

## 研究简报

## 分子束外延中的掺硼工艺

杨小平 蒋维栋 樊永良 盛 篓 俞鸣人

(复旦大学 应用表面物理国家重点实验室, 上海, 200433)

李炳宗

(复旦大学 电子工程系)

1991年4月22日收到, 91年9月8日修改定稿

我们在硅分子束外延中利用共蒸发  $B_2O_3$  的方法在硅中进行硼掺杂, 掺杂浓度可控制在  $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  至  $4.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  之间, 这说明不需要利用离子注入或高温掺杂炉, 也可以在硅外延层中实现有效的 P 型硼掺杂。我们还对掺杂外延层的质量进行了初步分析: 外延层剖面均匀、没有明显的偏析现象; 当硅源速率在  $2 \text{ \AA/s}$  时, 外延层中氧含量与衬底相同。

PACC: 6855

## 一、引言

随着超大规模集成电路技术要求降低工艺的处理温度和精确控制器件的尺度和界面特性, Si 分子束外延的优点日益显示出来, 但 Si-MBE 技术中掺杂方面遇到了很大困难。Si 中比较理想的受主型掺杂剂是硼, 但是硼的熔点特别高( $2300^\circ\text{C}$ )很难使其产生足够高的掺杂气氛。为了克服硼的高熔点引起的困难, Stephan<sup>[1,2]</sup> 等设计了一种特殊高温炉, 可加热到  $1300$ — $2000^\circ\text{C}$ , 用它直接蒸发单质硼进行硼掺杂, 但如此高温易引起其它炉杂质的脱附, 从而影响外延层的质量。Schwartz<sup>[3]</sup> 等人采用低能离子注入的方法进行硼掺杂, 取得了较好的结果, 但其缺点是设备复杂、价格昂贵, 且需要高温退火以消除离子注入时引起的缺陷。Tatsumi<sup>[4-6]</sup> 等人提出共蒸发  $B_2O_3$  的方法来实现硼掺杂, 该方法克服了以上缺点, 并取得了较好的掺杂效果, 但保证不引入多余的氧是一个要解决的问题。

本文采用了共蒸发  $B_2O_3$  的方法来实现分子束外延中硼掺杂, 并采用四探针、霍耳电阻、扩展电阻以及 SIMS 等方法对外延层质量作了初步研究。

## 二、实验

本实验是在法国 Riber 公司型号为 SSC 的超高真空电子束蒸发台中进行的, 该系统包括预室、分析室、生长室三部分, 生长室里配有 RHEED 可作样品表面结构的在位分析, 生长时生长室内的压强低于  $1 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ , 保证外延层清洁。在该系统上我们增加了

一个掺杂源炉，其中坩埚采用普通的 PBN 坩埚，加热是通过钽皮灯丝的热辐射加热，最高可加至 1400℃。

衬底材料是  $\phi 39\text{ mm}$  的 n 型 Si (100) 单晶，衬底清洗采用 Shiraki 方法，然后在生长室中经高温退火获得清洁有序的  $2 \times 1$  再构表面。生长时同时打开硅源和  $\text{B}_2\text{O}_3$  源的挡板，在衬底上(温度高于 500℃) Si 与  $\text{B}_2\text{O}_3$  反应生成 B 和  $\text{SiO}_2$ ， $\text{SiO}_2$  继续与 Si 反应生成  $\text{SiO}$ ， $\text{SiO}$  易挥发从而带走  $\text{B}_2\text{O}_3$  中多余的氧，实现了硅中硼的掺杂<sup>[7]</sup>。

### 三、实验结果与讨论

#### 1. 空穴浓度与硼源温度的关系

为了研究掺杂浓度与源温的关系，我们用四探针法测量外延层的电阻率，进而换算成掺杂浓度。图 1 为掺杂浓度与源温的关系，结果表明掺杂浓度随温度的升高而增加。实验采用的生长温度为 700℃，硅源的生长速率 0.1 nm/s。

#### 2. 空穴迁移率与温度的关系

为了研究掺杂的有效性、即掺杂后硼原子是否以替代形式存在于晶体当中，而不是存在于间隙位置或以分子形式存在于晶体中，我们测量了掺杂外延层的霍耳迁移率随温度的变化关系，结果掺杂后外延层的霍耳迁移率为  $50\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ，这与相同掺杂浓度的体硅材料的霍耳迁移率  $51\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  相一致，说明此时硼的掺杂是有效的；另外霍耳迁移率随温度升高而缓慢降低，这也说明实现了有效的高掺杂。

#### 3. 掺杂外延层的掺杂均匀性及界面突变性

扩展电阻的测试结果示于图 2，其中样品的生长温度为 700℃， $\text{B}_2\text{O}_3$  源温为 900℃，Si 生长速率为 0.2 nm/s。由图可见外延层中掺杂是均匀的，没有偏析现象，外延层与衬底的界面也比较陡峭，掺杂浓度每  $0.11\text{ }\mu\text{m}$  下降一个量级。

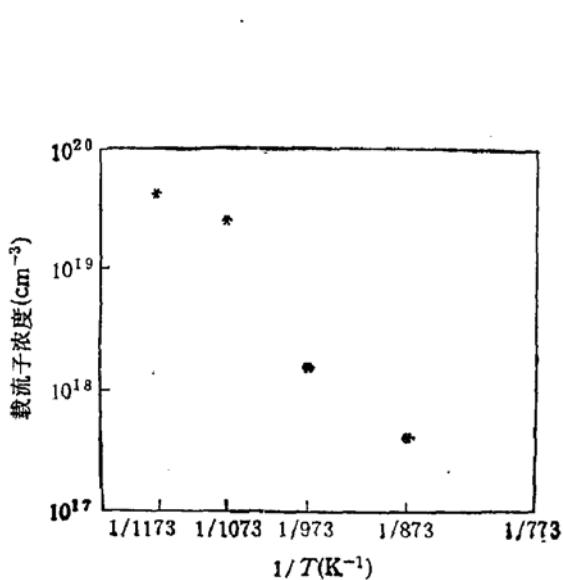


图 1 掺杂浓度与源温的关系

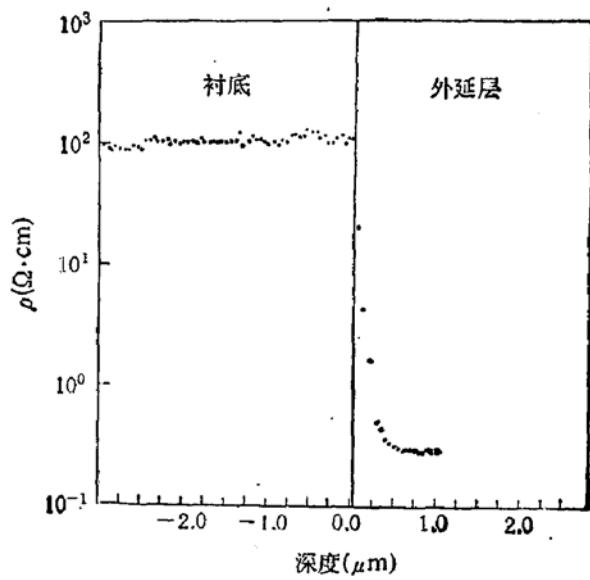


图 2 扩展电阻法的测试结果

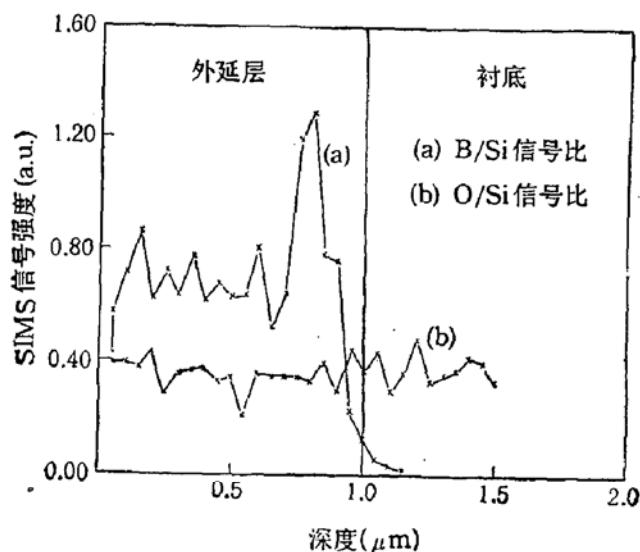


图3 霍耳迁移率与温度关系

#### 4. 外延层中的氧含量

为了研究外延层中是否因  $B_2O_3$  带进多余的氧，即  $B_2O_3$  是否完全分解为硼，固定  $B_2O_3$  源温为  $900^{\circ}C$ ，生长温度为  $700^{\circ}C$ ，改变硅的生长速率，我们用 SIMS 测量了外延层中 B/Si 信号比及 O/Si 信号比的剖面分布。当硅的生长速率为  $0.05 \text{ nm/s}$  时，外延层中硼与氧有明显的偏析现象；且外延层中氧含量比衬底高。当硅的生长速率为  $0.2 \text{ nm/s}$  时，外延层中硼与氧基本均匀分布，没有偏析；且外延层中氧含量与衬底相同，结果示于图 3，这说明此时外延层中  $B_2O_3$  已完全分解，而当硅的生长速率为  $0.05 \text{ nm/s}$  时，Si 的速率不够大，不能提供足够的 Si 与  $B_2O_3$  反应，以致于外延层中含有  $B_2O_3$  的不完全分解物  $BO_x$ 、 $B_2$  等，从而引起偏析<sup>[8]</sup>。所以只要 Si 的生长速率足够大，就不会引入多余的氧。

## 四、结 论

用  $B_2O_3$  来代替硼进行 P 型掺杂是行之有效的，我们的掺杂浓度已达  $4.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ，这足已达到制作器件的掺杂浓度要求，且掺杂的外延层晶体质量较高，外延层中杂质纵向分布均匀，没有偏析现象。

**致谢：**本文在完成过程中一直得到王迅教授热情鼓励和精心指导，谨此致以衷心感谢。另外还要感谢本实验室周国良、周铁城等在实验过程中给予的帮助。

## 参 考 文 献

- [1] R. A. A. Kubiak, W. Y. Leong and E. H. C. Parker, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B3**, 592(1985).
- [2] Stephane Andrieu, J. A. Chroboczek, Yves Campidelli, Elie Andre and Francois Amaud d'Avitaya, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B6**(3), 835(1988).
- [3] R. G. Schwartz, J. H. Mcfee, *Appl. Phys. Lett.* **40**, 239(1982).
- [4] H. Aizaki and T. Tatsumi, Proc. 17th Conference on Solid Devices and Materials, Tokyo 1985, p.301.

- [5] R. M. Ostrom and F. G. Allen, *Appl. Phys. Lett.*, **48**, 221(1986).
- [6] Toru Tatusmi, *Thin Solid Films*, **184**, 1(1990).
- [7] E. de Fresart, K. L. Wang and S. S. Rhee, *Appl. Phys. Lett.*, **53**, 48(1988).
- [8] E. de Fresart, S. S. Rhee and K. L. Wang, *Appl. Phys. Lett.*, **49**, 847(1986)

## Homoepitaxial Boron Doping in Silicon Molecular Beam Epitaxy

Yang Xiaoping, Jiang Weidong, Fan Yongliang, Sheng Chi and Yu Mingren

(Surface Physics Laboratory, Fudan University, Shanghai, 200433)

Li Bingzhong

(Electronic Engineering Department, Fudan University, Shanghai, 200433)

### Abstract

Boron doping has been realized in silicon molecular beam epitaxy using  $\text{B}_2\text{O}_3$  source with the usual Knudsen cell without using a special high temperature cell or low energy ion implantation technique. Carrier concentration can be controlled in the range from  $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  to  $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  by changing the crucible temperature. The carrier profile achieved by Knudsen cell shutter opening and closing was sufficiently steep demonstrated by the result of extended resistivity. The oxygen concentration in the epitaxial film depends on the evaporation rate of silicon. When silicon evaporation rate was  $0.2 \text{ nm/s}$ , the oxygen concentration in the epitaxial film was the same as in the substrate.

PACC: 6855