

# 应变 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 材料掺杂浓度的表征技术<sup>\*</sup>

戴显英 张鹤鸣 王伟 胡辉勇 吕懿 舒斌

(西安电子科技大学微电子研究所, 西安 710071)

**摘要:** 在分析研究  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料多子迁移率模型的基础上, 建立了  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料电阻率与其 Ge 组分、掺杂浓度及温度关系的曲线谱图。同时, 通过对半导体材料掺杂浓度各种表征技术的分析和实验研究, 提出了采用四探针法表征  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料掺杂浓度的技术。此表征技术与 Si 材料掺杂浓度的在线检测技术兼容, 且更加简捷。此表征技术的可行性通过实验及对  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料样品掺杂浓度的理化分析得到了验证。

**关键词:**  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料; 四探针; 电阻率; 掺杂浓度; 迁移率模型; 表征

**EEACC:** B2530B; B2520

中图分类号: TN304. 07

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)09-0946-05

## 1 引言

$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料的禁带宽度随 Ge 组分的增加而减小, 因而可实现能带结构的人工调控。用  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料作双极晶体管的基区, 构成异质发射结, 发射效率比同质结晶体管提高好几个数量级, 可获得较高的电流增益。利用  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  异质结可产生电子或空穴势阱, 形成二维电子气或二维空穴气的性质可制备高跨导场效应晶体管。另外, 利用  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  的异质结结构形成载流子限定和光子限定, 还可应用于光放大。所以  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料是一种性能优良、极具应用潜力的高速半导体器件和光电子器件材料<sup>[1]</sup>。

材料的掺杂浓度是设计和优化器件及电路性能的关键技术, 如何简便快捷地表征  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料的掺杂浓度, 目前还缺乏相应的技术方法。表征半导体 Si 等材料掺杂浓度的技术有多种<sup>[2]</sup>, 如二次离子质谱技术、扩展电阻技术、C-V 技术、霍尔效应技术及探针技术等。然而, 除探针技术外, 这些表征技术大多设备昂贵, 需要制作专门样品或定标样品, 对于

$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  就更难于推广应用。探针技术测量的是半导体材料的电阻率, 再依据电阻率确定材料的掺杂浓度, 可广泛应用于 Si 材料掺杂浓度的表征, 但不同几何形状、尺寸的样品需要鉴别校正。虽然探针技术简便适用, 但能否应用于  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料则需要理论支持及实验验证。

本文在分析研究  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料多子迁移率与材料 Ge 组分、掺杂浓度及温度之间关系的数学模型基础上, 建立了  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料电阻率与它们之间关系的曲线图。同时, 对探针技术测量  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料电阻率进行了分析研究, 提出并建立了采用探针技术表征  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料掺杂浓度的技术。该技术首先利用四探针测定  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料电阻率, 然后根据获得的数据, 从本文建立的  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  电阻率与杂质浓度等关系曲线图中即可直接查到被测  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料的掺杂浓度。本文提出的  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料掺杂浓度表征技术, 快捷、简便, 对材料样品的几何形状、几何尺寸无特殊要求, 且具有与 Si 材料掺杂浓度检测技术兼容等优点。利用该技术测定的掺杂浓度与理化分析的结果符合得很好。

\* 模拟集成电路国家重点实验室基金资助项目(No. 99JS09. 3. 1DZ0111)

戴显英 男, 1961 年出生, 高级工程师, 主要从事半导体材料、器件物理及功率器件等方面的研究。

张鹤鸣 男, 1947 年出生, 教授, 主要从事微电子技术专业教学和器件物理及功率器件等方面的研究工作。

2002-09-21 收到, 2002-11-07 定稿

©2003 中国电子学会

## 2 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 材料多子迁移率模型及电阻率

### 2.1 多子迁移率模型

$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料一般外延生长在 Si 衬底上, 形成应变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  异质结构。由于 Si 与 Ge 之间存在约 4% 的晶格失配, 因此只能在一定的临界厚度之内生长出高质量的应变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  薄膜。晶格应变导致类硅型能带结构发生变化, 6 度简并的  $x$  导带能谷分裂成为能量降低了的一个 4 度简并导带和一个 2 度简并导带, 其中 4 度简并导带能量稍低。同时价带中简并的轻重空穴带分裂, 重空穴带能量升高。这样应变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  薄层材料迁移率除与 Ge 组分密切相关外, 在纵向(材料生长方向)和横向还具有很强的各向异性特征<sup>[3]</sup>。根据应用要求, 考虑掺杂 Ge 组

$$\mu'_I(T, N_I) = \begin{cases} \frac{68T_n^{-0.57} + \frac{1252T_n^{-2.23}}{1 + (N_D/1.45 \times 10^{17} T_n^{2.4})^{0.88T_n^{-0.146}}}}{407T_n^{-2.33}} & \text{n 型} \\ \frac{54.3T_n^{-0.57} + \frac{407T_n^{-2.33}}{1 + (N_A/2.35 \times 10^{17} T_n^{2.4})^{0.88T_n^{-0.146}}}}{1252T_n^{-2.23}} & \text{p 型} \end{cases} \quad (4)$$

其中  $T_n = T/300$ ,  $N_D$  与  $N_A$  分别为 n 型和 p 型  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  的掺杂浓度。将(2)~(4)式代入(1)式, 则可得到  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  多子空穴与多子电子横向迁移率。

### 2.2 电阻率

半导体材料电阻率与掺杂浓度、迁移率的关系式如下:

$$\rho_n = \frac{1}{N_D q \mu_n} \quad (5)$$

$$\rho_p = \frac{1}{N_A q \mu_p} \quad (6)$$

式中  $\rho_n$ 、 $\rho_p$  分别为 n 型和 p 型材料电阻率;  $\mu_n$ 、 $\mu_p$  分别为多子电子和空穴迁移率。将(1)式所示迁移率模型分别代入(5)、(6)式中, 可得到不同掺杂浓度、不同 Ge 组分以及不同温度时的  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料电阻率。图 1 和图 2 分别给出了通过计算机仿真得到的 n 型和 p 型  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  电阻率与掺杂浓度、Ge 组分及温度的关系曲线。作为示例, 图中掺杂浓度选取  $10^{14}$  ~  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$ , 温度为 3000。曲线 0、曲线 1 … 曲线 6 分别为 Ge 组分  $x = 0, 0.1, \dots, 0.6$  时, n 型或 P 型  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料电阻率与杂质浓度等的关系曲线。对于参数的其它范围值同样也可以得到。

分以及温度的影响, 本文采用的横向多子迁移率模型如下:

$$\mu(x, T, N_I) = \left[ \frac{1}{\mu_I(x, T, N_I)} + \frac{1}{\mu_A(x)} \right]^{-1} \quad (1)$$

其中

$$\mu_I(x, T, N_I) = \mu'_I(T, N_I)(1 + 4.31x - 2.28x^2) \quad (2)$$

$$[\mu_A(x)]^{-1} = \begin{cases} x(1-x)\exp(-7.68x)/160 & x \leq 0.2 \\ \exp(-3.86x)/2151 & 0.2 < x \leq 0.6 \end{cases} \quad (3)$$

式中  $x$  是  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料中的 Ge 组分;  $N_I$  为施主或受主掺杂浓度;  $T$  为温度。

对于 p 型和 n 型  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料,  $\mu'_I(T, N_I)$  分别为

$$\frac{1252T_n^{-2.23}}{1 + (N_D/1.45 \times 10^{17} T_n^{2.4})^{0.88T_n^{-0.146}}} \quad \text{n 型}$$

$$\frac{407T_n^{-2.33}}{1 + (N_A/2.35 \times 10^{17} T_n^{2.4})^{0.88T_n^{-0.146}}} \quad \text{p 型}$$

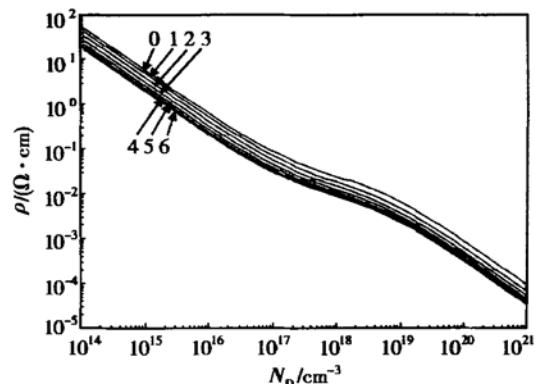


图 1 室温下不同 Ge 组分 n 型  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  电阻率与掺杂浓度关系

Fig. 1 Curves of relation between resistivity and doping concentration with different Ge composition in n-type strained  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  at room temperature

图 1、图 2 中, 在 Ge 组分  $x = 0$ (曲线 0)的极限条件下, 应分别是 n 型 Si 材料和 p 型 Si 材料的电阻率与其掺杂浓度间的关系曲线。将该曲线与常用的 Si 材料电阻率与掺杂浓度间的关系曲线相比较, 符合得较好, 说明本文采用的  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  多子迁移率模型与实际情况相符。

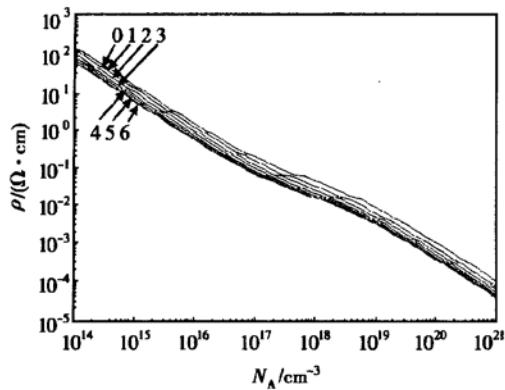


图 2 室温下不同 Ge 组分 p 型  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  电阻率与掺杂浓度关系

Fig. 2 Curves of relation between resistivity and doping concentration with different Ge composition in p type strained  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  at room temperature

### 3 掺杂浓度表征

#### 3.1 四探针法测试 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 材料电阻率

目前在半导体工艺中常用的四探针技术的主要优点是设备简单, 测试简捷, 便于在线应用, 且精度满足应用要求, 同时又对样品几何形状及尺寸无严格要求, 但对不同形状及尺寸的样品需要选择确定校正系数<sup>[2]</sup>.

四探针技术的测试原理如图 3 所示. 图中所示的四个箭头表示四根探针, 与半导体材料表面相垂直, 且在同一平面内等间距. 电流从外侧探针输入, 由中间二根探针读取电压. 对于薄层样品, 电阻率  $\rho$  表示为

$$\rho = \frac{V}{I} \times d \times \frac{\pi}{\ln 2} \quad (7)$$

式中  $d$  为被测材料薄层厚度;  $V$  和  $I$  分别表示由四探针读出的电流与电压值. 关系式(7)是通过求解平面电场的拉普拉斯方程得出的, 要求被测材料无限薄, 而且要无限大. 在实际应用中, 这两个条件是很难满足的, 因此就需要对(7)式进行修正, 得到下式

$$\rho = C_0 \times \frac{V}{I} \times d \times \frac{\pi}{\ln 2} \quad (8)$$

其中  $C_0$  是由样品薄层厚度、几何形状及尺寸等决定的一个修正系数.

理论分析表明<sup>[3]</sup>, 对无限大样品, 当薄层厚度

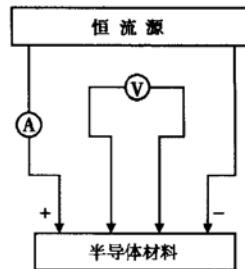


图 3 四探针测试原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of four-pointprobe testing principle

与探针间距之比小于 0.6 时, 修正系数  $C_0$  接近于 1. 而对有限大圆晶片样品, 当四探针阵列中心与圆晶片中心重合时, 只要圆晶片直径与探针间距之比大于 25, 其误差小于 1%. 通常四探针的间距为 1mm, 那么测量直径 25mm 圆晶片时已完全可以不考虑修正系数. 对于矩形薄层样品, 当短边长与探针间距之比大于 10 时, 所测电阻率误差小于 7%. 因此, 满足一定条件时修正系数可以不加考虑.

#### 3.2 掺杂浓度表征

应变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  外延生长存在临界厚度的限制<sup>[4]</sup>, 例如当 Ge 组分  $x = 0.2$  时, 厚度可以做到 250nm 左右. 组分越高, 应变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  临界厚度越小. 在实际应用中, 应变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  外延层厚度通常在数十 nm, 比如 SiGe HBT 的基区  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  层一般在 50nm 左右, 场效应晶体管中  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  层一般为几个 nm. 由于应变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  层的厚度极薄, 因此采用四探针技术测试其电阻率是非常适合的. 本研究工作表明, 即使采用(7)式而丌做任何修正, 其误差也在工程应用可以接受的范围之内.

四探针技术测试应变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  掺杂浓度的基本方法如下:

(1) 由四探针测试出应变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  薄层材料的电压  $V$  和电流  $I$ , 通过函数关系式(7)或(8)解出其电阻率  $\rho$ ;

(2) 根据应变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料的 Ge 组分  $x$  和由四探针技术得到的电阻率  $\rho$  及材料导电类型, 对照图 1(n 型) 或图 2(p 型), 可直接查出该应变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料的掺杂浓度.

### 4 实验验证及分析

根据以上讨论, 对 n 型和 p 型应变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材

料样品的掺杂浓度进行了实验分析, 结果如表 1 所示。实验中四探针的间距为 1mm, 电阻率计算应用了(7)式, 未加修正, 实验样品采用 MBE(分子束外延)制备。材料中的 Ge 组分与厚度由 MBE 工艺条件给出, 同时又通过 X 射线四晶衍射对样品 Ge 组分进行了测定, 用化学 C-V 技术对样品厚度进行了测定, 测得的数据与工艺给出的数据基本相同。

表 1 不同掺杂浓度样品实验测试数据

Table 1 Testing data of doping concentration in strained  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  sample

样品	Ge 组分	厚度/nm	掺杂浓度/ $\text{cm}^{-3}$ (C-V 技术)	掺杂浓度/ $\text{cm}^{-3}$ (本技术)
1# (p型)	0.15	80	$1.0 \times 10^{19}$	$7.6 \times 10^{18}$
2# (p型)	0.35	150	$9.0 \times 10^{18}$	$1.2 \times 10^{19}$
3# (p型)	0.21	110	$4.0 \times 10^{19}$	$5.0 \times 10^{19}$
4# (p型)	0.24	130	$4.0 \times 10^{19}$	$6.9 \times 10^{19}$
5# (n型)	0.30	120	$1.0 \times 10^{20}$	$7.5 \times 10^{19}$
6# (n型)	0.27	120	$1.2 \times 10^{20}$	$8.5 \times 10^{19}$
7# (n型)	0.21	120	$1.2 \times 10^{20}$	$8.0 \times 10^{19}$

为验证此表征技术的测试结果, 研究中又将  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  样品用电化学 C-V 技术<sup>[5]</sup>进行了掺杂浓度的测试分析, 其结果如表 1 中所示。从测试结果可见, 采用本文所提出的技术得到的掺杂浓度与采用 C-V 技术得到的掺杂浓度基本相同。如果考虑修正因子, 利用(8)式计算电阻率二者得到的掺杂浓度将会更接近, 但考虑修正因子会使测试过程变得复杂。分析此技术与 C-V 技术测试结果的误差, 主要来源于以下几个方面: 一是在  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  界面杂质浓度存在过渡区; 二是高掺杂下杂质未能完全电离; 三是  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  层的 Ge 组分和厚度的测量也会存在一定误差; 四是 C-V 技术本身的精度也有一定局限。

上述理论分析和实验验证结果表明: 对于应变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料, 采用四探针技术表征其掺杂浓度是可行的。

## 5 结论

本文建立的应变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料迁移率及电阻率的模型有较高精度。通过仿真分析得到的  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料电阻率与 Ge 组分、掺杂浓度及温度的关系

曲线为应变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料掺杂浓度的测定奠定了基础。

在对半导体材料掺杂浓度各种表征技术的分析研究基础上, 本文提出的采用四探针技术表征  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料掺杂浓度的技术是可行的。该表征技术与现行的 Si 材料掺杂浓度在线检测技术相容, 同时又比 Si 材料掺杂浓度表征技术更加快捷、简便。

只要利用常规的四探针技术测量出应变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  的电阻率, 然后从本文绘制的电阻率关系曲线中对照即可得出该样品的掺杂浓度。

利用该技术测量应变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料掺杂浓度的精度可以满足工程应用。

掺杂浓度的测量是  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料应用中的关键技术之一, 而目前对  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料掺杂浓度的表征还没有完整的理论体系和适用于在线检测的简便技术手段。因此, 本文提出的应变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料掺杂浓度技术将为  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  材料掺杂浓度的表征提供有益的帮助。

**致谢** 作者感谢中国科学院半导体研究所张秀兰老师所做的电化学 C-V 分析, 感谢中国科学院西安光机所张景文老师所做的四晶衍射分析。

## 参考文献

- Cressler J D. SiGe HBT technology: A new contender for Si-based RF and microwave circuit application. IEEE Trans Micro Theory Tech, 1998, 46(5): 572
- Sun Yicai. Measurement technology for semiconductors. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1984[ 孙以材. 半导体测试技术. 北京: 冶金工业出版社, 1984]
- Chen Zhiming, Wang Jiannong. Material physics basic of semiconductor devices. Beijing: Scienc Press, 1999[ 陈治明, 王建农. 半导体器件的材料物理学基础. 北京: 科学出版社, 1999]
- Paul D J. Silicon germanium strained layer materials in microelectronics. Adv Mater, 1999, 11(3): 191
- Zhang Xiulan, Zhu Wenzhen, Huang Dading. Distribution of carriers in GeSi/Si multiple heteroepilayers. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(3): 288 (in Chinese) [ 张秀兰, 朱文珍, 黄大定. GeSi/Si 多层异质外延载流子浓度的分析. 半导体学报, 2001, 22(3): 288]

## Characterization of Doping Concentration for Strained $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ Material\*

Dai Xianying, Zhang Heming, Wang Wei, Hu Huiyong, Lü Yi and Shu Bin

(Microelectronics Institute, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** The relation between the resistivity and the doping concentration with the different Ge composition was obtained based on a new majority carrier mobility model of the strained  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  material. According to this relation, the doping concentration of the strained  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  can be measured using a collinear four-probe array. The experimental results have a good reliability and reproducibility. The characterization technique is compatible with the on-line measure of the doping concentrations of Si and much more simple and convenient.

**Key words:**  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  material; four probe array; resistivity; doping concentration; mobility model; characterization

**EEACC:** B2530B; B2520

**Article ID:** 0253-4177(2003)09-0946-05

\* Project supported by National Analog IC Key Laboratory Foundation(No. 99JS09.3. IDZ0111)

Dai Xianying male, was born in 1961, senior engineer. He is engaged in the research on semiconductor material and power device.

Zhang Heming male, was born in 1947, professor. He is engaged in the research on device physics and power device.

Received 21 September 2002, revised manuscript received 7 November 2002

©2003 The Chinese Institute of Electronics