

# 在 Si 上的离化团束外延 Ge

秦复光 王向明 杨光荣 林兰英

(中国科学院半导体研究所)

1983年5月30日收到

用离子团束法来外延半导体材料是低温外延的一种可能途径。所谓离化团束外延(ICBE)，其特点是在薄膜的外延过程中，引入了一定数量的具有一定能量的离子。在ICBE情况下，外延材料在喷射炉中被加热成零点几个托到 $10^{-2}$  托的蒸气喷入 $10^{-3}$  托左右的高真空中。在这样一个绝热膨胀过程中由于范德瓦尔斯力的作用，这些喷出的材料质点便聚集成 $10^2 \sim 10^3$  个原子构成的原子团。这些原子团在行进过程中经过离化电场时被部分离化。被离化了的原子团(带一个正电荷)就叫离化团，它们在衬底负电压的加速下被赋予能量，并随同其它中性的原子团一起淀积在衬底上。由于外延材料的质点以离化团的形式存在，团的每个粒子都将以远高于热动能的能量参与外延，而且化学活性也会大大提高，这样将有效地影响薄膜的生长过程，其结果之一就是降低了外延生长的温度<sup>[1]</sup>。但用 ICBE 作 Ge 在 Si 上的外延，从已知的文献来看，在国内外还没有报道过。

## 一、实验装置和方法

我们采用了类似 Toshinori Takagi 的装置<sup>[2]</sup>，如图 1 示。用机械泵-油扩散泵系统加上真空室中的 LN 冷阱可保持工作真空在 $1 \times 10^{-3}$  托左右。用电子束加热石墨喷射炉。喷出的原子团通过离化电场时，被 200 mA 以上的能量为 1 keV 的电子流所部分离化。所形成的离化团被加在衬底上 10 kV 左右的负高压所加速而随同其它中性原子团淀积在 Si 衬底上。衬底在外延前经过 850°C 以上的预热处理。外延生长时，衬底温度保持在 480°C 左右。通过实验，我们研究了外延生长温度、生长速率、离化团能量、衬底预热处理等对外延薄膜结构的影响。

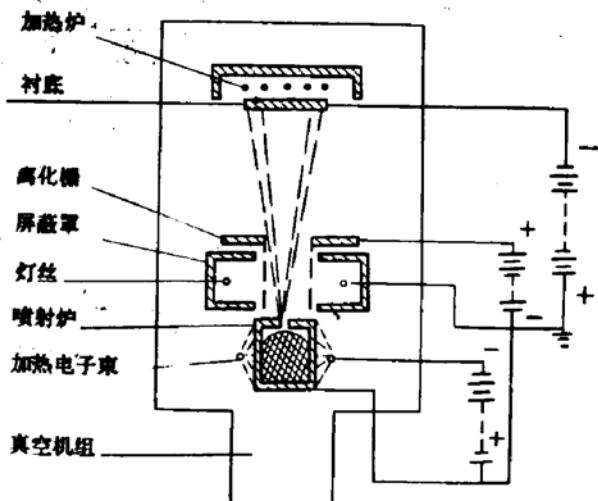


图 1 离化团束外延示意图

## 二、实验结果

本文只将 ICBE 中主要影响外延薄膜结构的因素和其实验结果列举如下：

### 1. 离化团能量对外延薄膜结构的影响

图 2 是一组具有基本相同的衬底温度( $490^{\circ}\text{C}$ )左右和大体一致的生长速率( $100\text{ \AA/分}$ 左右)的生长条件下而离化团能量(对于衬底负偏压  $V_c$  的数值)不同时所得到的外延薄膜的 RHEED 衍射图形, 衍射电子束的入射方位均为  $[1\bar{1}0]$ 。

由图 2 可以看到, 当衬底负偏压  $V_c$  从 0 变到  $16\text{kV}$  时, 外延薄膜结构相应的有着一个从多晶到单晶的变化过程而又从单晶逐渐到多晶的变化趋势。至于前一个变化过程, 国外同类工作中已见发表<sup>[2]</sup>, 而后一个过程尚未见过在同类外延工作中有过报道。实验表明, 离化团能量不仅对外延生长温度的降低有重要影响(这可以从比较图 2(a) 与图 2(e) 以外的几张图的结果看出), 而且对外延薄膜的结构和质量有着重要影响。生长好的

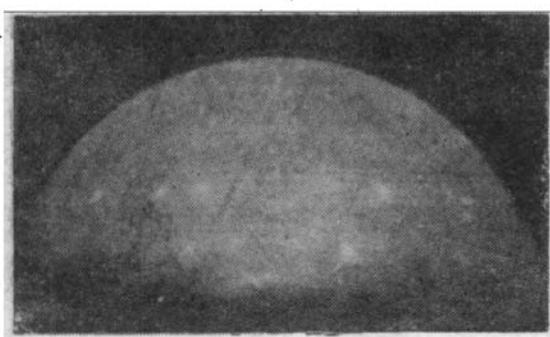
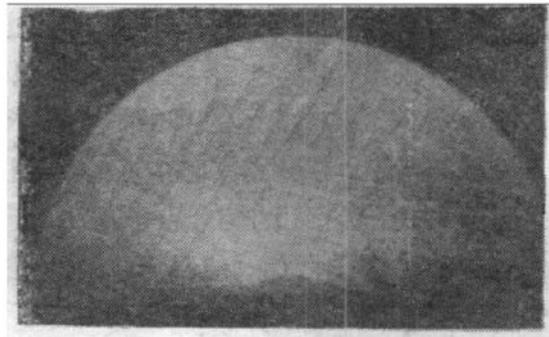
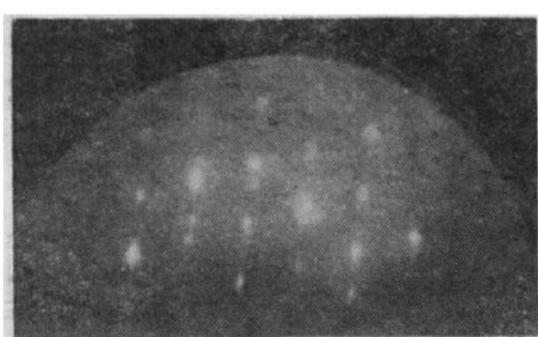
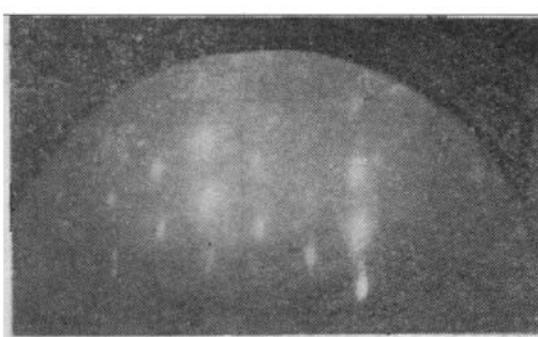
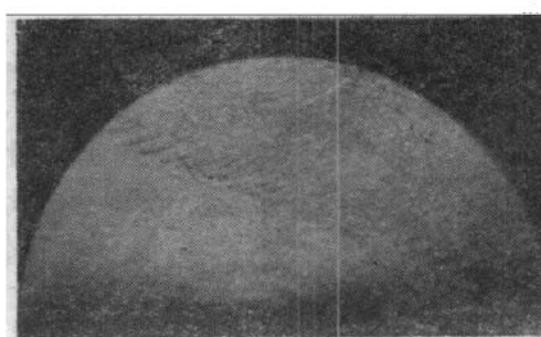
(a)  $V_c = 0$ (b)  $V_c = -4\text{kV}$ (c)  $V_c = -8\text{kV}$ (d)  $V_c = -10\text{kV}$ (e)  $V_c = -12\text{kV}$ (f)  $V_c = -16\text{kV}$ 

图 2 不同的衬底负偏压  $V_c$  下在  $\text{Si}(111)$  上沉积的  $\text{Ge}$  薄膜的 RHEED 衍射图形(入射方位  $[1\bar{1}0]$ , 衬底温度  $T_s \approx 490^{\circ}\text{C}$ , 生长速率  $R \approx 100\text{ \AA/分}$ )

单晶外延薄膜，存在着一个最佳的能量范围。

## 2. 村底温度 $T_s$ 和生长速率 $R$ 对外延薄膜结构的影响

正象在其它的一些外延中已经观察到的一样，在我们的实验中也观察到了在其它生长条件大致相同的情况下，衬底温度和生长速率对外延薄膜结构是有一定影响的，以表 1 和表 2 所列的两组实验为例就可以看出这种影响。

表 1 外延薄膜结构与衬底温度的关系的一组实验

实验编号	衬底	$V_c$ (伏)	$R$ ( $\text{\AA}/\text{分}$ )	$T_s$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	RHEED 观察
64	Si(111)	-10k	50	147	无定形
65	Si(111)	-10k	50	414	多晶+部分结构
67	Si(111)	-10k	83	494	单晶(个别李晶点)
68	Si(111)	-10k	60	555	单晶

表 2 外延薄膜结构与生长速率的关系的一组实验

实验编号	衬底	$V_c$ (伏)	$R$ ( $\text{\AA}/\text{分}$ )	$T_s$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	RHEED 观察
6	Si(111)	-10k	190	470	单晶+部分李晶
12-2	Si(111)	-10k	460	470	织构
8	Si(111)	-10k	519	470	多晶+部分组织
10	Si(111)	-10k	1255	470	无定形

根据实验结果，将  $R$ 、 $T_s$  与外延薄膜结构的关系用  $\log R$  及  $\frac{1}{T_s}$  的坐标形式表示在

图 3 中，这样就可以清楚地看到，坐标平面可用直线划分成单晶、多晶、无定形形成区。这个结果与 Sloope<sup>[3]</sup> 在真空蒸发的实验中观察到的结果相似，但从单晶形成区与多晶形成区之间的分界直线的斜率计算出来的与薄膜结构由多晶到单晶过渡相对应的激活能 ( $\Delta E \approx 0.76\text{eV}$ ) 低于蒸发或溅射的数值<sup>[4]</sup>。

## 3. 村底的预热处理对外延薄膜结构的影响

实验结果表明，衬底预处理的温度和时间会影响外延生长的温度(表 3)。如预处理的温度大于  $850^{\circ}\text{C}$ 、时间为 5 分钟，薄膜的结构转变温度与衬底的取向无关(表 4、表 5)。

这部分实验结果表明，ICBE 使 Ge 可以在较低的衬底温度和  $1 \times 10^{-5}$  托左右的真

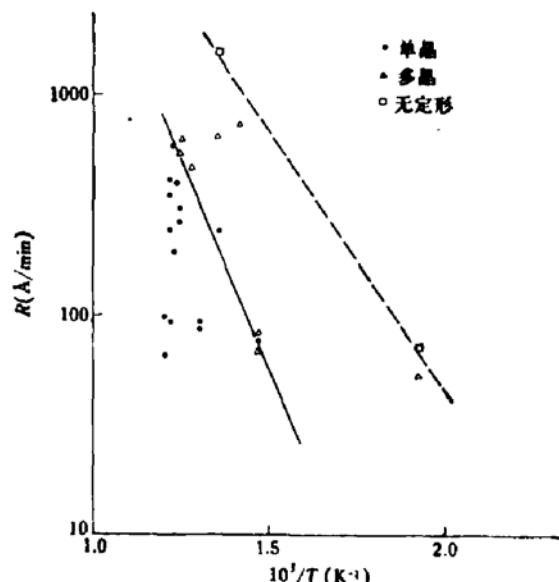


图 3 生长速率和衬底温度对薄膜结构的影响

表 3 衬底的预热处理对外延温度的影响

预热 处理	温度 范围	薄膜结构 和 $T_s$	外延薄膜结构为 无定形的 $T_s$ (℃)	外延薄膜结构为 多晶的 $T_s$ (℃)	外延薄膜结构为 单晶的 $T_s$ (℃)
	550℃左右, 5分钟		$T_s < 460$	$460 < T_s < 530$	$T_s > 530$
	850℃左右, 5分钟		$T_s < 400$	$400 < T_s < 470$	$T_s > 470$

表 4 一组外延条件基本相同、衬底预热处理温度为 550℃ 左右、5 分钟时, Ge 在 Si(111) 与 Si(100) 上外延实验结果的比较

实验编号	衬 底	$R(\text{\AA}/\text{分})$	$T_s$ (℃)	$V_c$ (伏)	RHEED 观察
44	Si(111)	240	530	-10k	单 晶
49	Si(100)	~300	530	-10k	织 构

表 5 衬底预热处理温度为 850℃ 左右, 5 分钟, Ge 在 Si(111) 和 Si(100) 上的一组外延实验结果的比较

实验编号	衬 底	$R(\text{\AA}/\text{分})$	$T_s$ (℃)	$V_c$ (伏)	RHEED 观察
66	Si(111)	83	494	-10k	单 晶
69	Si(100)	61	494	-10k	单 晶
70	Si(100)	67	494	-10k	单 晶
71	Si(100)	83	414	-10k	多 晶
65	Si(111)	50	414	-10k	多 晶

空度下在 Si 衬底上生长单晶薄膜。在 ICBE 中, 参与外延的材料质点的能量无论对于外延薄膜的结构还是对外延温度都有很大的影响, 这是离子束外延区别于其它外延的基本特征之一。从实验看出, 在一定的真空条件和衬底温度及生长速率下, 生长好的单晶外延薄膜是存在着一个离化团的最佳能量(相当于负偏压)范围, 可通过调整施于衬底上的外加电压来实现对离化团能量的控制。此外, 在 ICBE 中, 其薄膜结构与对应的生长速率和不同的衬底温度如同在别的外延方法中所见到的一样, 是有一定关系的, 表现在  $\log R - \frac{1}{T}$  图上为直线所划分的区域, 只不过本实验计算出来的激活能较其它生长方法更低一些。同时, 实验还观察到, 在一定的条件下, 外延薄膜结构转变与衬底的取向无关。

### 参 考 文 献

- [1] T. Takagi, I. Yamada and A. Sasaki, *Thin Solid Films*, 45, 569 (1977).
- [2] T. Takagi, I. Yamada and A. Sasaki, *Thin Solid Films*, 39, 207 (1976).
- [3] B. W. Sloope, C. O. Tiller, *J. Appl. Phys.*, 36, 3174 (1965).
- [4] Rybka, *Thin Solid Films*, 8, R7 (1971).

## Germanium Epitaxy on Silicon by Ionized-Cluster Beam

Qin Fuguang, Wang Xiangming, Yang Guangrong and Lin Lanying  
(Institute of Semiconductors, Academia Sinica)

### Abstract

The heteroepitaxy of Ge on Si is realized by ionized-cluster beam method under vacuum conditions in the range of  $2 \times 10^{-5}$  Torr to  $7 \times 10^{-6}$  Torr and with a substrate temperature of  $\sim 500^{\circ}\text{C}$ . It is observed that the structure of epitaxial films changes gradually from amorphous to polycrystalline then to monocrystalline and then to polycrystalline when the ionized-cluster beam energy is changed from 0V to 16 keV. The activation energy for transition between different structures, which is estimated from the relationship between the critical deposition rate and the substrate temperature, is smaller in our experiment than those in common vacuum depositions. It is also observed that the orientations of substrates have no influence upon the structure transition temperature of epitaxial films, which is another feature that differs from those of other epitaxial methods.