

一台简易的 100 keV 离子注入机*

离子束科研组

(山东科学技术大学物理系)

一、引 言

用离子注入掺杂制造半导体器件的新工艺进入到批量生产的阶段后, 半导体器件的生产单位往往需要一些专门生产某种特定类型器件的离子注入装置。对于这样的注入装置, 除了要求稳定可靠外, 还应当具备结构简单紧凑, 操作方便而安全, 造价低廉等特点。鉴于这一考虑, 我们于 1970 年试制了一台简易的 100 keV 离子注入机。

作为一台简易的离子注入机, 其必不可少的部分是: (1)离子源: 用以产生注入半导体材料或器件的离子。(2)分析器: 用以分选出所需要的离子而滤掉其它杂质离子。(3)加速部分: 使离子得到所需要的能量, 以达到一定的注入深度。(4)扫描器: 使离子束有一定的扫描面积并保证注入浓度沿衬底平面上的均匀分布。(5)靶室: 用来安装离子注入的半导体材料及器件。至于其它的附加装置, 则应当尽可能地省略。充分利用分析器、加速管的聚焦特性, 将磁分析器设计成满足双聚焦条件; 采用等梯度加速管, 使在电压比发生改变时, 不需要附加匹配透镜仍能使用。这样便可以尽量减少透镜系统, 以使管道缩短, 结构简单, 调整方便。

作为一台离子注入机, 影响其构造和造价的一个重要部件是分析器。通常, 在核物理实验室中, 对于这类机器几乎总是按照先加速后分析的方案来进行设计的。即离子从离子源引出后, 先进行加速, 然后再进入分析器进行分选。如果采用的是磁分析器, 则由于进入分析器的离子的能量较大, 就要求有较大的离子轨道偏转半径 a 。这就使管道变长, 磁铁体积增大, 造价变高。如果采用先分析后加速的方案, 即, 离子从离子源引出(或给以一个较低能量的预加速)后, 立即进入分析器进行分选, 然后再进行主加速, 这时由于进入分析器的离子能量低, 用较小的分析磁铁就能得到足够的分辨率。

当然, 与先分析后加速方案相关联的是, 为了不使磁分析器处于高电位, 就往往使靶室处于高电位, 而让有较多电控制系统的离子源处于低电位。其结果是使离子源的操作方便, 但增加在靶处操作的困难。

根据以上的考虑, 我们按照先分析后加速的方案, 并利用现成的小型教学用电磁铁, 试制了一台简易的专用于掺杂硼的 100 keV 离子注入机。

二、机器的结构

所试制的 100 keV 离子注入机的结构及光路如图 1 所示。

* 1972 年 8 月 28 日收到。

离子源采用电感耦合高频源。离子源所用振荡器的振荡频率为20—30MC,最大输出功率为500W。

气体从放电管顶部输入。掺硼时,通入硼烷(B_2H_6)气体,气耗约20毫升·大气压/小时,用一针型阀控制流量。

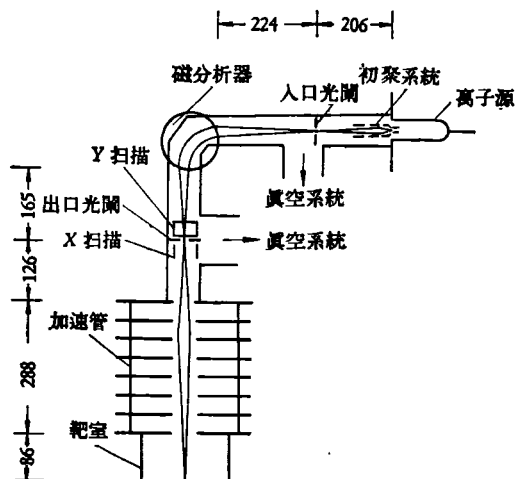


图1 简易的100keV离子注入机结构及光路示意图

放电管长110mm,内径37mm,用石英玻璃制成。放电管外加螺线管,用以产生横向磁场,中心磁场强度为30—100Gs。实验表明,此横向磁场对引出的离子流有较大的影响。

吸极用不锈钢制成,吸极屏蔽用石英玻璃制成。吸极孔道直径 $d = 1.5$ mm,长度 $L = 7.5$ mm,屏蔽孔直径 $D = 3$ mm。阳极电压5kV。引出的总离子流约为1mA。

根据我们的经验,在放电管内的硼烷很容易被热分解而在放电管壁及吸极屏蔽上附着一层黑色沉淀物,以致使离子源寿命很快降低。若在放电管中同时通入微量

氩气,可以使放电更充分,对提高离子源的寿命是有益处的。

从吸极引出的离子流经过等径三圆筒透镜聚焦后,成象于磁分析器的入口光阑 s_1 。为了使进入磁分析器的离子束有较小的散角,设计的角放大率为1/4。圆筒内径20mm,中间圆筒长20mm,圆筒间隙1mm^[1]。

由于被分选的硼离子的能量低,质量小,对分辨率要求不高,所以有可能用一个现成的小型电磁铁来代替较大的磁分析器。所用磁铁的磁场具有足够的均匀度和稳定性。极掌为圆形,半径等于5cm。离子束主轨道通过磁场的几何学如图2所示。图中圆 O_1 为磁场边界, $PABQ$ 为离子束主轨道, Q 为 P 的象, ϵ 为倾斜角, φ 为偏转角, l' 和 l'' 分别为物距和象距。

在离子束散角足够小的情况下,入口 A 和出口 B 处的磁场边界可被近似地当作直线以便采用扇形磁场中的离子光学公式。

使用时极距固定为2.5cm。因为极掌面积较小,边缘散射场的影响不能忽略。为了便于精确地估计这种影响,我们在入口和出口处安置两个磁屏蔽套管,使散射场被限制在宽度为 $2c$ 的范围内。测定了 $c = 11.5$ mm,并确定了磁场的等效边界,这个边界在磁铁实际边界之外2mm。根据图2的几何关系,并使离子束近似地满足把散射场修正计算在内的双聚焦条件^[2],选定 $\varphi = 82^\circ$, $\epsilon = 25^\circ$, $a = 76.4$ mm,求出 $l' = 224$ mm, $l'' = 165$ mm,放大率 $M = -0.8$ 。

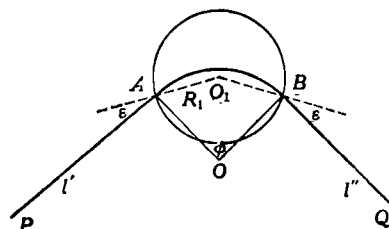


图2 通过圆形磁铁的离子轨道

在双聚焦条件下,质量分辨率由下式决定:

$$\frac{m}{\Delta m} = \frac{\delta/2}{(s_2 - Ms_1 + \gamma_1 + \gamma_2)}$$

其中 s_1 和 s_2 分别为物缝和象缝宽度,

$$\delta = (l'' \tan \varepsilon + a)(1 - \cos \phi) + l'' \sin \phi,$$

γ_1 为色差引起的象宽, γ_2 为圆弧边界对直线边界的偏离引起的几何象差。

对于高频离子源, 能量分散为 100 eV, 离子能量 $E = 5 \text{ keV}$, 可得 $\gamma_1 = \frac{\Delta E}{E} \delta \approx 3 \text{ mm}$. 在入射束的半散角为 2.5° 的情况下, 算出 $\gamma_2 = 2.6 \text{ mm}$. 如果取 $s_1 = s_2 = 3 \text{ mm}$, 可以得到分辨率 $\frac{m}{\Delta m} = 11$, 也就是说可以把硼离子与其它离子分开. 当用硼烷作为放电物质时, 测得的质量谱如图 3.

离子束通过分析器后, 即进入加速管进行主加速, 以达到所需要的能量.

加速管采用等梯度型^[3]. 加速电极均为平板式, 用铝板加工制成, 中心孔径为 50 mm. 绝缘环材料系普通陶瓷. 电极与绝缘环用环氧树脂封接. 加速管均压采用电晕针法.

在毫米束注入机的情况下, 由于对打在靶上的象的质量要求不高, 所以没有在加速管前外加匹配透镜. 在注入离子能量为 50 keV 到 100 keV 时, 在靶上的束斑的形状变化不大. 当离子注入能量小于 50 keV 时, 可以适当短路几片加速电极, 使离子束投在靶上的象有较好的形状.

加速电压电源没有附加稳压装置, 纹波系数小于 1%. 由于从离子源中引出的离子大部分都在分析器的真空盒中散失, 通常只有几个到

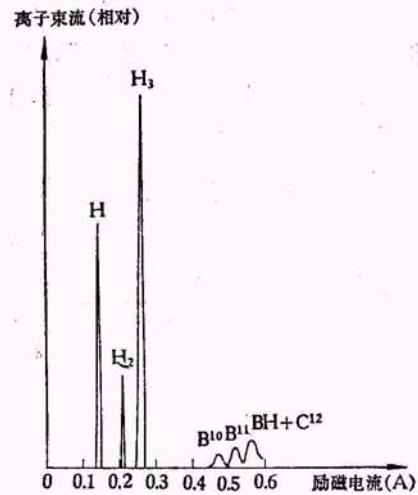


图3 硼烷的质量谱

几十个微安的离子流通过加速管, 所以高压负载较低.

我们采用了电扫描装置. 扫描偏向板放在加速管之前, 在靶上的最大扫描面积为 $15 \times 20 \text{ mm}^2$.

离子束经加速管加速后, 即进入靶室. 硅片装在圆形靶盘上, 可用机械方法转动到 8 个不同的位置, 其中一个位置为观察窗, 观察离子束调整情况. 由于靶室处于高压, 因此换靶片时需要退高压. 从退高压到升高压至 100 keV 约需两分钟. 靶室与系统其它部分之间有插板阀可隔开, 以便在不破坏整个系统的真空的情况下更换靶片.

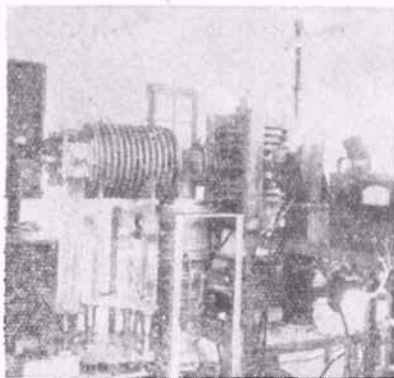


图4 机器的外形照片

最后打到靶片上的 B^+ 束流约 $2 \mu\text{A}$. 在最佳聚焦情况下, 束点直径约 3—4 mm.

整个机器的外形照片见图 4. 机器的总长约 1.3 米, 由于机器的结构比较简单, 重量比较轻, 设备不太复杂, 所以加工也比较方便.

三、使用结果

运用这台机器,曾将硼离子注入硅片,测量了硅片中硼的浓度分布及注入硼离子的能量(从 15 keV 到 80 keV)对 P-N 结深的影响。同时,也曾用此注入机将 80 keV 的硼离子注入硅片,试制了 3 公分雪崩渡越时间二极管,并为有关单位制作的高频低噪声三极管 CG36 及 CG37 注入硼离子。使用的情况表明,这样的机器对半导体材料或器件的硼掺杂是可用的。由于采用了先分析后加速的方案,在操作上有许多方便之处:(1)离子源处于低电位,便于对离子源进行调整和控制;(2)由于进入磁分析器的离子能量与最后加速的总能量无关,因此,改变离子总能量时,不需要改变分析器的励磁电流;(3)大多数的离子都是在低能量时打在分析器部分的真空盒中,辐射的剂量较小,因而辐射屏蔽可以比较简单。在使用中遇到的主要问题是,由于靶室处于高压,给离子束流的精确测量和注入浓度的精确控制带来困难。另外,由于设计上考虑不周,扫描面积太小,同时,加工和安装比较粗糙,致使象差也比较大。这些问题正在逐步解决中。

参 考 文 献

- [1] O. Klemperer, *Electronic Optics*, Cambridge University Press, 1953, p.68.
- [2] N. I. Tarantin et al., *Nucl. Instr. Meth.*, **38** (1965), 103.
- [3] M. M. Elkind, *Rev. Sci. Instr.*, **24** (1953), 129.