

p 型 ZnO 薄膜的研究进展

王忆锋, 唐利斌

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 氧化锌(ZnO)具有适合基于pn结的各种光电器件,例如紫外光子探测器、发光二极管和激光二极管等应用的理想性质。虽然多年来已可获得高质量的n型ZnO,但是由于本征缺陷的自补偿效应较强等原因,稳定低阻且为p型导电的ZnO薄膜一直难于制备。通过对部分有关文献的归纳分析,主要介绍了近年来在p型掺杂方面的进展,以及不同方法制备的p型ZnO薄膜的空穴浓度、迁移率及电阻率等性能参数。

关键词: ZnO; p型掺杂; 光电器件

中图分类号: TN304.2+2 **文献标识码:** A

Research progress of p-type ZnO thin films

WANG Yi-feng, TANG Li-bin

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Zinc oxide (ZnO) has ideal qualities for various optoelectronic devices, such as UV photo-detectors, emitting diodes and laser diodes, based on p-n junctions. However, while high quality n-type ZnO has been available for many years, the fabrication of high quality reproducible and low resistivity p-type conduction for ZnO thin films is proven difficult because of the strong self-compensation effect of intrinsic defects and other reasons. By summing and analyzing of some related papers published in recent years, this review focuses on the developments in p-type doping processes, and the characteristics including hole concentration, mobility and resistivity of p-type ZnO thin films prepared by different methods are listed.

Key words: ZnO; p-type doping; optoelectronic devices

1 引言

氧化锌(ZnO)是一种具有六方纤锌矿晶体结构的宽禁带II-VI族半导体材料,与近年来广受关注的氮化镓(GaN)相比,ZnO在激子束缚能、介电常数、化学稳定性、热稳定性以及原料来源、生产成本等方面更具优势,在紫外光电和发光器件等领域应用前景可观。

pn结结构是半导体器件的核心。ZnO基pn结的制备同时需要p型ZnO和n型ZnO(以下简记为p-ZnO, n-ZnO)薄膜材料。高质量的n-ZnO已易于生长,但相应的p-ZnO薄膜则较难制备,使得ZnO基光电器件的研发应用受到制约,也使p-ZnO成为研究热点。本文主要介绍了2000年以来部分英语期刊文献中报道的p-ZnO研究进展。

2 p-ZnO研究的主要问题和方法

ZnO有体材料和薄膜材料之分。光电器件主要

应用薄膜材料。ZnO薄膜的制备方法有多种,包括磁控溅射法、分子束外延(MBE)、金属有机物化学气相沉积(MOCVD)、化学气相沉积法(CVD)、脉冲激光沉积法(PLD)、离子注入法、原子层外延法(ALE)、溶胶凝胶法、超声雾化热解法等,其中磁控溅射是使用较多的一种方法。

纯净半导体具有等量的电子和空穴,掺入杂质可以使其变成以电子为多数载流子的n型半导体,或变成以空穴为多数载流子的p型半导体。提供电子的杂质称为施主杂质。接受电子的杂质称为受主杂质,受主杂质相当于提供了一个空穴。ZnO由于

作者简介: 王忆锋(1963-),男,工学士,高级工程师,2000年8月~2001年6月在美国内布拉斯加大学林肯分校计算机系做国家公派访问学者。目前主要从事器件仿真研究。E-mail: wangyifeng63@sina.com

收稿日期: 2009-01-05; **修订日期:** 2009-03-13

其化学键的离子性较强,在实际情况下只能产生一种极性。纯净 ZnO 单晶的电阻率高达 $10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$,如经 600 ~ 1200 °C 的 Zn 蒸气热处理,其电阻率会急剧下降,并呈 n 型导电。目前已容易制备品质较好、电子浓度可控的 n - ZnO 薄膜。从理论上说,在 n - ZnO 通过受主掺杂中引入空穴,并使空穴浓度高于电子浓度,即可以获得 p - ZnO,实现从 n 型导电到 p 型导电转变。但实际上,由于 ZnO 中存在较多本征施主缺陷,对受主掺杂元素产生高度自补偿作用,并且受主杂质固溶度很低,导致实现 p 型转变的难度较大。p - ZnO 的研究主要围绕抑制自补偿、寻求合适的受主掺杂元素、提高受主掺杂元素固溶度这三个方面展开。

利用运动电荷在电磁场中受力产生的霍尔效应,可以判断 ZnO 掺杂后是否发生了导电类型转变,并计算多数载流子的浓度和迁移率。此外,光致发光(PL)谱、电致发光(EL)谱、阴极发光(CL)谱、拉曼谱、紫外-可见吸收光谱、二次离子质谱(SIMS)、X 射线衍射(XRD)、X 射线光电子能谱(XPS)、透射电子显微镜(TEM)、高分辨透射电子显微术(HRTEM)、原子力显微镜(AFM)等也常用于对 ZnO 薄膜的表征和分析。

3 p - ZnO 的掺杂方法

不同的掺杂组分和制备工艺决定了 ZnO 薄膜

的性质。只掺杂一种元素的方法称为单掺杂;同时掺杂两种元素的方法称为共掺杂(codoping)。最有效的受主掺杂物是 V 族元素,如氮(N)、磷(P)、砷(As)、锑(Sb)等。此外,文献中报道的掺杂元素还有锂(Li)、铜(Cu)、钠(Na)、碳(C)、银(Ag)等。N 在 ZnO 中具有最浅的受主能级,是被研究得最多的 p 型单掺杂元素,但也有其不足,比如,N 的活性较差,与 Zn 难于成键;固溶度低、离化能高、局域键结构不稳定等。N 元素杂质源主要包括 N_2O 、 NH_3 等气体。

共掺杂是将 N, P, As 等活性受主与铝(Al)、镓(Ga)、铟(In)、锂(Li)、锰(Mn)、锆(Zr)等活性施主同时掺杂,利用它们之间的强键合来提高 V 族元素的掺杂浓度、增强 V 族元素的局域稳定性和进一步降低受主离化能,增加 N, P, As 等原子的掺杂浓度。文献中报道的共掺杂有 p - ZnO: (N, Al), p - ZnO: (N, In), p - ZnO: (As, Al), p - ZnO: (N, Ga), p - ZnO: (Cu, Ga), p - ZnO: (N, Li), p - ZnO: (N, Mn), p - ZnO: (N, Zr) 等。目前, V 族元素与其他元素的共掺杂已成为获得 p - ZnO 的主要途径之一。

4 p - ZnO 可量化的性能参数

p - ZnO 研究中可量化的性能参数主要有三个,即空穴浓度、空穴迁移率以及(线)电阻率。文献中给出的部分数据如表 1 所示。ZnO 基 pn 结器件的

表 1 文献中所列部分 p - ZnO 薄膜的空穴浓度、空穴迁移率以及(线)电阻率

序号	掺杂元素/衬底	空穴浓度/ cm^{-3}	空穴迁移率/ $(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	电阻率/ $(\Omega \cdot \text{cm})$	出处
1	N	1.06×10^{16}	15.8	40.18	文献[1]
2	N/蓝宝石	1.6×10^{18}	3.67(离子注入)	4.80	文献[2]
3	N/玻璃	6.7×10^{14}		(溅射)	文献[3]
4	N	$1.89 \times 10^{15} \sim 2.11 \times 10^{19}$		(溅射)	文献[4]
5	N	(溅射)	(N^+ 离子注入+真空退火)	0.105 ~ 0.98	文献[5]
6	N	2.7×10^{16}		(CVD)	文献[6]
7	N	2.2×10^{16}	(CVD)	(NH_3 等离子体处理)	文献[7]
8	N	$< 1 \times 10^{13}$	6(ALE)		文献[8]
9	N	$\sim 1 \times 10^{15}$	0.2 ~ 0.4(ALE)		文献[8]
10	P	4.71×10^{18}	(溅射)	(纳米棒)	文献[9]
11	P/n - Si	$2.7 \times 10^{16} \sim 2.2 \times 10^{17}$	4 ~ 13(溅射)	10.4 ~ 19.3	文献[10]
12	Sb/蓝宝石	1.27×10^{17}	(MOCVD)		文献[11]
13	Sb/蓝宝石	1.9×10^{17}	7.7(外延)	4.2	文献[12]
14	Li/石英	8.934×10^{15}	1.03(Zn - Li 薄膜热处理)	678.34	文献[13]
15	Ag/蓝宝石	$4.9 \times 10^{16} \sim 6.0 \times 10^{17}$	(PLD)		文献[14]
16	(N, Al)/玻璃	1.1×10^{17}		(溅射)	文献[3]
17	(N, Al)	1.32×10^{18}	54.8		文献[15]
18	(N, In)	$7.30 \times 10^{16} \sim 2.30 \times 10^{18}$			文献[16]
19	(N, Li)/蓝宝石	3.07×10^{16}	1.74	(溅射)	文献[17]
20	(N, Ga)/蓝宝石	3.9×10^{17}	38	(溅射)	文献[18]
21	(N, Li)		(PLD)	~ 0.93	文献[19]
22	(N, Al)	$\sim 10^{17}$	0.43 ~ 2.06(同质缓冲层)	8.20	文献[20]
23	(N, Zr)/蓝宝石	5.5×10^{19}	4.4(PLD)	0.026	文献[21]
24	(As, Al)	2.354×10^{20}	0.13(溅射)	2.122×10^{-2}	文献[22]
25	(As, Al)/ $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$	$5.0 \times 10^{16} \sim 7.3 \times 10^{17}$	2.51 ~ 6.02(N^+ 离子注入)	10.11 ~ 15.3	文献[23]

制备要求 p-ZnO 的空穴浓度量值在 $10^{17} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 之间。从表中数据可以看出,不论是单掺杂还是共掺杂,都可能做到这一点。

5 制备工艺对 p-ZnO 的影响

衬底制备是生长 p-ZnO 薄膜的第一步。文献中提到的衬底材料有 Si、蓝宝石、石英^[13]、玻璃、GaAs、ZnO、ZnTe 等。p-ZnO 薄膜的制备对于衬底材料和生长温度有着比较严格的要求。衬底温度对于 p-ZnO:Li 薄膜 p 型导电性能的优化具有重要作用。文献[24]研究了在不同衬底上用 MBE 制备的掺杂 ZnO 薄膜的 PL 谱及结构特征。在 GaAs 衬底上制备的 p-ZnO:As 及 p-ZnO:(N,Al) 空穴浓度均在 $\sim 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的量值范围;而在 ZnTe 衬底上制备的 p-ZnO:N 薄膜的空穴浓度在 $\sim 6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的范围。文献[3]报道,p-ZnO:(N,Al) 的导电类型和载流子浓度依赖于衬底温度。在 500 °C, 其空穴浓度为 $1.1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$;当生长温度高于 550 °C 时,共掺杂已不能制备 p-ZnO 薄膜。共掺杂难于实现具有高载流子浓度和高迁移率的 p-ZnO, 其主要原因可能是共掺杂过程中产生的 AlN 沉积物的固有缺陷。

通常掺杂浓度越高,半导体的导电性越好。p-ZnO 的空穴浓度量值要求在 $10^{17} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 之间,为此需要重掺杂($\sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$)。文献[25]指出,P 掺杂在减少 ZnO 的本征缺陷、产生浅受主方面有着重要作用,增加 P 掺杂浓度可以改善晶体质量。文献[26]报道,在用 MOCVD 方法生长 p-ZnO:P 薄膜的过程中,通过调节 P 蒸发温度使得进入 ZnO 薄膜的 P 含量不同,可以控制 p 型导电。文献[27]报道,通过改变 Ga 浓度,可以优化 p-ZnO:(Cu,Ga) 薄膜的空穴浓度。文献[28]使用阴极发光(CL)谱方法研究了 p-ZnO:Sb 受主激活能量与载流子浓度之间的关系。当载流子浓度分别为 $1.3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $6.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $8.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 和 $1.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时,对应的激活能量分别为 $(212 \pm 28) \text{ meV}$, $(175 \pm 20) \text{ meV}$, $(158 \pm 22) \text{ meV}$ 和 $(135 \pm 15) \text{ meV}$ 。p-ZnO:N 薄膜中的非均匀微结构对于空穴迁移率有着重要影响。半导体材料的载流子浓度、迁移率及电阻率等参数的特点是易变,不仅会随着材料制备条件变化,也会在器件制备过程、乃至器件使用过程中发生变化,并且变化范围很大,对一种确定的半导体材料而言也无确定大小。类似于二维电子气的概念,文献[29]提出一种二维空穴气界面态模型来解释用超声雾化热解法在 Si 衬底上

制备的 ZnO:(N,In) 薄膜出现的反常高 p 型导电性。

为了满足批量生产的需求,p-ZnO 薄膜的各项性能必须是可预测并且是稳定的。文献[30]研究了 p-ZnO:N 薄膜 p 型导电的稳定性。文献[19]报道,用 PLD 方法制备的 p-ZnO:(N,Li) 薄膜,p 型导电的重复性好、稳定性高,同时具有不错的晶体质量。文献[5]报道,用射频反应磁控溅射,再经 N^+ 离子注入和真空退火制备了 p-ZnO 薄膜,经 30 天老化后在室温下测量,薄膜仍保持 p 型导电,并且导电性能并没有明显退化;线电阻率在 $0.105 \sim 0.98 \Omega \cdot \text{cm}$ 之间。

在 PLD、MOCVD 等制备方法中,压力是一个重要的工艺参数。文献[21]报道,载流子及导电类型对 N_2O 沉积压力非常敏感。仅在中等压力($5 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-4} \text{ Torr}$, $1 \text{ Torr} = 133.322 \text{ Pa}$) 下制备的薄膜上观察到 p 型导电。文献[31]报道,通过控制 MOCVD 生长过程中的氧分压,制备了本征 p-ZnO 薄膜。用 N_2 等离子体实现了 p-ZnO:N 薄膜。文献[9]报道了压力对于射频磁控溅射制备的 p-ZnO:P 的表面形貌、电学和光学性质的影响。在 $5 \sim 20 \text{ mTorr}$ 压力下生长的薄膜经过快速热退火为 n 型导电;但是在 1 mTorr 低压力下生长的薄膜则为 p 型导电。这一结果表明,射频磁控溅射中的压力对于 p-ZnO:P 的生长具有关键作用。文献[10]也指出,低压下的 O_2 气氛退火可以获得 p-ZnO:P 薄膜。文献[32]报道,在 PLD 生长过程中当氧压力在 $6 \times 10^{-5} \text{ Torr} \sim 3 \times 10^{-4} \text{ Torr}$ 之间变化时,未掺杂 ZnO 薄膜从 n 型转变为 p 型。

与其他衬底材料相比,同质外延是 ZnO 体单晶具有的独特优势。在 ZnO 衬底上用 PLD 外延生长的 p-ZnO:P 薄膜没有观察到位错^[33]。但 ZnO 体单晶制备本身也是一项具有挑战性的工作。 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Si}$ 衬底可能是在 Si 衬底上实现 p-ZnO 薄膜量产的一种简单方法^[23]。用溶胶-凝胶法和离子注入在(0001)蓝宝石衬底上制备 p-ZnO 薄膜,具有低成本的特点^[2]。文献[34]报道,用溅射和热扩散工艺在 GaAs 衬底制备 p-ZnO:As 薄膜,是一种可靠性较高的量产 p-ZnO 薄膜的有效方法。此外,引入同质缓冲层也具有实现 p-ZnO 量产的潜力^[20]。

由于 ZnO 在光学特性、机电耦合及稳定性方面的优异表现,ZnO 的一维纳米结构(例如纳米棒, nanorod)亦受关注,可望在微机电系统(MEMS)、表

面探针等微观领域获得应用。采用常规的薄膜器件制备工艺,可以获得一般需要微纳加工技术才能实现的纳米器件功能。文献[35]报道,先在Si衬底上形成具有良好方向性的ZnO纳米棒阵列,通过热退火扩散形成p-ZnO:As,制备了基于p-ZnO:As/n-Si的LED器件。文献[9]报道了压力对于p-ZnO:P表面形貌、电学和光学性质的影响。随着压力的降低,P掺杂ZnO:P薄膜的纳米棒结构变得密集和扁平。

6 结束语

生长出p-ZnO薄膜后,即可制备同质pn结^[11,18]或异质pn结^[10,19,21,33,35],由此可以衍生出各种光电器件,这是p-ZnO薄膜研究的主要目标。要实现这一点,需要进一步提高薄膜晶体质量,解决p型掺杂的稳定性和可控性问题,提高载流子的掺杂浓度和迁移率;需要深入掌握ZnO各种杂质和缺陷的自身行为及其对载流子运输机理、材料性能和器件功能的影响规律;需要突破高质量ZnO基外延薄膜制备、能带调节等关键问题。此外,可靠性、可重复性、可量产性、生产成本等都是相关研究中要考虑的因素。

参考文献:

- [1] Eun Soo Junga, Hong Seung Kima, Hyung Koun Cho, et al. The effects of thermal annealing in NH₃-ambient on the p-type ZnO films [J]. *Superlattices and Microstructures*, 2007, 42(1): 62-67.
- [2] Xue Shu Wen, Zu Xiao Tao, Shao Le Xi, et al. Preparation of p-type ZnO:(Al, N) by a combination of sol-gel and ion-implantation techniques [J]. *Chinese Physics B*, 2008, 17(6): 2240-2244.
- [3] Zhi Zhen Ye, Fei Zhu Ge, Jian Guo Lu, et al. Preparation of p-type ZnO films by Al⁺N⁻codoping method [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2004, 265(1): 127-132.
- [4] Ming Lung Tu, Yan Kuin Su, Chun Yang Ma. Nitrogen-doped p-type ZnO films prepared from nitrogen gas radio-frequency magnetron sputtering [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100(5): 3705.
- [5] S-Y Tsai, Y-M Lu, M-H Hon. Fabrication of low resistivity p-type ZnO thin films by implanting N⁺ ions [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2008, 100(4): 042037.
- [6] Zhiyan Xiao, Yichun Liu, Jiying Zhang, et al. Electrical and structural properties of p-type ZnO:N thin films prepared by plasma enhanced chemical vapour deposition [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2005, 20(8): 796-800.
- [7] P Cao, D X Zhao, J Y Zhang, et al. Optical and electrical properties of p-type ZnO fabricated by NH₃ plasma post-treated ZnO thin films [J]. *Applied Surface Science*, 2008, 254(9): 2900-2904.
- [8] L Dunlop, A Kursumovic, J L MacManus-Driscoll. Reproducible growth of p-type ZnO:N using a modified atomic layer deposition process combined with dark annealing [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(17): 2111.
- [9] Dae Kue Hwang, Min Suk Oh, Yong Seok Choi, et al. Effect of pressure on the properties of phosphorus-doped p-type ZnO thin films grown by radio frequency-magnetron sputtering [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(16): 1109.
- [10] P Wang, NuoFu Chen, Z G Yin. P-doped p-type ZnO films deposited on Si substrate by radio-frequency magnetron sputtering [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(15): 2102.
- [11] J Z Zhao, H W Liang, J C Sun, et al. Electroluminescence from n-ZnO/p-ZnO:Sb homojunction light emitting diode on sapphire substrate with metal-organic precursors doped p-type ZnO layer grown by MOCVD technology [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, 41(19): 195110.
- [12] W Guo, A Allenic, Y B Chen, et al. Microstructure and properties of epitaxial antimony-doped p-type ZnO films fabricated by pulsed laser deposition [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(24): 2108.
- [13] X H Wang, B Yao, Z Z Zhang, et al. The mechanism of formation and properties of Li-doped p-type ZnO grown by a two-step heat treatment [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2006, 21(4): 494-497.
- [14] Hong Seong Kang, Byung Du Ahn, Jong Hoon Kim, et al. Structural, electrical, and optical properties of p-type ZnO thin films with Ag dopant [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(20): 2108.
- [15] Zheng Hai Zhang, Zhi Zhen Ye, De Wei Ma, et al. Preparation and characteristic of p-type ZnO films by Al-N codoping technique [J]. *Materials Letters*, 2005, 59(22): 2732-2734.
- [16] J F Kong, H Chen, H B Ye, et al. Raman scattering spectra of coupled LO-phonon-plasmon modes in N-In codoped p-type ZnO thin films [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(4): 1907.
- [17] X H Wang, B Yao, Z P Wei, et al. Acceptor formation

- mechanisms determination from electrical and optical properties of p-type ZnO doped with lithium and nitrogen [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 39 (21): 4568 – 4571.
- [18] Manoj Kumar, Tae-Hwan Kim, Sang-Sub Kim, et al. Growth of epitaxial p-type ZnO thin films by codoping of Ga and N [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89 (11): 2103.
- [19] J G Lu, Y Z Zhang, Z Z Ye, et al. Low-resistivity, stable p-type ZnO thin films realized using a Li-N dual-acceptor doping method [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88 (22): 2114.
- [20] J G Lu, L P Zhu, Z Z Ye, et al. Improved N-Al codoped p-type ZnO thin films by introduction of a homo-buffer layer [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2005, 274 (3): 425 – 429.
- [21] H Kim, A Cepler, M S Osofsky, et al. Fabrication of Zr-N codoped p-type ZnO thin films by pulsed laser deposition [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90 (20): 3508.
- [22] Eui Jung Yun, Hyeong Sik Park, Kyu H Lee, et al. Characterization of Al-As codoped p-type ZnO films by magnetron cosputtering deposition [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103 (7): 073507 – 073507 – 4.
- [23] Chin Ching Lin, San Yuan Chen, Syh Yuh Cheng, et al. Properties of nitrogen-implanted p-type ZnO films grown on SiN/Si by radio-frequency magnetron sputtering [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84 (24): 5040.
- [24] E Przeździecka, E Kamińska, K P Korona, et al. Photoluminescence study and structural characterization of p-type ZnO doped by N and/or As acceptors [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2007, 22 (2): 10 – 14.
- [25] B J Kwon, H S Kwack, S K Lee, et al. Optical investigation of p-type ZnO epilayers doped with different phosphorus concentrations by radio-frequency magnetron sputtering [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91 (6): 1903.
- [26] X H Pan, J Jiang, Y J Zeng, et al. Electrical and optical properties of phosphorus-doped p-type ZnO films grown by metalorganic chemical vapor deposition [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103 (2): 023708 – 023708 – 4.
- [27] Sudhakar Shet, Kwang-Soon Ahn, Yanfa Yan, et al. Carrier concentration tuning of bandgap-reduced p-type ZnO films by codoping of Cu and Ga for improving photoelectrochemical response [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103 (7): 3504.
- [28] O Lopatiuk-Tirpak, W V Schoenfeld, L Chernyak, et al. Carrier concentration dependence of acceptor activation energy in p-type ZnO [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88 (20): 2110.
- [29] Jun Liang Zhao, Xiao Min Li, André Krtischil, et al. Study on anomalous high p-type conductivity in ZnO films on silicon substrate prepared by ultrasonic spray pyrolysis [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90 (6): 2118.
- [30] Z Y Xiao, Y C Liu, R Mu, et al. Stability of p-type conductivity in nitrogen-doped ZnO thin film [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92 (5): 2106.
- [31] Guotong Du, Yan Ma, Yuantao Zhang, et al. Preparation of intrinsic and N-doped p-type ZnO thin films by metalorganic vapor phase epitaxy [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87 (21): 3103.
- [32] Min Suk Oh, Sang Ho Kim, Tae Yeon Seong. Growth of nominally undoped p-type ZnO on Si by pulsed-laser deposition [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87 (12): 2103.
- [33] A Allenic, W Guo, Y B Chen, et al. Microstructure and electrical properties of p-type phosphorus-doped ZnO films [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, 41 (2): 025103.
- [34] Peng Wang, Nuofu Chen, Zhigang Yin, et al. As-doped p-type ZnO films by sputtering and thermal diffusion process [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100 (4): 3704.
- [35] Minghua Sun, Qi feng Zhang, Jin lei Wu. Electrical and electroluminescence properties of As-doped p-type ZnO nanorod arrays [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2007, 40 (12): 3798 – 3802.