

In_xGa_{1-x}As/InP 应变多量子阱 P-i-N 结构的 GSMBE 生长及 X 射线双晶衍射研究 *

王晓亮 孙殿照 孔梅影 侯 涣¹ 曾一平

(中国科学院半导体研究所 北京 100083)
(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 西安 710068)

摘要 在国产 CBE 设备上,用 GSMBE 技术在国内首次生长出了一系列高质量的阱层具有不同 In 组分的 In_xGa_{1-x}As/InP 应变多量子阱 P-i-N 结构材料,阱层中的设计 In 组分从 0.39 变化到 0.68。用 X 射线双晶衍射对该组样品进行了测试分析,并用 X 射线衍射的运动学模型对衍射图样进行了计算机模拟,确定出了该组样品阱层中的 In 组分、阱宽及垒宽。结果表明,每个样品的 DCXRD 衍射图样上均至少可以看到 14 个锐而强的卫星峰,且模拟曲线与测得的衍射曲线符合得相当好,说明材料结构完整、具有较高的质量;样品的设计参数与计算机模拟得到的参数基本一致,说明生长过程可以很好的控制。

PACC: 8115G, 6855, 7280E; EEACC: 0510D, 2520D, 2530B

1 引言

In_xGa_{1-x}As/InP 材料系统在光电子器件和微电子器件领域具有重要的应用,利用该材料系统可以制备长波长激光器^[1,2]、高电子迁移率晶体管^[3]、电光调制器及开关器件^[4~7]。因此,该材料系统受到了广泛重视。In_xGa_{1-x}As 的特点是既可以匹配地($x=0.53$)生长在 InP 衬底上^[8],也可以正($x>0.53$)负($x<0.53$)失配地生长在 InP 衬底上,这一点不同于 GeSi/Si、InGaAs/GaAs 材料系统,因此 In_xGa_{1-x}As/InP 材料系统也是一个极好的研究平面双轴应变效应的材料系统。但是,高质量的 In_xGa_{1-x}As/InP 应变量子阱超晶格材料不容易生长,这主要是由于生长 In_xGa_{1-x}As/InP 应变量子阱超晶格材料,除了要想方设法消除失配位错的产生以实现共格生长外,还要降低 V 族元素切换所带来的置换效应和记忆效应对量子阱界面的影响^[9~11]。我们在国产 CBE 设备上用 GSMBE 方法在国内首次生长出了高质量的 In_xGa_{1-x}As/InP 应变多量子阱 P-i-N 结构材料,并用 X 射线双晶衍射和计算机模拟对所生长的结构材料进行了研究。

* 国家“863”高技术计划资助项目

王晓亮 男,1963 年生,博士后,从事半导体微电子及光电子超薄异质结构材料生长、物理及器件研究

孙殿照 男,1942 年生,研究员,从事半导体超薄微结构材料及器件生长及特性研究

1996 年 5 月 31 日收到初稿,1996 年 12 月 16 日收到修改稿

2 结构和生长

设计的样品结构如图 1 所示。为了便于沿着生长方向加电场和进行光电测量, 把样品设计成 P-i-N 结构, P-i-N 结构的特点是既能通过外加偏压的改变调节 i 区电场的大小, 又能让光通过 P^+ 区域照在多量子阱区作光谱测量(能到达多量子阱区的光子的能量小于 InP 的禁带宽度); 另外, P-i-N 结构与一些光电子器件(如激光器、调制器、光电探测器等)的结构相似。因此, 生长出高质量的多量子阱 P-i-N 结构样品, 不仅对物理研究极为重要, 而且对进一步的器件结构生长也具有重要意义。

首先在 N^+ 型 InP 衬底上外延生长 200nm 的掺 Si N^+ 型缓冲层, 接着生长 200nm 厚的不掺杂的 i 型 InP 层, 再生长 20 周期的 $\text{InP}(20\text{nm})/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}(5\text{nm})$ 不掺杂 i 型多量子阱(MQW)区, 在 MQW 的上面生长 200nm 的不掺杂的 i 型 InP 层, 顶层为 500nm 厚的掺 Be P^+ InP。这样, 就形成了 P-i-N 结构, i 区为多量子阱区。在多量子阱区的两边夹上 200nm 的空间层, 旨在防止 N 型和 P 型杂质扩散到多量子阱区域中, 而且防止在多量子阱区中形成二维电子气和二维空穴气, 以减小空间电荷对外加偏压的屏蔽作用。

多量子阱区的生长采用不对称切换时序, 生长参数用我们确定出的最佳生长参数^[8]。多量子阱区的生长用计算机自动控制。为了研究应变对多量子阱 MQW 的影响, 我们生长了五个具有图 1 所示结构的样品, 这五个样品除了 MQW 区阱层的 In 组分 x 不同、因而应变不同之外, 其它参数均相同。五个样品的生长过程也完全相同。在生长时, 调节 In 束源炉和 Ga 束源炉的温度, 以调节 InAs 和 GaAs 的生长速率从而达到调节 MQW 区阱层 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的 In 组分的目的。表 1 给出了所生长的五个样品的设计参数及生长条件, 其中 $R(\text{In})$ 表示 InAs 的生长速率, $R(\text{Ga})$ 表示 GaAs 的生长速率, $T(\text{Ga})$ 和 $T(\text{In})$ 分别表示 In 束源炉和 Ga 束源炉的温度, L_w 表示 MQW 的垒宽, L_b 表示 MQW 的阱宽。

表 1 五个多量子阱 P-i-N 结构样品的设计参数及生长条件

样品号	In 组分 x	应变	L_w/nm	L_b/nm	$R(\text{In})/(\text{ML} \cdot \text{s}^{-1})^*$	$R(\text{Ga})/(\text{ML} \cdot \text{s}^{-1})$	$T(\text{In})/^\circ\text{C}$	$T(\text{Ga})/^\circ\text{C}$
A	0.39	-1.0%	5	20	0.39	0.61	876	922
B	0.47	-0.4%	5	20	0.47	0.53	886	913
C	0.53	0	5	20	0.53	0.47	891	906
D	0.60	+0.5%	5	20	0.60	0.40	901	879
E	0.68	+1.0%	5	20	0.68	0.32	908	883

* $\text{ML} \cdot \text{s}^{-1}$ 表示单分子层/秒

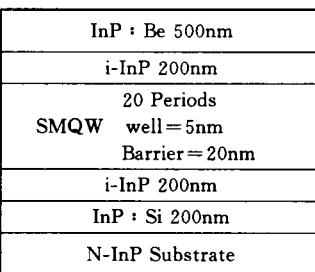


图 1 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ 应变多量子阱 P-i-N 结构示意图

3 结果和讨论

3.1 多量子阱 P-i-N 结构样品的 DCXRD 研究

为了确定样品的质量及 i 型多量子阱 MQW 区的实际结构参数以与设计参数进行比较

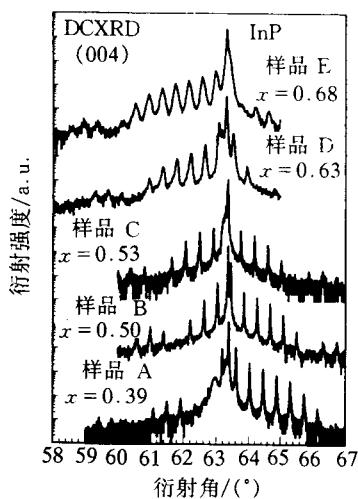


图 2 五个 P-i-N 结构样品 A、B、C、D 和 E 的 DCXRD 测量结果

并为深入分析该组样品打下基础,用日本理学(Rigaku)SLX-1AL 型超晶格测定装置对该组样品进行了 DCXRD 测试,所测得的结果示于图 2 中。由图可见,尽管 MQW 只有 20 个周期,且 MQW 上有 700nm 厚的 InP 盖层,在测试的角度范围内,每个样品均至少可以看到 14 个清晰的卫星峰,这说明了 MQW 的质量是很好的。

由图 2,我们可以看到:

(1) 对样品 C,卫星峰的位置和强度相对于 InP 衬底的(004)衍射峰基本上呈对称分布,零级卫星峰与衬底峰相重合,说明该样品上的 MQW 与 InP 衬底匹配得较好,这与设计参数 $x=0.53$ 相一致。从该样品的 DCXRD 衍射曲线上,还可以看到 ±8 级卫星峰,说明样品具有很高的质量。另外,在该样品的 DCXRD 衍射图样上,±5 级卫星峰的强度极

弱,这是由于设计阱宽和垒宽分别为 5nm 和 20nm,从而周期 25nm 与阱宽之比为 5 所致,这为设计结构参数与实际结构参数相一致提供了有力的证据。

(2) 对样品 A 和样品 B,卫星峰的强度和位置相对于 InP 衬底的(004)衍射峰的分布不对称,多数卫星峰位于衬底峰的右边(大衍射角度方向),这说明两个样品均处于平面双轴张应变状态,这与我们的设计定性地符合。从样品 B 的 DCXRD 衍射曲线上,我们可以看到 ±7 级卫星峰。从样品 A 的 DCXRD 衍射曲线上,我们可以看到 14 个卫星峰。

(3) 对样品 D 和样品 E,卫星峰相对衬底峰的分布也不对称,多数卫星峰分布在衬底峰的左侧(小衍射角度方向),这说明两个样品均处于平面双轴压应变状态,这也与我们的设计定性地符合。对样品 D,我们可以看到 14 个卫星峰;对样品 E,我们可以看到 15 个卫星峰。

(4) 样品 A、B、C 的卫星峰细而锐,样品 D、E 的卫星峰的半高宽相对于样品 A、B、C 而言则较大。样品卫星峰的半高宽反映了样品质量的好坏,样品半高宽的数值越小,说明样品的质量越好。样品卫星峰的半高宽依赖于多种因素,包括多量子阱周期性的好坏、量子阱界面的质量、阱层及垒层合金组分的均匀性以及各层的应变状态等。通常用 X 射线衍射的动力学理论来讨论多量子阱超晶格 X 射线衍射卫星峰的展宽机制^[13~15]。目前尚不能给出样品 D、E 的卫星峰较样品 A、B、C 卫星峰宽的确切原因,但从图 2 可以看出,In 组分较大的两个样品(样品 D 及 E)的卫星峰较宽,这说明卫星峰较宽与 In 组分较大有关。

(5) 在样品 A、样品 C、以及样品 D 衬底峰的左侧均看到了不属于 MQW 卫星峰的衍射峰,这些额外峰的来源尚不十分清楚,初步分析认为额外峰与具体的生长过程及两边盖层的性质有关。

根据所测得的卫星峰之间的角距离,我们可以计算出 MQW 的周期。计算结果表明,五个样品中的 MQW 均具有较好的周期性,且 MQW 的实际周期与设计周期基本相符。但单凭 DCXRD 衍射确定不出 MQW 的实际阱宽和垒宽。要确定出样品中的实际阱宽和垒宽,需要根据一定的模型对所测得的 DCXRD 摆摆曲线进行计算机模拟。

3.2 DCXRD 摆摆曲线的计算机模拟

通常用于解释和计算 X 射线揆摆曲线的理论模型主要有两种,即运动学理论^[12]和动力学理论^[13],动力学模型所依据的理论基础严谨,对实验结果的解释也更加细致入微,但其计算复杂,物理意义也不直观。运动学理论计算简单,物理图象清楚,但有一定的适用范围,运动学理论假设,随着 X 射线深入晶格内部,其入射强度并不明显减小。这就要求外延层厚度小于 X 射线的消光长度。对于超过消光长度的外延层,应用运动学理论进行模拟计算时,将具有一定的近似性。我们用运动学理论对五个多量子阱 P-i-N 结构样品的 DCXRD 揆摆曲线进行了计算机模拟。

3.2.1 运动学模型^[12,16]

对一个均匀的外延层,可以用该外延层的厚度 t 、结构因子 F 、垂直和水平方向上的应变 e^\perp 和 $e^//$ 以及吸收系数 μ 来描述。设 X 射线入射到该外延层的表面上,如果以表面的法线方向为基准,则入射 X 射线与该外延层及特定反射相关联的两个量 A 及 Y 可以表示为:

$$A = r_e (\lambda |F| t / [V (|\gamma_0 \gamma_H|)^{1/2}]) \quad (1)$$

$$Y = -\pi V \sin 2\theta_B (\Delta\omega) \gamma_0^{1/2} / [r_e \lambda^2 |F| |\gamma_H|^{1/2}] \quad (2)$$

其中 r_e 是经典电子半径; λ 是入射 X 射线的波长; V 是原胞体积; γ_0 和 γ_H 分别是入射及衍射 X 射线的方向余弦(相对于表面的内法线方向), θ_B 是衬底的 Bragg 角。角度偏离量可以表示为:

$$\Delta\omega = \theta - \theta_B + (e^\perp \cos^2 \Psi + e^// \sin^2 \Psi) \operatorname{tg} \theta_B \pm (e^\perp - e^//) \sin \Psi \operatorname{con} \Psi \quad (3)$$

其中 θ 是扫描角度,符号土与入射角度是 $\theta_B - \Psi$ 或 $\theta_B + \Psi$ 有关,其中 Ψ 是晶面与表面之间的夹角。在式(3)中,第一项代表了晶格常数的差异,第二项与晶面旋转有关。

超晶格结构通常包括两种材料,用 a 和 b 来表示,它们各自有各自不同的厚度、应变和结构因子,分别对应于 A_a, Y_a 和 A_b, Y_b 。如忽略吸收,则对于具有 M 个周期的超晶格,衍射幅度可以表示为:

$$E = i(\gamma_0 / (|\gamma_H|)^{1/2}) \exp[-i\beta] F_s \sin[M(A_a Y_a + A_b Y_b)] / \sin(A_a Y_a + A_b Y_b) \quad (4)$$

其中

$$\beta = (M - 1)(A_a Y_a + A_b Y_b) + A_a Y_a \quad (5)$$

$$F_s = [\sin(A_a Y_a)] / Y_a + \exp[-i(A_a Y_a + A_b Y_b)] [\sin(A_b Y_b)] / Y_b \quad (6)$$

量 F_s 可以看成是超晶格周期的结构因子。

3.2.2 计算机模拟结果

图 3 给出了样品 E 的 DCXRD 衍射图样的计算机模拟结果,由图可见,实验曲线和理论曲线符合得相当好。对 A、B、C、D 样品,实验曲线和模拟曲线也符合得相当好。

表 2 给出了应用上述运动学模型进行计算机模拟所得到的阱宽、垒宽及 In_xGa_{1-x}As 阵层中 In 组分 x 的值与设计值的比较。由表可见,模拟得到的值与设计值符合得很好。表中还给出了各个样品中 MQW 周期的设计值及由 DCXRD 揆摆曲线所得到的周期的平均值。

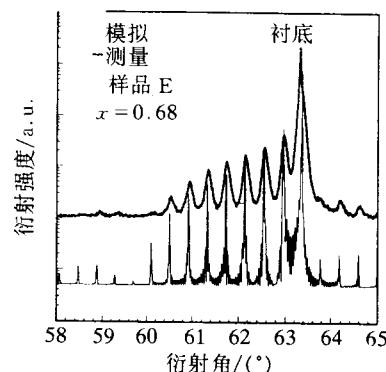


图 3 样品 E 的 DCXRD 衍射图样的计算机模拟结果

表 2 样品有关参数的设计值及模拟结果

样品号	设计 In 组分	模拟 In 组分	设计 垒宽/nm	模拟 垒宽/nm	设计 阱宽/nm	模拟 阱宽/nm	设计 周期/nm	DCXRD 测得 周期/nm
A	0.39	0.39	20	19.99	5	4.69	25	24.68
B	0.47	0.50	20	20.02	5	5.00	25	25.02
C	0.53	0.53	20	19.59	5	4.90	25	24.49
D	0.60	0.63	20	19.04	5	5.04	25	24.08
E	0.68	0.68	20	20.60	5	4.83	25	25.43

4 结论

我们在国产 CBE 设备上,通过优化生长条件和不对称切换方法,用 GSMBE 方法在国内首次生长出了高质量的阱层具有不同 In 组分的 $In_xGa_{1-x}As/InP$ 应变多量子阱 P-i-N 结构材料。用 X 射线双晶衍射对其中五个样品进行了测试分析,并用 X 射线双晶衍射的运动学模型对所测得的衍射图样进行了计算机模拟。这五个样品的设计阱宽均为 5nm,设计垒宽均为 20nm,结构及生长条件均相同,唯一的不同之处是阱层的 In 组分不同(因而应变不同),设计 In 组分从 0.39 变化到 0.68。X 射线双晶测试结果表明,每个样品的 DCXRD 衍射图样上均至少可以看到 14 个锐而强的卫星峰,说明样品结构完整,质量高。用计算机模拟确定出了阱层中的实际 In 组分、实际阱宽及垒宽。设计参数与实际参数基本一致,说明生长过程可以很好地控制。模拟曲线与衍射曲线符合得相当好,也说明了材料具有较高的质量。

致谢 感谢林兰英院士的关怀和鼓励。感谢中国科学院半导体所王玉田副研究员及庄岩同志对样品进行了 X 射线双晶衍射测试。

参 考 文 献

- [1] Ming. C. Wu, N. A. Ollson, D. Sivco *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**: 221.
- [2] H. Temkin, T. Tanbun-Ek and R. A. Logan, *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**: 1210.
- [3] R. M. Kapre, A. Madhukar and S. Goha, *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **58**: 2255.
- [4] K. W. Goossen, E. A. Caridi, T. Y. Chang *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**: 715.
- [5] D. Gershoni, R. A. Hamm, M. B. Panish *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**: 1347.
- [6] U. Koren, B. I. Miller, T. L. Koch *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**: 1132.
- [7] N. Agrawal, D. Hoffmann, D. Franke *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**: 249.
- [8] Wang Xiaoliang, Sun Dianzhao, Kong Meiyng *et al.*, *J. Cryst. Growth*, 1996, **164**: 281.
- [9] R. Averbeck *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**: 1732.
- [10] M. E. Sherwin *et al.*, *J. Electron. Mater.*, 1992, **21**: 269.
- [11] T. Anan *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(8): 1047.
- [12] V. S. Speriosu and T. Vreeland, *J. Appl. Phys.*, 1984, **58**: 1591.
- [13] C. R. Wie *et al.*, *J. Appl. Phys.*, 1986, **62**: 6094.
- [14] A. Mazuelas and A. Ruiz, *J. Cryst. Growth*, 1994, **135**: 123.
- [15] L. Tapfer and K. Ploog, *Phys. Rev. B*, 1986, **33**(8): 5565.
- [16] V. S. Speriosu, *J. Appl. Phys.*, 1981, **52**(10): 6094.

GSMBE Growth and DCXRD Study on $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ Strained-Layer MQWs in P-i-N Configuration

Wang Xiaoliang, Sun Dianzhao, Kong Meiyng, Hou Xun¹ and Zeng Yiping

(*Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083*)

(*1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068*)

Received 31 May 1996, revised manuscript received 16 December 1996

Abstract We have grown a series of high quality $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ strained-layer multi-quantum wells(MQW) in a P-i-N configuration with $x=0.39$ to $x=0.68$ using the home made GSMBE system. Double crystal X-ray diffraction(DCXRD) patterns and their computer simulation are used to determine the strctural parameters and indium composition in the well of the samples. The results show that the samples are of high quality and that the growth process can be well controlled.

PACC: 8115G, 6855, 7280E; **EEACC:** 0510D, 2520D, 2530B