

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2020.02.016

常用照明光源光谱分析及其紫外防护方法

陈星辉, 吴智丹, 黄 润

(湖南工业大学 理学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 与白炽灯相比, LED灯和节能灯具有光效高、耗电少、寿命长等优点, 从而被广泛推广使用, 但其紫外辐射问题不容小觑。利用光栅光谱仪对市售多品牌、多规格的LED灯和节能灯光源进行光谱扫描, 发现这两种照明光源均富含强紫外光谱。利用磁控溅射镀膜法, 采用高纯氧化锌陶瓷靶, 在石英基材上溅射镀膜, 溅射工艺条件如下: 室温、功率180 W、气压0.5 Pa、氧氩比0:8.3, 时间2 h。将制备的氧化锌薄膜用做照明灯的紫外防护层, 通过实验验证了其有效性和可行性。

关键词: LED灯; 节能灯; 光谱; 紫外线; 氧化锌薄膜; 紫外防护

中图分类号: O433; O434.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2020)02-0092-05

引文格式: 陈星辉, 吴智丹, 黄 润. 常用照明光源光谱分析及其紫外防护方法[J]. 湖南工业大学学报, 2020, 34(2): 92-96.

Spectral Analysis and UV Protection of Common Illumination Sources

CHEN Xinghui, WU Zhidan, HUANG Run

(College of Science, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Compared with incandescent lamps, LED lamps and energy-saving lamps, which are characterized with such advantages as high light efficiency, low power consumption and long-life duration, are widely used, but with the potential problem of ultraviolet radiation. With the grating spectrometer used to scan the spectrum of multi-brand and multi-specification LED lights and energy-saving illumination sources, it is found that both of them are rich in strong UV spectrum. By using magnetron sputtering coating method and high-purity ZnO ceramic target, the film is to be sputtered on the quartz substrates with the following sputtering conditions to be met: room temperature, with the power being 180 W, an air pressure of 0.5 Pa, an oxygen argon ratio of 0:8.3, a time duration of 2 hours. With the zinc oxide film applied to the UV protective layer of illumination lamp, its validity and feasibility can be verified by experiments.

Keywords: LED lamp; energy-saving lamp; spectrum; ultraviolet light; ZnO film; UV-protection

1 研究背景

自2008年我国启动“绿色照明”工程以来, 白炽灯逐渐退出历史舞台, 取而代之的是节能灯和

LED灯。它们与白炽灯相比具有光效高、耗电少、寿命长的特点, 被广泛应用于人们生活的方方面面。

LED灯又称发光二极管, 是一种将电能转化为光能的半导体器件。其核心部件是一个PN结, 当电

收稿日期: 2019-10-22

基金项目: 湖南省普通高等学校教学改革研究基金资助项目(2019-579), 湖南工业大学大学生研究性学习和创新性实验计划基金资助项目(2019-102)

作者简介: 陈星辉(1966-), 女, 湖南湘潭人, 湖南工业大学高级实验师, 主要从事近代物理实验方面的教学与研究, E-mail: 442090113@qq.com

流通过晶片, PN 结正向导通时, N 型半导体内的电子与 P 型半导体内的空穴向对方扩散, 在发光层剧烈碰撞复合释放能量产生光子, 即发出可见光。PN 结的材料决定了发光的波长, 也决定了光的颜色。LED 白光的晶片中加入了一层荧光粉涂层, 电子与空穴碰撞复合产生蓝光, 其中一部分蓝光直接穿过荧光粉涂层发射出去, 另一部分蓝光打在荧光涂层上并与其作用而产生黄光, 蓝光与黄光混合而形成白光。从发光原理看 LED 灯是无紫外辐射的绿色照明灯。

节能灯又称三基色紧凑型荧光灯, 通电后发射电子, 电子与氙原子发生弹性碰撞, 氙原子获得较大的动能后撞击汞原子, 使汞蒸气原子电离产生 253.7 nm 的紫外线, 紫外线激发荧光粉发出可见光。因为紫外线并不能完全被荧光粉吸收, 因此, 节能灯在使用过程中, 灯管内的紫外线会有部分透过玻璃管壁辐射到环境中; 加之荧光粉的脱落等因素, 节能灯可产生较强的紫外辐射^[1]。

由于部分生产厂家为节约成本而降低原材料质量等级, 且灯具市场监管不严, 使得市场上常用的 LED 灯和节能灯大部分存在质量问题, 会产生紫外辐射。通过对多种品牌、多种型号的 LED 台灯和节能台灯光源进行光谱扫描, 发现它们都具有较强的紫外辐射 (紫外光波长范围 200~380 nm), 且紫外光能量远大于可见光能量。

诸多研究表明^[1-4], 过量的紫外照射可对人体皮肤、眼睛等造成伤害。紫外照射过多会导致皮肤红斑、浮肿、松弛、增厚、色素沉积等, 严重时还会诱发 DNA 突变、染色体变异, 导致皮肤癌。长期紫外照射还可以导致晶状体混浊, 老年性白内障等疾病产生。因此如何对照明灯具进行紫外防护具有十分重要的意义。

2 节能灯和 LED 灯光源光谱分析

2.1 实验仪器与实验方法

1) 实验仪器。主要实验仪器有: 组合式多功能光栅光谱仪、电脑、汞灯、多种品牌的节能台灯和 LED 台灯。

2) 实验方法。采用 WGD-8A 型组合式多功能光栅光谱仪扫描照明灯具的发射光谱, 利用汞原子标准光谱 (汞灯光谱 365.0, 404.7, 546.1 nm) 校正光栅光谱仪波长, 以确保测量精度。将入射狭缝和出射狭缝均调至 0.5 mm, 负高压调至 300 V, 对不同品牌不同型号的 LED 台灯和节能台灯分别进行光谱扫描, 扫描波长范围为 200~660 nm, 得到两种不同类型光源的发射光谱, 分别见图 1 和图 2。

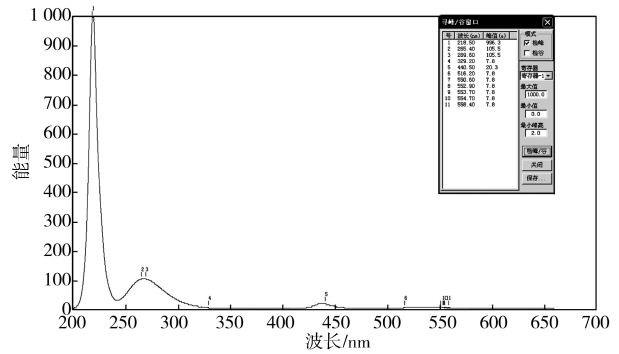


图 1 LED 灯 (白光) 光谱图

Fig. 1 Spectrum of LED light (white light)

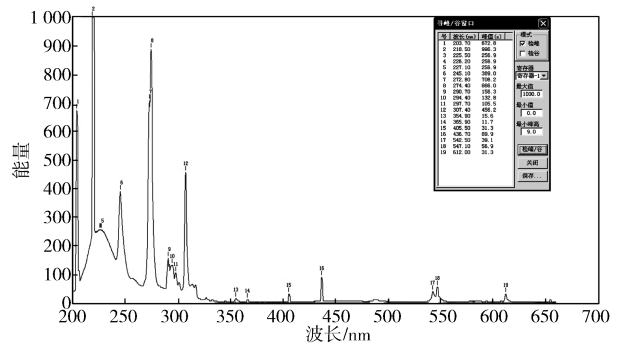


图 2 节能灯 (白光) 光谱图

Fig. 2 Spectrum of energy-saving lamps (white light)

1.2 实验结果与分析

从实验结果看, 两种类型灯光源的光谱图存在很大差异, 同类型的光谱图类似, 因此只给出两个具有代表性品牌的 LED 灯和节能灯的发射光谱, 如图 1 和图 2 所示。图 1 和图 2 中光谱峰值数据分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 LED 灯光谱峰值数据

Table 1 Spectrum peak data of LED lamps

波长/nm	218.50	265.40	269.60	329.20	440.50	516.20
能量	996.3	105.5	105.5	7.8	20.3	7.8
波长/nm	550.60	552.90	553.70	554.70	558.4	
能量	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	

表 2 节能灯光谱峰值数据

Table 2 Spectrum peak data of energy-saving lamps

波长/nm	203.70	218.50	225.50	226.20	227.10	245.10	272.80
能量	672.8	996.3	256.9	256.9	256.9	389.0	706.2
波长/nm	274.40	290.70	294.40	297.70	307.40	354.90	365.90
能量	886.0	156.3	132.8	105.5	456.2	15.6	11.7
波长/nm	405.50	436.70	542.50	547.10	612.00		
能量	31.3	89.9	39.1	56.9	31.3		

从光谱图 1 和图 2 可看出, 两种类型的光源谱线均为线状, 紫外线 (波长 200~380 nm) 部分能量很高, 而可见光 (波长 380~780nm) 部分能量相对很弱。

由表 1 可知, LED 灯的谱线中含有紫外线

(218.50, 265.40, 269.60, 329.20 nm)、紫色光(440.50 nm), 以及绿色光(516.20, 550.60, 552.90, 553.70, 554.70, 558.40 nm)。由表2可知, 节能灯的谱线中含有丰富的紫外线(203.70, 218.50, 225.50, 226.20, 227.10, 245.10, 272.80, 274.40, 290.70, 294.40, 297.70, 307.40, 354.90, 365.90 nm)、紫色光(405.50, 436.70 nm)、绿色光(542.50, 547.10 nm)、橙色光(612.00 nm)。这些谱线的出现与两种光源的发光原理相关, 也与产品的质量相关。分别对LED黄色、红色、蓝色和绿色光进行光谱扫描, 同样发现这些有色光源都具有较强的紫外光谱, 并且照明灯距离狭缝越近, 紫外线辐射越强。由此可知, 灯具市场提供给消费者的产品着实令人担忧, 因此关于紫外防护材料的研究具有重要意义。

3 紫外防护材料研究

目前, 紫外防护的手段主要分为两种: 一种是反射, 另一种是吸收。这两方面学者们研究较多^[5-8], 并得到了许多能吸收和反射紫外线的材料, 如TiO₂、CeO₂、ZnO、纳米Al₂O₃、纳米FeO等。这些材料主要被用于太阳镜、太阳伞以及汽车玻璃的紫外防护, 而真正用于灯具的较少。其主要原因是, 灯具的紫外防护材料必须具备可见光透过率高、耐高温、绿色环保、价格低廉且制作工艺简单的特点, 其中透光性是最主要的因素。因此, 许多学者和企业正致力于透光性好且能有效吸收和反射紫外线材料的研究。

由文献[9-11]可知, 研究者大多利用有机物和无机物制作涂料喷涂在节能灯表面, 以达到防紫外照射的目的, 这些方法或多或少会给环境带来污染, 而且喷涂很难做到均匀, 紫外防护效果有限。通过对灯具市场的调研发现, 目前LED灯具还没有采取任何紫外防护措施(从发光原理上讲, LED灯没有紫外线辐射)。因此, 寻找更加简单、更加完善、环境友好、符合照明灯特点的紫外防护材料和方法很有必要。

3.1 氧化锌材料的特点

通过大量的文献^[12-20]研究可知, 氧化锌储量丰富、价格低廉, 无毒无害, 激子束缚能高达60 meV, 具有很好的化学稳定性和热稳定性。氧化锌具有很好的紫外吸收和可见光高透过性能, 室温下禁带宽约为3.37 eV, 能吸收波长小于368 nm的紫外线, 而对可见光则不吸收, 且氧化锌薄膜制作工艺简单, 适合大量生产。因此氧化锌可被用做照明灯具的紫外防护材料。

3.2 氧化锌薄膜的制备

氧化锌薄膜的制备方法很多, 常用的有磁控溅射

法、脉冲激光沉积法、分子束外延法、化学气相沉积法、喷雾热解法、溶胶-凝胶法^[13-15], 本研究采用磁控溅射镀膜法。

经过前期多批次的摸索实验对比发现, 磁控溅射镀膜法的溅射工艺是影响氧化锌薄膜的紫外防护效果和可见光透过率的重要因素。通过对多批次实验结果比较, 得出其最佳方案如下: 室温下采用高纯氧化锌陶瓷靶材, 在石英基片上溅射成膜, 溅射气压为0.5 Pa, 氧氩比为0:8.3, 溅射功率为180 W, 溅射时间为2 h。

3.2.1 实验材料

实验主要仪器有: 高真空多靶磁控溅射镀膜机, JCP-350M2; 超声波清洗机, DS-3510DT; 薄膜测厚仪, SGC-10; 紫外-可见分光光度计, WFZ-26A; 组合式多功能光栅光谱仪, WGD-8A。

其他主要材料有: 电脑、汞灯、吹风机、石英片等。高纯氧化锌陶瓷靶、高纯氮气、高纯氩气、丙酮、无水酒精、去离子水等。

3.2.2 氧化锌薄膜的制备方法

在实验室中, 氧化锌薄膜的制备步骤如下:

1) 基片清洗。将石英基片分别用丙酮、无水酒精超声清洗10 min, 每次清洗后均用去离子水漂洗干净残留药品; 然后用去离子水超声清洗10 min, 以清洁石英基片表面的油污及其他污物; 最后用吹风机吹干备用。

2) 基片和靶材安装。将清洁吹干后的石英基片安装于镀膜机的基片台; 将高纯氧化锌陶瓷靶材安装于镀膜机腔室靶上, 测量靶材与其外壳罩之间的绝缘电阻(大于0.3 MΩ); 符合要求后, 关闭腔室门抽真空。

3) 溅射镀膜。当腔室真空度小于 2.7×10^{-3} Pa时开始启辉溅射, 打开基片旋转, 确保溅射均匀。选择溅射工艺为室温、溅射功率180 W, 溅射气压0.5 Pa, 氧氩比0:8.3, 溅射时间为2 h。预溅射10 min以除去靶材表面的杂质后开始成膜计时, 镀膜2 h后计时结束, 关闭镀膜机, 真空保压24 h, 取出镀膜后的基片, 进行薄膜厚度和透过率测试。

3.3 氧化锌薄膜厚度及光学性能测试

光透过率、折射率和消光系数是表达氧化锌薄膜光学性能的重要参数, 而薄膜厚度与其光学性能参数密切相关。

采用薄膜测厚仪测量所制备的氧化锌薄膜厚度、折射率和消光系数。测试结果表明, 氧化锌薄膜厚度均匀, 为471 nm; 当波长为549.00 nm时, 折射率 $N=2.7228$, 消光系数 $K=0.08789$;

采用紫外-可见分光光度计测量氧化锌薄膜光透过率, 结果如图3和表3所示。

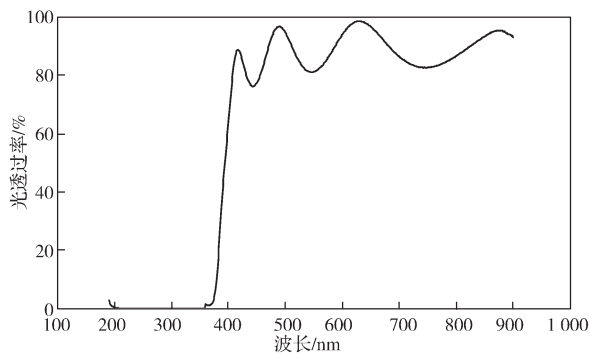


图 3 氧化锌薄膜光透过率曲线

Fig. 3 Light transmittance curves of ZnO film

表 3 氧化锌薄膜光透过率测试数据

Table 3 Light transmittance test data of ZnO film

波长范围 /nm	196.00~368.00	369.00~380.00	381.00~432.00
光透过率 /%	<1.424	<9.828	12.081~80.438
波长范围 /nm	432.00~489.00	490.00~627.00	628.00~660.00
光透过率 /%	79.815~97.028	96.850~98.822	94.883~98.799

从图 3 和表 3 可知, 所制备的氧化锌薄膜紫外波段透过率很小, 波长小于 368 nm 的紫外线可视作全部吸收; 而可见光的透过率很高, 平均透过率大于 90%。因此, 所制备的氧化锌薄膜完全符合照明灯具紫外防护的要求。

3.4 灯光照射狭缝光谱比较实验

为了进一步检验氧化锌薄膜防紫外线的效果, 将灯光直接照射光栅光谱仪狭缝与透过氧化锌薄膜后照射狭缝, 比较其光谱的变化。仅以节能灯光为例加以描述, 对 LED 灯光完全类似。

1) 节能台灯开启 10 min 后, 将节能灯光源放到离光栅光谱仪狭缝 20 cm 处, 光栅光谱仪入射狭缝和出射狭缝均调至 0.5 mm, 负高压调至 300 V, 扫描出节能台灯的发射光谱, 如图 2 所示。

2) 将镀有氧化锌薄膜的石英基片紧贴在光栅光谱仪入射狭缝上, 其他条件与 1) 完全相同的情况下, 重新扫描出节能台灯的发射光谱, 如图 4 所示。

两种情形下光谱图紫外部分所对应的的光谱能量峰值比较如表 4 所示。

表 4 两种情形下光谱能量峰值对比

Table 4 Comparison of spectral energy peaks in two cases

波长 /nm	203.70	245.10	272.80	274.40	290.70	307.40
能量峰值	图 2 672.8	389.0	706.2	886.0	156.3	456.2
	图 4 122.6	66.4	98.4	144.6	24.2	86.0
吸收率 /%	81.8	82.9	86.1	83.7	84.5	81.1

注: 1. 图 2 中 2 号谱线能量值超出量程, 所测值 996.3 不可信, 舍去; 2. 图 4 与图 2 中光谱能量峰值对应的波长有些差异, 以图 2 的为准。

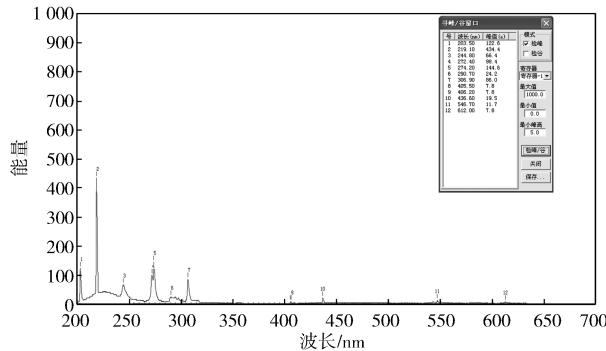


图 4 节能灯光透过氧化锌薄膜后光谱图

Fig. 4 Spectrum of energy-saving lamps after passing through ZnO film

比较光谱图 4 与 2 的能量峰值可以看出, 氧化锌薄膜对紫外线的吸收明显。从表 4 的实验数据可知, 氧化锌薄膜吸收紫外线的能量平均为 83.4%, 很大程度地阻挡了节能灯紫外辐射对人体的伤害。同时, 氧化锌薄膜对可见光也有一定的反射和散射作用, 使可见光的能量有所减弱, 但并不影响阅读效果。

4 结语

对灯具市场上 LED 灯和节能灯光源的光谱分析, 发现这些光源均具有较强的紫外辐射, 严重影响人们的身体健康。利用磁控溅射镀膜法, 以高纯氧化锌陶瓷靶为靶材, 在石英基片上制备了透明、淡黄色氧化锌薄膜, 该薄膜对紫外线吸收率高, 其中波长为 196.00~368.00 nm 的紫外线透过率小于 1.424%, 369.00~380.00 nm 的紫外线透过率小于 9.828%, 而可见光透过率高达 90% 以上。因此, 所制备的氧化锌薄膜可用于照明灯具的紫外防护。

参考文献:

[1] 宋松林. 普通照明用自镇流荧光灯产品紫外辐射安全风险[J]. 家用电器, 2015(12): 28-32.
SONG Songlin. Security Risk Assessment of Ultraviolet Radiation for Self-Ballasted Fluorescent Lamps for General Lighting Service[J]. Electrical Appliances, 2015(12): 28-32.

[2] 叶希韵. 紫外线致皮肤光老化研究进展[J]. 生物学教学, 2015, 40(11): 2-5.
YE Xiyun. Research Progress of Skin Photoaging Induced by Ultraviolet[J]. Biology Teaching, 2015, 40(11): 2-5.

[3] 路婷婷, 陈亚泽, 卢涛, 等. 紫外线的皮肤损伤机制及具有紫外线防护作用的天然产物的研究进展[J]. 中国药理学通报, 2012, 28(12): 1655-1659.
LU Tingting, CHEN Yaze, LU Tao, et al. Mechanism of UV Damage and the Protective Effect of Natral Products

- Against UV Damage[J]. Chinese Pharmacological Bulletin, 2012, 28(12): 1655-1659.
- [4] 曾庆广, 左志高, 解帮杰, 等. 高原地区对紫外线晶状体损伤的防护研究[J]. 武警医学, 2005, 16(9): 678-679.
- ZENG Qingguang, ZUO Zhigao, XIE Bangjie, et al. Protective Study on UV Lens Damage in Plateau Area[J]. Medical Journal of the Chinese People's Armed Police Forces, 2005, 16(9): 678-679.
- [5] 郑天亮, 何宗虎. 防紫外线透明涂层的试验研究[J]. 表面技术, 2002, 31(6): 15-16.
- ZHENG Tianliang, HE Zonghu. Experimental Research of UV-Absorbing Clear Coating[J]. Surface Technology, 2002, 31(6): 15-16.
- [6] 张爱华, 李梅, 柳召刚, 等. 溶胶-凝胶法制备 CeO₂ 防紫外膜[J]. 功能材料, 2012, 43(8): 988-991.
- ZHANG Aihua, LI Mei, LIU Zhaogang, et al. The Preparation of CeO₂ UV-Shielding Film by Sol-Gel Process[J]. Journal of Functional Materials, 2012, 43(8): 988-991.
- [7] 侯大寅, 李良飞, 魏取福. PET 基纳米 ZnO 溅射成膜及其紫外线通透性能[J]. 纺织学报, 2007, 28(2): 48-51.
- HOU Dayin, LI Liangfei, WEI Qufu. Sputter Coated Nano-ZnO Film on PET Substrate and Its Ultraviolet Radiation Transmittance[J]. Journal of Textile Research, 2007, 28(2): 48-51.
- [8] 尉乔南, 李若平, 朱治广, 等. 高含量高透明度 PS/TiO₂ 纳米复合材料膜的紫外防护性能研究[J]. 中国塑料, 2015, 29(3): 63-69.
- YU Qiaonan, LI Ruoping, ZHU Zhiguang, et al. UV-Protective Properties of Transparent Polystyrene/TiO₂ Nanocomposite Films with High Particle Loadings[J]. China Plastics, 2015, 29(3): 63-69.
- [9] 高明, 陈伟民, 成业春. 一种用于防紫外线灯管涂料: CN102627878A[P]. 2012-08-08.
- GAO Ming, CHEN Weiming, CHEN Yechun. A Kind of Coating for Anti Ultraviolet Lamp: CN102627878A[P]. 2012-08-08.
- [10] 陈云生. 防紫外线吸收膜的荧光灯[J]. 光源与照明, 2008, 6(2): 24.
- CHEN Yunsheng. Fluorescent Lamp with Anti-Ultraviolet Absorption Film[J]. Lamps and Lighting, 2008, 6(2): 24.
- [11] 刘彬, 隋成华, 鄢波, 等. 基于溶胶-凝胶法制备的 ZnO 膜系在紧凑型荧光灯制造工艺中的应用[J]. 浙江工业大学学报, 2012, 40(4): 469-472.
- LIU Bin, SUI Chenghua, YAN Bo, et al. Preparation of Zinc oxide Films in the Manufacturing Technology of Compact Fluorescent Lamp Based on Sol-Gel Method[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2012, 40(4): 469-472.
- [12] KIM J, THIYAGARAJAN P, RHEE S. Deposition of Al-Doped ZnO Films on Polyethylene Naphthalate Substrate with Radio Frequency Magnetron Sputtering[J]. Thin Solid Films, 2010, 518(20): 5860-5865.
- [13] 彭福川. ZnO 薄膜的制备及其光电学性质的研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2011.
- PENG Fuchuan. Preparation and Optoelectronic Properties of ZnO Films[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2011.
- [14] YAMADA M, MATSUMURA M, MAEDA Y. Suppression of Damage to Organic Light-Emitting Layers During Deposition of Al-Doped ZnO Thin Films by Radio-Frequency Magnetron Sputtering[J]. Thin Solid Films, 2011, 519(10): 3352-3357.
- [15] 任光远. 射频磁控溅射 ZnO 薄膜及其性能的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2014.
- REN Guangyuan. Growth of ZnO Thin Films by RF Magnetron Sputtering on and Study Its Properties[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014.
- [16] 范丽琴. 衬底温度对磁控溅射制备掺铝氧化锌薄膜的结构和光电性能的影响[J]. 物理实验, 2014, 34(6): 1-6.
- FAN Liqin. Effects of Substrate Temperature on Structure and Photoelectric Properties of Al Doped ZnO Thin Films Prepared by Magnetron Sputtering[J]. Physics Experimentation, 2014, 34(6): 1-6.
- [17] 朱冠芳. 磁控溅射法氧化锌薄膜的制备和光学性能研究[D]. 西安: 西北大学, 2008.
- ZHU Guanfang. Research on ZnO Film Preparation and Its Optical Property Using Radio Frequency Magnetron Sputtering[D]. Xi'an: Northwest University, 2008.
- [18] 张军. 多功能 ZnO 薄膜的制备与性能研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2007.
- ZHANG Jun. Fabrication and Properties of Functional ZnO Thin Films[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007.
- [19] 刘玉荣, 黄荷, 刘杰. 室温下溅射法制备高迁移率氧化锌薄膜晶体管[J]. 发光学报, 2017, 38(7): 917-922.
- LIU Yurong, HUANG He, LIU Jie. High Mobility ZnO Thin-Film Transistor Fabricated by Sputtering at Room Temperature[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2017, 38(7): 917-922.
- [20] 王聪, 刘玉荣. 氧化锌薄膜晶体管电性能的温度特性[J]. 光电工程, 2016, 43(2): 50-54.
- WANG Cong, LIU Yurong. Temperature Dependence of the Electrical Characteristics of ZnO Thin Film Transistors[J]. Opto-Electronic Engineering, 2016, 43(2): 50-54.

(责任编辑: 邓光辉)