



**中国科学技术大学**  
University of Science and Technology of China

# 第四章

## 离子注入

**孙海定**

**微电子学院**

- **§4.0 引言**
- §4.1 核碰撞和电子碰撞
- §4.2 注入离子在无定形靶中的分布
- §4.3 注入损伤
- §4.4 热退火
- §4.5 离子注入系统

**我们已经知道怎样通过扩散将杂质掺入晶圆——预淀积和再分布，但该过程受以下限制**

- **掺杂浓度不能超过杂质的固浓度**
- **较难得到杂质均匀分布（轻掺杂）**

# 扩散对于先进VLSI的局限性



## 高集成度的VLSI

→ 更小的特征图形尺寸、更近的器件间距

→ 热扩散对先进电路有所限制：

■ 横向扩散 → 芯片面积的增加、集成度降低

■ 高温 → 晶体损伤

→ 漏电流引发的器件失效

→ 工艺范围更宽

■ MOS晶体管的发展

→ 低掺杂度控制和超浅结

# 一种新的掺杂技术—离子注入



## United States Patent Office

2,787,564

Patented Apr. 2, 1957

1

2,787,564

### FORMING SEMICONDUCTIVE DEVICES BY IONIC BOMBARDMENT

William Shockley, Madison, N. J., assignor to Bell Telephone Laboratories, Incorporated, New York, N. Y., a corporation of New York

Application October 28, 1954, Serial No. 465,393

4 Claims. (Cl. 148—1.5)

This invention relates to a process for manufacturing semiconductive devices, and to devices fabricated in accordance with this process.

An important form of semiconductive device for use in the amplification of applied signals comprises a semiconductive body which includes a base zone of one conductivity type intermediate between emitter and collector zones of opposite conductivity type. Such devices are now familiarly known as junction transistors. In such transistors, charge carriers of the sign which are in the minority in the base zone are injected therein from the emitter zone under the influence of applied signals. Such injected carriers diffuse across the base zone into the collector zone and modify the current flowing in the collector circuit whereby an amplified replica of the applied signal is there available.

The upper limit in the frequency of useful operation of a junction transistor is to a large degree fixed by the transit time of the injected carriers in diffusing across the

2

bombarding beam is adjusted so that the projected ions will penetrate into the interior of the semiconductive body and be localized there for converting that region to opposite conductivity type. By utilization of a monoenergetic beam, the ions are all made to penetrate to a fairly uniform depth whereby the thickness of the region of converted conductivity type is kept small. The thickness of this region can be controlled by variations in the energies of the bombarding ions. Thereafter, the semiconductive body is treated to repair the radiation damage done to the surface region penetrated. This is done advantageously by annealing at a temperature sufficiently low that there results little migration from the region of deposition of the significant impurity ions introduced by the bombardment. It is also characteristic of this technique

at fine scale junctions of a predetermined geometry may be formed either in the interior or even on the surface of a semiconductive body. The junction may be formed in accordance with a preselected pattern either by the use of a deflection system which sweeps an ion beam focused to an appropriate cross section over the semiconductive body or else by interposing a suitable apertured mask between the ion source and the semiconductive body. In this latter technique, it is advantageous to employ a mask apertured on a scale considerably enlarged over the size of the junction pattern desired and thereafter to condense, in the manner familiar to workers in ion optics, the ions passing through the mask to reduce the scale of the pattern to that desired for the junction.

Accordingly, a broad object of the invention is to form fine scale junctions of a predetermined geometry in a semiconductive body.

The bombardment of a semiconductive body with a

# 最初的离子注入设备示意图



April 2, 1957

W. SHOCKLEY

2,787,564

FORMING SEMICONDUCTIVE DEVICES BY IONIC BOMBARDMENT

Filed Oct. 28, 1954

FIG. 1

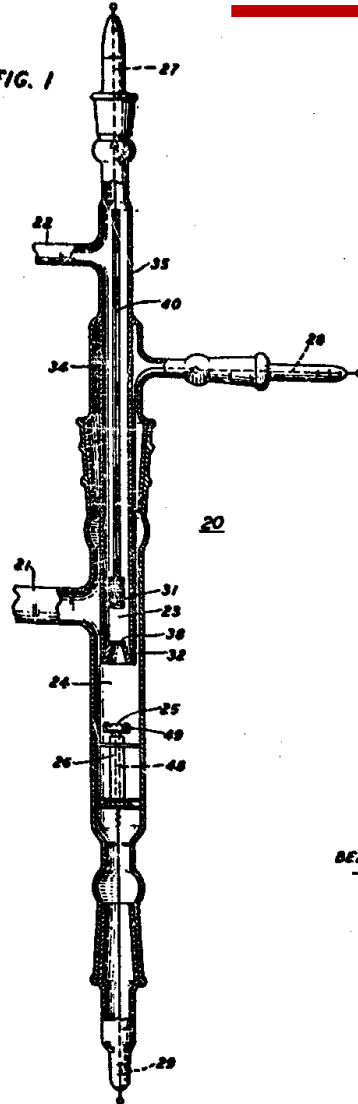


FIG. 2A

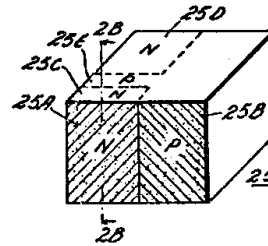
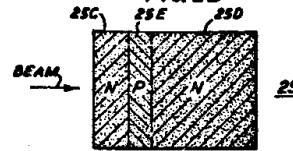


FIG. 2B

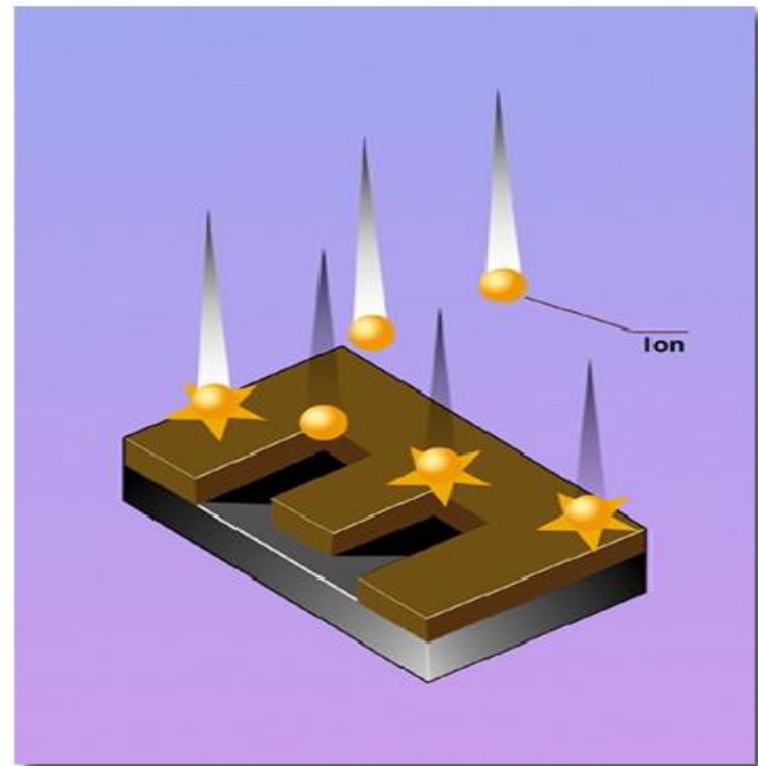


INVENTOR  
W. SHOCKLEY  
BY  
Arthur J. Torrington  
ATTORNEY

# 什么是离子注入



离化后的原子在强电场的加速作用下，以物理的方式注射可控制数量的杂质进入靶材料的表层，以改变特定区域材料表层的物理或化学性质的一种掺杂方法。



Ion Implantation

# 离子注入的基本过程



- 将某种元素的原子或携带该元素的分子经**离化**变成带电的离子；
- 通过**质量分析**选择出所需要的注入离子；
- 在强电场中**加速**，获得较高的动能后，**投射**入材料表层（靶）。

**离子注入三大基本要素：**

离子的**产生、加速、控制**



# 离子注入的主要优点 (1)

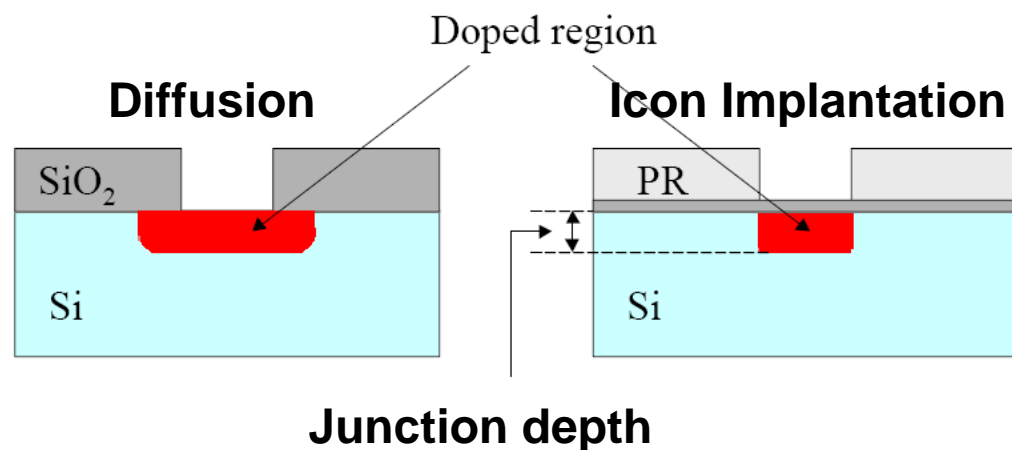


- **高精度**(误差在2%左右, 扩散工艺为5~10%) : 离子注入深度是随离子能量的增加而增加, **可重复精确控制掺杂浓度和深度**, 易形成浅结和超浅结。
- **低温工艺**(Si, 室温; GaAs,  $<400^{\circ}\text{C}$ ) : 拓宽了对注入掩蔽膜的选择(光刻胶、铝等都可作为掩蔽膜), **对器件制造中的自对准掩蔽技术给予更大的灵活性**; 且易实现对化合物半导体的掺杂, 同时避免了高温扩散的热缺陷。
- **掺杂纯度高**: 单一的离子束, 注入离子纯度高, 能量单一, 从而保证了掺杂纯度不受杂质源纯度的影响, 利于MOS管阈值电压的控制和保证杂质源的纯度。

# 离子注入的主要优点 (2)



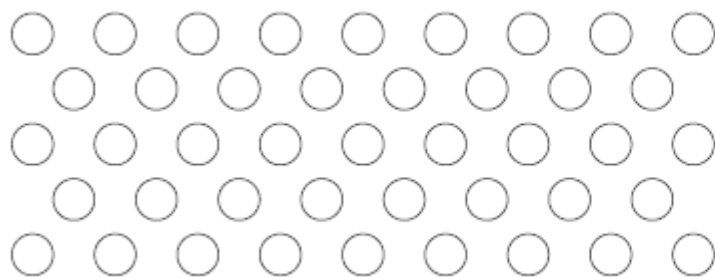
- **很好的杂质均匀性**: 同一平面内的杂质均匀性和重复性在 $\pm 1\%$ , (而高浓度扩散的最好结果只能控制在5%-10%), 利于器件电学性质的控制, 使电路的性能一致且电学性质好。
- **无固溶度极限**: 原则上各种元素均可掺杂, 使可供选择的掺杂元素的范围变大, 使掺杂工艺灵活多样。
- **直进性**: 横向效应比扩散小很多, 保证了高集成度及较好的电性能。



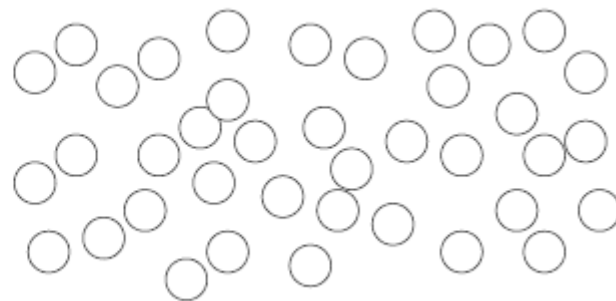
# 离子注入的主要缺点



- 造成衬底晶圆的**晶格损伤**。



Before Implantation



After Implantation

- 注入设备**复杂而昂贵**。

# 扩散与离子注入比较



Diffusion	Ion Implantation
High temperature, hard mask	Low temperature, photoresist mask
各向同性 Isotropic dopant profile	各向异性 Anisotropic dopant profile
Cannot independently control of the dopant concentration and junction depth	Can independently control of the dopant concentration and junction depth
Batch process 成批加工	Both Batch and single wafer process

# 离子注入的主要应用



离子注入在现代硅片制造中有广泛的应用，其中最主要的应用是**掺杂半导体材料**，特别适用于**高浓度、浅结和低浓度及具有特殊浓度分布掺杂**的制备，是**亚微米以后和大直径硅片制作的标准工艺**。

# 离子注入在BJT制造中的应用



- 高能注入形成埋层
- LOCOS(硅局部氧化)下方的p-n结隔离
- 形成基区注入
- 砷注入多晶硅发射区
- 多晶电阻

# 目录



- §4.0 引言
- **§4.1 核碰撞和电子碰撞**
- §4.2 注入离子在无定形靶中的分布
- §4.3 注入损伤
- §4.4 热退火
- §4.5 离子注入系统

# §4.1 核碰撞和电子碰撞



**一、核阻止机制**

**二、电子阻止机制**

**三、离子注入的主要参数**

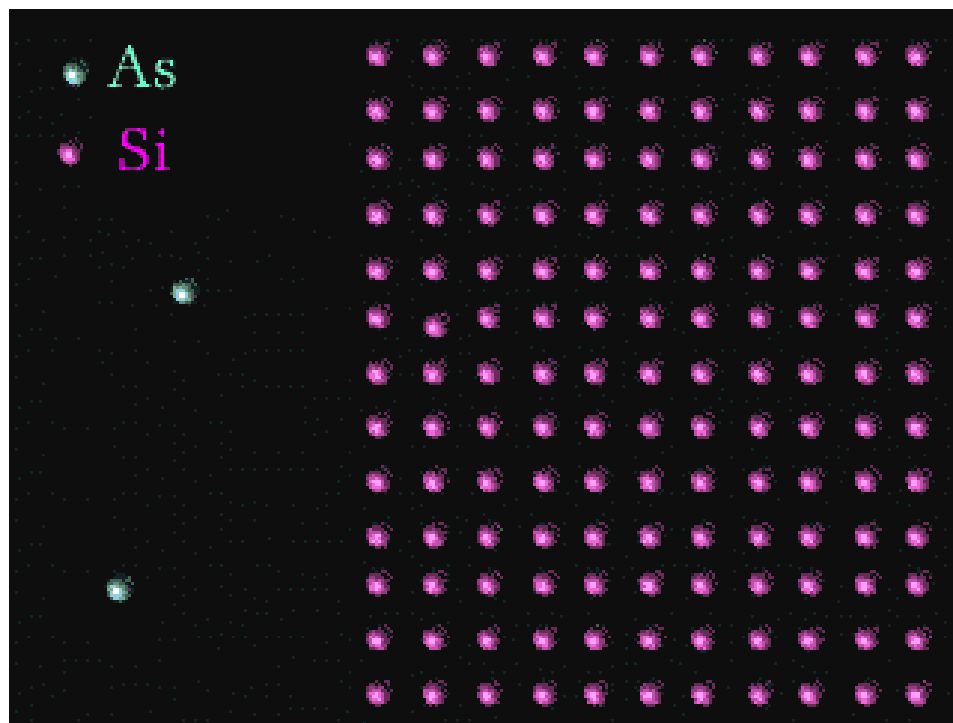


# 离子进入材料后会产生什么现象？



离子注入过程是一个**非平衡**过程，高能离子注入到固体靶中后，与晶格上的原子进行多次碰撞，逐步损失能量，最后由于能量消失而在靶中某一点停止运动，形成一定的杂质分布。—**能量损失模型(LSS模型)**

停下来的位置是随机的，大部分不在晶格上，因而没有电活性。



# 注入离子如何在体内静止？



## LSS理论—对在非晶靶中注入离子的射程分布的研究

- 1963年，Lindhard, Scharff and Schiott首先确立了注入离子在靶内分布理论，简称 **LSS理论（能量损失模型）**。
- 该理论认为：**注入离子在靶内的能量损失分为两个彼此独立的过程，即两种能量损失机制：**
  - (1) **核阻止** (nuclear stopping)
  - (2) **电子阻止** (electronic stopping)
- **总能量损失为两者的和**

# 靶内原子对杂质离子的阻挡机制



靶内原子对入射离子的阻挡作用分为两类：

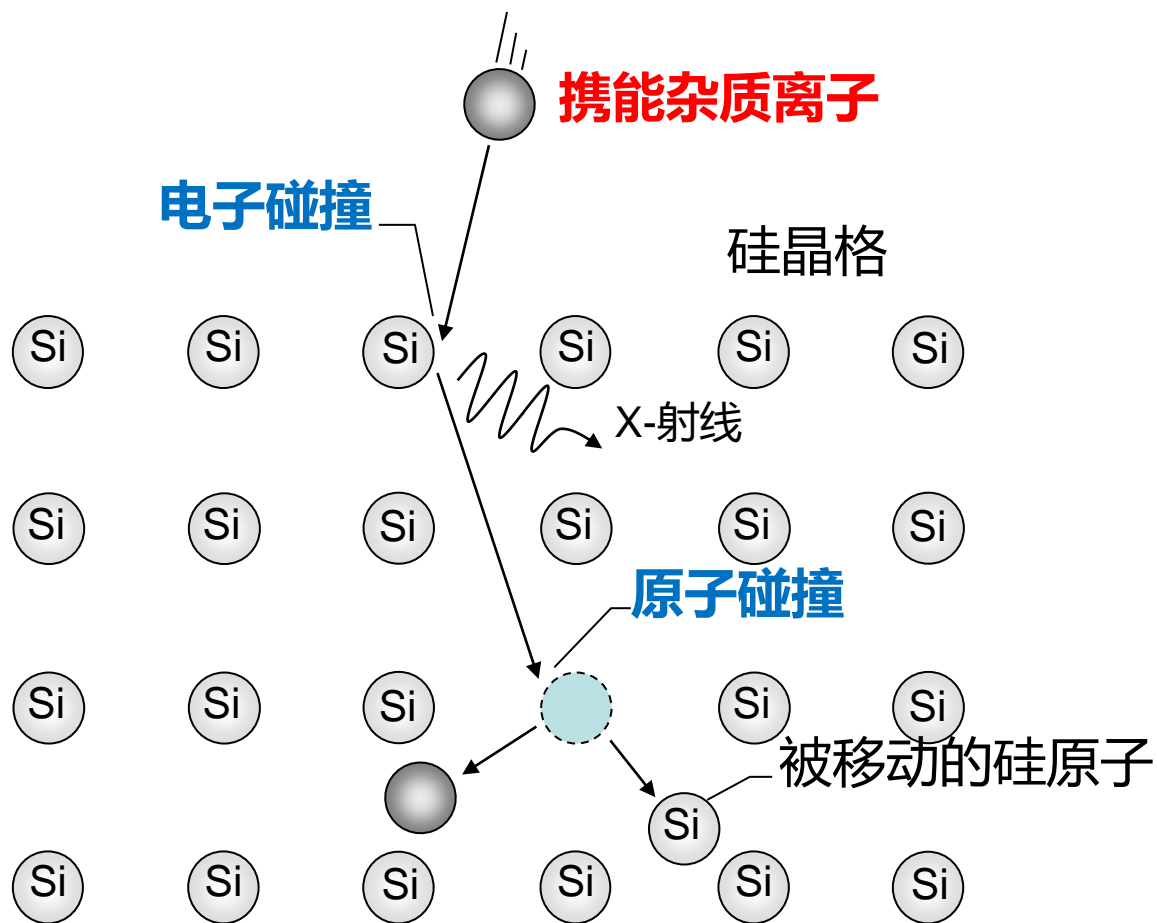
- **核阻止** (核碰撞 nuclear stopping)

是指**注入离子与靶内原子核之间的相互碰撞**；将较大的能量传给靶核，使离子的**运动方向**发生较大的偏析，靶核产生位移。

- **电子阻止** (电子碰撞 electronic stopping)

是指**注入离子与靶内的自由电子和束缚电子碰撞**，产生电子 - 空穴对；碰撞后离子能量损失较小，可认为碰撞后离子的**运动方向基本不变**。

# 离子注入能量损失机制



# 核阻止本领

(Nuclear stopping power)

入射离子遇到的靶原子核阻挡作用后的能量

损失大小： $S_n(E) \equiv \left(\frac{dE}{dx}\right)_n$

定义为**核阻止本领** / 截面 ( $\text{eVcm}^2$ );

E: 注入离子在x处的能量; 典型的注入能量 $E_0$   
为5 - 500keV;

$(dE/dx)_n$  : **核阻止能量损失率**。

**物理意义**: 能量为E的一个注入离子, 在靶内运动单位长度时, 损失给靶原子核的能量。

# 注入离子与靶原子的实际碰撞



对离子与靶原子的碰撞而言，实际情况比硬球碰撞复杂：

- 散射是在三维空间进行的
- 只要在两粒子的有效势场范围内，入射离子与靶原子间的碰撞便会发生。

# 核阻止与离子能量的关系



**低能量时，核阻止本领随能量增加而线性增加；中等能量时，达到最大值；高能量时，核阻止本领变小。**

**且不同的注入离子，核阻止本领达到最大时的能量值不同。**

**即：核阻止作用主要发生在低能范围，且离子质量越大，能量损失就越大。**

# 电子阻止本领

## (Electronic stopping power)

入射离子遇到的靶内电子的阻挡作用后的能量损失大小，定义为**电子阻止本领**：

$$S_e(E) \equiv \left( \frac{dE}{dx} \right)_e$$

$\left( \frac{dE}{dx} \right)_e$ ：电子阻止能量损失率。

- **物理意义**：能量为E的一个注入离子，在靶内运动单位长度时，损失给靶内电子的能量。
- **LSS模型**：认为电子是自由电子气，电子的阻止就类似于粘滞气体的阻力(一阶近似)，是库仑力的相互作用，认为是非弹性的。



# 电子阻止本领



在注入离子常用能量范围内，**电子阻止本领与注入离子能量的平方根即注入离子速度成正比**，即：

$$S_e(E) = k_e \cdot \sqrt{E} = C \cdot V$$

其中： $V$ 为注入离子的速度； $C$ ：常数；  
 $k_e$ 是与入射离子与靶材有关的比例系数；

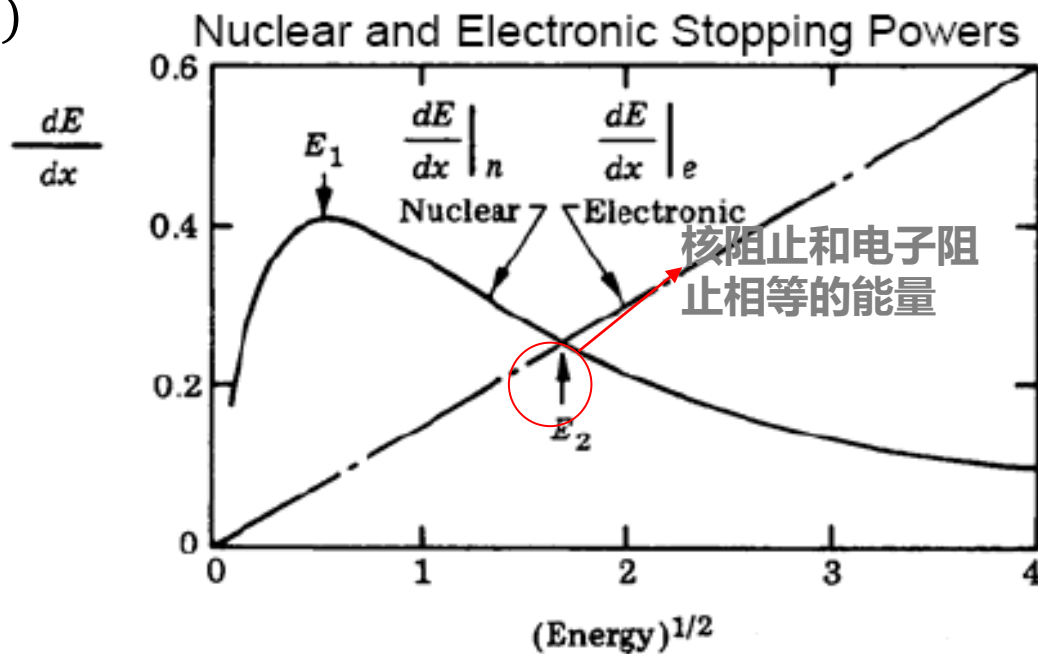
# 总阻止本领

(total stopping power)

单个入射离子在靶内单位距离上**总的能量损失**

**为：**  $-\frac{dE}{dx} = S_n(E) + S_e(E)$

	E1(keV)	E2(keV)
B into Si	3	17
P into Si	17	140
As into Si	73	800



❖ 核阻止本领在低能量下起主要作用(注入分布的尾端)

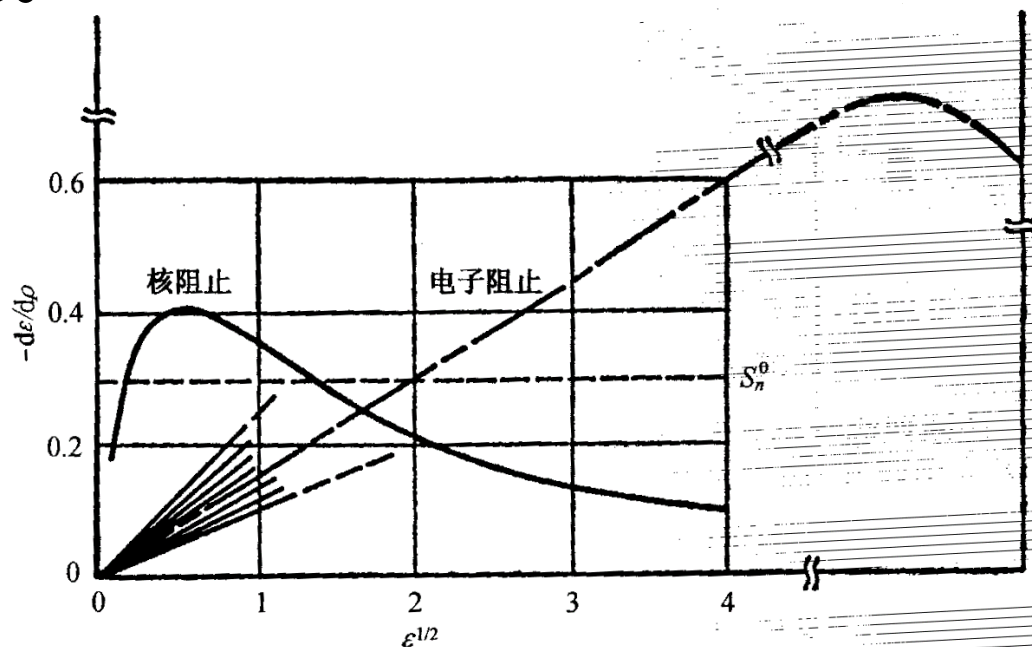
❖ 电子阻止本领在高能量下起主要作用

# 阻挡机制与注入能量的关系



根据注入离子的能量，离子受到的碰撞机制不同：

- **低能区：**核阻止起主要作用，电子阻止作用可忽略。
- **高能区：**以电子阻止作用为主，核阻止可忽略；
- **中能区：**在中间一个较宽的范围内，核阻止本领和电子阻止本领同时起作用。

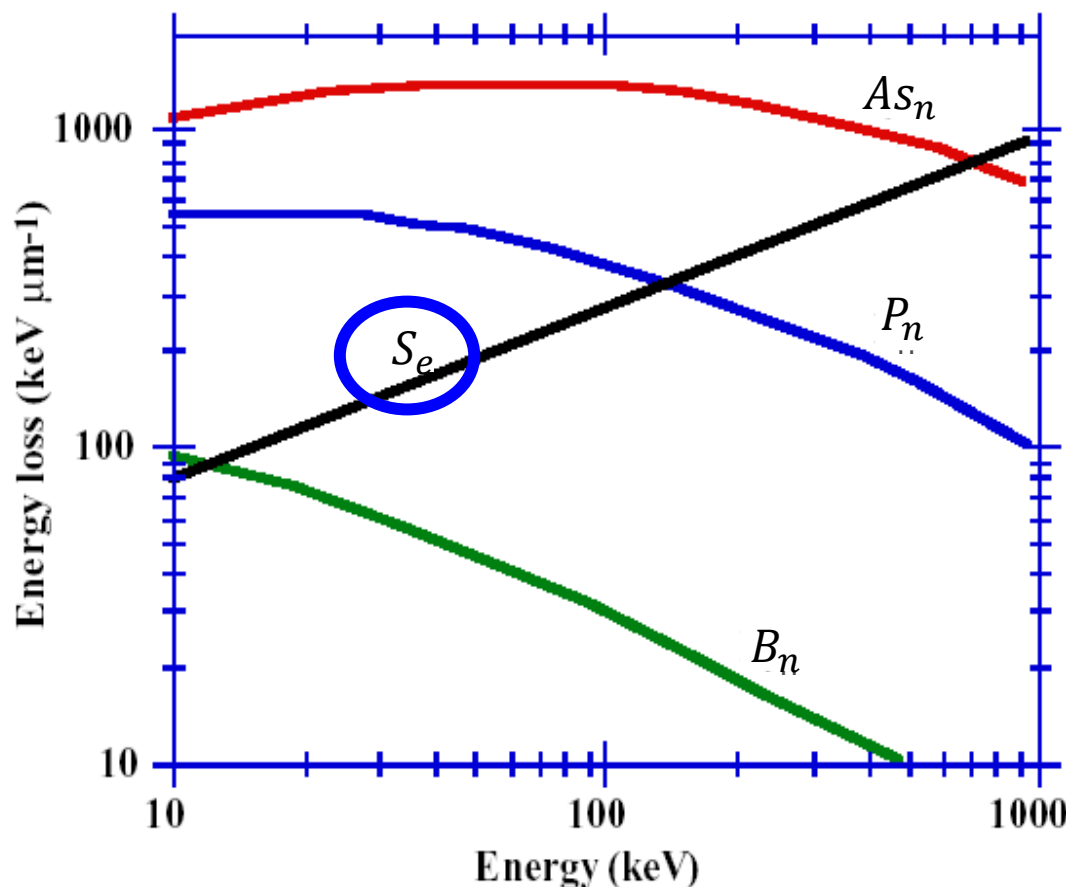


# 阻挡机制与注入能量的关系

在通常的注入能量范围内：

**重离子**(Heavy ions/at lower energy), 如硅中的砷、磷、锑, 砷化镓中的硒、碲等, **以核阻止能量损失机制为主**;

**轻离子**(Light ions /at higher energy), 如硅中的硼, 砷化镓中的铍等则**以电子阻止能量损失机制为主**。



# 临界能量与注入离子的关系



临界能量 (交叉能量)  $E_c$ :

$S_n(E)=S_e(E)$ 处的能量。

- $E_c$ 随注入离子原子量的增加而增大;
- 轻离子, B:  $E_{ne} \approx 15\text{keV}$ ,  
重离子, P:  $E_{ne} \approx 150\text{keV}$ 。

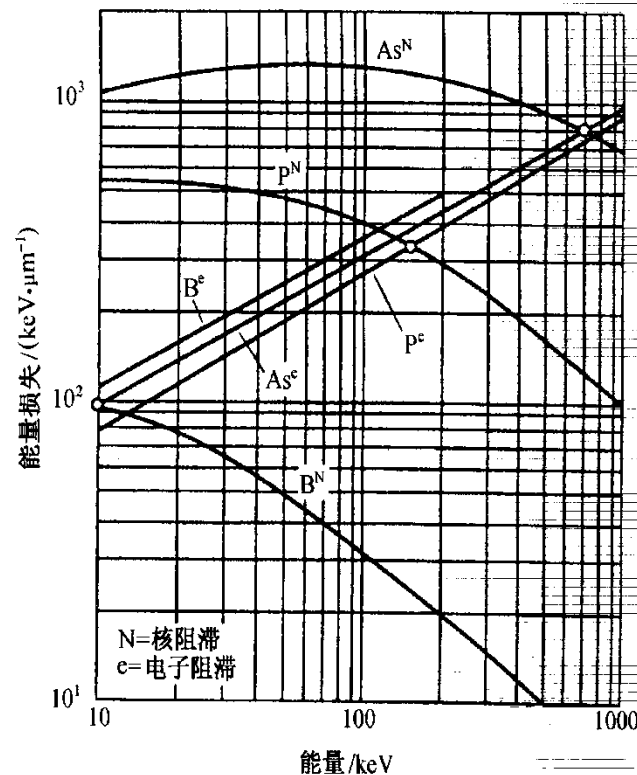


图4.4 As, P, B在硅中的核阻止本领和电子阻止本领与能量的关系的计算值

# 离子注入的主要参数



- **剂量**：单位面积硅片表面注入的离子数；  
单位：原子每平方厘米(或离子每平方厘米)；
- **射程**：离子注入过程中离子穿入硅片的总距离。  
单位：um；

# 剂量 (Dose)

**剂量Q**是指**单位面积硅片中注入的原子数或离子数**，单位为每平方厘米的原子数或离子数。

$$Q = \frac{I \cdot t}{e \cdot n \cdot A} \quad Q \text{ 可以精确控制}$$

其中：

I 为硅片背面搜集到的离子束的流量，称为**束流**，单位是mA；0.01 uA ~ mA；

t 为**注入时间**，单位为秒；

A 为**注入面积**，单位是平方厘米；

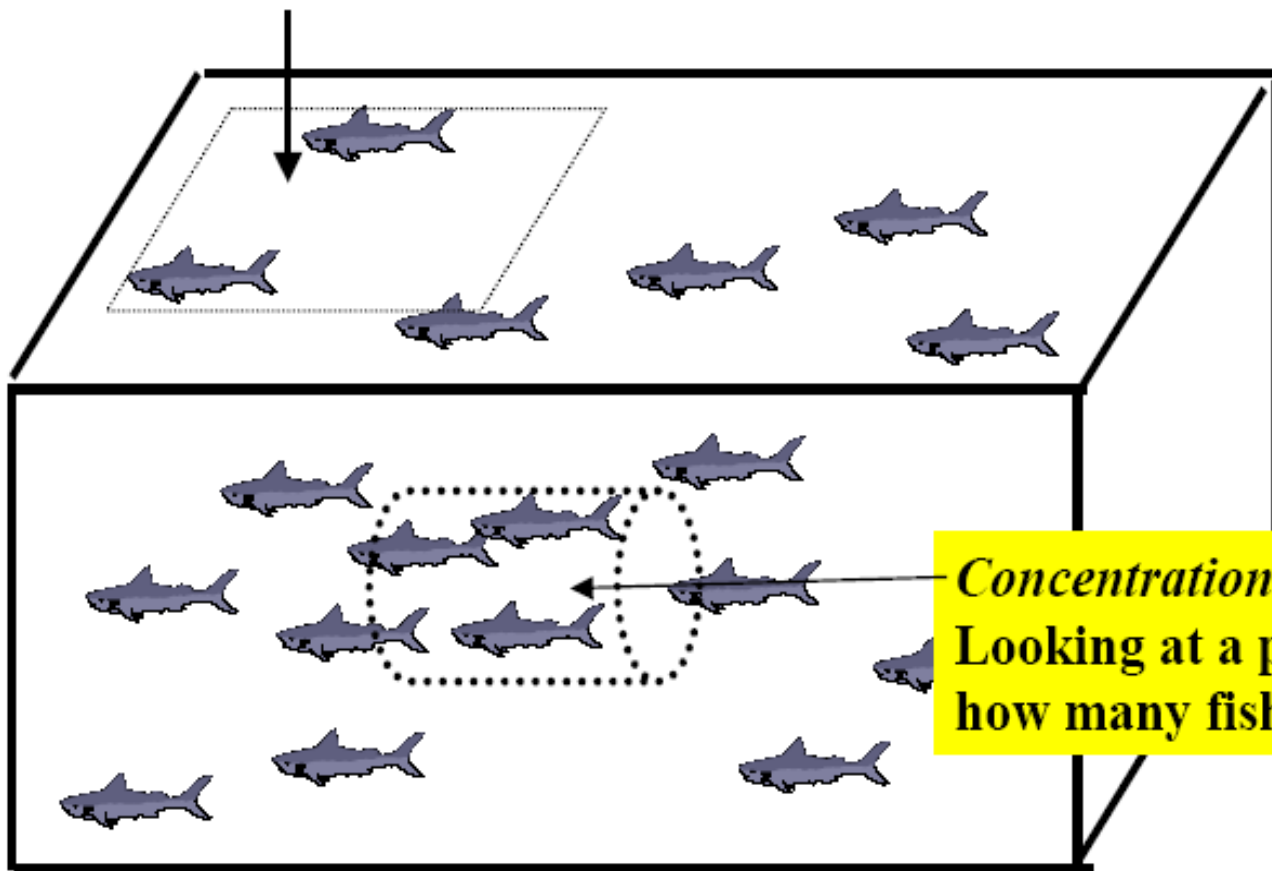
e 为电子电荷，等于  $1.6 \times 10^{-19}$  库仑；

n 为注入离子电荷，如B<sup>+</sup>等于1；

- 离子束流的量级是定义剂量的关键变量。如果束流增大，单位时间内注入的杂质原子数量也增大。
- 大束流有利于提高硅片产量，但也会产生均匀性问题。

# 剂量与浓度的含义

***Dose [# / area] : looking downward, how many fish per unit area for *ALL* depths***



***Concentration [# / volume] :  
Looking at a particular location,  
how many fish per unit volume***



**射程R是指离子注入过程中离子穿入硅片的总距离。**

**从能量的观点，是离子能量从注入时的初始能量 $E_0$ 减少到0的总距离。**

**离子位移 $dx$ 的总的能量损失率：**

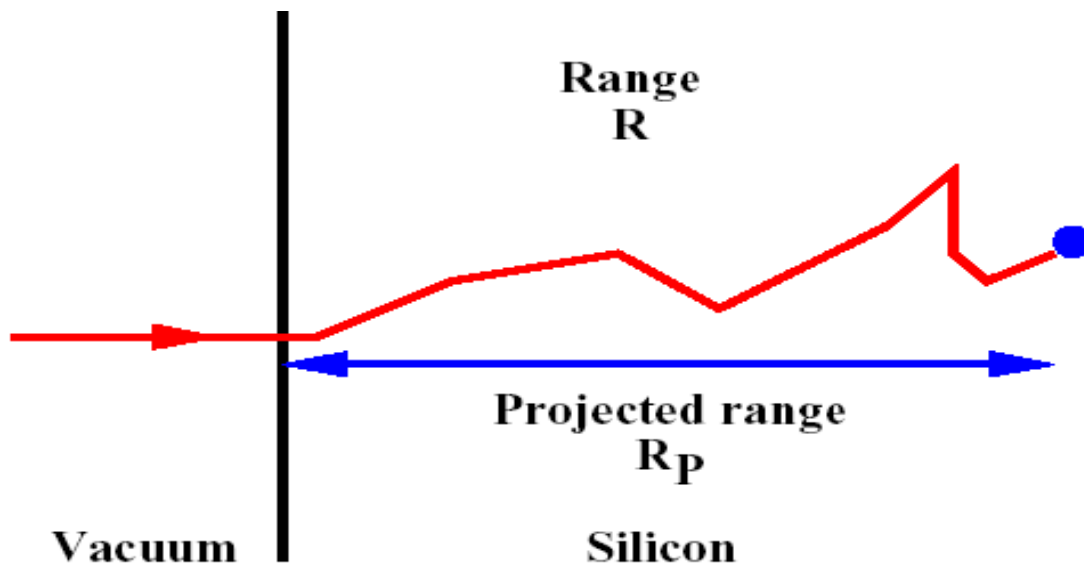
$$\frac{dE}{dx} = \frac{dE}{dx}|_n + \frac{dE}{dx}|_e = [S_n(E) + S_e(E)]$$

**射程：**

$$R = \int dx = - \int_{E_0}^0 \frac{dE}{dE/dx} = \int_0^{E_0} \frac{dE}{S_n(E) + S_e(E)}$$

# 射程分布

- **射程**(range): 离子在靶内的总路线长度  $R$ ;
- **投影射程**(projected range): 射程在入射方向上的投影, 即平均深度  $R_p$ ;
- **平均投影射程**: 投影射程的平均值  $X_p$ , 具有统计分布规律—几率分布函数。



# 不同特性离子的射程



- 对**低能重离子**，离子所经**路径呈曲折路径**。
- 对**高能轻离子**，**靠近靶表面的一段距离内**离子的轨迹近似直线，但**离靶表面一段距离后**，运动轨迹变成了折线。

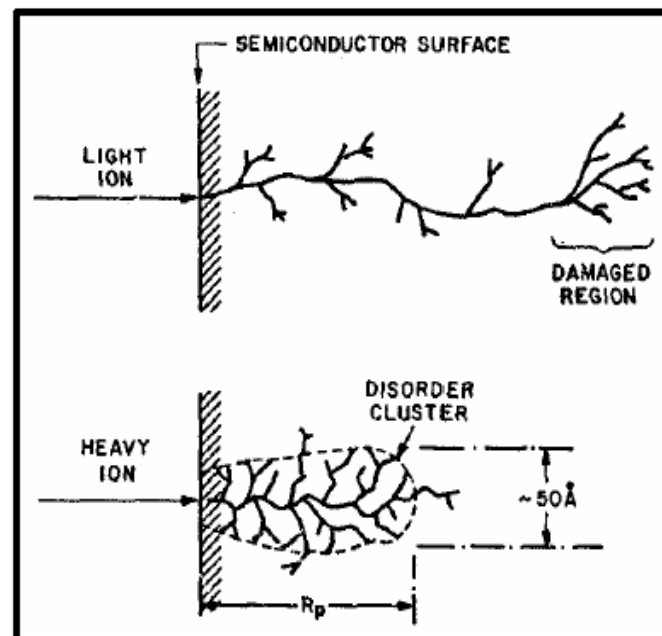
## EXAMPLES

Implanting into Si:

$H^+ \Rightarrow$  Electronic stopping dominates

$B^+ \Rightarrow$  Electronic stopping dominates

$As^+ \Rightarrow$  Nuclear stopping dominates



# 常用离子在硅中的注入能量(**KeV**)与射程(**Å**) 的关系

入射能量 注入硅中的 离子		20	40	60	80	100	120	140	160	180
<b>B</b>	$R_p$	<b>714</b>	<b>1413</b>	<b>2074</b>	<b>2695</b>	<b>3275</b>	<b>3802</b>	<b>4284</b>	<b>4745</b>	<b>5177</b>
	$\Delta R_p$	<b>276</b>	<b>443</b>	<b>562</b>	<b>653</b>	<b>726</b>	<b>713</b>	<b>855</b>	<b>910</b>	<b>959</b>
<b>P</b>	$R_p$	<b>255</b>	<b>488</b>	<b>729</b>	<b>976</b>	<b>1228</b>	<b>1483</b>	<b>1740</b>	<b>1996</b>	<b>2256</b>
	$\Delta R_p$	<b>90</b>	<b>161</b>	<b>226</b>	<b>293</b>	<b>350</b>	<b>405</b>	<b>459</b>	<b>509</b>	<b>557</b>
<b>As</b>	$R_p$	<b>151</b>	<b>263</b>	<b>368</b>	<b>471</b>	<b>574</b>	<b>677</b>	<b>781</b>	<b>855</b>	<b>991</b>
	$\Delta R_p$	<b>34</b>	<b>59</b>	<b>81</b>	<b>102</b>	<b>122</b>	<b>143</b>	<b>161</b>	<b>180</b>	<b>198</b>

# 目录



- §4.0 引言
- §4.1 核碰撞和电子碰撞
- **§4.2 注入离子在无定形靶中的分布**
- §4.3 注入损伤
- §4.4 热退火
- §4.5 离子注入系统

## §4.2 注入离子在无定形靶中的分布



- 一、纵向分布
- 二、横向效应
- 三、沟道效应
- 四、浅结的形成

# 注入离子纵向浓度分布



单个注入离子在靶内的碰撞是一随机过程；如果注入离子数量很小，它们在靶内分布是很分散的；如果注入大量的离子，则它们在靶内将按一定的统计规律分布

注入离子在靶中的浓度分布是大量离子在深度上按一定的统计规律分布，故可由离子的概率分布函数得到离子的浓度分布为：

$$n(x) = N_s h(x)$$

其中：  $N_s$  是单位面积的杂质数，即注入剂量；

$h(x)$  为注入离子的概率分布函数；

# 注入离子纵向浓度分布—高斯分布



一级近似下，注入离子在无定形靶内的纵向概率分布可用对称高斯分布描述，故

注入离子浓度在深度 $x(\text{cm})$ 处的统计分布:

$$n(x) = N_{\max} \cdot \exp\left[-\frac{(x - R_p)^2}{2\Delta R_p^2}\right] = \frac{N_s}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \cdot \exp\left[-\frac{(x - R_p)^2}{2\Delta R_p^2}\right]$$

该分布为**一对称的高斯分布**，峰值位于对称中心 $x=R_p$ ； $N_{\max}$ 为峰值浓度。

通过靶表面单位面积注入的离子总数(剂量)为:

$$N_s = \int_0^{\infty} n(x) dx = \sqrt{2\pi} N_{\max} \Delta R_p$$
$$\therefore n(x = R_p) = N_{\max} = \frac{N_s}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \approx 0.4 \cdot \frac{N_s}{\Delta R_p}$$



# 注入离子浓度分布特点

- 在平均投影射程  $x = R_p$  处有一最高浓度：

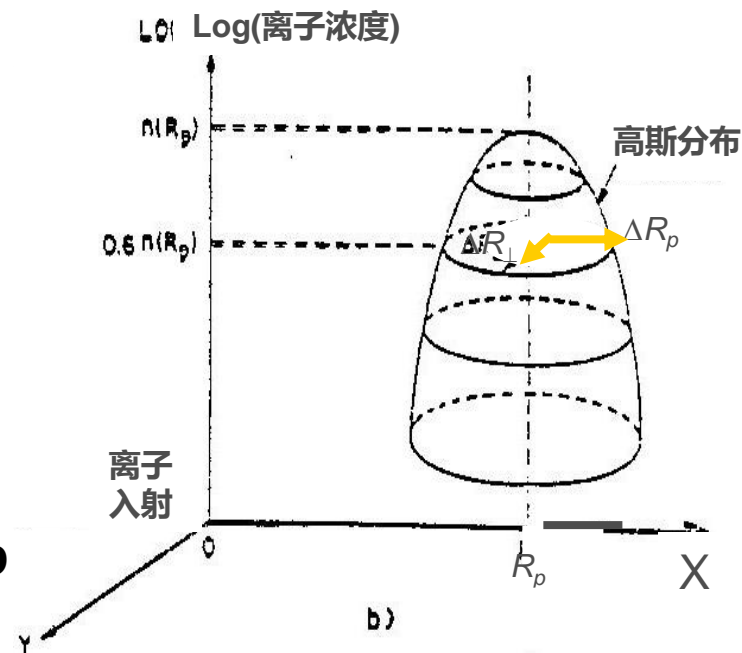
$$N_{max} = \frac{N_s}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \approx 0.4 \cdot \frac{N_s}{\Delta R_p}$$

- 在平均投影射程  $R_p$  两边，注入离子浓度对称下降； $x - R_p$  越大，下降越快。在  $x - R_p = \pm \Delta R_p$  处  $N(x)/N_{max} = e^{-1/2} = 0.6065$ ；

**pn结的位置：**

$$N_B = N_{max} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x - R_p}{\Delta R_p} \right)^2 \right]$$

$$x_j = R_p \pm \Delta R_p \sqrt{2 \ln \left( \frac{N_{max}}{N_B} \right)}$$



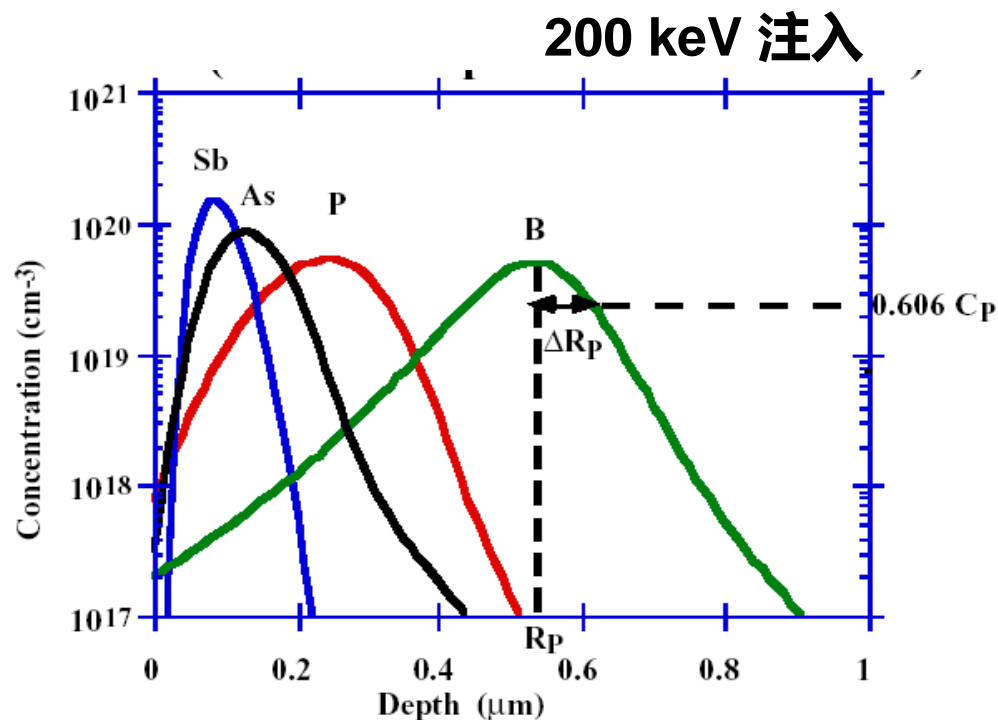
# 结论一



在忽略横向离散效应和一级近似下，注入离子在靶内的纵向浓度分布可近似取高斯函数形式；

$$n(x) = \frac{N_s}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \cdot \exp\left[-\frac{(x - R_p)^2}{2\Delta R_p^2}\right]$$

元素	原子质量
Sb	122
As	74
P	31
B	11



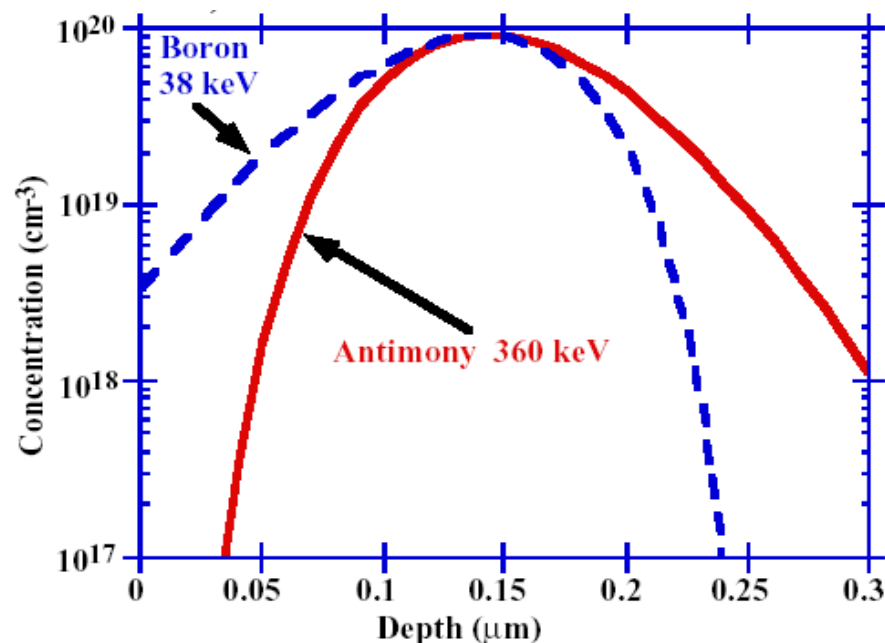
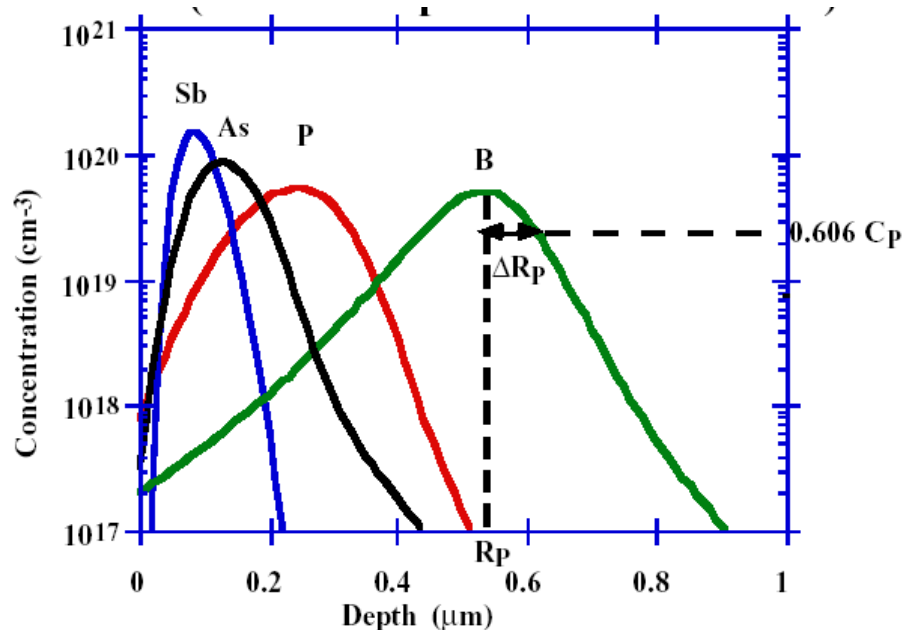
# 结论二



**对称高斯分布是对实际分布的一级近似，  
它用来模拟离子注入的深度范围；**

**但它只对在峰值附近的分布描述比较准确，  
当离峰值较远时则有较大偏差。**

# 注入离子的真实分布

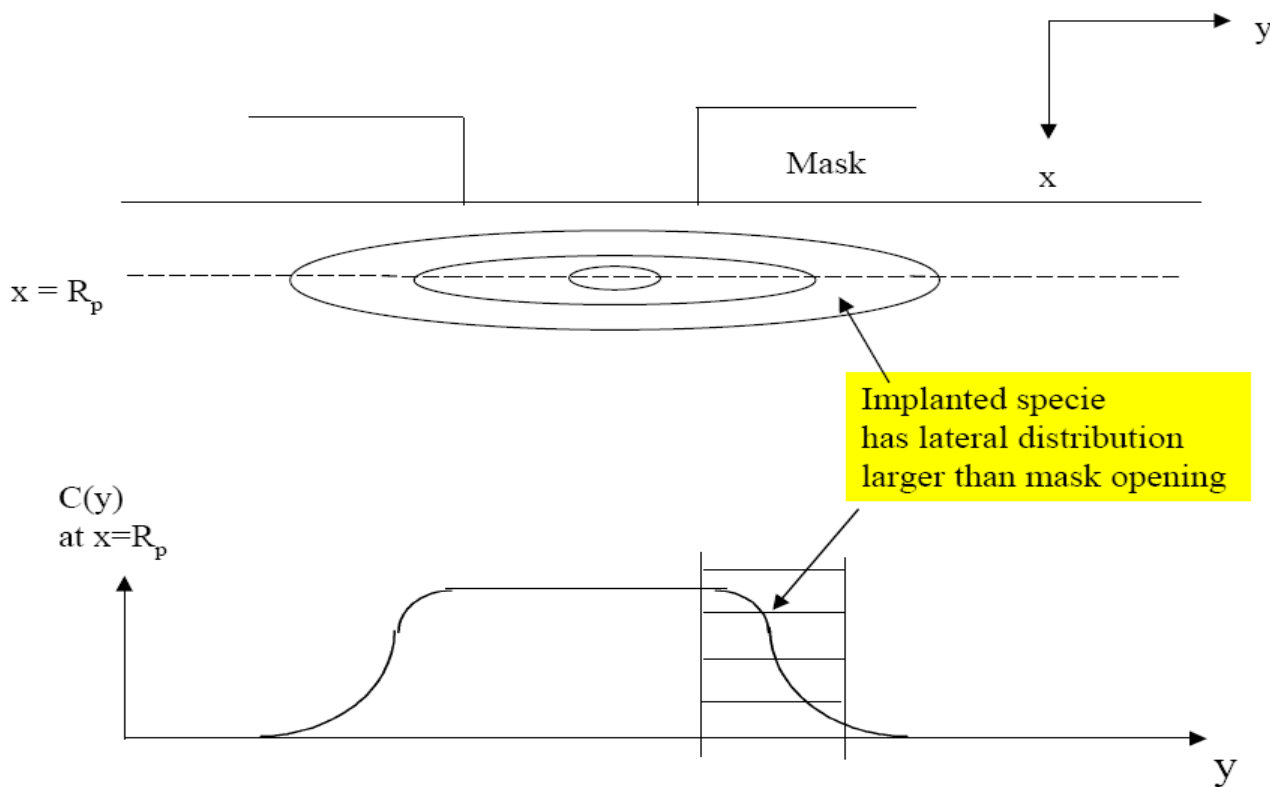


- ❖ 真实分布非常复杂，不服从严格的高斯分布
- ❖ 当轻离子硼（B）注入到硅中，会有较多的硼离子受到大角度的散射（背散射），会引起在峰值位置与表面一侧有较多的离子堆积；重离子散射得更深。

# 注入离子的横向分布—横向效应



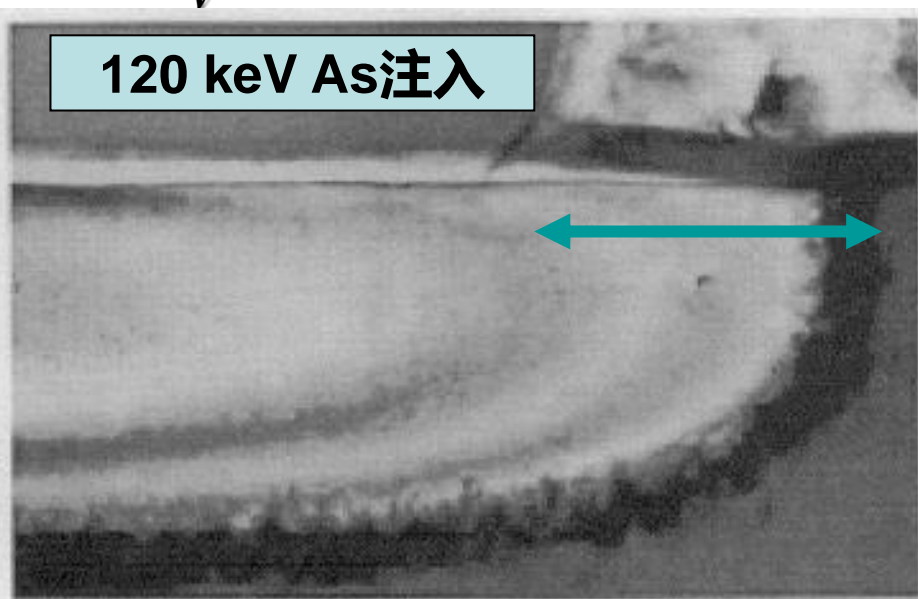
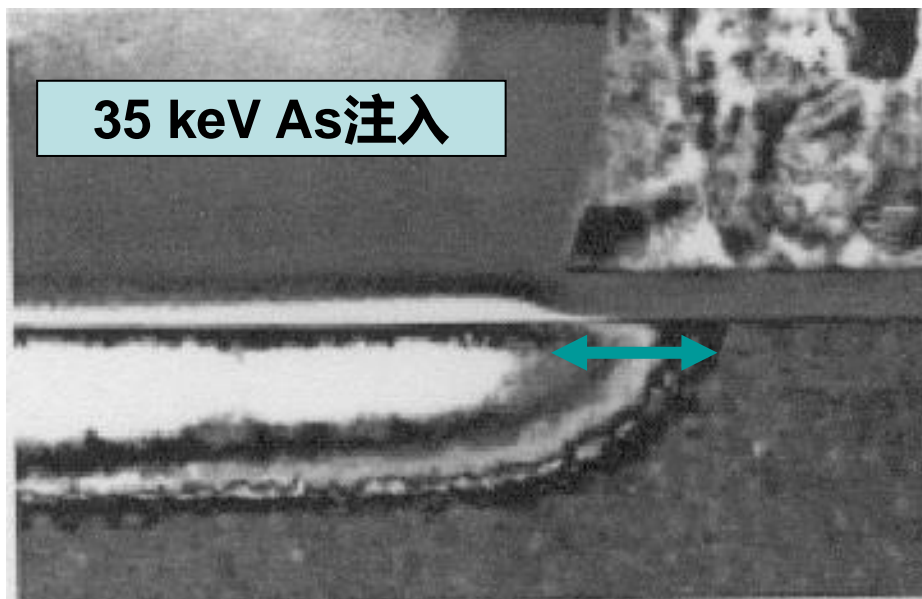
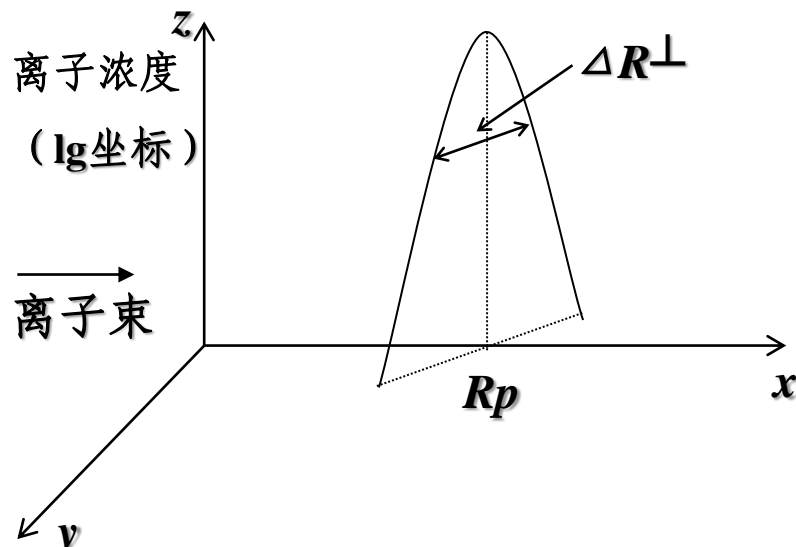
注入的离子除了在深度方向上产生浓度的分布外，其在**与入射方向垂直的平面上**也会产生**横向分布**，即**横向效应**。



**影响：**离子在注入窗口边缘的横向分布直接导致**源、漏**间**有效沟道长度缩短**。

# 结 论

- ①横向效应与注入能量成正比;
- ②是结深的30%-50%;
- ③窗口边缘的离子浓度是中心处的50%，以后则按余误差函数下降。

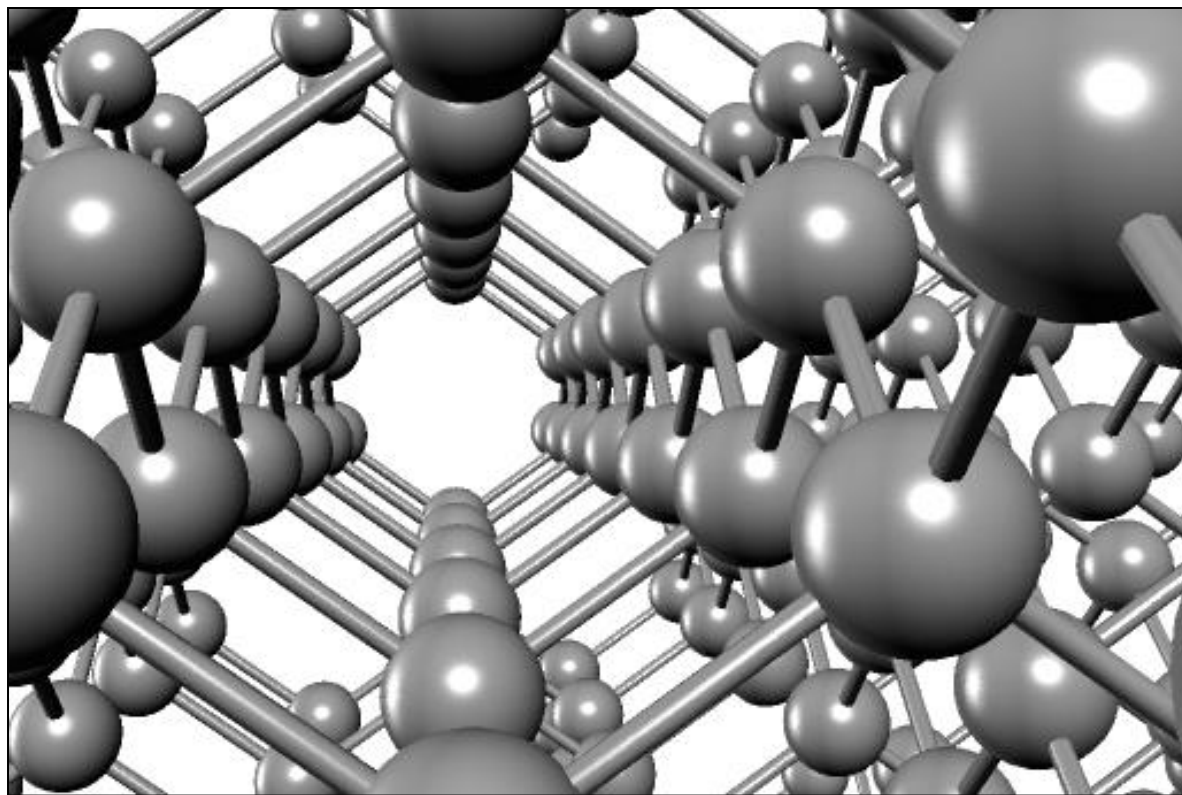


横向效应与注入能量的关系

# 单晶材料中的沟道结构



单晶材料的一个突出的结构特点是：**沿主晶轴方向的原子结构呈一系列平行的管状通道**，称为**沟道**，沟道壁是由紧密排列着原子的原子列构成。



沿  $\langle 110 \rangle$  轴的硅晶格视图

# 沟道 (Ion Channeling)效应

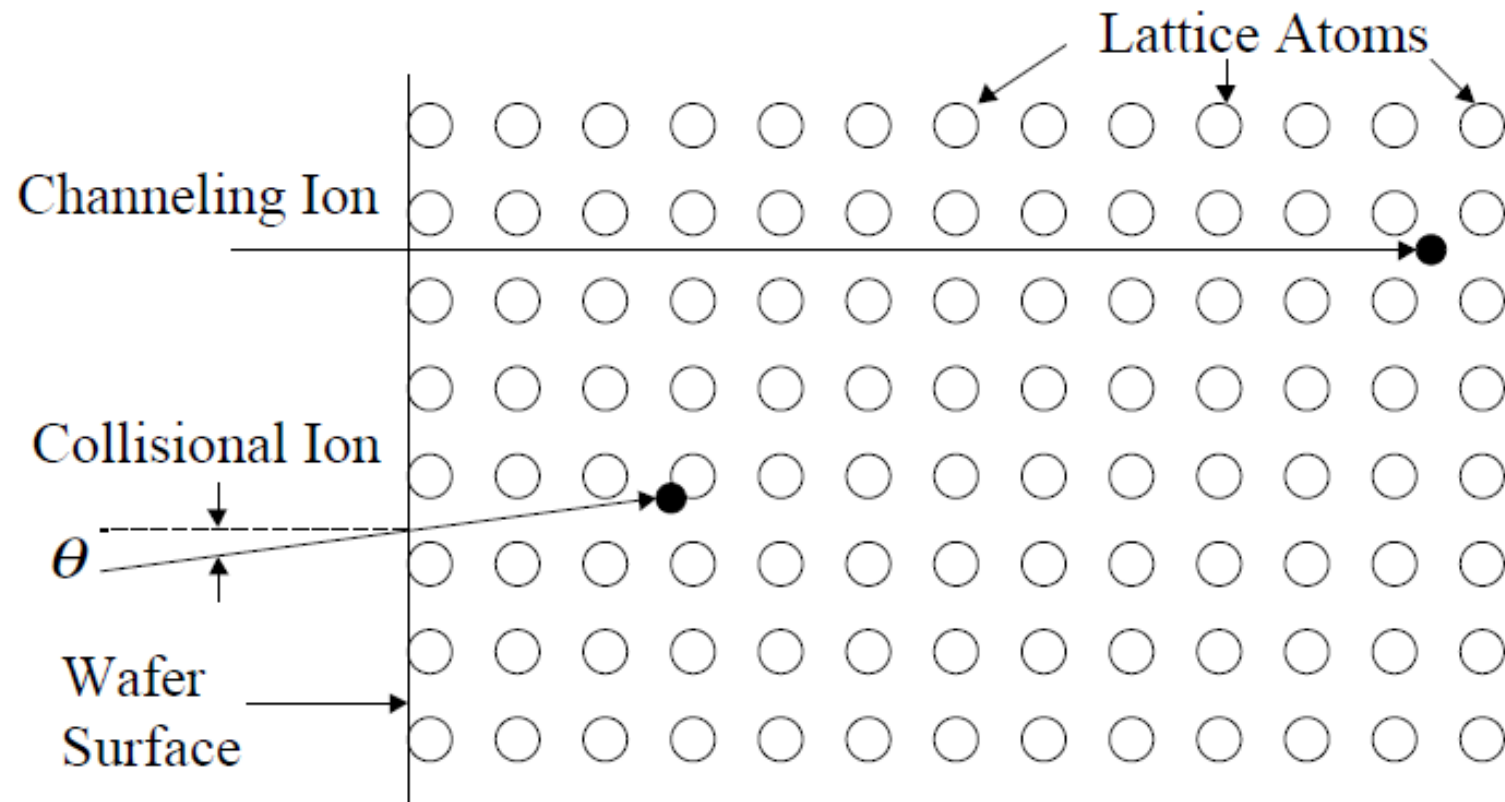


- **非晶靶**：对注入离子的阻挡是各向同性；
- **单晶靶**：对注入离子的阻挡是各向异性；

对单晶靶进行离子注入时，当离子**沿主晶轴方向注入**时部分离子会沿沟道运动，几乎不会受到原子核的散射，方向基本不变，可行进很长的距离，使注入深度增大很多，这种现象称为**沟道效应**；相应的离子称为沟道离子。



# Channeling Effect

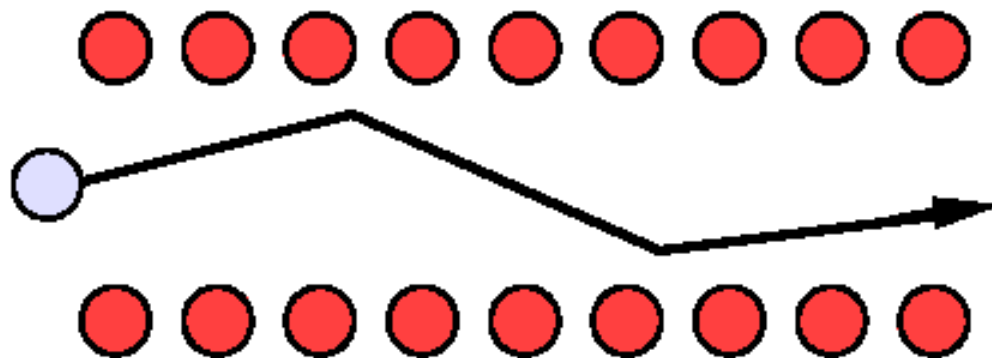


# 产生沟道效应的主要原因



当离子进入沟道沿主晶轴向行进时，当原子相距较远时，**受到的核阻止作用很小，以电子阻止作用为主；**

但沟道中的电子密度很低，**注入离子受到的电子阻止作用也很小**，故注入离子在沟道中行进的距离变得很长。



# 沟道效应的影响

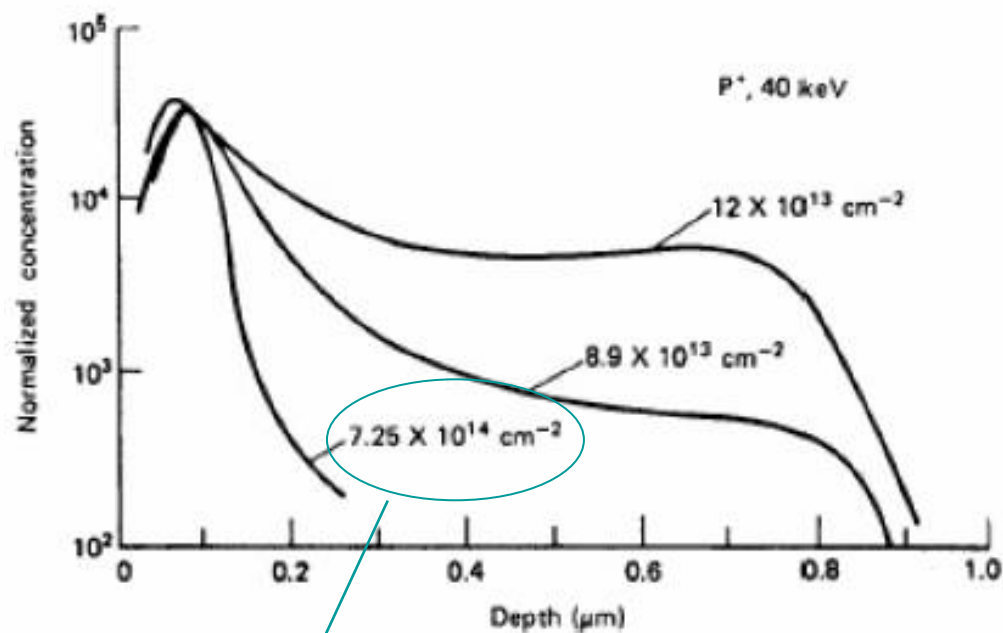
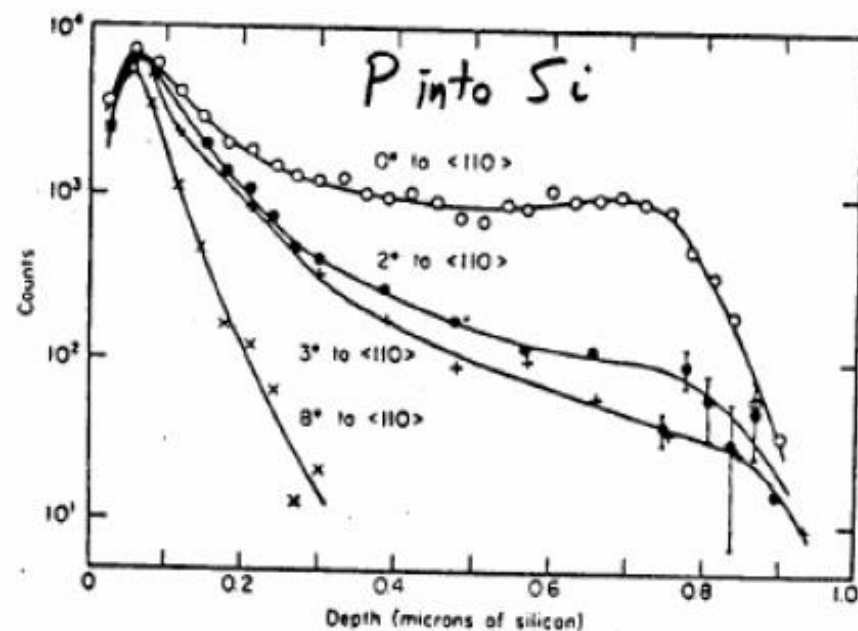
- 沟道效应的存在，将使得**对注入离子在深度上难以控制**，可能导致注入距离超过了预期的深度，从而使元器件失效；
- 对于单晶靶，由于沟道效应**很难控制注入离子的浓度分布**。在晶体中注入**将偏离LSS理论在非晶体中的高斯分布**，并使**注入**离子的浓度分布产生一个很长的拖尾。

因此，沟道效应的使用价值很小，故要尽量避免。
- 由于沟道效应的出现受很多因素的影响，故**很难获得重复的浓度分布**。

# 单晶靶中沟道效应的影响



## 沿<100>的沟道效应



产生非晶化的剂量

# 影响沟道效应的主要因素(1)



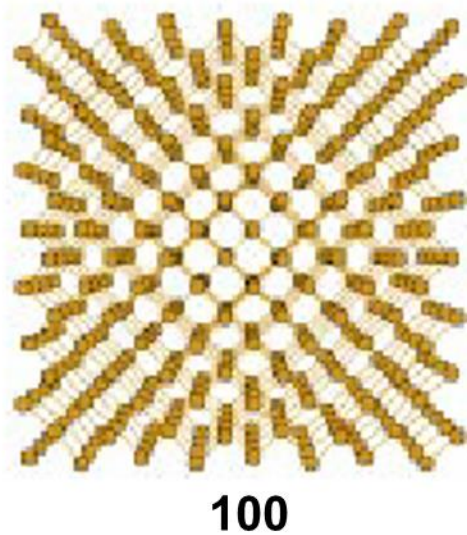
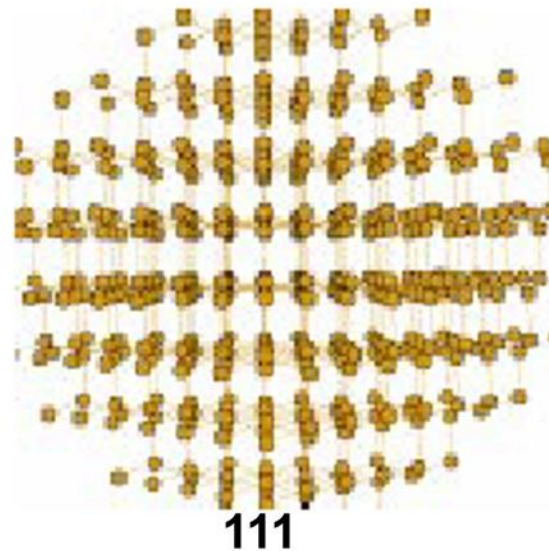
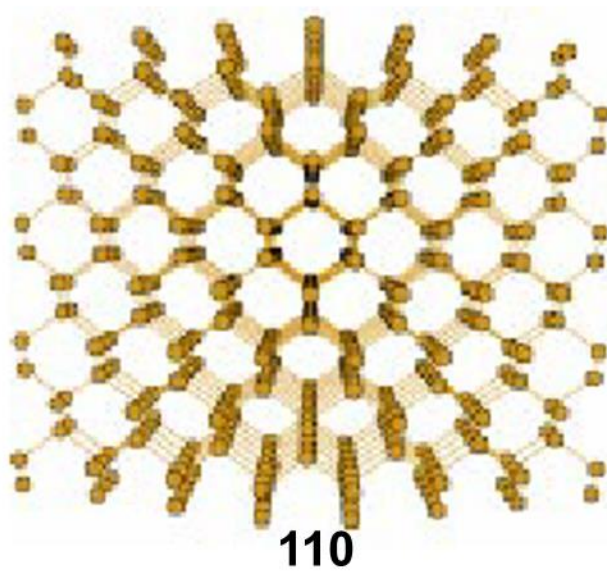
- 离子注入方向

入射方向偏斜到一定程度，单晶靶可按非晶靶方式处理，称为**退沟道**。

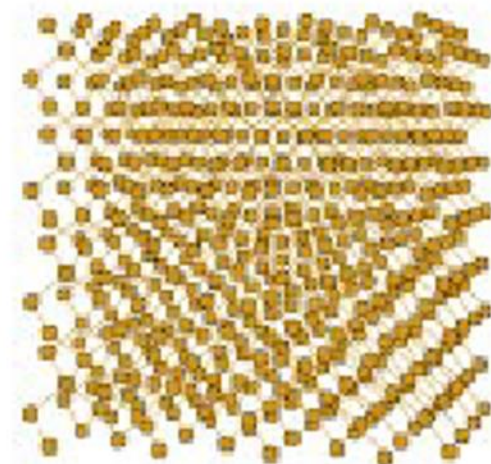
对硅中常用杂质在数十万电子伏特的注入能量范围内，理论上的最小偏离角度为：

$$\psi_{\min} = 3^{\circ} - 5^{\circ}$$

但实际应用中，使晶体相对注入离子呈无定形，MOS工艺常用  $7^{\circ} - 10^{\circ}$ 。



倾斜旋转硅片后的无序方向



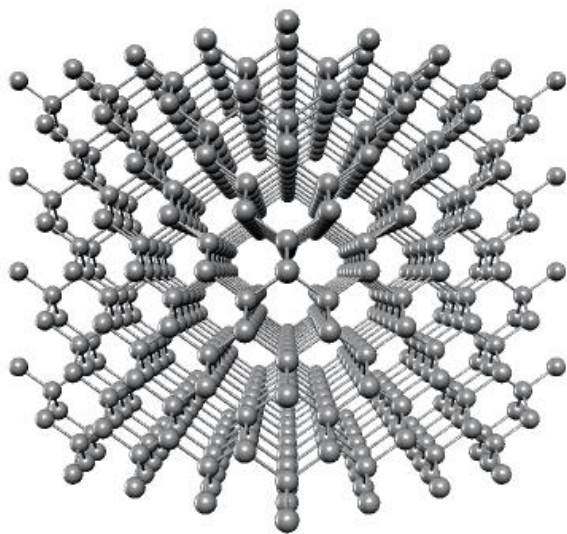


# 影响沟道效应的主要因素(2)

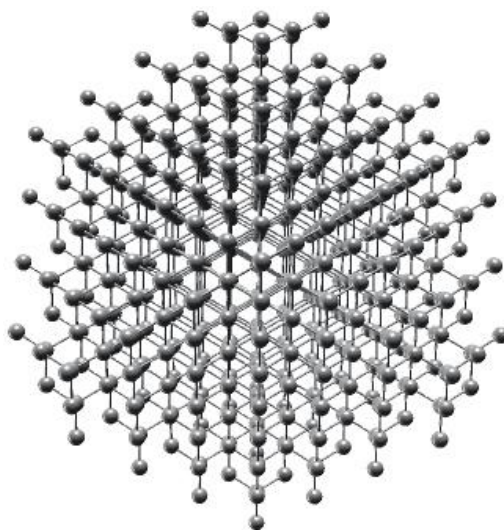


- 单晶靶取向（晶向）

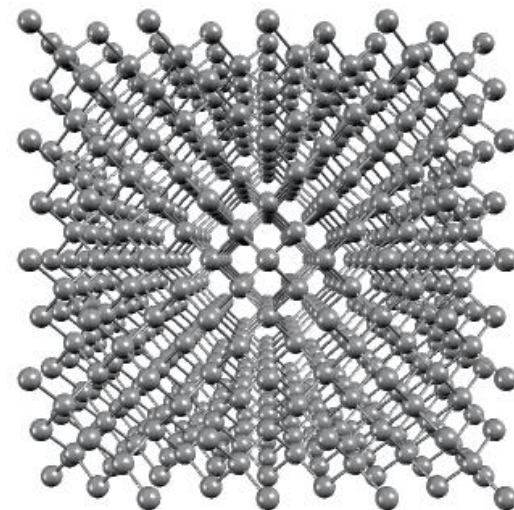
沟道效应还与晶向有关，沟道效应按 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 111 \rangle$ 、 $\langle 100 \rangle$ 顺序依次减弱。



$\langle 110 \rangle$



$\langle 111 \rangle$



$\langle 100 \rangle$

# 影响沟道效应的主要因素(3)



- **靶温**

**射程分布与注入时入射靶温度有关，靶温越高，沟道效应越弱。**

- **注入剂量和注入速度**

**注入剂量越大，注入速度越高，沟道效应越弱。**



# 减弱沟道效应的主要措施



1. 注入方向偏离晶体的主轴方向，典型值  $7^\circ$ ；
2. 淀积非晶表面层：在样品表面预淀积一层无定形膜，如  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ；
3. 在表面制造损伤层：用  $\text{Si}$ ,  $\text{Ge}$ ,  $\text{F}$ ,  $\text{Ar}$  等离子注入使表面预非晶化，形成非晶层（Pre-amorphization）；
4. 增大注入剂量，或增大注入速度；
5. 提高样品温度；

这几种方法都是利用增加注入离子与其他原子碰撞来降低沟道效应。工业上常用前两种方法。

# 浅结的形成

形成硼浅结主要受以下因素的影响：

- 硼很轻，注入时投影射程深；

解决方法：分子注入( $BF_2$ )、降低注入能量、预先非晶化。

- 硼被偏转进主晶轴方向的概率较高，易产生沟道效应；

一种解决方法：注硼之前以高剂量注入重原子(Ge)使硅表面非晶化。

- 高温退火时出现的异常扩散。(拖尾区最明显)

# 典型离子注入参数



**离子:** P, As, Sb, B, In, O

**剂量:**  $10^{11} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-2}$

**能量:** 1– 400 keV

**可重复性和均匀性:**  $\pm 1\%$

**温度:** 室温

**流量:**  $10^{12} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

# 目录

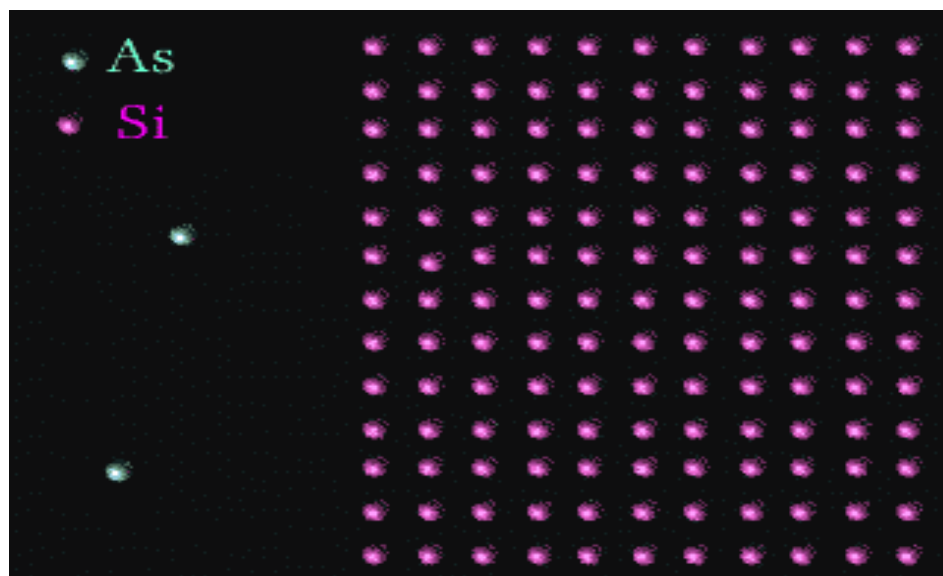


- §4.0 引言
- §4.1 核碰撞和电子碰撞
- §4.2 注入离子在无定形靶中的分布
- **§4.3 注入损伤**
- §4.4 热退火
- §4.5 离子注入系统

# 注入损伤

离子注入 → 晶格原子的级联碰撞 → 大量的晶格原子移位，材料结构变疏松 → 注入损伤不可避免：

高能离子注入硅片后与靶原子发生一系列碰撞，形成一系列的空位——间隙原子对及其它类型的晶格无序分布，这种因为离子注入所引起的简单或复杂的缺陷统称为**晶格损伤**；



# 损伤的产生

**移位阈能 $E_d$** : 靶原子离开其平衡位置所需的最小能量;  
(对于硅原子,  $E_d \approx 15\text{eV}$ );

**$E_T$** : 靶原子与注入离子碰撞后所获得的最小能量;

- $E_T < E_d$ : 加剧靶原子的热振动, 但不位移;
- $E_d < E_T < 2E_d$ : 靶原子位移, 留下空位;
- $E_T > E_d$ : 位移原子 (反冲原子) 再与靶原子碰撞, 产生级联碰撞。

# 级联碰撞引起的损伤分布 /1



- **入射为轻离子：**

**质量较靶原子轻的离子传给靶原子能量较小，被散射角度较大，只能产生数量较少的位移靶原子；**

**注入离子运动方向的变化大，碰撞后轻离子的运动轨迹在核阻止阶段呈“锯齿形”，反冲原子引起的级联损伤分布在“锯齿形”的拐角附近。故：**

**轻离子注入后产生的损伤密度小，不重叠，但区域较大，且呈锯齿状。**

# 级联碰撞引起的损伤分布 /2



- **入射为重离子：**

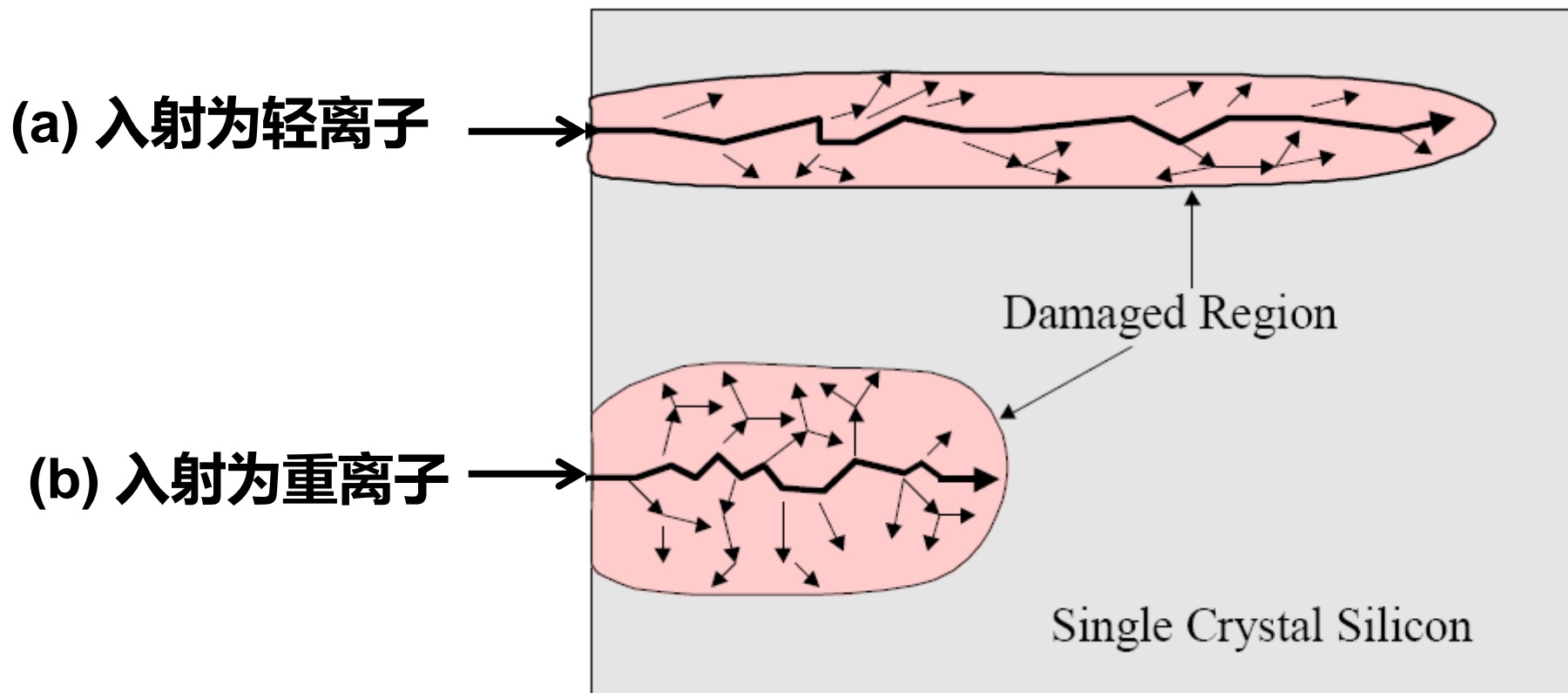
一进入靶表面移位就剧烈发生，且每次碰撞传输给靶的能量较大，**散射角小**；

反冲原子在快速损耗能量的过程中引起级联碰撞，故**射程较短**，在小体积内有较大损伤；且在离子轨迹的附近互相重叠，而在轨迹末端密度降低；

**重离子注入后造成的损伤区域小，损伤密度大**；呈现为一个靶表面附近较粗，靶内部一端较细的旋转椭球，该旋转椭球就是一个中心空位密集，周边堆积着大量间隙原子的损伤结构。



# 损伤区的分布



# 离子注入引起的晶格损伤



- 孤立的点缺陷或点缺陷群；（ $E_T \approx E_d$ ，轻离子注入）
  - 由点缺陷相互作用形成的复合缺陷，在晶体中形成局部的非晶区；（轻掺杂的重离子注入）
  - 损伤积累使局部的非晶区相互重迭而形成成长程无序的非晶层。（重掺杂的重离子注入）
- 前两种称为简单晶格损伤，后一种称为非晶层形成。

- 注入离子引起的晶格损伤有可能使晶体结构完全破坏变为无序的非晶区。
- 与注入剂量的关系
  - 注入剂量越大，晶格损伤越严重；
  - 临界剂量：形成非晶层所需的最小注入离子剂量；
  - 临界剂量与注入离子的质量成反比。

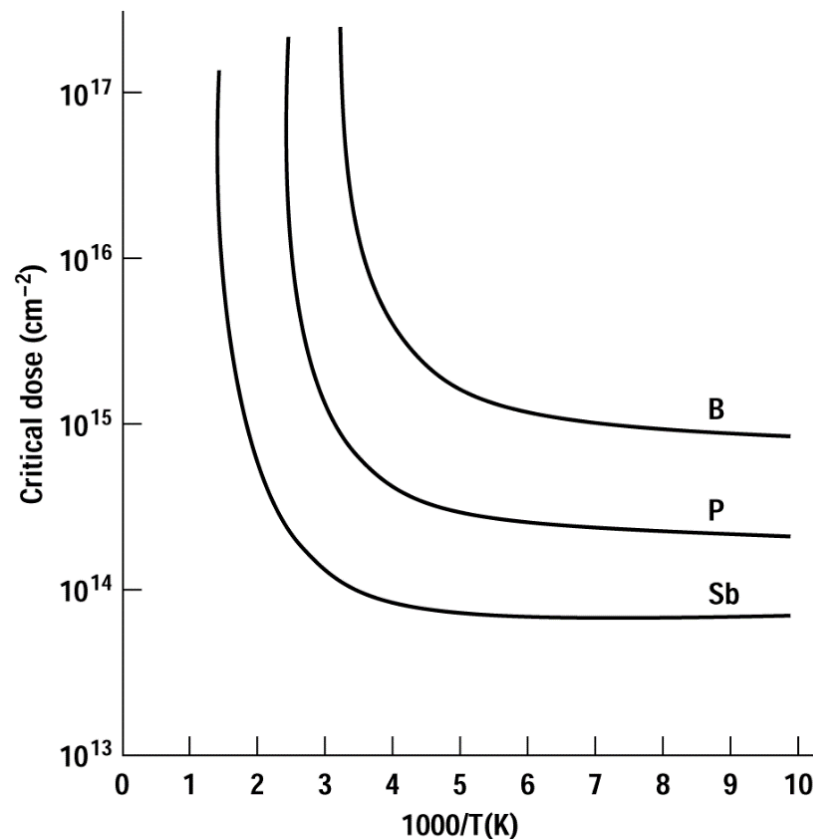


Figure 5.13 Critical implant dose required to amorphize a silicon substrate as a function of substrate temperature for several common silicon dopants (after Morehead and Crowder).

# 目录



- §4.0 引言
- §4.1 核碰撞和电子碰撞
- §4.2 注入离子在无定形靶中的分布
- §4.3 注入损伤
- **§4.4 热退火**
- §4.5 离子注入系统

## §4.4 热退火



- 一、退火的目的（作用）**
- 二、退火机理**
- 三、退火方式**
- 四、硅材料的热退火特性**

# 损伤的去除 - 退火

## 损伤对电特性的影响:

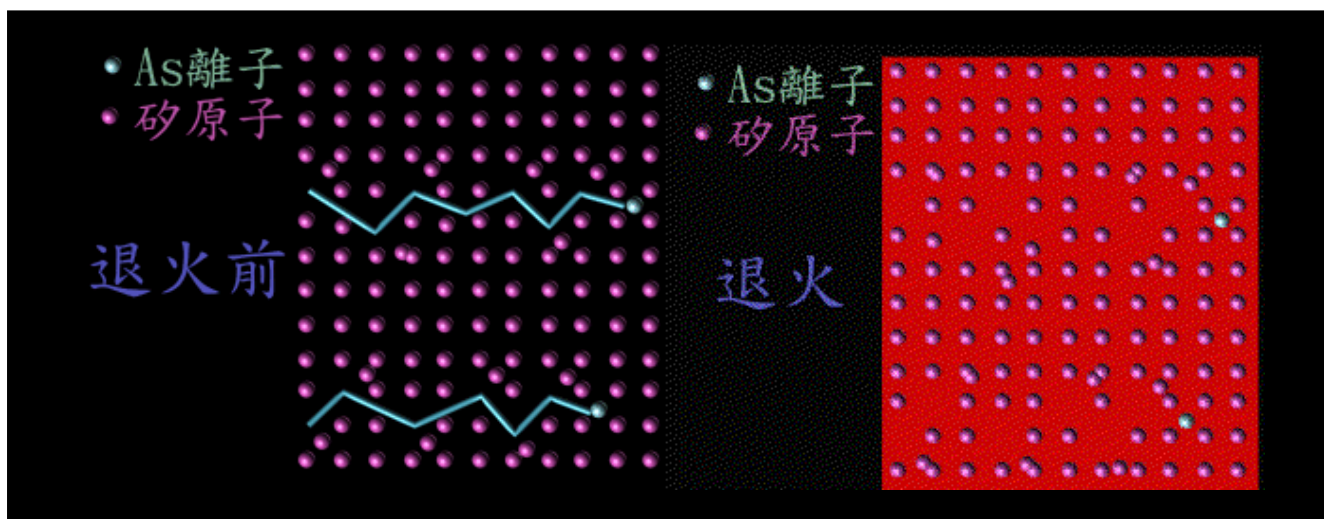
- 注入杂质不在晶格上: 载流子浓度低, 起不到施主或受主的作用;
- 散射中心: 使迁移率下降;
- 缺陷中心: 非平衡少子的寿命减少, pn结漏电流增加;

在芯片制造过程中, 为了实现特定目的将硅片在一定温度下, 经过一定时间的热处理, 这一热处理技术称为退火。

# 退火的目的（作用）

**退火**是离子注入掺杂必不可少的一项工艺技术，其**主要目的或作用**为：

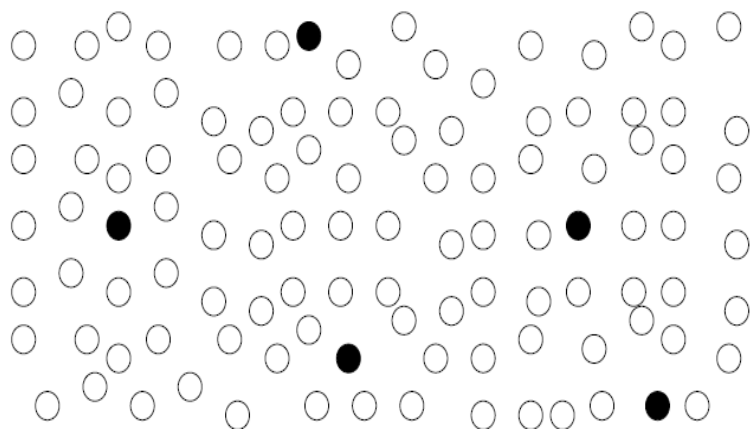
1. 消除由离子注入产生的晶格损伤，恢复硅晶格原有的晶体结构；
1. 激活杂质，让杂质进入电活性位置 - 替位位置；
2. 恢复材料少子寿命及载流子迁移率。



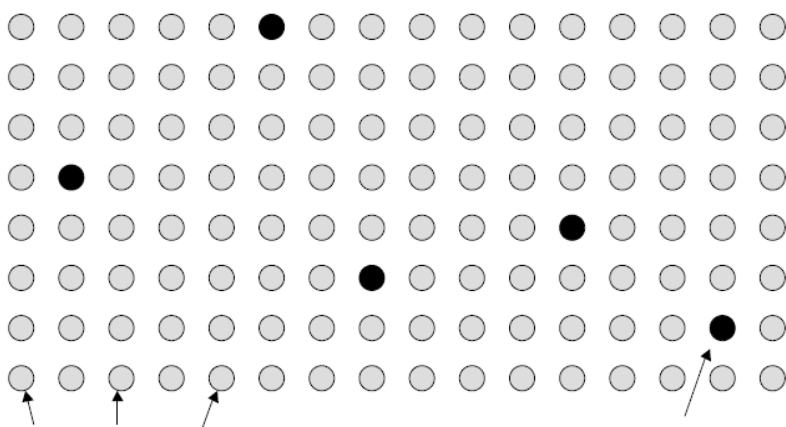
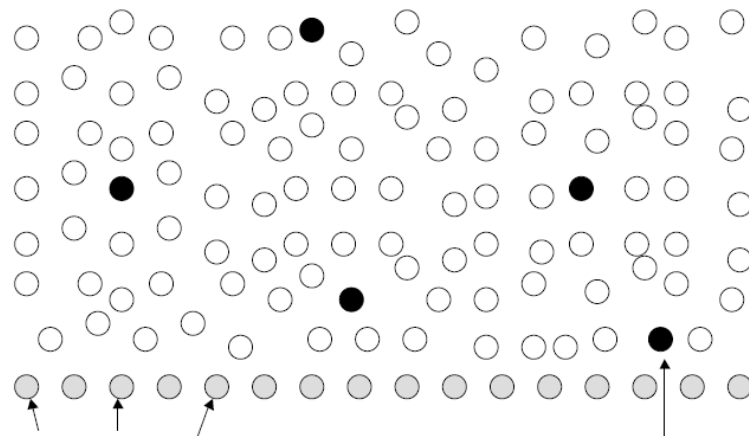
- **复杂的损伤分解为简单缺陷：空位、间隙原子；**
- **简单缺陷可因复合而消失；**
- **非晶层损伤由单晶区向非单晶区通过固相外延再生长得到恢复。**



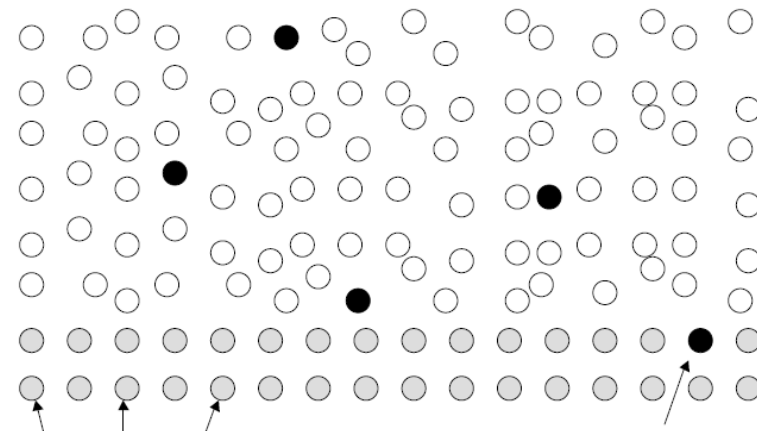
# 热退火原理示意



**Before Annealing**



**After Annealing**



# 退火工艺条件

退火：在**一定温度**下，通常在**一定条件**下，经过**一定时间**的热处理。

■ **工艺条件**：温度；时间；方式(常规、快速)。

退火温度和时间取决于注入剂量及非晶层的消除，所以退火的温度和时间，退火方式都要根据实际情况而定。

另外，还要根据对电学参数恢复程度的要求选定退火条件，退火温度的选择还要考虑到欲退火硅片所允许的处理温度。

# 退火的主要方式

## ■ 常规热退火

传统的退火方式，退火时间通常为15—30 min，使用**通常的扩散炉**，在真空或氮、氩等气体的保护下对衬底作退火处理。

## ■ 快速热退火

用极快的升温和在目标温度(一般是1000°C)下短暂的持续时间(数秒内)对硅片进行处理。注入硅片的退火通常在通入Ar或N<sub>2</sub>的**快速热处理机(RTP)**中进行。

# 常规热退火

退火温度和时间取决于注入剂量及非晶层的消除：

- 修复晶格：退火温度 $600^{\circ}\text{C}$ 以上，时间最长可达数小时；
- 杂质激活：退火温度 $650 - 900^{\circ}\text{C}$ ，时间 $10 - 30$ 分钟；

**优点：**该法设备简单，适用于大批量生产；退火效果一般能满足器件的要求；

**缺点：**不能全部消除缺陷，对高剂量注入激活率不够高，且会引起杂质再分布和二次缺陷。

# 快速热退火

## (RTA: Rapid Thermal Annealing)

快速退火的目的是通过降低退火温度，或者缩短退火时间来完成退火，其退火时间在  $10^{-11} \sim 10^2$  秒，亦称瞬态退火。

**RTA机理：**利用高功率密度的物质作用于晶片表面，使注入层在短时间内达到高温，以达到消除损伤的目的。

**RTA的主要优点：**掺杂的再分布大大降低，在修复晶格缺陷、激活杂质和最小化杂质扩散三者之间取得优化，并能减小瞬时增强扩散效应，是实现浅结注入的最佳方法。

# 快速退火的特点

## ● 特点:

退火时间短 ( $10^{-11} - 10^2$ 秒) ;

注入杂质激活率高;

对注入杂质分布影响小;

衬底材料的电学参数基本不受影响。

## ● 种类

(脉冲、连续波) 激光退火、电子束退火、离子束退火、非相干退火 (宽带非相干光源: 卤素灯、电弧灯)

# 退火技术比较



	传统炉管	RTA
工艺	整批	单片
加热率	低	高
均匀，重复性	高	低
产率	高	低

# 退火效果的衡量



退火效果一般采用**注入离子的激活率**来衡量，它表示样品经退火后，**单位靶面积在注入层或结深范围内的载流子数占注入剂量的比值**，即：

$$\alpha_n = \frac{1}{Q_0} \int_0^{x_j} n(x) dx$$



# 硅材料的热退火特性



- **注入剂量与退火温度成正比。**

**随着剂量或离子质量的增加，退火的困难程度增大。**

- **迁移率和寿命的恢复比载流子激活需要更高的温度。**
- **在修复注入过程中产生的一次缺陷的退火过程中，会出现二次缺陷。**
- **中等程度损伤的注入层在退火过程中会出现逆退火现象，对硼尤其明显。**

# 目录



- §4.0 引言
- §4.1 核碰撞和电子碰撞
- §4.2 注入离子在无定形靶中的分布
- §4.3 注入损伤
- §4.4 热退火
- **§4.5 离子注入系统**

## §4.5 离子注入系统



**第一台商用注入机在1973年面世，到1980年，大多数掺杂工艺都是在离子注入机内进行，它是半导体工艺中最复杂的设备之一。**

# 离子注入能量



- 离子注入中的能量是动能，常用单位是焦耳。而离子注入中的能量一般用离子电荷与电势差的乘积来表示，单位为电子伏特(eV)；
- 注入机的能量越高，意味着杂质原子能穿入硅片越深，射程越大。而控制结深就是控制射程，故**能量是注入机的一个很重要的参数。**

# 离子注入机分类



- **按注入能量的大小：**

低能机( $< 200\text{Kev}$ )、中能机( $200\text{Kev} \sim 1\text{Mev}$ )、  
高能机( $> 1\text{Mev}$ )

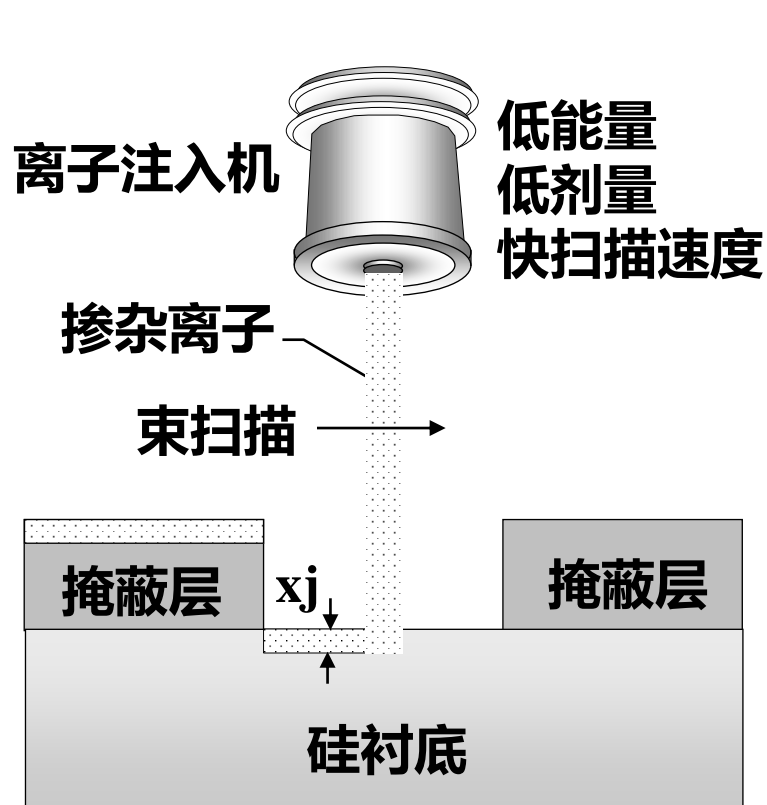
- **按离子束电流强度：**

小束流机( $< 1 \sim 100\mu\text{A}$ )、中束流机( $100\mu\text{A} \sim 1\text{mA}$ )、  
强束流机( $> 1\text{mA}$ )

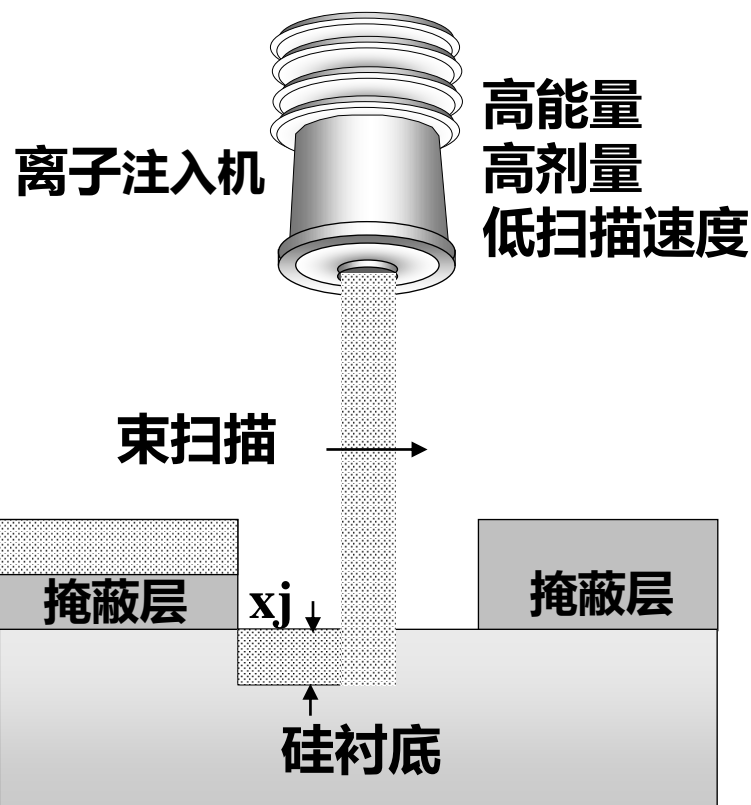
- **按使用不同对象：**

半导体用离子注入机和金属用离子注入机

# 掺杂浓度及深度的控制

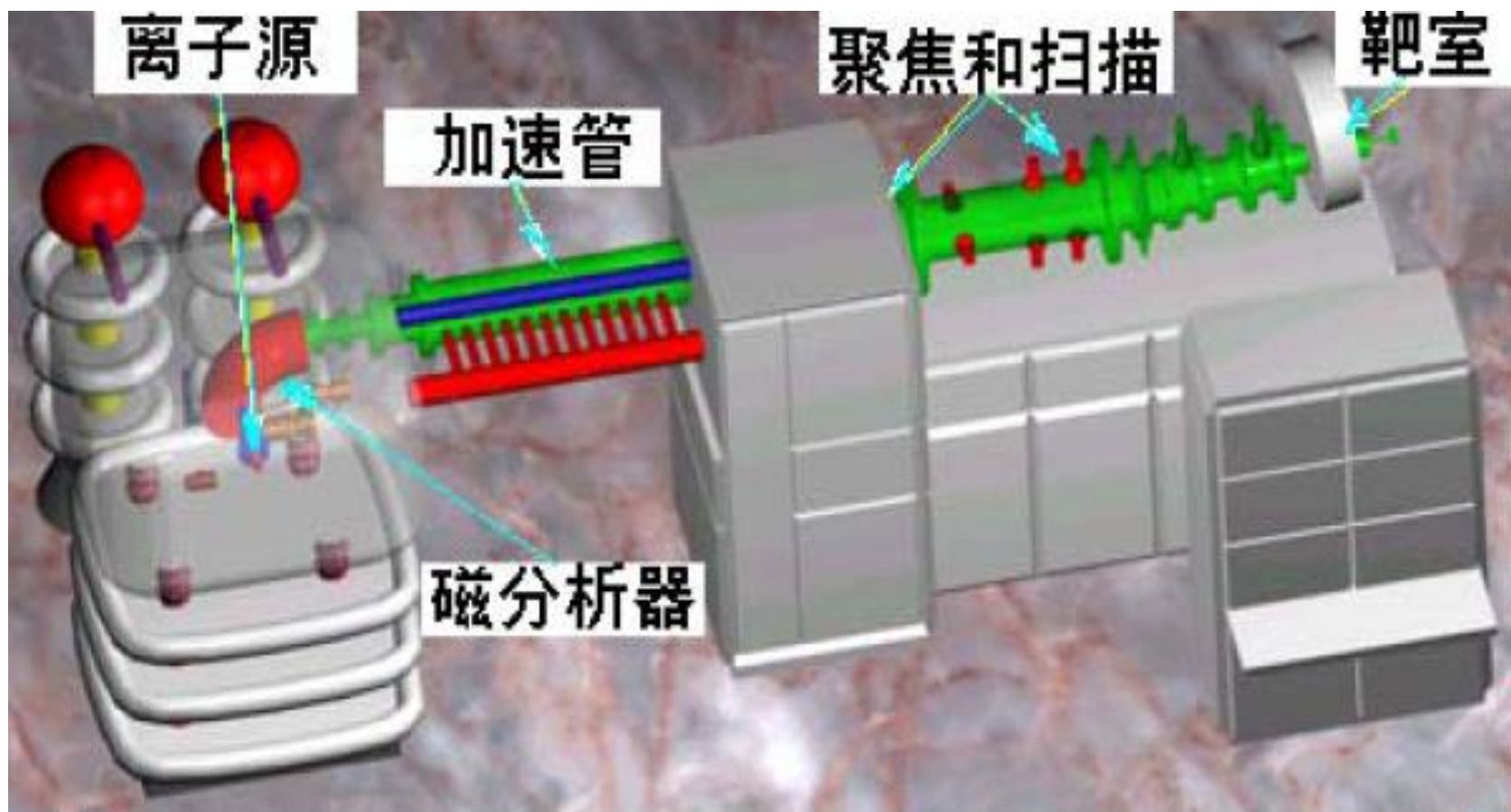


(a) 低掺杂浓度( $n^-$ ,  $p^-$ )及浅结深( $x_j$ )



(b) 高掺杂浓度( $n^+$ ,  $p^+$ )及深结深( $x_j$ )

# 离子注入系统示意图



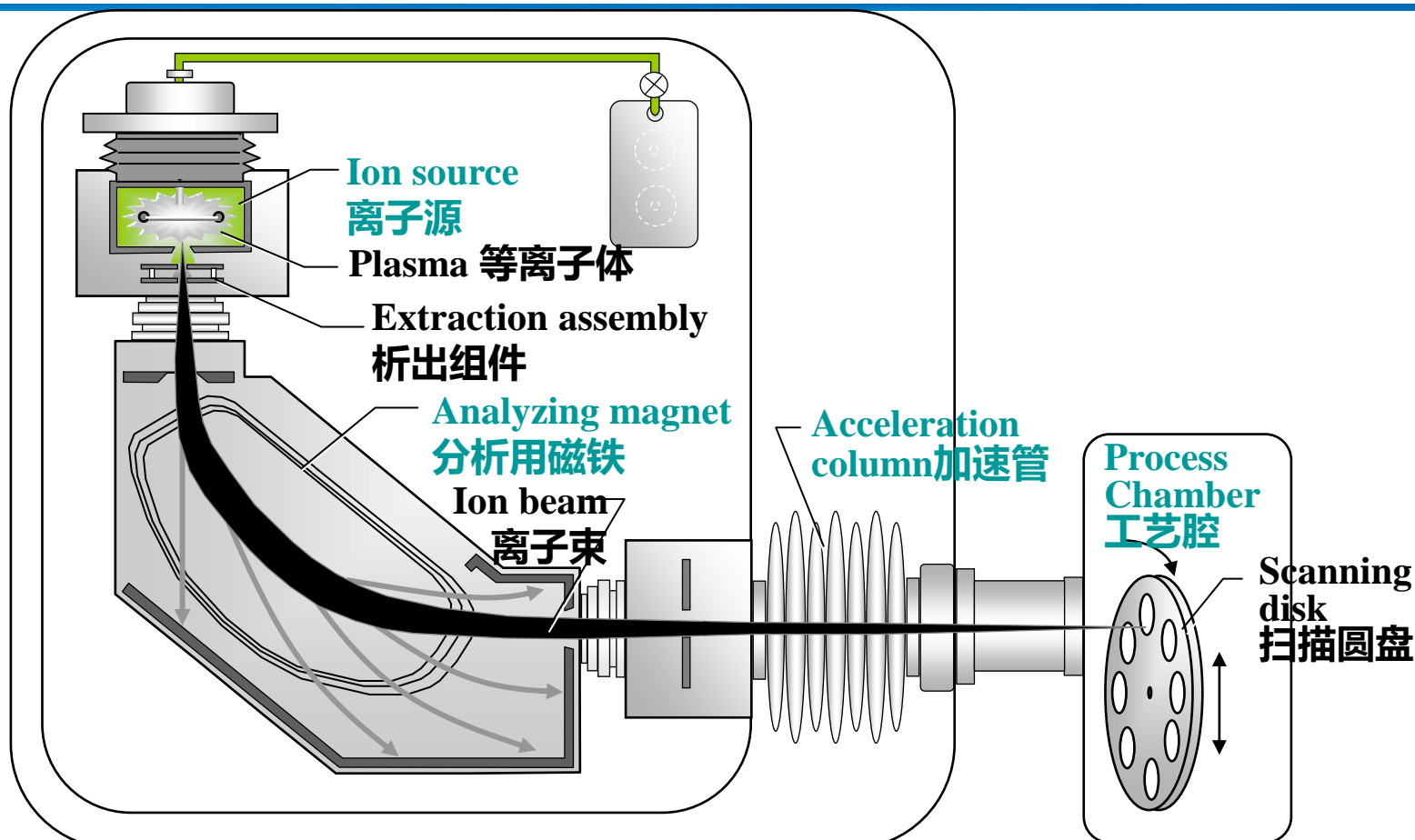
# 离子注入系统的组成



- **离子源 (Ion Source)**
- **磁分析器(质量分析器) (Magnetic analyzer)**
- **加速管 (Accelerator)**
- **聚焦和扫描系统 (Focus and Scan system)**
- **工艺腔(靶室和后台处理系统 Target Assembly)**



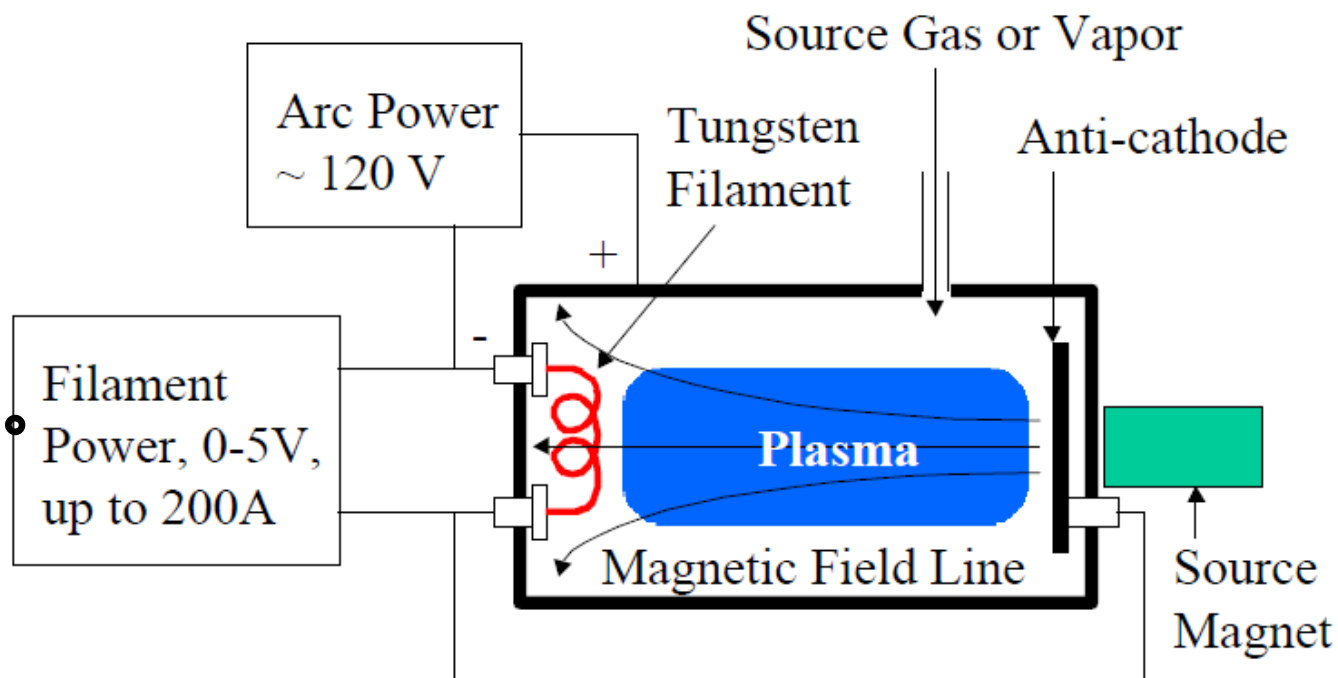
# 离子注入系统的原理示意图



从**离子源**引出的离子经过**磁分析器**选择出需要的离子，分析后的**离子加速**以提高离子的能量，再经过**二维偏转扫描器**使离子束均匀的注入到材料表面，用**电荷积分仪**可精确的**测量注入离子的数量**，调节注入离子的能量可精确的**控制离子的注入深度**。

# 离子源(Ion Source)

- **作用**：离子源是用来**产生注入离子**的装置(部件)。
- **原理**是利用灯丝(filament)发出的**自由电子**在电磁场作用下，**获得足够的能量后撞击分子或原子**，使它们**电离成离子**，再经吸极吸出，由初聚焦系统聚成离子束，射向磁分析器。
- **离子源和引出装置通常放在同一个真空腔内-离子化反应腔。**

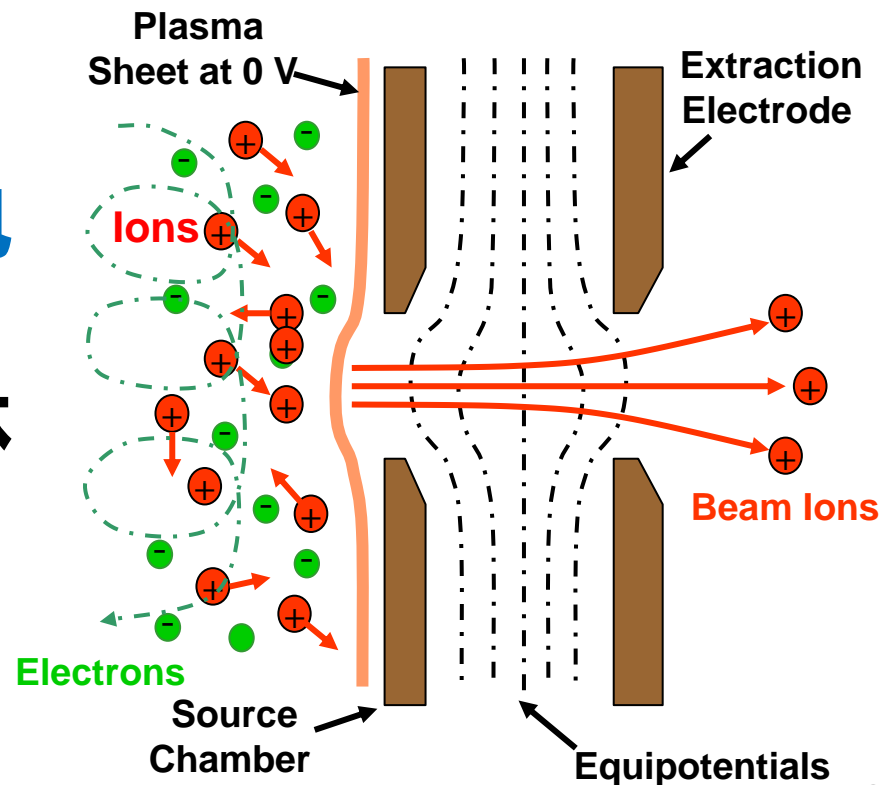


# 离子源(Ion Source)



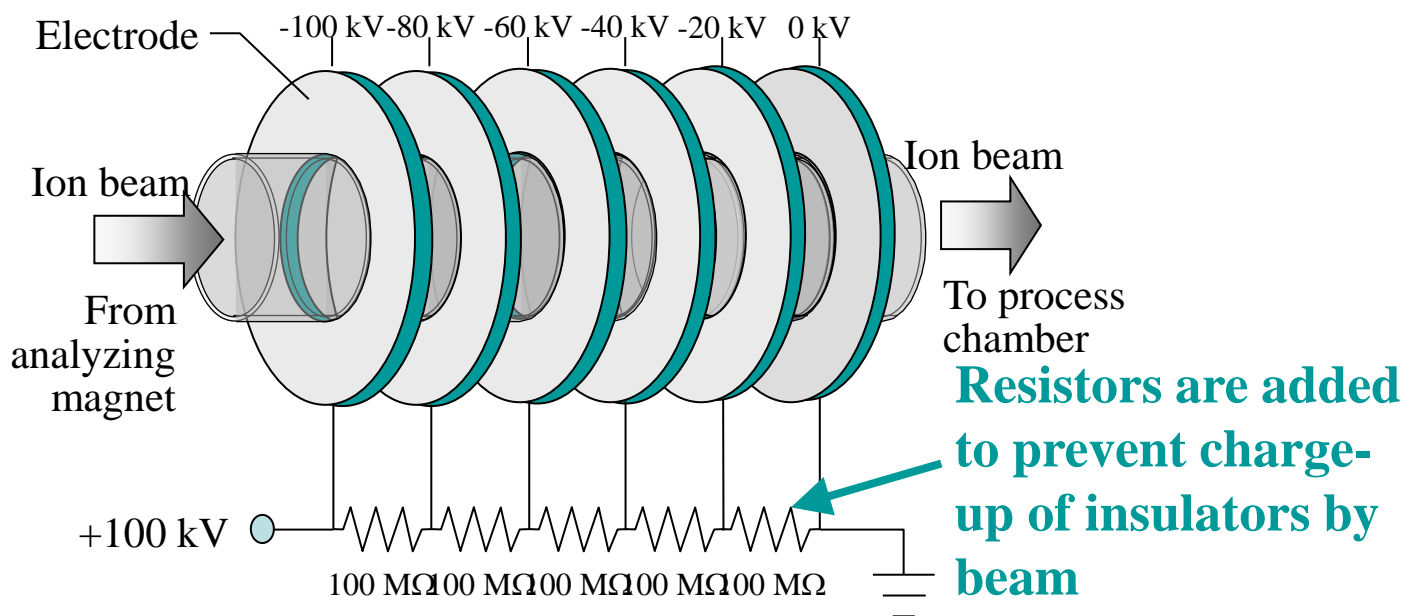
离子源从气态或固态杂质源中产生正离子，引出装置的环形电极利用负高压(几伏至几十千伏)电场把正离子拖出离子源。

- 产生离子有很多方法：  
目前常用的是**气体放电**产生等离子体；**高频、电子振荡**产生等离子体等。



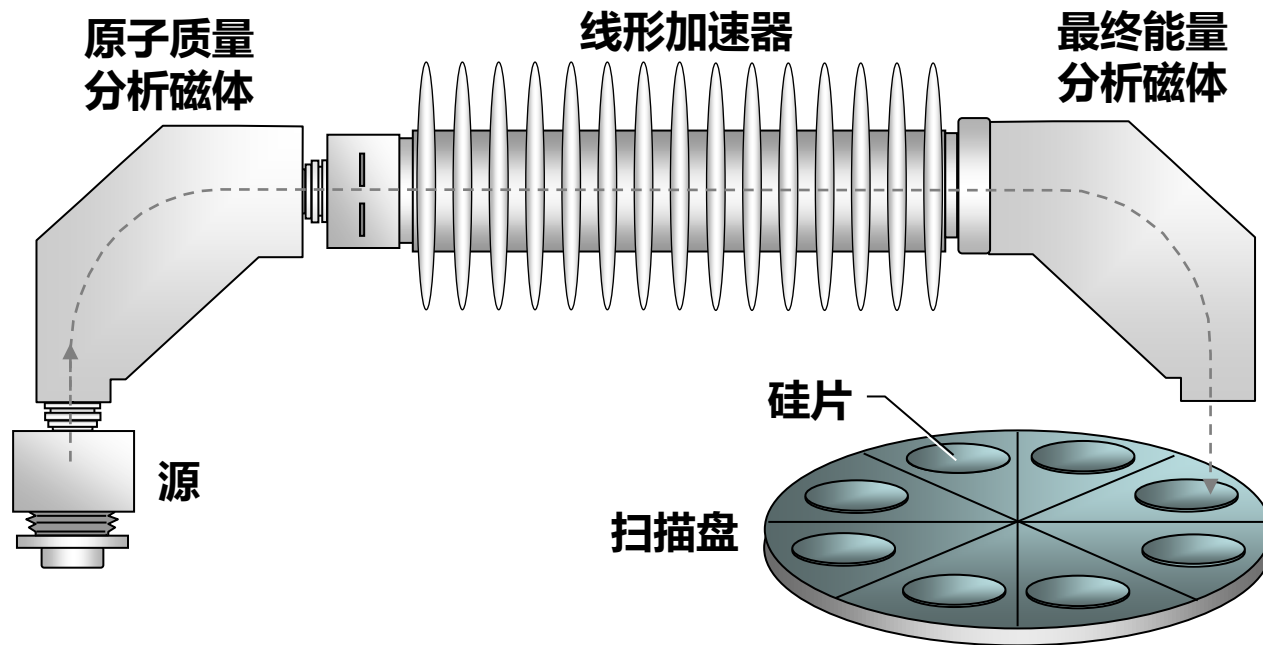
# 加速管

- **作用：**使离子获得所需的能量。
- **原理：**利用强电场，使离子获得更大的速度。



**加速管一端加高压，一端接地，形成一个静电场，离子在静电场的作用下加速到所需能量。**

# 高能注入机的线形加速器

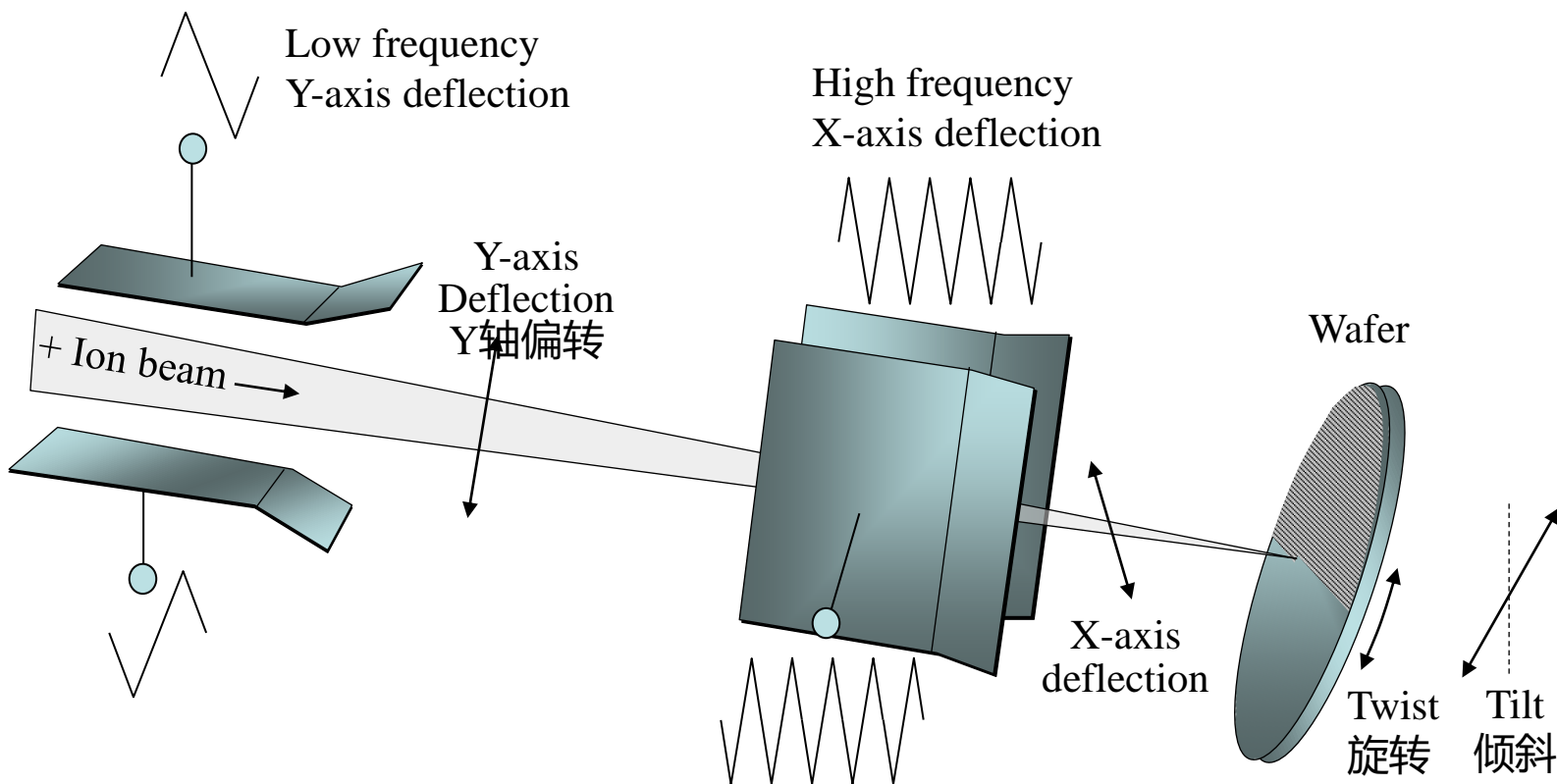


是一种直线型设计，沿轴向由一系列被介质隔离的带负电的环形电极组成，电极上的负电压依次增大。

电极间总的电压差决定了注入能量，注入机通常以最大离子束电流和加速电压来划分。

# 聚焦和扫描系统

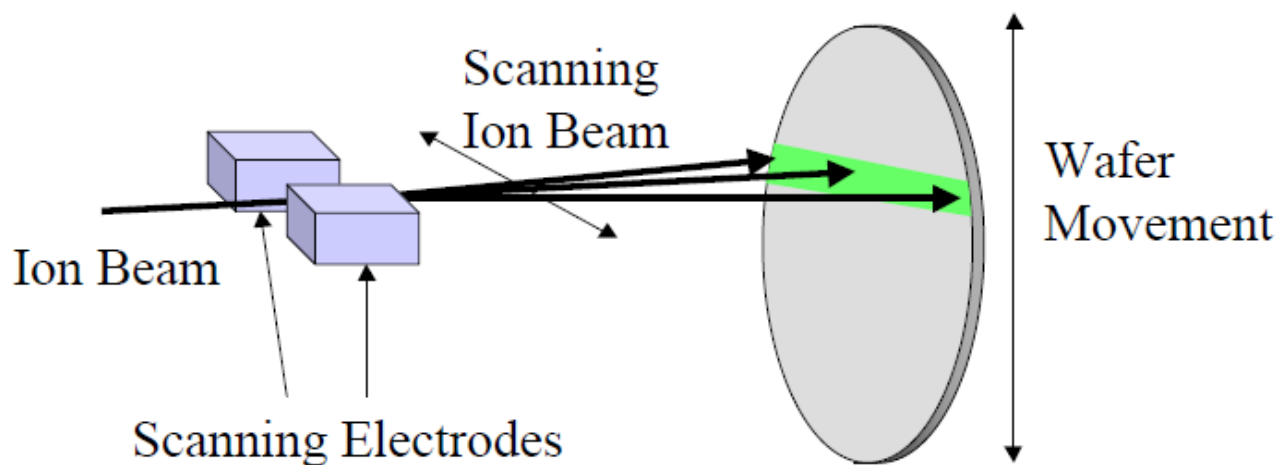
由加速管出来的离子先由静电聚焦透镜聚焦，再进行x、y两个方向扫描，然后通过一套X-Y电极构成的偏转系统注到靶上。



# 扫描系统



注入到硅片中的离子束是在成分和能量方面纯净的离子束，这种聚束的离子束通常很小，必须通过扫描才能覆盖整个硅片。



- **目的：**使离子在整个靶片上均匀注入。  
扫描在剂量的统一性和重复性方面起着关键作用。

# 靶室和后台处理系统



离子束向硅片注入发生在靶室(工艺腔)中。

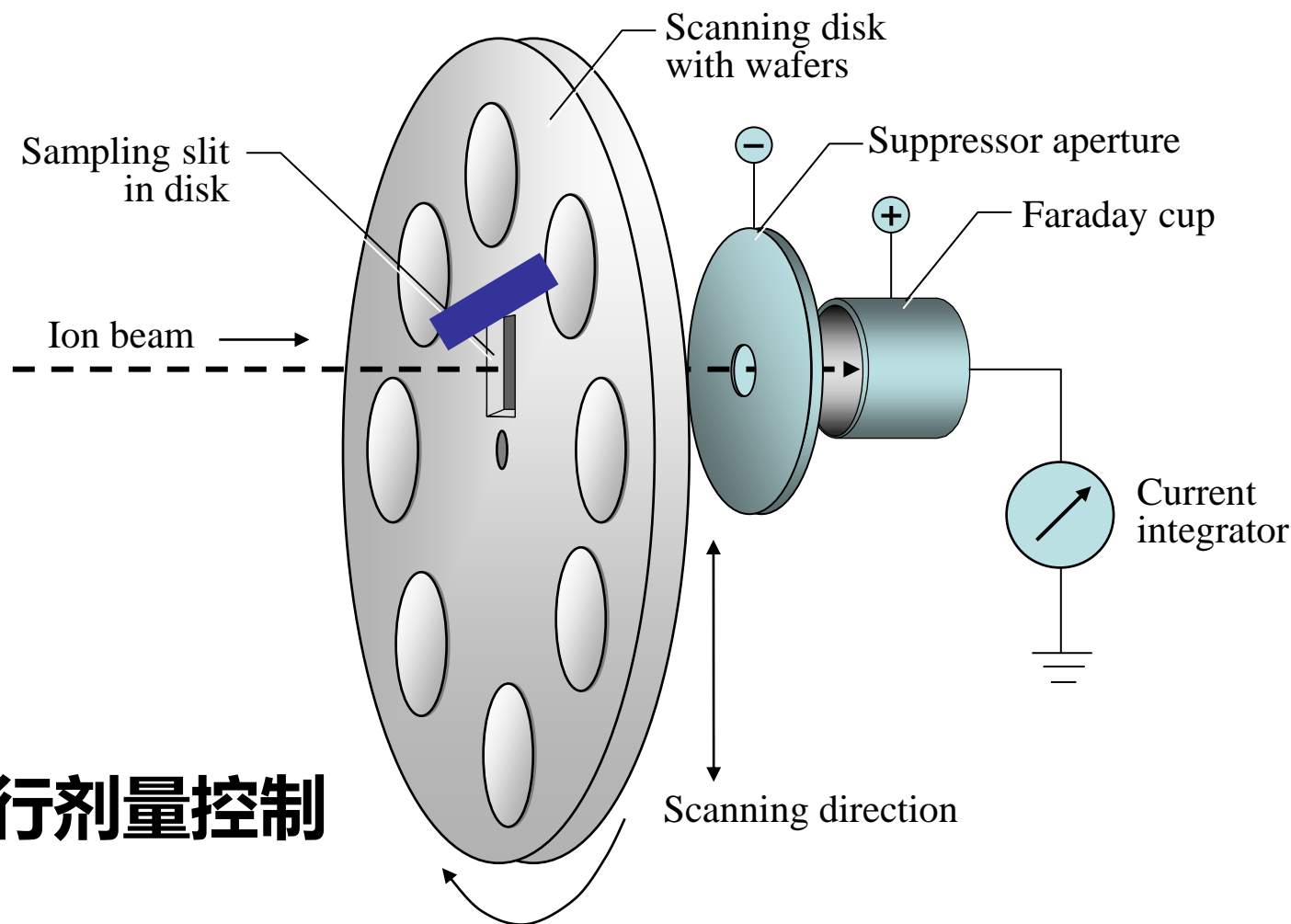
靶室是注入机的重要组成部分，包括具有真空锁的**全自动装片和卸片机构**、**测量电荷的法拉弟杯**和**计算机控制系统**；另外还有一些**监测和控制沟道效应的装置**。

根据不同需要，可采用高温靶（ $800^{\circ}\text{C}$ ），低温靶（液氮温度），冷却靶（小于 $120^{\circ}\text{C}$ ）。



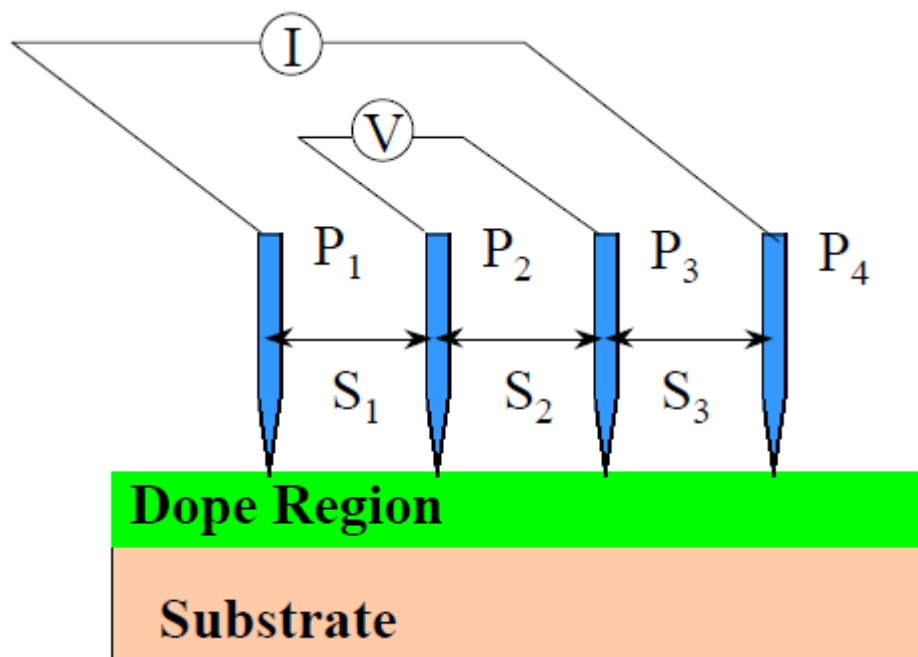
# 法拉第杯电流测量

## Faraday Cup - Beam Current Measurement



**作用：进行剂量控制**

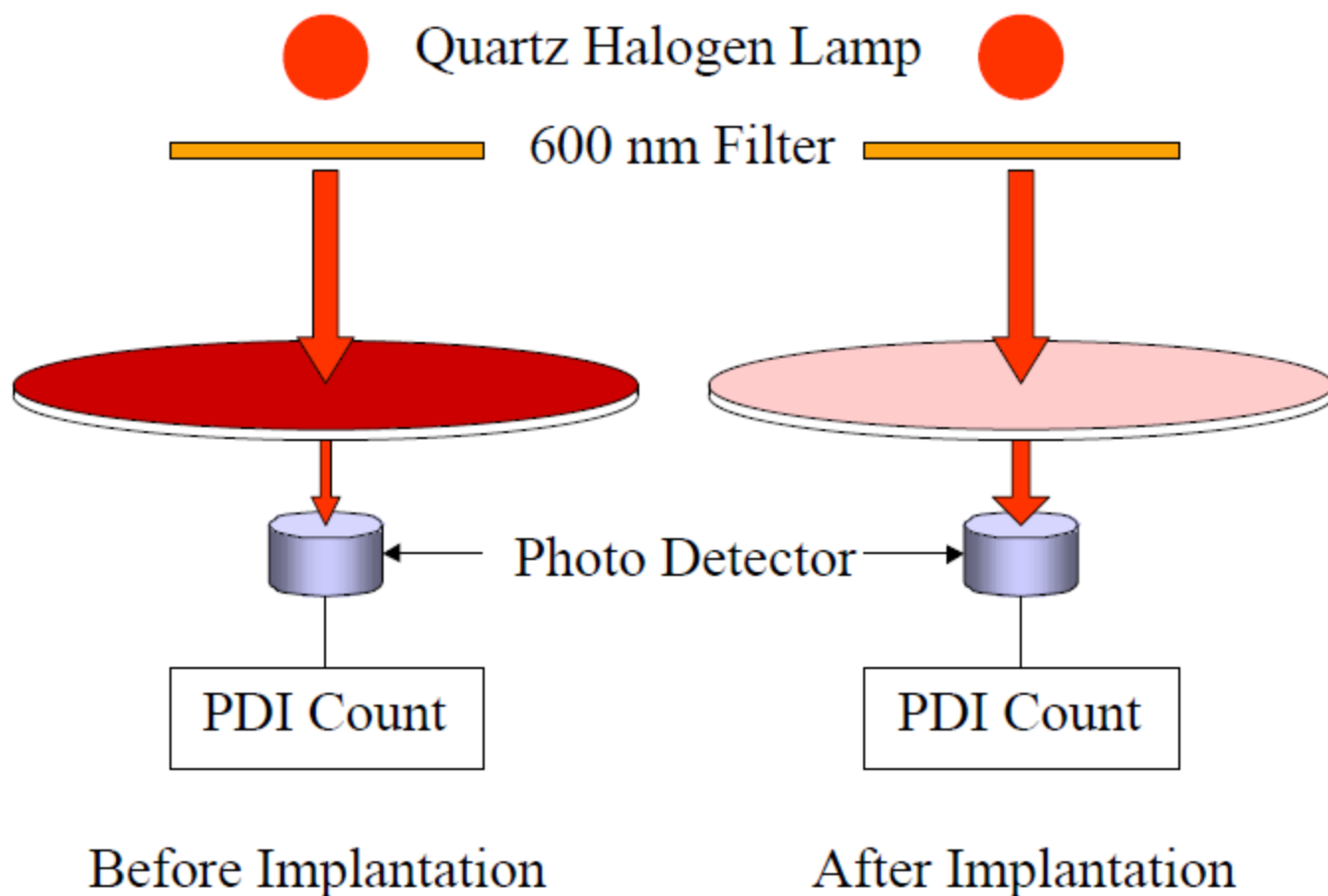
- 四探针测试仪用于测试方块电阻



# 离子注入层的评估之二



- 特殊测试技术—光学剂量测定



# 主要质量测量参数



- 硅片表面无法接受的颗粒沾污
- 剂量控制
- 使用低能注入的超浅结结深

# 主要问题的检查



- 剂量不均匀造成硅片表面不同区域的杂质含量不同;
- 离子束中的沾污;