

GaAs 脊形量子线结构的 MBE 生长机理研究

牛智川 周增圻 林耀望 周帆
潘昆 张子莹 祝亚芹 王守武

(中国科学院半导体研究所 国家光电子工艺中心 北京 100083)

摘要 本文报道了非平面衬底上分子束外延生长 GaAs 脊形量子线结构的实验研究。已成功地在 GaAs(001)刻蚀条形衬底上生长出了由(111)面和(113)面构成的两种脊形量子线结构。本文讨论了非平面衬底上 MBE 生长脊形结构的形成机制,认为在一定的生长条件下,脊形结构的表面取向是由两个原始交界面上生长速率的相对差异决定的;而生长速率的差异是由表面再构的不同决定的。

PACC: 6855, 8115G, 7320, 7340L

1 引言

量子线的制备是半导体材料及器件研究领域的前沿课题之一。近年来在非平面衬底上直接外延生长量子线结构的方法受到了极大重视^[1~3]。与其他方法相比^[4,5],这种方法可以实现一次外延制备量子线结构,避免了多步工艺制备方法所无法克服的弊端,可以有效地提高量子线横向限制结构的内在质量(如抑制杂质浓度、减少界面缺陷等),使其光学特性更加优越。已经较多地使用了 MOCVD 技术进行非平面生长的研究和 V 形量子线结构^[6,7]的制备。MBE 方法最初被认为不适合于非平面衬底上的生长,但最近的生长实验表明^[8,9]:通过适当调整生长条件,可以获得高质量的非平面外延结构。这使得用 MBE 的非平面生长方法直接制备低维结构成为热点研究课题。但目前其生长机制的研究和工艺条件均需要做进一步的探索,以利于提高重复性和可靠性。

本文报道了用 MBE 方法在腐蚀条形的 GaAs(001)衬底上直接生长脊形量子线结构的实验研究。SEM 的测试表明:在沿<110>方向刻槽的条形(001)衬底上得到了由(113)面构成的脊形外延结构;而沿<110>方向刻槽的条形(001)衬底上得到了由(111)面构成的脊形外延结构。本文讨论了 MBE 在非平面表面生长的外延特性,首次提出了一种简单的生长模型,解释了(113)过渡面在 MBE 外延过程中出现的形成机制。

牛智川 男,1963 年生,博士,现从事Ⅲ-V 族半导体材料的 MBE 生长及低维结构器件研究

周增圻 男,高级工程师,现从事Ⅲ-V 族半导体材料的 MBE 生长及激光器件研究

王守武 男,研究员,中国科学院院士,现从事半导体材料与器件物理研究

1995 年 6 月 9 日收到初稿,1995 年 10 月 25 日收到修改稿

2 实验

首先在(001)半绝缘 GaAs 衬底上,用常规光刻分别沿<110>方向(样品 A)和<110>方向(样品 B)刻出周期为 4mm 的条形掩膜,对样品 A 用 $H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O$ (体积比 5:1:1)溶液腐蚀,形成台面结构,平台侧面取向为(111)A 面(Ga 面);对样品 B 用 $H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O$ (体积比为 1:8:100)溶液腐蚀,形成台面结构,其侧面取向为(111)B 面(As 面). 生长设备为 VG V80H-Mark I 型 MBE 系统. 生长条件是:生长温度 580°C, V / III 束流比 7:1. 外延层结构为:样品 A 首先生长 500nm 的 GaAs 过渡层、然后是 40nm 的 AlAs 标志层用以观察外延层表面结构在生长过程中的变化、第三层为 500nm 的 GaAs 层、再生长 40nm 的 AlAs 标志层,在其顶部生长层厚分别为 8nm/20nm 的 GaAs/AlAs 量子阱层、500nm 的 GaAs 层、40nm 的 AlAs 标志层、50nm 的 GaAs 保护层. 样品 B 首先生长 500nm 的 GaAs 过渡层、40nm 的 AlAs 标志层、500nm 的 GaAs 层、40nm 的 AlAs 标志层、300nm 的 GaAs 层、40nm 的 AlAs 标志层、500nm 的 GaAs 层. 其中 GaAs 的生长速率以(001)晶面为准设计为 $0.3\mu m/h.$, AlAs 为 $0.2\mu m/h.$, 生长时衬底以 10 转/min 的速率. 旋转使外延生长在整个表面均匀地进行.

3 测试结果与讨论

从外延样品剖面的 SEM 测试结果图 1 和图 2(见图版 I, 图中黑色外延层为 AlAs), 可以清楚地看到两种脊形外延层结构. 样品 A 的脊形由(113)面构成, 而(113)面显然是在 MBE 的生长过程中出现的; 样品 B 的脊形由(111)面构成, 它保持了原条形侧面的晶向. 一般而言, 脊形形成的原因是由于 GaAs 在不同取向晶面上具有不同的生长速率, 沿(001)晶向的生长速率大于沿(111)晶向, 台顶面的横向尺寸随外延的进行逐渐变小形成脊形结构. 但生长速率的差异是怎样造成的? 而且为什么沿<110>方向的条形台面上生长出了过渡的(113)晶面? 而沿<110>方向的条形台面上并不出现过渡晶面? 目前还没有很明确的解释. 而在通常的生长条件下, 这种取向的形成显然是受条形方向和宽度的制约的^[10].

根据已有的报道^[11,12], 我们知道: 在一定的生长条件下, 沿不同取向表面进行 MBE 生长时, 各取向表面具有不同的再构形式. 在表面富 As 稳定的情况下, GaAs(001)面的再构是 2×4 结构, 其特征是表面 As 原子的 2 聚物加两个 As 空位与下面的一层 Ga 原子相接; (111)A 表面为 2×2 结构, 是表面 As 原子的三聚物与下面的一层 Ga 原子相接; (111)B 面虽然也是 2×2 结构, 但它是表面 As 原子的三聚物与下面的一层 As 原子相接. 显然这三种再构表面原子键结合能是不同的, 比较(001)、(111)A、(111)B 三个再构表面其最外两层 Ga、As 原子数 N_{Ga}/N_{As} 的比率, 可以发现:(100)面的 $N_{Ga}/N_{As}(R_1) = 2/1$, 即相当于每两个 Ga 原子结合一个 As 原子;(111)A 面 $R_2 = 4/3$; 而(111)B 面由于其最外两层只有 As 一种原子因而其比率 R_2' 是无穷大. 因此定性地看,(100)表面原子键的结合能最小而(111)B 表面则最大. 生长时入射在(111)B 面上 Ga 原子需要有较大的能量才能打破 As 原子的三聚物原子团而进入稳定的格点, 其扩散长度最长导致生长速率最小; 而入射在(100)面上生长的 Ga 原子的扩散长度最小, 其生长速率最大;(111)A 面的生长速率介于(100)面和(111)B 面的生长速率之间.

此外我们还注意到下面的事实:(001)面的 R_1 和(111)A 面的 R_2 之比为: $R_1/R_2 = 1.5$, 这恰好与下面所做实验得出的沿这两个晶面生长速率的比率相一致. 而(001)面的 R_1 和(111)B 面的 R_2' 之比为: $R_1/R_2' = 0$, 而实际上沿这两个晶面的生长速率的差异很大. 这反映

出了不同的再构表面原子结合状态对生长速率相对差异的决定作用,而且这两者之间似乎存在一定的对应关系,有待进一步的研究.

从(001)和(111)方向外延层厚度的差别,可以大致推断沿<001>方向的生长速率是沿<111>A 方向的 1.5 倍左右,这一结果实际上与 T. Hayakawa 等人^[11]所做的类似的 MBE 生长实验结果是相符的. 可以认为在这样的生长参数下,这一比率是真实的(如果远离这样的生长条件,如用很高的生长速率等,这一比率可能会有变化).

根据以上实验事实,我们提出了一种形成脊形结构的简单模型,以解释(113)面的形成机制,即在一定的生长条件下,当入射 Ga 原子在衬底表面的扩散长度(这一参数与生长温度、V / I 束流比等条件有关)小于或接近台面尺寸时,生长过程中产生的过渡面的取向是由两个原始交界面生长速率的相对差异决定的,生长速率差异越大则产生的过渡面的取向越接近于原条形侧面的取向.

微观地考察样品 A 的外延生长将有以下的过程: 在(001)面上生长 3 个单层的同时将在(111)A 面上生长 2 个单层. 如果以 Ga 原子层的生长为例可以给出图 3(见图版 I)所示的该模型简单示意. 其序号 1,2,3 代表外延第一层至第三层 Ga 原子层的顺序生长过程, 交界处的 Ga 原子序号 2',3' 表示了与(001)面相同的生长顺序. 意即当(001)面第 2,3 层形成时 Ga 原子将同时进入此处的格点形成稳定的过渡面,而在(001)面第二层 Ga 原子层形成之前交界处不能存在稳定的 Ga 原子格点. 这样的生长过程将导致具有一定取向附加晶面的出现. 如图 3 所示,由于该面与(001)面的夹角约为 25°,因此在交界处形成了平滑的过渡面——(113)A 面.

对于在由(001)面和(111)B 面构成的交界面上生长时不形成另外的附加过渡面的实验结果可以作如下的解释: 由于(111)B 再构表面的特殊性, Ga 原子在其表面的生长比在(001)面上的生长相比要困难的多, 当用 As₂ 作为 V 族源时这种生长速率的差异更加明显^[12]. 虽然不能在此给出象样品 A 一样精确的生长速率比例关系,但可以认为在(001)面生长数十乃至数百层的 Ga 原子层的同时才能在(111)B 面生长一个单层(按照我们的生长模型,如果在(100)面生长十层才能在(111)B 面生长一层的话,其过渡面取向已非常接近(111)方向). 所以这样的生长过程其结果只能是其侧面将保持原有晶面的取向.

这里从相对生长速率这一关键因素粗略地考察了脊形结构的形成机制. 深入研究 MBE 非平面生长机理还需要综合考虑其他多种因素(如不同的生长条件、条形结构等)的影响,才能得出更精确的理论模型. 但我们的模型已经能够简单明了的解释脊形结构的形成机理. 这对于用 MBE 直接生长脊形量子线具有一定的指导意义. 此外对该脊形结构样品光学特性方面的进一步研究已证实这两种脊形结构均具有明显的横向量子限制效应,有关内容另文发表^[13,14].

4 结论

本实验用 MBE 方法在非平面衬底上直接外延生长出了两种脊形量子线结构. 其脊形结构分别由(113)面或(111)面构成. 根据实验结果我们提出了“MBE 生长脊形结构的相对生长速率模型”,即在一定的生长条件下,在不同取向的晶面上,由于不同的再构形式,导致了生长速率的差异; 外延生长形成脊形结构时,其侧面的取向是由原交界面生长速率的相对差异决定的. 这种生长模型基本可以解释不同脊形表面取向形成的原因. 这对于 MBE 在非平面衬底上生长低维外延结构的半导体器件具有一定的指导意义.

参 考 文 献

- [1] E. Kapon, D. M. Hwang and R. Bhat, Phys. Rev. Lett., 1989, **63**: 430.
- [2] S. Tsuukamoto, Y. Nagamune, M. Nishioka *et al.*, J. Appl. Phys., 1992, **71**: 533.
- [3] J. Motohisa and H. Sakaki, Appl. Phys. Lett., 1993, **63**: 1786.
- [4] C. Greus, A. Forchel, J. Straka *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1992, **61**: 1199.
- [5] H. Asahi, S. J. Yu, J. Takizawa *et al.*, Surf. Sci., 1992, **267**: 232.
- [6] Z. C. Niu, L. X. Zhen, Z. B. Xiao *et al.*, "Selective growth of GaAs quantum wire structures by MOCVD", Proceedings of C-MRS and E-MRS Joint Symposium on Electronic and Optoelectronic Materials, Beijing, China, 1994, Page 12—13.
- [7] S. Tsukamoto, Y. Nagamune, M. Nishioka *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1993, **62**: 49.
- [8] M. Walther, T. Rohr, G. Bohm *et al.*, J. Gryst. Growth, 1993, **127**: 1045.
- [9] S. Koshiba, H. Noge, H. Akiyama *et al.*, Inst. Phys. Conf. Ser., 1993, **129**: 931.
- [10] T. Sugaya, Y. Okada and M. Kawabe, Jpn. J. Appl. Phys., 1992, **31**: 713.
- [11] T. Hayakawa, M. Morishima and S. Chen, Appl. Phys. Lett., 1991, **59**: 3321.
- [12] J. Zhou, Q. Xue, H. Chaya *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1994, **64**: 583.
- [13] 牛智川, 等, "脊形量子线结构的光学特性研究", 未发表.
- [14] Z. C. Niu, Z. Q. Zhou, Y. W. Lin *et al.*, "Growth of GaAs ridge quantum wire structure by MBE on patterned substrate", Proceedings of the 22nd International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS-22), Cheju Island, Korea, 1995, Advance Program, P138.

MBE Growth Mechanism of GaAs Ridge-QWR Structures On Nonplanar Substrates

Niu Zhichuan, Zhou Zengqi, Lin Yaowang, Zhou Fan,
Pan Kun, Zhang Ziying, Zhu Yaqin, Wang Shouwu

(National Research Center For Optoelectronic Technology,
Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Received 9 June 1995, revised manuscript received 25 October 1995

Abstract Two kinds of GaAs ridge quantum wire structures have been fabricated by MBE on GaAs (001) mesa-etched substrates. SEM measurements indicated that the QWRs were formed with (113) and (111) side faces. A simple growth model has been given to discuss the growth mechanism of MBE facet growth. It was found that the orientations of additional side faces were determined by the growth rate ratio of two original cross planes, and the growth rate is determined by the structures of surface reconstructions under certain growth conditions.

PACC: 6855, 8115G, 7320, 7340L