基板。石英作为一种易获得、成本低的材料,适合器件的批量化制造,但耦合系数低,不适宜作为高性能的 SAW 紫外探测器。蓝宝石由于具有高的传播速度、高稳定性而被用于 SAW 紫外探测器上,但其高晶格与热失配度导致其与薄膜易发生晶格失调。Si 由于其良好的机械刚性和较高的传播速度而被开发用于 SAW 紫外探测,但它具有低带隙、电子移动性差等特点,不能很好地用于高灵敏度的紫外探测。在实际研究中,往往需要根据实际的要求而选择不同的基板材料。表 1 列举出了研究人员对于基于不同基板材料的 ZnO 薄膜声表面波紫外探测器的研究情况。

表 1 基板材料的部分研究工作

Tab. 1 Some research works of substrate materials

作者(年份)	薄膜层	基板材料	紫外光	分析	意义
Sharma(2003) ^[29]	ZnO	LiNbO ₃	波长为 365 nm、光强为 5~40 mW/cm ²	在小于 37 MHz 工作频率下,有光照时发生频率偏移(<170 kHz)	敏感膜吸收紫外光的能力决定频率响应
Emanetoglu, (2004) ^[30]	ZnO	蓝宝石	波长 365 nm、光强 0.81~2.32 mW/cm ²	相较于 GaN 基的探测器,插入损耗增加,频率偏移减少	为零源功率远程紫外传感器提供新思路
Sreenivas(2005) ^[33]	ZnO	LiNbO ₃ 石英	波长为 365 nm、光强为 10~40 mW/cm ²	频率降低 频率升高	不同基板可以影响 ZnO 膜吸收光的能力
Kumar(2009)	ZnO	石英	波长为 365 nm、强度为 19 mW/cm ²	中心频率降低 45 kHz,插入损耗增大 1.1 dB	有利于制造低成本的 SAW 紫外探测器
魏清良(2010) ^[32]	ZnO	Si	光强为 551 μW/cm ²	器件灵敏度为 8.12×10 ⁻⁶ /(μW·cm ⁻²)	研究了基于高阶模式 SAW 振荡器的高灵敏度 UV 检测器
谷航(2014) ^[34]	ZnO	Glass	波长为 365 nm、光强为 8.6 μW/cm ²	灵敏度为 36.4×10 ⁻⁶ mW/cm ²	利用仿真与实验相结合的方法进行研究

4.3 类 MgZnO 薄膜的 SAW 紫外探测器

为了进一步提高 ZnO 薄膜对紫外光的敏感程度,研究人员通过在 ZnO 薄膜上掺杂一些 II-III 族元素,例如 Be, Mg, Cd, Al 等。掺杂的 ZnO 薄膜可以将器件的暗电流降低几个数量级,而其光电流明显提高,从而可以提高光电转换效率及器件的灵敏度,这样可以制造具有大范围检测波长的高灵敏度声表面波 UV 探测器。目前,针对掺杂 ZnO 的 SAW 紫外探测器的研究主要集中在类 MgZnO 聚合物薄膜上,这是由于 Zn^{2+} (0.060 nm) 与 Mg^{2+} (0.057 nm) 的离子半径相似,因此 Mg 原子的替代在 ZnO 中不会引起很大的晶格常数的改变,使得这种材料适合用来制备 $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}/\text{ZnO}$ 异质结、超晶格结构和多量子阱。掺 Mg 可以使得 ZnO 的母体结构具有优异的光电性能,作为一种宽带隙调谐半导体, $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ 膜已被认为是用于可调紫外检测器最有前途的 UV 光电材料。带隙能量与 $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ 薄膜中 Mg 含量的函数关系如图 3 所示^[35]。Mg 摩尔含量在小于 37% 时, $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ 薄膜具有六方纤锌矿晶体结构,在大于 62% 是 $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ 薄膜具有立方晶体结构,在 37% ~ 62% 时具有两者的混合相。

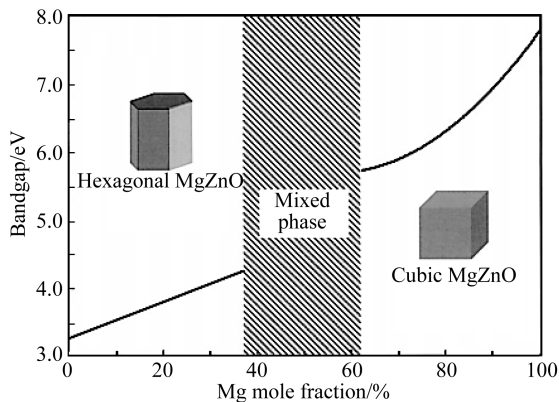


图 3 $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ 薄膜带隙能量与 Mg 含量的关系
Fig. 3 Relationship between band gap energy and Mg content of $\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ films

ZnO 掺杂 Mg 会导致带隙增大,在 Mg 的含量为 49% 时达到 4.05 eV,光响应会转移到 220 ~ 260 nm^[36]。然而, Mg 掺杂会导致电导逐渐减小,这削弱了 SAW 传感器中的声电相互作用。此外,当 Mg 的含量高于 30% 时,形成 ZnO 晶体结构中的许多缺陷(如残余应力、位错等),这导致光学性

能降低^[37]。Mg 和 Al 原子同时掺杂 ZnO 有助于在宽范围内调节 ZnO 的光学性能。为了得到性能更好的 ZnO 薄膜,研究人员通过掺杂 Al 等金属,并利用退火等处理方式来进行进一步改进 MgZnO 薄膜的性能。Kutepov 等研究了基于 $\text{Zn}_{1-x-y}\text{Mg}_x\text{Al}_y\text{O}$ 薄膜的声表面波光电探测器,薄膜的电导率可在 $0.25 \times 10^{-6} \sim 83 \times 10^{-6} \Omega/\text{cm}$ 之间变化,器件对于紫外光十分敏感,在波长为 248 nm 的紫外照射下,器件具有 0.1 ~ 0.2 ms 的快速光电响应^[38]。

4.4 ZnO 纳米结构的 SAW 紫外探测器

随着薄膜生长技术的发展,多种形态的 ZnO 薄膜,如纳米棒^[39]、纳米线^[40]、纳米片^[41]、纳米环、纳米螺旋/纳米环^[42]、纳米带、纳米管^[43]、纳米花和纳米壁^[44]等被开发出来,如图 4 所示,并应用于紫外探测。目前,常见的纳米结构的 ZnO 制备技术有热蒸发氧化法^[45]、化学气相沉积方法^[46]和物理气相沉积^[47]等。改变 ZnO 薄膜的结构形式主要是为了提高膜的紫外吸收效应,使其响应更快,灵敏度更高,这是由于纳米结构会使 ZnO 薄膜的比表面积增大,光电转换效率更快。不同的结构形式, ZnO 薄膜的电气和光学特性是不同的^[48],其探测机理也有所区别。比如 ZnO 纳米线中的光电机理为:当纳米线在 UV 光照射下时,产生电子-空穴对,由于表面陷阱状态(在表面吸收的氧分子),电子被捕获在表面,在施加电压时,未配对的电子在阳极处被收集,从而增加了电导率。而 ZnO 纳米颗粒(NP)的探测机理为:在光子能量大于带隙能量的紫外光照射下,表面吸附的氧分子捕获光生空穴,缩小 ZnO NP 层中的耗尽区,从而提高 ZnO NP 层的导电性。

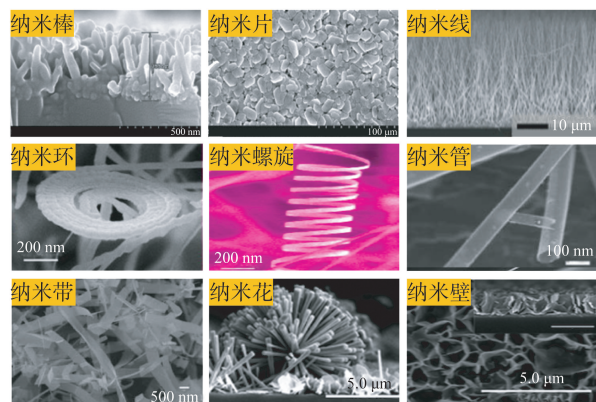


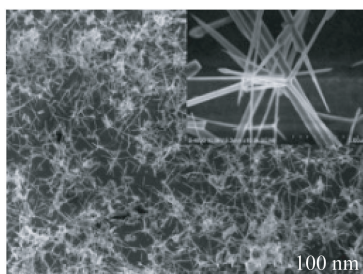
图 4 ZnO 不同的纳米结构
Fig. 4 Different ZnO nanostructures

贺永宁等研究了 ZnO 纳米线膜结构的声表面波紫外探测器,发现器件从暗场到紫外光辐射的转化过程中,其中心频率减少了 4 kHz,插入损耗增大了 0.23 dB^[49]。Peng 等报道了 ZnO 纳米线与 ZnO 单晶薄膜的声表面波紫外探测器,在波长为 365 nm,光强度为 150 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的紫外照射下,基于 ZnO 纳米线的 SAW 紫外探测器的灵敏度为 0.448 3 kHz/ $(\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$,如图 5(a)~5(c)所示,比传统 ZnO 单晶薄膜的 SAW 紫外探测器的灵敏度大了近 7 倍^[50]。

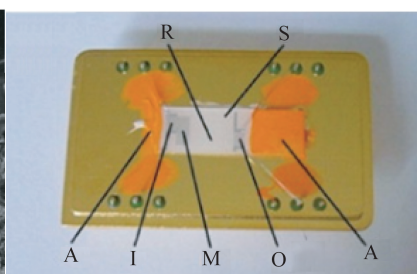
Wang 等报道了 ZnO 纳米棒结构的声表面波的高精度紫外探测器,该器件在波长为 365 nm,光功率密度为 3.5 mW/cm^2 时,相较于 AlGaIn 基的 SAW 紫外探测器的灵敏度增大了 6 倍^[51]。Chai 等报道了交叉纳米棒对紫外辐射监测的影响。在 1 V 偏压,紫外光波长为 361 nm 的照射下,器件的响应度为 15 mA/W ,这表明该探测器可以适用于低紫外探测^[52]。Li 等报道了 ZnO 纳米棒/ZnO 薄膜结构的 SAW 紫外探测器,如图 5(d)~5(f)所示。在波长为 365 nm,光强为 0.048 mW/cm^2 的紫外光照射下,器件灵敏度为

$93.7 \times 10^{-6}/(\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2})$,是传统 ZnO 薄膜的灵敏度 ($31.3 \times 10^{-6}/(\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2})$) 的近 3 倍^[53]。Lao 等报道了通过聚合物表面官能化实现了基于 ZnO 纳米带(NB)的高灵敏度 UV 探测器,该器件 ZnO 纳米带中的 UV 诱导的光电导相比于传统 ZnO 薄膜增加了 5 个数量级^[54]。

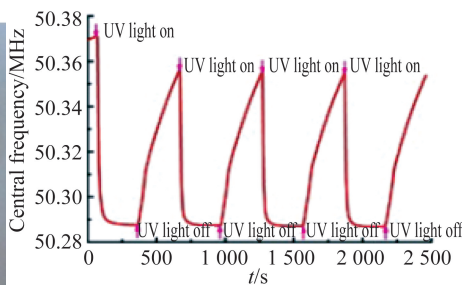
在 ZnO 纳米结构中掺杂一些 Au, Ag, Al, Sn, Cu 等不同元素可以大幅度提高紫外探测器的性能。Chen 等报导了掺 Ag 的 ZnO 纳米颗粒的 SAW 紫外探测器,如图 5(g)~5(i)所示。Ag 掺杂有效地增强了 ZnO 薄膜的导电性,提高了 SAW 传感器的灵敏度。在波长为 365 nm 的紫外照射下,器件可以达到 $84.2 \times 10^{-6}/(\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$ 的灵敏度^[55]。Khan 等报导了掺 Au 的 ZnO 纳米棒(NR)的紫外探测器。与 ZnO NR 相比,通过抑制深能级发光而增强固有发光。在紫外光照射,3 V 的偏压下,观察到 Au-ZnO NR 的光电流为 5.83 μA ,暗电流为 0.13 μA ,而未掺杂 Au 的 ZnO 纳米棒的光电流为 4.75 μA ,暗电流为 0.61 μA ,相比较而言,掺杂 Au 的 ZnO 纳米棒的器件性能更优^[56]。表 2 列出了基于纳米结构的 ZnO 的工作成果。



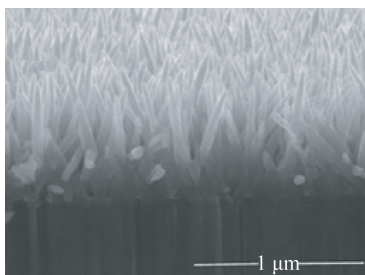
(a)制备出的 ZnO 纳米线
(a) ZnO nanowires prepared



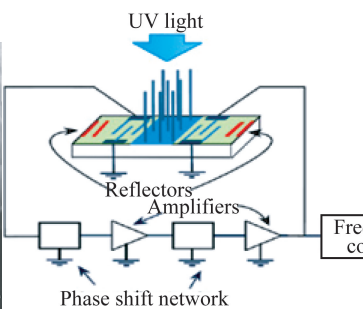
(b)SAW 紫外探测器的外观
(b) Appearance of SAW UV detector



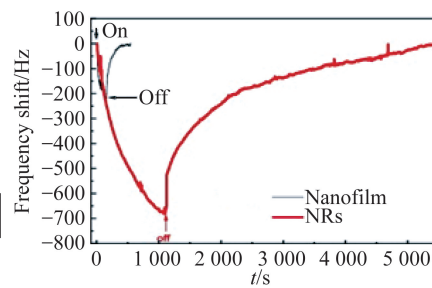
(c)具有 ZnO 纳米线层的探测器的频率-时间曲线 (针对显示重复性)
(c) Frequency-time curve of a detector with a ZnO nanowire layer (for showing repeatability)



(d)ZnO 纳米棒的 SEM 图像
(d) SEM image of a ZnO nanorod



(e)UV 探测器示意图
(e) Schematic diagram of UV detector



(f)具有 ZnO 纳米薄膜和 ZnO 纳米棒的 SAW 传感器的动态响应特性(紫外光波长为 365 nm,光强为 24 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$)
(f) Dynamic response characteristics of SAW sensor with ZnO nano film and ZnO nano rods (ultraviolet light wavelength is 365 nm, light intensity is 24 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$)

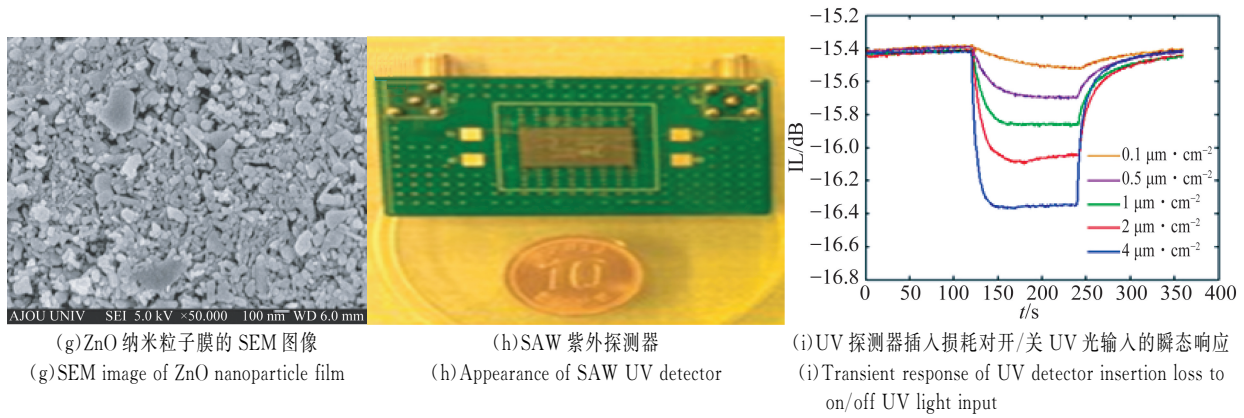


图 5 不同 ZnO 纳米结构的 SAW 紫外探测器

Fig. 5 SAW UV detectors with different ZnO nanostructures

表 2 对 ZnO 纳米结构的部分研究工作总结

Tab. 2 Summary of some research work on ZnO nanostructures

作者(年份)	薄膜层	基 板	中心频率/MHz	灵敏度/ $(\mu\text{m} \cdot \text{cm}^{-2})$
Wang(2009) ^[51]	ZnO 纳米棒	128°YX LiNbO ₃	145	0.06×10^{-6}
Chivukula(2010) ^[57]	ZnO 纳米颗粒	YZ LiNbO ₃	64	2.8×10^{-6}
Peng(2012) ^[50]	ZnO 纳米线	128°YX LiNbO ₃	50.9	8.26×10^{-6}
Lee(2013) ^[58]	ZnO 纳米颗粒	41°YX LiNbO ₃	235	3.34×10^{-6}
Chen Fu(2015) ^[55]	掺 Ag 的 ZnO 纳米颗粒	128°YX LiNbO ₃	156	84.2×10^{-6}
Saha(2016) ^[59]	ZnO 纳米线	LCM	—	0.096
Li(2019) ^[53]	ZnO 纳米棒/ZnO 薄膜	石英	200.2	93.7

注:灵敏度定义为归一化中心频移($\Delta f/f_0$)或 S21 对紫外光强度的插入损耗偏移; LCM: langasite crystal microbalance, langasite($(\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14})$)晶体微量天平。

4.5 柔性 ZnO 基 SAW 紫外探测器

近年来,为解决传统硬质 ZnO SAW 紫外探测器不能贴于弯曲曲面的问题,人们提出了基于 ZnO 薄膜的柔性紫外探测器。柔性电子设备由于其柔韧性、重量轻、成本低等特点,被认为是 21 世纪十大新兴技术之一。基于柔性 SAW 的紫外探测器可以贴于弯曲曲面和人体皮肤,在智能蒙皮和电子皮肤上有重要的应用前景。2014 年,骆季奎等首次报导了双模式 ZnO/PI 结构的柔性 SAW 紫外光探测器,器件表现出瑞利波和兰姆波,两种波的灵敏度分别为 $111.3 \times 10^{-6}/(\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2})$ (瑞利波)和 $55.8 \times 10^{-6}/(\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2})$ (兰姆波)^[60]。Hasan 等报导了基于纳米结构 ZnO 薄膜 SAW 器件的柔性紫外传感器。在不同的弯曲程度下,器件的灵敏度不一样,说明柔性器件的弯曲程度与紫外探测器的性能有关,例如在平坦状态下,器

件的灵敏度为 $39.2 \times 10^{-6}/(\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2})$,向下弯曲时为 $30.8 \times 10^{-6}/(\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2})$,向上弯曲时为 $18.5 \times 10^{-6}/(\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2})$ 。器件表现出良好的可重复性和稳定性,在柔性或可穿戴 UV 光传感器的应用中具有巨大潜力^[61]。尽管柔性 SAW 紫外探测器具有重量轻、可弯曲等优点,但是其本身性能很难与硬质 SAW 器件相比拟,这严重制约了柔性电子传感和监测系统的发展,特别是远程、无线和无源传感网络。

5 其他敏感薄膜类 SAW 紫外探测器

除了 GaN, ZnO 薄膜, AlN, TiO₂, MoS₂, 钙钛矿等其他敏感薄膜的紫外探测器也有报道。同 GaN 和 ZnO 一样, AlN 也是一种直接带隙宽禁半导体材料,在所有半导体中具有最宽的直流能

带隙 6.1 eV。Li 等研究了基于 AlN 薄膜的紫外探测器,在紫外光波长为 200 nm 时,响应度最大,为 0.3 A/W,表明 AlN 可以用作深紫外光探测器材料^[62]。但是由于 AlN 的带隙宽大于中、长紫外波段的能量值,无法激发电子到薄膜层,同时,当用 AlN 作为 SAW 紫外探测器的敏感薄膜时,低的机电耦合系数会导致声电效应降低,从而使器件的性能下降。Walter 等报道了 TiO₂ 纳米棒薄膜的 SAW 紫外探测器,在波长为 365 nm 的紫外光照射下,其相位偏移高达 2 540 pF,主要是由于 TiO₂ 具有优异的光电活性,其纳米结构可以提高紫外光的吸收效率^[63]。Zhou 等报导了二维(2D)宽带隙半导体二硫化钼(MoS₂)纳米片作为 SAW 紫外(UV)光导材料的探测器,在波长为 365 nm,光强度为 4.666 mW/cm² 的紫外光照射下,最大频移可达 3.5 MHz,其灵敏度为 $2.05 \times 10^{-6} \text{ m}/(\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$,分析认为高灵敏度归因于 MoS₂ 纳米片的高共振频率(以 GHz 为单位)和高比表面积^[64]。Jiang 等报导了基于二维钙钛矿的高灵敏 SAW 光学传感器,发现特征频率与光强保持着良好的线性关系,器件的灵敏度可达到 $31.5 \times 10^{-6}/(\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$ 。由此表明,钙钛矿在光电探测领域具有广阔的应用前景^[65]。

6 基于 SAW 的紫外探测器挑战与未来发展趋势

近年来,尽管 SAW 紫外探测器取得了巨大的研究进展,但离高灵敏度、高性能、高稳定性和实用性还有距离,SAW 紫外探测面临的主要挑战有:

(1)敏感薄膜的选择性低。尽管做紫外光电探测器的材料有很多,但很多不适用于 SAW 紫外探测器。采用何种敏感材料首先取决于紫外光子的能量是否高于敏感薄膜材料的带隙能量^[58]。如何合成适合 SAW 紫外探测的敏感材料是目前的一大挑战。

(2)优化降低敏感膜异质结构的晶格失配。基于薄膜同质结/异质结的结构比其对应物的单

层薄膜具有更高的光响应性能,因为它们的界面处具有内部内置电。但是基于异质结的结构在光电导期间显示出较慢的响应时间和恢复时间,这主要是由于异质结构界面处的晶格失配引起的。因此,为了在基于薄膜同质结或异质结的中实现期望的光响应,需要降低界面处的晶格失配。

(3)超高灵敏度纳米结构的可控制备和优化。纳米结构形态在光捕获效应中起关键作用,其性能的好坏决定了表面电子和空穴对的产生效率。

(4)如何得到高质量的纳米结构是一个亟待解决的问题,包括直径、长度、取向、密度、结晶和分级组装的可靠控制。

(5)如何阵列化、集成化、智能化探测。

(6)如何实现阵列化集成化探测,且同时无线无源传感与人工智能大数据平台相结合是一个挑战。

未来基于 SAW 技术的紫外探测发展趋势如下:

(1)无线无源集成探测。基于声表面波的紫外探测器的优势之一便是可以实现无线无源,且可以与集成电路集成形成探测芯片与系统,未来可以将 SAW 探测器集成在智能终端(如手机)装置中,易于随身携带、实时监测,快速反馈探测信息,使探测器更加智能化,符合当代人们的需求。

(2)全波段紫外探测器的开发。目前 SAW 紫外探测器主要集中在一段波长的探测,无法实现紫外全波段的探测器,通过大幅度改变敏感膜的能量带隙或许可以用于基于不同波段的紫外探测器,实现混合式的多功能探测。

(3)超高灵敏度紫外探测器的开发。紫外探测器的发展与微电子学的发展并行,随着平面电子加工技术的发展和成熟,通过改变声表面波叉指换能器的结构,可以实现以 GHz 为单位的高频紫外探测器,其探测精度会大大提高。

(4)人工智能+大数据平台监测。大部分 SAW 紫外探测还仅仅处于试验阶段,主要研究工作还处于器件传感层,在数据处理层工作偏少,未来可将采集的数据人工智能处理,且与大数据平台结合后实现远程监测。

参考文献:

[1] 张忠廉,刘榴娣. 紫外线技术在军事上的应用研究[J]. 光学技术,2000,26(4):289-293.

ZHANG ZH L, LIU L D. Research on the application of ultraviolet technology in the military [J]. *Optical Technology*, 2000,26(4): 289-293. (in Chinese)

[2] 张猛蛟,蔡毅,江峰,等. 紫外增强硅基成像探测器

- 进展 [J]. 中国光学, 2019, 12(1): 19-37.
- ZHANG M J, CAI Y, JIANG F, *et al.*. Progress of UV-enhanced silicon-based imaging detectors [J]. *China Optics*, 2019, 12(1): 19-37. (in Chinese)
- [3] XIE C, LU X T, TONG X W, *et al.*. Ultrawide-bandgap semiconductors: Recent progress in solar-blind deep-ultraviolet photodetectors based on inorganic ultrawide bandgap semiconductors [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2019, 29(9): 1806006.
- [4] ZHANG Y, CAI Y, ZHOU J, *et al.*. Surface acoustic wave-based ultraviolet photodetectors: a review [J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(7): 587-600.
- [5] 周剑, 吴学忠, 肖定邦, 等. 柔性声表面波器件的波模式分析 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(6): 1328-1334.
- ZHOU J, WU X ZH, XIAO D B, *et al.*. Wave mode analysis of flexible surface acoustic wave devices [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(6): 1328-1334. (in Chinese)
- [6] 潘峰. 声表面波材料与器件 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- PAN F. *Surface Acoustic Wave Materials and Devices* [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
- [7] 彭文博, 贺永宁, 赵小龙, 等. 声表面波 ZnO 薄膜紫外探测器的响应机制研究 [J]. 压电与声光, 2014, 36(1): 12-15, 18.
- PENG W B, HE Y N, ZHAO X L, *et al.*. Investigation of the response mechanism for ZnO thin film based surface acoustic wave ultraviolet detector [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2014, 36(1): 12-15, 18. (in Chinese)
- [8] WANG S, LI Z J, ZHOU X, *et al.*. Advances in nanostructured acoustic wave technologies for ultraviolet sensing [J]. *Nanoscience and Nanotechnology Letters*, 2015, 7(3): 169-192.
- [9] PALACIOS T, CALLE F, GRAJAL J. Remote collection and measurement of photogenerated carriers swept by surface acoustic waves in GaN [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 84(16): 3166-3168.
- [10] CIPLYS D, SHUR M S, PALA N, *et al.*. Ultraviolet-sensitive AlGaIn-based surface acoustic wave devices [C]. *Sensors*, 2004 *IEEE, Vienna*, 2004 (3): 1345-1348.
- [11] CHIVUKULA V S, CIPLYS D, SHUR M S, *et al.*. Capacitance controlled n-GaN SAW UV sensor [C]. *Sensors*, 2008 *IEEE, Lecce*, 2008: 984-987.
- [12] 刘万金, 胡小燕, 喻松林. GaN 基紫外探测器发展概况 [J]. 激光与红外, 2012, 42(11): 1210-1214.
- LIU W J, HU X Y, YU S L. Development overview of GaN-based ultraviolet detector [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(11): 1210-1214. (in Chinese)
- [13] AMANO H, SAWAKI N, AKASAKI I, *et al.*. Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, 48(5): 353-355.
- [14] AMANO H, KITO M, HIRAMATSU K, *et al.*. P-type conduction in Mg-doped GaN treated with low energy electron beam irradiation (LEEBI) [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1989, 28: L2112-L2114.
- [15] WANG W L, YANG W J, LIU Z L, *et al.*. Synthesis of homogeneous and high-quality GaN films on Cu(111) substrates by pulsed laser deposition [J]. *Cryst Eng Comm*, 2014, 16(36): 8500-8507.
- [16] AL-HEUSEEN K, HASHIM M R. One-step synthesis of GaN thin films on Si substrate by a convenient electrochemical technique at low temperature for different durations [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2011, 324(1): 274-277.
- [17] ARÍZAGA G G C, HERNÁNDEZ K V C, CASTRO N C, *et al.*. Synthesis and characterization of GaN rods prepared by ammono-chemical vapor deposition [J]. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 2012, 2(2): 292-299.
- [18] CIPLYS D, RIMEIKA R, SEREIK A, *et al.*. GaN-based SAW delay-line oscillator [J]. *In Electronics Letters*, 2001, 37(8): 545-546.
- [19] CIPLYS D, RIMEIKA R, SHUR M S, *et al.*. Visible-blind photoresponse of GaN-based surface acoustic wave oscillator [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 80(11): 2020-2022.
- [20] CHEN T C, LIN Y T, LIN C Y, *et al.*. Suitability of surface acoustic wave oscillators fabricated using low temperature-grown AlN films on GaN/sapphire as UV sensors [J]. *IEEE on Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2008, 55(2): 489-493.
- [21] CIPLYS D, SHUR M S, SEREIK A, *et al.*. Deep-UV LED controlled AlGaIn-based SAW oscillator [J]. *Phys. Stat. Sol. (a)*, 2006, 203(7): 1834-1838.
- [22] KOH K, NAKAI K, NEGISI T, *et al.*. P21-

- surface acoustic wave ultraviolet sensor using epitaxial AlGaN/(Al, Ga)N film [C]. 2006 *IEEE Ultrasonics Symposium, Vancouver, BC*, 2006: 1774-1777.
- [23] FAN Y M, XU K, LIU Z H, *et al.*. Ultraviolet photoresponse of surface acoustic wave device based on Fe-doped high-resistivity GaN [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2017, 56(5):050307.
- [24] 胡轶,胡更新,张洁静,等. ZnO 纳米棒/CdS 量子点的制备及紫外-可见探测性能研究 [J]. *中国光学*, 2019, 12(6):1271-1278.
- HU YI, HU G X, ZHANG J J, *et al.*. Preparation of ZnO nanorods / CdS quantum dots and their UV-visible detection performance [J]. *China Optics*, 2019, 12 (6) : 1271-1278. (in Chinese)
- [25] NAKANISHI Y, MIYAKE A, KOMINAMI H, *et al.*. Preparation of ZnO thin films for high-resolution field emission display by electron beam evaporation [J]. *Applied Surface Science*, 1999, 142:233-236.
- [26] ONDO-NDONG R, ESSONE-OBAME H, MOUS-SAMBI Z H, *et al.*. Capacitive properties of zinc oxide thin films by radiofrequency magnetron sputtering [J]. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 2018(12):309-317.
- [27] KUMAR G, KUMAR R, KUMAR A, *et al.* ZnO thin films: chemical vapour deposition, growth and functional properties [J]. *Reviews in Advanced Sciences and Engineering*, 2016, 5(2):150-160.
- [28] WISZ G, VIRT I, SAGAN P, *et al.*. Structural, optical and electrical properties of zinc oxide layers produced by pulsed laser deposition method [J]. *Nanoscale Research Letters*, 2017, 12(1):253.
- [29] SHARMA P, KUMAR S, SREENIVAS K, *et al.*. Interaction of surface acoustic waves and ultraviolet light in ZnO films [J]. *Journal of Materials Research Society*, 2003, 18(3):545-548.
- [30] EMANETOGLU N W, ZHU J, CHEN Y, *et al.*. Surface acoustic wave ultraviolet photodetectors using epitaxial ZnO multilayers grown on r-plane sapphire [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 85 (17): 3702-3704.
- [31] KUMAR S, KIM H, SREENIVAS K, *et al.*. ZnO based surface acoustic wave ultraviolet photo sensor [J]. *J Electroceram*, 2009, 22:198-202.
- [32] WEI C L, CHEN Y C, CHENG C C, *et al.*. Highly sensitive ultraviolet detector using a ZnO/Si layered SAW oscillator [J]. *Thin Solid Films*, 2010, 518(11):3059-3062.
- [33] SREENIVAS K, KUMAR S, SHARMA P. Interaction of surface acoustic waves with ultraviolet light [J]. *Ferroelectrics*, 2005, 329(1): 69-72.
- [34] 谷航,何兴理,骆季奎. 基于 ZnO/Glass 声表面波器件的高速紫外传感特性研究 [J]. *传感器与微系统*, 2014, 33(9):35-37, 41.
- GU H, HE X L, LUO J K. Research on high-speed UV sensing characteristics based on ZnO / glass SAW device [J]. *Sensors and Microsystems*, 2014, 33(9): 35-37, 41. (in Chinese)
- [35] YANG W, HULLAVARAD S S, NAGARAJ B, *et al.*. Compositionally-tuned epitaxial cubic $Mg_xZn_{1-x}O$ on Si(100) for deep ultraviolet photodetectors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 82(20): 3424-3426.
- [36] ENDO H, KIKUCHI M, ASHIOI M, *et al.*. High-sensitivity mid-ultraviolet Pt/Mg_{0.59}Zn_{0.41}O schottky photodiode on a ZnO single crystal substrate [J]. *Applied Physics Express*, 2008(1):051201.
- [37] KIM I S, LEE B T. Design and growth of deep UV-range single crystalline ZnMgAlO thin films lattice-matched to ZnO [J]. *Crystal Growth & Design*, 2010, 10(7): 3273-3276.
- [38] KUTEPOV M E, KAYDASHEV V E, KARAPETYAN G Y, *et al.*. Deep UV light sensitive Zn_{1-x-y}Mg_xAl_yO films with fast photoelectric response for SAW photodetectors [J]. *Smart Mater. Struct.*, 2019, 28(6):065024.
- [39] ULIANOVA V, ZAZERIN A, PASHKEVICH G, *et al.*. High-performance ultraviolet radiation sensors based on zinc oxide nanorods [J]. *Sensors and Actuators A Physical*, 2015, 234: 113-119.
- [40] NÚÑEZ C G, VILOURAS A, TAUBENAVARAJ W, *et al.*. ZnO nanowires-based flexible UV photodetector system for wearable dosimetry [C]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(19):7881-7888.
- [41] XIANG Y, YU N S, LIU J, *et al.*. Simple fabrication of ZnO nanosheets/p-GaN heterostructure and ultraviolet detection [J]. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2018, 102: 29-32.
- [42] WANG Z L. ZnO nanowire and nanobelt platform for nanotechnology [J]. *Materials Science and*

- Engineering R*, 2009, 64(3/4): 33-71.
- [43] FANG X S, BANDO Y, GAUTAM U K, *et al.*. ZnO and ZnS nanostructures: ultraviolet-light emitters, lasers, and sensors [J]. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2009, 34(3/4): 190-223.
- [44] TANG J F, SU H H, LU Y M, *et al.*. Controlled growth of ZnO nanoflowers on nanowall and nanorod networks via a hydrothermal method [J]. *Cryst Eng Comm*, 2015, 17(3): 592-597.
- [45] MOHANAN A A, PARTHIBAN R, RAMAKRISHNAN N. Shadow mask assisted direct growth of ZnO nanowires as a sensing medium for surface acoustic wave devices using a thermal evaporation method [J]. *Micromech. Microeng.*, 2016, 26(2): 025017.
- [46] WU J J, LIU S C. Low-temperature growth of well-aligned ZnO nanorods by chemical vapor deposition [J]. *Adv. Mater.*, 2002, 14(3): 215-218.
- [47] JIMENEZ-CADENA G, COMINI E, FERRONI M, *et al.*. Synthesis of different ZnO nanostructures by modified PVD process and potential use for dye-sensitized solar cells [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2010, 124(1): 694-698.
- [48] SANG L W, LIAO M Y, SUMIYA M. A comprehensive review of semiconductor ultraviolet photodetectors: from thin film to one-dimensional nanostructures [J]. *Sensors*, 2013, 13(8): 10482-10518.
- [49] 贺永宁, 文常保, 李昕, 等. 基于 ZnO 半导体纳米线膜的声表面波型紫外探测器 [J]. *功能材料与器件学报*, 2008(1): 263-267.
- HE Y N, WEN C B, LI X, *et al.*. SAW UV detector based on ZnO semiconductor nanowire film [J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2008(1): 263-267. (in Chinese)
- [50] PENG W B, HE Y N, WEN C B, *et al.*. Surface acoustic wave ultraviolet detector based on zinc oxide nanowire sensing layer [J]. *Sensors Actuators A*, 2012, 184: 34-40.
- [51] WANG W S, WU T T, CHOU T H, *et al.*. A ZnO nanorod-based SAW oscillator system for ultraviolet detection [J]. *Nanotechnology*, 2009, 20(13): 135503.
- [52] CHAI G Y, LUPAN O, CHOW L, *et al.*. Crossed zinc oxide nanorods for ultraviolet radiation detection [J]. *Sensors and Actuators A*, 2009, 150(2): 184-187.
- [53] LI W, GUO Y J, TANG Q B, *et al.*. Highly sensitive ultraviolet sensor based on ZnO nanorod film deposited on ST-cut quartz surface acoustic wave devices [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 363: 419-425.
- [54] LAO C S, PARK M C, KUANG Q, *et al.*. Giant enhancement in UV response of ZnO nanobelts by polymer surface-functionalization [J]. *Am. Chem. Soc.*, 2007, 129(40): 12096-12097.
- [55] FU C, LEE K J, LEE K, *et al.*. Low-intensity ultraviolet detection using a surface acoustic-wave sensor with a Ag-doped ZnO nanoparticle film [J]. *Smart Mater Struct*, 2015, 24(1): 015010.
- [56] KHAN R, UTHIRAKUMAR P, KIM T H, *et al.*. Enhanced photocurrent performance of partially decorated Au nanoparticles on ZnO nanorods based UV photodetector [J]. *Materials Research Bulletin*, 2019, 115: 176-181.
- [57] CHIVUKULA A, CIPLYS D, SHUR M, *et al.*. ZnO nanoparticle surface acoustic wave UV sensor [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 96(23): 233512.
- [58] LEE K J, OH H, JO M, *et al.*. An ultraviolet sensor using spin-coated ZnO nanoparticles based on surface acoustic waves [J]. *Microelectron. Eng.*, 2013, 111: 105-109.
- [59] SAHA T, GUO N Q, RAMAKRISHNAN N, *et al.*. Zinc oxide nanostructure-based langasite crystal microbalance ultraviolet sensor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(9): 2964-2970.
- [60] HE X L, ZHOU J, WANG W B, *et al.*. High performance dual-wave mode flexible surface acoustic wave resonators for UV light sensing [J]. *Micromech. Microeng.*, 2014, 24(5): 055014.
- [61] HASAN S A, TORUN H, GIBSON N, *et al.*. Flexible UV sensor based on nanostructured ZnO thin film SAW device [J]. 2019 *IEEE Jordan International Joint Conference on Electrical Engineering and Information Technology (JEEIT)*, Amman, Jordan, 2019: 85-90.
- [62] LI J, FAN Z Y, DAHAL R, *et al.*. 200 nm deep ultraviolet photodetectors based on AlN [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006(21), 89: 213510.
- [63] WATER W, WEN C W. Application of TiO₂ thin film with nanorods to surface acoustic wave type ultraviolet photo detection [J]. *Electroceram*, 2016, 36: 94-101.

- [64] ZHOU P, CHEN C S, WANG X, *et al.*. 2-Dimensional photoconductive MoS₂ nanosheets using in surface acoustic wave resonators for ultraviolet light sensing [J]. *Sensors and Actuators A*, 2018, 271:389-397.
- [65] JIANG T Y, JU ZH Y, LIU H F, *et al.*. High sensitive surface-acoustic-wave optical sensor based on two-dimensional perovskite [C]. 2019 *International Conference on IC Design and Technology (ICICDT)*, SUZHOU, China, 2019:1-4.

作者简介:

殷长帅(1996—),男,湖北孝感人,硕士研究生,2019年于三峡大学获得学士学位,主要从事声表面波光电探测的研究。E-mail:yin_CS@foxmail.com

通讯作者:

周 剑(1988—),男,湖南长沙人,副教授,硕士生导师,主要从事声表面波传感器、人工智能传感器及柔性电子器件的研究。E-mail:jianzhou@hnu.edu.cn