

ZnO 半导体电导型 X 射线探测器件研究*

赵小龙¹⁾ 康雪¹⁾ 陈亮²⁾ 张忠兵²⁾ 刘金良²⁾ 欧阳晓平²⁾
彭文博¹⁾ 贺永宁^{1)†}

1) (西安交通大学, 电子与信息工程学院, 西安 710049)

2) (西北核技术研究所, 辐射探测科学研究中心, 西安 710024)

(2013 年 12 月 15 日收到; 2014 年 1 月 17 日收到修改稿)

本文制备了基于 ZnO 纳米线阵列和 ZnO 薄膜的 Ag-ZnO-Ag 电导型 X 射线探测器件, 研究了它们对 X 射线的响应特性. 薄膜器件在 100 V 偏置时的响应度达到 $0.12 \mu\text{C}/\text{Gy}$, 纳米线阵列器件在 50 V 偏压下的响应度达到 $0.17 \mu\text{C}/\text{Gy}$. 器件工作机理研究表明, 器件的响应过程与表面氧吸附与解吸附效应有关, 氧气吸附与解吸附过程使得 X 射线辐照下的载流子寿命大幅度增加, 从而使得器件对 X 射线具有较高的响应度. 本文研究结果表明 ZnO 薄膜和纳米线阵列器件在 X 射线剂量测量领域具有应用前景.

关键词: ZnO 薄膜, ZnO 纳米线, X 射线探测, 氧吸附

PACS: 85.25.Oj, 29.40.-n, 07.85.Fv, 07.07.Df

DOI: 10.7498/aps.63.098502

1 引言

半导体核辐射探测器具有体积小、灵敏度高、分辨率高以及可集成度高等优点, 在核辐射探测领域有广泛的需求. 目前, 成熟的半导体核辐射探测器以硅基材料为主, 例如硅漂移探测器 (SDD)、硅微条 (SMD)、硅二极管 (Si-PIN) 等, 然而硅材料抗辐照能力较差, 探测器使用寿命短, 不利于在强辐照环境下使用^[1,2], 研制具有更强抗辐照性能的宽禁带半导体探测器成为辐射探测领域关注的焦点. 众多的宽禁带半导体材料被尝试用于核辐射探测器制作, 例如 SiC^[3,4], GaN^[5] 以及金刚石^[6,7] 等, 并取得显著进展, 但是由于核辐射探测器对材料质量要求非常高, 而宽禁带半导体材料缺陷较多且相关处理工艺不成熟, 宽禁带半导体探测器性能与硅探测器相比差距明显, 并且制作成本非常高. 近年来, 受到近紫外波段光电子学发展的推动, ZnO 开始成为 GaN 基之后步入宽禁带半导体材料和器件领域中的新宠儿. ZnO 是一种直接

带隙半导体, 室温禁带宽度 3.37 eV, 相比于金刚石以及 GaN, ZnO 材料易于生长, 可以采用多种方法制备. 得益于 ZnO 在光电领域的广泛研究, ZnO 半导体的单晶、外延薄膜、掺杂和合金化等材料基础研究以及其 ZnO 基紫外发光和光电探测器件应用研究进展都非常迅速^[8-13], ZnO 半导体还具有良好的抗辐照性能, 这为开展基于 ZnO 材料的核辐射探测器研究创造了先天条件. ZnO 单晶的响应时间快, 灵敏体积较大, 可实现单片集成, 2011 年, Endo 等^[14] 利用水热法生长的 ZnO 单晶制备了 Pt-ZnO-AZO 结构电导型 X 射线探测器, 响应度达到 $1.5 \mu\text{C}/\text{Gy}$. 2010 年, Gao 等^[15] 报道了一种基于 ZnO 纳米量子点薄膜的 Au-ZnO-Au 电导型 X 射线探测器, 该探测器对 X 射线响应电流小于 1 nA. 与已报道的 HgI₂ 和 CdZnTe 探测器^[10] 相比, 目前 ZnO 探测器的灵敏度较低.

本文探索了薄膜电导型 ZnO 器件用于低能 X 射线剂量测量的可行性. 首先采用 ZnO 薄膜制备了 X 射线探测器件, 研究基于 ZnO 光电导效应探测

* 国家自然科学基金 (批准号: 60876038, 11375144) 和 “ZnO 半导体纳米结构核辐射探测机理研究”, 西安交通大学基本科研业务费学科综合交叉科研项目资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: yongning@mail.xjtu.edu.cn

X射线的器件特性和工作机理. 考虑到本课题组在之前的ZnO纳米线紫外探测器件研究中发现纳米线的大的比表面积对提高探测灵敏度具有优势^[16], 还制备了基于ZnO纳米线阵列的X射线探测器件, 期望获得高灵敏度的X射线探测器件. 基于X射线与ZnO半导体的体光电效应和ZnO表面氧吸附形成的空穴陷阱效应, 对所制备的ZnO X射线探测器件对X射线的响应过程进行了理论分析.

2 器件制备和表征

2.1 电导型 Ag-ZnO-Ag 结构 X 射线探测器件制备

器件由Ag叉指电极和ZnO薄膜或纳米线阵列构成. 器件的制备工艺如下:

首先, 制备Ag叉指电极. 在石英衬底上蒸发镀银, 银层厚度为150 nm, 然后对蒸发的银在450°下真空热处理1 h, 以提高Ag与石英衬底的黏附性. 然后, 将Ag刻蚀出叉指电极, 电极宽度和间距均为500 μm , 指条等效总长度为5.6 cm.

第二步, 溅射ZnO籽晶薄膜. 采用射频磁控溅射法制备, 选用纯度为99.99%的ZnO靶, 溅射工艺参数为: 溅射功率120 W, 氧气流量为10 sccm, 氩气流量为5 sccm, 气压为1.0 Pa, 温度250°, 时间30 min. 籽晶层厚度为200 nm.

第三步, 溅射ZnO薄膜和水热法生长ZnO纳米线阵列. 将第二步制备好的籽晶片分为两部分, 一部分采用相同的ZnO磁控溅射工艺继续溅射2 h; 另一部分采用水热法生长ZnO纳米线阵列, 生长液采用0.025 M的六次甲基四胺和0.025 M的二水合乙酸锌的1:1混合溶液, 温度为80°, 生长时间为3 h.

最后, 氧气气氛真空热处理. 将制备好的薄膜和纳米线阵列基片放入高温炉进行热处理, 减少缺陷浓度, 提高ZnO材料的结晶性能. 热处理在低压Ar气和氧气混合气氛下进行, Ar气流量为100 sccm, 氧气流量为10 sccm, 腔内气压保持为700 Pa, 温度为700 °C, 热处理时间为1 h.

2.2 ZnO 薄膜和纳米线阵列膜层的表征

采用HITACHI S-4800扫描电子显微镜对制备的薄膜和纳米线显微形貌和厚度进行表征, 使用D/max 2400衍射仪测量薄膜和纳米线阵列的X射线衍射谱(XRD).

ZnO薄膜扫描电子显微图(SEM)如图1(a), (c)所示, 薄膜为柱状多晶结构, 薄膜厚度为1.4 μm . ZnO纳米线阵列SEM如图1(b), (d)所示, 纳米线与籽晶层的总厚度为1 μm , 纳米线的直径约为150 nm, 纳米线之间发生融合.

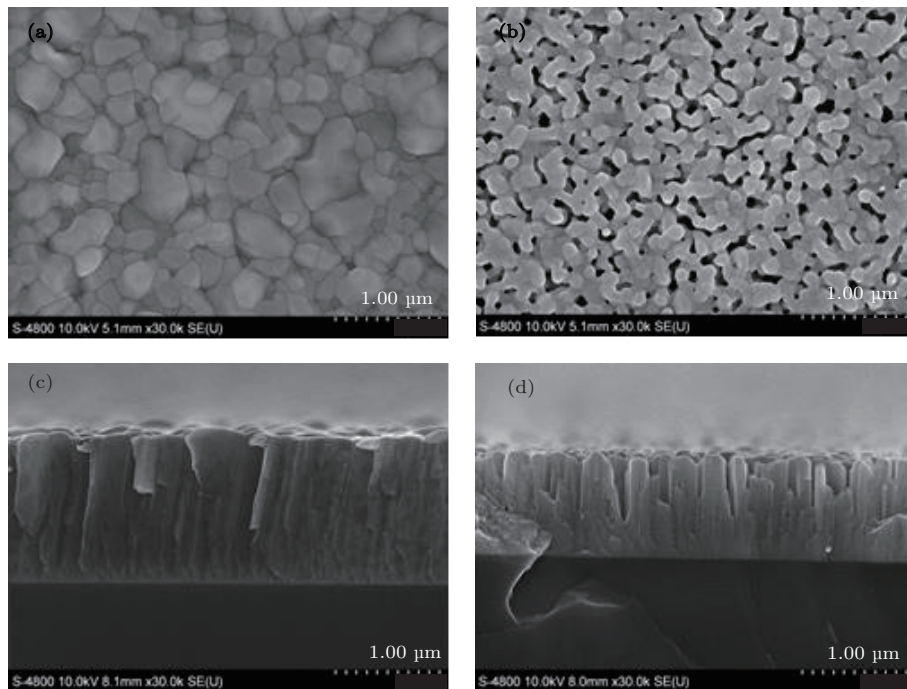


图1 (a), (c) 磁控溅射 ZnO 薄膜 SEM 图; (b), (d) 水热法生长 ZnO 纳米线阵列 SEM 图

XRD 测量结果如图 2 所示, 表明溅射薄膜和生长的纳米线具有良好的 C 轴取向。

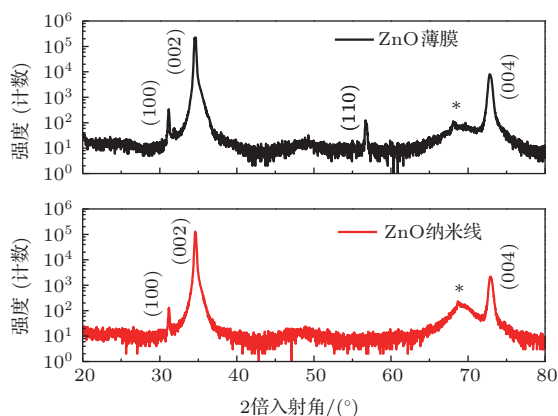


图 2 ZnO 薄膜和纳米线阵列 XRD 图 (* 为 Si 衬底的衍射峰)

3 测试与结果分析

3.1 X 射线响应测试方法

使用 Agilent B2902A 型精密源/测量单元进行电源输出和器件电流-电压特性测试. X 射线源采用西北核技术研究所的 X 光荧光光谱仪 (X-UNIQUE II). X 射线机的加速电压为 30 kV, 电子束流为 15 mA, 电子束打靶, 产生韧致辐射 X 射线, X 射线光谱如图 3 所示. 探测器距 X 射线源的距离为 17 cm, 探测器位置处的照射剂量率为 10 mC/(kg·s).

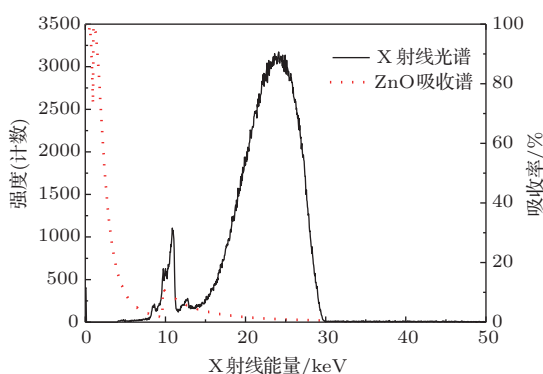


图 3 X 射线机出射 X 射线光谱和 X 射线在 1 μm ZnO 中的吸收谱

图 3 中 ZnO 对不同能量 X 射线的吸收率^[17]表明, 与低光子能量的紫外光在 ZnO 晶体表面 10 nm 内几乎被全吸收不同, 能量在 10 eV—15 keV 范围内的 X 射线在 1 μm 厚的 ZnO 中的吸收小于 1%. X 射线激发 ZnO 产生一个电子空穴对所需的平均能量为 9.0 eV^[14], ZnO 吸收一个 10 keV 的 X 射线光

子就可以产生 10³ 量级的电子空穴对. 因此即使少量 X 射线粒子与 ZnO 发生相互作用也可以在 ZnO 中产生较多的电子空穴对, 通过外电路检测这些电子空穴对, 可实现对 X 射线的探测。

3.2 探测器件的直流 X 射线响应特性

器件的暗电流曲线如图 4 所示. 器件的暗电流与 ZnO 薄膜和纳米线中的缺陷和晶界有关, 受空间电荷限制电导 (SCLC) 效应^[18] 影响, 呈现出非线性。

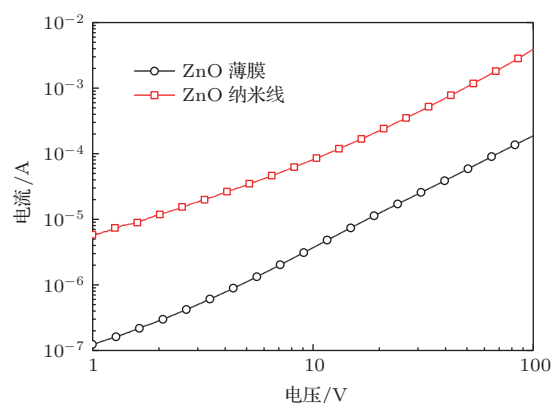


图 4 ZnO 薄膜和纳米线结构器件的暗场 I-V 特性曲线

器件对直流 X 射线的响应过程如图 5 所示. 薄膜器件的偏置电压为 100 V, 在第一个上升周期器件的光响应电流 (光场电流减去暗场电流) 为 0.48 mA, 根据 X 射线照射剂量计算出薄膜器件的响应度为 0.12 μC/Gy. 纳米线阵列器件的偏置电压为 50 V, 在第一个上升周期的光响应电流为 0.7 mA, 根据 X 射线照射剂量计算出薄膜器件的响应度为 0.17 μC/Gy. 可见两种器件对 X 射线具有较高的响应, 并且纳米线阵列器件的响应略高。

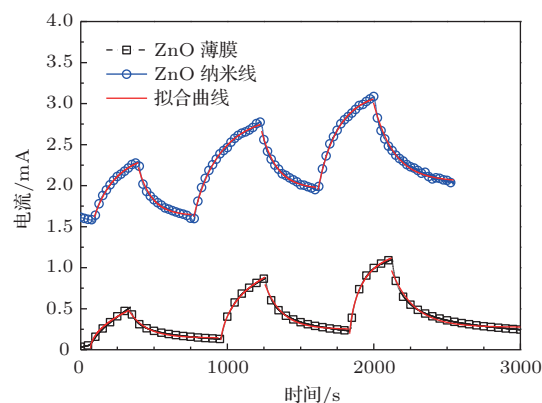


图 5 ZnO 薄膜和纳米线阵列器件对直流 X 射线的响应曲线

值得注意的是, 虽然两种器件的光响应电流较大, 但是响应时间和恢复时间较长为90—100 s, 远大于 ZnO 晶体中载流子的寿命 $1 \mu\text{s}—1 \text{ms}$ ^[10]. 按照半导体光电效应理论分析, 在不考虑表面效应的前提下, 氧化锌半导体对 X 射线的响应速度决定于体内载流子的寿命, 因此在 ZnO 半导体对 X 射线的响应过程中表面效应不可忽视.

3.3 ZnO 光电导 X 射线探测器件工作机理分析

与紫外光与 ZnO 发生表面光电导效应不同, 当 X 射线照射器件时, 发生体光电效应. 光电效应产生的多余载流子使得 ZnO 薄膜或纳米线阵列膜电导率增加, 在偏置电压下通过检测器件电流的变化实现对 X 射线的探测. 在不考虑表面效应的前提下, 根据半导体光电导效应, 对 n 型半导体, 饱和光响应电流密度为

$$J_{\text{opt}} = g\tau_n q\mu_n E, \quad (1)$$

其中, J_{opt} 为饱和光响应电流密度, g 为电子空穴对的体内产生率, τ_n 为体内电子的寿命. μ_n 为电子的迁移率, E 为电场强度, q 为单位电荷量. 从(1)式可以看到提高电子的寿命, 可以提高器件的 X 射线响应电流.

当 X 射线入射 ZnO 时, 在 ZnO 体内产生多余电子和空穴对, 由于 ZnO 表面存在氧吸附^[16] 使得空穴向 ZnO 表面扩散与氧负离子复合, 使得光生空穴浓度减小, 从而减少了光生电子的复合途径, 因此电子的寿命 τ_n 大幅度增加. 这里对 ZnO 的 X 射线响应过程受表面效应影响的机理和规律进行分析.

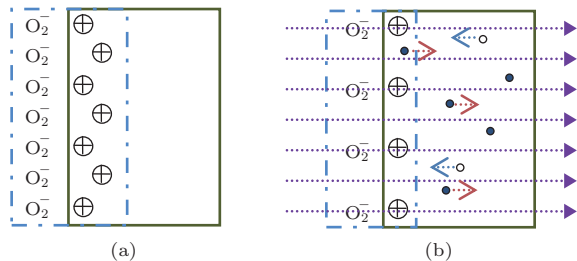


图6 ZnO 半导体的表面效应示意图 (a) 暗场下 ZnO 表面的氧吸附; (b) X 射线照射下 ZnO 表面发生的解吸附过程和体内的电荷积累 (黑色圆点表示电子, 空心圆圈表示空穴)

暗场下, ZnO 表面吸附氧分子, 形成氧负离子层, 如图 6(a) 所示. 当 X 射线辐照时, 在 ZnO 内部产生电子和空穴对, 空穴向表面漂移与氧负离子结

合, 发生氧的解吸附, 光生电子在 ZnO 中积累, 使得器件的电导率增加. 表面过程的反应方程式为



X 射线辐照下, 由于氧的解吸附使得 ZnO 中电子浓度减小为 $-\frac{1}{\sigma^0 D_{\text{ZnO}}} \frac{d\theta}{dt}$, σ^0 为位置面积, 表示一个氧吸附位置所占的表面积, 单位为 cm^2 , D_{ZnO} 为 ZnO 层的厚度, θ 为氧负离子的表面覆盖度, 表示氧负离子的数目占总的可吸附位置数目的比例, 单位为 1, t 为时间. X 射线辐照引起的电子空穴产生率为 g , 电子和空穴的净复合速率为 U . 则 ZnO 中的电子浓度 n 随时间的变化关系为

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{1}{\sigma^0 D_{\text{ZnO}}} \frac{d\theta}{dt} + g - U. \quad (4)$$

由于在 ZnO 内部的电子空穴的产生和复合过程是快过程, 因此可以认为电子和空穴的产生与复合达到准平衡, (4) 式可以写为

$$g - U \approx 0, \quad (5)$$

$$\frac{dn}{dt} \approx -\frac{1}{\sigma^0 D_{\text{ZnO}}} \frac{d\theta}{dt}. \quad (6)$$

电子和空穴的净复合率 U 可表示为

$$U = rnp - rn_0p_0 = r(\Delta n + n_0)(\Delta p + p_0) - rn_0p_0, \quad (7)$$

其中 r 为电子空穴对复合速率, n 为 X 射线辐照下 ZnO 体内电子浓度, p 为 X 射线辐照下 ZnO 体内空穴浓度, Δn 为 X 射线辐照下 ZnO 体内产生的非平衡电子浓度, Δp 为 X 射线辐照下 ZnO 体内产生的非平衡空穴浓度, n_0 为暗场下 ZnO 体内电子浓度, p_0 为暗场下 ZnO 体内空穴浓度.

制备的 ZnO 为 n 型半导体, 因此 $n_0 \gg p_0$, 在 X 射线辐照下 $\Delta p \gg p_0$, (7) 式可简化为

$$U = rn\Delta p. \quad (8)$$

X 射线辐照下 $\Delta p \approx p$, 由(5)和(8)式可得

$$p \approx \Delta p = \frac{g}{rn}. \quad (9)$$

在 ZnO 表面, 氧分子俘获氧化锌中的电子使得 ZnO 电导率下降. 氧吸附速率, 与表面电子浓度 $n \cdot \exp\left(-\frac{qV_s}{kT}\right)$ 成正比, 与表面可吸附的位置数 $(1 - \theta)$ 成正比, 与氧气分压 P_{O_2} 成正比, 因此可表示为 $k_2(1 - \theta)n \cdot \exp\left(-\frac{qV_s}{kT}\right) \cdot P_{\text{O}_2}$, 其中, k_2 为比

例系数, V_s 为表面势, k 为普朗克常量, T 为温度. 同时, ZnO 中的空穴与吸附的氧负离子结合发生氧负离子的解吸附, 解吸附速率与表面空穴的浓度 $p \cdot \exp\left(\frac{qV_s}{kT}\right)$ 成正比, 与表面覆盖度成正比, 可表示为 $k_1\theta p \cdot \exp\left(\frac{qV_s}{kT}\right)$, k_1 为比例系数. 所以表面覆盖度随时间的变化关系为

$$\frac{d\theta}{dt} = k_2(1-\theta)n \cdot \exp\left(-\frac{V_s}{kT}\right) P_{O_2} - k_1\theta p \cdot \exp\left(\frac{V_s}{kT}\right). \quad (10)$$

由 (6) 式和 (10) 式可得电子浓度

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{1}{\sigma^0 D_{ZnO}} \left[k_2(1-\theta)n \cdot \exp\left(-\frac{V_s}{kT}\right) P_{O_2} - k_1\theta p \cdot \exp\left(\frac{V_s}{kT}\right) \right]. \quad (11)$$

(11) 式的求解比较复杂, 需要进行合理的简化. 从图 5 可以看出器件的明暗电流比较小, 因此可以近似认为表面覆盖度 $\theta \approx \theta_0$ 并且表面势 V_s 不变. 因此 (11) 式简化为

$$\frac{dn}{dt} = -\left[k'_2(1-\theta_0)nP_{O_2} - k'_1\theta_0\frac{g}{rn} \right], \quad (12)$$

其中,

$$k'_2 = \frac{1}{\sigma^0 D_{ZnO}} k_2 \cdot \exp\left(-\frac{qV_s}{kT}\right),$$

$$k'_1 = \frac{1}{\sigma^0 D_{ZnO}} k_1 \cdot \exp\left(\frac{qV_s}{kT}\right).$$

对 (12) 式求解得

$$n^2 = n_s^2 - [n_s^2 - n_0^2] \times \exp[-2k'_2(1-\theta_0)P_{O_2}t], \quad (13)$$

其中, $n_s^2 = \frac{k'_1\theta_0 g}{rk'_2(1-\theta_0)P_{O_2}}$.

X 射线辐照结束后, 空穴浓度快速减小, 这里取暗场的平衡浓度 p_0 作为近似, 假设 $\theta \approx \theta_0$ 仍然成立, 则电子的浓度

$$\frac{dn}{dt} = -[k'_2(1-\theta_0)nP_{O_2} - k'_1\theta_0 p_0] - rnp_0. \quad (14)$$

对 (14) 式求解得 X 射线辐照结束后, ZnO 中电子浓度随时间的变化关系:

$$n = \frac{k'_1\theta_0 p_0}{k'_2(1-\theta_0)P_{O_2} + rp_0} + \left[n_{t0} - \frac{k'_1\theta_0 p_0}{k'_2(1-\theta_0)P_{O_2} + rp_0} \right] \times \exp\{-[k'_2(1-\theta_0)P_{O_2} + rp_0]t\}, \quad (15)$$

其中 n_{t0} 为 X 射线辐照结束时的 ZnO 中电子浓度.

利用 (13)、(15) 式对实验结果进行拟合, 如图 5 中的实线所示. (13) 式和 (15) 式表明在表面氧吸附与解吸附过程主导的光响应过程中, 饱和光电流不仅与 X 射线强度和载流子寿命有关, 还和 ZnO 表面的氧吸附量有关, ZnO 表面的氧吸附增加了器件对 X 射线的响应度; ZnO 中载流子的寿命主要由表面的氧吸附过程的快慢决定, 较慢的氧吸附过程使得器件对 X 射线的响应变慢.

4 结 论

本文利用磁控溅射法制备 ZnO 薄膜和水热法生长 ZnO 纳米线, 制备了 Ag-ZnO-Ag 电导型 X 射线探测器件, 对器件进行了直流 X 射线响应测试. 结果表明 ZnO 薄膜和纳米线阵列器件对 X 射线都有较大的响应电流, 薄膜器件的响应度为 0.12 $\mu\text{C}/\text{Gy}$ (100 V 偏置), 纳米线阵列器件的响应度为 0.17 $\mu\text{C}/\text{Gy}$ (50 V 偏置). 利用 ZnO 表面发生的氧气吸附与氧负离子的解吸附过程能很好的对器件的响应机理进行解释. 理论分析表明氧吸附过程使得器件对 X 射线具较高的响应, 并且增加了器件的响应时间. 研究结果表明 ZnO 薄膜和纳米线阵列光电导型器件可用在 X 射线剂量测量领域.

参考文献

- [1] McGregor D S, Hermon H 1997 *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res., Section A* **395** 101
- [2] Owens A, Peacock A 2004 *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res., Section A* **531** 18
- [3] Metzger S, Henschel H, Kohn O, Lennartz W 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 1351
- [4] Zhang L, Xiao J, Qiu Y Z, Cheng H L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 056106 (in Chinese) [张林, 肖剑, 邱彦章, 程鸿亮 2011 物理学报 **60** 056106]
- [5] Vaitkus J, Cunningham W, Gaubas E, Rahman M, Sakai S, Smith K M, Wang T 2003 *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. Section A* **509** 60
- [6] Kania D R, Landstrass M I, Plano M A, Pan L S, Han S 1993 *Diamond Relat. Mater.* **2** 1012
- [7] Ouyang X P, Wang L, Fan R Y, Zhang Z B, Wang W, Lü F X, Tang W Z, Chen G C 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2170 (in Chinese) [欧阳晓平, 王兰, 范如玉, 张忠兵, 王伟, 吕反修, 唐伟忠, 陈广超 2006 物理学报 **55** 2170]
- [8] Shen D Z, Mei Z X, Liang H L, Du X L, Ye J D, Gu S L, Wu Y X, Xu C X, Zhu G Y, Dai J, Chen M M, Ji X, Tang Z K, Shan C X, Zhang B L, Du G T, Zhang Z Z 2014 *Acta Optica Sinica* **35** 1 (in Chinese) [申德振, 梅增

- 霞, 梁会力, 杜小龙, 叶建东, 顾书林, 吴玉喜, 徐春祥, 朱刚毅, 戴俊, 陈明明, 季旭, 汤子康, 单崇新, 张宝林, 杜国同, 张振中 2014 发光学报 **35** 1]
- [9] Pan Y W, Ren S T, Qu S L, Wang Q 2013 *Chin. Phys. B* **22** 118102
- [10] Liu K, Sakurai M, Aono M 2010 *Sensors* **10** 8604
- [11] Klingshirn C 2007 *Chem. Phys. Chem.* **8** 782
- [12] Zhang B, Li M, Wang J Z, Shi L Q 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 027303
- [13] Wang X H, Li R B, Fan D H 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 037202
- [14] Endo H, Chiba T, Meguro K, Takahashi K, Fujisawa M, Sugimura S, Narita S, Kashiwaba Sato Y, E 2011 *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. Section A* **665** 15
- [15] Gao X, Kang Q S, Yeow J T W, Barnett R 2010 *Nanotechnology* **21** 285502
- [16] He Y, Zhang W, Zhang S, Kang X, Peng W, Xu Y 2012 *Sens. Actuators, A* **181** 6
- [17] Berkeley Lab http://henke.lbl.gov/optical_constants/filter2.html [2013-12-11]
- [18] Lampert, M A 1964 *Rep. Progr. Phys.* **27** 329

Study of ZnO photoconductive X-ray detector*

Zhao Xiao-Long¹⁾ Kang Xue¹⁾ Chen Liang²⁾ Zhang Zhong-Bing²⁾ Liu Jin-Liang²⁾
Ouyang Xiao-ping²⁾ Peng Wen-Bo¹⁾ He Yong-Ning^{1)†}

1) (*The School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

2) (*Radiation Detection Research Center, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*)

(Received 15 December 2013; revised manuscript received 17 January 2014)

Abstract

Ag-ZnO-Ag X-ray detectors based on ZnO film and nanowires are both fabricated in this paper. Results of continuous X-ray radiation measurement show that the two detectors have high responsivity: the responsivity of the ZnO film device is about 0.12 $\mu\text{C}/\text{Gy}$ under a 100 V bias voltage, and that of the ZnO nanowires device is about 0.15 $\mu\text{C}/\text{Gy}$ under a 50 V bias voltage. Surface effect due to the absorption and desorption of oxygen on the ZnO surface, which makes the carrier lifetime increase, is decisive to the high responsivity. ZnO film and nanowires have their potential applications in the X-ray dose rate measurement.

Keywords: ZnO film, ZnO nanowires, X-ray detection, oxygen absorption

PACS: 85.25.Oj, 29.40.-n, 07.85.Fv, 07.07.Df

DOI: 10.7498/aps.63.098502

* Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60876038, 11375144), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China in project of Investigation of ZnO Nanostructure Based Scintillators.

† Corresponding author. E-mail: yongning@mail.xjtu.edu.cn