

# MBE-GaAs/Si 材料晶体质量对少子 扩散长度的影响\*

胡雨生 汪乐

(中国科学院上海冶金研究所 上海 200050)

**摘要** 对于 GaAs/Si 材料由于晶格失配和热膨胀系数失配,外延时必然会出现大量的失配位错等缺陷进入外延层,为了更有效地消除或减弱由于以上二种失配所引入的失配位错等缺陷,本文采用高温快速热退火的方法,结合表面光伏(SPV),微波光电导谱(MPCS),双晶衍射(DCRD)等测试手段在整个高温热退火区域寻求一个对具有一定 GaAs 层厚度的 GaAs/Si 材料最佳热退火温度  $T_0$ ,经此温度  $T_0$  快速热退火后,由 SPV, MPCS 所测得的 GaAs 外延层少子扩散长度  $L_0$  数值达最大,DCRD 所测得双晶衍射半峰宽也明显变窄,各项指标均有力说明经该温度  $T_0$  热退火后确能有效地降低 MBE-GaAs/Si 材料中的失配位错等缺陷密度,从而对晶体质量有改善作用.

PACC: 7360F, 6630L, 6170A

## 1 引言

MBE-GaAs/Si 材料<sup>[1]</sup>将 GaAs 优越的电学性能,光学性能和 Si 材料的硬度大,热传导率高,易集成的特性结合于一体,为光电集成电路等新型光电器件提供了可能的材料.也为 Si 的大规模集成电路和 GaAs 集成块的合成提供了可能的材料.但是, GaAs 和 Si 之间存在的晶格失配及热膨胀系数的差别,外延时必然会出现大量的失配位错等缺陷进入外延层. C. Choi 和 J. W. Lee 等人<sup>[2,3]</sup>通过对 GaAs/Si 异质结材料进行透射电子显微镜(TEM)和扫描电子显微镜(SEM)观察,看到大量失配位错向外延层延伸,而这些高密度的失配位错( $10^8$ — $10^9$ cm<sup>-2</sup>)进入外延层必然导致外延层晶体质量下降,其影响主要表现在以下三方面:

- 1 位错起复合中心作用;
- 2 Fe、Ni、Cu 等重金属杂质会聚集到位错线附近;
- 3 杂质原子沿位错线的扩散速度加快.

由此可见位错的存在确实将严重影响器件性能,所以如何减少位错密度是个不容忽视极为重要的问题.为此了解材料生长过程并检测外延层晶体质量,以及选择合适的退火温度来有效降低外延层失配位错密度,对于有效改善晶体质量是十分必要的.

\* 国家自然科学基金资助项目

胡雨生 男,1954年生,工程师,从事化合物半导体材料特性测试与研究以及太阳能电池研究工作

汪乐 男,1940年生,副研究员,从事化合物半导体材料性能研究以及太阳能电池研究

1993年11月5日收到初稿,1994年3月15日收到修改稿

本文利用表面光伏 (SPV)<sup>[4]</sup> 微波光电导谱 (MPCS)<sup>[5]</sup>, 同时测定表征半导体材料质量的重要参数少子扩散长度  $L_p$ , 并对 GaAs/Si 样品进行了不同退火温度下的快速热退火实验, 从不同退火温度后所测得的  $L_p$  变化情况表明在整个退火温度区域内, 存在一个最佳热退火温度, 选择这一退火条件,  $L_p$  值最大, 这对晶体质量改善起较大帮助, 从退火后样品表面质量, 以及双晶衍射谱 (DCRD) 谱峰半宽度变化均能很好地得到印证。

## 2 实验方法

本文实验采用 SPV 法中较为简便, 精度较高的等光伏<sup>[4]</sup>法测定 MBE-GaAs/Si 异质结外延层少子扩散长度, 根据 SPV 的 5 个限制条件选用外延层厚度为 4—5 $\mu\text{m}$ , 浓度为 2—5 $\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$  掺 Si N 型 GaAs/Si 材料作为 SPV 实验用样品. 而对于外延层厚度较薄 3 $\mu\text{m}$ , 浓度为 2 $\times 10^{15}\text{cm}^{-2}$  样品将采用微波光电导谱 (MPCS) 测定外延层少子扩散长度  $L_p$ .

将被测样品经 SPV; MPCS; DCRD, 测定后, 放入高频炉中在高纯  $\text{N}_2$  保护下进行快速热退火 (RTA), 其温度范围 800—930 $^\circ\text{C}$  间隔 40 $^\circ\text{C}$ , 改变一种温度, 每次退火时间 10s, 各次退火后即做 SPV 测定分析  $L_p$ . 数值随退火温度的变化找出其最佳热退火条件, 并对未退火前与 920 $^\circ\text{C}$  退火后的样品分别用 SPV, MPCS, DCRD 作检测. 通过分析 GaAs 外延层退火前后  $L_p$  值改变以及 DCRD 峰间距  $\Delta\theta$  减小和其半峰宽变窄来确定外延层晶体质量的变化。

## 3 实验结果与讨论

由 MPCS 测得 MBE-GaAs/Si 样品未退火前外延层少子扩散长度  $L_p = 0.45\mu\text{m}$  经 920 $^\circ\text{C}$  10s 退火后少子扩散长度  $L_p$  增大到  $L_p = 0.85\mu\text{m}$  而扩散长度本身就是表征材料质量好坏的一个重要参数, 退火后  $L_p$  值增大这表明经热退火后 GaAs 外延层内位错密度减少使晶体质量较退火前有了改善, 因为对于一个晶格失配体系而言失配位错对晶体质量影响是很明显的, 从透射电镜 (TEM)<sup>[3]</sup> 观察到 GaAs/Si 材料在未退火前由于界面晶格失配而进入外延层的失配位错密度达  $10^9\text{cm}^{-2}$ , 经高温热退火后失配位错密度下降了 100 倍, 外延层内位错密度的下降必然对改善晶体质量是很有帮助的. 这点从该样品退火前后 DCRD 测试结果图 1 中可看到退火后 DCRD 半峰宽明显变窄从 330 秒减小到 220 秒, 以上诸结果均能很好地表征了合适的热退火条件对改善晶体质量是很有益的。

图 2 为不同温度热退火后用 SPV 法测定的 GaAs/Si 材料外延层  $L_p$  随退火温度变化曲线, 并对未退火前与 900 $^\circ\text{C}$  10s 退火后, 用 MPCS 作了对比测试所得结果基本一致. 从中还可看到随退火温度增大  $L_p$  值开始逐渐增大, 当退火温度升至 900 $^\circ\text{C}$  时  $L_p$  值达最大. 这是因为在 900 $^\circ\text{C}$  左右热退火条件下, 样品表面仍呈光亮的镜面在未受到任何损伤的情况下, 主要是通过高温热退火后降低 GaAs 层的位错密度使 GaAs 层晶体质量得以提高, 这从图 1 GaAs/Si 材料退火后 DCRD 谱比退火前明显变窄这点就得以很好地印证. 而退火温度升至 920 $^\circ\text{C}$  以上时, 热退火反而引起 GaAs 外延层  $L_p$  值下降其原因之一是 920 $^\circ\text{C}$  以上的退火温度样品表面已由原先的光亮镜面变成暗色. 其二对 GaAs/Si 材料体系, 其即存在晶格失配同时又存在热膨胀系数失配, 两者同时对 GaAs 外延层晶体质量产生影响的缘故. 所以对

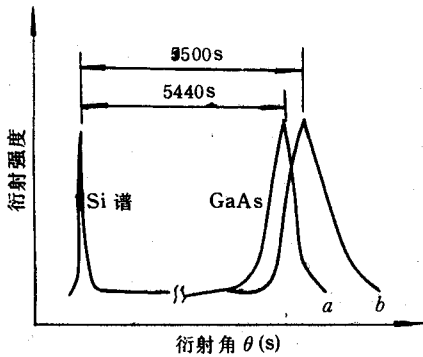


图 1 热退火前后 GaAs/Si 双晶衍射图(SM592)

a—920°C, 10s b—未经热处理

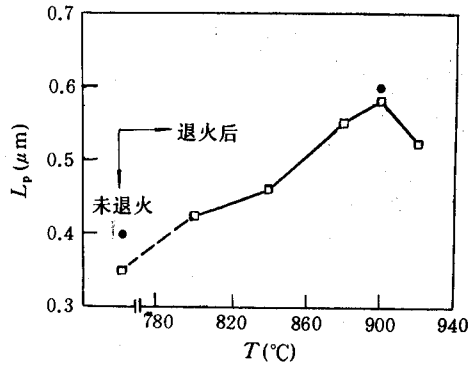


图 2 (SM571)-GaAs/Si 材料经不同温度退火后外延层

$L_p$  随退火温度的变化 ● MPCs □ SPV

于一个具有一定厚度的 GaAs/Si 材料而言,当退火温度增大到超出某一临界值时,  $L_p$  值开始下降,此时,热膨胀系数失配,所引起的张应力才渐渐起支配作用使 GaAs 外延层晶体质量随退火温度增大而逐渐退化.从 Bell Lab, Nchand 等人<sup>[6]</sup>对 GaAs/Si 材料进行 900°C 和 940°C 热退火后所测的光致发光谱(PL)中可看出 940°C 热退火后 PL 谱强度比 900°C 热退火后的(PL)谱特征峰强度下降了 1.5 倍说明 900°C 以上的高温热退火所引入的热缺陷会降低材料的发光效率和少子寿命必将引起该材料 PL 谱特征峰强度减弱.

表 1 所列不同 GaAs 外延层厚度和浓度的三块 GaAs/Si 样品退火前后少子扩散长度  $L_p$  的变化,从表中可看出在未退火前 SM592 与 SM622 两样品 GaAs 外延层浓度差 2 个数量级,但各自的  $L_p$  值均在 0.45 $\mu\text{m}$  左右.而经过快速热退火后三个样品各自 GaAs 层少子扩散长度  $L_p$  数值却发生很大差异,特别是相同浓度的二个样品 SM571 与 SM622 热退火后的  $L_p$  数值,前者增大 50%而后者却只增大 11%,导致这种异常现象的原因,我们认为对于一个既存在晶格失配,又存在热膨胀系数失配的 GaAs/Si 材料体系中 GaAs 外延层从表面到界面经历着从双轴张应力到双轴压应力的变化,其中双轴压应力随着外延层的增厚而减小<sup>[7]</sup>,说明失配位错等缺陷对压应力的弛豫机制是不断积累的,即 GaAs 外延层的晶体质量随外延层厚度的减薄是渐渐退化的.上述 SM592 与 SM622 两样品在退火前尽管 GaAs 外

表 1 三块不同 GaAs 外延层厚度的 GaAs/Si 样品退火前后  $L_p$  的增加率

样 品	SM592	SM571	SM622
测试方法	MPCS SPV	MPCS SPV	MPCS SPV
厚度( $\mu\text{m}$ )	3.3	4.2	5.2
$n(\text{cm}^{-3})$	$6.8 \times 10^{15}$	$3 \times 10^{17}$	$2 \times 10^{17}$
退火前 $L_p$	0.45 /	0.4 0.35	0.45 0.43
退火后 $L_p$	0.85 /	0.6 0.58	0.5 0.51
$L_p$ 增加率	89%	50%	11%

延层浓度差二个数量级,由于各自 GaAs 层厚度的不同,导致二者扩散长度  $L_p$  数值均在  $0.45\mu\text{m}$  左右.相反,随外延层的增厚双轴张应力却随之而增大<sup>[7]</sup>,显然对于一个热膨胀失配体系,厚度的增加必然会在降温时经历更大的热应力冲击,也会由此引入更多的热缺陷,因此外延层晶体质量是随着厚度增加而退化.这点在表 1 中也能很明显地看到这种变化,即三个样品经热退火后各自的扩散长度增大的幅度是随 GaAs 外延层厚度增加而减小,特别是 SM571 与 SM622 二样品 GaAs 外延层浓度一样,由于两者外延层厚度不同,经热退火后前者  $L_p$  增大 50% 而后者只增大 11%

显而易见,对于一个既存在晶格失配,又存在热膨胀系数失配的 GaAs/Si 材料体系,在两者对外延层晶体质量都产生影响的情况下, GaAs 外延层必有一个最佳厚度使其获得较好的晶体质量和最佳退火温度随厚度而变化.

从以上分析结果表明对于一定 GaAs 外延层厚度的 GaAs/Si 材料在整个退火温度区域内的确存在一个最佳热退火温度在这个温度区域内对 GaAs/Si 材料进行热退火能有效地降低 GaAs 外延层中由于晶格失配所引入的失配位错等缺陷密度,对晶体质量有明显改善.

## 4 结论

1 用 MPCS 测定了 GaAs 外延层浓度为  $2 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ ,厚度为  $3.3\mu\text{m}$  MBE-GaAs/Si 样品退火前后 GaAs 层  $L_p$  值的变化,同时测定与分析了该样品退火前后 DCRD 谱半峰宽明显变窄,以及结合 J. W. Lee 等人用 (TEM) 所观察到 GaAs/Si 材料在退火前后外延层失配位错密度下降均有力说明了热退火对改善 GaAs 层晶体质量和 GaAs 层  $L_p$  增大的原因.

2 用 SPV 法测定了 GaAs 外延层浓度为  $(2-5) \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$  厚度为  $4.2-5\mu\text{m}$  MBE-GaAs/Si 样品随退火温度增大时 GaAs 层  $L_p$  数值变化的测定.并用不同的测试方法对 GaAs 层  $L_p$  数值进行监测,二者测试结果基本一致.

3 分析与讨论了 GaAs/Si 材料 GaAs 外延层  $L_p$  数值随整个退火温度区域内变化情况,确定出对于一定厚度的 GaAs/Si 材料的最佳的热退火温度.

**致谢** 文中所用样品为冶金所分子束外延组提供,微波光电导谱测试得到复旦大学褚幼令同志的帮助,在此一并衷心感谢.

## 参 考 文 献

- [1] N. Chand *et al.*, J. Appl. Phys., 1990, **67**:2343.
- [2] C. Choi, Appl. Phys. Lett., 1987, **50**:992.
- [3] J. W. Lee, Appl. Phys. Lett., 1987, **50**:31.
- [4] 陈朝, 1981 全国 GaAs 会议集, 227.
- [5] 褚幼令, 半导体学报, 1990, **11**(10):751.
- [6] N. Chand *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1986, **49**(13):815.
- [7] 胡福义等, 物理学报, 1991, **40**(6):962.

## Effects of Crystal Quality on Minority Carrier Diffusion of MBE-GaAs/Si Material

Hu Yusheng and Wang Le

(Shanghai Institute of Metallurgy, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050)

Received 5 November 1993, revised manuscript received 15 March 1994

**Abstract** It is possible to find the best thermal annealing temperature  $T$  for GaAs/Si having a definite GaAs layer thickness through high temperature rapid thermal annealing method with Surface Photo-Voltage (SPV), Microwave Photoconductivity Spectrum (MPCS) and Double Crystal X-ray Diffraction (DCRD). It is expected to obtain the longest minority carrier diffusion length  $L_p$  of GaAs epitaxial layer measured by SPV, MPCS and to narrow apparently the X-ray full width at half maximum (FWHM) determined by DCRD after rapid thermal annealing at temperature  $T$ . Variant informations explain powerfully that the density of defect (e. g. mismatch dislocations etc.) in MBE - GaAs/Si material is efficiently reduced after thermal annealing at temperature  $T$

**PACC:** 7360F, 6630L, 6170A