

# 半导体掺杂

## 掺杂

原位掺杂：在制备材料中掺入杂质

后掺杂：已制成的晶锭、晶片、薄层中引入杂质

常规掺杂：采用合金、扩散、离子注入

嬗变掺杂：将半导体中的同位素嬗变为杂质

# 半导体掺杂

- ❖ 扩散和离子注入是两种最常用的常规掺杂方法
- ❖ 适用于对半导体晶片或薄层进行局部电阻率控制或载流子寿命控制
- ❖ 是器件制造的核心工艺

# 扩散工艺

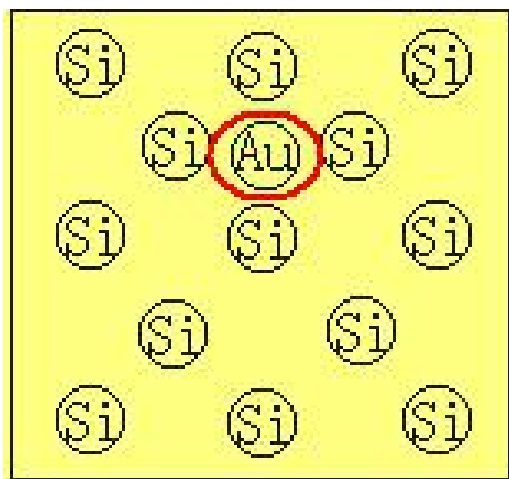
**扩散**是微观粒子（原子、分子等）的一种极为普遍的热运动形式，运动结果使浓度分布趋于均匀。

**条件：** 浓度差 热运动存在

集成电路制造中的**固态扩散工艺**简称扩散，是将一定数量的某种杂质掺入到硅晶体中或其他半导体晶体中去，以**改变电学性质**，并使**掺入的杂质数量、分布形式和深度等都满足要求**。扩散是**掺杂**的一种方法。

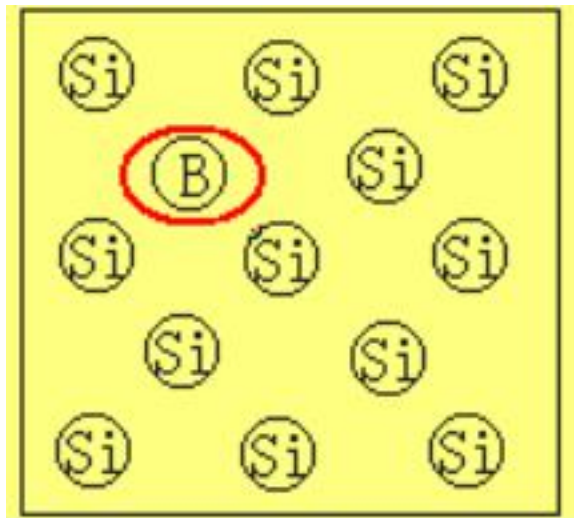
# 杂质的扩散机构

- 主要可分为以下两种机构，**替位式扩散**和**间隙式扩散**。
- 存在于晶格间隙的杂质称为**间隙式杂质**
- 间隙式杂质从一个间隙位置到另一个间隙位置上的运动称为**间隙式扩散**



间隙式杂质主要是半径小、且不容易和硅原子键合的原子，它们以**间隙方式**在晶体中作扩散运动。

**间隙式杂质**



**替位式杂质**

- 占据晶体内晶格格点上的正常位置的杂质原子，称**替位杂质**。替位杂质从一个晶格位置运动到另一个晶格位置上称为**替位式扩散**。
- 替位杂质的近邻晶格上出现**空位**，替位杂质才能比较容易的运动到近邻空位上。当近邻没有空位时，通过**换位**才能实现替位杂质从一个晶格位置运动到另一个晶格位置上，这种换位会引起周围晶格发生很大的畸变，需要相当大的能量，这个过程是难以实现的。
- **替位杂质运动同间隙杂质相比一般来说更困难**

# 扩散系数与扩散方程

- 扩散是随机跳动产生的原子运动，如果存在杂质浓度梯度则将产生杂质的净扩散流。
- 决定扩散运动重要因素：  
浓度差、温度、粒子大小、晶体结构、缺陷浓度以及粒子运动方式
- 扩散的结果：  
粒子浓度趋于平衡

# 菲克第一定律

- 1855年，菲克（Fick）提出描述物质扩散的第一定律,他认为,如果在一个有限的基体中存在杂质浓度梯度，则杂质将会产生扩散运动，而且扩散方向是指向浓度低的方向。

菲克第一定律：

杂质的扩散流密度正比于杂质浓度梯度

$$\frac{\partial C}{\partial x}$$

扩散粒子密度J： 单位时间通过单位面积的杂质数

$$J(x, t) = -D \frac{\partial C}{\partial x}$$

D为扩散系数，单位是 $\text{cm}^2/\text{s}$

C(x,t)杂质浓度

负号表示粒子是从浓度高向浓度低处扩散

# 扩散系数D

- 扩散系数D是表征扩散能力的重要参数。

它的数值越大，表示扩散得越快，在相同时间内，在晶体中扩散得越深其数学表达式为： $D=D_0\exp(-\Delta E/kT)$

式中： $\Delta E$ 扩散过程中的激活能，实际上就是杂质原子扩散时必须克服的某种势垒。

$D_0$ ：温度T为无穷大时，扩散系数D的表观值。

$k$ ：玻耳兹曼常数，其值为： $8.62 \times 10^{-5} \text{eV/K}$

T：绝对温度（K）。

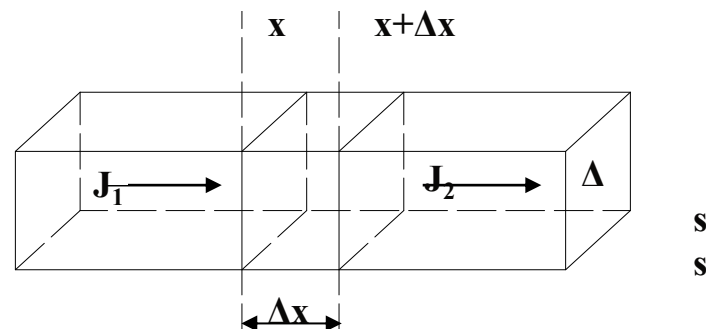


# 几种杂质在硅中的 $D_0$ 和 $\Delta E$ 的数值

杂质元素	$D_0$ (cm <sup>2</sup> /s)	$\Delta E$ (ev)	适用的温度范围 (°C)
砷 (As)	68. 6	4. 23	1000~1350
锑 (Sb)	12. 9	3. 98	1190~1398
磷 (P )	10. 5	3. 96	900~1300
硼 (B )	25	3. 51	1050~1350
铝 (Al)	4. 8	3. 36	1050~1380
镓 (Ga)		4. 12	1130~1358
铟 (In)	16. 5	3. 90	1105~1360
碳 (C )	0. 33	2. 92	1070~1400
铜 (Cu)	$4 \times 10^{-2}$	1. 0	800~1100
银 (Ag)	$2. 0 \times 10^{-3}$	1. 60	1100~1350
金 (Au)	$1. 1 \times 10^{-3}$	1. 12	800~1200
铁 (Fe)	$6. 2 \times 10^{-3}$	0. 87	1100~1260
锂 (Li)	$2. 5 \times 10^{-3}$	0. 655	25~1350

## 扩散方程（第二菲克定律）

一维情况下，沿扩散方向，从 $x$ 到 $x+\Delta x$ ，面积为 $\Delta S$ 的一个小体积元内的杂质数量随时间的变化情况。



在 $t$ 时刻，设体积元内的杂质浓度为 $C(x,t)$ ；在 $t+\Delta t$ 时刻，设体积元内的杂质浓度为 $C(x,t+\Delta t)$ ；经过 $\Delta t$ ，该体积元内杂质变化量为：

$$C(x,t) \cdot \Delta S \cdot \Delta x - C(x,t+\Delta t) \cdot \Delta S \cdot \Delta x = -[C(x,t+\Delta t) - C(x,t)] \cdot \Delta S \cdot \Delta x$$

经过 $\Delta t$ ，该体积元内杂质变化量是由通过 $x$ 处和  $x+\Delta x$ 处两界面的流量差造成的，有：

$$J(x+\Delta x,t) \Delta S \cdot \Delta t - J(x,t) \Delta S \cdot \Delta t = [J(x+\Delta x,t) - J(x,t)] \cdot \Delta S \cdot \Delta t$$

$$-\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial J(x,t)}{\partial x} \quad \text{扩散方程：} \quad \frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2}$$

**第二菲克定律：**描述了杂质浓度随时间变化的规律

# 扩散杂质的分布

- 由扩散方程以及边界条件和初始条件不同，扩散方程的解不同，杂质的分布也不同。
- 目前，扩散分布主要有两种：恒定表面源扩散、有限表面源扩散

## 恒定表面源扩散（以硅为例）

- 在整个扩散过程中，硅片表面始终暴露在具有恒定而均匀的杂质源的气氛里。即表面的杂质浓度 $N_s$ 始终不变。
- 边界条件： $C(0, t) = C_s \quad x=0$
- 初始条件：在扩散的开始时间( $t=0$ )，除了Si表面( $x=0$ )与杂质气体接触外，Si片内部各点都没有杂质扩进去，即

$$C(x, 0) = 0 \quad t=0$$

得到方程组:

$$C(0, t) = C_s \quad x=0$$

$$C(x, 0) = 0 \quad t=0$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} dx = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} dx$$

解得:

$$C(x, t) = C_s \left( 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{Dt}}} e^{-\lambda^2} d\lambda \right) = C_s \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) = C_s \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$$

式中 $C_s$ 为Si表面浓度, 为常数

$$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{Dt}}} e^{-\lambda^2} d\lambda \text{ 为误差函数用符号 } \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \text{ 表示,}$$

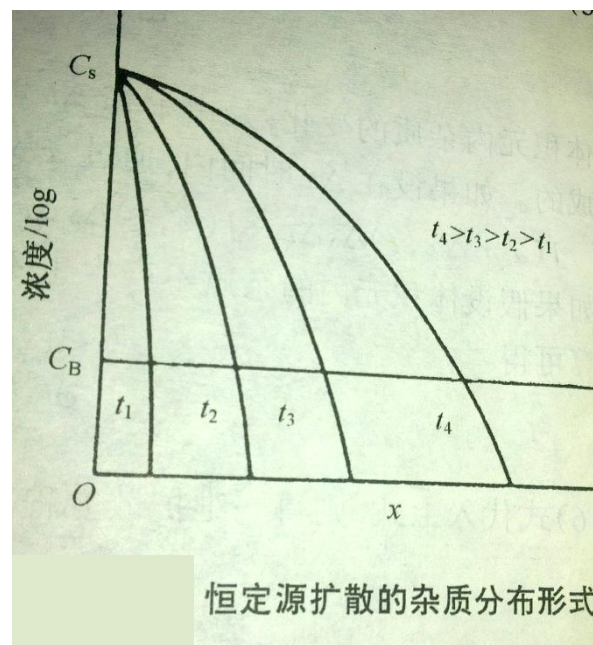
$$1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \text{ 为余误差函数用 } \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \text{ 表示。}$$

# 恒定表面源扩散的特点

## • 1. 杂质分布形式:

$C_s$ 一定的情况下，扩散的时间越长，杂质扩散就越深，扩到硅片内部的杂质也越多

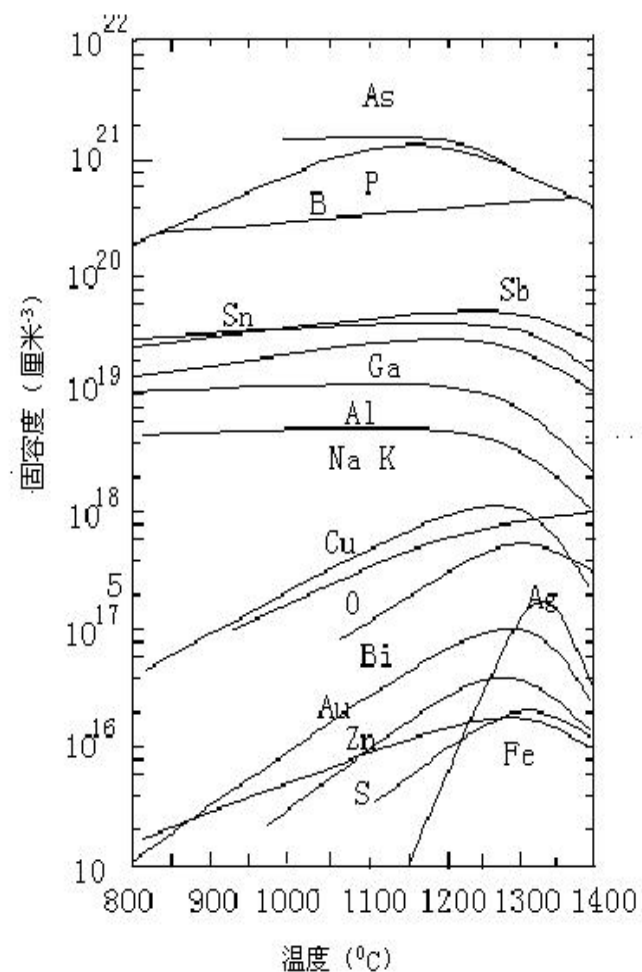
$C_s$ 由杂质在固体中的固溶度决定



$$Q = \int_0^{\infty} C(x, t) dx = \int_0^{\infty} C_s \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} dx = C_s 2\sqrt{Dt} \int_0^{\infty} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} d \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$$

$$Q = 2C_s \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} = 1.13C_s \sqrt{Dt}$$

- 恒定表面源扩散其表面杂质浓度 $C_s$ ,基本上由该杂质在扩散温度900-1200℃下的**固溶度所决定**。
- 在固溶度范围内,随着时间的增长,进入基片的杂质也不断增多
- 杂质的**最大固溶度**给杂质扩散的表面杂质浓度 $C_s$ 设置了**上限**
- 900-1200℃固溶度**随温度变化不大**,很难通过温度控制表面杂质浓度 $C_s$
- 如果扩散所要求的表面杂质浓度大于某杂质元素在Si中的最大固溶度,那么就无法用这种元素来获得所希望的杂质分布。



固溶度是指杂质在一定温度下能够溶入固体中的最大浓度 **几种在硅中的固溶度**

## 结深：

如果扩散杂质与衬底原有的导电类型不同，则在两种杂质浓度相等处形成pn结，其结的位置 $x_j$ 即结深。

$$C(x, t) = C_s \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$$

$$\text{当 } x = x_j \text{ 时 } C(x, t) = C_B$$

$$x_j = A\sqrt{Dt}$$

$$A = 2\operatorname{erfc}^{-1}\left(1 - \frac{C_B}{C_s}\right) \quad A \text{ 是仅与 } C_B/C_s \text{ 有关的常数}$$

**结深是工艺的一个重要参数，由上式可以看到 $x_j$ 与扩散系数 $D$ 和扩散时间 $t$ 的平方根成正比**

# 杂质浓度梯度

$$\left. \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \right|_{x,t} = -\frac{C_s}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}}$$

梯度受 $C_s$ ,  $t$ 和 $D$ 的影响, 改变其中某个量, 使浓度梯度满足要求  
p-n结处梯度为:

$$\left. \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \right|_{x_j} = -\frac{2C_s}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{x_j} \exp\left(-\operatorname{erfc}^{-2} \frac{C_B}{C_s}\right) \times \operatorname{erfc}^{-1} \frac{C_B}{C_s}$$

在 $C_s$ 和 $C_B$  一定的情况下, p-n结越深, 在结处的杂质浓度梯度越小



## 有限表面源扩散

如果扩散之前在硅片表面淀积一层杂质，在整个扩散过程中这层杂质作为扩散的杂质源,不再有新源补充，这种扩散方式称**有限源扩散**。

- 边界条件：由于扩散过程中，没有外来杂质补充，在Si片表面（ $x=0$ 处）的杂质浓度

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x} = 0$$

即  $\left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=0} = 0(t>0)$  和  $C(\infty, t) = 0$

初始条件：Si片内的杂质总量保持不变

$$\int_0^{\infty} C(x, 0) dx = \int_0^{\varepsilon} C(x, 0) dx = Q \quad (\varepsilon \rightarrow 0)$$

$$C(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi D t}} e^{-\frac{x^2}{4 D t}}$$

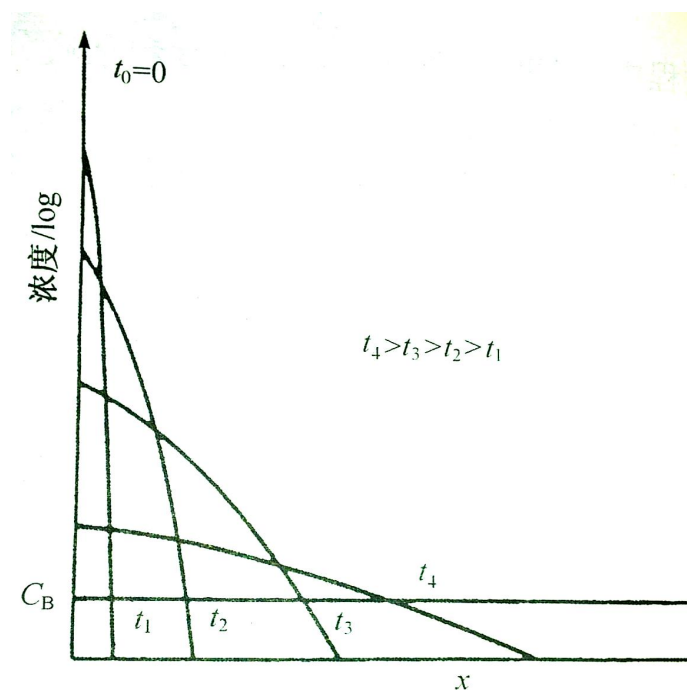
式中Q：扩散前存在于Si片表面无限薄层内，单位面积的杂质总量，扩散过程中Q为常数

$e^{-x^2/4Dt}$  高斯函数，上式所描绘的杂质分布称为高斯分布

# 有限源扩散的特点

## 1.杂质分布形式:

在整个扩散过程中,**si片内的杂质总量保持不变**,没有外来杂质补充,只依靠扩散前在**si片**表面上已淀积了那一薄层内有限数量的杂质原子,向硅片体内扩散。随着扩散时间的增长,表面杂质浓度不断下降,并不断地向内部推进扩散,这时表面杂质浓度与扩散杂质深度都在发生变化,由此可确定。



有限源扩散的杂质分布形式

# 有限表面源扩散表面浓度计算

## ■ Si表面 (X=0处) 杂质浓度

$$C(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}}$$

$$C_s(t) = C(0, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}}$$

D愈大 (扩散温度越高) t愈长,  $C_s$ 则愈低。

## ■ 有限表面源扩散杂质分布形式

$$C(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}} = C_s(t) e^{-\frac{x^2}{4Dt}}$$

可见C与 $C_s$ 成正比, 与D, t的平方根成反比。

# 结深

$$C_S(x, t) = C_B \quad x=x_j$$

$$x_j = A\sqrt{Dt}$$

$$A = 2\left(\ln \frac{C_S}{C_B}\right)^{1/2} \quad \text{A与} C_S/C_B \text{ 有关}$$

**在杂质分布形式相同的情况下 $C_B$ 越大，结深越浅**

# 杂质浓度梯度

$$\left. \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \right|_{x,t} = -\frac{x}{2Dt} C(x,t)$$

• p-n结处梯度为：

$$\left. \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \right|_{x_j} = -\frac{2C_s}{x_j} \bullet \frac{\ln(C_s / C_B)}{C_s / C_B}$$

- 杂质浓度梯度将随扩散深度的增加而减小

# 两步扩散工艺

- 对于限定源扩散来说，其特点是在整个扩散过程中，杂质总量保持不变，而随扩散时间的增长，表面浓度不断下降，扩散深度不断加深，因此，采用有限表面源扩散时，既能控制表面浓度又能控制扩散深度。
- 但采用有限源扩散时，扩散前必须在Si片表面沉积足够量的杂质源，并且必须具有较高的表面浓度，才能使限定源扩散获得符合要求的表面浓度和扩散深度。实践表明，采用恒定表面浓度扩散即能比较准确地控制扩散硅表面的杂质总量，又能获得高的表面浓度并且操作方便。因此，在当前硅平面器件工艺中普遍采用两步扩散工艺。
- 预淀积（恒定表面扩散）的主要目的是为了控制扩散入Si片表面的杂质总量，为第二步的再分布创造必要的条件。
- 再分布（有限表面源扩散）的目的，是控制整个扩散的表面浓度和结深，使它符合器件设计要求。

# 扩散工艺

- 按原始杂质源在室温下的相状态加以分类：

固态源扩散、液态源扩散、气相源扩散

- 固态源扩散：开管扩散、箱法扩散、涂源法扩散——杂质的化合物与硅反应，生成单质的杂质原子向硅内扩散
- 液态源扩散——携带气体通过源瓶，把杂质源蒸气带入扩散炉管内，与硅反应，生成单质的杂质原子向硅内扩散
- 气态源扩散——气态杂质一般先在硅表面进行化学反应生成掺杂氧化层，杂质再由氧化层向硅中扩散

# 硅掺杂工艺

## ①传统扩散工艺

固态源扩散： $\text{BN}$ ,  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$

气态源扩散： $\text{BBr}_3$

液态源扩散： $\text{AsH}_3$ ,  $\text{PH}_3$ ,  $\text{B}_2\text{H}_6$

## ②扩散工艺的发展

快速气相掺杂 (RVD)

气体浸没激光掺杂 (GILD)

**扩散只用于重掺杂**

大部分器件特征尺寸小于 $1\mu\text{m}$ , 用**离子注入**;



# 固态源扩散

## ① 开管扩散

通以一定流速的氮气或氩气，以防止逆扩散和污染

## ② 箱法扩散

箱子具有一定密闭性，扩散之前，氧化物杂质源脱水处理

## ③ 涂源法扩散

旋转涂源工艺，只适用于对杂质浓度控制要求不高的情况  
化学气相淀积“涂源”，均匀性、重复性都很好

常用B源：BN（化学性质稳定）

扩散前先加热生成 $B_2O_3$



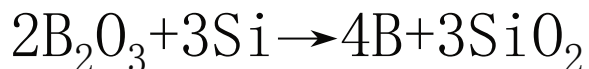
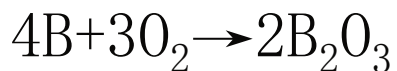
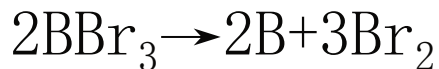
常用P源：单磷酸铵 $NH_4H_2PO_4$ （用惰性陶瓷黏合剂热压形成）

◆ 优点：重复性、稳定性较液态源扩散好

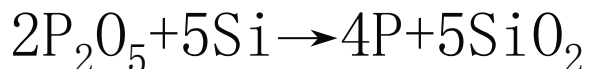
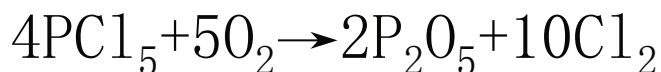
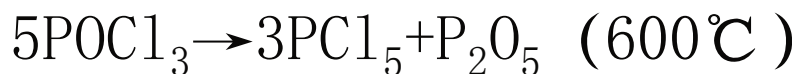
◆ 缺点：源的处理不方便（ $B_2O_3$ 受潮，活化处理）

# 液态源扩散

## 常用B源



## 常用磷源



◆ 优点：系统简单、操作方便、成本低、效率高、重复性、均匀性好

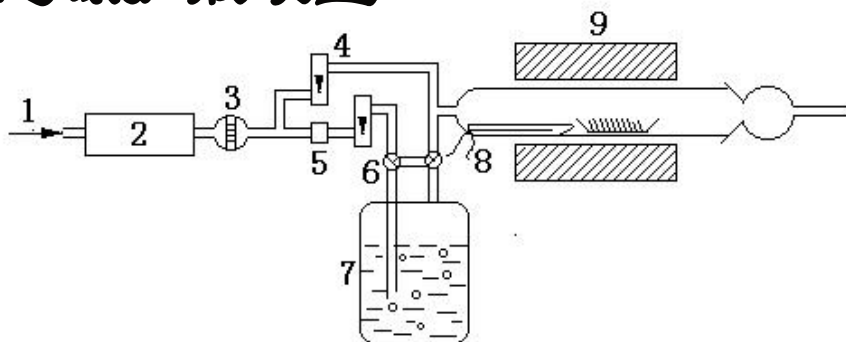
◆ 缺点：腐蚀性高，起泡器加压（易爆），对温度敏感，携带气体纯化和干燥

◆ 要求：

➤ 应准确控制炉温、源温（通常在低温）、扩散时间、气体流量

➤ 源瓶的气密性要好，扩散系统不能漏气

## 液态源扩散装置

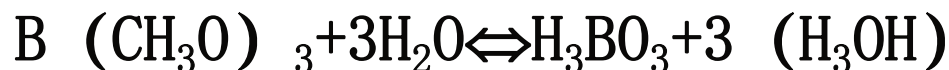


- |                  |        |
|------------------|--------|
| 1—N <sub>2</sub> | 2—纯化系统 |
| 3—流量计            | 4—流量   |
| 5—节流器            |        |
| 6—三通             | 7—源瓶   |
| 8—热电偶            | 9—扩散炉  |

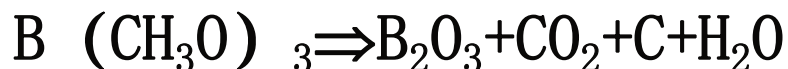
## 液态源扩散

液态源硼扩散采用的**杂质源**有：**硼酸三甲酯**  $[B(CH_3O)_3]$ ，**硼酸三丙酯**  $[B(CH_3CH_2CH_2O)_3]$ 和三溴化硼  $[BBr_3]$ 等

■ 硼酸三甲酯是无色透明的液体，在室温下挥发性强具有较高的饱和蒸气，本身易水解，生成硼酸和甲醇基反应式如下：



硼酸三甲酯在高温（500℃以上）下，发生热分解



分解出的三氧化二硼，在900℃左右与硅起化学反应，生成硼原子，并淀积在Si片的表面，其反应为：



此预淀积反应，在Si表面上易形成硼硅玻璃，还原出来的B原子向硅片内部扩散。

# 气态源扩散

比液态源扩散还要方便

调节各路流量来控制表面浓度不灵敏，因为实际上杂质总是过量的

气态杂质源多为杂质的氢化物或者卤化物，毒性大，易燃易爆

# 硼扩散工艺条件步骤

- 预沉积条件：炉温为**930°C**，源温为室温（**25°C**左右），予沉积前先在**930°C**下通源**15-20min**，使石英管含硼量达到饱和状态（新处理石英管**40-60min**）
- 当炉温升高至预定温度（**1180°C**）后通干氧**20min**，以排除管道内的空气，同时加热水溶并使水溶温度达到预定值（**95°C**）一切就绪后，即可将正片和陪片一起装入石英舟再推入炉子恒温压，先通**5min**干氧，**30min**湿氧，最后通**5min** 干氧。时间到后即可把硅片拉出石英管道。

# 扩散层的质量分析与检验

在工艺生产中，控制扩散工艺条件的**主要目的在于控制扩散的杂质分布**。具体的说就是控制各次扩散的**结深、表面浓度**，结深可以直接测量，而表面浓度则是通过对扩散层的薄层电阻和结深推算出来的，**因此结深、薄层电阻、表面浓度是评价扩散层质量的三个重要的工艺指标**。

结深的讨论与测试

$$x_j = A\sqrt{Dt}$$

$$A = 2\operatorname{erfc}^{-1}\left(1 - \frac{C_B}{C_S}\right)$$

**余误差函数分布**

$$A = 2\left(\ln \frac{C_S}{C_B}\right)^{\frac{1}{2}}$$

**高斯函数分布**

# 结深的测量:

磨角法:

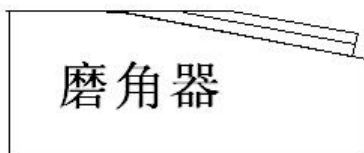
• 1) 原理:

它是利用P区和N区在染色上的差异, 使P-N结的界面显现出来, 测量其结深。当在结面上滴染色液时, 由于结两侧的Si与染色液形成微电池, 两个极区反应不同, 染色也有差异, 于是结面被显示出来。



• 2) 方法:

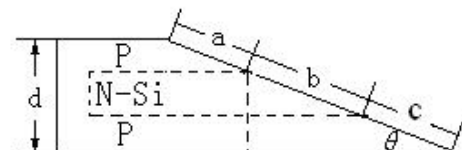
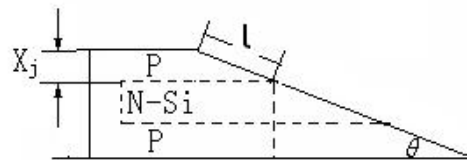
先将陪片固定在特别的磨角器上, 使Si片磨出一个具有一定角度 $\theta$  ( $1 \sim 5^\circ$ ) 的斜截面, 如图所示:



$$X_j = l \cdot \sin \theta$$

避免  $\theta$  变化引起误差

$$x_j = \frac{ad}{a+b+c}$$

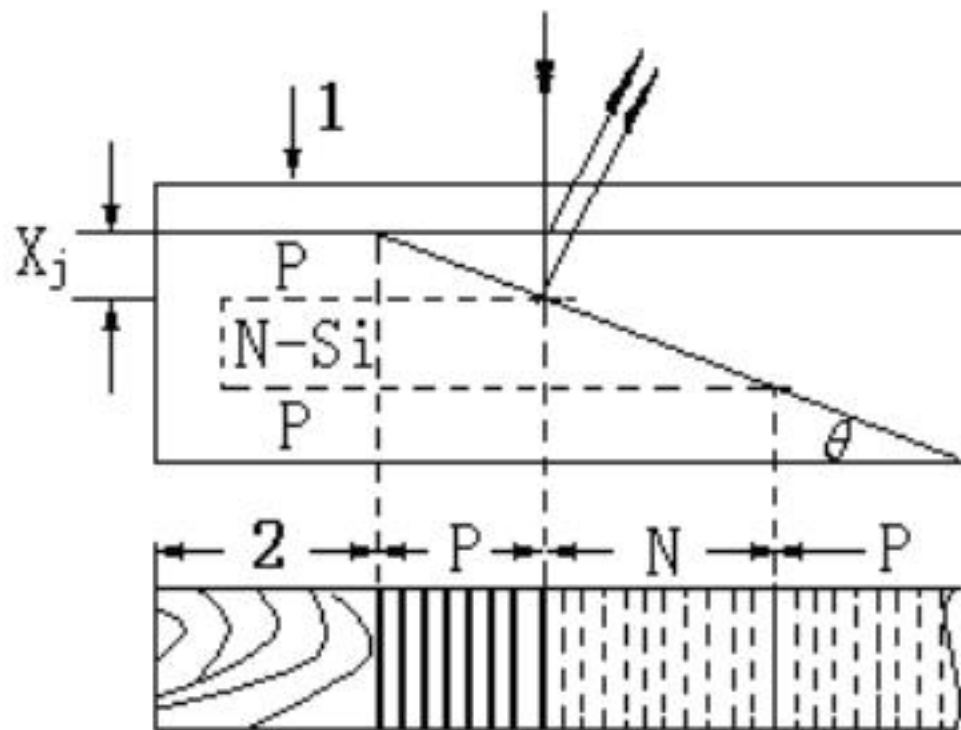


测量较浅结方法：采用双光干涉法，只要在硅片表面加一块平板玻璃（与Si片表面要贴紧）干涉条纹是平板玻璃的下面反射的光线和Si片表面反射光线相干涉所产生的。

$$x_j = \frac{\lambda}{2} m$$

**m: 条纹数目**

**$\lambda$ : 光波长**





# 薄层（方块）电阻的测量

在半导体器件生产中扩散层薄层电阻是反映扩散层质量符合设计要求与否的重要工艺指标之一。

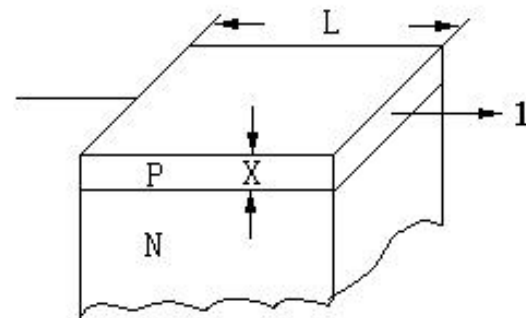
对应于一对确定数值的结深和薄层电阻，扩散层的杂质分布是确定的，也就是说，把薄层电阻的测量同结深的测量结合起来，我们就能够了解到扩散入硅片内部杂质的具体分布。

因此在晶体管和集成电路生产中，几乎每一次予淀积再分布后都要进行薄层电阻的测试。所以深入地了解薄层电阻的定义，物理意义和测试方法，对我们控制扩散条件和提高产品质量具有十分重要的现实意义。

## 薄层电阻定义

**薄层电阻**：表面为正方形的半导体薄层，在电流方向[电流方向平行正方形的边]所呈现的电阻。

扩散层的薄层电阻也称方块电阻，常分别用 $R_s$ 或 $R_{\square}$ 表示。



$$R_s = \bar{\rho} \frac{l}{s} = \bar{\rho} \frac{l}{l \cdot x_j} = \bar{\rho} \frac{1}{x_j}$$

由上式可见，薄层电阻的大小与薄层的平均电阻率成正比，与薄层的厚度成反比，而与正方形的边长无关。其单位为欧姆。为了表示薄层电阻不同于一般电阻，其单位常用[欧姆/方块]或 $\Omega/\square$ 表示。

# 薄层(方块)电阻的物理意义

在杂质均匀分布的半导体中，电阻率与杂质浓度之间有以下关系：

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q\mu C}$$

$q$ ：为电子电荷量

$\mu$ ：为载流子迁移率

$C$ ：为均匀掺杂半导体中杂质浓度

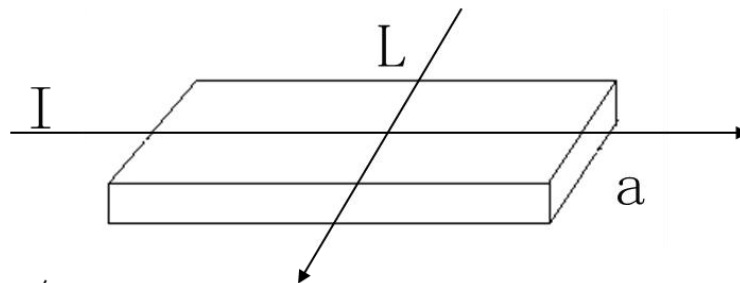
对于扩散薄层来说，在扩散方向上各处的杂质浓度 $C(x)$ 是不相等的，所以载流子的迁移率 $\mu$ 的数值也不相同。则扩散薄层的平均电阻率与平均杂质浓度之间关系：

$$\bar{\rho} = \frac{1}{q\bar{\mu}\bar{C}_{(x)}} \quad R_s = \frac{\bar{\rho}}{x_j} = \frac{1}{q\bar{\mu}\bar{C}_{(x)}x_j} \quad \bar{C}_{(x)} \cdot x_j \quad \begin{array}{l} \text{为单位表面积扩散薄层内} \\ \text{的净杂质总量} \end{array}$$

薄层电阻 $R_s$ 与单位表面积薄层内的净杂质总量成反比。因此，**薄层(方块)电阻的大小直接反映了扩入Si片内部的净杂质总量的多少**。薄层电阻越小，表示扩入Si片的净杂质总量越多。反之，扩入Si片的净杂质总量越少。

# 计算扩散电阻

- 当计算一条状扩散层一端到另一端的电阻值时，只要将串联的方块数乘上 $R_s$ （方块电阻），或用并联方块数去除 $R_s$ ，就可以得到条状扩散电阻值。

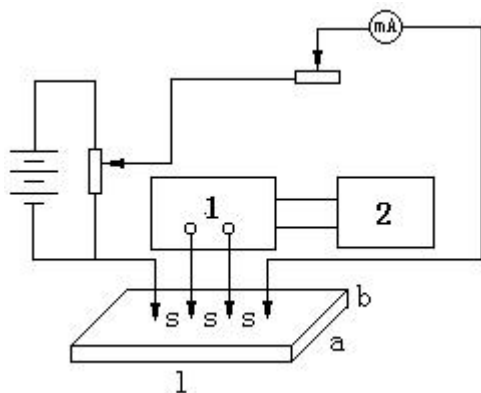


$$R = R_s \cdot L / a$$

$$R = R_s \cdot a / L$$

# 方块电阻的测量

目前在生产中测量扩散层薄层电阻 $R_s$ ，广泛使用四探针法。测量装置图如图所示：四探针采用排成直线彼此相距为 $S$ 的四根钨丝构成。测量时将针尖压在Si片的表面上外面两根针通电流 $I$ ，测量中间两根探针的电压，如果被测Si片很大，（即它的长度 $L$ 和宽度 $a$ 比探针间距 $S$ 大很多时，则薄层电阻采用下面公式进行计算）



$$R_s = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot \frac{V}{I} = 4.53 \frac{V}{I}$$

1—电位差计    2—检流计

- 由于生产中，所用样品的面积都比较小，因此上式中的系数必须加以适当修正。因此薄层电阻的普遍公式的表达式为：

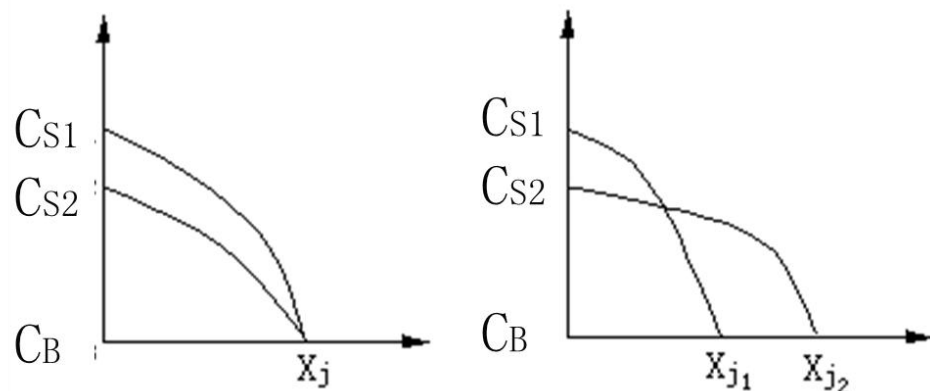
$$R_s = C \frac{V}{I}$$

式中C称为修正因子，其数值的大小除与被测样品的形状和大小有关外还与样品是单面扩散还是双面扩散等因素有关。为使用方便，我们把各种情况下修正因子C的数值列表中以便查阅。

# 表面杂质浓度

- 扩散杂质在半导体基片中的表面浓度，是半导体器件设计，制造的一个重要结构参数，用 $N_s$ 表示。
- 目前直接测定表面杂质浓度的方法比较复杂，常采用间接方法获得

$C_s$   $X_j$   $R_s$ 三者的关系

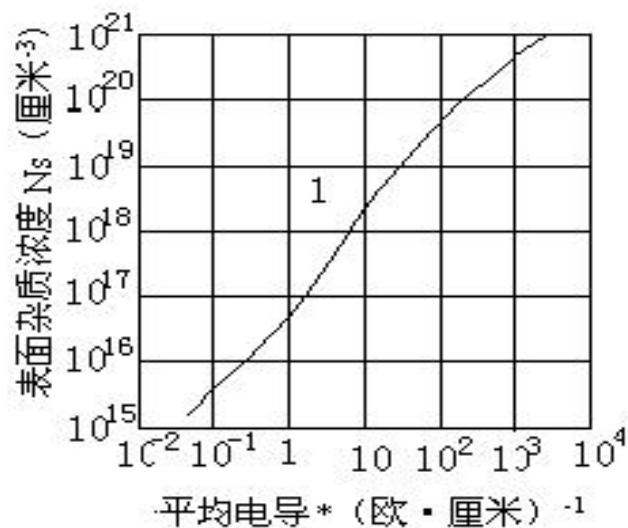


(a)  $X_j$  相同  $R_s$  不相同 (b)  $Q(R_s)$  相同  $X_j$  不相同

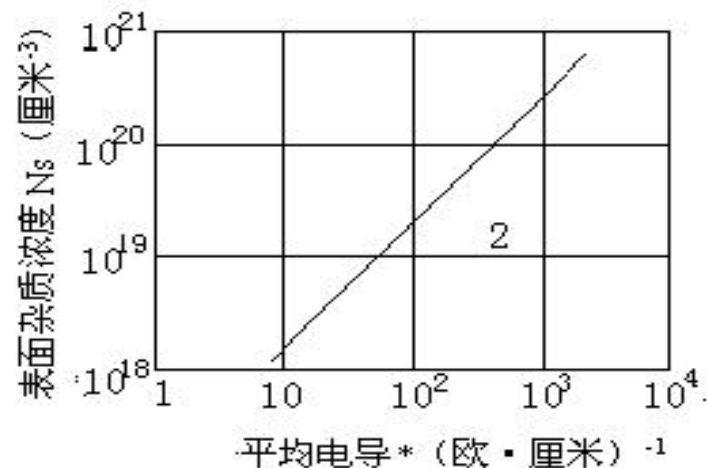
$X_j$ 、 $R_s$ 反映出表面杂质浓度 $N_s$ 的大小

$$R_s = \frac{\bar{\rho}}{x_j} \quad \bar{\sigma} = \frac{1}{R_s x_j}$$

测 $R_s, X_j \rightarrow \bar{\sigma} \xrightarrow{\text{查表}} N_s$



1— $N_B = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$



2— $N_B = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

P型硅高斯分布扩散层  $\sigma$  与 $N_s$ 的关系    N型硅高斯分布扩散层  $\sigma$  与 $N_s$ 的关系



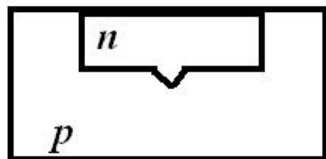
# 击穿电压

P-N结**击穿电压**是表征扩散层质量好坏的重要标志。

## 分段击穿 or 低压击穿

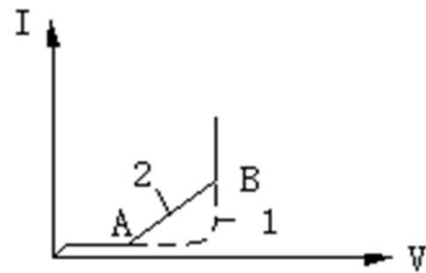
是一种局部击穿作用，首先在pn结局部点发生击穿，然后出现大面积击穿。

原因：



(1) 光刻的图形边缘不整齐，扩散后pn结出现**尖峰**；

(2) 外延层的位错、层错密度过高，以及表面存在合金点、破坏点时，杂质在这些地方扩散快，使pn结出现**尖峰**



1—正常雪崩击穿 2—分段击穿

- 尖峰处的曲率半径小，引起**电场集中**，当外加反向电压还较小时，尖峰处电场很大，首先发生击穿。
- 由于尖峰处的截面积很小，体电阻大，击穿后电流随外加电压缓慢增加，当反向电压**达到pn结雪崩击穿电压**时，pn结大面积击穿，反向电流急剧增加。

# 减少分段击穿电压措施

- 尽量选取低层错、位错的外延片
- 提高光刻的质量，防止出现毛刺、钻蚀、针孔等
- 避免杂质污染
- 控制好扩散温度和杂质蒸汽压，避免合金点和破坏点的产生
- 在不影响其它电学特性的情况下，适当增加 $x_j$ ，以加大尖峰的曲率半径，提高击穿电压

# 扩散工艺的发展

## 快速气相掺杂（RVD: rapid vapor-phase doping）

- ❧ 快速气相掺杂是一种掺杂剂从气相直接向硅中扩散、并形成超浅结的快速掺杂工艺。
- ❧ 硼源： $B_2H_6$           磷源： $PH_3$
- ❧ 特点：
  - ❖ 使用RTP，可形成浅结
  - ❖ 在硅表面不形成含有杂质的玻璃层
  - ❖ 与离子注入相比，无沟道效应、晶格损伤、或使硅片带电

# 扩散工艺的发展

气体浸没激光掺杂（**GILD: gas immersion laser doping**）

✧ 气体浸没激光掺杂是一种用短脉冲（20~100纳秒）激光照射气态源中的硅表面，使之成液态层，同时进行掺杂的过程。

✧ 硼源：BF<sub>3</sub>                  磷源：PF<sub>5</sub>

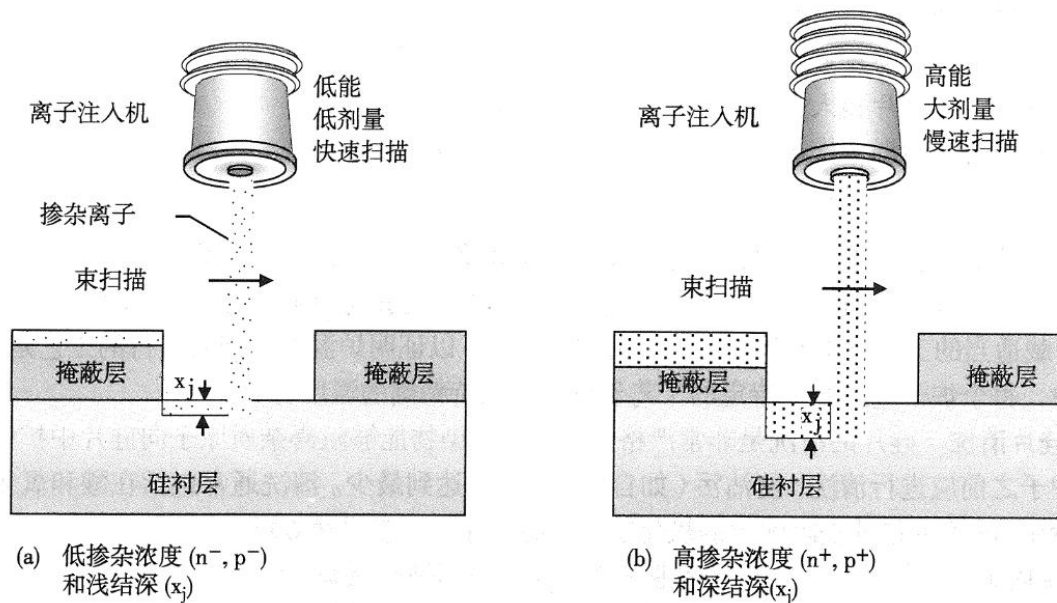
✧ 特点：

- ❖ 对体内杂质分布无影响
- ❖ 形成陡峭杂质分布形式的超浅结
- ❖ 杂质分布非常均匀，因为液体中杂质扩散速度非常快（比在固体中高8个数量级）

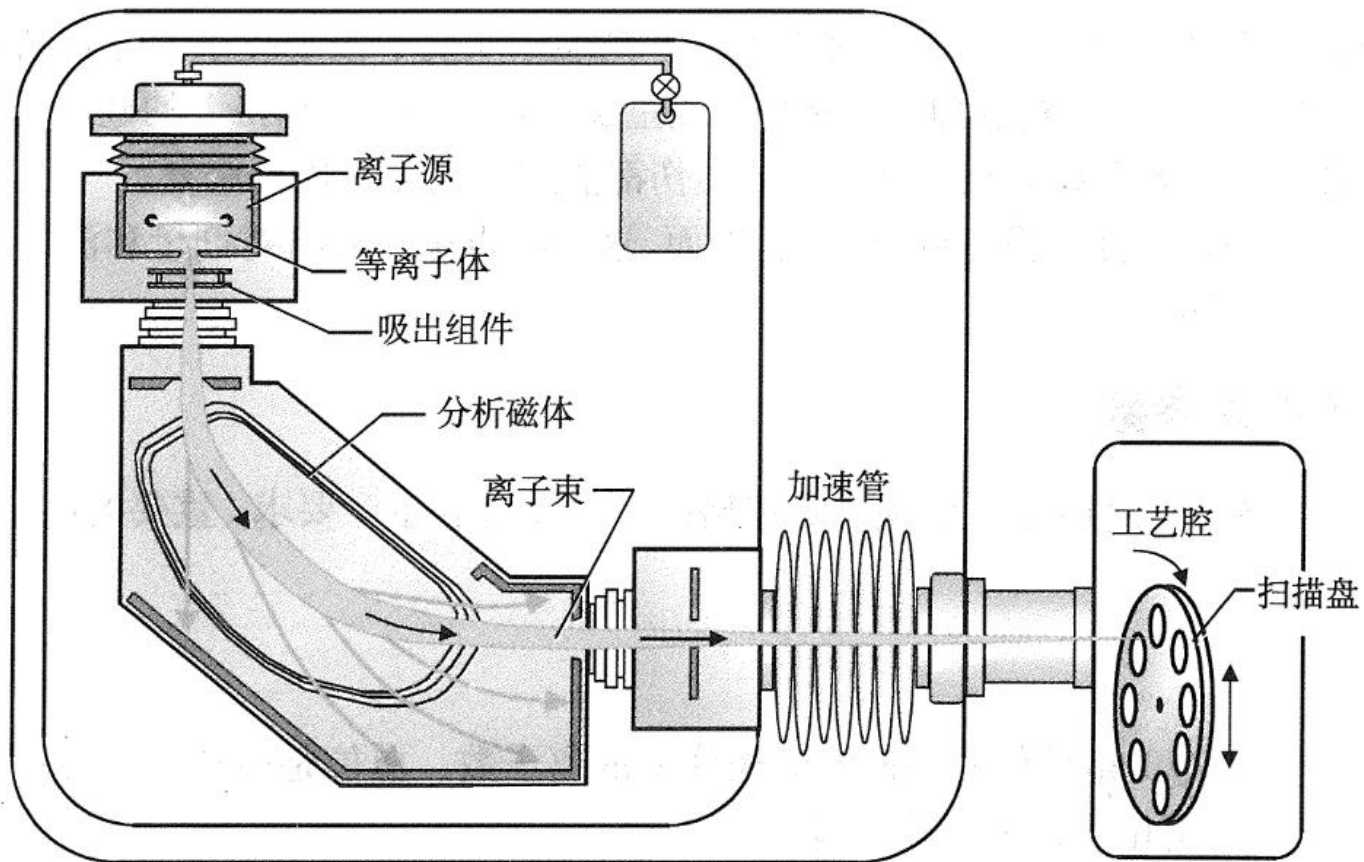
---

# 离子注入

**离子注入**是一种向硅衬底中引入可控制数量的杂质，以改变其电学性能的方法。亚0.25微米工艺的注入过程有两个主要目标：**向硅片中引入均匀、可控制数量的特定杂质；把杂质放置在希望的深度。**



控制杂质浓度和深度



离子注入机示意图

# 离子注入的优缺点

优点	描述
1. 精确控制杂质含量	能在很大范围内精确控制注入杂质浓度, 从 $10^{10}$ 到 $10^{17}$ ions/cm <sup>2</sup> (离子每平方厘米), 误差在 $\pm 2\%$ 之间。扩散在高浓度控制杂质含量误差在5%到10%以内, 但浓度越小误差越大
2. 很好的杂质均匀性	用扫描的方法控制杂质的均匀性
3. 对杂质穿透深度有很好的控制	通过控制注入过程中离子能量控制杂质的穿透深度, 增大了设计的灵活性, 如埋层, 最大杂质浓度在埋层里, 最小浓度在硅片表面
4. 产生单一离子束	质量分离技术产生没有沾污的纯离子束。不同的杂质能够被选出进行注入。高真空保证最少沾污
5. 低温工艺	注入在中等温度(小于 $125^{\circ}\text{C}$ )下进行, 允许使用不同的光刻掩膜, 包括光刻胶
6. 注入的离子能穿过薄膜	杂质可以通过薄膜注入, 如氧化物或氮化物。这就允许MOS晶体管阈值电压调整在生长栅氧化层之后进行。增大了注入的灵活性
7. 无固溶度极限	注入杂质含量不受硅片固溶度限制

离子注入的**缺点**：

高能杂质离子轰击硅原子将对晶体结构产生损伤；

另一个缺点是注入设备的复杂性



# 离子注入参数

重要的离子注入参数有：

- 剂量
- 射程/能量

剂量：

剂量(Q)是单位面积硅片表面注入的离子束，单位为原子(或离子)每平方厘米，可由下式计算

$$Q = \frac{I_t}{enA}$$

如公式所示，离子束电流的量级是定义剂量的一个关键变量。如果电流增大，单位时间内注入的杂质原子数也增大，大电流会产生均匀性问题

## 射程:

离子射程指的是**离子注入过程中，离子穿入硅片的总距离**

当离子由于电势差加速时，它们就获得了能量。离子的能量是动能(KE)，一般我们用电子伏特(eV)来表示，描述这种能量的公式为

$$KE = nV$$

其中，KE = 能量，单位是电子伏特 (eV)

n = 离子的电荷状态，(即 “+” = 1, “++” = 2)

V = 电势差，单位是伏特

例如，如果带一个正电荷的离子在电势差为 100 000 伏特 (100 kV) 的电场中运动，它的能量就是：

$$\begin{aligned} KE &= nV \\ &= (1)(100 \text{ kV}) \\ &= 100 \text{ keV} \end{aligned}$$

# 离子注入参数

注入机分类	描述和应用
中低电流	<ul style="list-style-type: none"><li>● 高纯离子束，电流大于 10 mA</li><li>● 束流能量一般小于 180 keV</li><li>● 多数情况下硅片固定，扫描离子束</li><li>● 穿通注入专用</li></ul>
大电流	<ul style="list-style-type: none"><li>● 产生的离子束电流大于 10 mA，大剂量注入最大能到 25 mA</li><li>● 离子束能量通常小于 120 keV</li><li>● 大多数情况下离子束固定，硅片扫描</li><li>● 超浅源漏区注入的超低能束流（200 eV 到 4 keV）</li></ul>
高能	<ul style="list-style-type: none"><li>● 束流能量超过 200 keV，最高达到几个 MeV</li><li>● 向沟槽或厚氧化层下面注入杂质</li><li>● 能形成倒掺杂阱和埋层</li></ul>
氧注入机	<ul style="list-style-type: none"><li>● 大电流系统用于半导体上硅（SOI）的氧注入</li></ul>

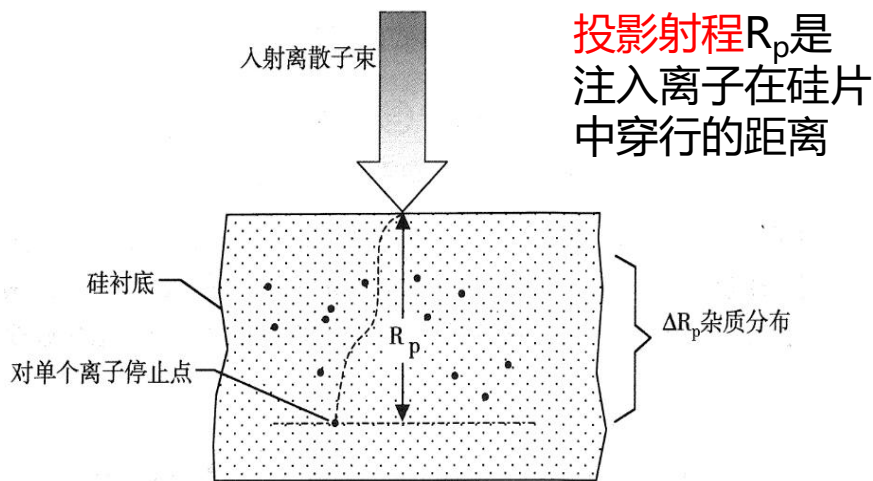


图1.杂质离子的射程和投影射程

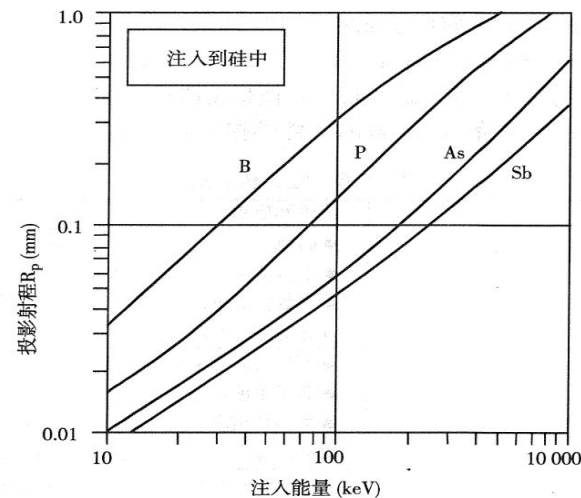


图2.注入能量对应投影射程图

投影射程决定于离子质量和能量、靶的质量和离子束相对于硅片晶体结构的方向（见图1）但并非所有离子都恰好停止在投影射程上，有的近些有的远些，离子也会横向移动。综合这些离子运动就产生了杂质原子穿行的距离分布，即偏差 $\Delta R_p$ 。随着杂质原子的注入能量增加投影射程将增大，但杂质浓度的峰值会因偏差的增加而降低。投影射程图能预测一定注入能量下的投影射程（图2）

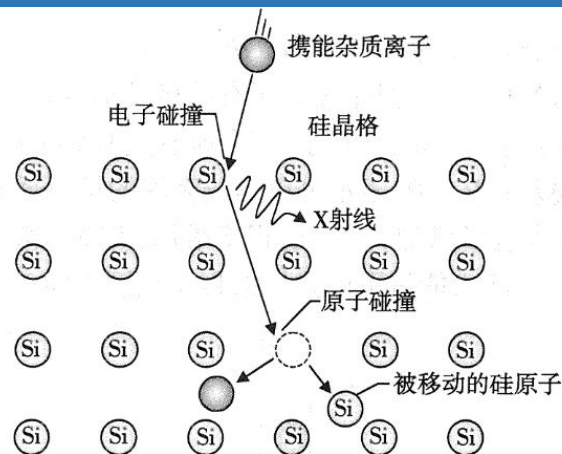


图3.注入杂质原子能量损失

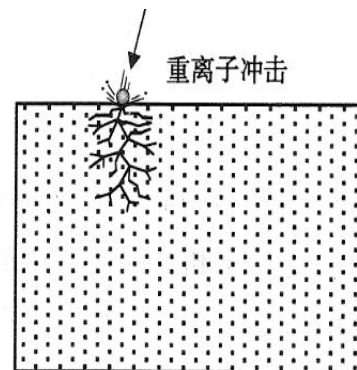
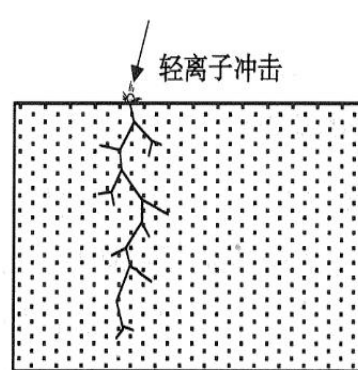
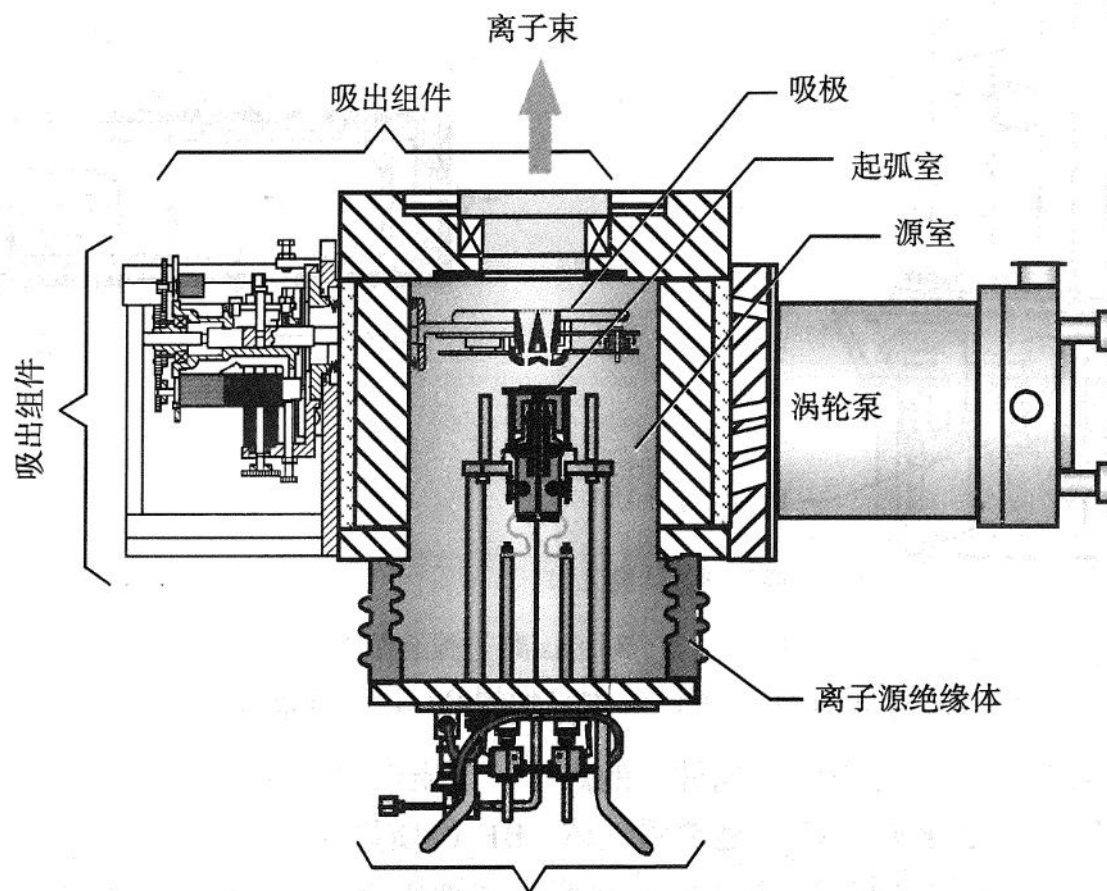


图4.由于轻离子和重离子引起的晶体损伤

注入离子在穿行硅片过程中与硅原子发生碰撞导致能量损失，并最终停在某一深度（图3）的**两个主要的能量损失机制是电子阻碍和核阻碍**。**电子阻碍**是杂质原子与靶材料的电子发生反应造成的。**核阻碍**是由于杂质原子与硅原子发生碰撞造成硅原子移位杂质在硅原子间穿过，会在晶格中产生一条受损害的路径，**损伤的情况决定于杂质离子的轻重**（图4）**轻杂质原子擦过硅原子，转移的能量很少，沿大散射角方向偏转**。**重离子每次与硅原子碰撞都会转移许多能量，并沿相对较小的散射角度偏转，每个移位硅原子也会产生大数量的位移**。

离子注入机包含以下5个部分：

离子源、引出电极（吸极）和离子分析器、加速管、扫描系统、工艺室



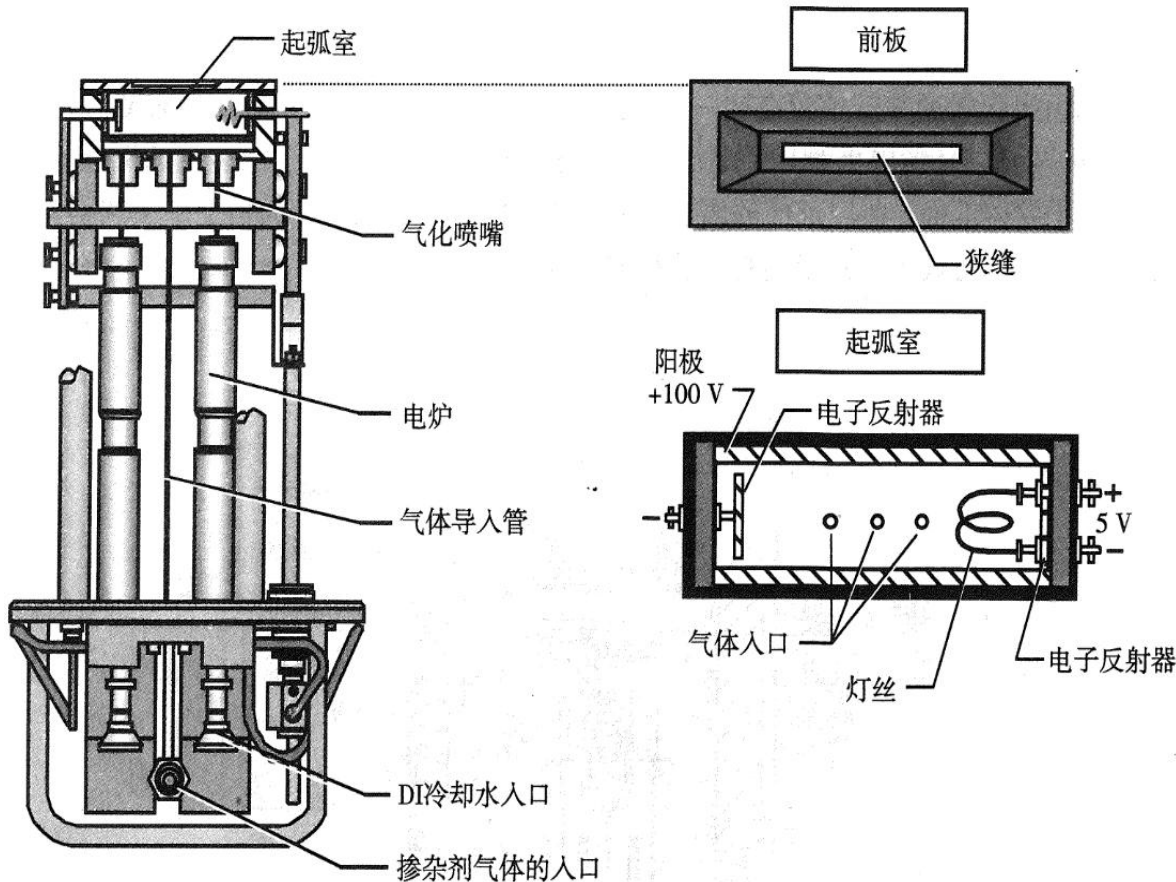
离子源和吸极装配图



## • 离子源

离子产生:

**通过电子轰击气体原子，离子源中会产生离子。**电子通常由钨丝源产生。Freeman离子源是一种最常用的电子源：棒状阴极灯丝装在一个有气体入口的电弧释放室内。电弧室的侧壁是阳极，当气体进入时，灯丝通大电流，并在阴极和阳极之间加100V电压，就会在灯丝周围产生等离子体。高能电子和气体分子碰撞就产生了正离子，外部磁铁施加一个平行于灯丝的磁场，以增加电离并稳定等离子体。Bernas离子源是Freeman离子源的一个变形：利用猪尾形灯丝和带负电的反射极，改进电子的产生和效率。



Bernas离子源装配图

## • 吸极和离子分析器

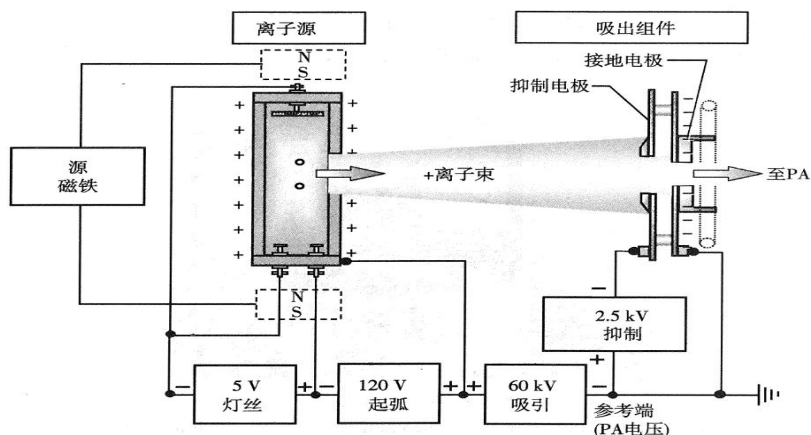


图1.离子源和吸极交互作用装配图

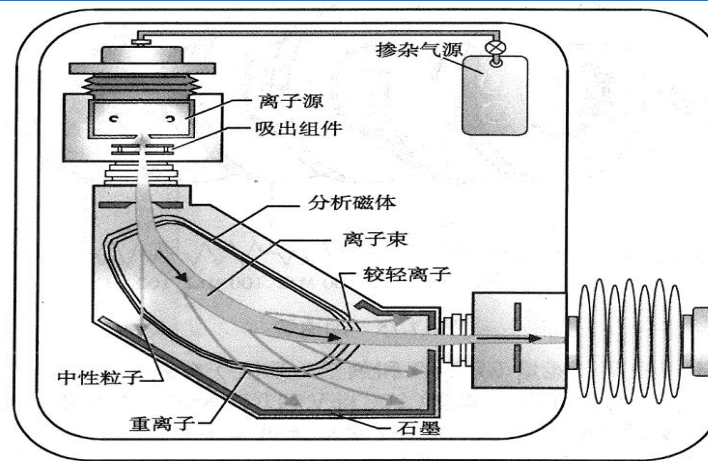


图2.分析磁体

**质量分析器磁铁：**从离子源中引出的离子可能包含许多不同种类的离子。它们在吸极电压的加速下，以很高的速度运动。离子束中的不同离子有着不同的原子质量单位(amu)。注入机中的磁性离子分析器能将需要的杂质离子从混合的离子束中分离出来。如图2，**分析器磁铁形成90°角，其磁场使离子的轨迹偏转成弧形。**对于一定的磁场强度，重离子不能偏转到合适的角度，而轻离子的偏转过大，**只有一种离子能发生恰当的偏转**，顺利通过分析器磁铁的中心，这就是最终注入到硅片中的杂质。



## • 加速管

为了获得更高的速度，除了分析器磁铁，正离子还要在加速管中的电场下加速。加速管是一种线性设计，由一系列被介质隔离的电极组成，电极上的负电压依次增大。电极间总的电压差将叠加在一起，总电压越高，离子速度越大。

**后加速器：**在加速管的后加速器中，束流也会发生聚束。

**大电流高能离子束：**高能注入机用于注入掩埋杂质层。大束流能减少注入时间，提供产量。离子穿过这些间隔时得以加速，最终能量能达到传统加速通道的20倍。

**大电流低能离子束：**对超浅结的需求促进了大电流低能离子束的发展。保证低能离子束具有很好的聚束特性很困难，因为离子束的尺寸很难控制，这种困难会随电流的增大和能量的降低而更加显著。

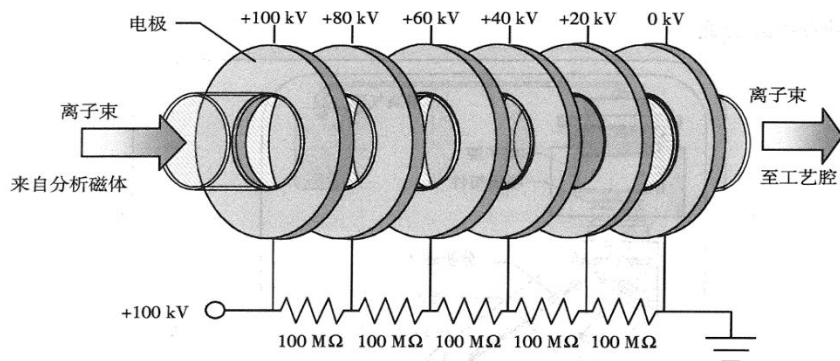


图1.加速管

**空间电荷中和：** 由于电荷之间相互排斥，所以一束仅包括正电荷的离子束本身不稳定，容易造成离子束膨胀，最终导致注入不均匀。离子束扩大可用二次电子中和正离子的方法缓解，被称为**空间电荷中和**。当高能杂质离子在行进过程中撞击某些表面时，就会产生二次电子。二次电子在负偏压板之间弹来弹去但不会离开离子束的特定区域。这些电子能中和离子束，阻止或减小离子束扩大（图1）

**中性束流陷阱：** 正电荷离子束在小于 $10^{-6}$ 托的真空下形成，但仍有残余气体分子。当杂质离子与残留气体分子碰撞而获得一个电子时，就形成了中性离子。它们没有电荷因为不能偏转，若不能去除将会被同时注入。**中性束流陷阱**就是利用偏转电极，使离子束在进入靶室前一段距离内发生偏转。由于中性离子不发生偏转，它们将直接撞击到接地的收集板上（图2）

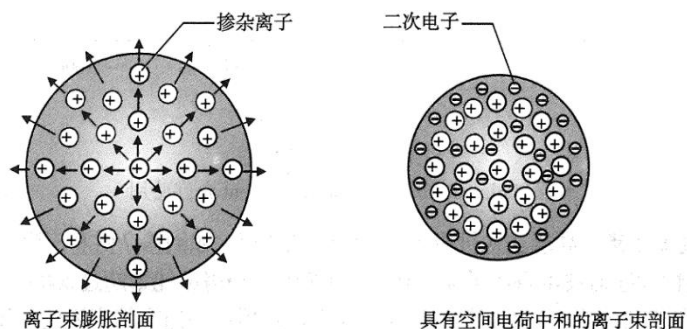


图1.空间电荷中和

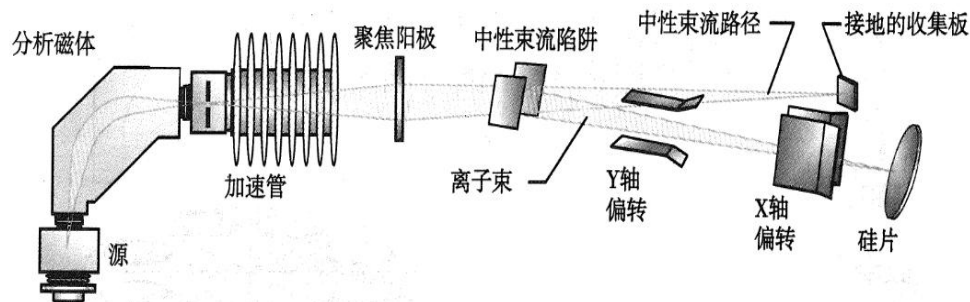


图2.中性束流陷阱

## • 扫描系统

注入机的目标是在成分和能量方面形成纯净的离子束。离子束仅包含具有预定能级的希望得到的杂质离子。

扫描方式有两种：固定硅片，移动束斑；固定束斑，移动硅片。

扫描在剂量的统一性和重复性方面起着关键作用。

注入机中的扫描系统有以下几个不同种类：

- 静电扫描
- 机械扫描
- 混合扫描
- 平行扫描

- **静电扫描：** 静电扫描在一套X-Y电极上加特定电压，使离子束发生偏转，注入到固定的硅片上(图1)。
- **机械扫描：** 离子束固定，硅片机械移动。此方法一般用于大电流注入机，因为静电很难使大电流高能离子束偏移。

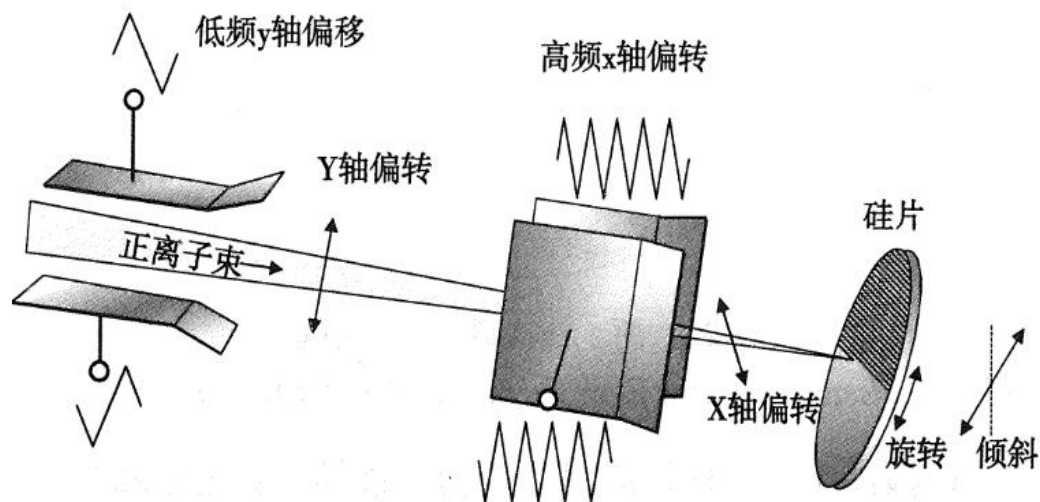


图1.硅片的静电离子束扫描

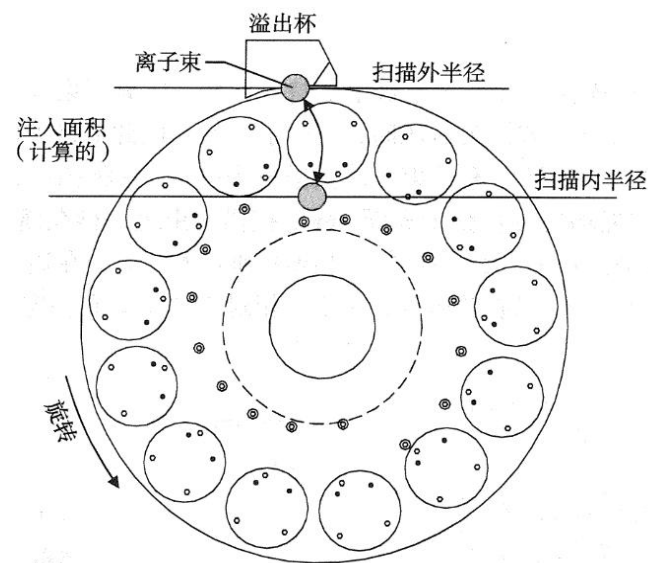


图2.离子注入硅片的机械扫描

- **混合扫描：** 硅片放置在轮盘上旋转，并沿y轴方向扫描。离子束在静电（或电磁）的作用下沿x轴方向扫描。这种方法常用于中低电流注入，每次注入一个硅片。
- **平行扫描：** 静电扫描的离子束与硅片表面不垂直，容易导致阴影效应。平行扫描的离子束与硅片表面的角度小于0.5度，因而能减小阴影效应和沟道效应。平行扫描中，离子束先静电扫描，然后通过一组磁铁，调整它的角度，使其垂直注入硅片表面。
- **硅片冷却：** 离子束轰击硅片的能量转化为热，导致硅片温度升高。硅片冷却系统用来控制温度，防止出现由加热引起的问题。硅片的冷却广泛应用了两种技术：气冷和橡胶冷却。

■ **硅片充电：**在注入过程中，离子束撞击硅片导致正离子在掩蔽层上的积累，即硅片充电。这种情况硅片上能形成大量电荷，特别是大电流注入机更严重。形成的电荷会改变离子束中的电荷平衡，使束斑扩大，剂量分布不均匀。还会损害表面氧化层，如损害栅氧化层导致器件出现可靠性问题

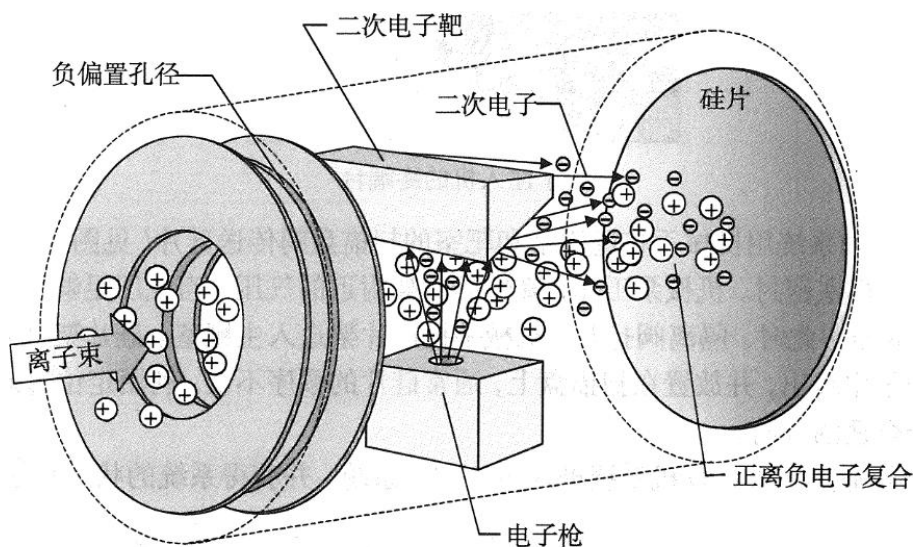


图1.控制硅片充电的电子喷淋

**传统的控制硅片充电方法是二次电子喷淋，即向表面喷发低能电子（图1）。**这种方法中，能量为几百eV的一次电子直接打向离子束路径附近的靶上，产生一团低能（小于20eV）二次电子。这些二次电子融入离子束，能中和硅片表面形成的正电荷。需要注意，不能有高能一次电子到达硅表面，否则会损害栅氧化层。



■ **硅片充电：**在注入过程中，离子束撞击硅片导致正离子在掩蔽层上的积累，即硅片充电。这种情况硅片上能形成大量电荷，特别是大电流注入机更严重。形成的电荷会改变离子束中的电荷平衡，使束斑扩大，剂量分布不均匀。还会损害表面氧化层，如损害栅氧化层导致器件出现可靠性问题

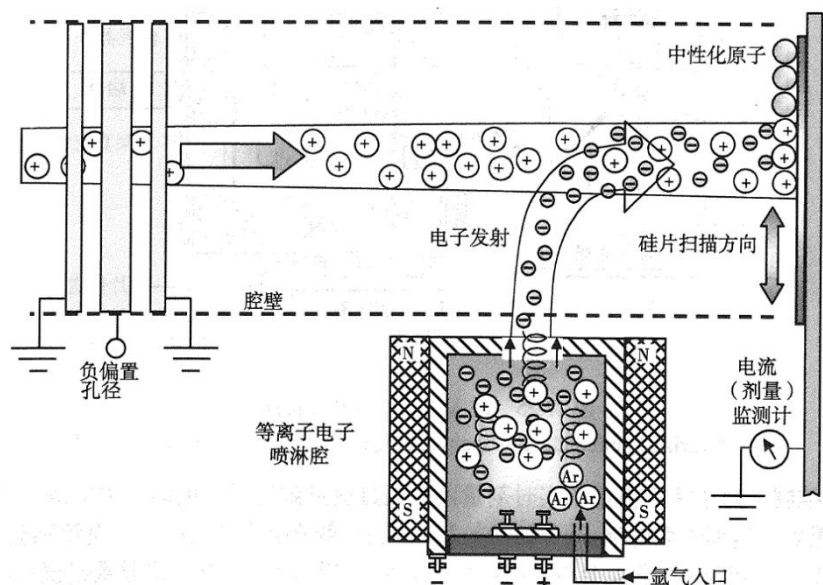


图2.控制硅片充电的等离子喷淋

现在通常把硅片和离子束置于一种被称为等离子喷淋系统的稳定的高密度等离子环境中，能够控制硅片充电。此方法从位于离子束路径和硅片附近的一个电弧室中的等离子体提取电子（图2）。等离子体被过滤，只有二次电子能够到达硅片表面，中和形成的正电荷。等离子喷淋比点离子喷淋的优点是等离子体中不产生高能电子，只利用了低能电子，有效减少了硅片形成的电荷和损害。

## 工艺腔

**离子束向硅片的注入发生在工艺腔中。**工艺腔是注入机重要的组成部分，包括扫描系统、具有真空锁的装卸硅片的终端台、硅片传输系统和计算机控制系统。另外还有一些监测剂量和控制沟道效应的装置。

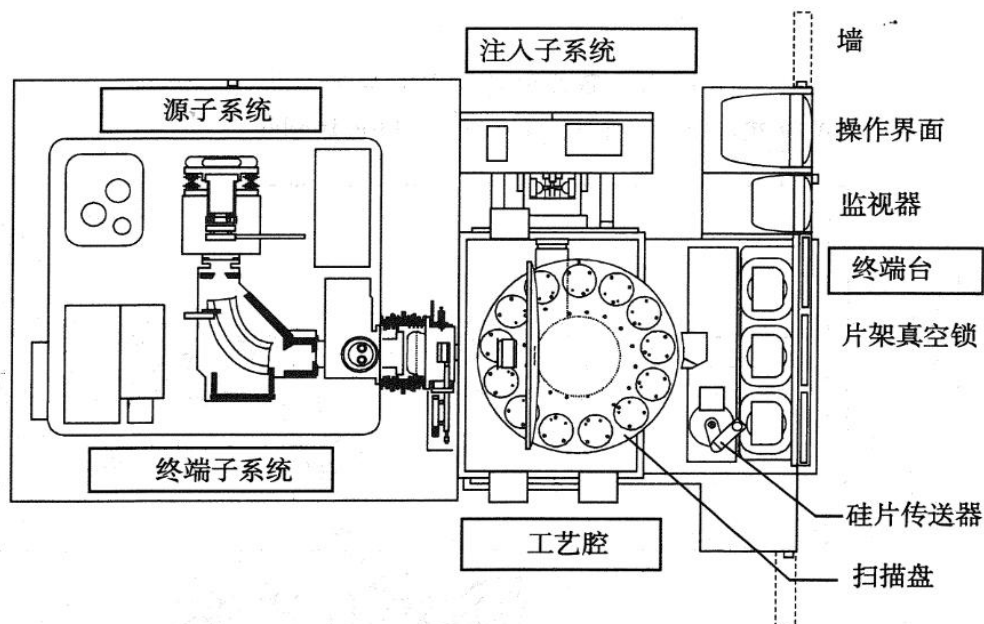


图1.注入工艺腔的硅片传送器



# 退火

离子注入会将原子撞击出晶格结构而损伤硅片晶格。被注入离子基本不占据硅的晶格点，而是停留在晶格间隙。这些间隙杂质只有经过高温退火才能被激活。退火能加热被注入硅片，修复晶格缺陷，还能使杂质原子移动到晶格点将其激活。

硅片的退火有两种基本方法：

- **高温炉退火：**传统的退火方式，用高温炉把硅片加热至800-1000°C并保持30分钟。此温度下，硅原子重新移回晶格位置，杂质原子也能代替硅原子位置进入晶格。但这样的温度和时间会导致杂质扩散
- **快速热退火(RTA)：**用极快的升温和在目标温度短暂的持续时间对硅片进行处理，能够在晶格缺陷的修复、激活杂质和最小化杂质扩散之间取得优化，还能减小瞬时增强扩散

# 沟道效应

单晶硅原子的排列是长程有序的。当注入离子未与硅原子碰撞减速，而是穿透了晶格间隙时，就发生了沟道效应。沟道效应使预期的设计范围大大扩展，特别是在低能离子的浅注入时更加严重。杂质离子通过晶格通道时不与电子和原子核发生碰撞，因此比那些发生碰撞的离子穿透的更深。注入过程中有四种方法控制沟道效应：

1. 倾斜硅片
2. 掩蔽氧化层
3. 硅预非晶化
4. 使用质量较大的原子沟道效应

# 颗粒

离子注入对颗粒沾污非常敏感。硅片表面上的一个颗粒能阻碍离子束，产生不正确的注入（图1）。大电流离子注入机由于离子束的侵蚀会产生更多颗粒。

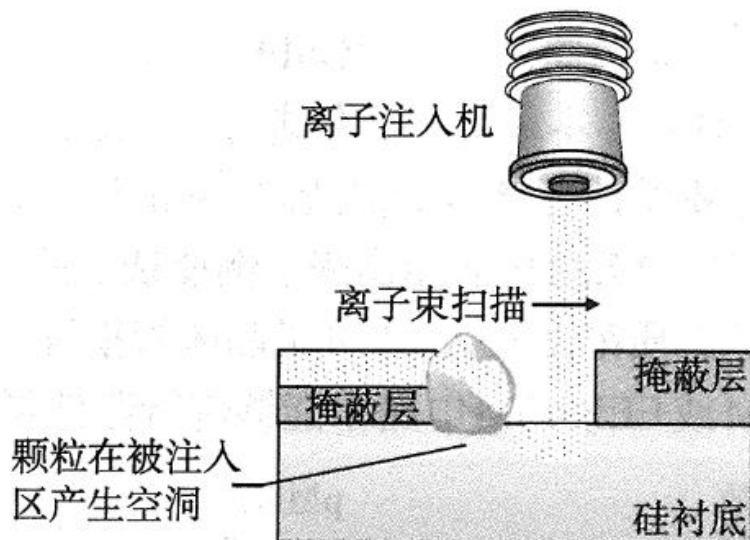


图1.来自颗粒沾污的注入损伤

# 离子注入在工艺集成中的发展趋势

## 先进的MOS硅片制造以下各种离子注入：

- **深埋层：** 用高能离子注入实现。在CMOS中有多种应用目的，如倒掺杂阱。三阱结构有一个埋层在标准n或p倒掺杂阱下的注入阱，能改进器件性能和封装密度。应用埋层的一个重要原因是COMS电路的门锁效应。
- **倒掺杂阱：** 阱是用于制造有源器件的扩散区。MOS器件的一个重要设计选择是倒掺杂阱，它的注入杂质浓度峰值在硅片表面下一定深度处。倒掺杂阱的另一种形式是垂直调节阱。
- **穿通阻挡层：** 沟道很短的亚微米器件必须有穿通阻挡层。穿通是沟道短路，会发生不希望的漏电，导致器件失效。当沟道长度减小、漏端电场增大时，就会发生穿通。防穿通注入的杂质位于临近源漏区的有源沟道下，能改变阱掺杂，防止在偏压器件下期间的漏耗尽区向沟道扩展。

# 离子注入在工艺集成中的发展趋势

- **阈值电压调整：**阈值电压是能够使源漏间导通的电压，对沟道区的杂质浓度非常敏感。为了得到合适的器件性能，需要向硅层下注入杂质，把沟道区杂质调整到所需浓度，这就是MOS栅阈值电压调整注入。
- **轻掺杂漏区：**轻掺杂漏区(LDD)注入用于定义MOS晶体管的源漏区。这种区域通常被称为源漏扩展区。注入使LDD杂质位于栅下紧贴沟道区边缘，为源漏区提供杂质浓度梯度。LDD在沟道边缘的界面区域产生复杂的的横向和纵向杂质剖面。
- **源漏注入：**源漏注入形成的重掺杂区 ( $10^{20}$ - $10^{21}$ 个离子每立方厘米) 在MOS晶体管轻掺杂有源沟道区和阱区 ( $10^{16}$ - $10^{17}$ 个离子每立方厘米) 之间。源漏区的导电类型与周围的阱相反。
- **多晶硅栅：**多晶硅栅必须进行注入或扩散掺杂以减小电阻。目前广泛应用的方法是p沟道器件用p+掺杂栅，n沟道器件用n+掺杂栅，这被称为双多晶硅栅结构

# 离子注入在工艺集成中的发展趋势

- **沟槽电容器：** 沟槽电容器能减小DRAM存储单元的尺寸，已经取代了屏慢存储电容器。沟槽电容器是在硅中用干法刻蚀沟槽形成的三维器件。为了获得足够的电容，在电容器侧墙很薄一层中的杂质浓度应达到约 $10^{19}$ 个离子每立方厘米。侧墙的掺杂使用具有一定角度的离子注入，这个角度由沟槽的形状决定。
- **超浅结：** 不断提高的速度和封装密度的需要，导致器件在很大程度上需要MOSD器件的沟道长度等比例地减小。为保持器件的电学性能，关键的器件要素必须随之减小。超浅结的形成使源漏区结深与沟道长度相应缩小。超浅结的形成使源漏区结深与沟道长度相应缩小。同时必须准确控制横向杂质剖面。超浅结用大束流低能注入实现。
- **绝缘层上硅：** 绝缘层上硅（SOI）成为先进硅片制造中一种重要的纵向隔离方式。SOI中绝缘层（氧化物）有效隔离了硅片表面的器件，但由于工艺复杂和成本高等问题一直没有得到广泛应用。

# 离子注入质量测量

表1.离子注入关键质量测量

质量参数	缺陷类型	备注
1. 硅片表面无法接受的颗粒沾污	A. 测量监测硅片表面的颗粒数（每道工序每片上的颗粒数）	可能的颗粒源： <ul style="list-style-type: none"><li>● 脏电极微放电</li><li>● 移动机械过程中外面包装过多</li><li>● 注入机清洗不适当（如离子源、提取装置和离子束经过的任何部分）</li><li>● 温度过高或溅射造成光刻胶的脱落</li><li>● 硅片背面的冷却橡胶</li><li>● 进样室</li><li>● 硅片处理</li><li>● 机器移动：开阀门、装卸分度器等</li></ul>
2. 剂量控制	A. 检测薄膜电阻发现剂量不合适。注入剂量不足的硅片方阻高（多余的杂质增大了电导率），剂量过大的硅片方阻低	不均匀表现为硅片表面不同区域的剂量不同，可能的原因有： <ul style="list-style-type: none"><li>● 错误的工艺流程。检查工艺流程与硅片标签是否一致</li><li>● 离子束电流测量不当。检查法拉第系统的漏电情况并采取适当的操作</li><li>● 电子进入离子束造成剂量过大。电子进入离子束使计数器计算的离子数比实际少，造成剂量过大。检查电子抑制系统</li><li>● 不当退火。RTA 检查：（1）退火过程中的温度和时间是否合适，（2）升温速度是否合适，（3）加热是否均匀，（4）N<sub>2</sub> 流速是否正确</li></ul>



表1.离子注入关键质量测量 (续)

质量参数	缺陷类型	备注
3. 使用低能注入的超浅结结深	A. 扩展薄膜电阻的测量发现结剖面不正确	<p>检查以下可能造成结深问题的因素：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 证明 RTA 升温速度和保持时间正确。过多的高温过程会导致杂质扩散，增加结深</li> <li>● 检查是否有离子的沟道效应。硅片的倾斜可能不正确。低能情况下，硅片可能需要注入重离子进行非晶化，然后退火</li> <li>● 如果注入的是硼（小质量元素），检查是否在退火过程中发生了 TED。可能需要使用超低能注入</li> </ul>



# 离子注入检查及故障排除

表1.一般的离子注入问题

问题	可能的原因	纠正措施
1. 剂量不均匀造成硅片表面不同区域的杂质含量不同（用方阻和热波轮廓图检测）	A. 电荷中和系统	<ul style="list-style-type: none"><li>● 硅片充电就会在轮廓图上显示硅片中心部分的电阻高</li><li>● 检查二次电子喷淋或等离子喷淋的操作是否正确</li></ul>
	B. 扫描系统问题（如沟道效应）	<ul style="list-style-type: none"><li>● 大电流注入时，检查扫描盘的驱动系统是否有机机械问题</li><li>● 固定硅片的中低电流注入，检查扫描系统的x和y方向扫描是否正确</li></ul>
	C. 注入机中的泄漏电流	<p>注入系统的离子束电流泄漏会产生很大的剂量和不均匀问题</p> <ul style="list-style-type: none"><li>● 证明所有的绝缘体清洁，没有堆积溅射材料。溅射材料来源于离子束对材料的撞击</li><li>● 所有电缆的绝缘必须高质量</li></ul>

# 离子注入检查及故障排除

表1.一般的离子注入问题（续）

问题	可能的原因	纠正措施
2.离子束中的沾污， 用 SIMS 检测	A. 离子源沾污	可能造成离子源沾污的因素： <ul style="list-style-type: none"><li>● 离子源是否被沾污</li><li>● 真空系统是否漏气</li><li>● 源材料是否满足纯度要求</li></ul>
	B. 质量分析之前离子束沾污	吸极和质量分析器之间的区域不是沾污的重要来源，但要检查真空是否漏气
	C. 质量分析中造成的沾污	质量分析器的窄缝过宽，不能把其他种类的离子全部排除。例如使用磷化氢作为源进行磷注入可能会造成氢沾污
	D. 质量分离后的离子束沾污	残余气体与离子束反应，造成能量不正确的离子（能量沾污）。正确措施包括： <ul style="list-style-type: none"><li>● 检查真空系统是否漏气</li><li>● 检查能量过滤系统</li><li>● 检查系统成分的金属沾污</li></ul>
	E. 终端台沾污	可能的沾污源有： <ul style="list-style-type: none"><li>● 终端台材料（如离子束撞击电极的溅射金属和掺杂）</li><li>● 来自光刻胶的碱性元素沾污</li><li>● 法拉第杯装置的铝</li><li>● 使用相同注入机的其他杂质元素的交互沾污</li></ul>