

Nb/SnO₂ 复合薄膜的制备、结构及光电性能*曾乐贵¹⁾²⁾ 刘发民^{1)†} 钟文武¹⁾ 丁 芑¹⁾ 蔡鲁刚¹⁾ 周传仓¹⁾

1) (北京航空航天大学物理科学与核能工程学院物理系纳米测控与低维物理教育部重点实验室, 北京 100191)

2) (装甲兵工程学院基础部, 北京 100072)

(2010年5月27日收到; 2010年6月25日收到修改稿)

用溶胶-凝胶旋涂法在玻璃基底上制备出 Nb/SnO₂ 复合透明导电薄膜, 利用 XRD, SEM, 紫外—可见分光光度计, 四探针电阻仪等测试方法对 Nb/SnO₂ 复合薄膜的结构和物性进行了研究. 结果表明: 当 Nb 含量小于 0.99at% 时, Nb/SnO₂ 复合薄膜为较纯的四方金红石结构; 复合薄膜中晶粒分布均匀, 平均尺寸在 5—7 nm. 当 Nb 含量小于 0.99at% 时, Nb/SnO₂ 复合薄膜的电阻率先减小后增大, 当 Nb 含量为 0.37at% 时, 复合薄膜的电阻率降低到 $9.49 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$. 在 400—700 nm 可见光范围内, 当 Nb 含量小于 0.99at% 时, Nb/SnO₂ 复合薄膜的透过率都在 90% 以上, 其光学带隙在 3.9—4.1 eV 之间; 当 Nb 含量达到 1.23at% 时, 可见光透过率明显降低.

关键词: 溶胶-凝胶法, Nb/SnO₂ 复合薄膜, 结构表征, 光电性能

PACS: 82.70.Gg, 61.05.cp, 73.61.Ey, 78.20.Ci

1. 引言

透明导电薄膜广泛地应用于平板显示、太阳能转换电池、抗静电涂层、THz 器件、半导体/绝缘体/半导体(SIS) 异质结, 以及巡航导弹和现代战机的窗口等领域^[1,2]. 目前, 研究最多的是氧化铟锡(indium tin oxide, ITO) 薄膜和掺杂的二氧化锡薄膜^[3]. ITO 透明导电薄膜具有优良的光电性能, 但由于稀有金属铟原材料昂贵且热稳定性差, 限制了其推广使用. 二氧化锡基掺杂透明导电薄膜原材料丰富、价格便宜, 除了具有良好的光电性能外, 还具有化学性能稳定等特点^[4]. 因此, 二氧化锡基透明导电薄膜引起了科研人员的极大关注和研究兴趣, 到目前为止, 大量实验研究表明二氧化锡基透明导电薄膜很有可能成为 ITO 薄膜的替代品^[5,6].

金红石型 SnO₂ 是一种宽带隙 n 型半导体金属氧化物, 高纯度的 SnO₂ 材料导电性能很差, 通过在 SnO₂ 中掺入 F, Sb, In, Ta 等元素, 可显著提高其导电性能^[7,8]. 目前, 主要研究集中在 Cu, Sb, F 等掺杂 SnO₂ 材料的光学、电学以及气敏性能方面^[9,10] 和过渡金属离子 Co, Fe, Mn 等掺杂 SnO₂ 材料的磁性半导体性能方面^[11—13]. 其中 Sb 掺杂的 SnO₂

(antimony-doped tin oxide, ATO) 是一种优良的透明导电薄膜, 具有良好的光学和电学性能, 同时还具有成本低、热稳定性好、硬度高等特性, 已经在光电及通讯领域得到了广泛应用^[14—17]. 但是 Sb 易腐蚀且有毒, 制备过程容易对环境产生污染, 因此, 探索 Sb 的替代元素很有意义. Sb 的氧化物以正五价最稳定, 在 ATO 中 Sb⁺⁵ 离子替代 Sn⁺⁴ 离子释放电子大大提高了 SnO₂ 薄膜的导电性能. 与 Sb 相同, Nb 也以正五价氧化物最稳定, 若 Nb⁺⁵ 离子能替代 Sn⁺⁴ 离子释放电子, 也将提高 SnO₂ 薄膜导电性能, 此外, Nb 的氧化物颜色比 Sb 的氧化物浅, 这一特性能提高薄膜的可见光透过率.

Kikuchi 等^[18] 报道用射频溅射法制备出低电阻的 Nb 掺杂 SnO₂ 薄膜, 该薄膜可应用于触摸屏等领域, 但此方法设备复杂, 对样品形状要求高, 大大限制了其应用范围. 以无机铌为原料, 用溶胶-凝胶法制备 Nb/SnO₂ 复合薄膜未见文献报道. 本实验以低成本的无机物为原料, 采用溶胶-凝胶旋涂法成功地制备出 Nb/SnO₂ 复合薄膜, 研究了 Nb 含量对 Nb/SnO₂ 复合薄膜结构、形貌、电学和光学性能的影响. 实验结果表明, Nb/SnO₂ 复合薄膜是一种具有低电阻率和高可见光透过率的多功能材料, 其光电性能达到太阳能转换电池、智能窗、抗静电涂层以及触

* 航天科学基金(批准号:373858)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: fmliu@buaa.edu.cn

摸屏等领域的应用要求. 另外, 该方法还具有成本低、无毒无腐蚀性、对样品形貌无特殊要求以及适合大规模工业化生产等特点.

2. 实验

本实验采用 $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (化学纯), Nb_2O_5 (化学纯), KOH (化学纯), $(\text{COOH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (化学纯) 和 $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ (化学纯) 为主要原料. 首先, 自制草酸铌溶液备用^[19]. 其次, 称取一定量的 $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 溶于一定量无水乙醇中, 在 80°C 冷凝搅拌回流 4 h, 蒸发至一定量, 再封闭放入 30°C 水浴 12 h, 得到 SnO_2 溶胶. 接着在一定温度下逐滴滴入一定量草酸铌溶液, 60°C 封闭搅拌 2 h, 再封闭放入 30°C 水浴 24 h. 最后在室温下老化若干小时, 即获得所需的 Nb/SnO_2 复合溶胶. 以洁净的玻璃片为基底, 采用匀胶机 (KW-4A) 旋涂法镀膜, 在 100°C 下烘干, 反复多次, 增加膜厚, 再依次在 300°C 保温 1 h 和 500°C 保温 1.5 h, 如此烘干保温数次, 直至达到所需厚度, 即得到 Nb/SnO_2 复合薄膜样品.

利用荷兰 Panalytical 公司生产的 X'Pert Pro 型 X 射线衍射仪 (XRD) 分析样品晶相结构, 所用辐射源为 Cu 靶, 波长是 0.15418 nm , 工作条件为 40 kV , 40 mA . 利用美国 FEI 公司生产的 XL-30 扫描电子显微镜 (SEM) 观察样品表面形貌和膜厚. 采用北京普析通用仪器有限责任公司生产的 TU-1901 双光束紫外—可见分光光度计, 测定样品紫外—可见光透射谱图, 其光波范围为 $190\text{--}900\text{ nm}$. 利用四探针电阻仪测定样品的方块电阻.

3. 结果与讨论

3.1. 结构表征

图 1 是相同制备条件下, 不同 Nb 含量 Nb/SnO_2 复合薄膜样品的 XRD 图谱. 通过查 XRD 标准图谱可知, 所有的衍射峰与四方金红石 SnO_2 (JCPDS 41-1445) 相对应. 随着 Nb 含量的增加, 衍射峰先变尖锐再变扁平, 说明结晶度随着 Nb 含量的增加先变好后变差. 当 Nb 含量小于 $0.99\text{ at}\%$ 时, 加入 Nb 后没有出现新的衍射峰, 可以认为 Nb 加入未导致新相生成, Nb 离子在 SnO_2 中主要以替代 Sn 离子位的形式固溶于其中. 当 Nb 含量达到 $1.23\text{ at}\%$ 时, 出现

了一个弱小的 SnO 衍射峰, 说明此浓度下复合薄膜不再保持纯四方金红石结构, 过量的 Nb 加入可以使部分 SnO_2 转化成 SnO .

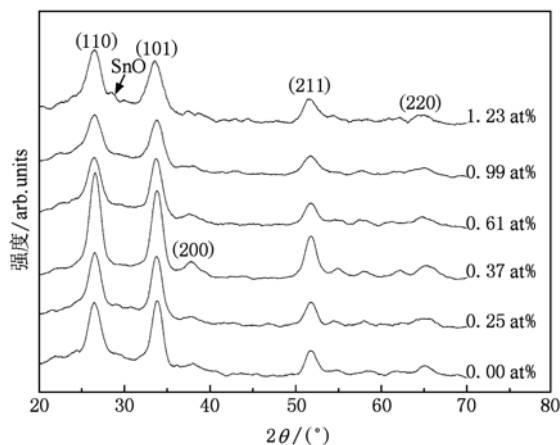


图 1 不同 Nb 含量 Nb/SnO_2 复合薄膜样品的 XRD 图谱

根据四方晶系中晶面间距与晶面指数及晶胞参数之间的关系式, 计算出样品的晶胞参数, 结果如表 1 所示.

表 1 薄膜样品晶胞参数和晶粒尺寸

含量/at%	$a = b/\text{nm}$	c/nm	V/nm^3	晶粒尺寸/nm
0.00	0.4771	0.3189	0.07260	5.81
0.25	0.4753	0.3194	0.07216	6.04
0.37	0.4733	0.3197	0.07163	6.65
0.61	0.4729	0.3202	0.07160	5.77
0.99	0.4745	0.3194	0.07190	5.22
1.23	0.4751	0.3198	0.07218	5.20

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2}, \quad (1)$$

式中 d 为晶面间距, h, k, l 为晶面指数, a, c 为晶胞参数.

当加入 Nb 时, SnO_2 晶胞体积随 Nb 加入量的增加略有减小. Sn^{4+} , Nb^{5+} 的离子半径分别为 0.071 nm , 0.064 nm , Nb^{5+} 容易取代 Sn^{4+} 的位置使得晶胞体积减小. 继续向 SnO_2 中加入 Nb 时, 过多的 Nb 加入使得 SnO_2 晶格发生畸变, 所以改变 Nb 加入量时体积变化不大.

根据衍射数据, 利用谢乐公式

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta}, \quad (2)$$

式中 k 是一个常数, 为 0.89 , λ 为 X 射线的波长, θ 为衍射角, β 为衍射峰的半高宽. 计算样品的平均晶

粒尺寸(见表1),晶粒的平均尺寸范围为5—7 nm,晶粒尺寸随着 Nb 含量的增加先逐渐增加后减小,结合晶胞参数 c 可知,加入少量 Nb 时,有利于晶粒沿薄膜方向生长,但随着 Nb 含量的增加,部分 Nb 离子会进入晶格间隙,抑制晶粒生长,从而使晶粒变小.

图2(a),(b),(c),(d),(e),(f)分别是不同 Nb 含量 Nb/SnO₂ 复合薄膜样品的场发射扫描电镜照片,从图2(a),(b),(c),(d)中可看出所有薄膜结构致密,随着 Nb 含量的增加,薄膜表面先变平整再变不平整,这也说明薄膜的结晶度先变好后变差.从图2(e),(f)薄膜的截面图可知薄膜与基片结

合紧密,具有良好的连续性,晶粒明显且较均匀,边缘清晰.

3.2. 导电性能

图3是不同 Nb 含量的 Nb/SnO₂ 复合薄膜电阻率变化曲线.从图中可看出,Nb/SnO₂ 复合薄膜的电阻率随着 Nb 含量增加先减小后增大,当 Nb 含量为 0.37at% 时电阻率降低到 $9.49 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$; 当 Nb 含量大于 0.61at% 时,电阻率开始呈线性增加; 当 Nb 含量为 1.23at% 时,电阻率增大到 $17.76 \Omega \cdot \text{cm}$. 电阻率降低可以解释为,SnO₂ 是 n 型半导体,Nb⁺⁵ 离子替代 Sn⁺⁴ 离子释放出电子,这些电子受到的束

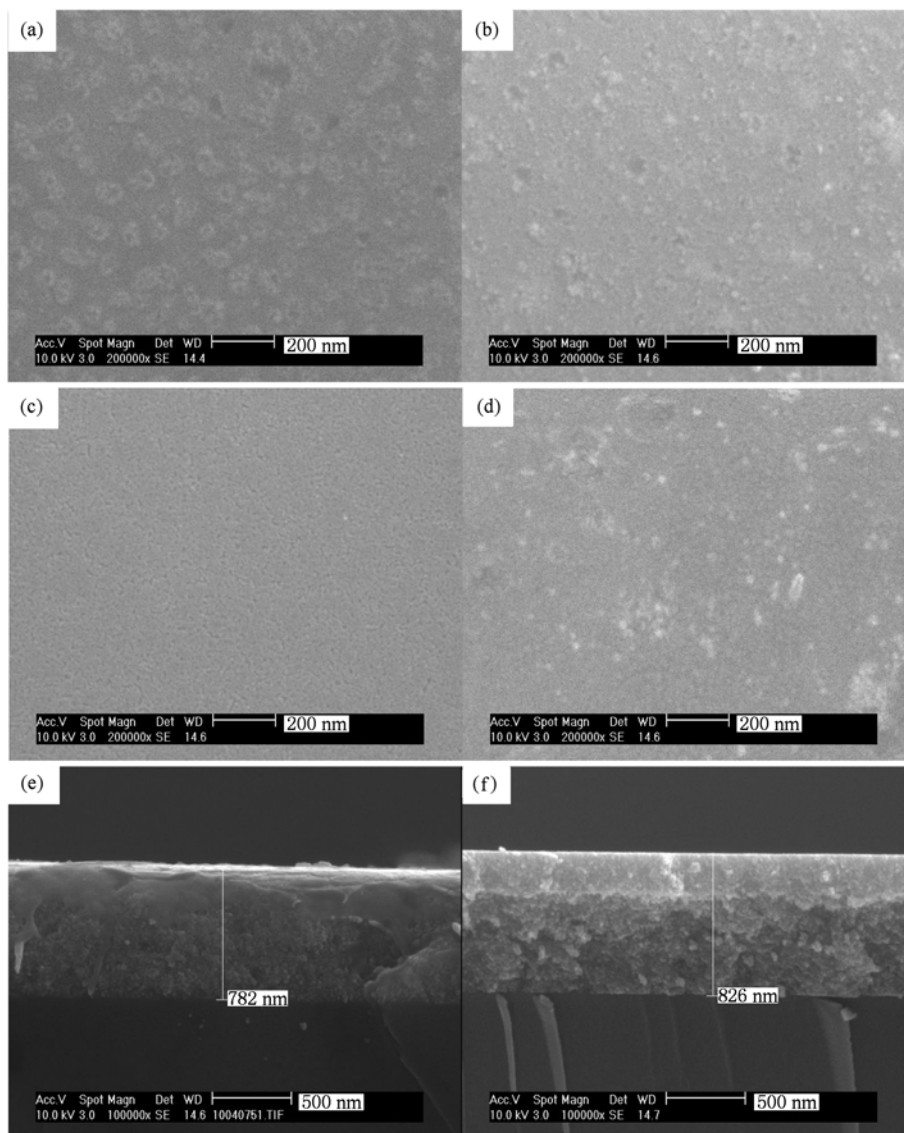


图2 不同 Nb 含量 Nb/SnO₂ 复合薄膜的 SEM 图 (a)SnO₂ 薄膜的表面图; (b)Nb(0.25at%)/SnO₂ 复合薄膜的表面图; (c)Nb(0.37at%)/SnO₂ 复合薄膜的表面图; (d)Nb(0.99at%)/SnO₂ 复合薄膜的表面图; (e)SnO₂ 薄膜的截面图; (f)Nb(0.37at%)/SnO₂ 复合薄膜的截面图

缚作用很弱小,能够在晶体中自由移动,提高了薄膜的导电性能^[20].随着 Nb 含量增加,必然会导致 SnO₂ 晶格发生畸变,畸变使得杂质离子散射增强和内部缺陷增多,导致载流子迁移率降低,使得薄膜导电性能显著下降.从图 1 还可以看出,当 Nb 含量为 1.23at% 时有微量 SnO 出现,Sn 从正四价变到正二价吸附电子降低了电子浓度也是导致薄膜导电性能降低的原因之一.

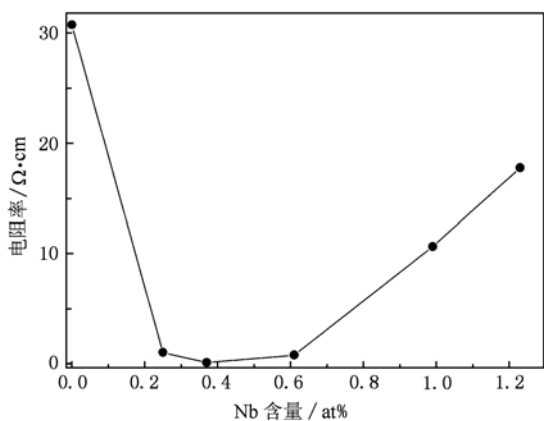


图 3 不同 Nb 含量的 Nb/SnO₂ 复合薄膜电阻率变化曲线

此外,晶粒尺寸增大导致边界散射减弱也会提高薄膜的导电性能,这与载流子浓度的变化相关,载流子浓度的表达式为

$$n = n_0 \exp\left(\frac{-q\phi}{kT}\right), \quad (3)$$

式中 n_0 是无晶界时载流子浓度, q 是电子电量, ϕ 是晶界势垒, k 是波尔兹曼常数, T 是温度, n 是温度为 T 和晶界势垒为 ϕ 条件下的载流子浓度^[21].晶粒尺寸增大导致薄膜的导电性能提高也与 Petritz 模型^[21,22] 相符合,其载流子迁移率表达式为

$$\mu_H = AT^{-1/2} \exp\left(\frac{-q\phi}{kT}\right), \quad (4)$$

式中 A 是与沉积条件有关的常数, μ_H 是在温度为 T 和晶界势垒为 ϕ 条件下的载流子迁移率.在一定温度下,晶粒尺寸增加会导致薄膜晶界势垒减小^[23],因而载流子浓度和迁移率增大,所以薄膜的导电性能提高.相反地,晶粒尺寸减小时薄膜的导电性能降低.此结论与由 XRD 计算得到的晶粒尺寸的变化规律相符.

3.3. 透光性能

图 4 是不同 Nb 含量 Nb/SnO₂ 复合薄膜的紫外—可见光透过率曲线,插图是框内部分的放大

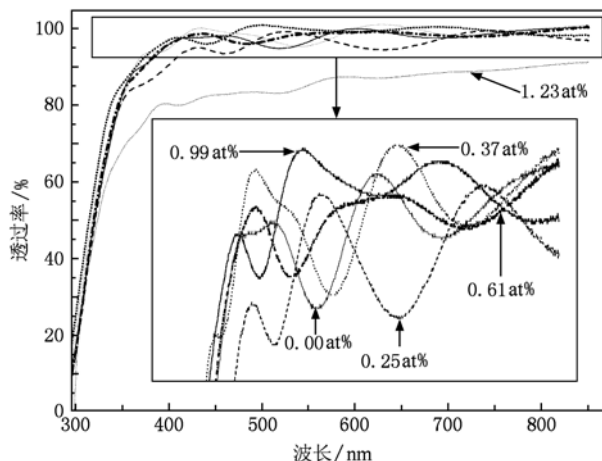


图 4 不同 Nb 含量 Nb/SnO₂ 复合薄膜样品的紫外—可见光透过率曲线

图.在测试样品前,利用两块空白玻璃片校正基准线,然后再测试复合薄膜的透过率,已消除玻璃基底的影响.复合薄膜厚度都是 800 nm 左右.当 Nb 含量小于 0.99at% 时,Nb/SnO₂ 复合薄膜的可见光透过率都达到 90% 以上,在近紫外波段透过率急剧降低,这与实验得到的禁带宽度相一致.复合薄膜对可见光的透过率没有随 Nb 加入量的改变发生明显变化,说明加入 Nb 未使复合薄膜内部缺陷明显增多,也未破坏膜层结构的均匀性.当 Nb 含量为 1.23at% 时,主要由于晶格畸变和微量 SnO 导致复合薄膜的可见光透过率明显降低.

薄膜的基本吸收是指处于价带的电子吸收光子被激发跃迁到导带上所吸收的入射电磁波的能量,用它可以确定薄膜的光学带隙(禁带宽度)的性质和数值.光学带隙宽度换算用公式^[24]

$$ah\nu = A(h\nu - E_g)^{1/n}, \quad (5)$$

式中 A 为与材料性质有关的常数, $h\nu$ 为光子能量, E_g 为薄膜的光学带隙宽度, n 为常数,对直接带隙 $n = 2$,对间接带隙 $n = 1/2$. SnO₂ 是直接带隙半导体^[25], n 的取值为 2, α 为吸收系数, $\alpha = (1/t) \times \ln(1/T)$, T 为样品的紫外—可见光透过率, t 为薄膜厚度.

图 5 是由紫外—可见光透过率曲线(图 4)数据按照(5)式计算得到的不同 Nb 含量薄膜样品的 $(ah\nu)^2$ 与光量子关系曲线,由外推法作曲线的切线,切线与横坐标的交点即为薄膜的光学带隙^[26].测算得出, Nb 含量为 0.00at%, 0.25at%, 0.37at%, 0.61at% 及 0.99at% 的复合薄膜样品的光学带隙分别

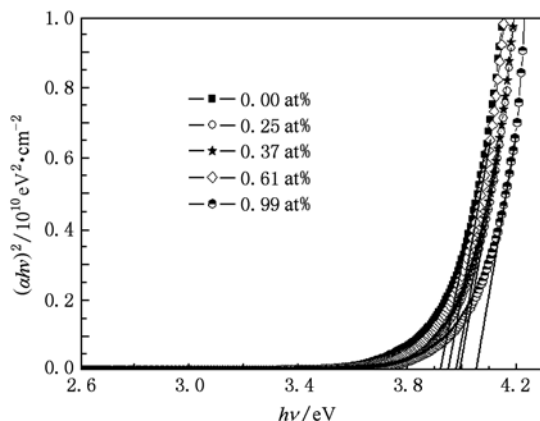


图5 不同Nb含量Nb/SnO₂复合薄膜样品的 $(\alpha hv)^2$ 与 (hv) 关系曲线

为3.92 eV, 3.99 eV, 3.97 eV, 3.95 eV及4.05 eV.

由图5可知,复合薄膜的光学带隙基本上是随着Nb含量的增加逐渐增加,其数值在3.95—4.05 eV之间,Nb加入导致复合薄膜的光学带隙增大.引起SnO₂光学带隙发生偏移主要有以下两个因素:一方面,由于Nb加入使施主能级在SnO₂导带底扩展为杂质能带,并与导带相连形成新的简并能带,导致SnO₂禁带宽度变窄,变窄的程度主要由电子与杂质离子之间的碰撞散射概率确定的,散射越大,禁带宽度的变窄程度就越大;另一方面,由于导带底基本被电子所占据,电子从价带跃迁到导带必须吸收更多的能量,就如同禁带变宽了,这就是所谓

的Burstein-Moss效应.SnO₂中的电子发生直接跃迁时对光波的吸收限主要是由以上两个因素对禁带宽度的综合影响确定^[27].用溶胶-凝胶法制备的Nb/SnO₂复合薄膜的光学特性主要受Burstein-Moss效应的影响.

4. 结 论

以低成本的SnCl₂·2H₂O, Nb₂O₅, KOH, HNO₃, (COOH)₂·2H₂O和CH₃CH₂OH为主要原料,采用溶胶-凝胶旋涂法成功地在玻璃基底上制备出Nb/SnO₂复合薄膜.实验结果表明:当Nb含量小于0.99at%时,Nb/SnO₂复合薄膜都保持四方金红石结构,薄膜中的晶粒均匀,其晶粒尺寸分布范围为5—7 nm;当Nb含量达到1.23at%时,Nb/SnO₂复合薄膜主要保持四方金红石结构,但出现微量的SnO.当Nb含量小于0.99at%时,Nb/SnO₂复合薄膜的电阻率先减小后增大,当Nb含量为0.37at%时,复合薄膜的电阻率降低到 $9.49 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$;当Nb含量为0.61at%时,Nb/SnO₂复合薄膜的电阻率开始呈线性增大;当Nb含量达到1.23at%时,Nb/SnO₂复合薄膜的电阻率显著增大,其主要原因是由于晶格畸变和微量SnO所引起的.在400—700 nm可见光范围内,当Nb含量小于0.99at%时,Nb/SnO₂复合薄膜的透过率都在90%以上;当Nb含量达到1.23at%时,可见光透过率明显降低.

- [1] Wu C G, Shen J, Li D, Ma G H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8623 (in Chinese) [吴臣国、沈杰、李栋、马国宏 2009 物理学报 **58** 8623]
- [2] Ginley D S, Bright C 2000 *MRS Bull.* **25** 15
- [3] Chen Z Q, Liu H M, Liu Y P, Chen W, Luo Z Q, Hu X W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4260 (in Chinese) [陈兆权、刘明海、刘玉萍、陈伟、罗志清、胡希伟 2009 物理学报 **58** 4260]
- [4] Epifani M, Alvisi M, Mirengli L, Leo G, Siciliano P, Vasanelli L 2001 *J. Am. Ceram.* **84** 48
- [5] Thangaraju B 2002 *Thin. Sol. Fi.* **402** 71
- [6] Ma J, Hao X T, Huang S L, Huang H, Yang Y G, Ma H L 2003 *Appl. Surf. Sci.* **214** 208
- [7] Huang J Y, Fan G H, Zheng S W, Niu Q L, Li S T, Cao J X, Su J, Zhang Y 2010 *Chin. Phys. B* **19** 047205
- [8] Rockenberger J, Zum Felde U, Tischer M, Troger L, Haase M, Weller H, Tischer M, Haase M 2000 *J. Chem. Phys.* **112** 4296
- [9] Chaudhary V A, Mulla I S, Vijayamohan K 1998 *Sens. Actu-B* **50** 45
- [10] Jung Y S, Choi Y W, Lee H C, Lee D W 2003 *Thin. Sol. Fi.* **440** 278
- [11] Ogale S B, Choudhary R J, Buban J P, Lofland S E, Shinde S R, Kale S N, Kulkarni V N, Higgins J, Lanci C, Simpson J R, Browning N D, Das Sarma S, Drew H D, Greene R L, Venkatesan T 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 077205
- [12] Liu C M, Fang L M, Zu X T 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 936 (in Chinese) [刘春明、方丽梅、祖小涛 2009 物理学报 **58** 936]
- [13] Kuang A L, Liu X C, Lu Z L, Ren S K, Liu C Y, Zhang F M, Du Y W 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2934 (in Chinese) [匡安龙、刘兴翀、路忠林、任尚坤、刘存业、张凤鸣、都有为 2005 物理学报 **54** 2934]
- [14] Santos-Pena J, Brousse T, Sanchez L, Morales J, Schleich D M 2001 *J. Power Sources* **97-8** 232
- [15] Park S S, Zheng H, Mackenzie J D 1993 *Mater. Lett.* **17** 346

- [16] Mazek M, Orel B 1998 *Sol. En. M.* **54** 121
- [17] Vaufrey D, Ben Khalifa M, Besland M P, Sandu C, Blanchin M G, Teodorescu V, Roger J A, Tardy J 2002 *Organic Light-Emitting Materials and Devices* **4464** 103
- [18] Kikuchi N, Kusano E, Kishio E, Kinbara A 2002 *Vacuum* **66** 365
- [19] Wang C, Hou Y D, Wu N N, Zhu M K, Wang H, Yan H 2009 *Acta Chim. Sin.* **67** 203 (in Chinese) [王超、侯育冬、吴宁、朱满康、汪浩、严辉 2009 化学学报 **67** 203]
- [20] Yan J F, Zhang Z Y, Deng Z H 2007 *Journal of Huazhong University of Science and Technology* (Nature Science Edition) **35** 81 [闫军锋、张志勇、邓周虎 2007 华中科技大学学报 (自然科学版) **35** 81]
- [21] Dawar A L, Joshi J C 1984 *J. Mater. Sci.* **19** 1
- [22] Petritz R L 1956 *Phys. Rev.* **104** 1508
- [23] Yan J K, Gan G Y, Chen H F, Zhang X W, Sun J L 2007 *Semiconductor Technology* **32** 109 (in Chinese) [严继康、甘国、陈海芳、张小文、孙加林 2007 半导体技术 **32** 109]
- [24] Gratzel M 1989 *Heterogeneous photochemical electron transfer* (Florida: CRC Press) 66—70
- [25] Terrier C, Chatelon J P, Roger J A 1997 *Thin. Sol. Fi.* **295** 95
- [26] Jousse D 1985 *Phys. Rev. B* **31** 5335
- [27] Shi X, Liu F M, Liu Y Y, Ding P, Zhou C C 2009 *Acta Materiae Compositae Sinica* **26** 0113 [石霞、刘发民、刘妍研、丁芑、周传仓 2009 复合材料学报 **26** 0113]

Preparation and structure and optical-electrical properties of the Nb/SnO₂ composite thin film*

Zeng Le-Gui^{1,2)} Liu Fa-Min^{1)†} Zhong Wen-Wu¹⁾ Ding Peng¹⁾
Cai Lu-Gang¹⁾ Zhou Chuan-Cang¹⁾

1) (Department of Physics, School of Physics and Nuclear Energy Engineering, Key Laboratory of Micro-nano Measurement-Manipulation and Physics (Ministry of Education), Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

2) (Department of Fundamental Courses, The Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)

(Received 27 May 2010; revised manuscript received 25 June 2010)

Abstract

The Nb/SnO₂ composite thin films were successfully synthesized by sol-gel spin-coating method on glass substrate. The structures and properties of Nb/SnO₂ composite thin films were characterized by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), ultraviolet visible near-infrared spectrophotometry and four-probe method. The effects of Nb doping on structure and optical-electrical properties of the Nb/SnO₂ composite thin films were researched. The results indicate that a tetragonal rutile structure is retained when the Nb content is less than 0.99at%, and the nano-particles are distributed homogeneously in the thin films and their size can be controlled in the range of 5—7 nm. The resistivity of Nb/SnO₂ composite thin films decreases and then increases when the Nb content is less than 0.99at%, and reaches a very low value of $9.49 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ at 0.37at% Nb. In the range of 400—700 nm visible region, the transmittance of Nb/SnO₂ composite thin films is up to 90% when the Nb content is less than 0.99at%, and the optical band gap of Nb/SnO₂ composite thin films are in the range of 3.9—4.1 eV. The visible light transmittance of Nb/SnO₂ composite thin films significantly reduce at 1.23at% Nb.

Keywords: sol-gel, Nb/SnO₂ composite thin films, structure characterization, optical-electrical properties

PACS: 82.70. Gg, 61.05. cp, 73.61. Ey, 78.20. Ci

* Project supported by the Astronautics Science Foundation of China (Grant No. 373858).

† Corresponding author. E-mail: fmliu@buaa.edu.cn