

# Ge<sub>0.4</sub>Si<sub>0.6</sub>/Si 多量子阱与 Ge/Si 短周期超晶格样品中的深中心

王海龙 司俊杰<sup>1</sup> 封松林

(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>1</sup> 中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点实验室 北京 100083)

**摘要** 用深能级瞬态谱(DLTS)研究了分子束外延生长的 Ge<sub>0.4</sub>Si<sub>0.6</sub>/Si 多量子阱与 Ge/Si 应变超晶格样品中深能级中心的性质。在两种样品中都观测到两个多数载流子中心和一个少数载流子中心。在 Ge<sub>0.4</sub>Si<sub>0.6</sub>/Si 多量子阱样品中深中心 E<sub>2</sub> 的能级位置为  $E_C - 0.30\text{eV}$ , E<sub>3</sub> 的能级位置为  $E_C - 0.22\text{eV}$ 。并且在正向注入下随着 E<sub>2</sub> 峰的消失观测到一个少数载流子峰 SH<sub>1</sub>, 其能级位置为  $E_V + 0.68\text{eV}$ 。在 Ge/Si 应变超晶格中, 深中心 H<sub>1</sub> 的能级位置为  $E_V + 0.44\text{eV}$ , 深中心 H<sub>2</sub> 的能级位置为  $E_V + 0.24\text{eV}$ 。发现反向多数载流子注入脉冲下随着多子峰 H<sub>1</sub> 的消失观测到了少子峰 SE<sub>1</sub>, 少子峰能级位置为  $E_C - 0.75\text{eV}$ 。E<sub>2</sub> 和 SH<sub>1</sub>, H<sub>1</sub> 和 SE<sub>1</sub> 两个峰可能分别由同一缺陷引起, 该缺陷是与位错有关的深中心。相信对这些缺陷的深入了解对于 Ge/Si 量子阱与超晶格样品在光电子器件的应用上具有很重要的意义。

PACC: 7155, 7360F

## 1 引言

硅是微电子学领域最重要的半导体材料, 其工艺技术和集成电路技术得到了高度发展。将硅从微电子学领域扩展到光电子领域, 发展集成电子学功能和光子学功能于一体的硅基光电子器件与回路已成为一个重要的发展趋势<sup>[1-3]</sup>。但是由于 Si 本身在能带结构上的缺点, 即它是非直接带, 在可见光范围内发光效率极低, 使其在光电器件的应用上受到极大限制。为解决这一难题, 近来作了大量的研究工作<sup>[2,4]</sup>, 提出了许多尝试性的方法, 比如硅氢化合物、掺杂、多孔硅等, 而 GeSi/Si 应变超晶格和量子阱就是其中较有希望并获得一定成功的方向。由于它们本身的优良特性及与传统 Si 集成工艺的兼容性, 近年来受到极大的关注, 人们期望它在 Si 基光电集成上有重要作用<sup>[5-8]</sup>。虽然 Si 和 Ge 存在着 4.2% 的晶格失配, 但在临界厚度以内可以通过弹性形变而在平行于界面方向上达到一个统一的平衡晶格常数, 形成位错密度较低的应变层超晶格。但由于晶格畸变而产生弹性应力, 这种超晶格是一种亚稳结构, 在界面处不可避免地会形成一些位错。这些位错和晶格失配将会在禁带引入深中

王海龙 男, 1971 年出生, 博士生, 目前主要从事化合物半导体电学性质的研究工作

封松林 男, 1964 年出生, 研究员, 现从事低维半导体物理性质的研究

1998-11-09 收到, 1999-03-25 定稿

心,它们将成为有效的载流子陷阱或复合中心.这些深能级中心会影响电子器件(如场效应晶体管、异质结双极晶体管等)的增益参数、漏电流和少数载流子复合寿命等.因此为了优化器件特性,需要更好的了解这些深中心对载流子的俘获和发射特性.尽管人们对应变 Si 中与位错有关的深中心的电学特性已经进行了细致的研究<sup>[9,10]</sup>,但对 GeSi/Si 量子阱和超晶格样品中深中心的研究还远远不够<sup>[11,12]</sup>.本文利用深能级瞬态谱方法对 Ge<sub>0.4</sub>Si<sub>0.6</sub>/Si 多量子阱与 Ge/Si 短周期超晶格中的深中心的电学特性进行了细致的研究.

## 2 实验和讨论

本文研究的两种样品都是分子束外延(MBE)方法在 V80 系统上生长的,Ge<sub>0.4</sub>Si<sub>0.6</sub>/Si 多量子阱样品的生长温度为 800 °C,在 N 型 Si 100 衬底上生长 200nm 的 Si 缓冲层,接着共度生长 2.5nm 的 Ge<sub>0.4</sub>Si<sub>0.6</sub>和 10nm 的 Si,共交替生长 3 个周期,最后是 100nm 的 Si 帽层.为了讨论方便我们把该样品称作 S1.用扩展电阻法测量样品表面为 N 型,载流子浓度为  $6 \times 10^{14}/\text{cm}^3$ .由于样品结构层较薄,为了确定 DLTS 信号中的各峰值到底是由生长的 Ge<sub>0.4</sub>Si<sub>0.6</sub>/Si 多量子阱结构引起的,还是由衬底和缓冲层引起,我们把样品腐蚀后,进行了比较测量.腐蚀分轻重两种情况,轻腐蚀只把多量子阱结构腐蚀掉,即腐蚀到缓冲层.重腐蚀一直腐蚀到 Si 衬底,把缓冲层和多量子阱结构全腐蚀掉. Ge/Si 应变超晶格样品的生长温度为 700 °C,在 N 型 Si 100 衬底上生长 200nm 的 Si 缓冲层,接着共度生长 0.7nm 的 Ge 和 5nm 的 Si,共交替生长 8 个周期,最后是 100nm 的 Si 帽层.为了讨论方便我们称该样品为 S2.用扩展电阻法测量样品表面为 P 型,载流子浓度为  $4 \times 10^{14}/\text{cm}^3$ .同样把外延层腐蚀只留下衬底进行了比较测量.对于多量子阱样品 S1,外延层为 N 型,蒸铝形成 Schottky 势垒.对于超晶格样品外延层为 P 型,蒸铝合金形成欧姆接触,样品衬底为 N 型,外延层为 P 型,为 PN 结结构.两种样品都是在背面离子注入剂量为  $1 \times 10^{16}/\text{cm}^2$  的磷(P),然后蒸金做成欧姆接触.

DLTS 测量是在瑞典 NNOVANCE AB 型深能级瞬态谱仪上进行的,温度变化范围为 77K 到 360K.

### 2.1 Ge<sub>0.4</sub>Si<sub>0.6</sub>/Si 多量子阱样品

由于样品表面为 N 型,多数载流子为电子.在多子填充脉冲条件下的 DLTS 测量中,测得样品中存在三个深中心,分别计作 E1(高温峰)、E2(中间温度峰)和 E3(低温峰),见图 1.改变率窗进行测量,作各能级的 Arrhenius 图(见图 2),可知其表观激活能分别为  $E_1 = E_c - 0.37\text{eV}$ ,  $E_2 = E_c - 0.30\text{eV}$ ,  $E_3 = E_c - 0.22\text{eV}$ .同时根据 DLTS 测量定出各中心的浓度分别为 E1( $3.8 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ ), E2( $4.9 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ ), E3( $5.1 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ ).把样品上表面结构层腐蚀掉,留下缓冲层和衬底,进行 DLTS 测量,发现 DLTS 信号中仍然有一个峰  $E_{qt}$  存在,其能级位置为  $E_{qt} = E_c - 0.36\text{eV}$ ,其浓度为  $3.5 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ .把样品上面结构层和缓冲层全部腐蚀掉,只留衬底,进行 DLTS 测量,DLTS 谱中未发现明显的峰值.对比同一率窗下这三种情况的深能级谱(图 1),可以看出轻腐蚀后样品中深能级谱的峰值  $E_{qt}$  位置与未腐蚀样品深能级瞬态谱中高温峰 E1 的位置非常接近,可见这两个能级对应同一缺陷,是由缓冲层中的缺陷引起.而 E2 和 E3 在腐蚀后没有再出现,可以确认它是由 Ge<sub>0.4</sub>Si<sub>0.6</sub>/Si 多量子阱结构层引起的.

改变注入脉冲高度,使其在脉冲期间正向注入少子,进行变率窗 DLTS 测量,发现多子峰 E2 消失,同时出现了少子峰 SH1,两种情况下的比较图见图 3.少子峰 SH1 的能级位置

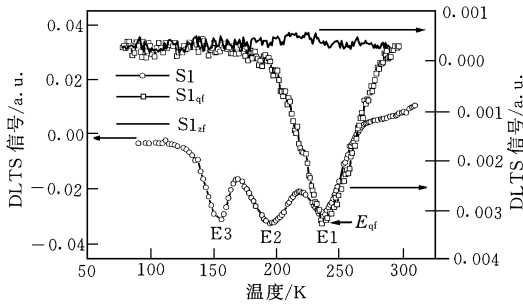


图 1 样品 S1 腐蚀前后的 DLTS 谱比较  
测量率窗为 4.14, 样品反向偏压为 -0.5V, 填充脉冲偏压为 0V, 填充脉宽为 2ms

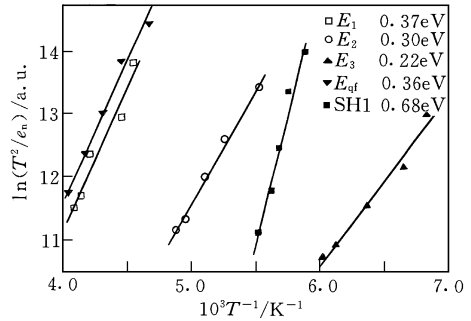


图 2 样品 S1 中各能级的 Arrhenius 图

由 Arrhenius 图 (图 2) 知为  $E_{SH1} = E_v + 0.68\text{eV}$ . 由于少子峰的浓度由深能级谱不太好确定, 这里没有给出其浓度

### 2.2 $\text{Ge}/\text{Si}$ 应变超晶格样品

由于样品表面为 P 型, 多数载流子为空穴 在多子填充脉冲条件下的 DLTS 测量中, 测得样品存在两个深能级, 分别计作 H1 (高温峰) 和 H2 (低温峰), 见图 4 改变率窗进行 DLTS 测量, 作各能级的 Arrhenius 图 (见图 5), 可知其表观激活能分别为  $E_{H1} = E_v + 0.44\text{eV}$ ,  $E_{H2} = E_v + 0.24\text{eV}$ , 其浓度分别为 H1 ( $3.2 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ ), H2 ( $8.2 \times 10^{11}/\text{cm}^3$ ). 把样品结构层腐蚀掉, 只留下衬底进行 DLTS 测量, 没有发现明显的缺陷 所以缺陷的产生应该为结构层所致

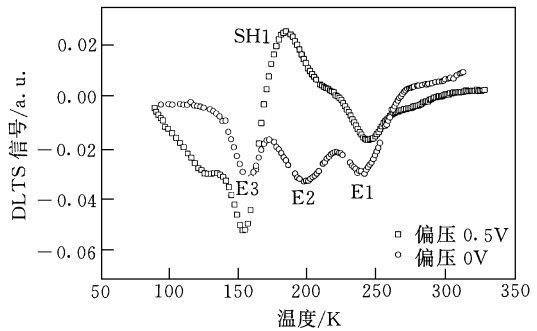


图 3 样品 S1 多子脉冲与少子脉冲的 DLTS 谱比较  
测量率窗为 4.14, 样品反向偏压为 -0.5V, 填充脉宽为 2ms, 填充脉冲偏压分别为 0V 和 0.5V

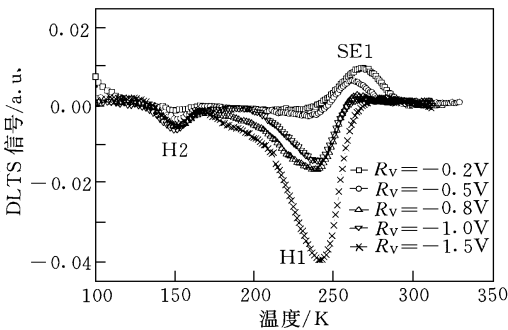


图 4 样品 S2 在不同反向偏压下的 DLTS 谱  
测量率窗为 8.28, 填充脉冲偏压为 0V, 填充脉宽为 2ms, 样品反向偏压分别为 -0.2V、-0.5V、-0.8V、-1.0V 和 -1.5V.

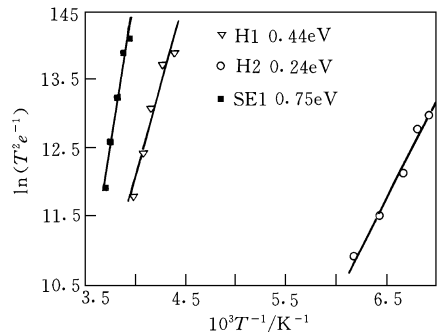


图 5 样品 S2 中深能级的 Arrhenius 图

在实验中观测到了一种比较少见的现象,随着反向偏压的减少高温峰 H1 的幅度逐渐变小,当偏压小到一定程度时,高温峰 H1 消失,并观测到一个少子峰 SE1,见图 4 由图 5 知该少子峰的表现激活能为  $E_{SE1} = E_C - 0.75\text{eV}$ 。一般来说要观测到少数载流子能级需要加正向少数载流子注入脉冲,在反向多数载流子注入脉冲下一般不会观测到少数载流子能级,当然这个能级也有可能由假的信号引起,但是我们可以由同一能级在正向少子注入脉冲下同样在样品中出现来排除这一点 伴随多子峰消失同时出现少子峰说明这两个峰可能是由同一缺陷引起,在 DLTS 测量过程中无论正向注入或是在反向偏压下都观测到了该能级,可能是由于该深中心对电子的俘获能力大于对空穴的俘获能力而产生的 当然也有可能随着偏压的不同,缺陷的荷电状态不同所致

### 2.3 讨论

在两种样品中均观测到两个多数载流子中心,可见它们为该类样品中常见的深能级 样品未有意掺杂,基本可以排除深中心为杂质缺陷能级的可能性 由 DLTS 谱的有关理论可知,对于点缺陷 DLTS 谱应该满足半高全宽  $\text{FWHM} = 0.1T_P$ ,其中  $T_P$  为 DLTS 谱峰值温度<sup>[13]</sup>,并且这个值并不随着填充脉冲  $t_p$  的变化而改变 从图 1 和图 4 中可以看出这几个峰的 DLTS 谱相对理想的点缺陷是明显展宽的 我们知道,在生长  $\text{Ge}_{0.4}\text{Si}_{0.6}/\text{Si}$  多量子阱与 Ge/Si 应变超晶格时由于晶格畸变而产生弹性应力,在界面处不可避免地会形成一些位错 这些位错和晶格失配将会在禁带引入深中心,它们将成为有效的载流子陷阱或复合中心 而与位错有关的深中心的 DLTS 谱一般都是展宽的,我们观测到的深能级有可能是与位错有关的深中心引起的

位错的 DLTS 谱和点缺陷的 DLTS 谱相比有明显的展宽,并且与位错有关的深中心的

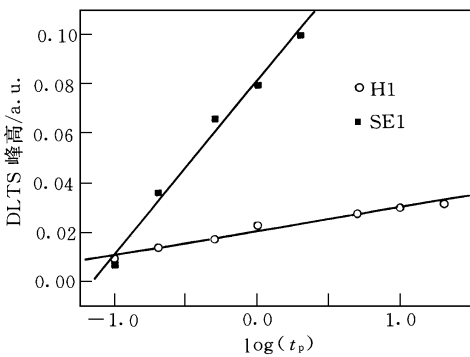


图 6 多子峰 H1 与少子峰 SE1 的对数俘获行为 测量率窗为 8.28,测量反向偏压为 -1V,填充脉宽为 2ms,H1 峰填充脉冲偏压为 0V,SE1 峰填充脉冲偏压为 1V.

俘获行为遵从对数俘获动力学,而不是像普通的点缺陷那样遵从指数俘获动力学 也就是说载流子俘获和 DLTS 填充脉冲时间  $t_p$  之间不是像理想的点缺陷那样成指数关系,而是和  $t_p$  之间成对数关系,也就是 DLTS 峰高和  $\log(t_p)$  之间应成线性关系<sup>[14]</sup>. 由于在  $\text{Ge}_{0.4}\text{Si}_{0.6}/\text{Si}$  多量子阱样品中,各个能级之间有些交叠,不便于测量 DLTS 谱高度与填充脉冲宽度之间的关系,我们对 Ge/Si 应变超晶格样品中的 H1 和 SE1 能级进行了细致的研究 从图 6 中可以看出 DLTS 谱峰高度和  $\log(t_p)$  之间确实成线性关系 这也表明我们所观测到的能级 H1 和 SE1 是和扩展缺陷如位错等有关

在  $\text{Ge}_{0.4}\text{Si}_{0.6}/\text{Si}$  多量子阱样品中随着少数载流子能级 SH1 的出现伴随着多数载流子能级 E2 的消失 而在 Ge/Si 应变超晶格样品中也随着少数载流子能级 SE1 的出现伴随着多数载流子能级 H1 的消失 根据这一现象,我们认为在这两个样品中 E2 和 SH1 能级,H1 和 SE1 能级可能由同一缺陷引起,该缺陷既能俘获电子也能俘获空穴,推测是一与位错有关的复合中心 在不同测量条件下同一缺陷既能俘

获电子又能俘获空穴可解释为由于缺陷的荷电状态不同而致

### 3 结论

本文用深能级瞬态谱(DLTS)研究了分子束外延生长的  $\text{Ge}_{0.4}\text{Si}_{0.6}/\text{Si}$  多量子阱与  $\text{Ge}/\text{Si}$  应变超晶格中深能级中心的性质。在  $\text{Ge}_{0.4}\text{Si}_{0.6}/\text{Si}$  多量子阱样品中观察到三个深能级中心,其中高温峰 E1 能级位置为  $E_c - 0.37\text{eV}$ , 中间温度峰 E2 能级位置为  $E_c - 0.30\text{eV}$ , 低温峰 E3 能级位置为  $E_c - 0.22\text{eV}$ 。并且通过对腐蚀前后样品的分别测量,确定 E1 是由缓冲层中的缺陷引起,而 E2 和 E3 是由  $\text{Ge}_{0.4}\text{Si}_{0.6}/\text{Si}$  多量子阱结构中的缺陷引起。并且在正向注入下随着 E2 峰的消失观测到一个少数载流子峰 SH1,其能级位置为  $E_v + 0.68\text{eV}$ 。在  $\text{Ge}/\text{Si}$  应变超晶格中观察到两个深中心,其中高温峰 H1 能级位置为  $E_v + 0.44\text{eV}$ , 低温峰 H2 能级位置为  $E_v + 0.24\text{eV}$ 。发现 H1 峰的俘获行为为对数俘获行为,并在反向多数载流子注入脉冲下随着多子峰的消失观测到了少子峰 SE1,少子峰能级位置为  $E_c - 0.75\text{eV}$ 。我们认为 E2 和 SH1、H1 和 SE1 两个峰可能分别由同一缺陷引起,该缺陷是与位错有关的深中心,在不同条件下同一缺陷既能俘获电子又能俘获空穴可以解释为其荷电状态不同。通过对这两种样品的测量我们发现无论在  $\text{Ge}_{0.4}\text{Si}_{0.6}/\text{Si}$  多量子阱与  $\text{Ge}/\text{Si}$  应变超晶格样品中都存在两个多数载流子中心,高温端的深中心既能俘获电子也能俘获空穴,可能是与位错有关的复合中心。相信对这些缺陷的深入了解对于  $\text{Ge}/\text{Si}$  量子阱与超晶格样品在光电子器件的应用上具有很重要的意义。

### 参 考 文 献

- [1] 刘育梁,王启明,红外与毫米波学报,1996,15(1): 65
- [2] 王启明,物理学进展,1996,16(1), 75
- [3] 余金中,半导体杂志,1998,22(1), 21
- [4] 司俊杰,杨沁清,王红杰,等,半导体学报,1998,19(6), 477
- [5] R. Zachai, K. Eberer, G. Abstreiter *et al*, Phys Rev. Lett, 1990, 64: 1055
- [6] D. Shen, K. Zhang and X. Xie, Appl Phys Lett, 1988, 52: 717
- [7] M. Ikeda, K. Terakura and T. Oguchi, Phys Rev. B, 1993, 48: 1571
- [8] C. Tserbak, H. M. Polatoglu and G. Theodorou, Phys Rev. B, 1993, 47: 7104
- [9] T. Wosinski, J. Appl Phys, 1989, 65: 1566
- [10] P. Om ling, E. R. Weber, L. Montelius *et al*, Phys Rev. B, 1985, 32: 6751
- [11] P. N. Grillo, S. A. Ringel *et al*, J. Appl Phys, 1995, 77(7): 3248
- [12] J. C. Brighten, I. D. Hawkins *et al*, J. Appl Phys, 1995, 76(7): 4237
- [13] L. C. Kimerling and J. R. Patel, Appl Phys Lett, 1979, 34: 73
- [14] P. N. Grillo, S. A. Ringel, E. A. Fitzgerald *et al*, J. Appl Phys, 1995, 77(2): 676

## Deep Centers in $\text{Ge}_{0.4}\text{Si}_{0.6}/\text{Si}$ Multiple Quantum Well and Ge/Si Strained Superlattice

Wang Hailong, Si Junjie<sup>1</sup>, Feng Songlin

*National Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors,  
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)*

*(1 State Key Lab On Integrated Optoelectronics, Institute of  
Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)*

Received 9 November 1998, revised manuscript received 25 March 1999

**Abstract** The Properties of deep centers in  $\text{Ge}_{0.4}\text{Si}_{0.6}/\text{Si}$  multiple quantum well and Ge/Si strained superlattice grown by MBE are investigated using Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS). In both samples, two deep majority carrier centers and one minority carrier center are observed. For the sample of  $\text{Ge}_{0.4}\text{Si}_{0.6}/\text{Si}$  multiple quantum well, E2 peak locates at  $E_C - 0.30\text{eV}$ , E3 peak locates at  $E_C - 0.22\text{eV}$ . Under minority-carriers filling pulse conditions, SH1 peak is observed with the E2 peak disappears. It locates at  $E_V + 0.68\text{eV}$ . For the sample of Ge/Si strained superlattice, the high temperature peak H1 locates at  $E_V + 0.44\text{eV}$ , low temperature peak H2 locates at  $E_V + 0.24\text{eV}$ . Under majority-carriers filling pulse conditions, anomalous minority-carrier electron trapping SE1 are also observed. It locates at  $E_C - 0.75\text{eV}$ . We think that the E2 and SH1, H1 and SE1 may be caused by the same defect respectively. The defect may be a recombination center related to dislocation. It is very meaningful to make clear the causes of the two common defects in the samples of  $\text{Ge}_{0.4}\text{Si}_{0.6}/\text{Si}$  multiple quantum well and Ge/Si strained superlattice.

**PACC:** 7155, 7360F