

磁控溅射 ZnO 薄膜生长的等离子体发射光谱研究^{*}

李 勇 孙成伟 刘志文 张庆瑜[†]

(大连理工大学三束材料改性国家重点实验室 大连 116023)

(2006 年 1 月 24 日收到, 2006 年 3 月 22 日收到修改稿)

通过反应磁控溅射过程中的等离子体发射光谱,研究了制备 ZnO 薄膜的沉积温度、氧气流量比例 $R = O_2 / (O_2 + Ar)$ 对 Zn 和 O 原子发射光谱的影响,并结合 ZnO 薄膜的结构和物理性能,探讨了沉积温度在 ZnO 薄膜生长中的作用. 研究结果显示:当 $R \geq 0.75\%$ 时, Zn 的溅射产额随 R 的增加基本呈线性下降规律. 当 R 介于 $10\% - 50\%$ 时, 氧含量的变化相对平缓, 有利于 ZnO 薄膜生长的稳定性控制. Zn 原子发射光谱强度随沉积温度的变化可以分为三个阶段. 当沉积温度低于 $250\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 发射光谱强度基本保持不变; 当沉积温度介于 $250 - 550\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 光谱强度随沉积温度的增加呈线性增加的趋势; 当沉积温度大于 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 以后, 光谱强度随沉积温度的增加而迅速增加. 通过沉积温度的控制可以实现满足或接近化学计量配比的 ZnO 薄膜的生长, 适合高质量 ZnO 薄膜沉积的温度介于 $650 - 800\text{ }^\circ\text{C}$, $750\text{ }^\circ\text{C}$ 下沉积的 ZnO 薄膜具有比较低的缺陷密度和明显的室温紫外光致荧光发射.

关键词: ZnO, 薄膜生长, 反应磁控溅射, 等离子体发射光谱

PACC: 7280E, 6855, 7855

1. 引 言

氧化锌 (ZnO) 是一种典型的纤锌矿结构的 II-VI 族半导体, 具有较大的禁带宽度 (3.37 eV) 和较高的激子束缚能 (60 meV), 可以实现室温下的激子发光, 在发光二极管、光探测器、电致荧光器件、透明导电薄膜、气敏传感器等诸多领域有着广泛的应用^[1-3]. 自从 1997 年 Tang 等^[4]报道了 ZnO 薄膜的近紫外受激发射现象以后, ZnO 再次成为当今半导体材料研究领域的一个热点. 目前, ZnO 薄膜的研究重点之一是如何制备高质量的 ZnO 薄膜^[5,6]. 为此, 人们对 ZnO 薄膜的制备工艺进行了广泛研究, 如分子束外延^[4]、化学气相沉积^[7]、脉冲激光沉积^[8]、溶胶-凝胶^[9]和反应磁控溅射^[10-13]等. 此外, 人们还研究了基片及过渡层对 ZnO 薄膜质量的影响, 取得了一些有价值的研究成果. 例如, Chen 等^[14]发现 MgO 作为过渡层对 ZnO 在 $Al_2O_3(001)$ 基体上的层状生长是有利的; Ko 等^[15]在等离子体辅助分子束外延 ZnO 生长行为的研究中发现, ZnO 薄膜的生长受气氛中氧浓度所控制, 并给出了生长过程中 ZnO 表面重构变化的相图. 这些有关薄膜生长行为的研究, 对于制备

高质量的 ZnO 薄膜具有十分重要的意义.

反应磁控溅射作为一种大面积、低成本的薄膜制备技术, 在 ZnO 薄膜制备中有着广泛的应用. 反应磁控溅射的主要缺点是控制参数多, 所制备的 ZnO 薄膜质量难以满足光电器件的要求. 近年来, 通过各国学者的不断努力, 利用反应磁控溅射方法制备的 ZnO 薄膜已经实现了室温光致荧光发射^[16,17], 使得反应磁控溅射技术受到人们越来越多的关注. 目前, 利用反应磁控溅射方法制备高质量 ZnO 薄膜的关键问题是了解薄膜生长过程中影响 ZnO 薄膜质量的主要工艺参数以及保证制备工艺的稳定性. 在以往的 ZnO 薄膜生长工艺探索中, 人们主要是通过薄膜的结构和物理性能表征确定实验参数. 但是, 对于反应磁控溅射这种控制参数较多, 且实验参数受设备的结构、溅射靶的几何尺寸、等离子体放电类型等众多因素影响较大的薄膜制备技术, 不同作者之间的实验参数一般没有可比性, 很难了解影响薄膜生长行为的关键因素, 而且实验结果的可重复性也比较差.

等离子体发射光谱是研究放电条件下气体状态的有效手段, 本文通过反应磁控溅射过程中等离子体发射光谱的在线测量, 研究了 ZnO 薄膜制备过程

^{*} 国家自然科学基金(批准号 50240420656)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: qy Zhang@dlut.edu.cn

中的沉积温度 T 、氧气流量比例 $R = O_2 / (O_2 + Ar)$ 对 ZnO 成膜空间中的 Zn 和 O 原子发射光谱的影响,揭示了 Zn 溅射产额随 R 变化的基本规律,并结合不同实验参数下所制备的 ZnO 薄膜的结构和物理性能,探讨沉积温度在 ZnO 薄膜生长中的作用。

2. 实验方法

实验采用反应脉冲磁控溅射方法制备 ZnO 薄膜。实验中选择金属 Zn 作为溅射靶,溅射靶直径为 60 mm,厚为 3 mm,纯度优于 99.99%。ZnO 薄膜的基片采用 n 型(100)取向的单晶 Si 片,厚度为 420 μm ,电阻率为 2—4 Ω/cm 。Si 基片清洗处理的方法如下:将 Si 片放入丙酮、乙醇、去离子水中分别用超声波清洗 5 min,再在体积比为 3:1 的 $H_2SO_4 + H_3PO_4$ 的溶液中浸泡 20 h,去除 Si 基片表面的油污及其他污染物,然后在 5% 的 HF 酸溶液中腐蚀 2 min,以便剥离掉 Si 基片表面的本征氧化层,最后经去离子水冲洗,用干燥 N_2 气吹干后快速放入真空室。ZnO 薄膜在沉积过程中使用的 Ar 和 O_2 气体的纯度均为 99.999%。真空室经涡轮分子泵抽至本底真空度为 4.0×10^{-4} Pa。采用质量流量计控制溅射过程中的工作气压为 0.5 Pa,Ar 和 O_2 的表观体积流率在 0—40 mL/min 连续可调。Si 基片与溅射靶之间的距离为 70 mm,基片温度在室温到 750 $^{\circ}\text{C}$ 之间连续可调。溅射靶的脉冲输入功率为 80 W,占空比为 50%,频率为 20 kHz。反应磁控溅射过程中的等离子体光谱通过真空室的石英窗口后,用会聚透镜成像方法耦合到直径为 0.3 mm 光纤,通过 SBP500 型三光栅光谱仪进行光谱的采集与记录。光谱采集的波长扫描范围为 400—800 nm,光谱仪的分辨率为 0.25 nm。

3. 结果与分析

3.1. 发射光谱随 R 的变化

图 1(a) 是沉积温度为 750 $^{\circ}\text{C}$ 时纯氧气氛溅射的等离子体发射光谱。从图 1(a) 中可以看到,在成膜空间中存在着丰富的活性氧种类,包括氧气分子 (O_2)、氧原子 (O) 和氧原子离子 (O^+),但 Zn 的光谱很弱,这是由于金属溅射靶表面严重氧化所致。同时,我们注意到等离子体发射光谱中没有 ZnO 分子或离子的光谱线,说明磁控溅射条件下的 ZnO 合成

过程主要是在基片表面完成 Zn 和 O 的化合,这主要是因为反应磁控溅射属于物理气相沉积,工作气压比较低,Zn 和 O 的平均自由程比较大的缘故。此外,我们也没有发现氢和其他杂质元素的发射光谱线,说明实验对各种杂质的控制非常有效。

氧在 ZnO 薄膜生长过程中具有决定性作用,特别是等离子体中的活性氧,如氧原子和氧原子离子的含量直接影响 ZnO 薄膜的生长行为和成膜质量。为了了解氧分压对 ZnO 薄膜生长的影响,我们通过改变氩气和氧气流量的方法,研究了 O 和 Zn 的发射光谱随 R 的变化。图 1(b) 是基片温度为 750 $^{\circ}\text{C}$ 时等离子体中 Zn 原子和 O 原子发射光谱的相对强度随 R 的变化。图 1(b) 中的两条 Zn 原子谱线强度变化曲线分别对应于 Zn 原子的 472.5 和 481.3 nm 发射光谱线,归一化以纯 Ar 放电时的谱线相对强度为标准;O 原子的谱线强度变化曲线取自 O 原子 777.4 nm 的发射光谱线,归一化以纯氧放电时的谱线相对强度为标准。从图 1(b) 中我们看到,不同的 Zn 原子发射光谱线随 R 的变化趋势是基本一致的,

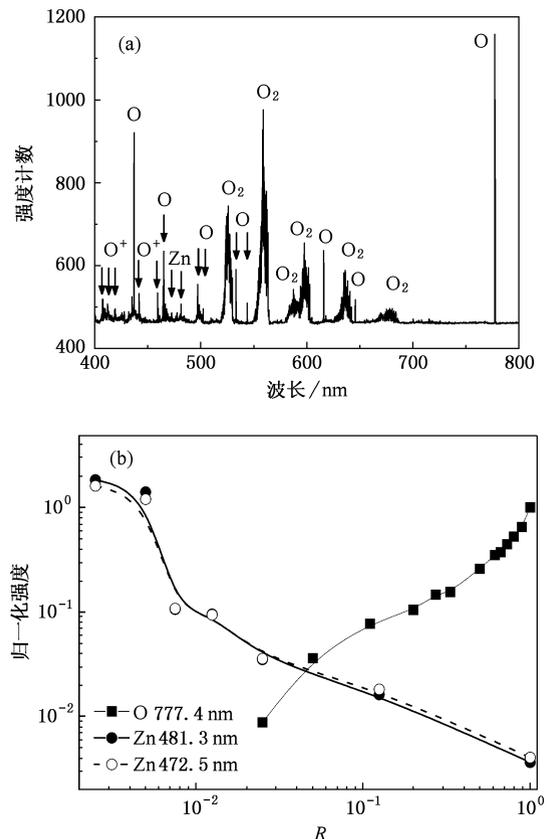


图 1 沉积温度为 750 $^{\circ}\text{C}$ 时的等离子体光谱 (a) 纯氧气氛下溅射的等离子体光谱 (b) Zn 原子和 O 原子的光谱归一化强度随 R 的变化情况

不同种类的活性氧的发射光谱线也有类似的变化规律. 所以, 我们认为所选取的 Zn 和 O 原子的发射光谱基本代表了成膜空间中 Zn 和 O 成分随 R 的变化.

R 决定着溅射空间中的氧气分压. 从图 1(b) 中可以看出, R 对 Zn 溅射产额的影响可以分为两个阶段. 当 $R \leq 0.5\%$ 时, Zn 原子谱线相对于纯 Ar 溅射时的强度有明显增加, 约为纯 Ar 溅射时的 Zn 原子谱线强度的 1.5—1.8 倍, 这与大量的实验结论, 即金属表面的微弱氧化将导致溅射产额显著增加是一致的. 由于此时没有观察到氧的发射光谱, 所以可以认为此时的氧气分压为零, 即全部的氧都复合在氧化的溅射靶表面和沉积的薄膜中. 当 $R \geq 0.75\%$ 时, Zn 原子发射光谱的相对强度随 R 的增加基本呈线性下降规律. 这一结果说明, $R = 0.75\%$ 时金属 Zn 靶表面的氧化层已基本形成, 并随 R 的增加而增加, 从而导致 Zn 的溅射速率下降. 氧原子发射光谱强度的变化行为表明, 当 $R = 2.5\%$ 时, 溅射气氛中才开始出现非常微量的氧. 此后, 溅射气氛中的氧含量变化大致可以分为三个阶段. 当 $R \leq 10\%$ 时, 溅射气氛中的氧含量增长较快; 当 R 介于 $10\%—50\%$ 时, 氧含量的变化相对平缓; 当 $R > 50\%$ 后, 氧含量再次急剧增加. 从薄膜制备的角度看, 溅射气氛中的氧含量随 R 变化的规律表明, 当 R 介于 $10\%—50\%$ 时, 对于控制 ZnO 薄膜生长的稳定性是有利的. 实际上, 利用反应磁控溅射方法制备出高质量 ZnO 薄膜的氧气流量比例均在此范围之内^[16, 17].

3.2. 发射光谱随沉积温度的变化

对于化学反应主要在基片表面进行的薄膜生长过程, 沉积温度对薄膜生长行为起着至关重要的作用. 就反应磁控溅射薄膜生长而言, 特别是在低温沉积条件下, 一般很难观察到等离子体发射光谱随沉积温度的变化而发生显著改变. 然而, 我们在磁控溅射 ZnO 薄膜生长的等离子体在线测量中发现, 在 R 较低的情况下, Zn 原子发射光谱在沉积温度大于 $250\text{ }^\circ\text{C}$ 以后出现了显著的增强, 这对理解沉积温度在 ZnO 薄膜生长的作用是非常有意义的. 图 2 是不同 R 时 Zn 原子发射光谱强度随沉积温度的变化. 从图 2 可以看到, 当 $R < 1.25\%$ 时, $250\text{ }^\circ\text{C}$ 以后的 Zn 原子发射光谱增加非常明显, 这一增加的趋势随 R 的增加而逐渐减弱. 对于 $R = 0.25\%$ 的沉积过程, $750\text{ }^\circ\text{C}$ 沉积时的 Zn 原子发射光谱强度约为室温时

的 4 倍; 而 $R = 1.25\%$ 的薄膜沉积过程中, $750\text{ }^\circ\text{C}$ 沉积时的 Zn 原子发射光谱强度约为室温时的 2.5 倍; 当 $R = 20\%$ 时, 已经观察不到 Zn 原子发射光谱强度的增加. 我们认为, Zn 原子发射光谱强度随沉积温度的这种变化与沉积在基片表面的 Zn 原子热脱附过程有关. 考虑到发射光谱强度与等离子体的状态和气体密度有关, 而且温度的改变并没有导致工作气压的显著变化, 因此 Zn 发射光谱强度的显著增加意味着基片温度增加所导致的热脱附 Zn 原子具有比较大的激活比例, 从而改变了成膜空间的等离子体状态, 这对 ZnO 薄膜的合成是非常有利的.

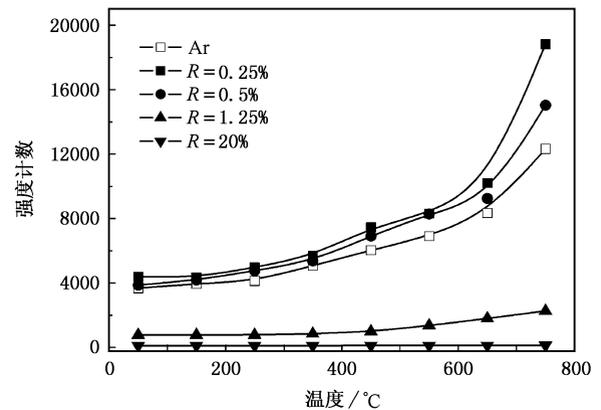


图 2 不同 R 时 Zn 原子发射光谱强度随沉积温度的变化

Zn 原子发射光谱强度随沉积温度的变化, 大体上可以分为三个阶段. 当沉积温度低于 $250\text{ }^\circ\text{C}$ 时, Zn 原子发射光谱强度基本保持不变; 当沉积温度介于 $250—550\text{ }^\circ\text{C}$ 时, Zn 原子发射光谱强度随沉积温度的提高呈线性增加的趋势; 当沉积温度大于 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 以后, Zn 原子发射光谱强度随沉积温度的提高而迅速增加. 这一结果一方面反映了金属 Zn 具有比较低的升华热, 使得沉积在基片表面的 Zn 原子在比较低的温度下具有比较大的蒸发速率; 另一方面, 低 R 时 Zn 原子的热脱附明显说明没有形成 ZnO 的 Zn 原子更容易从表面脱附, 这意味着可以通过沉积温度的控制而实现满足或接近化学计量配比的 ZnO 薄膜的生长. 尽管在 $R = 20\%$ 时, 观察不到 Zn 原子发射光谱强度的增加, 但并不意味着此时没有 Zn 原子的热脱附, 只是由于此时成膜空间的氧含量比较大, 基片表面绝大多数的 Zn 原子可以与 O 化合形成 ZnO, 而且 Zn 原子很难从 ZnO 解离, 使得从基片表面热脱附的 Zn 原子比例显著降低, 且远远少于从磁控靶面上溅射出来的 Zn 原子数量, 因此很难观察到等离

子体发射光谱强度上的变化。

实际上,在以往的反应磁控溅射 ZnO 薄膜生长中,多数学者选择的沉积温度是 400—550 °C^[17]。虽然结构分析结果表明,所制备的 ZnO 薄膜具有高度的(001)择优取向和非常好结晶质量,其 ZnO(002)的 X 射线衍射峰的半峰宽一般小于 0.25^d^[17],但是,很少有室温光致荧光的报道。在为数不多的有关反应磁控溅射 ZnO 薄膜的室温光致荧光报道中,其深能级杂质的荧光也相当显著。这说明,尽管基片表面上没有与 O 发生键合的 Zn 原子可以在 400—550 °C 从表面热脱附,但还不足以实现满足或接近化学计量配比的 ZnO 薄膜的生长。从我们的等离子体发射光谱强度的变化趋势上看,当沉积温度大于 650 °C 时, Zn 原子发射光谱强度才开始急剧增加,说明此时的 Zn 原子脱附更加有效。因此,我们认为反应磁控溅射制备高质量 ZnO 薄膜的合适沉积温度应该大于 650 °C,但不能高于 800 °C。因为大量的退火实验证明^[16],当温度超过 800 °C 以后就有可能导致 ZnO 的部分分解,从而导致 O 空位和 Zn 添隙等深能级杂质的出现。由于磁控溅射等离子体中 O 原子的发射光谱线非常弱,很难观测到发射光谱强度随沉积温度的变化。但是,从气体吸附和化学反应的基本规律上看,低温有利于分子气体的物理吸附,而不利于化学反应。所以,低温时的 ZnO 薄膜生长以原子 O 为主,但有可能导致大量分子态的氧存在;相反,在

高沉积温度下气体分子的物理吸附大大降低,而且化学反应活性增加,从而降低了分子态氧的存在,这对高质量的 ZnO 薄膜生长是有利的。此外,比较高的沉积温度可以减少薄膜中 Ar 的含量,这对改善 ZnO 的光电特性也是有利的^[18]。

3.3. 沉积温度对 ZnO 薄膜结晶质量和光学性能的影响

表 1 是不同沉积温度下 ZnO 薄膜结晶质量的表征结果。从表 1 可以看出:当沉积温度低于 500 °C 时, ZnO 薄膜处于压应变状态,晶格受到的是压应力,并且随沉积温度的增加压应力逐渐降低,说明在 ZnO 的晶格中可能存在一定数量的填隙原子;当沉积温度为 750 °C 时, ZnO 薄膜的晶格处于张应变状态,而且 Zn/O 原子比例相对于 500 °C 时也有所降低,这可能是 Zn 的过量蒸发所导致的。需要指出的是,这里的 Zn/O 原子比例是通过电子探针方法测定的,由于电子探针针对轻元素难以精确定量,所以分析结果只具有相对意义。拉曼光谱测量表明,拉曼位移随沉积温度的增加而增大。一般认为^[19],拉曼位移的这种偏离与薄膜内应力有关,但这不足以解释我们的实验结果。我们通过仔细分析发现^[18],随着沉积温度的增加,拉曼位移的增加实际上反映出 ZnO 晶粒内部缺陷密度的降低,这与我们相关的光学参数的测量结果是一致的。

表 1 不同沉积温度下 ZnO 薄膜的结晶特性

沉积温度/°C	ZnO(002)半峰宽(°)	应力/GPa	Zn/O 原子比	拉曼位移/cm ⁻¹	折射率 n_{633}	消光系数 $k_{633}/10^{-6}$
室温	0.28	-1.66	0.79	436.9	1.97	1502.80
250	0.24	-0.90	0.82	438.0	1.96	104.64
500	0.21	-0.63	0.94	438.0	1.92	4.22
750	0.23	1.21	0.91	440.1	1.95	3.36

光致荧光特性是评价 ZnO 薄膜结晶质量的最有效的手段。我们利用波长为 325 nm 的 He-Cd 激光器为激发源,研究了不同沉积温度下 ZnO 薄膜在 350—750 nm 范围内的室温光致荧光发射。实验结果显示,沉积温度在 500 °C 时,没有观察到 ZnO 薄膜有室温紫外荧光发射,而 750 °C 下沉积的薄膜具有比较明显的室温紫外光致发光。同时,在所有沉积温度下都没有观察到在退火过程中经常出现的 400—550 nm 波长范围内的可见光谱。没有出现可见发光带这一事实说明,利用反应磁控溅射方法可以制备出具有较低缺陷密度的 ZnO 薄膜。而紫外荧光光谱

和消光系数随沉积温度的变化,则反映出影响 ZnO 薄膜紫外荧光发射的缺陷可能与溅射过程中 Ar 和 O₂ 等残余气体密度有关。这与我们通过反应磁控溅射的等离子体发射光谱所得到结论是完全一致的。尽管沉积温度为 500 °C 时 ZnO(002)的 X 射线衍射半峰宽具有最小值,但这并不意味着此时的 ZnO 薄膜质量最好,只是反映了此时的薄膜晶粒尺寸比较大。

4. 结 论

1) 氧气流比例 R 决定着 ZnO 薄膜生长过程

中的金属 Zn 靶的溅射产额和成膜空间中的氧含量. 微量氧气将导致溅射产额的显著增加. 当 $R \geq 0.75\%$ 时, 金属 Zn 靶的溅射产额随 R 的增加基本呈线性下降规律. 当 R 介于 $10\%—50\%$ 时, 氧含量的变化相对平缓, 有利于 ZnO 薄膜生长的稳定性控制.

2) Zn 原子发射光谱强度随沉积温度的变化, 大体上可以分为三个阶段. 当沉积温度低于 $250\text{ }^\circ\text{C}$ 时, Zn 原子发射光谱强度基本保持不变; 当沉积温度介

于 $250—550\text{ }^\circ\text{C}$ 时, Zn 原子发射光谱强度随沉积温度的提高呈线性增加的趋势; 当沉积温度大于 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 以后, Zn 原子发射光谱强度随沉积温度的提高而迅速增加. 通过沉积温度的控制可以实现满足或接近化学计量配比的 ZnO 薄膜的生长.

3) 反应磁控溅射制备高质量 ZnO 薄膜的合适沉积温度介于 $650—800\text{ }^\circ\text{C}$. 不同沉积温度下的薄膜性能表征证明, $750\text{ }^\circ\text{C}$ 下沉积的 ZnO 薄膜具有比较低的缺陷密度和明显的室温紫外光致荧光发射.

- [1] Bagnall D M , Chen Y F , Zhu Z *et al* 1997 *Appl. Phys. Lett.* **70** 2230
- [2] Ryu Y R , Kim W J , White H W 2000 *J. Cryst. Growth* **19** 419
- [3] Aoki T , Hatanaka Y , Look D C 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 3257
- [4] Tang Z K , Wong G K L , Yu P 1998 *Appl. Phys. Lett.* **72** 3270
- [5] Kim S K , Jeong S Y , Cho C R 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 502
- [6] Sieber I , Wanderka N , Urban I *et al* 1998 *Thin Solid Films* **330** 108
- [7] Wang J Z , Du G T , Zhang Y T *et al* 2004 *J. Cryst. Growth* **263** 269
- [8] Guo X L , Tabata H , Kawai T 2001 *J. Cryst. Growth* **213** 122
- [9] Lee J H , Ko K H , Park B O 2003 *J. Cryst. Growth* **247** 122
- [10] Lin B , Fu Z , Jia Y 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 943
- [11] Fang Z B , Gong H X , Liu X Q *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1748 [in Chinese] 方泽波、龚恒翔、刘雪芹等 2003 物理学报 **52** 1748]
- [12] Jeong S H , Kim B S , Lee B T 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 2625
- [13] Zhang D H , Wang Q P , Xue Z Y 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1484 (in Chinese) [张德恒、王卿璞、薛志营 2003 物理学报 **52** 1484]
- [14] Chen Y , Ko H , Hong S *et al* 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 559
- [15] Ko H , Yao T , Chen Y *et al* 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 4354
- [16] Sun C W , Liu Z W , Zhang Q Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 430 (in Chinese) [孙成伟、刘志文、张庆瑜 2006 物理学报 **55** 430]
- [17] Özgür Ü , Alivov Y I , Liu C *et al* 2005 *J. Appl. Phys.* **89** 041301
- [18] Sun C W , Liu Z W , Qin F W *et al* 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1390 (in Chinese) [孙成伟、刘志文、秦福文等 2006 物理学报 **55** 1390]
- [19] Decremps F , Pellicer J , Saitta A *et al* 2002 *Phys. Rev. B* **65** 092101

Study of ZnO film growth by reactive magnetron sputtering using plasma emission spectra^{*}

Li Yong Sun Cheng-Wei Liu Zhi-Wen Zhang Qing-Yu[†]

(State Key Laboratory of Materials Modification by Laser , Ion and Electron Beams , Dalian University of Technology , Dalian 116023 , China)

(Received 24 January 2006 ; revised manuscript 22 March 2006)

Abstract

Using on-line measurement of plasma emission spectra during reactive magnetron sputtering , the growth of ZnO films was studied with the variation of O₂ flow and deposition temperature , ranging from room temperature to 750 °C . With the structural characterization and measurement of optical properties , we revealed the role of growth temperature and O₂ flow in the growth of ZnO film . The results showed that O₂ flow was important in determining the sputtering yield of Zn target . When the flow ratio of O₂ to Ar + O₂ (R) > 0.75% , the sputtering yield of Zn decreased linearly with increasing O₂ flow . When R was in the 10%—50% range , the concentration of oxygen varied slowly , which may be useful for the control of film growth . The intensity of emission spectrum of atomic Zn at 481.3 nm varied with increasing deposition temperature T . When $T < 250$ °C , the intensity was approximately a constant . When 250 °C < $T < 550$ °C , the intensity increased linearly with increasing deposition temperature . When $T > 550$ °C , the intensity increased sharply with increasing deposition temperature . By controlling the deposition temperature , a high-quality film with the composition close to stoichiometric ZnO was fabricated on Si(001) substrate at 750 °C and ultraviolet photoluminescence was detected at room temperature .

Keywords : ZnO , film growth , reactive magnetron sputtering , emission spectrum of plasma

PACC : 7280E , 6855 , 7855

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50240420656).

[†] Corresponding author. E-mail : qy Zhang@dlut.edu.cn