

集成电路工艺模拟中的离子注入设备模型研究

李 煜 李瑞伟 王纪民

(清华大学微电子学研究所, 北京 100084)

摘要: 以离子注入工艺为例, 通过研究沟道效应对离子注入工艺的影响, 提出了建立设备模型的必要性, 并进行了离子注入设备模型的初步研究。

关键词: 设备模型; 工艺模拟; 离子注入; 沟道效应

EEACC: 2220C; 2550X

中图分类号: TN405 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2002)03-0319-04

1 概述

在现代集成电路技术中, 工艺模拟无论对于工艺的研究与开发还是对集成电路产品的工艺设计都具有重要的意义。而在集成电路工艺的发展中, 设备又起着十分重要的作用, 所谓“一代设备, 一代工艺”就是这种作用的生动写照。但在目前的工艺模拟中, 往往采用的是统一的简单工艺模型, 而忽视了不同设备对工艺的不同影响。这就可能使模拟结果与实际工艺有较大的偏差, 而且也不能模拟工艺的分散性和流片成品率。为了对此加以改进, 需要在工艺模拟中加入设备模型。加入设备模型的工艺模拟与简单工艺模拟的主要区别在于: (1) 设备模型可根据设备的实际情况修正简单模拟的工艺模型与条件; (2) 设备模型可以模拟硅片上工艺结果的分布与均匀性, 这种功能在传统的工艺模拟软件中是没有的。本文, 对离子注入工艺模拟中的设备模型进行了初步研究, 并以此为例, 说明了设备模型在工艺模拟中的必要性。文中, 主要研究了离子注入设备对硅片上离子注入深度均匀性及其分布的影响。关于离子注入的数学模型, 目前已经很成熟, 如参考文献[1~6], 离子注入的工艺模拟软件也很多, 例如 SUPREM 4、TMA 等等。但是, 关于离子注入设备对离子注入工艺模拟影响的研究, 国内外尚未见文章报道。

2 离子注入的沟道效应

离子注入深度(射程)主要是由离子的种类及注入能量决定的, 但离子束相对于硅片晶向的注入角度对离子注入的深度也有一定影响, 有些情况下, 影响是相当大的。根据器件工作的需要, 硅片表面通常是垂直于主晶轴的。当离子沿硅片的主晶轴入射时, 入射离子将可能进入原子阵列中开阔空间的入口, 在原子阵列电势的导引之下, 沿着开阔空间的中心即沟道进入晶体内部。沟道离子只与沟道边沿有轻度的、较少的碰撞, 与非沟道离子相比, 沟道离子的能量损失较低, 因而其深入距离比非沟道注入离子的射程大得多, 可以是在无定型硅中注入射程的几倍, 这就是离子注入的沟道效应。

为了减小在注入角度有偏差时, 由于沟道效应而造成的注入深度非均匀性, 通常使注入方向与硅片主晶轴有一个 7°的倾角。

3 离子注入设备

本文主要讨论的是中心扫描的离子注入机对硅片表面各处工艺结果构成的影响, 这种扫描方式的离子注入机的主要工作原理如下:

放电管内的少量自由电子在电磁场作用下, 获

李 煜 博士研究生, 主要研究方向为集成电路工艺模拟。

2001-06-02 收到, 2001-09-23 定稿

©2002 中国电子学会

得足够的能量后,撞击要注入的分子或原子使它们电离成离子.再经吸极加速后吸出,由初聚系统聚成离子束,射向磁分析器.位于高压端的磁分析器,利用不同荷质比的离子在磁场下运动轨迹的不同将离子分离,选出所需的杂质离子.被选离子束通过可变狭缝,进入加速管.由于加速管一端接高压,一端接地,形成一个静电场.离子在静电场作用下加速到所需要的能量.离子束离开加速管后进入控制区.先由静电聚焦透镜使其聚焦.再进行 x 、 y 两个方向的扫描,然后进入偏转系统以除去束流中带过来的中性分子,离子束流被偏转后注到靶上.

由于这种扫描方式的离子注入机的扫描中心固定不动,因此在硅片表面各处的离子注入倾角必然会存在差异.由于沟道效应,这将在硅片表面各处有不同的注入深度.

4 离子注入模拟软件与设备模型

为了模拟注入设备对硅片上注入结深分布的影响,我们把扫描中心与硅片的距离称为“扫描半径”.显然,扫描半径越小,硅片直径越大,则硅片各处注入角度差别就越大,因而注入深度的偏差也越大.而扫描半径与硅片直径都是由设备决定的.我们选择SILVACO公司的虚拟工艺线(VWF)软件包作为基本的注入模拟软件.与早期的离子注入工艺模拟软件不同,该软件考虑了离子注入的沟道效应,并且将硅片表面晶向和离子束的入射角度作为输入数据之一.模拟中我们取(100)晶面作为硅片表面.

为了描述中心扫描的离子束在硅片各处的注入角度,我们在硅片上建立起一个直角坐标系,如图1所示.选取硅片表面的[100]和[010]晶向分别作为 x 轴和 y 轴.将坐标原点定在硅片表面中心,为了与实际工艺情况相一致,假定坐标原点表面处的注入角为 7° (与[001]晶轴的夹角),且位于 yz 平面内.显然,硅片上其它各处的注入离子束不但与 z 轴([001]晶向)的夹角 θ 不同,而且偏离 yz 平面的夹角也不同(也就是方位角 ϕ 不同),这样,问题还是比较复杂的.但考虑到硅晶体结构的对称性,问题可得到一定的简化.

首先,由于硅片晶体结构对 yz 平面具有宏观的镜面对称性,而离子束在硅片的 $+x$ 和 $-x$ 两个半圆区的注入角度也完全是镜面对称的,因此,硅片上这两个半圆区的注入结深分布一定是镜面对称的.

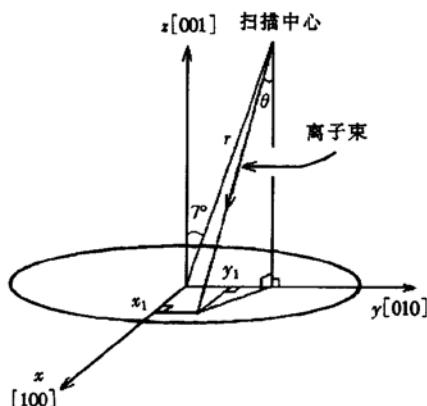


图1 硅片上用以计算注入角的直角坐标系

Fig. 1 Orthogonal coordinate for calculating implantation tilt angle on wafer

在模拟时,只需模拟一个半圆区的结深分布即可.其次,由于硅片对 z 轴具有4重转轴(转 90°)的宏观对称性(4重螺旋轴),因此,对注入角 θ 一定的离子束,当方位角 ϕ 改变 90° 时,注入结深也不会改变,因此,可以猜测,对于一定的注入角 θ ,也许注入的方位角 ϕ 对注入的结深影响不会太大.为了确定注入的方位角 ϕ 对注入结深的影响,我们对不同的 θ 、 ϕ 的离子注入进行了模拟.模拟结果表明,对一定的离子束,注入结深只与 θ 有关,而与方位角 ϕ 无关.这样在模拟硅片上离子注入结深分布时,只需计算硅片上各处的离子束与 z 轴的夹角 θ 即可,而无需计算方位角 ϕ .这就使得问题大大简化了.

由图1可知,注入倾角的计算公式可由立体几何知识推导得出:

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{\sqrt{(r \sin 7^\circ - y_1)^2 + x_1^2}}{r \cos 7^\circ}\right)$$

其中 r 为扫描中心与硅片中心的距离(简称扫描半径); x_1, y_1 为硅片上某点的坐标.

我们针对硅片尺寸不同、离子束扫描半径不同的离子注入机进行了注入结深的模拟.在模拟时将硅片划分为小方格,按照上面公式,根据设备的离子束的扫描半径计算出每个方格中心点处的离子注入角度 θ ,从而对其注入深度分别进行模拟,并将其视作该方格的注入深度.

5 模拟实验与模拟结果分析

集成电路离子注入工艺常用的能量范围是10~100keV,我们在模拟过程中,注入能量选定为中

间的 50keV. 靶材料选定为掺磷的 N 型 Si 衬底, 衬底掺杂浓度选为常用的 $1 \times 10^{15}/\text{cm}^3$, 注入的离子选定为 BF₂. 为了使注入结深内的平均浓度远大于衬底掺杂浓度, 我们将注入剂量取为 $1 \times 10^{13}/\text{cm}^2$, 在此情况下, 注入结深内的平均浓度约为 $3 \times 10^{17}/\text{cm}^{-3}$.

如上所述, 要求出硅片上注入结深的分布, 即使利用了硅片晶体结构对称性以后, 仍需对硅片的半个圆片区进行模拟, 如果要逐个方格进行注入模拟的话, 模拟的工作量是很大的. 为了进一步简化模拟的工作量, 我们在假定的注入条件下, 首先按注入结深的变化区间对注入的角度进行划分. 为此, 我们通过一系列的模拟试验得到了注入角度与注入结深的关系, 如表 1 所示.

表 1 注入角度与注入结深的关系

Table 1 Relationship between implantation angle and junction depth

注入角度/(°)	注入结深/μm
5.9	< 0.235
5.5	0.24
5	0.245
4.6	0.25
4.1	0.255
3.6	0.26
3	0.265
2.4	0.27
1.6	0.275
0.8	0.28

这样, 我们计算出每个小方格的注入角度后, 即可根据注入角度-注入结深关系表, 从注入角度所处范围直接查出结深所处范围.

对于上表, 需要说明的是, 在 200mm 硅片表面, 最大注入角度大约为 10°, 最小注入角度约为 3°. 若单纯考虑因注入角度不同而导致其注入射程在硅片法线方向分量的不同, 则其差别应在 $\pm \frac{\cos 3^\circ - \cos 10^\circ}{2} = \pm 0.7\%$ 以内, 而上表中的结深偏差达 $\pm 10\%$, 因此, 它主要反映了注入沟道效应导致的结深偏差.

我们对不同尺寸硅片和不同离子束扫描半径进行了注入结深模拟, 图 2 和图 3 所示为对 125mm 和 200mm 两种硅片, 离子束扫描半径为 130cm 的两种情况的模拟结果. 130cm 为典型中心扫描式离子注入机的离子束扫描半径.

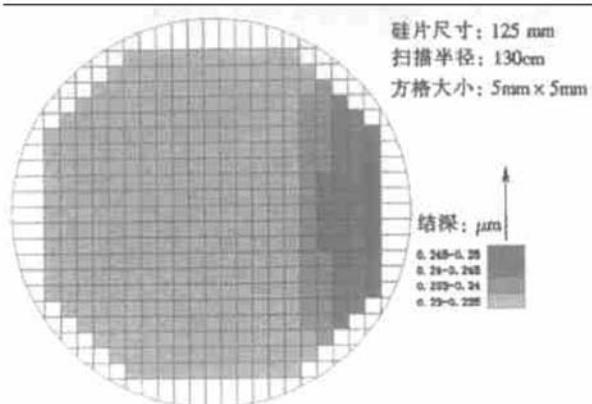


图 2 考虑设备模型后, 125mm 硅片离子注入结深分布的模拟结果

Fig. 2 Simulation result of junction depth in 125mm wafer after considering equipment model

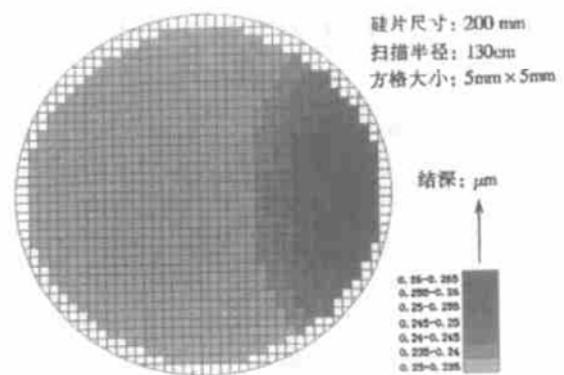


图 3 考虑设备模型后, 200mm 硅片离子注入结深分布的模拟结果

Fig. 3 Simulation result of junction depth in 200mm wafer after considering equipment model

通过对两种不同尺寸硅片的模拟可以看出, 对于 125mm 的硅片, 在离子束扫描半径为 130cm 的情况下, 模拟所得的结深分布还是比较均匀的. 但对于 200mm 的硅片, 则出现了结深分布变化较大的现象, 注入结深的偏差达到了 $\pm 10\%$. 显然, 中心扫描方式的离子注入机对于 200mm 的硅片已不能满足工艺均匀性方面的要求. 对于 200mm 的硅片, 采用平行扫描方式的离子注入机是必要的.

6 结论

工艺设备对工艺结果有重要影响, 因此, 为提高工艺模拟的仿真程度, 有必要研究开发工艺模拟中

的设备模型。加入设备模型的工艺模拟，即使未对模拟中的基本工艺模型进行改进，也可以得到许多新的关于硅片上工艺结果分布均匀性的知识，这对于改进工艺和设备，提高生产成品率都是很有意义的。

参考文献

- [1] Takeda T, Tazawa S, Yoshii A. Precise ion-implantation analysis including channeling effects. IEEE Trans Electron Devices, 1986, ED-33: 1278
- [2] Crandle T L, Mulvaney B J. An ion-implantation model incorporation damage calculations crystallizing targets. IEEE Electron Device Lett, 1990, 11: 42
- [3] Yang S H, Morris S J, Tian S, et al. Monte Carlo simulation of arsenic ion implantation in (100) single-crystal silicon. IEEE Trans Semicond Manuf, 1996, 9: 49
- [4] Posselt M, Schmidt B, Murthy C S, et al. Modeling of damage accumulation during ion implantation into single-crystalline silicon. J Electrochem Soc, 1997, 144: 1495
- [5] Klein K M, Park C, Tasch A F. Monte Carlo simulation of boron implantation into single-crystalline silicon. IEEE Trans Electron Devices, 1992, 39: 1614
- [6] Eaglesham D J, Stolk P A, Gossman H J, et al. Implantation and transient B diffusion in Si: the source of the interstitials. Appl Phys Lett, 1994, 65: 2305
- [7] Zhuang Tongzeng. The fabrication technology of integrated circuit—principle and practice. Beijing: Publishing Company of Electronic Industries, 1987[庄同曾. 集成电路制造技术——原理与实践. 北京: 电子工业出版社, 1987]

Research of Model for Ion Implantation Equipment in Integrated Circuit Technology Simulation

Li Yu, Li Ruiwei and Wang Jimin

(Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: With the rapid development in the process of integrated circuits, the function of the process simulation software has been improved constantly, but its shortcoming appears increasingly. The influence of equipment on the process has not been counted in. In order to promote the improvement of this situation, it is necessary to establish an equipment model in process simulation. Taking the process of ion implantation as an example, some elementary research on ion implantation equipment model considering the influence of the channeling effects on the process is accomplished.

Key words: equipment model; process simulation; ion implantation; channeling effects

EEACC: 2220C; 2550X

Article ID: 0253-4177(2002)03-0319-04

Li Yu PhD candidate, is engaged in the research on semiconductor technology simulation.

Received 2 June 2001, revised manuscript received 23 September 2001

© 2002 The Chinese Institute of Electronics