

① 97, 16(5) 321-324 321-4

1997/P1871A/016/05

# GeSi/Si 应变超晶格退火及离子注入研究

肖剑飞<sup>1)</sup> 封松林<sup>1)</sup> 彭长四<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>中国科学院半导体研究所半导体超晶格国家重点实验室,北京,100083;

<sup>2)</sup>中国科学院物理研究所,北京,100080

TN304.2  
0471.4

**摘要** 用深能级瞬态谱(DLTS)研究退火及离子注入对分子束外延生长的 GeSi/Si 应变超晶格性质的影响,观察到3个与位错有关的深中心和1个表层内的深中心,退火和离子注入都使得这些深中心的浓度增加数倍,说明 GeSi/Si 应变超晶格不适应做过多的热处理,同时测定 Pd<sup>+</sup> 注入在 GeSi/Si 超晶格的杂质能级为  $E_c=0.28\text{eV}$ ,与体 Si 中的 Pd 杂质能级一致.

**关键词** GeSi/Si 应变超晶格,退火,离子注入.

## 引言

GeSi/Si 应变超晶格不仅具有许多独特的物理性质,且与成熟的硅集成工艺兼容,人们期望它在 Si 基光电集成上有重要作用<sup>[1]</sup>. 退火和离子注入作为很重要的半导体工艺过程,在应变超晶格中表现出许多独特的效应,近年来引起了人们的关注.

对于 GeSi/Si 超晶格,退火引起的应变弛豫与合金组分、生长温度有关,而且应变弛豫是逐步发生的<sup>[2]</sup>. 离子注入产生的损伤比体材料中的损伤严重很多,且随 Ge 的组分增加而增加<sup>[4-6]</sup>,同时使得退火弛豫效应明显增强<sup>[3]</sup>.

过渡元素钯(Pd)被认为是比元素金(Au)更适合作硅开关器件的复合中心,也常作为亚微秒级载流子寿命的控制杂质,是一种重要的离子注入元素<sup>[7,8]</sup>. 本文研究了退火和钯离子(Pd<sup>+</sup>)注入对 GeSi/Si 应变超晶格性质的影响.

## 1 实验结果及分析

实验样品是分子束外延 GeSi/Si 超晶格. 在 p 型 Si<100>衬底上外延 100nm Si 缓冲层,接着共度生长 4nm 的 Ge<sub>0.2</sub>Si<sub>0.8</sub>和 20nm 的 Si 层,Ge<sub>0.2</sub>Si<sub>0.8</sub>层和 Si 层共交替生长 10 个周期,最后是 50nm 的 Si 帽层,所有外延生长在 650℃ 进行,外延层为弱 n 型. 样品结构如图 1.

将样品切成 4 个部分,分别记作 1、2、3、4 号. 2 号样品在 800℃ 下通氮气快速退火 (RTA) 10s. 3 号和 4 号样品在室温下注入钯离子(Pd<sup>+</sup>),注入条件为:离子能量  $E=500\text{KeV}$ ,剂量  $d=1\times 10^{18}/\text{cm}^2$ ,注入电流  $I=0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,注入深度中心在 200nm 左右. 由于注入电流很小,粒子能量不高,离子注入所引起的晶格损伤和热效应可以忽略不计. 4 号样品注入后在 800℃ 下通氮气快速退火 10s. 最后在 4 个样品背面蒸铝制成欧姆接触,正面蒸发直径  $\phi\approx 1\text{mm}$  的金点形成肖特基接触.

4个样品在反向偏压  $V_R = -2V$ 、注入脉冲高度  $V_P = 2V$ 、脉冲宽度  $P_w = 0.1ms$ 、率窗  $t = 2.07ms$  的条件下进行 DLTS 测量,其中 1,2 号及 3 号样品的典型谱如图 2 所示。

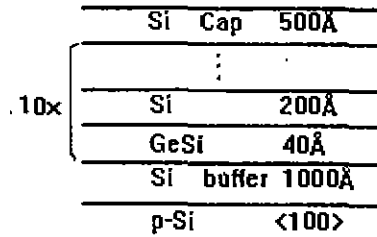


图1 样品结构

Fig. 1 Schematic of sample used in this study

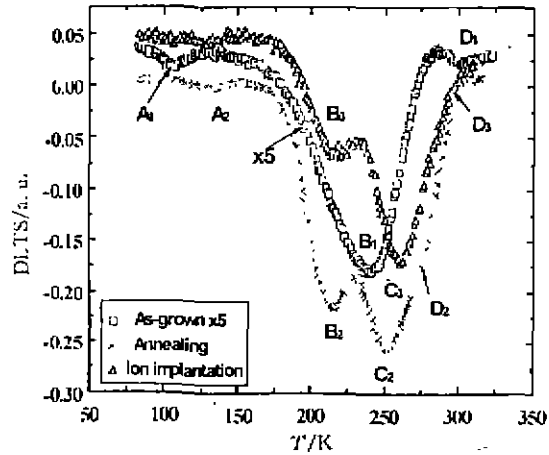


图2 原始样品及其退火和离子注入(未退火)后的典型 DLTS 谱

Fig. 2 Typical DLTS spectra of as-grown, annealed, and ion-implanted sample

1号样品存在3个深中心峰,记作  $A_1$ 、 $B_1$ 、 $D_1$ (下标表示样品编号),其中  $A_1$  和  $D_1$  的能级位置分别为  $\Delta E_{A_1} = E_C - 0.17eV$ ,  $\Delta E_{D_1} = E_C - 0.56eV$ . 深中心峰  $B_1$  的 DLTS 谱有明显加宽,低温部分尤其显著,  $(\ln(T^2 e_n^{-1}) - 1/T)$  曲线偏离线性,应是一复合峰。

对退火的2号样品探测到4个深中心峰,标作  $A_2$ 、 $B_2$ 、 $C_2$  和  $D_2$ . 其能级位置分别在  $\Delta E_{A_2} = E_C - 0.21eV$ ,  $\Delta E_{B_2} = E_C - 0.32eV$ ,  $\Delta E_{C_2} = E_C - 0.4eV$ . 深中心  $D_2$  和 DLTS 峰由于受到  $C_2$  的影响,形状很不规则,能级位置约为  $\Delta E_{D_2} = E_C - 0.5eV$ .

退火后深中心的浓度明显升高,相当于原来浓度的5倍多.说明退火不仅不能消除这些深中心,反而导致应变弛豫和应力释放,产生大量失配位错,引入更多的此类深中心.复合峰  $B_1$  实际包含两个深中心,退火应变弛豫使这两个深中心的能级位置发生变化,而成为两个独立的 DLTS 峰,对应退火后的峰  $B_2$  和  $C_2$ ,即  $B_1 \rightarrow B_2 + C_2$ .

离子注入(未退火)DLTS 谱与退火的 DLTS 谱比较相似,除了峰  $A_3$  未出现外,峰  $B_3$  与  $B_2$ 、 $C_3$  与  $C_2$  对应得较好,峰  $D_3$  不是很明显.深中心  $B_3$  和  $C_3$  的能级位置分别为  $\Delta E_{B_3} = E_C - 0.335eV$  和  $\Delta E_{C_3} = E_C - 0.43eV$ . 与退火一样,深中心浓度增大,深中心峰  $B_1$  代之为两个深中心峰  $B_3$  和  $C_3$ . 这些现象也与应变弛豫有关,由于注入离子并未激活,因此仅与离子注入引起的应力变化有关.离子注入总会在周围产生一定程度的晶格畸变和晶格损伤,从而引入位错.位错具有的能量往往比较高,这些新增加的能量,打破原来的能量平衡,使得应变层里的面应变能密度超过形成一个螺旋位错所需要的能量密度,于是 GeSi/Si 超晶格发生应变弛豫.

由上述分析可知深中心  $B_2$  和  $B_3$ 、 $C_2$  和  $C_3$  本质上具有相同的起因,分别起源于某类相同的位错.两者在超晶格应力作用下,DLTS 谱叠加成为峰  $B_1$ . 退火或者离子注入(未退火)

后,应力释放或部分释放,两个深中心表现在 DLTS 谱上分别就是  $B_2$  和  $C_2$  或者  $B_3$  和  $C_3$ , 但深中心  $B_2$  和  $B_3$ 、 $C_2$  和  $C_3$  的发射率相差较大,其相应的 Arrhenius 图如图 3 所示,尽管它们分别由相同的位错引起,但由于退火和离子注入导致的应变弛豫程度不一样,使得深中心的性质差别很大. 这样,我们就得到关于  $B_1$ 、 $B_2$  和  $C_2$  以及  $B_3$  和  $C_3$  的比较清晰的物理图象,即它们分别对应不同应力状态下起源于相同位错的两个深中心.

离子注入再退火又得到 4 个深中心,依次记作  $A_4$ 、 $I$ 、 $B_4$  和  $D_4$ ,其能级位置分别在  $\Delta E_{A_4} = E_C - 0.184\text{eV}$ ,  $\Delta E_I = E_C - 0.28\text{eV}$ ,  $\Delta E_{B_4} = E_C - 0.38\text{eV}$ ,  $\Delta E_{D_4} = E_C - 0.54\text{eV}$ . 深能级  $\Delta E_I$  指认为注入钯离子退火激活后在超晶格中形成的钯杂质能级,与文献[7]和[13]的钯离子在晶体 Si 中的杂质能级基本一致. 但 DLTS 谱与退火及离子注入(未退火)的 DLTS 谱相差甚远,却与原始谱有点相似,如图 4,推测这可能与激活的  $\text{Pd}^+$  与位错的相互作用有关,其物理机制还有待进一步研究.

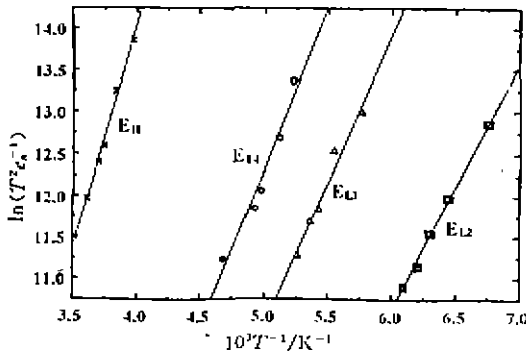


图 3 退火后深中心  $B_2$  和  $C_2$  以及离子注入(未退火)后深中心  $B_3$  和  $C_3$  的 Arrhenius 图  
Fig. 3 Arrhenius plot of deep centers  $B_2$  and  $C_2$  of annealed sample, and of deep centers  $B_3$  and  $C_3$  of ion-implanted sample

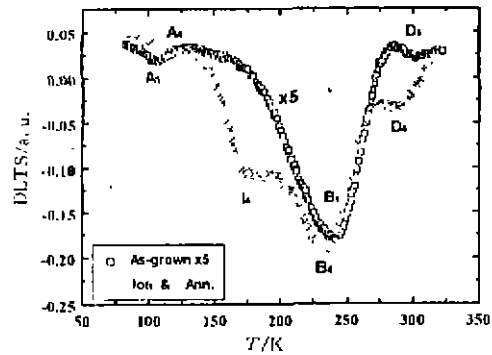


图 4 原始样品及其离子注入再退火后的 DLTS 谱  
Fig. 4 DLTS spectra of as-grown and annealed, ion-implanted sample

对照文献[9~12], 4 个样品中所有记作 B、C 和 D 的深中心都是与位错有关的扩展深中心. 标为 A 的深中心可能与表面态有关, 因为只有在零偏或正偏条件下才能在 DLTS 谱上探测到, 退火也不能消除, 离子注入(未退火)后引起表面损伤能使其消失, 退火后又恢复. 它的起因还有待进一步研究.

## 2 结论

我们研究了退火和离子注入对 GeSi/Si 应变超晶格性质的影响, 结果表明退火不能消除 GeSi/Si 应变超晶格中与位错有关的扩展深中心, 相反退火使超晶格应变弛豫, 产生大量的失配位错和其它位错, 与此相关的深中心浓度大大升高. 离子注入同样造成 GeSi/Si 应变超晶格应变弛豫, 使得深中心浓度大大升高. 这些深中心对材料和器件往往十分有害, 因此应在工艺中尽量避免.

$\text{Pd}^+$  注入 n 型 GeSi/Si 超晶格和在体材料 Si 中所形成的深杂质能级基本相同, 很容易

理解,因为 GeSi/Si 的能带不连续量主要分配在价带,导带能带差异较小,而且样品中 GeSi 的比重较小,主要是 Si 层中的 Pd<sup>+</sup>能级在起作用。

### REFERENCES

- 1 Lie C, D Y, Song J H, *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **66**(5), 592
- 2 周国良. 博士学位论文, 复旦大学(ZHOU G L. Doctor's Thesis, Fudan Univ.), 1993
- 3 Hull R, Bean J C, Bonar J M, *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(24), 2445
- 4 Lie C D Y, Vantomme A, *et al.*, *J. Appl. Phys.*, 1993, **74**(10), 6039
- 5 Vos M, Wu C. *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **58**, 951
- 6 Haynes T E, Holland O W. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**, 61.
- 7 Zhou J, Wang L, *et al.* *Mater. Sci. Forum.*, 1989, **38~41**, 403.
- 8 阮圣央, 周洁, 等. 半导体学报(RAN S Y, ZHOU J, *et al.* *Chin. J. Semiconductors*), 1984, **5**(3), 266
- 9 Brighten J C, Hawkins I D, *et al.*, *J. Appl. Phys.*, 1994, **76**(7), 4237
- 10 Grillot P N, Ringel S A, *et al.* *J. Appl. Phys.*, 1995, **77**(2), 676
- 11 Schmalz K, Yassievich I N, *et al.* *Phys. Rev. B.*, 1994, **50**(19), 14287
- 12 Grillot P N, Ringel S A, *et al.* *J. Appl. Phys.*, 1995, **77**(7), 3248
- 13 Yunusov M S, *et al.* *Sov. Phys. Semicond.*, 1978, **12**, 1423

## INVESTIGATION OF ANNEALING AND ION IMPLANTATION IN GeSi/Si SUPERLATTICE

XIAO Jian-Fei<sup>1)</sup> FENG Song-Lin<sup>1)</sup> PENG Chang-Si<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>National Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

<sup>2)</sup>Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** The effects of annealing and ion implantation on GeSi/Si strained superlattice grown by MBE were investigated using DLTS. Three deep centers related to dislocation and one deep center in the surface were observed. By annealing and ion implantation, the concentrations of these deep centers were increased by several times, indicating that these processes are unfit to GeSi/Si strained superlattice. The deep level of Pd<sup>+</sup> implanted in GeSi/Si superlattice is at  $E_C - 0.28\text{eV}$ , which is in agreement with that in Si.

**Key words** GeSi/Si, strained superlattice, thermal annealing, ion implantation.