

# Al-N 共掺 p 型 Zn<sub>0.95</sub>Mg<sub>0.05</sub>O 薄膜的性能\*

简中祥 叶志镇<sup>†</sup> 高国华 卢洋藩 赵炳辉 曾显嘉 朱丽萍

(浙江大学硅材料国家重点实验室, 杭州 310027)

**摘要:** 利用直流反应磁控溅射法,以 N<sub>2</sub>O 为 N 掺杂源,用 Al-N 共掺技术制备了 p 型 Zn<sub>0.95</sub>Mg<sub>0.05</sub>O 薄膜.用 X 射线衍射分析(XRD)、Hall 测试仪和紫外可见(UV)透射谱等研究方法对其晶体结构、电学性能和禁带宽度进行分析.XRD 分析结果表明,Zn<sub>0.95</sub>Mg<sub>0.05</sub>O 薄膜具有良好的晶格取向,Hall 测试的结果所得 p 型 Zn<sub>0.95</sub>Mg<sub>0.05</sub>O 薄膜最低电阻率为 58.5Ω·cm,载流子浓度为 1.95×10<sup>17</sup>cm<sup>-3</sup>,迁移率为 0.546cm<sup>2</sup>/(V·s),UV 透射谱所推出的薄膜禁带宽度中,纯 ZnO,p 型 Zn<sub>0.95</sub>Mg<sub>0.05</sub>O 和 p 型 Zn<sub>0.9</sub>Mg<sub>0.1</sub>O 分别为 3.34,3.39 和 3.46eV,可以看出 Mg 在 ZnO 禁带宽度中起了调节作用.

**关键词:** ZnMgO; p 型掺杂; 薄膜

**PACC:** 6855; 8115C; 7280E

**中图分类号:** TN304.054

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2007)03-0425-05

## 1 引言

ZnO 作为一种宽禁带半导体材料,最大的用途在于短波长半导体激光,可作为白光的基础材料.ZnO 有很高的激子结合能,为 60meV,远高于其他宽禁带半导体材料,如 GaN 为 25meV,也高于室温的热能 26meV,因而 ZnO 激子在室温下是稳定的<sup>[1]</sup>,可以实现室温或更高温度下的激子受激紫外辐射发光.然而在 ZnO 制备过程中,由于非化学计量比引入的本征施主缺陷(氧空位及锌填隙等)造成 p 型 ZnO 材料生长困难,得到的 p 型 ZnO 稳定性不理想,这制约了该材料的光电应用.近年来,许多文献报道了利用不同掺杂技术可以实现 p 型掺杂,且具有一定的稳定性<sup>[2~6]</sup>.

除了 p 型掺杂,ZnO 应用中的另一个关键问题是能带调节,用 Mg 可以实现 ZnO 禁带宽度在 3.3~4.0eV 范围内的调节.Zn<sup>2+</sup> 的离子半径是 0.057nm,Mg<sup>2+</sup> 的离子半径是 0.06nm,所以 Mg 原子对 Zn 原子的替代并不会引起晶格常数的很大变化.当 Mg 含量不太大(<10%)时,Mg 的掺入不会改变 ZnO 的晶体结构.由于 Zn<sub>1-x</sub>Mg<sub>x</sub>O 合金的禁带宽度比 ZnO 的大,可以用于紫外波段的光电器件中,提高器件的发光效率,如果能获得 p 型的 Zn<sub>1-x</sub>Mg<sub>x</sub>O,就能制得 ZnO 基异质结光电器件和 ZnO 基多层量子阱.目前,关于 Zn<sub>1-x</sub>Mg<sub>x</sub>O 合金薄膜 p 型掺杂的研究还比较少,p 型 Zn<sub>1-x</sub>Mg<sub>x</sub>O 合金

薄膜的成功实现都是以 V 族元素(P,N)作为受主掺杂剂.Heo 等人<sup>[7]</sup>用 PLD 方法在 500°C 下生长得到 p 型 ZnMgO:P 薄膜.随后,他们在 ZnO 单晶衬底上制备了 Zn<sub>0.9</sub>Mg<sub>0.1</sub>O: P/n-ZnO p-n 结<sup>[8]</sup>.Zhang 等人<sup>[9]</sup>用超声喷射热解法(USP)在单晶 Si 衬底上制备了 Al-N 共掺 p 型 Zn<sub>1-x</sub>Mg<sub>x</sub>O 薄膜,然而导电 Si 衬底对薄膜电学性能测试的影响有待进一步的研究.

根据 Yamamoto 的共掺理论<sup>[10]</sup>,施主和受主元素共掺的方法可以大幅提高受主元素在 ZnO (ZnMgO)中的掺杂浓度,采用共掺方法,可以得到高空穴浓度的 p 型 ZnO 材料.所以本文利用本课题组 Al-N 共掺技术的基础<sup>[11,12]</sup>和 ZnO 能带结构调节理论,提出利用 Al-N 共掺方法制备 p 型 ZnMgO 薄膜,并且通过调节合金中的 Mg 含量来控制禁带宽度,从而为 ZnO 的能带工程及其基础上的 ZnO 基紫外光电器件、异质结等的研究奠定了基础.

## 2 实验

利用直流反应磁控溅射法在玻璃衬底上生长 p 型 Zn<sub>0.95</sub>Mg<sub>0.05</sub>O 薄膜(为了讨论方便,本文表示的薄膜的 Mg 含量均为合金靶的 Mg 含量,并非薄膜中 Mg 的真实含量),玻璃衬底在纯酒精中用超声波清洗 20min.溅射靶材为 Mg<sub>0.05</sub>Al<sub>0.01</sub>Zn<sub>0.94</sub>三元合金,用具有 99.99%纯度的金属 Zn,Mg 和 Al,通过一定比例在真空炉中熔炼而成.实验过程中,生长室

\* 国家自然科学基金重点基金(批准号:50532060)和国家重点基础研究发展规划(批准号:2006CB604906)资助项目

<sup>†</sup> 通信作者.Email:yez@zju.edu.cn

2006-09-11 收到,2006-09-30 定稿

的真空抽到  $10^{-3}$  Pa,接着按 1 : 1 : 1 的比例通入 Ar (99.99%),  $O_2$  (99.99%) and  $N_2O$  (99.99%), 使生长室气氛的压强保持在 7Pa. 溅射功率为 80 W (200V $\times$ 0.4A), 溅射时间 30min.

利用 Philip X'Pert 型 X 射线衍射仪对样品的晶体结构和结晶质量进行测试,所用 X 射线源为  $CuK\alpha$  射线,波长 0.15406nm;利用 HL 5500 型霍尔测试仪对样品作电学性能测试;利用 Cary 100 型分光光度计对样品作光学性能测试.

### 3 结果与分析

#### 3.1 结晶性能

图 1 为不同衬底温度下生长的 ZnMgO 薄膜的 XRD 谱,所有图谱均只有 (002) 衍射峰出现,表明所生长的薄膜均具有良好的 *c* 轴择优取向.此外, XRD 谱中没有观察到其他相的衍射峰,说明 Zn-MgO 薄膜中不存在相的分凝或析出现象.从图中还可以看出,随着衬底温度的升高,半高宽逐渐变窄,且峰的强度越来越大,说明衬底温度的升高改善了薄膜的结晶性能.这是因为衬底温度高,溅射到表面的原子可以获得较大的能量,因而原子在薄膜中有足够的能量进行结构调整,从而可以得到结晶性能良好的薄膜.薄膜的结晶性能将直接影响薄膜的导电性能及光学性能.

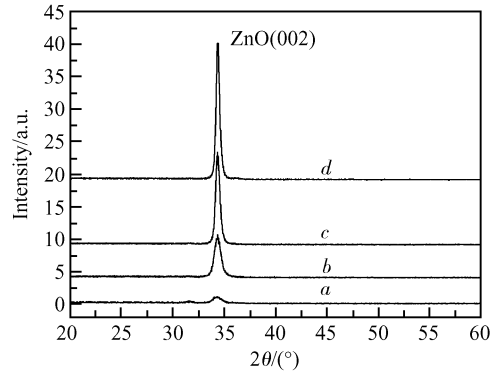


图 1 不同衬底温度下制备的 Al-N 共掺  $Zn_{0.95}Mg_{0.05}O$  薄膜的 XRD 图谱 a:400°C; b:480°C; c:530°C; d:600°C

Fig.1 XRD spectra of Al-N codoped  $Zn_{0.95}Mg_{0.05}O$  thin films at different temperatures a: 400°C; b: 480°C; c: 530°C; d: 600°C

#### 3.2 电学性能

表 1 给出了不同衬底温度下生长的薄膜电学性能的测试结果.从表中可以看出,生长温度在 400~530°C 时得到的是 p 型  $Zn_{0.95}Mg_{0.05}O$  薄膜;在 530°C 时,所得 p 型  $Zn_{0.95}Mg_{0.05}O$  薄膜的电学性能最好,载流子浓度为  $1.95 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,电阻率为  $58.5 \Omega \cdot \text{cm}$ ,迁移率为  $0.546 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ .我们使用玻璃衬底保证测得的是薄膜自身的电学性能.

表 1 不同生长温度下制备的  $Zn_{0.95}Mg_{0.05}O$  薄膜的电学性能

Table 1 Electrical properties of  $Zn_{0.95}Mg_{0.05}O$  thin films deposited at different substrate temperatures

Sample	Growth temperature /°C	Resistivity /( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	Mobility /( $\text{cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ )	Carrier concentration / $\text{cm}^{-3}$	Conduction type
1#	350	10.5	0.16	$3.71 \times 10^{18}$	n
2#	400	4850	0.41	$3.14 \times 10^{15}$	p
3#	450	1410	0.43	$1.02 \times 10^{16}$	p
4#	480	1070	0.489	$1.19 \times 10^{16}$	p
5#	500	114	0.659	$8.31 \times 10^{16}$	p
6#	530	58.5	0.546	$1.95 \times 10^{17}$	p
7#	550	55.8	0.264	$4.24 \times 10^{17}$	p/n
8#	600	15.7	0.329	$1.21 \times 10^{18}$	n

从表 1 中可以看出,当温度低于 400°C 或者高于 530°C 时,制备的 ZnO 薄膜呈现 n 型, p 型  $Zn_{0.95}Mg_{0.05}O$  薄膜的获得只能在 400~530°C 温度区间内实现.在 550°C 时 p 型和 n 型交替出现, p 型性能不稳定,这是由于电子和空穴在薄膜中相互补偿的结果.可见,衬底温度对薄膜的电学性能有很大影响,原因解释如下: Al-N 共掺使 Al 和 N 在 Zn-MgO 薄膜中以 Al-2N 复合体的形式<sup>[5]</sup>存在,得到 p 型薄膜,当生长温度较低时,一方面,溅射到衬底表面的原子不能获得足够的能量进行结构调整,以减

小 ZnMgO 薄膜中的本征施主缺陷;另一方面, Al 原子也没有足够的动能,不能顺利进入晶格位置,使 Al 的掺入受到影响,而 Al-N 共掺的原理就是要利用 Al 的掺入降低 Madelung 能量,若 Al 的掺入量太小, N 的掺入量也会随之减小,当 N 的掺入量小到不足以抵消薄膜中的施主时,薄膜的 p 型转变就不会发生.当生长温度太高时,一方面,本征施主缺陷会随温度的升高而增加;另一方面,由于温度的升高, Al-2N 复合体受到破坏, N 在 ZnMgO 薄膜中不能稳定地存在, N 的浓度便会降低,受主浓度的降

低,也使薄膜不能实现p型转变.因此,在设定的气氛参数下,即Ar:O<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>O=1:1:1时,400~530°C是实现ZnMgO薄膜p型转变比较理想的温度区间.此外,从表1中还可以看出,当薄膜为p型时,电阻率随温度的升高而降低,载流子浓度随温度的升高而增加,这可能是由于随着温度的升高晶体的结晶性能变好.

为了说明薄膜电学性能的稳定性,我们每隔一段时间对样品进行测试.表2是2个月后,薄膜电学性能测试结果,这里仅对p型薄膜进行测试.与表1作比较发现,薄膜在放置两个月后,其电阻率和载流子浓度有所变化,这可能与放置在空气中,薄膜表面气体分子吸附有关,但是所有薄膜均保持p型,表明所生长的Zn<sub>1-x</sub>Mg<sub>x</sub>O薄膜具有稳定的p型性能.

表2 放置两个月后p型Zn<sub>0.95</sub>Mg<sub>0.05</sub>O薄膜电学性能测量结果  
Table 2 Electrical properties of p-type Zn<sub>0.95</sub>Mg<sub>0.05</sub>O thin films for two month after deposited

Sample	Resistivity /(Ω·cm)	Mobility /(cm <sup>2</sup> / V·s)	Carrier concentration /cm <sup>-3</sup>	Conduction type
2#	1960	3.07	1.04×10 <sup>15</sup>	p
3#	395	0.38	4.16×10 <sup>16</sup>	p
4#	2190	0.546	5.21×10 <sup>15</sup>	p
5#	154	0.690	5.86×10 <sup>16</sup>	p
6#	65.5	0.122	7.83×10 <sup>17</sup>	p

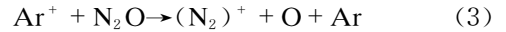
Zn<sub>0.95</sub>Mg<sub>0.05</sub>O薄膜p型掺杂的实现说明N掺入到了薄膜中,并以受主的形式存在,这证明N<sub>2</sub>O是ZnMgO薄膜p型掺杂的有效掺杂源.在选择掺杂剂的过程中考虑到由于ZnO薄膜中包含O原子,同时,O的空位作为施主杂质,通常存在于薄膜中,充当施主杂质,因此我们选择富氧的气氛以消除O空位.而富氧气氛的形成可以通过在溅射气氛中通入适量的氧气和选用氮的氧化物气体实现.同时N在ZnO薄膜中是一种有效的受主杂质,用来实现p型转变.可见,O和N两种原子对于消除O空位和实现浅受主能级都是非常好的选择,所以我们选择了N和O的化合物.根据Yan等人<sup>[13,14]</sup>的计算,与N<sub>2</sub>O相比,NO和NO<sub>2</sub>更适合于在ZnO中作为N的受主气体源,然而经实验发现N<sub>2</sub>O和NO比NO<sub>2</sub>更适合作为ZnO的p型掺杂源,而N<sub>2</sub>O在Ar<sup>+</sup>等离子体状态激发下,掺入薄膜中的N浓度比NO的高<sup>[15]</sup>,所以选用N<sub>2</sub>O作为掺杂源,且N<sub>2</sub>O能分解为NO.以下讨论N<sub>2</sub>O在溅射过程中的分解反应机理.

N<sub>2</sub>O为直线构型,一个N以sp<sup>2</sup>杂化成键,其中N原子与两边的一个N原子,一个O原子分别形成一个N—N单键(π键,键能为167kJ/mol<sup>1</sup>)和一个N=O双键(1个σ键+1个π键,键能为607kJ

·mol<sup>-1</sup>).可见,N<sub>2</sub>O分解有两种可能性:



同时,溅射的过程中,由于电子和Ar<sup>+</sup>的撞击,可能发生如下反应<sup>[15]</sup>:



其中反应式(1)所需要的裂解能为1.65eV,产生的O可以填补O空位,反应式(2)所需要的裂解能为4.93eV,而反应式(4)是N原子的主要来源,产生的N用于取代O的位置.这都抑制了施主的产生,同时促进受主的生成,有利于实现ZnMgO的p型转变.结果也表明,N<sub>2</sub>O确是ZnMgO p型掺杂的有效掺杂源.共掺引入的Al可以促进反应式(2)的进行,因为Al和N有如下反应:



### 3.3 光学性能

为了研究Mg掺入对ZnO薄膜禁带宽度的影响,我们在相同条件下溅射出了ZnO和Zn<sub>0.9</sub>Mg<sub>0.1</sub>O薄膜作为比较,图2为所生长的ZnO薄膜、Zn<sub>0.9</sub>Mg<sub>0.1</sub>O薄膜以及6#和7#样品的紫外可见透射图谱.从图中可以看出,所有的薄膜在可见光区都有优良的透射特性,可见光透射率约为90%,且具有较陡的吸收边.此外,由图2还可推算出薄膜的光学禁带宽度E<sub>g</sub>,其吸收系数α满足关系式<sup>[16]</sup>:

$$\alpha = [2.303 \lg(1/T)]/d \quad (6)$$

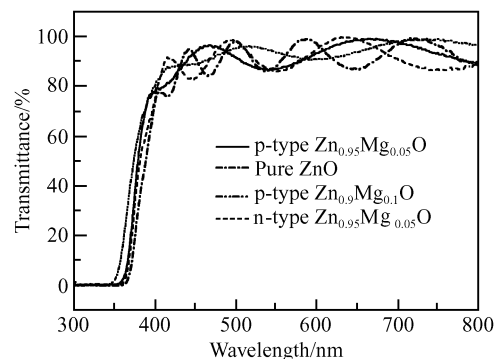


图2 n型、p型Zn<sub>0.95</sub>Mg<sub>0.05</sub>O,纯ZnO以及p型Zn<sub>0.9</sub>Mg<sub>0.1</sub>O的透射谱图

Fig. 2 Optical transmittance spectra of the n-type, p-type Zn<sub>0.95</sub>Mg<sub>0.05</sub>O, pure ZnO, and p-type Zn<sub>0.9</sub>Mg<sub>0.1</sub>O thin films

其中T是透射率;d为薄膜厚度.

因为ZnMgO为直接带隙半导体,所以ZnMgO的吸收系数α与光子的能量(hν)满足如下关系式:

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (7)$$

其中  $A$  为常数;  $h\nu$  为光子能量. 由图 2 作出  $(\alpha h\nu)^2$  与  $h\nu$  的函数曲线, 如图 3 所示. 将图中线性部分拟合, 延长至  $(\alpha h\nu)^2 = 0$ , 便可得到 ZnMgO 薄膜的光学禁带宽度.

从图 3 可以看出, n 型  $\text{Zn}_{0.95}\text{Mg}_{0.05}\text{O}$  薄膜的  $E_g$  约为 3.38eV, p 型  $\text{Zn}_{0.95}\text{Mg}_{0.05}\text{O}$  薄膜的  $E_g$  约为 3.39eV, 两者之间几乎相同. 可见, Mg 百分含量相同时, ZnMgO 薄膜无论是 p 型还是 n 型, 禁带宽度相同, 说明禁带宽度大小只取决于 Mg 的百分含量. 此外, 图中  $\text{Zn}_{0.95}\text{Mg}_{0.05}\text{O}$  薄膜禁带宽度与纯 ZnO 薄膜禁带宽度 (3.34eV) 相比发生了微小的蓝移, 根据 Lu 等人<sup>[17]</sup> 的理论, ZnO 在 Al-N 重掺的情况下, 由于杂质能带的引入出现能带红移现象, 说明 Al-N 的掺入部分抵消了 Mg 在薄膜中能带调节作用, 所以薄膜只发生微小的蓝移, 所以这个微小蓝移仍然可以说明 Mg 的掺入且对 ZnO 禁带宽度的调节起了作用. 再将 p 型  $\text{Zn}_{0.95}\text{Mg}_{0.05}\text{O}$  薄膜与 p 型  $\text{Zn}_{0.9}\text{Mg}_{0.1}\text{O}$  薄膜禁带宽度 (3.46eV) 比较, 表明随着薄膜中 Mg 含量的增加, 禁带宽度也随之增大. 此外, p 型  $\text{Zn}_{0.9}\text{Mg}_{0.1}\text{O}$  薄膜与 p 型  $\text{Zn}_{0.95}\text{Mg}_{0.05}\text{O}$  薄膜禁带宽度的差为 0.07eV, 而 p 型  $\text{Zn}_{0.95}\text{Mg}_{0.05}\text{O}$  薄膜与纯 ZnO 的禁带宽度的差为 0.05eV. 这两个差值比较, 前者比后者稍大, 是因为随着 Mg 含量的增大, Al-N 掺入的量相对减少, 其对薄膜禁带宽度的红移作用相对减弱. 然而, 这两个差值还是很接近的, 说明 Mg 掺入的量与薄膜的禁带宽度近似呈线性关系, 因此, ZnMgO 薄膜的禁带宽度可以通过 Mg 掺入量调节.

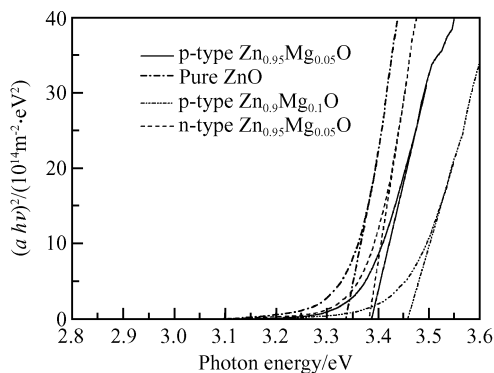


图 3 根据透射谱拟合所得的  $\alpha^2$  与  $h\nu$  的关系

Fig. 3 Curves of  $\alpha^2$  versus  $h\nu$  derived from optical transmittance spectra

## 4 结论

利用直流反应磁控溅射通过 Al-N 共掺的方法在玻璃衬底上沉积 p 型  $\text{Zn}_{0.95}\text{Mg}_{0.05}\text{O}$  薄膜, 得到的

薄膜具有良好的择优取向, 结晶性能随温度变化明显; 从薄膜电学性能的测量结果可以看出, 在 530°C 衬底温度下生长得到的 p 型  $\text{Zn}_{0.95}\text{Mg}_{0.05}\text{O}$  薄膜具有最低的电阻率为  $58.5\Omega \cdot \text{cm}$ , 载流子浓度为  $1.95 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ , 迁移率为  $0.546 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ; 所得的  $\text{Zn}_{0.95}\text{Mg}_{0.05}\text{O}$  薄膜禁带宽度比纯 ZnO 薄膜的大, 比 p 型  $\text{Zn}_{0.9}\text{Mg}_{0.1}\text{O}$  薄膜的小, 表明 Mg 在禁带宽度的调节上起了重要的作用.

## 参考文献

- [1] Look D C, Reynolds D C, Sizelove J R, et al. Electrical properties of bulk ZnO. *Solid State Commun*, 1998, 105:399
- [2] Krtschil A, Dadgar A, Oleynik N, et al. Local p-type conductivity in zinc oxide dual-doped with nitrogen and arsenic. *Appl Phys Lett*, 2005, 87(26):1
- [3] Tabata H, Saeki M, Guo S L, et al. Control of the electric and magnetic properties of ZnO films. *Physica B*, 2001, 310:993
- [4] Minegishi K, Koiwai Y, Kikuchi Y, et al. Growth of p-type zinc oxide films by chemical vapor deposition. *Jpn J Appl Phys*, 1997, 36:L1453
- [5] Yuan G D, Ye Z Z, Zhu L P, et al. Control of conduction type in Al- and N-codoped ZnO thin film. *Appl Phys Lett*, 2005, 86(20):1
- [6] Ye Zhizhen, Xu Weizhong, Zeng Yujia, et al. Fabrication of ZnO light-emitting diode by using MOCVD method. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(11):2264 (in Chinese) [叶志镇, 徐伟中, 曾昱嘉, 等. MOCVD 法制备 ZnO 同质发光二极管. *半导体学报*, 2005, 26(11):2264]
- [7] Heo Y W, Kwon Y W, Li Y, et al. p-type behavior in phosphorus-doped (Zn, Mg) O device structures. *Appl Phys Lett*, 2004, 84:3474
- [8] Ip K, Heo Y W, Norton D P, et al.  $\text{Zn}_{0.9}\text{Mg}_{0.1}\text{O}/\text{ZnO}$  p-n junctions grown by pulsed-laser deposition. *Appl Phys Lett*, 2004, 85:1169
- [9] Zhang X, Li X M, Chen T L, et al. p-type conduction in wide-gap  $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}$  films grown by ultrasonic spray pyrolysis. *Appl Phys Lett*, 2005, 87:1
- [10] Yamamoto T. Codoping for the fabrication of p-type ZnO. *Thin Solid Films*, 2002, 420:100
- [11] Yuan G, Ye Z, Qian Q, et al. p-type ZnO thin films fabricated by Al-N co-doping method at different substrate temperature. *J Cryst Growth*, 2005, 273:451
- [12] Yuan G, Ye Z, Zhu L, et al. p-type conduction in Al-N codoped ZnO films. *Mater Lett*, 2004, 58:3741
- [13] Yan Y, Zhang S B, Pantelides S T. Control of doping by impurity chemical potentials: predictions for p-type ZnO. *Phys Rev Lett*, 2001, 86:5723
- [14] Zhang S B, Wei S H, Yan Y. The thermodynamics of codoping: how does it work. *Phys B*, 2001, 302/303:135
- [15] Matsui H, Saeki H, Kawai T, et al. N doping using  $\text{N}_2\text{O}$  and NO sources: from the viewpoint of ZnO. *J Appl Phys*, 2004, 95(10):5882
- [16] Carballeda-Galicia D M, Castanedo-Perez R, Jimenez-Sandoval O, et al. High transmittance CdO thin films obtained by the sol-gel method. *Thin Solid Films*, 2000, 371:105
- [17] Lu J G, Ye Z Z, Zhuge F, et al. p-type conduction in N-Al co-doped ZnO thin films. *Appl Phys Lett*, 2004, 85:3134

## Deposition of Al-N Co-Doped p-Type $\text{Zn}_{0.95}\text{Mg}_{0.05}\text{O}$ Thin Films\*

Jian Zhongxiang, Ye Zhizhen<sup>†</sup>, Gao Guohua, Lu Yangfan, Zhao Binghui,  
Zeng Yujia and Zhu Liping

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

**Abstract:** Al-N codoped p-type  $\text{Zn}_{0.95}\text{Mg}_{0.05}\text{O}$  thin films were deposited on glass substrates by DC reactive magnetron sputtering,  $\text{N}_2\text{O}$  was used as the N doping source. The XRD patterns showed that the introduction of Mg and Al has no effect on the crystallinity of the films, the films all showed *c*-axis preferential orientation. A conversion of conduction type was confirmed by Hall effect measurement in a range of temperature from 400 to 530°C. The lowest reliable room temperature resistivity was found to be  $58.5\ \Omega \cdot \text{cm}$ , with a carrier concentration of  $1.95 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$  and a Hall mobility of  $0.546\ \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ . The p-type behavior is stable. The optical transmittance spectra reveal blue shift in optical bandgap for the p-type  $\text{Zn}_{0.95}\text{Mg}_{0.05}\text{O}$  comparing with that for pure ZnO, which confirms the effective incorporation of Mg. The band gap of alloy is controllable.

**Key words:** ZnMgO; p-type doping; thin films

**PACC:** 6855; 8115C; 7280E

**Article ID:** 0253-4177(2007)03-0425-05

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 50532060) and the Special Funds of National Key Basic Research Plan of China(No. 2006CB604906)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: yezz@zju.edu.cn

Received 11 September 2006, revised manuscript received 30 September 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics