

浅谈强流离子注入机

杨 德 茂

离子注入是六十年代发展起来的一门新技术，它在半导体器件制造工业中已成为一种成熟的生产工艺。七十年代起，又将它用到金属表面强化处理和超导、磁泡等材料的改性试验研究中。实行离子注入的机器叫做离子注入机。它的主机，是低能离子加速器。在介绍强流离子注入机之前，先谈谈离子注入是怎么回事。

离子注入和半导体掺杂

电子手表和袖珍计算器，都是由集成电路制成的，所以说，集成电路是人们常接触的一种半导体器件。制造一块集成电路要经过几十道工序，其中有一道工序叫离子掺杂。为得到导电性能符合特定要求的半导体材料，人们有选择地往锗、硅晶体内掺进少量杂质。例如，在纯净的锗、硅晶体内掺进少量磷就能得到 n 型半导体，掺进少量硼就能得到 p 型半导体。怎样使杂质元素掺进锗、硅晶体内呢？过去的方法是用热扩散工艺。把硅片放到热扩散炉内，当炉温高到 $900-1200^{\circ}\text{C}$ 时，硅片就被杂质蒸气包围，杂质总是从浓度大的地方向浓度小的地方扩散，所以，杂质也会向硅内扩散到一定深度。但扩散工艺的可控性差，掺杂的质量不高。这种工艺正逐渐地被离子注入新工艺所代替。

离子注入，好比子弹打靶，我们知道射击时，子弹在手枪内得到加速，高速运动的子弹打靶时会钻进靶内。说明只要子弹有足够高的能量，就能硬挤进靶材料内。如果靶材料足够厚，我们就可以说，子弹的速度愈高，它钻进靶愈深。同样道理，人们用加速器把所要掺杂的离子用静电场加速，最后让这些离子去轰击一块晶片，就可以使杂质离子硬挤进晶体内，同样实现掺杂。

与热扩散工艺相比，离子注入工艺的突出优点是它的可控性。通过调节和控制离子束的能量、强度、位置，使离子在大面积晶片内的掺杂很均匀，其均匀性可达 $\pm 1\%$ ，而且掺进杂质的量不受溶解度的限制。所

以离子注入技术特别适用于大规模集成电路的生产。用离子注入制备的大规模集成电路不仅有很高的集成度，而且成本低。

离子注入机概况

离子注入机怎样产生和加速离子，并把离子均匀地注入到靶片里的呢？我们只要了解一下离子注入机的结构和它的部件的功能，就不难回答这个问题。

离子注入机主要由离子源、加速管、质量分析器、扫描系统和靶室组成(图 1)。当然，和其它加速器一样，它还需要真空系统，各种电源和控制系统。顾名思义，离子源是产生离子的装置；加在加速管上的高电压把从离子源引出来的离子束加速到注入能量；质量分析器将注入用的离子从经过加速后的各种离子中挑选出来；电扫描系统是让束状离子流按一定规律作 x 和 y 方向的移动(设离子沿 z 方向流动)，使束斑在靶片上均匀移动，从而实现均匀注入；靶室是容纳和支承靶片的真空室，它具有计量注入离子数、靶片温度控制和更换靶片的功能。靶片直径通常为 3 英寸左右。

离子注入机的主要性能指标是能量、靶流、离子种类、注入均匀性和片间重复性等。通常根据上述几个指标来评价、分类和选用离子注入机。也可以按照用途，把半导体工业生产用的注入机称为生产机，把材料科学研究用的注入机称为试验机。下面以这几个指标，概述注入机的现状和发展。

在某些应用中，可以通过控制离子的能量，使离子注入到靶内合适的深度。在 500KeV 能量下，低质量数元素的离子可穿进约 1 微米；而高质量数的，因为速度较低，只穿进约 0.25 微米。生产机的能量一般在 200KeV 以下，试验机能量可高达 600KeV ；但有些特殊半导体工艺却只要求几 KeV 的离子。

机器的靶流大小直接关系到注入到合适剂量的时间，也就关系到机器的生产能力。这是因为注入时间 $t=D/J_i$ ，其中 D 为注入剂量，表示在单位面积靶片上注入的离子数，它的单位是离子数/厘米²。 J_i 是靶片处离子流密度， $J_i=I/S$ ， I 是靶流， S 是靶片面积。如果 $S=20\text{cm}^2$ ， $I=20\text{mA}$ ，那么 $J_i=1\text{mA}/\text{cm}^2$ 。如果要求注入剂量 $D\approx 10^{12}$ 离子/ cm^2 ，可以算出，注入时间近似为 160 秒(其中用到 1mA 离子流相当于每秒通过 6×10^{15} 个单电荷离子)。通常，按靶流指标将机器分成弱流、中流、强流三种类型。以半导体掺杂中常用的

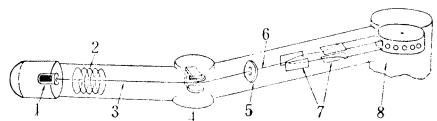


图 1 离子注入机示意图

1. 离子源；
2. 加速管；
3. 离子束；
4. 磁分析器；
5. 分析镜；
6. 注入用离子束；
7. 电扫描系统；
8. 靶室

硼离子 (B^+) 为例,靶流在 $200\mu A$ 以下的为弱流机;靶流在 $500\mu A$ 上下的叫中流机,靶流在 $1mA$ 以上的为强流机。

生产机作为一种专用机,没有必要产生很多种离子,只要能产生硼 (B^+)、磷 (P^+)、砷 (As^+) 还有锑 (Sb^+) 的离子就行了。试验机为适用于多种试验,应当能产生种类尽量多的离子。有的机器可以做到全离子化,能给出门捷列夫元素周期表上列出的各种元素的离子。

通常生产机的离子注入均匀性要求达到 0.75% 左右。片与片间的重复性也要求高达 0.5%,这对生产机的扫描系统提出了严格的要求。但对某些应用,象金属表面的强化处理,注入均匀性只要低于 $\pm 10\%$ 就可以了。

除上述四个性能指标外,机器的自动化水平,靶室对靶片的容量,更换靶片的方式和靶片处理效率等,也

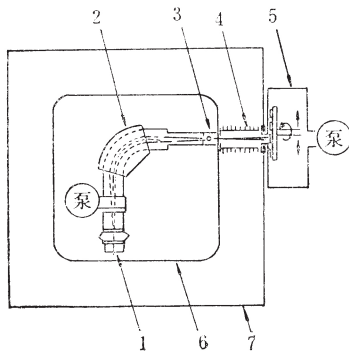


图2 采用机械扫描靶室的强流注入机
1.离子源; 2.磁分析器; 3.分辨缝;
4.加速管; 5.旋转靶室; 6.高压舱;
7.外机壳

反映了机器的性能。近几年来,随着离子注入半导体器件的商品化和离子注入日益得到广泛应用,机器性能也在几个方面得到了发展。其中,最引人注意的是靶流的提高。研制强流机的目的,就是为了在一定的注入剂量要求下,缩短注入时间,提高注入效率。在生产线上就是提高生产效率。强流机已经成为离子注入机的必然发展趋势。有人预计,在80年前后的五年内世界上生产的离子注入机中,约有一半属于强流型。

强流离子注入机

图2示出了典型强流机的示意图。将它与图1给出的结构对比一下,可以看出,强流机除包括必不可少的离子源,加速器,磁分析器和靶室外,省掉了电扫描系统而在靶室内增设了机械扫描机构。这是为了解决强流离子束带来的特殊技术问题。

离子注入机中,离子束的流强达到毫安级后,会出现两个特殊问题:

(1) 空间电荷效应影响强流束的传输。强流机中离子束不仅截面积加大而且离子密度也高,所以正离子之间静电斥力增大,致使离子束迅速膨胀(称为束

“爆炸”)。如不采取措施,束流将会打在管壁上损失,无法实现强束流的传输。通常,可利用空间电荷自中和现象解决这个问题。办法是让束流输运管道中的真空度适当,离子与管道中的残余气体原子碰撞,产生的次级电子会被捕获到离子束内而中和离子束的正电荷。假如再使用电偏转板来使离子束扫描的话,离子和电子会因受偏转的程度不同而分离。这样会破坏电中和状态。所以,强流机中大都不用电扫描而是使用机械扫描。所谓机械扫描,就是离子束的位置不动,而靶片对离子束做相对运动,以实现均匀注入。

(2) 束流加热靶片的效应。靶片受到离子轰击时,承受的功率是离子的流强与能量乘积。在强流机中,靶上单位面积上承受的功率(功率密度)较高,如不改变扫描方式,靶片温度会上升到不容许的程度。因此,人们使用了多个靶片同时承受离子注入的措施。这也是由机械扫描装置实现的。

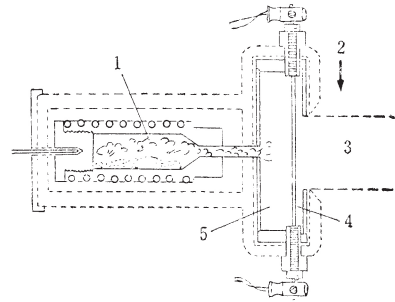


图3 强流离子源示意图

1.坩锅; 2.磁场; 3.离子束; 4.阴极; 5.弧放电室

我们可以从强流机的总体布局和部件结构上,看出设计者是如何具体地克服强流带来的困难的。

从图2看出,强流机的部件比较少,省去了四极磁透镜和电偏转系统。而且用先分析后加速离子的方案。这样尽可能地缩短了离子传输的距离,减少了途中损失。

离子源是强流机的关键部件,它的性能直接影响机器束流大小和品质。目前,大多数强流机采用 Freeman 型强流重离子源(图3)。它包括阴极、弧室、坩锅、附加磁铁和引出电极(图中未示出),直径为0.1英寸的钨阴极偏心地穿过圆筒形石墨制的弧室。弧室一侧连通坩锅,另一侧开有 $2mm \times 40mm$ 的引出缝。阴极通以 $100A$ 的电流,加热到一定温度时就发出电子,电子碰撞从坩锅通入弧室的蒸气原子,而使它们电离,建立起等离子体。附加磁铁产生 100 高斯的磁场,约束等离子体中的电子使它沿着复杂的螺旋轨道运动,以增大电离效率,当引出电极上加一相对弧室为负的引出电压时,离子就被引出电极拉出并被成形为楔状束。

强流机基本上都用分析磁铁作质量分析器。传输

离子的真空管道位于磁极之间。大家知道，带电粒子穿过静磁场时受到洛仑兹力作用而改变运动方向。不同的离子，尽管能量相同，而且穿进同一磁场内，但是由于它们的质量不同，受到的作用力也不同，从而，在磁场内的轨道开始分离。运用上述原理，人们就用放在磁铁出口处的分析缝，挑选有用的离子而扫掉没用的离子。

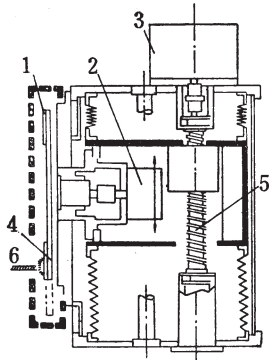


图4 盘式机械扫描靶室

- 1.靶片； 2.旋转扫描电机；
- 3.横移扫描电机； 4.靶盘；
- 5.丝杠； 6.离子束

强流机的加速管与高压加速器的一样，分成等梯度型和单缝或双缝型。

现在加速管在强流机上作为加速经过分离的离子的部件，大多为单缝型的，因为这种加速管能在宽的能量和流强范围内给出品质优良的束流。

强流机上的机械扫描结构有多种型式，其中以图4所示的盘式扫描机构最有代表性。多个靶片固定在直径为30cm的靶盘上，靶盘由旋转扫描电机带动做500—1000转/分的旋转。靶盘和旋转扫描电机一起又被丝杠带动做低速的上下往复运动。这样，靶盘将做旋转和横移的复合运动，为保证注入均匀性，上下移动速度是由按一定规律加工的变螺距丝杠来保证。

离子注入机的新应用

从七十年代起，人们尝试着用离子注入进行金属表面处理，促使表面硬化，提高抗磨性及耐腐蚀性。已在某些工具上得到明显效果。可以预计，只要强流机的流强有所突破，并降低注入成本，离子注入在金属方面的应用也会转入实用阶段。此外，离子注入还可用作反应堆材料辐照损伤的模拟手段。