第27卷 第5期
2006年10月
发 光 学 报
CHINESE JOURNAL OF LUMINESCENCE
Vol. 27 No. 5
Oct., 2006

文章编号: 1000-7032(2006)05-0797-04

缓冲层 $In_xGa_{1-x}As$ 组分对 $In_{0.82}Ga_{0.18}As$ 结晶质量和表面形貌的影响

张铁民[1,2], 缪国庆[1*], 金亿鑫[1], 谢建春[1,2], 蒋 红[1], 李志明[1], 宋 航[1]
(1. 中国科学院 激发态物理重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 采用低压金属有机化学气相沉积(LP-MOCVD)技术,两步生长法在InP衬底上制备 $In_{0.82}Ga_{0.18}As$ 材料。研究缓冲层 $In_xGa_{1-x}As$ 的In组分对 $In_{0.82}Ga_{0.18}As$ 结晶质量和表面形貌的影响。X射线衍射(XRD)用于表征材料的组分和结晶质量。用扫描电子显微镜(SEM)观察样品的表面形貌。实验结果表明,低温生长的缓冲层 $In_xGa_{1-x}As$ 的In组分影响高温生长的外延层 $In_{0.82}Ga_{0.18}As$ 的结晶质量和表面形貌。测量得到四个样品的外延层 $In_{0.82}Ga_{0.18}As$ 的X射线衍射谱峰半峰全宽(FWHM)为0.596°,0.468°,0.362°和0.391°,分别对应缓冲层In组分 x =0.28,0.53,0.82,0.88,当缓冲层In组分是0.82时,FWHM最窄,表明样品的结晶质量最好。SEM观察四个样品的表面形貌,当缓冲层In组分是0.82时,样品的表面平整,没有出现交叉平行线或蚀坑等缺陷,表面形貌最佳。

关 键 词: 铟镓砷; 金属有机化学气相沉积; X射线衍射; 扫描电子显微镜
中图分类号: O471.4　　**PACC:** 6116D; 6855　　**文献标识码:** A

1 引 言

在InP衬底上外延生长的 $In_xGa_{1-x}As$ 是制作1~3 μm红外波段光电探测器的重要材料。通过改变In组分可以获得不同的带隙,从而使它的探测范围可调。近年来,高In组分的InGaAs红外探测器在地球观测、遥感和环境监测等方面有着很好的应用前景。MOCVD生长InGaAs材料,生长温度通常选在540~670 ℃之间[1]。而生长高In组分的InGaAs时,生长温度一般选在550 ℃以下,由于In—As的键能低于Ga—As的键能,制备高In组分的InGaAs要求较低的生长温度[2]。但低温生长的材料其电学和光学性质较差,所以选择适当的生长温度,对生长高质量的InGaAs尤为重要。$In_{0.82}Ga_{0.18}As$ 红外探测器可探测红外波长达到2.6 μm,它与InP衬底的晶格失配达到2%[3]。由于晶格失配而导致薄膜表面形貌粗糙和存在大量的缺陷,会影响所制作探测器的性能。为生长高质量的失配半导体材料,在衬底和外延层之间插入缓冲层是最有效的方法。已报道的缓冲层结构有:固定组分、组分线性变化、组分阶跃变化,或者采用超晶格等方法[4~7]。Isamu Akasaki在 Al_2O_3 上生长GaN的两个重大技术突破之一就是低温生长缓冲层技术[8]。我们采用两步生长法,利用低温生长 $In_xGa_{1-x}As$ 缓冲层,因为低温可以有效地抑制三维岛状生长,增加临界厚度[9],减小线位错密度[10],提高薄膜的结晶质量。然后高温生长外延层,因为高温生长可以使外延层获得更好的电学和光学性质,从而提高所制作探测器的性能。本文用两步生长法制备的 $In_{0.82}Ga_{0.18}As$,不仅得到表面平整的材料,还为在InP衬底上生长失配的 $In_xGa_{1-x}As$ 提供了新的途径。

2 实 验

实验设备为LP-MOCVD,水平式生长室,旋转石墨转盘,高频感应加热,衬底温度由热电偶测量,生长过程中反应室压强为10 000 Pa。实验采用掺Fe半绝缘(100)InP衬底;三甲基铟(TMIn)和三甲基镓(TMGa)作为Ⅲ族源;浓度为10%的砷烷(AsH_3)作为Ⅴ族源。我们通过固定TMGa

收稿日期: 2006-01-10; **修订日期:** 2006-04-15
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50132020); 国家自然科学基金(50372067)资助项目
作者简介: 张铁民(1968-),男,吉林人,博士研究生,主要从事半导体光电子材料与器件的研究。
E-mail: zhangtiemin@sohu.com, Tel: (0431)6176326
*: 通讯联系人; E-mail: miaogq@ciomp.ac.cn, Tel: (0431)6176326

和 AsH_3 的流量，调整 TMIn 的流量，先在低温 450 ℃生长厚度为 300 nm，组分分别为 $x=0.28$，0.53，0.82，0.88 的 $In_xGa_{1-x}As$ 缓冲层，然后升高温度至 530 ℃，生长厚度为 1 μm 的 $In_{0.82}Ga_{0.18}As$ 外延层。使用D/max-RA型 X 射线衍射仪，分析样品的组分及结晶质量。用 KYKY-1000B 扫描电子显微镜观察样品表面形貌。

3 结果与讨论

3.1 X 射线衍射结果

通过 XRD 分析样品的组分和结晶质量。测量样品的外延层衍射峰与衬底衍射峰的差，用 Bragg 公式[11]可以计算出外延层的晶格常数 a_{epi} 和 $In_xGa_{1-x}As$ 中的 x 值。图 1 为四个 InGaAs 样品的 XRD 图，衬底 InP 衍射峰和外延层 $In_{0.82}Ga_{0.18}As$ 衍射峰都非常明显。缓冲层衍射峰只有样品 A 和样品 D 能看到，P1 为样品 A 缓冲层 $In_{0.28}Ga_{0.72}As$ 的衍射峰，P2 为样品 D 缓冲层 $In_{0.88}Ga_{0.12}As$ 的衍射峰，而样品 B 缓冲层 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 的衍射峰与衬底 InP 衍射峰重叠，样品 C 缓冲层 $In_{0.82}Ga_{0.18}As$ 的衍射峰与外延层 $In_{0.82}Ga_{0.18}As$ 衍射峰重叠。

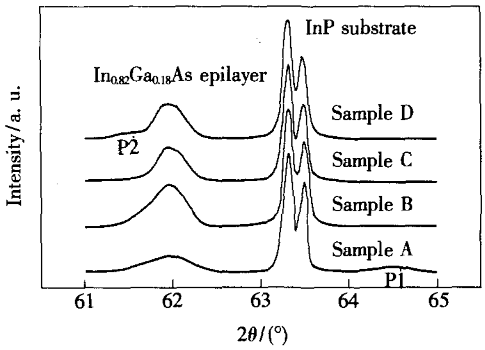

图 1 $In_{0.82}Ga_{0.18}As/In_xGa_{1-x}As/InP$ 的 XRD 谱

Fig. 1 X-ray diffraction patterns of $In_{0.82}Ga_{0.18}As/In_xGa_{1-x}As/InP$.

通过测量样品的外延层衍射峰的半峰全宽(FWHM)[2,12]，可以分析外延层结晶质量。表 1 列出四个样品缓冲层的 In 组分 x 和外延层的 In 组分 x 及对应的外延层衍射峰的 FWHM 值。可以看到，当缓冲层的组分为 $x=0.28$ 时，FWHM 值为 0.596°是四个样品中最宽的，表明此时样品结晶质量最差；当缓冲层的组分为 $x=0.53$ 时，FWHM 值为 0.468°，此时样品结晶质量得到改善；当缓冲层的组分为 $x=0.82$ 时，FWHM 值为 0.362°是四个样品中最窄的，此时样品结晶质量最好；而当缓冲层的组分为 $x=0.88$ 时，FWHM 值为 0.391°，表明样品结晶质量又下降了。我们所生长的四个样品除缓冲层组分不同外，其他生长条件都是相同的，这就排除了样品的厚度、温度和生长速率等条件对外延层的 FWHM 影响，那么 FWHM 值的变化就与缓冲层的组分有直接联系。当缓冲层组分 $x=0.82$，与外延层组分相同时，FWHM 最窄，说明选择此组分生长缓冲层可以改善外延层的结晶质量。

表 1 不同缓冲层组分与 $In_{0.82}Ga_{0.18}As$ 外延层 X 射线衍射峰的 FWHM 关系

Table 1 The relation between different composition of buffer layer and FWHM of XRD peaks of $In_{0.82}Ga_{0.18}As$ epilayer.

样品	缓冲层 In 组分 x	外延层 In 组分 x	外延层 FWHM (°)
A	0.28	0.82	0.596
B	0.53	0.82	0.468
C	0.82	0.82	0.362
D	0.88	0.82	0.391

3.2 SEM 观察样品的表面形貌

图 2 给出四个样品的 SEM 图像，我们可以观察到当缓冲层组分 $x<0.82$ 时，样品的表面出现交叉平行线或蚀坑等；当缓冲层组分 $x>0.82$ 时，样品的外延层表面形貌也比组分 $x=0.82$ 的样品稍差。当缓冲层组分为 $x=0.28$ 时，缓冲层的晶格常数小于衬底 InP 的晶格常数，它们之间是负失配，而外延层为 $In_{0.82}Ga_{0.18}As$，与衬底之间是正失配。这两种不同的失配相互作用，没有使两种不同的失配相互抵消而改善外延层质量，反而使外延层表面出现交叉平行线等缺陷。当缓冲层组分为 $x=0.53$ 时，缓冲层的晶格常数与衬底相同，它们之间是晶格匹配的，而外延层与衬底之间是正失配，外延层表面的交叉平行线消失了，但出现一些蚀坑。当缓冲层 In 组分为 $x=0.82$ 时，它与外延层的组分相一致，缓冲层与外延层的晶格是匹配的，缓冲层和外延层与衬底之间都是正失配，然而外延层表面交叉平行线和蚀坑等缺陷都消失了。当缓冲层 In 组分为 $x=0.88$ 时，缓冲层与外延层对衬底都是正失配，而缓冲层与外延层之间又是负失配，正负失配之间相互作用也没有改善

表面形貌，还略微变差了。由此，我们可以得知，当缓冲层组分为 $x<0.82$ 或 $x>0.82$ 时，通过缓冲层、衬底和外延层之间的正负失配相互作用，没能使外延层的表面形貌得到改善，而当缓冲层组分与外延层组分都是 $x=0.82$ 时，外延层表面形貌最佳。

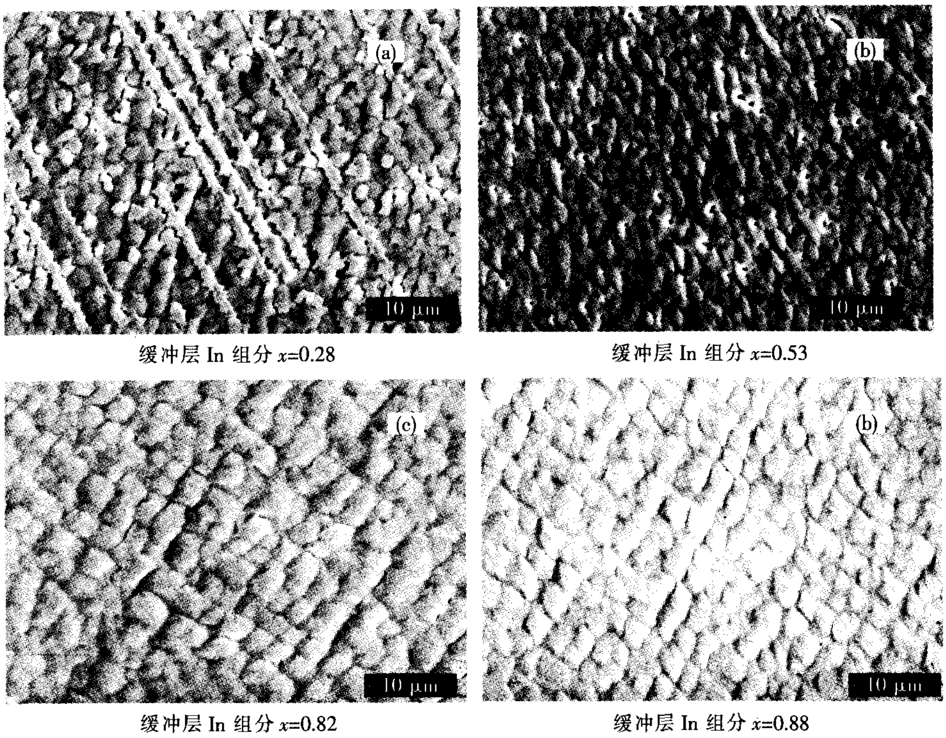

图2　$In_{0.82}Ga_{0.18}As/In_xGa_{1-x}As/InP$ 的 SEM 图像

Fig. 2　SEM images of $In_{0.82}Ga_{0.18}As/In_xGa_{1-x}As/InP$.

4　结　　论

由于 $In_{0.82}Ga_{0.18}As$ 与衬底 InP 晶格失配大，生长表面光亮、无缺陷的薄膜单晶比较困难。我们所采用的两步生长法，与采用组分线性变化或组分阶跃变化生长缓冲层的方法相比，步骤少、结构简单、更容易实现。从本实验结果来看，外延层的结晶质量和表面形貌与缓冲层组分的选择有很大的关系，当低温生长的缓冲层晶格匹配于高温生长的外延层时，外延层 $In_{0.82}Ga_{0.18}As$ 结晶质量和表面形貌是最佳。实验表明两步生长法是生长失配材料的一种有效方法。

参　考　文　献：

[1] Kunishige Oe. Low-temperature metalorganic vapor-phase epitaxial growth of InGaAs layers on InP substrates [J]. *J. Cryst. Growth*, 2000, **219**(1-2):10-16.

[2] Chang Shou-zen, Chang Tien-chin, Lee Si-chen. The growth of highly mismatched $In_xGa_{1-x}As$ ($0.28\leqslant x\leqslant 1$) on GaAs by molecular-beam epitaxy [J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **73**(10):4916-4926.

[3] Martinlli Ramon U, Zamerowski Thomas J, Longeway Paul A. 2.6 μm InGaAs photodiodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **53**(2):989-991.

[4] Chai Young G, Chow Robert. Molecular beam epitaxial growth of lattice mismatched $In_{0.77}Ga_{0.23}As$ on InP [J]. *J. Appl. Phys.*, 1982, **53**(2):1229-1232.

[5] Scott M D, Moore A H, Moseley A J, *et al.* $Ga_{0.28}In_{0.72}As/Al_{0.28}In_{0.72}As$ 2 μm photodiode heterostructures prepared by atmospheric pressure MOCVD [J]. *J. Cryst. Growth*, 1986, **77**(1-3):606-612.

[6] di Forte-Poisson M A, Brylinski C, di Persio J, *et al.* $Ga_{1-x}In_xAs/InAs_yP_{1-y}$ photodiodes for the 1.6 to 2.4 μm spectral region grown by low pressure MOCVD [J]. *J. Cryst. Growth*, 1992, **124**(1-4):782-791.

[7] Morio W, Haruo H. Wide wavelength and low dark current lattice-mismatched InGaAs/InAsP photodiodes grown by metalorganic vapor-phase epitaxy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(3):361-363.

[8] Isamu Akasaki. Nitride semiconductors impact on the future world [J]. *J. Cryst. Growth*, 2002, **237-239**(2):905-911.

[9] Gendry M, Drouot V, Santinelli C, *et al.* Growth modes and relaxation mechanisms of strained InGaAs layers grown on InP(001) [J]. *J. Vac. Sci. Technol.* B, 1992, **10**(4):1829-1834.

[10] Chen H, Guo L W, Cui Q, *et al.* Low-temperature buffer layer for growth of a low-dislocation-density SiGe layer on Si by molecular-beam epitaxy [J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, **79**(2):1167-1169.

[11] Gao Wei, Berger Paul R, Ervin Matthew H, *et al.* Liquid phase epitaxial growth of InGaAs on InP using rare-earth-treated melts [J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, **80**(12):7094-7103.

[12] Chang Shou-zen, Lee Si-chen, Chen C R, *et al.* Dislocation generation mechanisms of $In_xGa_{1-x}As$ ($0 \leqslant x \leqslant 1$) epilayers grown on (100) InP substrates by molecular beam epitaxy [J]. *J. Appl. Phys.*, 1994, **75**(3):1511-1516.

Effect of the $In_xGa_{1-x}As$ Buffer Layer Compositions on Crystalline Quality and Surface Morphology of $In_{0.82}Ga_{0.18}As$ Grown by Low Pressure MOCVD

ZHANG Tie-min[1,2], MIAO Guo-qing[1], JIN Yi-xin[1], XIE Jian-chun[1,2], JIANG Hong[1], LI Zhi-ming[1], SONG Hang[1]

(1. *Key Laboratory of Excited State Processes, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: The $In_xGa_{1-x}As$ material is very important for uncooled infrared detector and has spectral response from 1 μm to 3 μm. In recent years, there are growing needs for high In composition $In_xGa_{1-x}As$ detectors, the most important applications are spectral imaging including earth observation, remote sensing and environmental monitoring, *etc.* The $In_xGa_{1-x}As$ ($x > 0.53$) was grown on semi-insulating (100) Fe-doped InP substrates by LP-MOCVD. The growth was performed using TMIn, TMGa, and AsH_3 as growth precursors in a horizontal reactor. Two step method of $In_{0.82}Ga_{0.18}As$ growth that the buffer layer was grown at low temperature of 450 ℃ and the epilayer was grown at higher temperature of 530 ℃ was studied. After depositing 300 nm $In_xGa_{1-x}As$ buffer layer, $In_{0.82}Ga_{0.18}As$ epilayer with thickness of 1 μm was deposited. It was observed that the different In composition of $In_xGa_{1-x}As$ buffer layer influence on crystalline quality and surface morphology of $In_{0.82}Ga_{0.18}As$ epilayer. The crystalline quality of the epilayer materials was characterized by X-ray diffraction (XRD). In our experiment, the In composition of the $In_xGa_{1-x}As$ buffer layers was 0.28, 0.53, 0.82 and 0.88, respectively. The full-width-at-half-maximum (FWHM) of diffraction peak for the buffer layer of $In_{0.82}Ga_{0.18}As$ is 0.362° and is the narrowest among the four samples. The surface morphology was observed by scanning electron microscopy (SEM). The SEM image of the sample with buffer layer of $In_{0.82}Ga_{0.18}As$ is a flat surface and is better than other samples with cross-hatches, pits or some defects. We found that the In composition of the $In_xGa_{1-x}As$ buffer can influence on the surface morphology of the $In_{0.82}Ga_{0.18}As$ epilayer. The experiments show the crystalline quality and the surface morphology of the $In_{0.82}Ga_{0.18}As$ epilayer is optimum when the In composition of buffer layer is the same as that of the epilayer.

Key words: $In_{0.82}Ga_{0.18}As$; MOCVD; XRD; SEM

Received date: 2006-01-10