

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0355-05

# 烧结温度对制备 $Zn_{0.9}Co_{0.1}O$ 材料的影响

苏雪琼 王 丽 陈江博 刘红梅 孔 乐 张新平

(北京工业大学应用数理学院, 北京 100124)

**摘要** 利用固相反应法制备  $Zn_{0.9}Co_{0.1}O$  三维体材料, 在不同的烧结温度下, 应用单因素实验法对相同的配比成分样品进行处理, 并对样品进行性能测试, 寻找出最佳反应温度, 为下一步沉积 ZnO 掺 Co 薄膜提供良好的靶材。分别对  $Zn_{0.9}Co_{0.1}O$  材料进行了 X 射线衍射(XRD)、拉曼(Raman)图谱和光致发光谱(PL)等进行了测试和分析。实验结果表明, 烧结温度制约  $Co^{2+}$  掺入 ZnO 晶格, 并取代  $Zn^{2+}$  的位置而不影响 ZnO 结构, 在 1200 °C 时制备的材料保持了纤锌矿结构, 从拉曼光谱中也看到  $Co^{2+}$  的声子结构特征明显, 并且出现 Co 离子进入 ZnO 晶格使得带隙变窄的光学现象。

**关键词** 材料; 稀磁半导体; 固相反应法; X 射线衍射; Raman 光谱; 光致发光

中图分类号 O474 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0355

## Properties of $Zn_{0.9}Co_{0.1}O$ Powders of Solid State Reaction in Various Fritting Temperatures

Su Xueqiong Wang Li Chen Jiangbo Liu Hongmei Kong Le Zhang Xinping

(College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract**  $Zn_{0.9}Co_{0.1}O$  powders are compounded by the solid state reaction and prepared for the high-quality target of depositing films.  $Zn_{0.9}Co_{0.1}O$  powders are synthesized at various fritting temperatures in order to investigate the structural and optical properties of the powders. The structural properties of a nubby powder are measured by X-ray diffraction (XRD). The optical properties of the target are tested by Raman scattering and ultraviolet photoluminescence (PL) emission measurements, respectively. The results show that the fritting temperature is an important parameter to influence the sample structure. A series of Co substitute Zn and the sample retains original structure in wurtzite lattice with a temperature of 1200 °C. At the same time the band gap of ZnO crystal lattice is narrowed from the Raman spectrum.

**Key words** materials; diluted magnetic semiconductors; solid state reaction; X-ray diffraction; Raman spectrum; photoluminescence

## 1 引 言

稀磁半导体(DMS)材料是指由磁性过渡金属或稀土金属元素(例如: Mn, Fe, Co, Ni, Cr 及 Eu 等)部分替代 II-VI 族, IV-VI 族或 III-V 族等半导体中的部分元素后所形成的一类新型半导体材料。随着对稀磁半导体的研究不断深入, 发现了许多新的物理效应, 据此希望能制作出新型的功能器件, 可应用

于不同波段的可见光发光和激光器、高密度非易失性存储器、磁感应器、半导体电路的集成电路、光隔离器件和半导体激光器集成电路以及量子计算机等领域。目前, 人们主要研究的是 II-VI 和 III-V 族化合物基的稀磁半导体, 半导体基一般有 GaAs, InAs, GaSb, GaN, GaP, ZnO, ZnS, ZnSe, ZnTe 等, 磁性元素一般为过渡金属元素 Mn, Fe, Co, Ni, V,

**基金项目:** 全国高等学校博士点基金(200800050013)和北京市教委基金(km200910005019)资助课题。

**作者简介:** 苏雪琼(1980—), 女, 硕士研究生, 主要从事脉冲激光沉积非晶氧化物半导体材料的研究。

E-mail: nysxq@emails.bjut.edu.cn

**导师简介:** 王 丽(1958—), 女, 教授, 博士, 主要从事激光超短脉冲与新型激光器件、非线性光学和脉冲激光沉积半导体材料方面的研究。E-mail: Lwang.1@bjut.edu.cn

Cr等。自从2000年Dietl等<sup>[1]</sup>利用Zener模型预言了p-型导电的Mn掺杂ZnO在室温以上显示铁磁性,掀起了ZnO稀磁半导体研究的热潮,ZnO基的稀磁半导体磁性研究获得了空前的重视。2005年,Sluiter等<sup>[2]</sup>用基于态密度泛函理论的第一性原理,计算预言了大多数过渡金属掺杂ZnO都能显示室温铁磁性,这也是ZnO基稀磁半导体在理论研究方面的一个重要里程碑。

随着ZnO稀磁半导体成为自旋电子学的研究热点,人们探索出多种制备方法,如脉冲激光沉积法(PLD)<sup>[3,4]</sup>、分子束外延生长法(MBE)<sup>[5]</sup>、溶胶-凝胶法(Sol-Gel)<sup>[6]</sup>、金属有机化学气相沉积法(MOCVD)<sup>[6]</sup>和Langmuir-Blodgett法(LB)<sup>[7]</sup>及磁控溅射法<sup>[8]</sup>等,但这些研究小组主要针对ZnO稀磁半导体薄膜的制备和薄膜特性进行检测研究。对于三维块状材料的制备及性能研究报道很少,而制备这些薄膜材料时很多是对制备出体材料进行溅射或沉积,因此,研究块状材料的结构及是否均匀掺杂,Co<sup>2+</sup>是否真正掺杂进ZnO晶体中,取代了Zn<sup>2+</sup>的位置,有没有发生团簇现象,对于今后制备高质量的二维氧化物稀磁半导体薄膜具有重要的意义。本文采用固相反应法高温烧结出Zn<sub>0.9</sub>Co<sub>0.1</sub>O的陶瓷体材料,研究了烧结温度对Zn<sub>0.9</sub>Co<sub>0.1</sub>O三维材料的晶体结构、晶格振动和光学特性的影响,通过优化制作工艺,为制备出优质的ZnO稀磁半导体薄膜提供良好的溅射蒸镀靶材。

## 2 实验原理

本实验中,Zn<sub>0.9</sub>Co<sub>0.1</sub>O是采用固相反应法制备而成的,Zn<sub>0.9</sub>Co<sub>0.1</sub>O材料选用纯度高达99.99%的ZnO和Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub>纳米粉末,按照Zn<sub>0.9</sub>Co<sub>0.1</sub>O分子式的摩尔配比计算出所需ZnO和Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的质量,使用电子天平称重后,在玛瑙研磨仪中研磨2h以上。将研磨好的粉末放入刚玉船中,在管式炉中保持恒温6h高温烧结,烧结温度为850,1000和1200℃,随炉自然冷却后,将再次捣碎研磨的粉末放入模具中,经液压压靶机压制(压力为10MPa,并保持压力3min)成形后,再经过相同的反应烧节点固化烧结保温处理6h,随炉自然冷却至室温备用。Zn<sub>0.9</sub>Co<sub>0.1</sub>O材料形状为直径30mm的圆饼形,厚度为4mm左右。

对制备好的Zn<sub>0.9</sub>Co<sub>0.1</sub>O材料进行分析,采用德国BRUKER公司的D8 ADVANCE X射线衍射仪(XRD)进行物相的定性和定量分析以及样品的结构分析。通过赛默飞世尔科技公司的NXR FT-

RAMAN拉曼光谱仪测量样品的声子振动情况,其中采用1064nm的激光作为激发光源。应用Edinburgh Instruments FLS920型全功能型稳态/瞬态荧光光谱仪,对材料的光致发光特性进行测试。以上所有测试均在室温条件下进行。

## 3 结果与讨论

### 3.1 X射线衍射测试

为了研究晶体的晶格结构、粒度大小和计算晶体的晶格常数,采用X射线衍射仪对样品进行测量。分别代表在不同的烧结温度下烧结出的Zn<sub>0.9</sub>Co<sub>0.1</sub>O材料与在800℃下相同制备工艺中烧结出纯ZnO陶瓷材料的XRD图谱,如图1所示。由图1可知,烧结过的Zn<sub>0.9</sub>Co<sub>0.1</sub>O材料的衍射峰与未掺杂ZnO材料的衍射峰相对应,不含有其他杂相的衍射峰,说明样品保持了ZnO的六角纤锌矿结构,Co的掺杂没有破坏这种C<sub>6v</sub>(P63mc)空间群结构,又没有形成其他结构的杂质如四氧化三钴、三氧化二钴或一氧化钴等,实现了Co离子很好地取代ZnO中Zn离子的磁性元素掺杂。在实验中看到原本ZnO粉末和Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉末分别是白色和黑色粉末,在混料后变为灰色粉末,但经过高温烧结后,样品颜色变为墨绿色,并且随着烧结温度的升高颜色也逐渐加深。

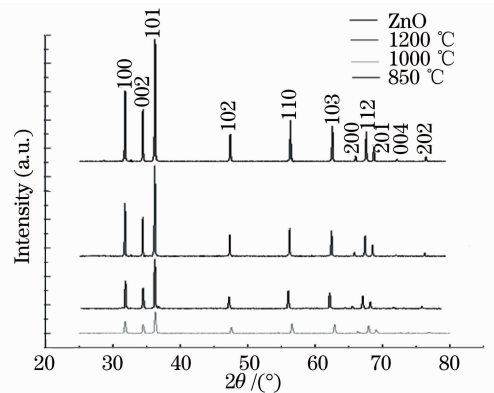


图1 不同烧结温度下Zn<sub>0.9</sub>Co<sub>0.1</sub>O材料和ZnO的XRD谱

Fig. 1 XRD spectrum of Zn<sub>0.9</sub>Co<sub>0.1</sub>O and ZnO on different temperatures

X射线衍射测量时,遵循布拉格衍射公式<sup>[9]</sup>

$$2d\sin\theta = n\lambda. \quad (1)$$

其中整数 $n$ 是衍射级数, $\lambda$ 是X射线或粒子的波长。而对于六方晶系的纤锌矿,

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{4}{3} \frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2}}. \quad (2)$$

如果衍射角度已知,可以根据布拉格公式进一步计算晶格间距  $d$

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left( \frac{h^2 + k^2 + hk}{a^2} \right). \quad (3)$$

实验中所用 X 射线波长为 1.54 nm,  $\theta$  是布拉格衍射角(入射角),探测器以  $2\theta$  角转动时,得到衍射峰相对应的一系列  $(hkl)$  衍射晶面间距  $d$ 。其中 (002) 特征峰的位置约在  $34.422^\circ$ ,当烧结温度分别为 850,1000 和 1200 °C 时,(002) 衍射峰对应的晶面间距  $d$  为 0.26026,0.26004 和 0.26032 nm。晶格常数  $a_o, c_o, c_o/a_o$  如表 1 所示,与 ZnO 标准晶格常数 ( $a_o = 0.325, c_o = 0.521, c_o/a_o = 1.60$ ) 几乎完全相符。王漪等<sup>[10]</sup> 研究认为晶面间隔并没有变化,这是由于 Co 离子的半径(0.072 nm)与 Zn 离子的半径(0.074 nm)大小相差不大,离子替代后不会引起晶格长度的明显变化。根据 Scherrer 公式<sup>[11]</sup>:  $D = \frac{0.94\lambda}{B \cos \theta_B}$ , 可以估算 ZnO 薄膜的平均晶粒尺寸  $D$ ,如表 1 所示。

表 1 不同烧结温度下的晶格常数和平均晶粒尺寸

Table 1 Lattice parameters and crystallite size of samples on different temperatures

$T / ^\circ\text{C}$	$a_o / \text{nm}$	$c_o / \text{nm}$	$c_o / a_o / \text{nm}$	$D / \text{nm}$
850	0.325259	0.520573	1.60049	299.2
1000	0.325446	0.520802	1.60027	99.2
1200	0.325206	0.520479	1.60046	862.3

通常晶粒尺寸的大小也反映了薄膜结晶质量的高低。随着烧结温度的变化,晶粒尺寸从大到小依次是 1200,850 和 1000 °C,而  $D$  值越大, $B$  值就越小,在衍射角  $\theta_B$  相同的情况下,FWHM 越小,说明样品的结晶质量越好。所以,衍射峰的半峰全宽  $B$  最小的是烧结温度为 1200 °C 的 Zn<sub>0.9</sub>Co<sub>0.1</sub>O 材料。此外,衍射峰的强度也是比较样品结晶性能优劣的一个重要数据。结晶质量越好,则衍射峰的强度就会越大,所以 1200 °C 烧结的 Zn<sub>0.9</sub>Co<sub>0.1</sub>O 材料的结晶质量最好。

### 3.2 拉曼光谱测试

拉曼(Raman)光谱测试也是一种很好的证明 Co 离子取代了 Zn 离子的测试方法。由于 ZnO 是一种纤锌矿晶体结构的半导体材料,它的结构属于 C<sub>6v</sub><sup>4</sup>(P63mc)空间群,群内所有原子占据 C<sub>3n</sub>。Zn 离子有 Td 几何学的不可约表达式:  $\Gamma_o = A_1 + E + F_2$ 。使用哈密顿量后,发现在布里渊区  $\Gamma$  点的光学声子可以用公式表示为:  $\Gamma_{\text{opt}} = 2A_1 + 2B_1 + 2E_1 +$

$2E_2^{[12]}$ 。其中极性的  $A_1$  和  $E_1$  都是可以分成横向(TO)和纵向(LO)光学声子,并且都具有红外活性和拉曼活性。没有极性的  $E_2$  模就只有拉曼活性,并且有两个高低频率模 [ $E_2(\text{low}), E_2(\text{high})$ ],所以在拉曼测试中  $E_2$  模式往往作为特征峰看待,同时  $B_1$  是没有拉曼极性的。图 2 所示为室温下测得的不同烧结温度下的 Zn<sub>0.9</sub>Co<sub>0.1</sub>O 材料的拉曼光谱图,激发光波长为 1064 nm,实际观测范围在 250 ~ 800 cm<sup>-1</sup>。图 2 中明显出现的拉曼位移有 437,483 和 523 cm<sup>-1</sup>,其中 437 cm<sup>-1</sup> 的峰值强度随着烧结温度的升高不断变强;483 和 523 cm<sup>-1</sup> 的拉曼散射强度则随着烧结温度的升高不断减弱。

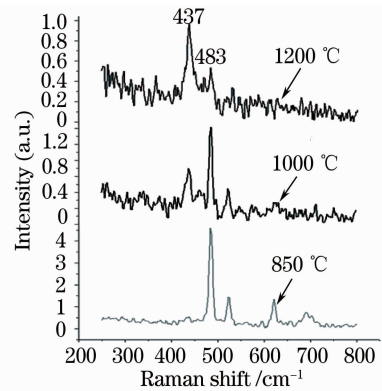


图 2 不同温度下制备的 Zn<sub>0.9</sub>Co<sub>0.1</sub>O 材料的拉曼光谱

Fig. 2 Raman spectra of Zn<sub>0.9</sub>Co<sub>0.1</sub>O on different temperatures

437 cm<sup>-1</sup> 峰位对应于 ZnO 的拉曼特征峰  $E_2$  (high),说明随着烧结温度的升高,样品的结构越来越接近纯 ZnO 的纤锌矿结构,也就是说,Co 越来越多地取代了 Zn 的位置,与氧形成了化学键,尤其是 1200 °C 下得到的样品结构最接近,与 XRD 的结果相一致。此外,  $E_2$  模式对陶瓷材料中应力有很强的灵敏性,因为原子之间距离的改变影响到力常数的数值,所以通过  $E_2$  处(437 cm<sup>-1</sup>) 峰位的变化或峰的展宽可以监测到膜中应力的微小变化。由图 2 可知,  $E_2$  模式谱峰的位置(437 cm<sup>-1</sup>) 并没有因为烧结温度不同而发生偏移或展宽,表明样品的应力完全被释放,在不同的烧结温度下制备的 Zn<sub>0.9</sub>Co<sub>0.1</sub>O 材料中应力大小没有发生变化。483 cm<sup>-1</sup> 峰位既不对应于纯 ZnO 拉曼图谱中的  $B_1(\text{low}), B_2(\text{high})$ , 也不对应于  $A_1(\text{TO}), A_1(\text{LO}), E_1(\text{TO}), E_1(\text{LO})$ , 更不是峰位在 100 cm<sup>-1</sup> 左右的  $E_2(\text{low})$ <sup>[13]</sup>, 所以,只能认为该峰值是由于磁性元素 Co 的掺杂,使晶格对称性遭到破坏,结构中出现了如超晶格、无序、

纳米、团簇、层状、多孔等现象,使得拉曼光谱上表现为原来严格遵守的动量守恒条件遭到了不同程度的破坏和松弛,让原来的禁戒模式获得了不同的激活,不仅在布里渊中心及边界处出现了拉曼激活,而且在其他位置也有相应的拉曼激活。M. Millot 等<sup>[14]</sup>曾报道,在 ZnO:Co 块状材料中少量存在 hcp-Co,观察到它的  $E_2$  声子的拉曼谱线。可见,随着烧结温度的升高,Co 离子完全取代 Zn 离子的情况越来越好,让晶格对称性恢复得更接近六方纤锌矿结构,所以该峰值强度变弱。同时通过 Raman 散射谱,对材料中晶粒和非晶成分的相对积分强度的分析估算出晶态百分比  $\chi_c$ ,估算的经验公式为: $\chi_c = I_c / (I_c + \eta I_a)$ ,式中  $I_c$  和  $I_a$  分别为晶粒和非晶成分的积分面积, $\eta = 1.0$  为散射因子。通过模拟计算得到 1200 °C 温度下烧结出的样品的晶态百分比最高,高达 86.23%;1000 °C 得到  $\chi_c = 44.71\%$ ;850 °C 时  $\chi_c = 6.15\%$ 。可知,随着制备温度的升高,材料中非晶成分的比例不断降低,烧结温度是影响陶瓷材料晶态结构的重要因素之一。

### 3.3 光致发光谱测试

光致发光谱(PL)测量也可以进一步验证 Co 离子是否真正进入到 ZnO 晶格中取代 Zn 离子的位置。因为 Co 离子的掺杂使 ZnO 的能带结构和禁带宽度发生变化,光致发光谱测量原理决定了它对这些变化的敏感性。当样品被激发时,PL 谱中的发光波长  $\lambda$ (nm)与对应的从激发态跃迁到基态的光子能量  $E$ (eV)之间的换算关系式为

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = \frac{1239.8}{\lambda} \quad (4)$$

本实验采用氙灯作为激发光源的荧光光谱仪,激发波长为 280 nm,对 850,1000 和 1200 °C 温度条件时烧结的 Zn<sub>0.9</sub>Co<sub>0.1</sub>O 陶瓷材料进行了光致发光谱测量,其测试结果如图 3 所示。烧结温度为 850,1000 和 1200 °C 的 3 个样品,分别在 468 nm 左右均有发射峰,对应的跃迁光子能量为 2.649 eV,与已知的纯 ZnO 的禁带宽度 3.37 eV 相比,发生了明显向低能级的红移。主要是由于 Co 离子替代 Zn 离子产生的局域化的 d 电子与能带电子间的 sp-d 交换作用引起的带隙变化导致的,s-d 和 p-d 交换作用使得导带边和价带边产生移动,带隙变窄<sup>[15,16]</sup>。而且样品都有一个 448~540 nm 较宽的发射带,有可能是因为这时的晶体长程有序特征还没有完全建立起来,整个材料还处于非晶状态的短程有序,使得导带底部和价带顶部分别产生由定域态组成的带尾,

它们一直延伸到禁带中<sup>[17]</sup>。并且由于 Co 元素的掺杂,也可能是能带带隙间的缺陷态引起深受主和深施主态,这些因素都使得发射带变宽。

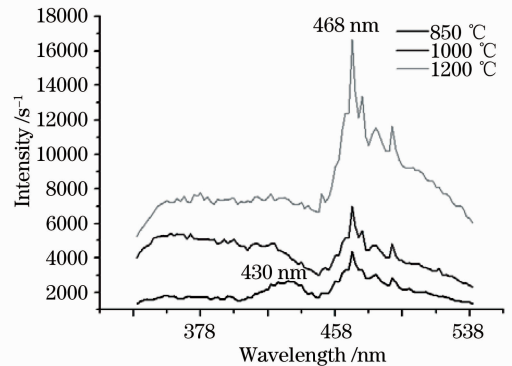


图 3 不同温度下制备的 Zn<sub>0.9</sub>Co<sub>0.1</sub>O 材料的光致发光谱

Fig. 3 Photoluminescence spectrum of Zn<sub>0.9</sub>Co<sub>0.1</sub>O prepared on different temperatures

同时,从图 3 可知,在 1200 °C 温度下烧结出的样品的发射峰强度最强,1200 °C 的样品因 Co 离子更好地与 O 离子建立化学键,较少出现断键,故有较强的发射峰,表现出较好的发光特性,与 XRD, Raman 测量的结果相吻合,说明 Co 离子较好地取代了 Zn 离子。

## 4 结 论

利用固相反应法,通过改变烧结温度制备了 Zn<sub>0.9</sub>Co<sub>0.1</sub>O 陶瓷材料,并通过对材料的晶格结构、晶格常数、声子振动和发光特性进行检测,研究了制备温度对 Zn<sub>0.9</sub>Co<sub>0.1</sub>O 材料中 Co 元素取代 Zn 元素的位置真正掺杂进入 ZnO 晶格内的影响。结果表明,随着烧结温度的升高,Zn<sub>0.9</sub>Co<sub>0.1</sub>O 材料的结构依然保持了纤锌矿结构,晶格常数与 ZnO 几乎没有大的差异。在烧结温度为 1200 °C 时,Co 离子取代 Zn 离子进入了 ZnO 晶格,具有与纯 ZnO 最相近结构,观察到 sp-d 交换作用使得能级带隙变窄。分析结果表明烧结温度的选择实现了对制备 Zn<sub>0.9</sub>Co<sub>0.1</sub>O 材料进行的最优化设计,为下一步制备 ZnO 掺 Co 薄膜提供前期工作。

### 参 考 文 献

- 1 T. Dietl, H. Ohno, F. Matsukura *et al.*. Zener model description of ferromagnetism in zinc-blende magnetic semiconductors[J]. *Science*, 2000, **287**: 1019~1022
- 2 M. H. F. Sluiter, Y. Kawazoe, P. Sharma *et al.*. First principles based design and experimental evidence for a ZnO-based ferromagnet at room temperature[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **94**(18): 187~204

- 3 H. Tabata, M. Saeki, S. L. Guo *et al.*. Control of the electric and magnetic properties of ZnO films [J]. *Physica B*, 2001, **308**~**310**: 993~998
- 4 Liu Yaodong, Zhao Lei. Preparation of ZnO thin films by pulsed laser deposition[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 534~537  
刘耀东, 赵磊. 脉冲激光沉积法制备氧化锌薄膜[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 534~537
- 5 S. Shirakata, K. Saeki, T. Terasako. Metalorganic molecular beam epitaxy of ZnO using DE Zn and  $H_2O$  precursors[J]. *J. Cryst. Growth*, 2002, **237**~**239**: 528~532
- 6 K. S. Kim, H. W. Kim, C. M. Lee. Effect of growth temperature on ZnO thin film deposited on  $SiO_2$  substrate[J]. *Mater. Sci. Eng. B-Solid*, 2003, **98**(2): 135~139
- 7 M. Seidl, M. Schurr, A. Brugger *et al.*. Zinc oxide thin films prepared by means of Langmuir-Blodgett multilayers[J]. *Appl. Phys. A. Mater*, 1999, **68**(1): 81~85
- 8 Ruijin Hong, Jianda Shao, Hongbo He *et al.*. Effects of oxygen partial pressure on optical absorption edge and UV emission energy of ZnO films [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(7): 428~431
- 9 Huang Shengtao. Elements of Modern X-ray Physics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1985  
黄胜涛. 固体 X 射线学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985
- 10 Wang Yi, Sun Lei, Han Dedong *et al.*. Room-temperature ferromagnetism in co-doped ZnO diluted magnetic semiconductor [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(12): 6651~6655  
王漪, 孙雷, 韩德栋等. ZnCoO 稀磁半导体的室温磁性[J]. *物理学报*, 2006, **55**(12): 6651~6655
- 11 B. D. Cullity. Elements of X-ray Diffractions [M]. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1978
- 12 N. Brihi, Z. Takkouk, A. Bouaine. Laser annealing effects on the structural, optical and magnetic properties of sputtered  $Zn_{0.95}Co_{0.05}O$  thin film [J]. *Mater. Sci. Eng. B-Solid*, 2007, **145**(1-3): 6~10
- 13 S. Ben Yahia, L. Znaidi, A. Kanaev *et al.*. Raman study of oriented ZnO thin films deposited by sol-gel method [J]. *Spectrochim. Acta A*, 2008, **71**(4): 1234~1238
- 14 M. Millot, J. Gonzalez, I. Molina *et al.*. Raman spectroscopy and magnetic properties of bulk ZnO:Co single crystal[J]. *J. Alloys and Compounds*, 2006, **423**(1-2): 224~227
- 15 K. J. Kim, Y. R. Park. Spectroscopic ellip sometry study of optical transitions in  $Zn_{1-x}Co_xO$  alloys [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(8): 1420~1422
- 16 Cao Ping, Li Binghui, Zhang Jiying *et al.*. Fabrication and optical properties of Co doped ZnO thin films grown by electrodeposition [J]. *Chinese J. Luminescence*, 2006, **27**(6): 949~952  
曹萍, 李炳辉, 张吉英等. 用电化学沉积方法制备钴掺杂的氧化锌薄膜及其光学性质[J]. *发光学报*, 2006, **27**(6): 949~952
- 17 Liu Enke, Zhu Bingsheng, Luo Jinsheng *et al.*. Semiconductor Physics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. 399~425  
刘恩科, 朱秉升, 罗晋生等. 半导体物理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. 399~425