

在蓝宝石上低温外延硅

杨光荣 王向明 秦复光

(中国科学院半导体研究所)

1984年7月7日收到

一、引 言

近年来,围绕着如何提高蓝宝石上的硅外延薄膜(SOS)的质量和降低其成本这两个主要目标,在成膜工艺和方法上,各国科技工作者都进行了大量的探索和研究,并且取得了一定的成就^[1-3]。影响蓝宝石上的外延硅薄膜结构和电学性质的重要因素之一是 Al_2O_3 衬底的自掺杂作用。而这种自掺杂无论是在外延的工艺过程中还是在随后的器件工艺中,都是有害的,并且随着温度的升高而加剧。因此,SOS的低温工艺是当前研究课题之一。本文介绍一种有希望的低温SOS方法,即部分离化束外延(PIBE)。用部分离化束法在蓝宝石上外延硅的情况下,作为外延材料的硅,在高真空条件下被加热蒸发成为硅原子,这些原子在经过离化电场时,其中一部分被电离成为离子,它们在衬底负电压的加速下被赋予能量并随同其他的中性原子一起淀积在蓝宝石衬底上。由于外延材料质点中的一部分是以离子的形式存在并且以远高于热动能的能量参与外延,因此其化学活性大大提高,必将有效地影响薄膜的生长过程。实验已证明,其结果之一就是降低了外延生长温度。我们已经在 $700^\circ C$ 左右的生长温度下,在蓝宝石衬底上得到了电子霍尔迁移率为 $270 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$,杂质浓度为 $\sim 10^{16}/\text{cm}^3$ 单晶硅外延薄膜,在生长温度约为 $800^\circ C$ 时,蓝宝石上外延的薄膜质量有进一步提高,其电子霍尔迁移率大于 $300 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。另外,我们还对SOS的PIBE工艺中离子能量对于外延薄膜结构和性质的影响进行了观察,这将有助于进一步改进和发展这种外延工艺。

二、实验装置和方法

我们采用了类似 Yukio Yasuda^[4] 的装置,如图1所示。由真空系统,电子束蒸发系统,离化系统,衬底加热系统及相应的供电控制系统组成,真空室的压强一般保持在 $1 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-6}$ 托范围。

蓝宝石上的硅外延薄膜的厚度是用红外干涉法(厚度 $\geq 4000 \text{ \AA}$ 时)或近红外干涉法(厚度 $\leq 4000 \text{ \AA}$ 时)测定的,结合淀积时间,可推算出淀积速率,我们实验用的淀积速率为 $3-5 \text{ \AA}/\text{秒}$ 。外延薄膜结构是用 RHEED 进行观察;并对外延薄膜的一些电学特性如霍尔迁移率、杂质浓度和电阻率等也作了测定。

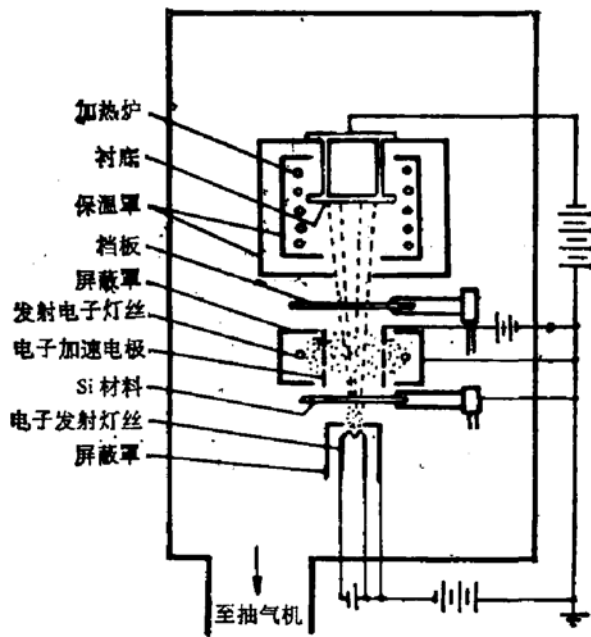


图 1 实验装置示意图

三、实验结果及其解释

图 2 列出的一组照片是在不同衬底温度和衬底负偏压下生长的外延层的 RHEED 检

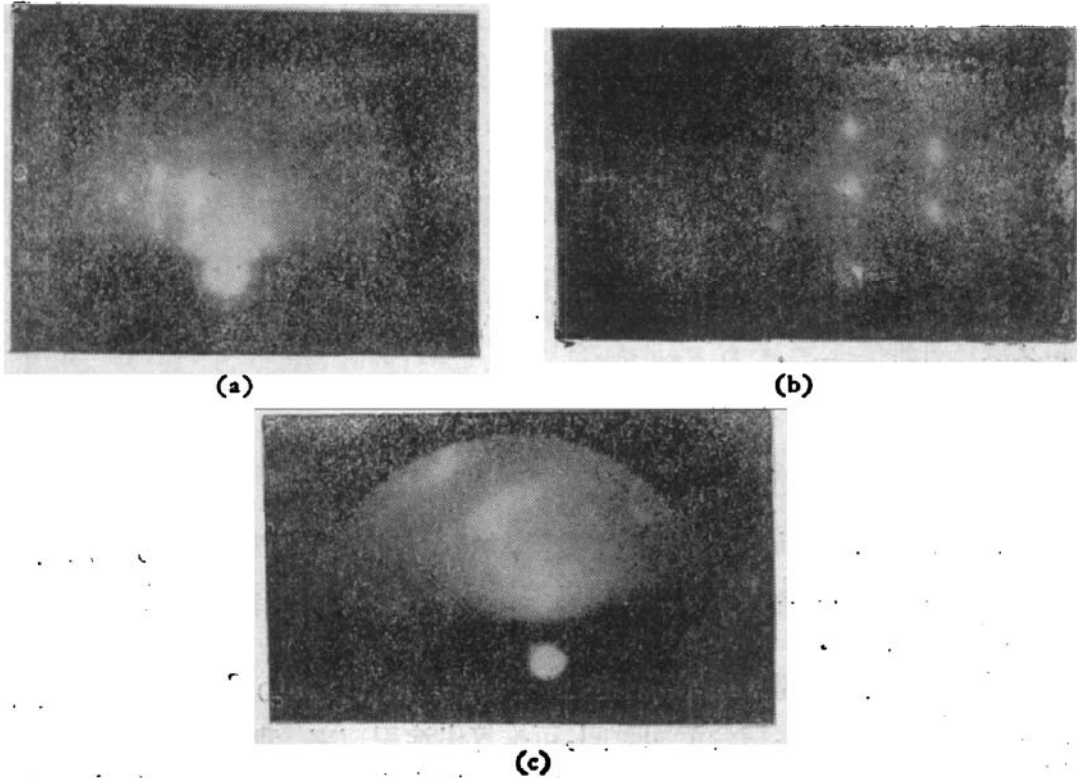


图 2 在不同的衬底温度 (T_s) 或衬底负偏压 (V_s) 条件下, 蓝宝石 ($1\bar{1}02$) 上淀积的硅薄膜的 RHEED 衍射图形. 其中 (a) $T_s = 700^\circ\text{C}$, $V_s = -5\text{kV}$, 电子束能量为 5keV , 入射方向是 $[01\bar{1}]$; (b) $T_s = 700^\circ\text{C}$, $V_s = -10\text{kV}$, 电子束能量为 10keV , 入射方向是 $[01\bar{1}3]$; (c) $T_s = 835^\circ\text{C}$, $V_s = -5\text{kV}$, 电子束能量为 15keV , 入射方向是 $[01\bar{1}]$

测结果。图 2(a) 与 (b) 这两组是在相同的衬底温度(700°C), 而离子束能量(相应于负偏压)不同的条件下, 所得的结果。图 2(a) 表明, 在离子束能量和衬底温度都较低的情况下所得到的外延薄膜结构, 除了单晶外还存在着织构。如果保持 (a) 图的衬底温度不变, 在其它外延条件基本相同的条件下只将离子束能量从 5keV (即 $V_s = -5\text{kV}$) 提高到 10keV (即 $V_s = -10\text{kV}$), 这就是图 2 (b) 的情况, 这时可以看到织构消失, 转变为单晶, 这证明, 离子束能量的增加是可以提高外延薄膜质量的。另一方面, 若继续保持 (a) 图中离子束能量为 5keV, 只将衬底温度从 700°C 增加到 835°C, 即图 2 (c) 的情况, 这样也能使织构消失而得到质量较好的单晶薄膜。这就是说, 一般在较高温度条件下才能实现的外延, 通过 PIBE 法可以在较低的温度条件下完成。由此可见, 离子束能量在降低外延温度、影响外延薄膜结构上的作用是十分清楚的。当然, 除了能量外, 在 PIBE 情况下, 外延薄膜结构还要受到其它生长条件的影响, 其中最主要的是系统真空度和衬底情况 (温度、取向及表面情况等)。其它生长条件基本相同时, 在我们的实验情况下, 离子束能量在 5—10keV 范围内, 影响外延薄膜质量的主要因素是衬底温度, 因此, 出现了在较低温度下图 2(b) 的岛状生长方式和在较高温度下的层状生长方式(图 2(c))。

不仅如此, PIBE 中离子束能量还对 SOS 的电学性质有重要影响。本文将列出在部分离化束外延中, 影响外延薄膜迁移率的几个主要因素, 并定性地对其中的部分实验结果作简单分析。

1. 部分离化束能量对外延薄膜的迁移率的影响

在相同的外延温度和其他外延条件基本相同的情况下, 只改变离化束能量使之从 0 keV 逐渐提高到 10 keV, 其结果如图 3 所示。由图 3 可看到, 对于相同的衬底温度 ($T_s \approx 835^\circ\text{C}$), 外延薄膜的霍尔迁移率随着束能从 0—5 keV 变化而逐渐上升, 在束能等于 5 keV 附近时, 达到最大值。此后, 束能继续提高到 10keV 时, 相应的薄膜霍尔迁移率逐渐下降。实验证明, 这个与最大迁移率相对应的最佳离化束能量是衬底温度的函数, 一般随衬底温度降低而上升。对上述现象可定性解释如下: 离子在外加电场中获得了能量, 这些能量的引入除了对衬底表面的清洁作用外, 对薄膜淀积过程本身, 如晶核的产生, 晶粒的长大和聚集以及连续薄膜的形成等无疑会产生不同程度的影响。当荷能离子到达衬底表面后, 离子的动能就转化为其他的能量形式, 包括吸附的材料原子沿表面的迁移能及对表面晶格局部加热的能量。这就

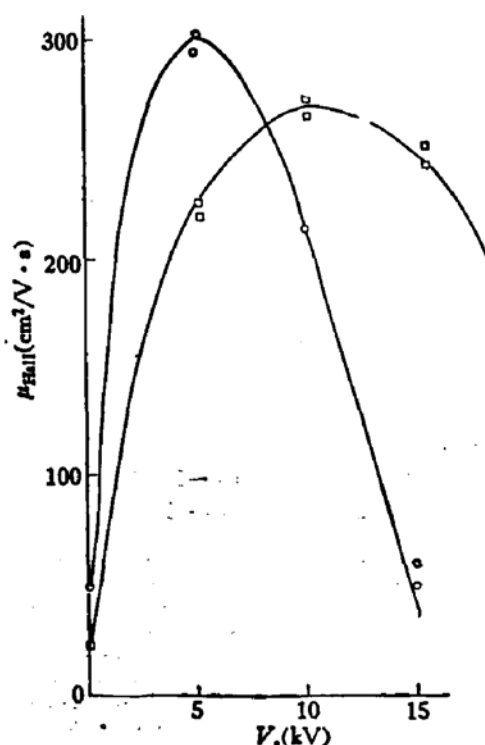


图3 部分离化束能量对外延薄膜的霍尔迁移率的影响

○ $D \approx 1\mu\text{m}$ $T_s = 835^\circ\text{C}$
 □ $D \approx 1\mu\text{m}$ $T_s = 700^\circ\text{C}$

促进了薄膜的外延生长。随着离子束能量的增加,薄膜结构也逐渐完整,迁移率也相应提高到一个最佳值。因此,对应于低的衬底温度,达到最佳迁移率状态的薄膜所需要的能量(即局部加热能)自然要高一些,而高衬底温度则要低一些,这个趋势在图上已显示出来了。但如果继续保持衬底温度不变,而使能量不断增加,薄膜结构趋于变坏,相应的迁移率也将逐渐下降。这是因为带有较多能量的人射材料质点以及某些残余气体被离子化并在负高压的加速下而产生的一些高能粒子对原始衬底表面和后来陆续淀积的薄膜的轰击和浅注入而造成的表面晶格损伤过多,在一定的衬底温度下使薄膜中的缺陷迅速增加,尽管仍保持单晶结构,但相应的电学性质,如迁移率必将下降。

2. 外延温度对部分离子化束薄膜的影响

保持离子束能量(衬底负偏压 V_s) 和其他外延条件基本不变的情况下,观察外延薄膜

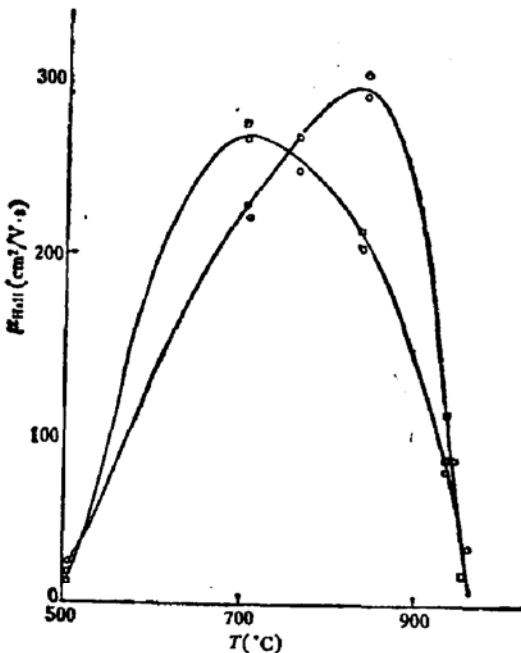


图4 外延衬底温度对薄膜霍尔迁移率的影响

□ $D \approx 1 \mu\text{m}$ $V_s = -10 \text{kV}$

○ $D \approx 1 \mu\text{m}$ $V_s = -5 \text{kV}$

迁移率与外延温度 (T_s) 的关系,其实验结果如图4所示。由图可见,保持一定的束流能量,外延薄膜的霍尔迁移率随着衬底温度的升高而升高,到某一温度范围时,达到最大数值,此后当温度继续上升,霍尔迁移率急剧下降。这个与最大迁移率相对应的最佳衬底温度与离子能量有关,一般随离子能量增高而降底。但是在我们的实验里,无论离子能量如何,当衬底温度上升到 920°C 以上时,外延薄膜的霍尔迁移率随温度的升高而下降,则基本是一样的。

对于这一实验现象的解释,除了离子束能量作用外,衬底自掺杂影响也是重要的因素。在某一固定的束能下,在较低的温度范围内,随着外延衬底温度的上升,薄膜结构会越来越趋完整,而离子对薄膜表面带来的损伤也由于衬底温度的上升而充分得到恢复。因而在某一最佳温区生成的最佳结构的薄膜,对应的薄膜霍尔迁移率也就达到最好的数值。当然,若所保持的束能较高,达到这种最佳平衡的衬底温度会低一些。但若继续提高衬底温度,来自衬底的自掺杂所引起的对外延薄膜的掺杂和缺陷会因此而加剧,结果会造成晶体结构的不完整和晶体内缺陷的增加,相应的薄膜霍尔迁移率也就随之下降。在高温区,衬底自掺杂起主要作用,因此,在高温下,不同能量的外延,其迁移率随衬底温度升高而下降的情况是基本相同的。

四、结 论

实验表明,在蓝宝石衬底上用部分离子化束方法可以在较低的生长温度下得到质量较

好的外延单晶硅薄膜,从而为 SOS 的低温生长工艺提供了一个可能的途径。实验指出,部分离化束的能量在 PIBE 中起着重要作用。这些荷能粒子的引入,不仅对衬底表面起到较彻底的清洁作用,而且对外延过程本身,诸如核的产生和形成,晶粒的生长和聚集以及岛的扩大和连续薄膜的生长等无疑会有不同程度的影响。通过控制离化束的能量来适当控制这些影响,就有可能制备出结构完整的高质量薄膜。

此外, PIBE 工艺不复杂,设备简单,可以相信,随着今后继续开展这方面的研究工作,将进一步显示出这种新工艺的特色来。

这项课题对于我们也才仅仅开始,尚未进行到器件工艺上;就薄膜质量而言,也还存在对其完整性,均匀性的进一步研究,以及 PIBE 这种方法的成膜机理的深入探索,因此还有大量工作要做。

参 考 文 献

- [1] H. W. Lam, A. F. Tasch and R. F. Pimizzotto, *VLSI Electronics Microstructure Science*, 4, 1(1982).
- [2] Anil Gupta and Prahalad K. Vasudev, *Solid State Tech.*, 104 (1983).
- [3] Anil Gupta and Prahalad K. Vasudev, *Solid State Tech.*, 129 (1983).
- [4] Yukio Yasuda and Yamichi Ohmura, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 8, 1098 (1969).

Silicon Epitaxy on Sapphire under a Lower-Temperature Condition

Yang Guangrong, Wang Xiangming and Qin Fuguang

(*Institute of Semiconductors, Academia Sinica*)

Abstract

The lower-temperature epitaxy of Si on sapphire is realized by partially ionized beam method. The Hall mobility of Si monocrystalline epitaxial film obtained at the substrate temperature of 700°C is about 270³ cm²/V.s and its impurity concentration is in the order of 10¹⁶—10¹⁷/cm³. When the temperature of the substrates is increased up to about 800°C, the mobility of Si epitaxy films reaches about 300 cm²/V.s. It has been proved by the experiments that the energy of partially ionized beam plays an important role in the film epitaxy. The main function of the energies is: (1) to lower the epitaxy temperature; (2) to affect the structure and quality of the epitaxial films; (3) to influence the growing manner of epitaxy in the energy range of about 5 KeV—10 KeV, i.e. the island growing appears in the lower substrate temperature and the layer growth occurs easily in the case of the higher substrate temperature.