

In_{0.25}Ga_{0.75}As/GaAs 应变异质结的 离子沟道分析

殷士端 吴春武 张敬平

(中国科学院半导体研究所,北京)

刘家瑞 朱沛然

(中国科学院物理研究所,北京)

1987年7月9日收到

本文采用 Li 离子作为背散射-沟道实验的分析束来研究 In_{0.25}Ga_{0.75}As/GaAs 应变异质结的结构。沟道效应和角扫描的实验表明,由于晶格失配,异质结的点阵发生应变,晶格常数在生长方向产生~0.04 Å 的拉伸或压缩,于是离子沟道在<110>倾斜方向发生 0.9° 的扭折,导致沿这个方向的严重退道。对较厚外延层的样品,除应变结构外,在生长过程中还形成失配位错结构及其他点阵缺陷,从而产生附加的退道。

主题词: 异质结,离子沟道,沟道

一、引言

异质结界面处的结构,包括晶格失配,点阵缺陷等直接影响其电学性能和器件的应用范围,因而是研究异质结和改进工艺的一个重要课题。背散射技术结合沟道效应测定异质外延层的组分,均匀性,膜厚和晶体质量等具有独特的优点,因而已被广泛采用。这个方法曾经有效地分析了蓝宝石衬底上外延生长单晶硅膜的结构^[1]。近年来,背散射-沟道实验技术更用于研究超晶格,使其应用得到进一步的发展^[2]。它能直接证明晶格常数失配的两种材料形成超晶格时,将产生拉伸和压缩应变^[3],并可测出晶格常数的微小变量^[4]。

本文利用背散射-沟道效应和应变模型^[3]分析晶格失配较大的 In_{0.25}Ga_{0.75}As/GaAs 的应变和 In_{0.25}Ga_{0.75}As 外延层的单晶质量。

二、实验条件和测量结果

测量分析用的样品是在(100)GaAs 衬底上用分子束外延技术生长一层 In_{0.25}Ga_{0.75}As 单晶,外延层的厚度为 100 Å, 200 Å 及 500 Å 等三种。在背散射-沟道效应的实验中,我们在国内首次采用锂粒子作为分析束。离子束由 2 × 1.7MV 的串列加速器提供,能量为 5.8 MeV。锂具有比 He, H 大的质量,因而能增大散射截面和反冲能量的分离,同时由于

Li 离子产生核反应的能量比较高,在背散射实验中可以采用较高的能量,这两个因素都有利于提高背散射测量的分辨率。另一方面,探测器对重粒子的分辨率较差。但综合上述几个因素,采用高能 Li 粒子,总的测量分辨能力还是得到了提高。如用 He 时, Ga、As 两个原子序数很相近的元素在背散射谱上几乎相重,而采用 Li 便能明显分开。我们用一般的金硅面垒探测器,得到 $\sim 25\text{keV}$ 的系统探测分辨率,如果选用高分辨的探测器,分辨率还可大大提高。测量时束流 $< 10\text{nA}$,束斑直径 $\sim 1\text{mm}$,散射角为 165° ,由探测器输出的脉冲信号由 ND-683 多道分析仪分析和处理。进行沟道分析时,晶向的对准和角扫描实验是利用一个三维定角器完成的。定角器用步进马达自动控制,最小步距为 0.01° 。退道测量和角扫描是沿 $\langle 100 \rangle$ 外延生长方向和 $\langle 110 \rangle$ 晶轴方向进行的。

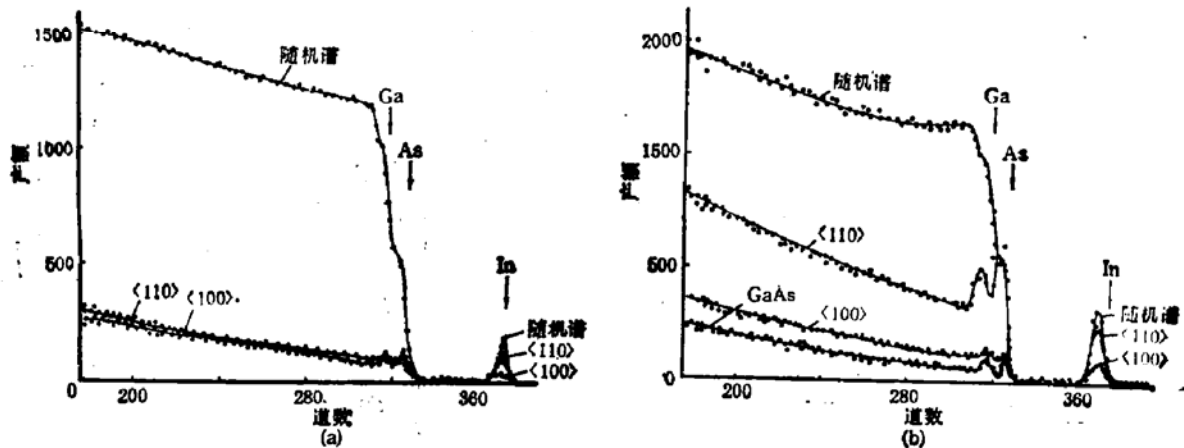


图 1 $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{GaAs}$ 的背散射-沟道谱膜厚 (a) 100Å (b) 500Å

图 1 是 $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{GaAs}$ 的背散射谱,包括随机谱和沿 $\langle 100 \rangle$ 及 $\langle 110 \rangle$ 方向的沟道谱。由于膜厚为 200Å 的背散射谱几乎与 100Å 的完全相同,故谱图省略而未列入。为了进行比较,图 1(b) 还给出了 GaAs 沿 $\langle 100 \rangle$ 方向的沟道谱。图中箭头表示样品表面由 In, As 及 Ga 等原子背散射的粒子的能量对应道数。从图 1(b) 可以看出, $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{GaAs}$ 异质结的沟道产额均比 GaAs 衬底高,但不同晶轴方向差别不一样,沿 $\langle 100 \rangle$ 方向与 GaAs 单晶比较接近,而沿 $\langle 110 \rangle$ 方向产额增加很明显。对于一般立方晶格的沟道谱,沿 $\langle 110 \rangle$ 方向的产额应略低于沿 $\langle 100 \rangle$ 方向,而这里却显示出相反的变化。这种反常的沟道效应是与异质结的晶格应变紧密联系的,它普遍存在于应变异质结中^[5,6]。

为了进一步研究退沟道效应和定量分析应变,我们对膜厚为 500Å 的外延层样品进行了角扫描实验。测量结果如图 2 所示。图中 2(a) 及 2(b) 分别为沿 $\langle 100 \rangle$ 方向和 $\langle 110 \rangle$ 方向的角扫描谱。扫描都是在 (100) 面内进行的。图中 In 谱反应外延层的点阵结构, GaAs 曲线是衬底提供的信息。从图 2 可以看出,对 $\langle 100 \rangle$ 方向, In 的角分布与 GaAs 衬底比较接近,两者最低产额对应的角度几乎相等。而沿 $\langle 110 \rangle$ 方向,则有角度差值 $\Delta\psi = 0.9^\circ$ 。沟道效应在一个晶轴方向和另一个晶轴方向的这种明显差别进一步说明异质结中的晶格应变^[7,8]。

沟道产额和随机产额的比值表征沟道粒子的退道程度。图 3 给出不同膜厚的样品在 $\langle 100 \rangle$ 和 $\langle 110 \rangle$ 两个方向的退道,图中实线和虚线分别表示外延层中 As 原子及 In 原子给出的信息。由图 3 可以看出,退道随外延层厚度的增加而增加。对 $\langle 100 \rangle$ 方向,退道较小。

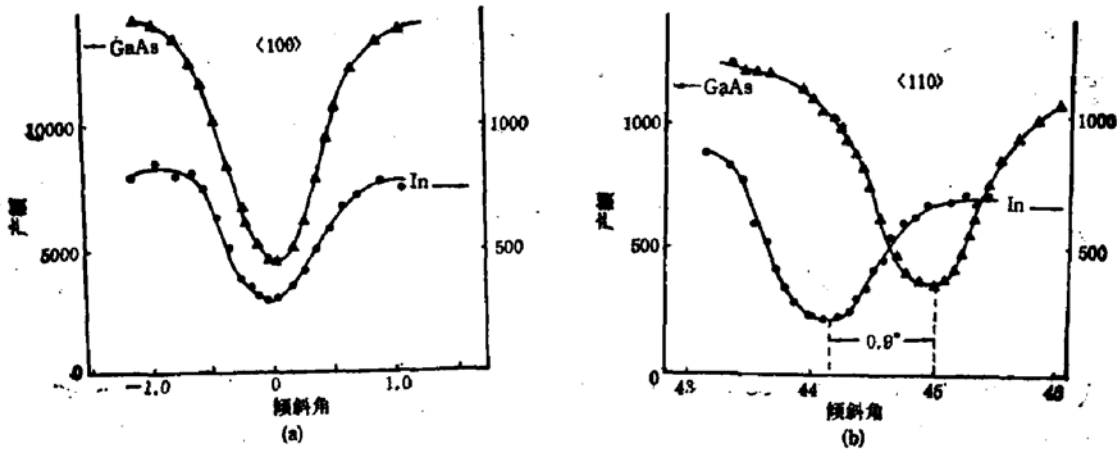


图 2 $In_{0.25}Ga_{0.75}As/GaAs$ 的角扫描谱 (a) 沿<100>方向 (b) 沿<110>方向

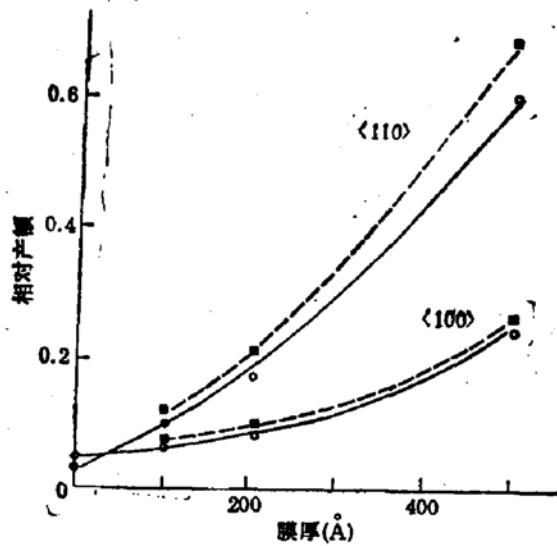


图 3 $In_{0.25}Ga_{0.75}As$ 中 As 原子(实线)及 In 原子(虚线)在 <100>及<110>方向提供的相对产额随膜厚的变化

且虚线与实线比较相近,说明 As 原子和 In 原子提供的退道相差不大,而对<110>方向,退道加剧,且 In 原子引起的退道明显大于 As 原子。

三、分析和讨论

当两种晶格常数失配的材料生长在一起时,在与生长方向垂直的平面内,两者的晶格常数必须调整到相同的值 $a_{||}$,而在沿生长方向发生拉伸或压缩的应变,这就是应变模型^[7],图 4 是这种应变的剖视图。对 $In_{0.25}Ga_{0.75}As/GaAs$ 系统, $a_{||} = 5.702 \text{ \AA}$ 。GaAs 具有比较小的晶格常数 $a_1 = 5.6532 \text{ \AA}$,所以在外延生长的方向发生压缩的形变,而对晶格常数较大的 $In_{0.25}Ga_{0.75}As$, $a_2 = 5.7609 \text{ \AA}$,晶格被拉伸,根据 Poisson 效应,在生长方向的晶格常数对 GaAs 要比平衡值 a_1 小, $a_{\perp 1} = a_1 - \delta a_1$,而对 $In_{0.25}Ga_{0.75}As$, 则比平衡值 a_2 大, $a_{\perp 2} = a_2 + \delta a_2$,其中 δ 是与晶体弹性系数有关的系数,对我们采用的系统, $\delta = 7.64 \times 10^{-3}$,于是 $a_{\perp 1} = 5.610 \text{ \AA}$, $a_{\perp 2} = 5.805 \text{ \AA}$,也就是衬底晶格常数的压缩量和外延材料的伸长量 $\sim 0.04 \text{ \AA}$ 。这种应变从图 4 可以看出,其对<100>方向的沟道没有影

响,而在倾斜 $\sim 45^\circ$ 的最佳沟道方向上产生扭折。于是在 $\langle 100 \rangle$ 方向基本保持原始单晶的退道,而在 $\langle 110 \rangle$ 方向,这种扭折导致高的背散射产额,明显增加退道。从图 4 可以通过简单的几何方法算出晶格应变引起的扭折角 $\Delta\phi$:

$$\Delta\phi = \theta_2 - \theta_1 = \text{tg}^{-1} \left(\frac{a_{12}}{a_{11}} \right) - \text{tg}^{-1} \left(\frac{a_{21}}{a_{22}} \right) = 0.98$$

图 2(b) 中两条扫描曲线的最低中心位置如前所述分别对应外延层和衬底沿 $\langle 110 \rangle$ 轴的最佳沟道方向。这两个方向的夹角实际上就是扭折角,两者理应相等,但我们得到的计算值 ($\approx 0.98^\circ$) 略大于测量值 ($= 0.90^\circ$)。这是由于位错结构的影响,它减弱晶格的应变。因为外延生长形成异质结的结构取决于影响系统自由能的两个因素,即晶格失配和位错。晶格失配越小,应变结构的自由能越低,因此越容易形成应变结构。另一方面,外延层的膜厚越厚,失配位错结构的自由能越小,从而越有利于这种结构的生成^[9]。对一定晶格失配的系统,调整外延层的厚度到某一临界值 d_c 时,两种结构的自由能相等。膜厚小于 d_c ,便得到应变结构,若大于 d_c 就会出现减弱应变的失配位错。Matthews 等人^[10] 从研究一系列的 III-V 族半导体超晶格中得出临界膜厚随晶格失配的变化关系。对我们所采用晶格失配为 1.75% 的样品, d_c 约为 300 Å。因此对 100 Å 及 200 Å 等薄膜样品,可以认为主要是应变结构,而对 500 Å 的厚膜样品,失配位错结构及其他点阵缺陷显然要起作用而不能忽视。失配位错减弱了应变,使测量值小于计算值,同时产生附加的退道。外延层越厚,失配位错和其他缺陷的总量越多,因此退道也越严重。图 3 便给出了这种变化关系。

退道随粒子进入样品深度的增加而增加,因此可以用深度表示退道的量。在 GaAs 衬底内,如果假设距界面 $D_{0.5}$ 处有 50% 的沟道粒子转变为退道粒子,则 $D_{0.5}$ 可以从实验求得。从图 1 的背散射-沟道谱能得到不同厚度样品的 $\ln(1-x)$ 值随深度的变化,其中 x 为退道率,外推这些曲线便能给出 $D_{0.5}$ 。 $D_{0.5}$ 反比于应变产生的扭折角^[3],即 $D_{0.5} \propto (\Delta\phi)^{-1}$ 。因此如果是单一的应变结构而且外延生长层是完美的单晶,则不同厚度的样品,

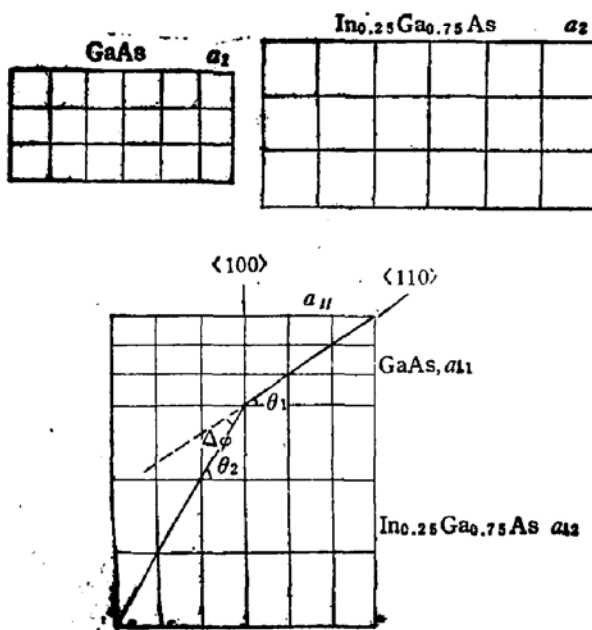


图 4 应变剖视图

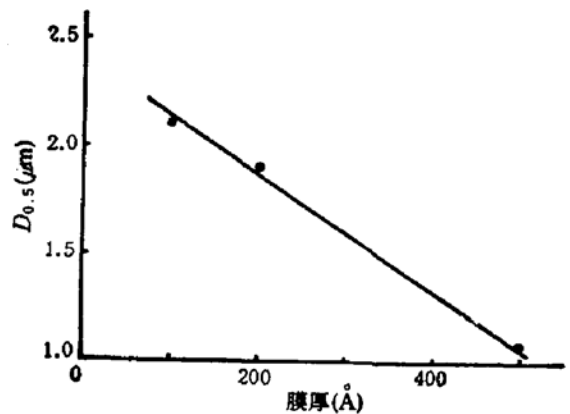


图 5 $D_{0.5}$ 随外延层厚度的变化

因晶格失配相同,理应有相同的 $D_{0.5}$ 值,但图 5 表明,其随膜厚的增加而明显减小,这也说明外延层中有点阵缺陷,晶体是不完美的,500 Å 的厚样品更为显著。

图 3 中对应 As 原子的实线和 In 原子的虚线的差别表征 In 在点阵中的替位程度。沿〈100〉方向,两者比较接近,说明在这个方向,In 原子基本没有偏离正常的点阵位置,而沿〈110〉方向,约有 ~20% 的 In 原子偏离了原来的 Ga 位置,也就是大约 80% 的 In 原子在取代位置。

四、结 论

利用背散射-沟道和角扫描能直观地测量应变结构的微量应变。 $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ 在生长过程中,由于其与 GaAs 衬底的晶格常数的失配,使异质结产生形变,离子沟道在界面处形成 0.9° 的扭折,晶格常数发生 0.04 \AA 的变化,从而导致沿〈100〉轴及〈110〉轴的反常退道效应。实验表明,薄外延层样品基本是应变结构,当膜厚增加到 500 Å 时,产生失配位错结构,给出附加的退道。在生长过程中形成的点阵缺陷和 In 原子偏离原来 Ga 原子的位置也都使退道增加。

参 考 文 献

- [1] S. T. Picraux, *Appl. Phys. Lett.*, **20**, 91(1972).
- [2] F. W. Saris, W. K. Chu, C. A. Chang, R. Ludeke and L. Esaki, *Appl. Phys. Lett.*, **37**, 931(1980).
- [3] J. H. Barrett, *Phys. Rev.*, **B28**, 2328(1983).
- [4] W. K. Chu, C. K. Pan and C. A. Chang, *Phys. Rev.*, **B28**, 4033(1983).
- [5] W. K. Chu, F. W. Saris, C. A. Chang, R. Ludeke and L. Esaki, *Phys. Rev.*, **B26**, 1999(1982).
- [6] J. H. Barrett, *Appl. Phys. Lett.*, **40**, 482(1982).
- [7] J. C. Beam, L. C. Feldman, A. T. Fiory, S. Nakahara and I. K. Robinson, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A2**, 436 (1984).
- [8] C. K. Pan, D. C. Zheng, T. G. Finstad, W. K. Chu, V. S. Speriosu, M. A. Nicolet and J. H. Barrett, *Phys. Rev.*, **B31**, 1270(1985).
- [9] S. T. Picraux, G. W. Arnold, D. R. Myers, L. R. Dawson, R. M. Biefeld, I. J. Fritz and T. E. Zipperian, *Nucl. Instr. and Meth in Phys. Res.*, **B7/8**, 453(1985).
- [10] J. W. Matthews and A. E. Blakeslee, *J. Cryst. Growth*, **27**, 118(1974).

Ion Channeling Analysis of $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{GaAs}$ Strained Heterojunction

Yin Shiduan, Wu Chunwu and Zhang Jingping

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing)

Liu Jiarui and Zhu Peiran

(Institute of Physics, Academia Sinica, Beijing)

Abstract

The structure of $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{GaAs}$ strained heterojunction is investigated by means of Li ion beam analysis. Channeling and angular scan measurements suggest that lattice strain occurs in the interface because of the lattice mismatch between the lattice constants of $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ and GaAs. There is an expansion and contraction of the equilibrium lattice constant of about 0.04 \AA in the interface, these stresses cause tetragonal distortions of 0.9° . Abnormally high dechanneling is observed due to the presence of this lattice strain. Lattice defects in the epitaxial layer also give rise to a significant dechanneling.

KEY WORDS: Heterojunction, Ion Channeling, Channeling