

用 GaAs 张应变层控制 InP 衬底上 InAs 三维岛的有序排列*

王本忠 赵方海 彭宇恒 刘式墉

(集成光电子学国家重点实验室吉林大学分区 吉林大学电子工程系 长春 130023)

摘要 提出了一种用张应变层控制自组装量子点有序排列的方法,通过低压MOCVD技术在InP衬底上利用GaAs张应变层的控制作用成功地制备出正交网格化有序排列的InAs岛状结构

PACC: 6865, 6116, 6820

近年来,依据S-K生长模式制备自组装量子点的技术,由于避免了微细加工方法的不足,因而引起人们的高度重视。到目前为止,利用这种方法通过MBE或MOCVD技术已经在GaAs衬底上制备了InAs/GaAs^[1,2]、InGaAs/GaAs^[3,4]、GaSb/GaAs^[5]以及InP/InGaP^[6]等自组装量子点,在InP衬底上通过MBE制备了InAs/AlInAs^[7]、InAs/InP^[8],通过LP-MOCVD技术制备了InAs/InP^[9]量子点结构。此外利用这种自组装量子点制备的半导体激光器也已经实现室温连续工作,并初步显示出量子点的优越性^[10,11]。尽管如此,利用这种方法制备量子点仍然存在一些明显的不足之处,有待于进一步的研究。例如这种量子点的尺寸均匀性相对较差,量子点的形成位置很难控制等。这些因素在某种程度上严重影响了量子点的性能,已经引起人们的注意,其中控制量子点的排列方式就是一个亟待解决的问题。Kitamura等人^[12]采用衬底偏角技术首次成功地制备出按直线排列的InGaAs/GaAs自组装量子点。Seifert等人^[6]研究了在沟槽衬底情况下S-K生长规律,发现用这种方法同样可以制备有序排列的自组装量子点,并且成功地生长出按直线排列的InP/GaAs量子点结构。本文首次报道了利用张应变层控制自组装量子点有序排列的方法,并利用GaAs的张应变效应,通过低压MOCVD技术在(001)InP衬底上制备出正交网格状有序排列的InAs三维岛状结构。这种方法无需对衬底进行任何预处理即可获得二维有序排列的InAs三维岛状结构。利用原子力显微镜(AFM)和扫描电镜(SEM)对这种三维岛进行了初步的表征。

样品是利用LP-MOCVD技术制备的,使用的源材料分别是TM_{In}、TM_{Ga}、纯PH₃和

* 集成光电子学国家重点实验室开放课题资助项目

王本忠 男,1960年出生,高级工程师,主要从事LP-MOCVD技术及化合物半导体材料与器件研究

赵方海 男,1963年出生,副教授,主要从事化合物半导体光电器件研究

刘式墉 男,1935年出生,教授,博士生导师,主要从事半导体光电子学研究

1997-07-14收到,1997-10-13定稿

AsH₃ 用经钯管纯化的 H₂ 作为载气, 总 H₂ 流量为 6L/min, 反应室的压力保持在 1.01×10^4 Pa。样品 A 以 (001) InP 材料作为衬底, 经常规清洗处理后装入反应室内, 先在 650 °C 温度下处理 5 分钟, 接着在 600 °C 温度下生长一层约 200nm 的 InP 缓冲层后在 PH₃ 保护下将温度降至 500 °C (用热电偶测温), 在此温度下生长约 3nm 厚的 GaAs 控制层, 然后生长等效厚度约为 4ML 的 InAs 材料, 紧接着在 AsH₃ 保护下降至室温。为了比较, 样品 B 采用 (001) GaAs 作为衬底, 先在 650 °C 生长 200nm 的 GaAs 缓冲层, 然后将温度降至 500 °C, 在此温度下再生长约 3nm 厚的 GaAs 层, 之后生长等效厚度约为 4ML 的 InAs 材料并在 AsH₃ 保护下降至室温。最后用原子力显微镜 (AFM) 和扫描电镜 (SEM) 对样品的表面进行研究。

图 1 (见图版 D) 是样品 A 的 AFM 表面形貌像, 从图中我们可以清楚地看到在上述生长条件下, InAs 材料的生长方式已经发生了从二维生长向三维生长的转变, 形成了 InAs 三维岛状结构, 其尺寸分布遵从高斯曲线规律, 主尺寸分布在 32.3nm, 平均面密度约为 $8.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 。然而, 令人感兴趣的是这种三维岛的排列方式是非随机分布的, 而是形成了按正交网格状有序排列, 排列方向为 (010) 和 (100)。从图 2 (见图版 D) 中可以看出利用同样的生长条件在 (001) GaAs 衬底上直接外延生长 InAs 三维岛时, InAs 三维岛是随机排列的。此外, 从文献报道的结果看, 在 (001) GaAs^[2] 和 InP^[8] 衬底上直接生长 InAs 三维岛时也没有观察到有序排列现象, 说明这种现象是沉积在 InP 衬底上 GaAs 张应变层影响了 InAs 三维岛的排列方式, 起到控制 InAs 三维岛形成位置的作用。文献 [12] 虽然指出用衬底偏角技术可以控制自组装量子点的成核位置, 但是这种方法只能生长出按直线排列的三维岛状结构。我们的结果显然与之不同, 可以排除衬底偏角的影响。图 3 (见图版 D) 是样品 A 的 SEM 表面形貌像, 同样可以清楚地观察到这种正交网格状有序排列的 InAs 三维岛。

我们认为这种网格状有序排列行为是由于在 InP 衬底上生长的 GaAs 张应变效应引起的。由于 GaAs 材料与 InP 衬底具有较大的晶格失配, 因此在 InP 衬底上外延生长 GaAs 材料时, 其生长过程仍然遵循 S-K 生长模式, 在生长的最初阶段 GaAs 外延层首先是以二维方式生长, 随着生长厚度的增加, 生长方式将由二维生长转变为三维生长^[13], 但由于 GaAs 外延层由晶格失配所产生的是张应变, 因而, 这种三维生长所形成的表面结构与压应变材料有很大的区别。对于压应变材料, 其晶格常数较衬底材料的晶格常数大, 在失配应力的作用下外延材料的晶格有收缩的趋势, 当外延生长方式由二维生长转变为三维生长后, 在外延层的表面所形成的是三维岛状结构。而对于张应变材料, 其晶格常数较衬底材料小, 在失配应力的作用下外延材料的晶格有扩张的趋势, 因而不能以岛状结构的方式释放应变能, 而是形成了表面接近平整的被网格状沟槽分割成的类方块形结构。在样品 A 的表面我们可以观察到这种沟槽结构的存在。与台面上相比, 由压应变材料 S-K 模式生长的三维岛更容易形成在沟槽的边缘^[12]。因此, 由张应变材料 S-K 模式生长形成的三维结构对压应变材料 S-K 模式生长形成的三维岛的成核位置起到控制作用, 使得三维岛的分布有序化。此外, 如果在较厚的 GaAs 层 (超过其产生失配位错的临界层厚度时) 上生长 InAs 三维岛时, 我们观察到了两种完全不同的岛状结构, 表明了 GaAs 层中的失配位错对 InAs 三维岛结构的影响。有关详细内容将另文发表。

总之, 上述实验结果证明, 采用张应变层控制 S-K 生长模式下三维岛形成位置的方法是可行的, 通过在 InP 衬底上生长的 GaAs 张应变层的控制作用初步地制备出正交网格化有序排列的 InAs 三维岛。尽管这种有序化排列还不是十分完美, 无疑这是制备有序化排列

自组装量子点的一个有效途径

参 考 文 献

- [1] J. -Y. Marzin *et al* , Phys Rev Lett , 1994, **73**: 716
- [2] Qianghua Xie *et al* , J. Vac Sci Technol , 1995, **B13**: 642
- [3] D. Leonard *et al* , Appl Phys Lett , 1993, **63**: 3203
- [4] F. Heinrichsdorff *et al* , Appl Phys Lett , 1996, **68**: 3284
- [5] Brian R. Bennett *et al* , Appl Phys Lett , 1996, **68**: 505
- [6] W. Seifert *et al* , Appl Phys Lett , 1996, **68**: 1684
- [7] S. Fafard *et al* , Appl Phys Lett , 1996, **68**: 991
- [8] J. Groenen *et al* , Appl Phys Lett , 1996, **69**: 943
- [9] 王本忠, 等, 吉林大学自然科学学报, 1997, **120**(2): 70
- [10] Hajime Shoji *et al* , Jpn J. Appl Phys 1996, **35**: L903
- [11] N. Kirstaedter *et al* , Appl Phys Lett , 1996, **69**: 1226
- [12] M. Kitamura *et al* , Appl Phys Lett , 1995, **66**: 3663
- [13] Yong Jin Chun *et al* , Jpn J. Appl Phys , 1993, **32**: L1085

Ordering InAs Islands Grown on (001) InP Substrate Controlled by Using Tensile Strained GaAs Layer

Wang Benzong, Zhao Fanghai, Peng Yuheng and Liu Shiyong

*(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Jilin University Region
Department of Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130023)*

Received 14 July 1997, revised manuscript received 13 October 1997

Abstract We present a new method to form ordered InAs quantum dots. By using GaAs tensile strained layer on (001) InP substrate, two-dimensional-alignment InAs islands are obtained on GaAs layer grown by LP-MOCVD.

PACC: 6865, 6116, 6820