

质量分离低能离子束外延超薄硅单晶 的初步研究

黄大定 姚振钰 任治璋
王向明 刘志凯 秦复光

中国科学院半导体研究所, 半导体材料科学实验室, 北京 100083
(1991年12月18日收到; 1992年10月8日收到修改稿)

采用质量分离的低能离子束外延(MALE-IBE)技术进行超薄硅外延生长, 在600°C下获得单晶硅外延层, 厚度2000 Å, 过渡区宽度小于500 Å, 有较好的电学性质.

PACC: 6180J, 6855, 7360F

1. 前 言

硅外延技术是超大规模器件及其它微电子器件的关键工艺, 尤其当器件线度向纳米级发展及量子器件的研究, 对结构优良、界面陡峭的超薄硅外延的呼声越来越高. 由于传统的气相化学淀积工艺(CVD)生长温度高, 自掺杂效应影响大, 生长超薄硅外延有相当困难. 近年来发展了MBE^[1], 及低温CVD; UHV/LPCVD^[2]、PECVD^[3]等工艺. 但与之相比, IBE具有其独特优点.

质量分离低能离子束外延技术是一种发展中的新型工艺技术, 其主要特点在于: 淀积的离子带有一定动能, 其能量在一定范围内可调. 当离子淀积到衬底后, 它还带有一定的移动动能. 这既可降低外延生长温度, 又有利于单晶的形成. 由于设备带有质量分离器, 即使原材料纯度不高, 也可获得同位素纯的离子, 这对于外延层质量控制, 也是大有好处的.

早期K. Yasi等^[4]采用此技术进行硅的淀积实验, 离子淀积能量为100eV, 淀积温度为300°C, 束流密度为4—5 μA/cm², 其结果仅获得无定形膜. 近期K. G. Orrman-Rossiter等^[5]在400°C下于N型(001)衬底上进行了硅同质外延, 并对其进行了微观结构的分析.

本工作是在质量分离的低能双束离子淀积系统^[6]上进行的. 此系统束流密度高(>100 μA/cm², 束斑为2×0.4 cm²)是其一大特色. 我们在600°C下实现了硅外延生长. 用X-光衍射、扩展电阻等手段对外延层的结构、电学性质进行了检测. 结果表明: 离子束外延技术是生长高质量超薄硅外延层的可行手段.

2. 实验条件

1. 衬底处理: 本实验采用N、P型, 电阻率为10⁻³—10 Ω·cm, 晶向(111)、(100)不同硅单晶材料为衬底, 尺寸为20×20 mm².

晶片经除蜡后,在洗液 $\text{NH}_4\text{OH}+\text{H}_2\text{O}_2+\text{H}_2\text{O}=1:2:7$ 中煮沸 10 分钟;浸入沸腾的硝酸内使其表面氧化后,再浸入氢氟酸内除去氧化层,如此重复数次;放入洗液 $\text{HCl}+\text{H}_2\text{O}_2+\text{H}_2\text{O}=1:2:5$ 内煮沸 10 分钟;经去离子水冲净后烘干放入样品室。

为在生长前除去衬底表面的自然氧化膜,我们采用了两种不同工艺:a. 在 800°C 下于 $7\times 10^{-6}\text{Pa}$ 的高真空室中处理 2 小时;b. 在 400°C 下以 200eV 的氯离子(Cl^+)轰击衬底表面 10 分钟。

2. 淀积源:源工作物质是四氯化硅,其在 Freeman 源中离化后,离子流以 25keV 的能量抽出,再经磁质量分析器分离获得 $^{28}\text{Si}^+$ 离子流。 SiCl_4 产生的离子流质量分离谱示于图 1。

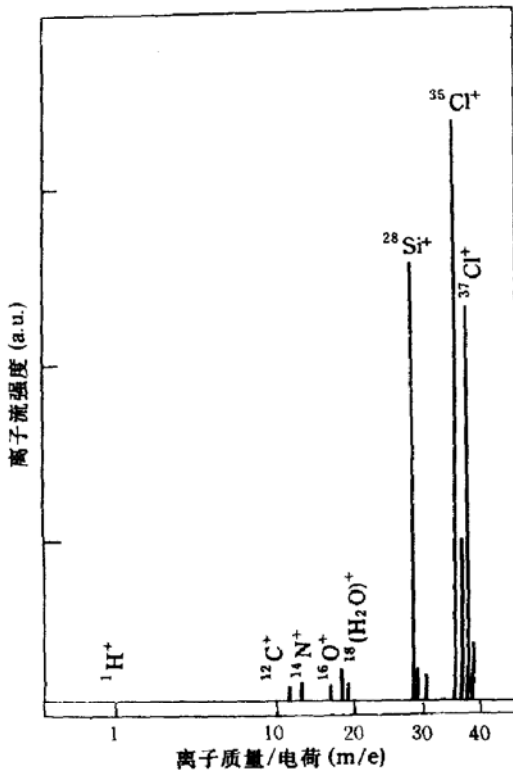


图 1 SiCl_4 离子质量分离谱图

3. 淀积条件: $^{28}\text{Si}^+$ 离子流最终经减速透镜后淀积在衬底上,淀积能量为 50eV ,束流为 $100\mu\text{A}$ (淀积速率约为 $20\text{Å}/\text{min}$).衬底温度为 600°C ,淀积室真空度 $\sim 7\times 10^{-6}\text{Pa}$.淀积时间约 100 分钟。

3. 测量结果与讨论

本工作在 N、P 型, (111)(100), $\rho\leq 10\Omega\cdot\text{cm}$ 硅衬底上进行硅外延生长,目前尚未看到这些参数的变化对结果的影响。

1. X-光衍射分析:图 2 是外延片 X-光双晶衍射的结果.衍射用 $\text{CuK}\alpha_1$ 辐射,外延层的衍射结果叠加在单晶衬底的衍射峰($2\theta=28.442^\circ$)上。

图 2a 是采用 800°C 下高真空预处理衬底的生长外延层结果.可见在此条件下可获得较好晶格匹配的外延层.图 2b 是采用 400°C 下 200eV 氯离子轰击处理衬底生长外延层结果.曲线 A 区说明外延层与衬底有较高的晶格失配(估计失配率约为 10^{-4}),曲线 B 区表明外延层中有微晶存在。

2. 外延层电阻分布:图 3 示出外延层扩展电阻测量结果.衬底为直拉硅单晶,晶向(100),P 型,电阻率约 $8\Omega\cdot\text{cm}$.结果表明外延层为 N 型,电阻率为 $4\Omega\cdot\text{cm}$,厚度约为 2000Å ,过渡区宽度(按变化两个数量级计)小于 500Å 。

一般地,影响外延层过渡区宽度的因素主要来自自掺杂效应,即在高温下生长引起的来自衬底的杂质扩散,即所谓固相自掺杂,及来自反应气体携带的衬底背面杂质的影响,即所谓气相自掺杂两部分.由于 CVD 工艺难以克服自掺杂的影响,目前最好的 CVD 外延过渡区宽度均在 2000Å 以上^[7]。

将本结果与低温 CVD 外延结果^[7]进行比较.如图 4 所示,IBE 过渡区宽度在相同温度下比 CVD 方法生长外延层过渡区宽度小很多.对 CVD 法来说,在较低温度下,过渡区宽度随温度变化而变缓,可认为是由于生长温度的降低只强烈地抑制了固体内杂质扩散造成的固相自掺杂,而对因反应气体携带造成的气相自掺杂的影响则很小.在 IBE 法生长过程中,由生长工艺决定,其气相自掺杂可以忽略,固其过渡区宽度在相同温度下比

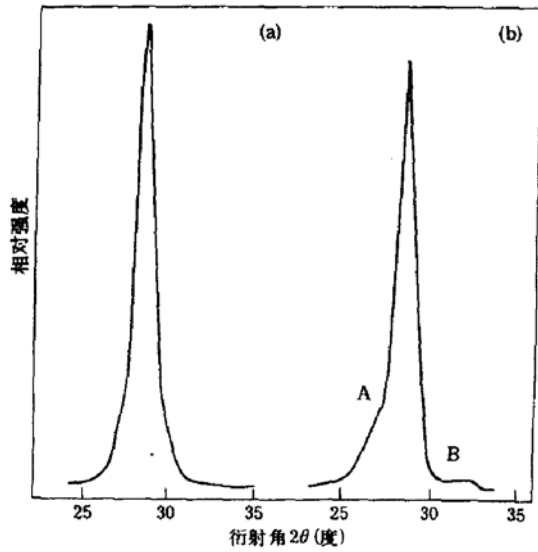


图2 LEIBE 硅外延 X-光双晶衍射迴摆曲线
(a)高真空高温热处理衬底样品, (b)低能氯离子
轰击处理衬底样品

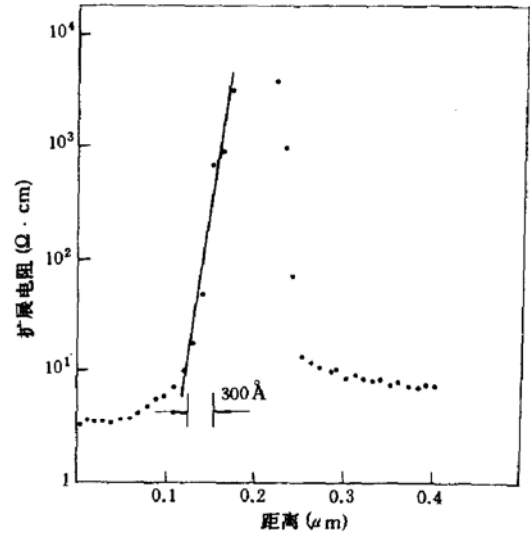


图3 LEIBE 硅外延断面扩展电阻分布

CVD 法的过渡区宽度小.

3. 电学性质测量:外延层霍尔测量结果表明:外延层为 N 型,迁移率在 $150-270\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 之间,载流子浓度在 $3\times 10^{16}-11\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 之间.

与完美晶体的电学参数相比,IBE 外延层的电学性质尚存一定不足.其原因除超薄外延层测量还有一定困难外,也表明其晶格完整性并非完美.此外,本工作所用设备,在真空度等方面还有一定问题.当离子源内有较高残余气体时,其离化后产生的 $[^{28}\text{N}_2^+]$ 、 $[^{28}\text{CO}^+]$ 等离子团与 $^{28}\text{Si}^+$ 有相同荷质比,而不能被质量分析器所分离.在硅离子淀积的同时,也会有碳、氮、氧等杂质进入生长中的硅外延层内.

为了获得高纯度、高完整性硅外延层,在离子束外延过程中,应注意降低同荷质比离子团的影响,提高源室及淀积室的真空度.此外,还可选择其它硅同位素 ($^{29}\text{Si}^+$ 、 $^{30}\text{Si}^+$) 的离子进行淀积.当然,由于这些同位素丰度很低,故必须以牺牲淀积率为代价.

4. 结 论

1. 采用 LEIBE 技术,在 600°C 下我们生长了质量较好的硅外延层.厚度 2000Å ,过渡区宽度约为 300Å ,与 CVD 工艺比较,它较好地克服了由固相自掺杂及气相自掺杂效应带来的不良影响.

2. 外延生长前,去除自然硅氧化膜是其关键工艺之一,在高真空下高温热处理,是目

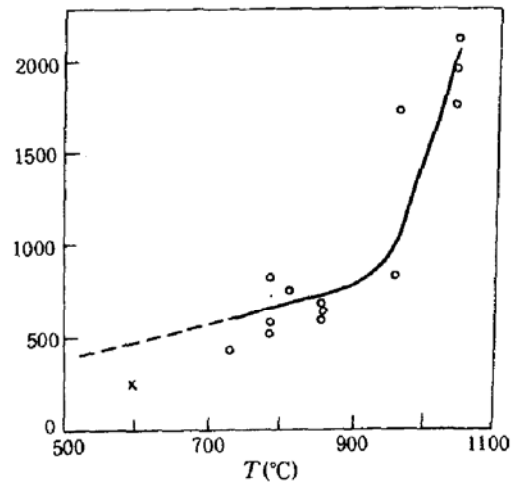


图4 过渡区宽度(W_t)与生长温度(T)的关系.
○——低温 CVD 实验数据^[7] ×——IBE 数据

前较有效的手段,用氯离子轰击去除氧化膜,其结果并不理想.

3. 为获得高纯度、高完整性 IBE 硅外延层,需注意同荷质比离子团的沾污,提高系统的真空度,或选择适宜的硅同位素离子进行淀积. 对此,尚须作进一步研究.

4. 低能离子束外延技术,是生长高质量超薄硅外延的可行方法. 它将是研制超大规模集成电路及各种量子器件的重要手段.

致谢:作者谨对我所理化室高维滨、杨丽卿、王万年等同志给予的帮助表示诚挚谢意.

参 考 文 献

- [1] B. E. Weir *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **59**,204(1991).
- [2] B. S. Megerson *et al.*, *J. Electrochem. Soc.*, **133**,1232(1986).
- [3] R. Reif; Proceedings of the Fifth European Conference on Chemical Vapor Deposition 13(1985).
- [4] K. Yagi *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **16**,245(1977).
- [5] K. G. Orrman-Rossiter *et al.*, *Phil. Mag. Lett.*, **16**,311(1990).
- [6] Qin Fuguang, *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, in press.
- [7] M. L. Hammond; Semicon/Beijing 89 Industry Technical Sessions 810-1(1989).

Initial Study on Mass-analysed Low Energy Ion Beam Epitaxial Ultrathin Silicon Film

Huang Dading, Yao Zhengang, Ren Zhizhang, Wang Xiangming
Liu Zhikai and Qin Fuguang

Semiconductor Material Science Laboratory, Institute of Semiconductors, Academia Sinica Beijing 100083

(Received 18 December 1991; revised manuscript received 8 October 1992)

Abstract

An ultrathin silicon epitaxy growth has been carried out by the Mass-analysed Low Energy Ion Beam Epitaxial technology. (MALE-IBE). We have grown monocrystalline silicon films, which are 2000 Å in thickness and less than 500 Å in transition width. They have good electrical properties.

PACC: 6180J, 6855, 7360F