

文章编号: 1000-7032(2011)06-0612-05

利用 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 与 InP 衬底之间的 应力制作结构材料的缓冲层

张铁民¹, 缪国庆^{2*}, 傅 军¹, 符运良¹, 林 红¹

(1. 海南师范大学 物理与电子工程学院, 海南 海口 571158;

2. 中国科学院 激发态物理重点实验室 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 采用低压金属有机化学气相淀积(LP-MOCVD)技术在 InP (100) 衬底上生长 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$, 研究生长温度对 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 材料表面形貌、结晶质量和电学性能的影响。利用 InP (100) 衬底与 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 材料晶格失配所产生的应变, 在不同的生长温度下应变释放程度不同, 进而在 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 表面形成不同类型的缓冲层。分析不同的缓冲层对外延层 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 的影响, 从而优化出最佳的生长温度。

关键词: $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$; 金属有机化学气相淀积; 缓冲层

中图分类号: O471.1; O472.4 PACS: 72.20.-i PACC: 7220 文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20113206.0612

1 引 言

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 是应用在光发射^[1]、场效应管^[2]、热光伏器件^[3]、探测器^[4]、光存储电荷^[5]等领域的重要材料。近年来, 高铟组分的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x > 0.53$) 探测器的需求越来越大, 主要应用在光谱成像方面, 包括地球观测、遥感、环境监测等^[6]。生长 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 材料的目的之一就是要扩展 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料的探测波长。但是在 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 与衬底 InP 间存在较大的晶格失配, 会在器件吸收层产生缺陷, 导致器件性能的下降。

缓冲层在生长晶格失配的材料系统中起着重要作用。高度晶格失配材料的生长, 如果没有合适衬底, 通常会由于应变而带来大密度的缺陷^[7], 很难制作出高质量的器件。目前, 解决外延层与衬底之间晶格失配的主要方法是在外延层与衬底之间加入缓冲层, 这样在晶格失配材料的生长中能有效地降低缺陷密度^[8-10]。鉴于缓冲层在异质外延生长过程中的重要性, 研究人员已对缓冲层的制备技术进行了大量研究, 提出很多种

方法来优化缓冲层的生长条件, 从而获得高质量外延材料。常用的缓冲层制备技术主要有组分渐变、组分跃变、超晶格和两步生长法等。

本文在 InP 衬底上生长 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 层, 通过改变生长温度形成了不同的缓冲层; 并对所制备样品的表面形貌、结晶质量、电学特性进行研究。

2 实 验

采用 LP-MOCVD 技术在半绝缘的 InP (100) 衬底上生长 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 层。采用三甲基铟 (TMIn)、三甲基镓 (TMGa)、在氢气中稀释成含量为 10% 的砷烷 (AsH_3) 分别为 In、Ga 和 As 源, 以经过纯化器处理的高纯氢气为载气。反应室为水平式, 感应耦合射频加热石墨衬托给衬底加热, 热电偶位于旋转石墨衬托下面, 反应室的压强保持在 1×10^4 Pa。为了研究结构材料的缓冲层与生长温度的关系, 在 InP (100) 衬底上直接生长厚度均为 300 nm 的 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 层, 生长温度分别为 390, 410, 430, 450, 470, 530 °C。为了分析方便, 分别标为样品 A、B、C、D、E、F。采用 X 射线

收稿日期: 2010-10-08; 修订日期: 2011-03-22

基金项目: 海南省教育厅高等学校科研项目基金(Hjkj2010-21); 国家自然科学基金重点项目(50632060); 国家自然科学基金面上项目(50972141); 海南省自然科学基金(609002); 海南师范大学学科建设基金(0020303020317, HS-2-2011-070205) 资助项目

作者简介: 张铁民(1968-), 男, 吉林省吉林市人, 博士, 主要从事半导体光电子材料与器件的研究。

E-mail: zhangtiemin@sohu.com, Tel: (0898) 65882863

*: 通讯联系人; E-mail: miaogq@ciomp.ac.cn, Tel: (0431) 86176326

衍射谱(XRD)来表征 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 层的结晶质量。用 HITACHI S4800 扫描电子显微镜(SEM)观察 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 层的表面形貌,分析缓冲层与生长温度的关系。采用范德堡方法测量 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 层的电子迁移率,表征样品的电学特性。

3 结果与讨论

外延层的表面形貌受衬底与外延层之间的晶格失配影响。表面扩散动力学在2维生长模式向3维生长模式转变过程中起重要作用,特别是较低的生长温度将减小表面扩散系数,从而推迟从2维生长模式向3维生长模式的转变^[11]。在较低的生长温度下,表面原子迁移受到严格限制,因此存在于 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 和 InP 衬底之间的应变会释放到界面内,并产生失配位错,失配位错有时也可以蔓延到外延层的表面。较高的生长温度会使

生长模式发生转变,由2维生长模式转变成3维生长模式,使表面形成3维的岛状结构。因此,要想获得理想的缓冲层材料,需要选择适当的生长温度。

图1为本实验选择的6个样品的SEM图像。样品A为390℃生长的 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 表面形貌,可以看到在这个温度下生长的样品表面平坦、光亮。这是因为在低温下生长,晶体生长保持为2维生长模式。样品B为410℃生长的 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 表面形貌,可以看到在这个温度下生长的样品表面有很浅的网纹。在此温度下生长,晶体生长还保持2维生长模式,但 InP 衬底与 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 层的晶格失配导致的应变会向生长方向延伸,导致表面出现密度较大的、但还很浅的网纹。样品C为430℃生长的 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 表面形貌,由于生长温度的提高,应变由生长方向延伸过渡到部

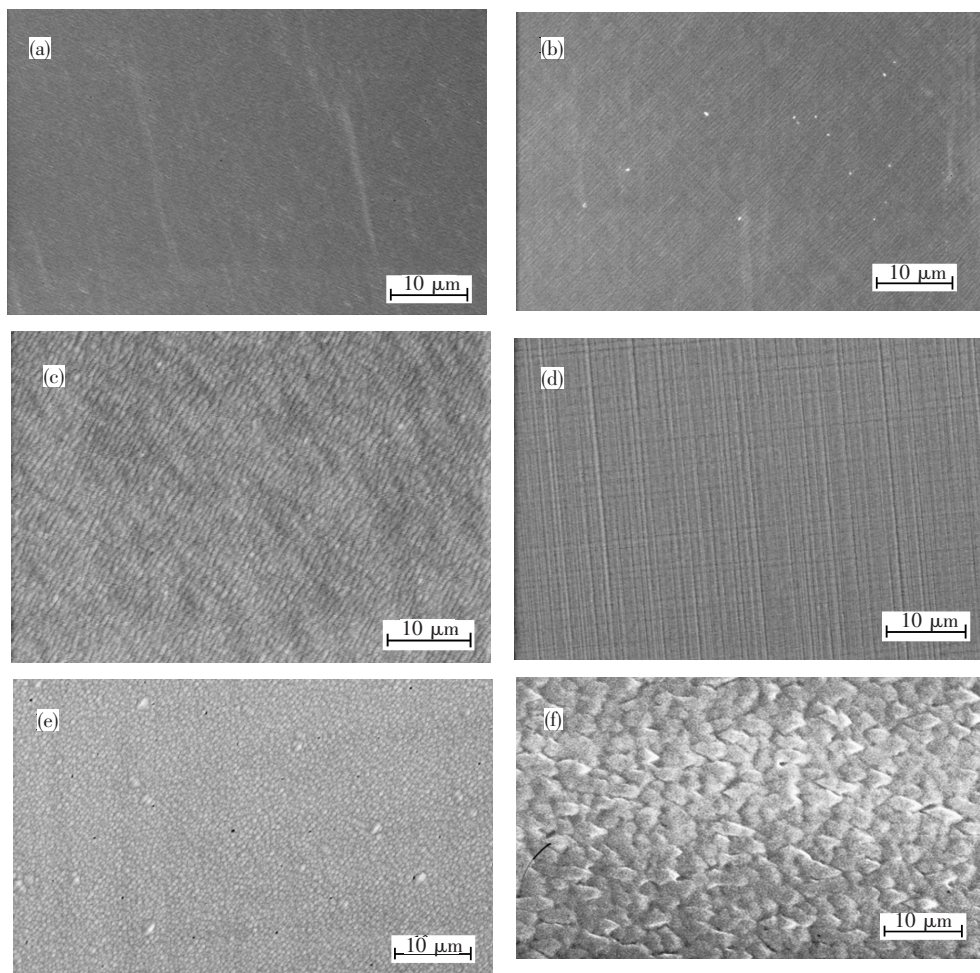


图1 不同温度下生长的 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 层的 SEM 表面形貌图像 (a) 390℃; (b) 410℃; (c) 430℃; (d) 450℃; (e) 470℃; (f) 530℃。

Fig.1 SEM surface morphology imagings of $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ layer grown with different growth temperature, (a) 390℃; (b) 410℃; (c) 430℃; (d) 450℃; (e) 470℃ and (f) 530℃, respectively.

分侧向延伸,使表面网纹密度降低,网纹的结构清晰可见。样品 D 为 450 °C 生长的 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 表面形貌,网纹结构变成交叉平行线,生长模式开始由 2 维生长模式向 3 维生长模式过渡。样品 E 为 470 °C 生长的 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 表面形貌,由于生长温度较高,衬底与外延层之间的应变释放,交叉平行线结构消失,表面出现一些 3 维岛状结构。样品 F 为 530 °C 生长的 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 表面形貌,由于生长温度大幅提高,表面分子扩散加大,一些 3 维岛状结构连在一起,使表面显得崎岖不平。

图 2 为 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}/\text{InP}$ 的 X 射线衍射测量结果。图 2 中插图为样品的生长温度与 XRD 中 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 衍射曲线的半峰全宽的关系。对于样品 A,即 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 层在 390 °C 生长, $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 层的 X 射线衍射峰的半峰全宽为 1 178",是所有样品测量结果中的最小值,这表明 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 层在这个温度下生长结晶质量最佳。这与 SEM 分析相一致,即在 InP 衬底上低温生长的 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 层表面平坦、光亮。对于样品 B,即 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 层在 410 °C 生长, $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 层的 X 射线衍射峰的半峰全宽为 1 224"。半峰全宽变大表明 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 层在这个温度下生长结晶质量变差,这也与 SEM 分析相一致。当生长温度达到 530 °C 时, $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 层的 X 射线衍射峰的半峰全宽增大到 2 665",是所有样品中的最大值,表明高温生长的 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 层结晶质量不好。从图 2 还可以看出,样品 D 的 X 射线衍射峰的半峰全宽比样品 C 的 X 射线衍射峰的半峰全宽增加了 767",这或许是由于在 450 °C 时,生长模

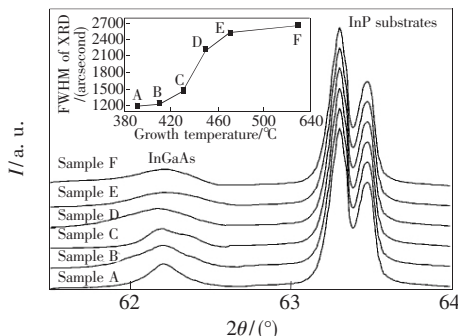


图 2 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 的 X 射线衍射谱,插图为生长温度与 X 射线衍射峰的半峰全宽的关系。

Fig. 2 X-ray diffraction patterns of $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}/\text{InP}$ layers, the inset shows the dependence of X-ray diffraction FWHM of $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ layers on the growth temperature.

式由 2 维生长模式向 3 维生长模式转变导致。由于样品 E 和样品 F 的生长温度已使样品处于 3 维生长模式,所以 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 层的 X 射线衍射峰的半峰全宽增加的并不多。

利用霍尔 (Hall) 效应,采用范德堡 (van der Pauw) 方法测量样品的电子迁移率,用以表征 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 层的电学特性。样品上的铂电极是在氮气环境下,在 380 °C 的管式炉中加热 10 min 烧结而成。在室温、磁场强度为 2 100 G 的条件下,测量样品 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 层的电学特性,结果如图 3 所示。随着生长温度从 390 °C 增加到 530 °C,样品的电子迁移率也从 1 744 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 增加到 2 900 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。从图 3 可知,从样品 A 到样品 D 的电子迁移率增加得较慢,而从样品 D 到样品 F 的电子迁移率增加幅度较大。这是因为,从样品 A 到样品 D 生长温度较低,存在于 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 和 InP 衬底之间的应变释放较少,应变失配位错大部分还存在于 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 层中,成为电子的散射中心,影响电子迁移率;而对于样品 E 和样品 F,存在于 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 和 InP 衬底之间的应变大部分已释放,并以 3 维岛状结构出现在表面,因此电子迁移率反而增大了。

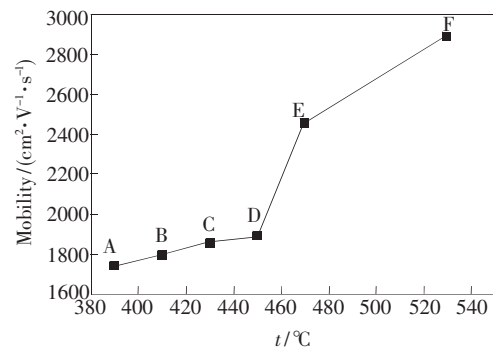


图 3 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 层电子迁移率与生长温度的关系, (A) 390 °C; (B) 410 °C; (C) 430 °C; (D) 450 °C; (E) 470 °C; (F) 530 °C。

Fig. 3 The dependences of electron mobility of $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ layers on growth temperature at (A) 390 °C; (B) 410 °C; (C) 430 °C; (D) 450 °C; (E) 470 °C and (F) 530 °C, respectively.

4 结 论

本文为两步生长法制备 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 材料的基础研究,即从缓冲层制作开始,通过研究 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 层的表面形貌、结晶质量和电学特性来

选择缓冲层的生长温度。从结果来看 450 °C 生长温度制作缓冲层对于后续生长的外延层最佳。这是因为: 低于这个生长温度制作的缓冲层,虽然表面形貌和结晶质量较好,但电学特性较差,且不

利于外延层应变释放到缓冲层中;而高于这个生长温度,制作的缓冲层虽然电学性能得以改善,但 3 维生长模式将使外延表面崎岖不平,不利于器件制作。

参 考 文 献:

- [1] Nagai H , Noguchi Y , Crack formation in InP-Ga_xIn_{1-x}As-InP double heterostructure fabrication [J]. *Appl. Phys. Lett.* , 1976 , **29**(11) : 740-741.
- [2] Bandy S , Nishimoto C , Hyder S , *et al.* Saturation velocity determination for In_{0.53}Ga_{0.47}As field-effect transistors [J]. *Appl. Phys. Lett.* , 1981 , **38**(10) : 817-819.
- [3] Murray S L , Newman F D , Murray C S , *et al.* MOCVD growth of lattice matched and mismatched InGaAs materials for thermophotovoltaic energy conversion [J]. *Semicond. Sci. Technol.* , 2003 , **18**(5) : s202-s208.
- [4] Bachmann K J , Shay J L , An InGaAs detector for the 1.0-1.7- μm wavelength range [J]. *Appl. Phys. Lett.* , 1978 , **32**(7) : 446-448.
- [5] Ducommun Y , Kroutvar M , Finley J J , *et al.* Dynamics of optically stored charges in InGaAs quantum dots [J]. *Physica E* , 2004 , **21**(2-4) : 886-891.
- [6] Hoogeveen R W M , van der A R J , Goede A P H. Extended wavelength InGaAs infrared (1.0 ~ 2.4 μm) detector arrays on SCIAMACHY for space based spectrometry of the earth atmosphere [J]. *Infrared Phys. Techn.* , 2001 , **42**(1) : 1-16.
- [7] Mathews J W , Mader S , Light T B. Accommodation of misfit across the interface between crystals of semiconducting elements or compounds [J]. *J. Appl. Phys.* , 1970 , **41**(9) : 3800-3805.
- [8] Fitzgerald E A , Watson G P , Proano R E , *et al.* Nucleation mechanisms and the elimination of misfit dislocations at mismatched interfaces by reduction in growth area [J]. *J. Appl. Phys.* , 1989 , **65**(6) : 2220-2237.
- [9] Guha S , Madhukar A , Chen Li , Defect reduction in strained In_xGa_{1-x}As via growth on GaAs(100) substrates patterned to submicron dimensions [J]. *Appl. Phys. Lett.* , 1990 , **56**(23) : 2304-2306.
- [10] Zhang Tiemin , Miao Guoqing , Song Hang , *et al.* Effect of buffer layer growth temperature on structural and electrical properties of In_{0.82}Ga_{0.18}As with two step growth technique [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报) , 2009 , **30**(6) : 787-791 (in English) .
- [11] Goldman R S , Chang J C P , Kavanagh K L , Control of surface morphology and strain relaxation of InGaAs grown on GaAs using a step-graded buffer [J]. *SPIE* , 1994 , **2140**: 179-188.

Preparation of Buffer by The Stress Between $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ Layer and InP Substrate

ZHANG Tie-min¹ , MIAO Guo-qing² , FU Jun¹ , FU Yun-liang¹ , LIN Hong¹

(1. College of Physics and Electronic Engineering , Hainan Normal University , Haikou 571158 , China;

2. Key Laboratory of Excited State Processes , Changchun Institute of Optics ,

Fine Mechanics and Physics , Chinese Academy of Sciences , Changchun 130033 , China)

Abstract: $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ layers were grown on semi-insulating Fe-doped InP (100) substrates by low pressure metalorganic chemical vapor deposition (LP-MOCVD) . The growth was performed using TMI_n , TMGa , and AsH₃ as growth precursors of In , Ga , and As , respectively , in a horizontal reactor. The substrate on a graphite susceptor was heated by inductively coupling radio frequency power , the growth temperature was detected by a thermocouple , and the reactor pressure was kept at 1×10^4 Pa. Thickness of $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ layer for all

samples was kept to be 300 nm. In our experiments, the growth temperature of $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ layers was 390, 410, 430, 450, 470, 530 °C, respectively. Because the strain caused by the lattice mismatch between $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ layer and InP substrate was varied from the growth temperature, the surface of $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ layer was different. It was analyzed that the growth temperature of $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ layer influenced on the surface morphology, crystalline quality and the electrical property of the $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ layer. The surface morphology of $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ layer was studied by the scanning electron microscopy (SEM). The components and crystalline quality of $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ layer were characterized by X-ray diffraction (XRD). The electrical property of $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ layer was measured using the Hall Effect. This work shows a useful way how to design for the optimum buffer in growing highly mismatched epitaxy layers.

Key words: $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$; MOCVD; buffer

CLC number: O472.1; O472.4 **PACS:** 72.20.-i **PACC:** 7220 **Document code:** A

DOI: 10.3788/fgxb20113206.0612