

直流反应磁控溅射 Al, N 共掺杂方法生长 p 型 ZnO 薄膜及其特性*

袁国栋 叶志镇 曾昱嘉 吕建国 钱 庆 黄靖云 赵炳辉 朱丽萍

(浙江大学硅材料国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 报道了利用直流反应磁控溅射以 Al, N 共掺杂技术生长 p 型 ZnO 薄膜。ZnO 薄膜在不同衬底温度下沉积于 α -Al₂O₃(0001) 衬底上, N 来自 NH₃ 与 O₂ 的生长气氛, Al 来自 Zn_xAl_{1-x} ($x = 0.9$) 靶材。利用 XRD, AFM, Hall, SIMS 和透射光谱对其性能进行了研究。结果表明, ZnO 薄膜具有高度 c 轴择优取向, 450 °C, 600 °C 分别实现了 p 型转变, 电阻率为 $10^2 \sim 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$, 载流子浓度为 $10^{15} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 迁移率为 $0.5 \sim 1.32 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。薄膜中 Al 原子促进了 N 原子的掺入。实验还表明, p-ZnO 薄膜在可见光区域具有很高的透射率(约为 90%), 室温下光学带宽为 3.28 eV。而在 450 °C 生长的 p-ZnO 具有较小的晶粒度和表面粗糙度。

关键词: Al, N 共掺杂技术; p-ZnO; 直流反应磁控溅射

PACC: 6855

中图分类号: TN304.2⁺ 1

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)06-0668-06

1 引言

ZnO 是一种新型的 II-VI 族宽禁带化合物半导体材料。由于 ZnO 具有很高的激子束缚能(室温下为 60 meV), 激子增益也可达到 300 cm⁻¹, 是一种理想的短波长发光材料^[1, 2], 在 LEDs, LDs 等领域有巨大的应用潜力。通过掺杂 Al, Ga 等元素可形成具有优异性能的 n-ZnO 材料^[3, 4], 但 ZnO 的 p 型掺杂却较为困难, 一方面是由于受主固溶度低, 另一方面, ZnO 的许多本征施主缺陷(如锌间隙和氧空位)会产生高度自补偿。我们在 ZnO 的 p 型掺杂方面已经做过很多有意义的尝试, 并取得较好的结果^[5~8]。Nakamura^[9]通过理论计算预测, 通过施主(B, Al, Ga 等)、受主(N, P, As 等)共掺杂技术可以较容易地实现 ZnO 的 p 型转变, 据此, Joseph 等人^[10]利用 Ga, N 共掺杂生长出了具有较好性能的 p 型 ZnO 薄膜。Al 与 Ga 同属 IIIA 族元素, 理论计算表明^[11], 反映施主杂

质的极化能 In < Ga < Al, 因此 Al 也适合用于共掺杂技术中生长低阻的 p 型 ZnO。而且 Al 原料丰富, 价格低廉, 如果 Al 能够代替 Ga, 通过共掺实现 p 型转变, 那么对于 ZnO 材料的实际应用将会有极其深远的意义。

磁控溅射是一种应用较为成熟和广泛的成膜技术, 适用于大面积沉积, 而且与 Si 平面工艺兼容, 可以通入不同的溅射气氛, 靶材选择范围也比较广泛, 因而能够有效实施 ZnO 的掺杂。本文首次报道了利用磁控溅射, 以 Zn_xAl_{1-x} ($x = 0.9$) 为靶材, 制备出 Al, N 共掺杂的 ZnO 薄膜, 并且实现了 ZnO 的 p 型转变。

2 实验

ZnO 薄膜由直流反应磁控溅射技术制得。反应室真空间抽至 10^{-3} Pa 后, 通入高纯 NH₃(99.99%) 和 O₂(99.99%) 的混合气体作为溅射气氛, 压强为 3~

* 国家重点基础研究专项经费(批准号: G2000068306), 国家自然科学基金(批准号: 90201038)资助项目

袁国栋 男, 1977 年出生, 博士研究生, 从事 ZnO 半导体器件研究。E-mail: yuandg@cmsce.zju.edu.cn

叶志镇 男, 1955 年出生, 教授, 博士生导师, 主要从事半导体薄膜和器件研究。E-mail: yezz@cmsce.zju.edu.cn

2003-05-21 收到, 2003-10-05 定稿

©2004 中国电子学会

5Pa, $\text{NH}_3\text{-O}_2$ 分压比为 3:2, 以 $\text{Zn}_x\text{Al}_{1-x}$ ($x = 0.9$) 为靶材, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (0001) 为衬底, 衬底温度(T_S) 分别控制在 400, 450, 500, 550, 600 和 650 °C。ZnO 薄膜在 60W (200V × 0.3A) 的溅射功率下生长 20~30min。

ZnO 薄膜的结构特性由 Philips X 射线衍射仪测量得到 ($\text{CuK}\alpha$, $\lambda = 0.1542\text{nm}$), 表面形貌由原子力显微镜分析, 其电学性能由 HL5500 霍尔测试仪来确定, 掺杂特性由 CAMECA 公司 IMS-6F 型二次离子质谱仪测试, 并采用 Lambda20 分光光度计测试其光学特性。

3 结果与讨论

3.1 结构特性

图 1 显示了不同生长温度下生长的 Al,N 共掺杂的 ZnO 薄膜, 1~6 号样品所对应的生长温度如图 1 所示(下面其它测试的样品编号同此)。所有样品只出现一个衍射峰, 对应于 ZnO 的 (002) 衍射面, 说明薄膜具有高度 c 轴择优取向^[12]。图 1 中还显示出 ZnO 薄膜峰位相对于 ZnO 粉末样品 (002) 晶面的 $2\theta = 34.43^\circ$ 均向低角方向偏移, 这说明薄膜由于 N 的掺入在 c 轴方向存在拉应力。图谱中没有观察到 Al 或 Zn 的峰, 从图中可以看到 (002) 峰的强度随着衬底温度的升高而增加, 在 550 °C 时取得最大值, 然后随着衬底温度的进一步升高强度反而降低, 由此可知衬底温度对 Al,N 共掺杂的 ZnO 薄膜的结晶特性有显著影响。这可以从成核理论中得到解释, 对于一个完善的异质外延成核, 必须满足表面扩散条件, 因

此衬底温度有一个下限, 当低于此下限时, 外来分子或原子即使具有较高的能量也容易被衬底迅速“冷却”, 使其表面扩散长度大为减少而不能迁移到成核位置, 这样获得的薄膜表面粗糙。但温度过高时又会使 ZnO 分子的吸附寿命缩短, 即使在溅射气氛分压较大的情况下, 也使 ZnO 分子的分解速率较大, 导致样品表面局部富 Zn, 而引入大量点缺陷 (V_0 、 Zn_i), 表现为膜层致密性差, 甚至形成非晶^[13]; 因此只有处于一定温度下, 吸附原子才有适当的能量迁移到能量最低的成核位置, 同时又有较低的解析速率, 得到较好结晶性能的薄膜。其中在 450 °C (# 2) 和 600 °C (# 5) 时分别实现了 ZnO 的 p 型转变。

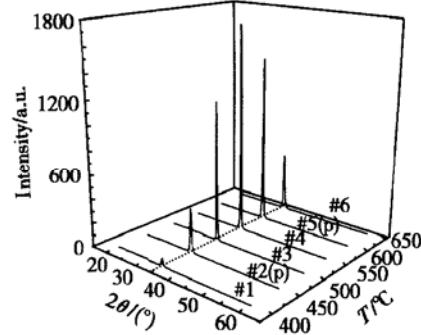


图 1 不同衬底温度下 ZnO 薄膜的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD profiles of ZnO films at different substrate temperature

3.2 表面形貌

图 2 为 2 号样品和 5 号样品的原子力显微镜 (AFM) 照片(两个样品均为 p 型, 可由下面的 Hall 测

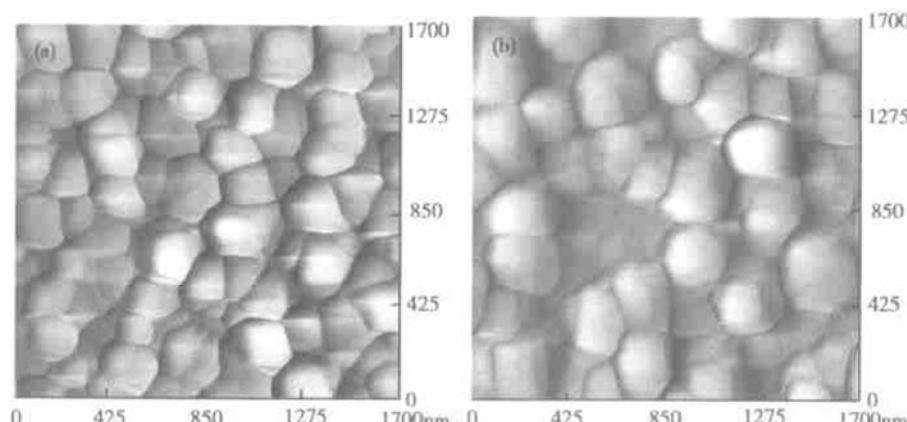


图 2 ZnO 薄膜的表面原子力显微镜形貌图像

Fig. 2 AFM surface image of ZnO films (a) No. 2; (b) No. 5

试表明), 扫描范围为 $1700\text{nm} \times 1700\text{nm}$. 从图中可以看出 ZnO 晶粒形状很不规则, 晶界明显. 样品 2 中的晶粒尺寸约为 $150\sim 200\text{nm}$, 晶粒大小比较均匀, 实际测得的表面粗糙度约为 20nm ; 样品 5 的晶粒尺寸大于样品 2, 约为 250nm , 较大晶粒通过合并周围的小晶粒而明显增大, 薄膜表面粗糙度约为 35nm . 说明随着衬底温度的升高, 晶粒长大, 薄膜表面的粗糙度也随之增加.

3.3 掺杂特性

图 3(a) 和(b) 分别为 7 号样品(n 型, 600°C 生长 5min, 500°C 再生长 20min, 详见 3.4 电学特性中的#7) 和 5 号样品(p 型) 的二次离子质谱(SIMS) 图. 沿着横坐标变大的方向依次为: 薄膜表面 → 薄膜内部 → 蓝宝石衬底. 两张图谱都给出四种元素: Zn , O , Al , N 在薄膜中的分布. 从图中可以清楚地看出, n 型薄膜的厚度约为 $0.07\mu\text{m}$. p 型薄膜的厚度约为 $0.1\mu\text{m}$. 还可看出: Al , N 原子都已经掺入 ZnO 薄膜中, 而 SIMS 能检测的最低浓度为 $1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$, 说明

这两种掺杂元素含量均已超过 $1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$. 图 3(a) 对应的样品其生长工艺为: 先在 600°C 下生长 5min, 然后降低衬底温度到 500°C 再溅射 20min. 从图中可以看出, 当衬底温度降低时, Al 原子在薄膜中的含量有增加的趋势. 与此同时, N 原子的含量也有增加的趋势. 说明温度从 600°C 降到 500°C 时有助于 Al 原子的掺入, 而 Al 原子的掺入会促进 N 原子的掺入. 这与文献[9]中的理论计算预测相一致. 从图 3(b) 中可以看出, 衬底温度 600°C 生长时, 生成的 ZnO 薄膜中 Zn , O , Al , N 四种原子对应的分布曲线比较平坦, 说明四种元素在薄膜厚度方向上含量均匀, 偏析很小, 只是在薄膜表面 Al , N 含量均有很小的下降趋势, 这可能跟一定温度下 Al , N 原子在薄膜表面的脱附有关. 从图 3(b) 也可以看出, Al , N 含量的变化趋势是一致的, 即含量随着距离表面的减小而下降. 这一点也证明了 Al 原子含量的减小抑制了 N 原子的掺入. 总之, 结果表明, ZnO 中 Al 的存在促进了 N 掺杂量的提高.

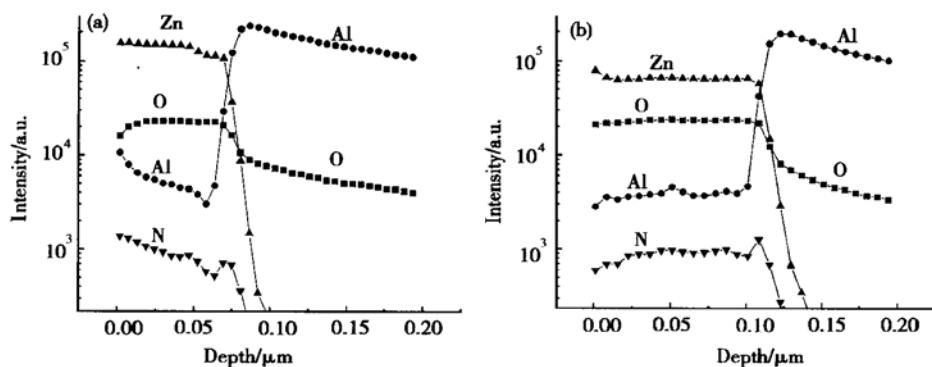


图 3 Al, N 共掺的 ZnO 薄膜的 SIMS 图谱 (a) 7 号样品; (b) 5 号样品
Fig. 3 SIMS depth profiles of $\text{Al}+\text{N}$ -codoped ZnO films (a) No. 7; (b) No. 5

文献[11]中的理论计算表明采用 2N 掺入会使 Madelung 能量增加 0.91eV , 而采用 $\text{Al}-2\text{N}$ 共掺入的方法却可以使 Madelung 能量降低 4.74eV . 这主要是由于 N 原子单独掺入时, 由于两个 N 原子间的排斥作用增加系统能量, 从而降低固溶度, 导致 N 原子不稳定. 对照图 3 分析, 7 号样品中 Zn 含量大于 5 号, O 含量小于 5 号, 7 号样品中 Al 原子平均含量高于 5 号样品, 而 Zn 间隙原子, O 空位, Al 原子都是施主杂质, 这与我们的 Hall 测试结果也是一致的, 即 7 号样品为 n 型导电, 5 号样品为 p 型导电. N 原子在

7 号样品表面略有增加的趋势, 但是仍被大量的施主杂质补偿, 所以薄膜仍然显示 n 型.

3.4 电学特性

表 1 给出不同衬底温度下 ZnO 薄膜的电学性能. 从表中可以看出, 在 400°C 生长温度下, ZnO 薄膜为 n 型, 当衬底温度为 450°C 时, ZnO 实现了 p 型转变, 载流子浓度为 $1.7 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$, 电阻率为 $278\Omega\cdot\text{cm}$, Hall 迁移率为 $1.32\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$. 温度进一步升高时, Al, N 共掺杂的 ZnO 薄膜又表现为 n 型. 直到衬

底温度升高到 600 ℃时, 薄膜又实现了 p 型转变, 但当衬底温度升高到 650 ℃时, 薄膜再次转变成 n 型。样品 7 是为了观察两步生长法(600 ℃生长 5min, 然后降低衬底温度到 500 ℃再生长 20min)对薄膜中 Al,N 等元素分布及电学性能的影响。

表 1 薄膜的电学性能

Table 1 Electrical properties of ZnO films

样品	衬底温度 / ℃	电阻率 / (Ω·cm)	迁移率 / (cm²·V⁻¹·s⁻¹)	载流子浓度 / cm⁻³	类型
# 1	400	210	4.2	3.7×10^{15}	n
# 2	450	278	1.32	1.7×10^{16}	p
# 3	500	145	5.14	8.38×10^{15}	n
# 4	550	9.5	0.139	4.72×10^{18}	n
# 5	600	4.76×10^3	0.512	2.56×10^{15}	p
# 6	650	150	3.6	7.4×10^{15}	n
# 7	600/5min 500/20min	33.4	0.0727	2.57×10^{18}	n

实验还表明, 上述 ZnO 薄膜电学性能的变化具有较好的稳定性和可重复性。根据 Minegishi^[14] 和 Kamata^[15] 的研究, ZnO 以 NH₃ 作为 N 源进行受主掺杂时, 由于 H 的钝化作用, 其电学性能对生长温度十分敏感, 只有在适当的温度下才能得到 p 型 ZnO 薄膜, 温度过高或过低都不能实现 ZnO 的 p 型转变; 而 Joseph 等人的结果表明^[10], III 族元素与 N 共掺杂能否得到 p 型 ZnO 薄膜, 也强烈依赖于薄膜的生长温度。以 NH₃ 作为 N 源进行 Al,N 的共掺杂生长 p 型 ZnO 薄膜, 其掺杂机理比较复杂, 表 1 所示的得到 p 型 ZnO 薄膜所需的温度以及其他电学性能随生长温度的变化是 H 的钝化, Al,N 相互作用以及 N,O 的脱附^[16] 等共同作用的结果。导电类型随生长温度的变化可以解释如下:

Minegishi 和 Joseph 的研究结果均表明, 生长温度是影响薄膜导电类型的一个重要因素。根据 Minegishi 和 Kamata 的研究结果, ZnO, ZnSe 中以 NH₃ 作为 N 源进行受主掺杂时, N 和 H 会形成牢固的 N—H 键存在于薄膜中。较低温度下(400 ℃)生长时, N—H 键在整个生长过程中都无法断开, N 没有活化, 同时, 低温下没有足够的能量使 Al,N 原子分别取代 Zn,O。而且 400 ℃下生长^[10] 时, 自由激子峰很弱, 氧空位峰很强, 说明薄膜中存在较多的氧空位, 氧空位起施主作用, 因此, 薄膜为 n 型。当温度升高(450 ℃)时, N—H 键在薄膜生长时断开, 活化的 N 原子取代 O 位置, 作为受主杂质存在, 与此同时, H 原子由于其较小的原子半径, 会存在于 N 相邻的间

隙位置, 有效地抑制了间隙 Zn 的存在。而且, 温度升高过程中, 氧空位峰明显下降^[10], 因此自补偿效应明显减小, 薄膜实现 p 型转变。温度进一步升高(500 ℃, 550 ℃)时, N—H 键在 N 注入前断开^[5], 这样 H 钝化作用减弱, 不能有效地抑制间隙 Zn 等施主杂质。从图 3(a)看出 500 ℃时 Al 含量较大, 补偿了 N 受主, 所以薄膜显示 n 型导电。温度升高到 600 ℃, 从图 3(b)可以看出, Al,N 原子在薄膜中分布均匀, 而且较图 3(a) Al 原子含量少(对于这一点的机理有待进一步研究), 这样似乎是会减少薄膜中 N 的浓度, 不利于形成 p 型薄膜。但从图 3(b) 中可以看出, 由于 Al,N 的共同作用, 引起该温度下薄膜中 Zn_i 浓度的下降, 较图 3(a) Zn:O 比变小, 这可以解释薄膜在 600 ℃下为什么实现 p 型转变, 而当温度继续升高到 650 ℃时, 导电类型又转变成 n 型, 这可能跟高温下 N 原子的脱附有关。

3.5 光学特性

图 4 为 2 号样品(p 型)和 4 号样品(n 型)在可见、紫色光范围内的透射光谱。从图上可以看出两个样品在可见光范围内(380~760nm)都有比较好的透射性, 透射率约为 90%。而对于波长小于 370nm 的

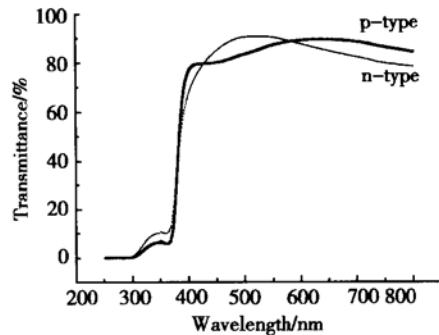


图 4 ZnO 薄膜在可见、紫色光范围内的透射光谱

Fig. 4 Transmittance spectra of p- and n-type ZnO films

紫外光透射率低于 1%。图中 300~350nm 的波动是由于测试中由可见光过渡到紫外光时所引起的噪音信号。此外我们还可以根据图 4 拟合出样品的禁带宽度。对于 ZnO 这类材料其吸收系数 α 、透射率 T 和厚度 d 有如下关系^[17]:

$$\alpha = [2.303 \times \lg(1/T)]/d$$

而 α 与光子能量 $h\nu$ 又有如下关系:

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g)$$

其中 A 为常数; E_g 为禁带宽度。这样根据图 4 作出 $(\alpha h\nu)^2$ 与 $h\nu$ 的函数曲线如图 5 所示, 将其线性

部分拟合，延长交于横轴， $(ah\nu)^2 = 0$ ，便可以求得

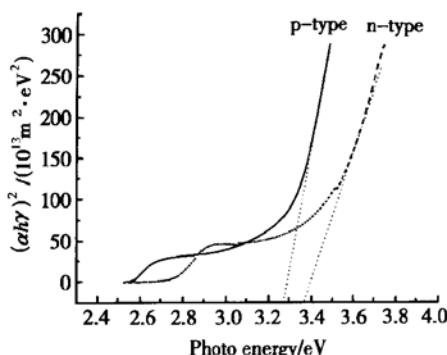


图 5 根据透射光谱拟合所得 p-ZnO 和 n-ZnO 的禁带宽度

Fig. 5 E_g of p- and n-type ZnO derived from transmittance spectra

E_g 。从图 5 可得 n-ZnO 禁带宽度约为 3.36eV, p-ZnO 禁带宽度约为 3.28eV。p-ZnO 禁带宽度的减小可能是由于 Zn—N 键的存在使其离子性降低和激子吸收^[18]引起的。根据 Pauling 理论, 两种元素形成单键时, 这两种元素的电负性越大, 则形成单键的电离度越大, O 原子的电负性(3.5)大于 N(3.0), 因此 Zn—O 电离度要大于 Zn—N, 从而导致 p-ZnO 的 E_g 减小。此结果又验证了 Hall 测试的正确性, 2 号样品中 N 已经成功地对 O 空位进行补偿, 并实现转型。

4 结论

本文报道了利用 Al, N 共掺杂技术生长 p 型 ZnO 薄膜。测试结果表明, ZnO 薄膜具有高度 c 轴择优取向, 在一定的条件下实现了 Al, N 原子在 ZnO 薄膜中的共掺杂, Al, N 两种原子在薄膜中互相促进掺杂, 在 450 °C, 600 °C 分别实现了 p 型转变, 其中 450 °C 时载流子浓度为 $1.7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 电阻率为 $278 \Omega \cdot \text{cm}$, Hall 迁移率为 $1.32 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ 。尚需进一步提高。p-ZnO 在可见光区的透射率约为 90%, 光学带宽为 3.28eV。

参考文献

- [1] Wong E C, Searon P C. ZnO quantum particle thin films fabricated by electrophoretic deposition. *Appl Phys Lett*, 1999, 74: 2939
- [2] Yu P, Tang Z K, Wong G K L, et al. Room-temperature gain spectra and lasing in microcrystalline ZnO thin films. *J Cryst Growth*, 1998, 184~185: 601
- [3] Park K C, Ma Y, Kim K H, et al. The physical properties of Al-doped zinc oxide films prepared by RF magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 1997, 305: 201
- [4] Ataev B M, Bagamadova A M, Mamedov V V, et al. Highly conductive and transparent thin ZnO films prepared in situ in a low pressure system. *J Cryst Growth*, 1999, 198~199: 1222
- [5] Ye Zhizhen, Lu Jianguo, Chen Hanhong, et al. Preparation and characteristics of p type ZnO films by DC reactive magnetron sputtering. *J Cryst Growth*, 2003, 253: 258
- [6] Lu Jianguo, Ye Zhizhen, Wang Lei, et al. Structural, electrical and optical properties of N-doped ZnO films synthesized by SS-CVD. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2003, 491~496: 5/6
- [7] Ye Zhizhen, Chen Hanhong, Liu Rong, et al. Structural and PL spectrum of ZnO films prepared by DC reactive magnetron sputtering. *Chinese Journal of Semiconductors* (in Chinese) [叶志镇, 陈汉鸿, 刘榕, 等. 直流磁控溅射 ZnO 薄膜的结构和室温 PL 谱. 半导体学报, 2001, 22(8) : 1015]
- [8] Lu Jianguo, Ye Zhizhen, Zhang Yinzh, et al. ZnO films synthesized by solid-source chemical vapor deposition with c-axis parallel to substrate. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2003, 24: 1
- [9] Nakahara K, Takasu H, Fons P, et al. Growth of N-doped and Ga+ N-codoped ZnO films by radical source molecular beam epitaxy. *J Cryst Growth*, 2002, 237~239: 503
- [10] Joseph M, Tabata H, Kawai T. p type electrical conduction in ZnO thin films by Ga and N codoping. *Jpn J Appl Phys*, 1999, L1205 ~ L1207: 38
- [11] Yamamoto T, Katayama Yoshida H. Solution using a codoping method to unipolarity for the fabrication of p type ZnO. *Jpn J Appl Phys*, 1999, L166~169: 38
- [12] Yuan Guodong, Ye Zhizhen, Zhu Liping, et al. p type conduction in Al-N co-doped ZnO films. *Mater Lett*, accepted
- [13] Qiu Dongjiang, Wu Huizhen, Yang Ailing, et al. Structural and optical studies of ZnO films grown at low temperature. *Chinese Journal of Materials Research*, 2000, 14(5) : 485 (in Chinese) [邱东江, 吴惠祯, 杨爱龄, 等. 低温生长的 ZnO 单晶薄膜的结构和性能. 材料研究学报, 2000, 14(5) : 485]
- [14] Minegishi K, Koiwai Y, Kikuchi Y, et al. Growth of p type zinc oxide films by chemical vapor deposition. *Jpn J Appl Phys*, 1997, L1453: 36
- [15] Kamata A, Mitsuhashi H, Fujita H. Origin of the low doping efficiency of nitrogen acceptors in ZnSe grown by metalorganic chemical vapor deposition. *Appl Phys Lett*, 1993, 63(24) : 3353
- [16] Joseph M, Tabata H, Saeki H, et al. Fabrication of the low-resistive p-type ZnO by codoping method. *Physica B*, 2001, 140~148: 302
- [17] Carballalda Galicia D M, Castanedo Perez R. High transmittance CdO thin films obtained by the sol-gel method. *Thin Solid Films*, 2000, 105~108: 371
- [18] Ryu Y R, Zhu S. Synthesis of p type ZnO films. *J Cryst Growth*, 2000, 216: 330

Preparation and Characteristics of p-Type ZnO Films Using Al and N Codoping Method by DC Reactive Magnetron Sputtering*

Yuan Guodong, Ye Zhizhen, Zeng Yujia, Lu Jianguo, Qian Qing, Huang Jingyun,
Zhao Binghui and Zhu Liping

(State Key Laboratory of Silicon Materials, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The p-type ZnO films with *c*-axis orientation are fabricated using Al and N codoping method by DC reactive magnetron sputtering. ZnO films are prepared on α -Al₂O₃(0001) substrate with different temperature. N acceptor comes from NH₃ and O₂ atmosphere, and Al donor dopant from Zn_xAl_{1-x} ($x = 0.9$) targets. The properties are examined by X-ray diffraction(XRD), atomic force microscopy(AFM), second ion mass spectroscopy(SIMS), Hall measurement, and transmission spectra. The results show that the Al and N codoping ZnO films can be realized at 450 °C, 600 °C with a p-type conduction, such as resistivity of $10^2 \sim 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$, carrier density of $10^{15} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ Hall mobility of 0.5~1.32 cm²/ (V·s). The presence of donor(Al) enhances N incorporation. The p-ZnO films have a transmittance about 90% in visible region and a band gap of 3.28 eV at room temperature. The p-ZnO film obtained at 450 °C possesses a smaller size of grain and smoother surface.

Key words: Al and N codoping method; p-ZnO; DC reactive magnetron sputtering

PACC: 6855

Article ID: 0253-4177(2004)06-0668-06

* Project supported by Special Funds for Major State Basic Research Project (No. G2000068306) and National Natural Science Foundation of China (No. 90201038)

Yuan Guodong male, was born in 1977, PhD candidate. He is engaged in the research on ZnO-based semiconductor optical materials and devices.

Ye Zhizhen male, was born in 1955, professor. He is engaged in the research on semiconductor materials and devices.

Received 21 May 2003, revised manuscript received 5 October 2003

©2004 The Chinese Institute of Electronics