

# 集成电路工艺原理

上海电力大学

邱丽娜、刘伟景

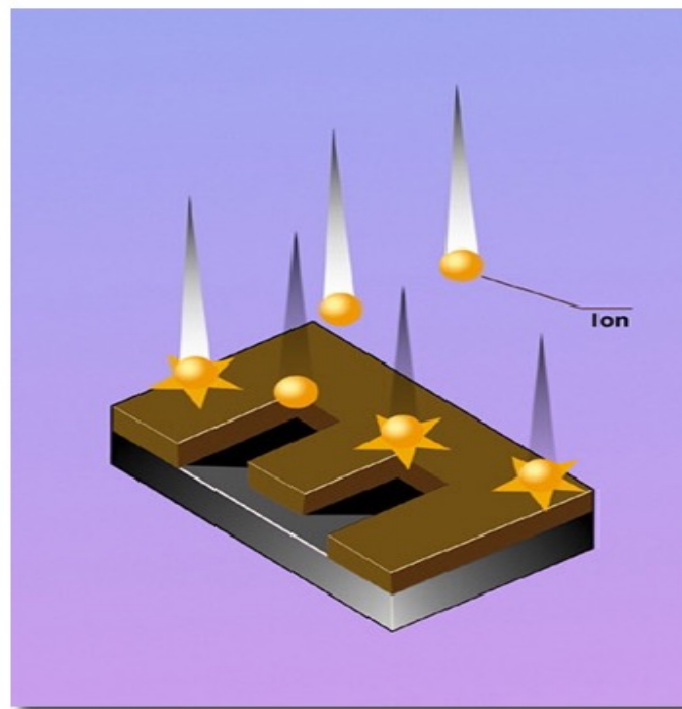
## 第六章 离子注入

### 3. 离子注入

**什么是离子注入？** 离化后的原子在强电场的加速作用下，注射进入靶材料的表层，以改变这种材料表层的物理或化学性质

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
- ❖ 在强电场中加速，获得较高的动能后，射入材料表层（靶）
- ❖ 以改变这种材料表层的物理或化学性质



Ion Implantation

## 第六章 离子注入

---

离子注入是一种将带电的且具有能量的粒子注入衬底硅的过程。注入能量介于1keV到1MeV之间，注入深度平均可达10nm~10μm，离子剂量变动范围从用于阈值电压调整的 $10^{12}/\text{cm}^3$ 到形成绝缘层的 $10^{18}/\text{cm}^3$ 。相对于扩散工艺，离子注入的主要好处在于能更准确地控制杂质掺杂、可重复性和较低的工艺温度。

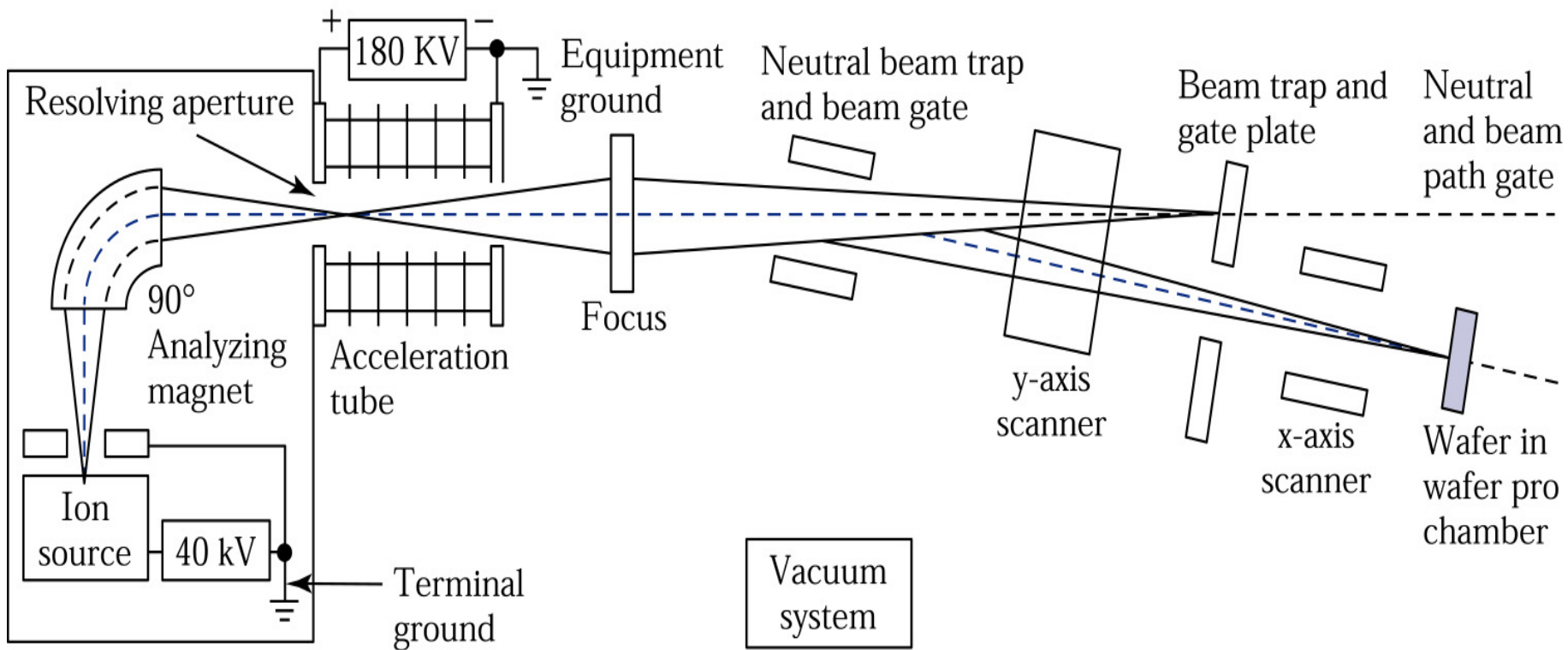
高能离子由于与衬底中电子和原子核的碰撞而失去能量，最后停在晶格内某一深度。平均深度由于调整加速能量来控制。杂质剂量可由注入时监控离子电流来控制。主要副作用是离子碰撞引起的半导体晶格断裂或损伤。因此，后续的退化处理用来去除这些损伤。

# 第六章 离子注入

## 离子注入特点

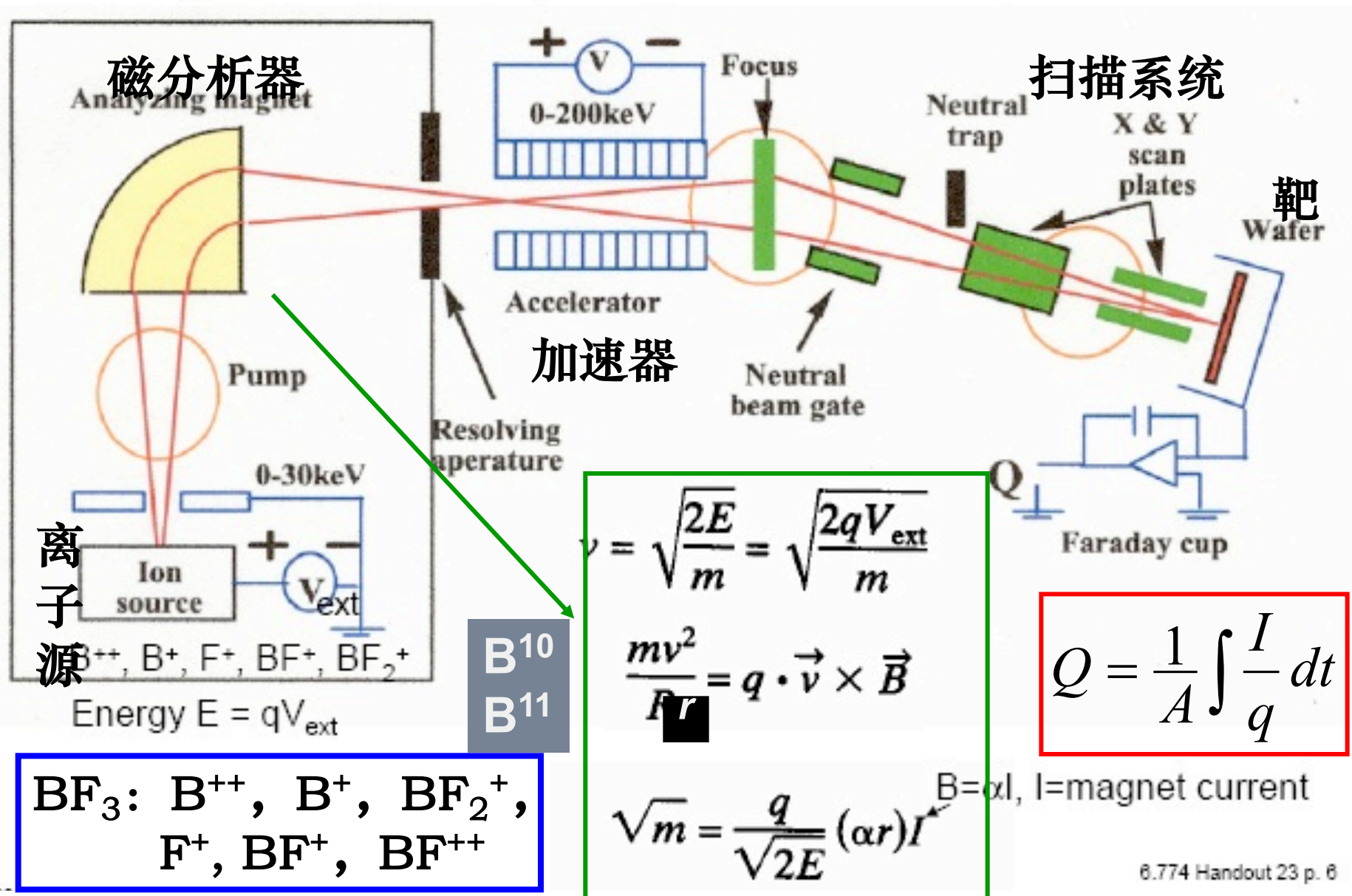
- 各种杂质浓度分布与注入浓度可通过精确控制掺杂剂量 ( $10^{11}$ - $10^{18}$   $\text{cm}^{-2}$ ) 和能量 (1-400 keV) 来达到
- 平面上杂质掺杂分布非常均匀 (1% variation across an 8" wafer)
- 表面浓度不受固溶度限制, 可做到浅结低浓度 或深结高浓度
- 注入元素可以非常纯, 杂质单一性
- 可用多种材料作掩膜, 如金属、光刻胶、介质; 可防止玷污, 自由度大
- 低温过程 (因此可以用光刻胶作为掩膜), 避免了高温过程引起的离子注入
- 横向效应比气固相扩散小得多, 有利于器件尺寸的缩小
- 会产生缺陷, 甚至非晶化, 必须经高温退火加以改进
- 设备相对复杂、相对昂贵 (尤其是超低能量离子注入机)
- 有不安全因素, 如高压、有毒气体

## 第六章 离子注入



中等电流离子注入机示意图特点

# 第六章 离子注入





## 第六章 离子注入

- a) **气体源 (Source)** : 在半导体应用中, 为了操作方便, 一般采用**气体源**, 如  $\text{BF}_3$ ,  $\text{BCl}_3$ ,  $\text{PH}_3$ ,  $\text{AsH}_3$  等。如用固体或液体做源材料, 一般先加热, 得到它们的蒸汽, 再导入放电区。
- b) **离子源 (Ion Source)** : 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源分子或原子, 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

气体源:  $\text{BF}_3$ ,  $\text{AsH}_3$ ,  $\text{PH}_3$ , Ar,  $\text{GeH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ , ...

离子源: B, As, Ga, Ge, Sb, P, ...

## 第六章 离子注入



•离子注入过程是一个**非平衡**过程，高能离子进入靶后不断与原子核及其核外电子碰撞，逐步损失能量，最后停下来。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。



# 第六章 离子注入

---

## 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。
- 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：(1) 核阻止 (nuclear stopping) ； (2) 电子阻止 (electronic stopping)

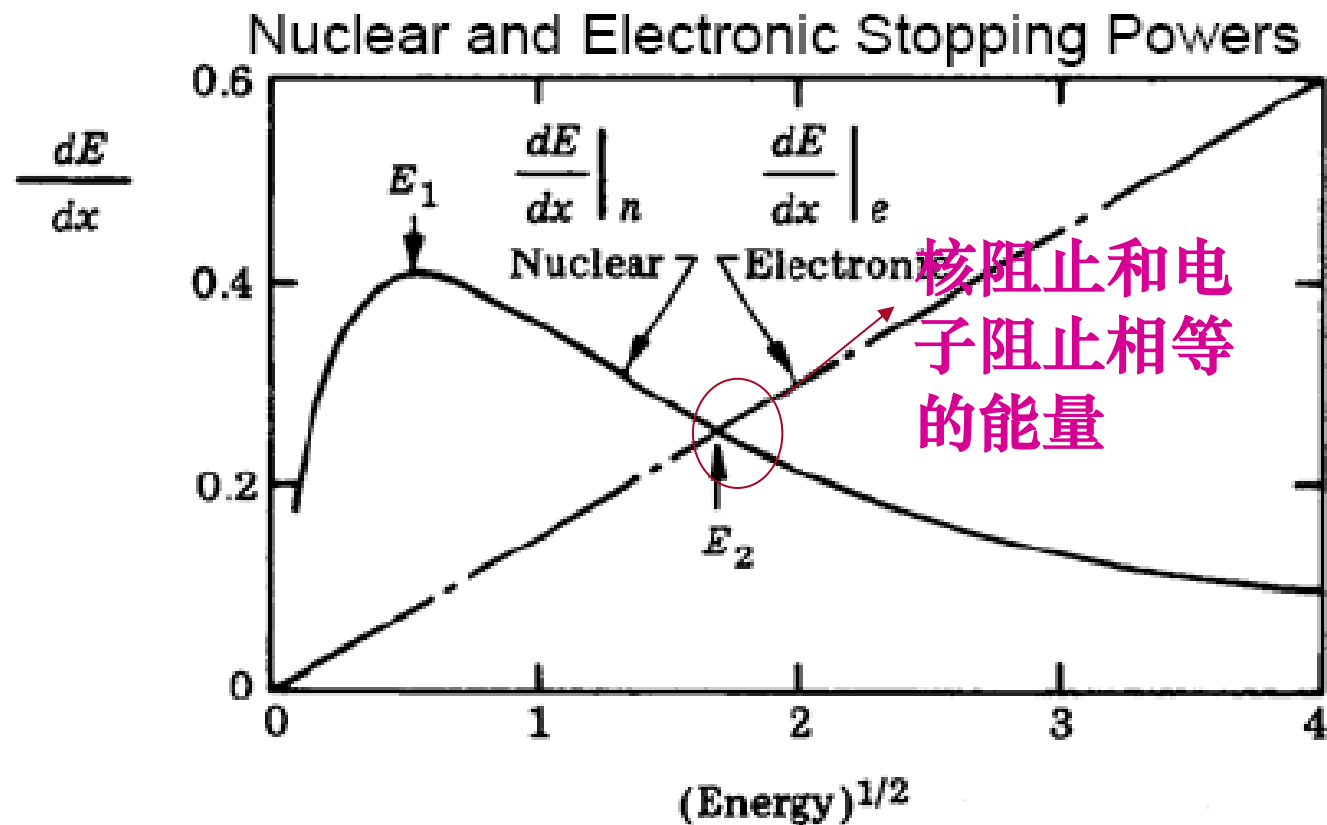
## 第六章 离子注入

---

- 阻止本领 (stopping power) : 材料中注入离子的能量损失大小
- 单位路程上注入离子由于核阻止和电子阻止所损失的能量分别为  $S_n(E)$ ,  $S_e(E)$  。
- 核阻止本领: 来自靶原子核的阻止, 经典两体碰撞理论。
- 电子阻止本领: 来自靶内自由电子和束缚电子的阻止。

# 第六章 离子注入

## 总阻止本领 (Total stopping power)



- ❖ 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

## 第六章 离子注入

$$\frac{dE}{dx} = -N[S_n(E) + S_e(E)]$$

$$S_n(E) = \frac{1}{N} \left( \frac{dE}{dx} \right)_n, S_e(E) = \frac{1}{N} \left( \frac{dE}{dx} \right)_e$$

能量为  $E$  的入射粒子  
在密度为  $N$  的靶内走  
过  $x$  距离后损失的能  
量

$-dE/dx$ : 能量随距离损失的平均速率

$E$ : 注入离子在其运动路程上任一点  $x$  处的能量

$S_n(E)$ : 核阻止本领/截面 ( $\text{eV}/\text{cm}^2$ )

$S_e(E)$ : 电子阻止本领/截面 ( $\text{eV}/\text{cm}^2$ )

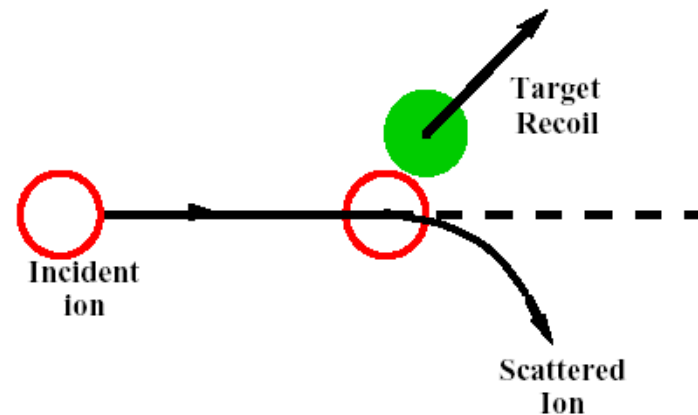
$N$ : 靶原子密度  $\sim 5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$  for Si

能量  $E$  的函数

## 第六章 离子注入

### 核阻止

- 注入离子与靶内原子核之间两体碰撞
- 两粒子之间的相互作用力是电荷作用



对心碰撞，最大能量转移：

$$E_{Trans} = \frac{4m_1m_2}{(m_1 + m_2)^2} E$$

m——质量，Z——原子序数  
下标1——离子，下标2——靶

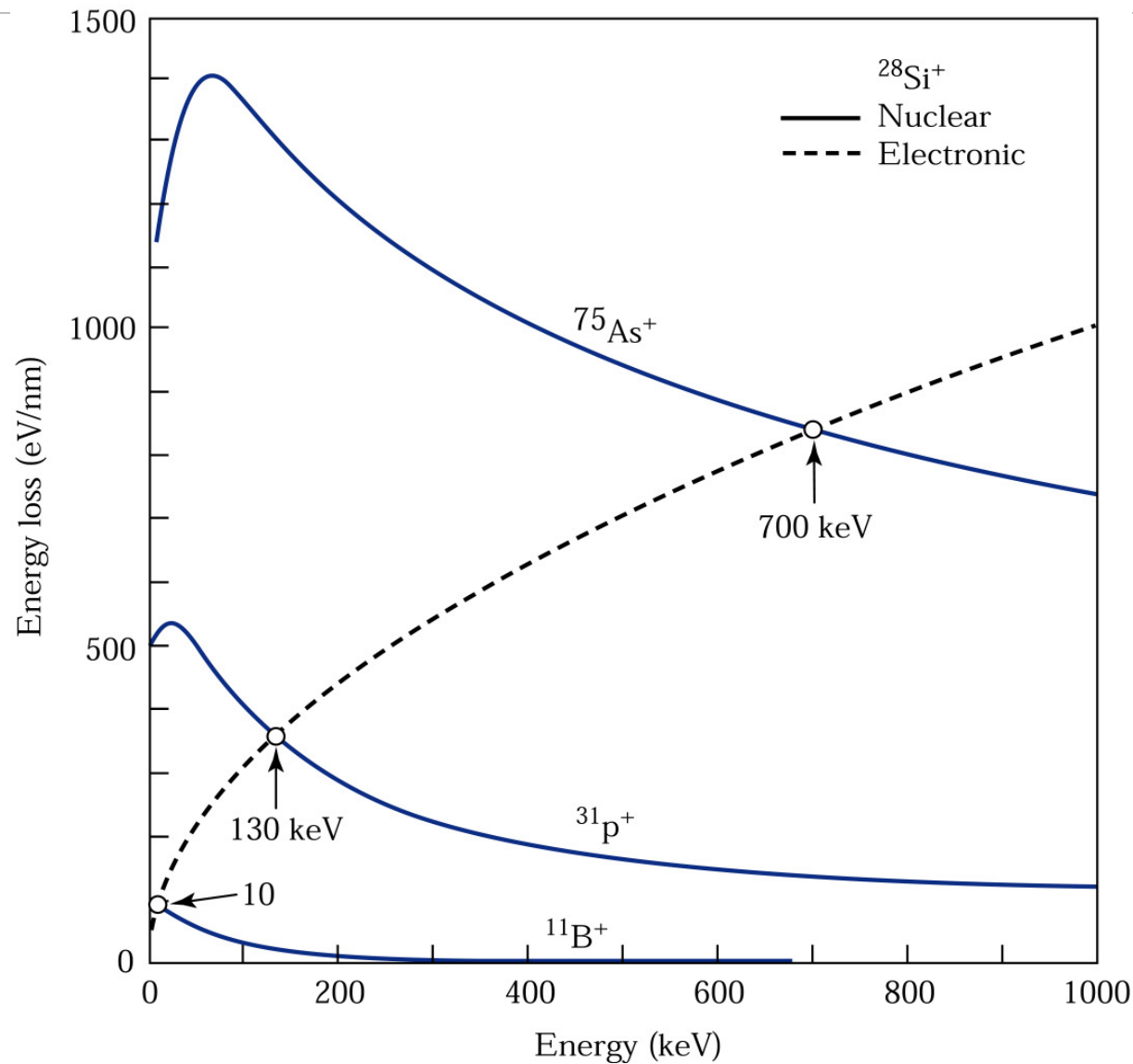
核阻止能力的一阶近似为：

$$S_n(E) = 2.8 \times 10^{-15} \frac{Z_1 Z_2}{\sqrt{Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3}}} \frac{m_1}{m_1 + m_2} \text{ eV cm}^2$$

例如：磷离子  $Z_1 = 15$ ,  $m_1 = 31$  注入硅  $Z_2 = 14$ ,  $m_2 = 28$ , 计算可得：  
 $S_n \sim 550 \text{ keV-mm}^2$

摘自 J.F. Gibbons, Proc. IEEE, Vol. 56 (3), March, 1968, p. 295

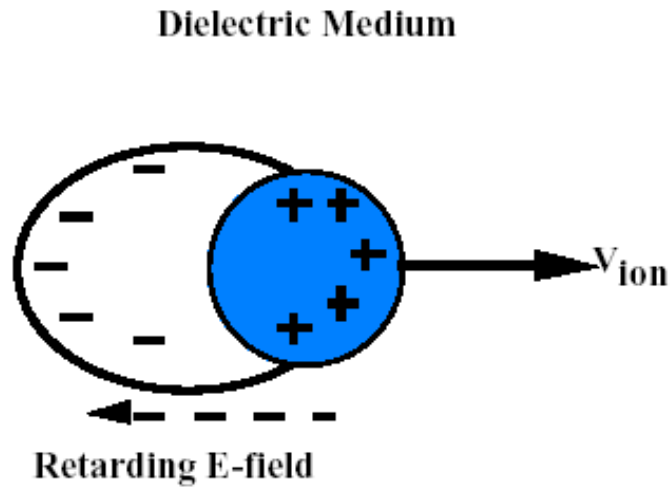
## 第六章 离子注入



计算显示，在低能量时，核阻止本领随能量的增加而线性增加， $\text{Sn}(\text{E})$ 会在某一中等能量时达到最大值。在高能量时，由于快速粒子没有足够的时间和靶原子进行有效的能量交换，所以 $\text{Sn}(\text{E})$ 变小。硅对各种能量的砷、磷、硼离子的 $\text{Sn}(\text{E})$ 计算值，在图中用实线画出(在离子符号左上角标有原子量)。由图可见，较重的原子(如砷)有较大的核阻止本领，即单位距离内的能量损失较大。

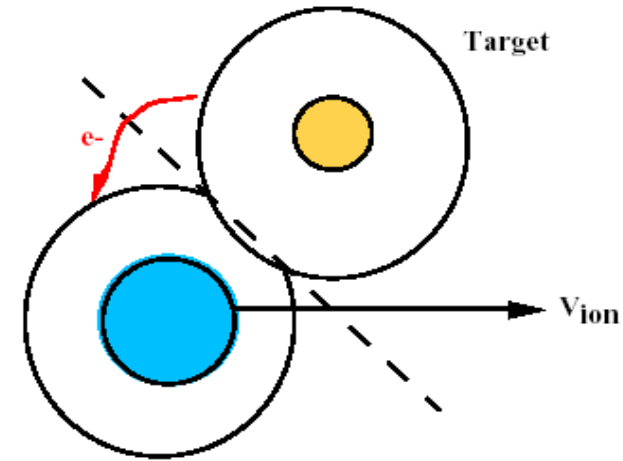
# 第六章 离子注入

电子阻止  
非局部电子阻止



不改变入射离子运动方向

局部电子阻止



电荷/动量交换导致入射离子运动方向的改变 (<核间作用)

把固体中的电子看成自由电子气，电子的阻止就类似于粘滞气体的阻力（一阶近似）。  
电子阻止本领和注入离子的能量的平方根成正比。

$$S_e(E) = C v_{ion} = k E^{1/2}, k \cong 0.2 \times 10^{-15} \text{ eV}^{1/2} \text{ cm}^2$$



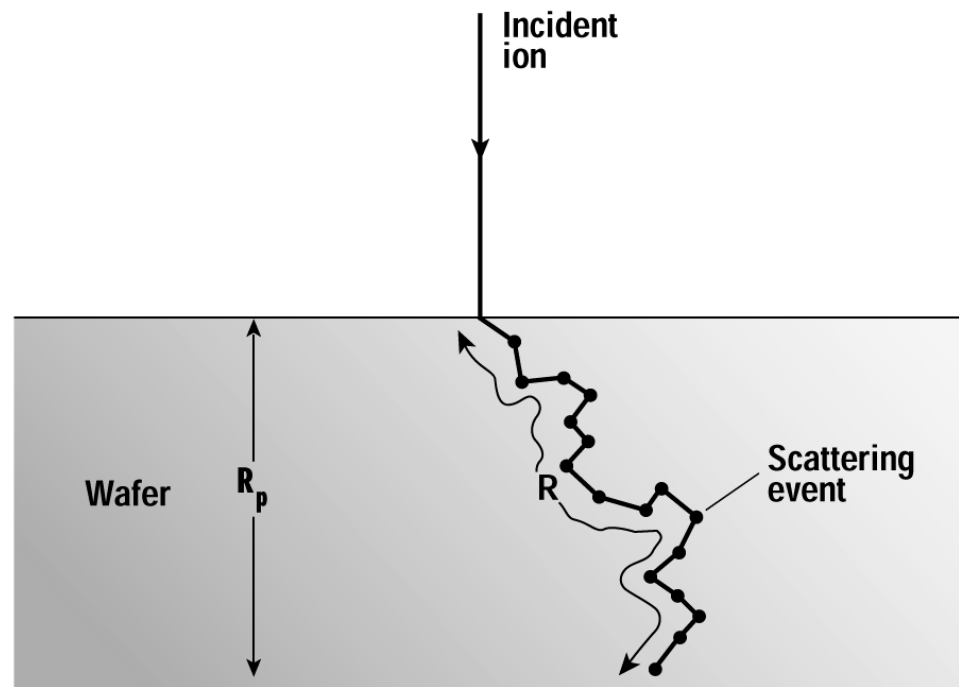
## 第六章 离子注入

$R$ : 射程 (range) 离子在靶内的总路线长度

$R_p$ : 投影射程 (projected range)  $R$ 在入射方向上的投影

射程分布: 平均投影射程  $R_p$ , 标准偏差  $\Delta R_p$ , 横向标准偏差  $\Delta R_{\perp}$

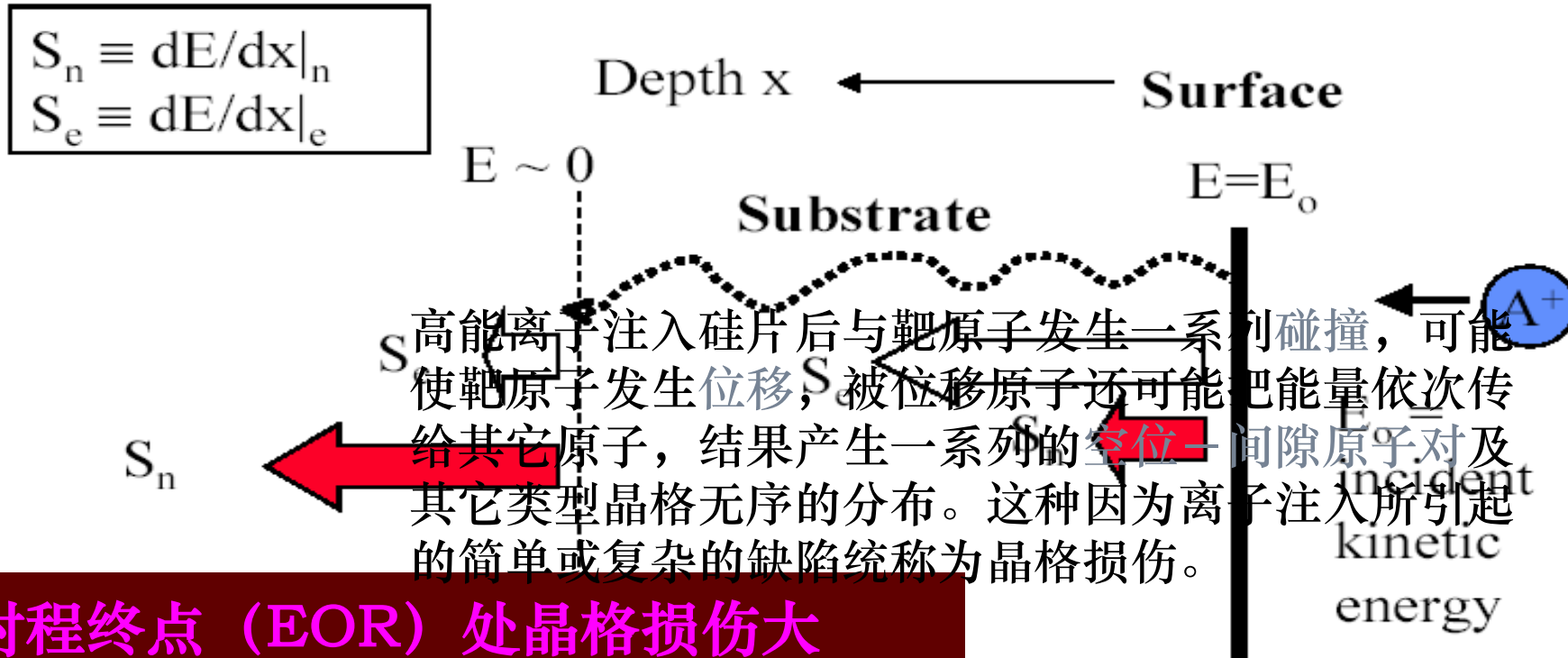
### 非晶靶中注入离子的浓度分布



$\Delta R_p$ : 标准偏差 (Straggling), 投影射程的平均偏差

$\Delta R_{\perp}$ : 横向标准偏差 (Traverse straggling), 垂直于入射方向平面上的标准偏差。

# 第六章 离子注入



射程终点 (EOR) 处晶格损伤大

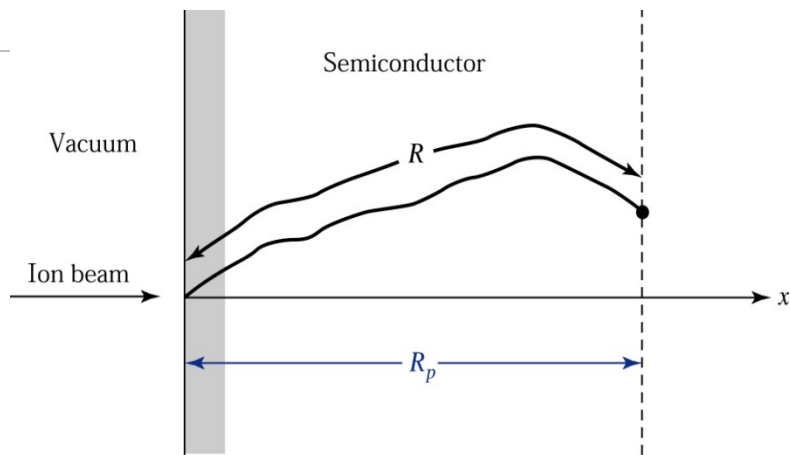
表面处晶格损伤较小

More crystalline  
damage at  
end of range  
 $S_n > S_e$

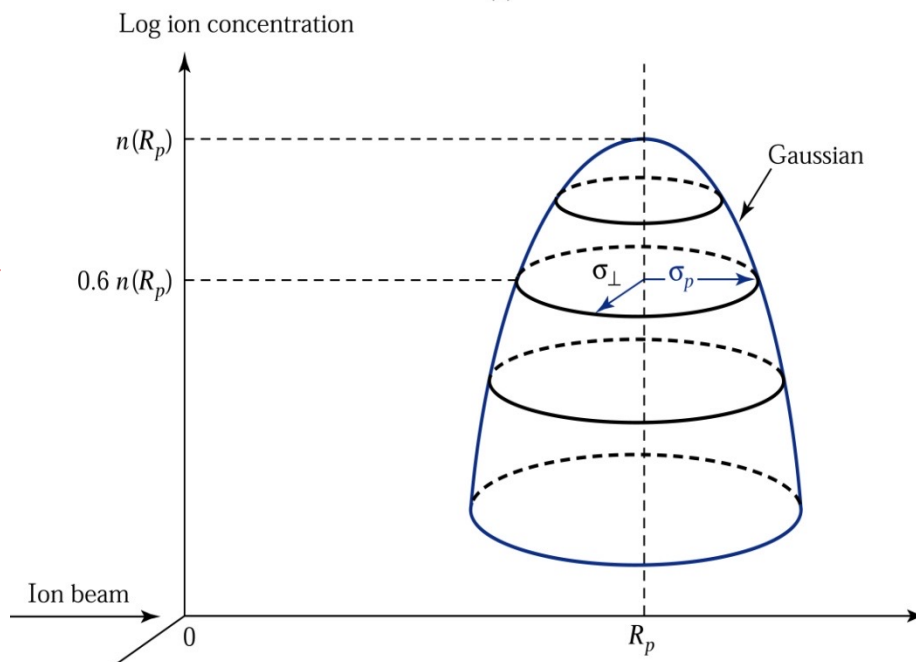
Less crystalline  
damage  
 $S_e > S_n$

## 第六章 离子注入

### 注入离子的二维分布图



(a)



(b)

沿着入射轴所注入的杂质分布可以用一个高斯分布函数来近似:

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

$S$ 为单位面积的离子注入剂量, 此式等同于恒定掺杂总量扩散是的式。沿 $x$ 轴移动了一个 $R_p$ 。

对扩散而言, 最大浓度位于 $x=0$ ; 而对离子注入来说, 最大浓度位于投影射程 $R_p$ 处. 在 $(x-R_p)=\pm\sigma_p$ 处, 离子浓度比其峰值降低了40%; 在 $\pm 2\sigma_p$ 处则降为10%; 在 $\pm 3\sigma_p$ 处降为1%; 在 $\pm 4.8\sigma_p$ 处降为0.001%.

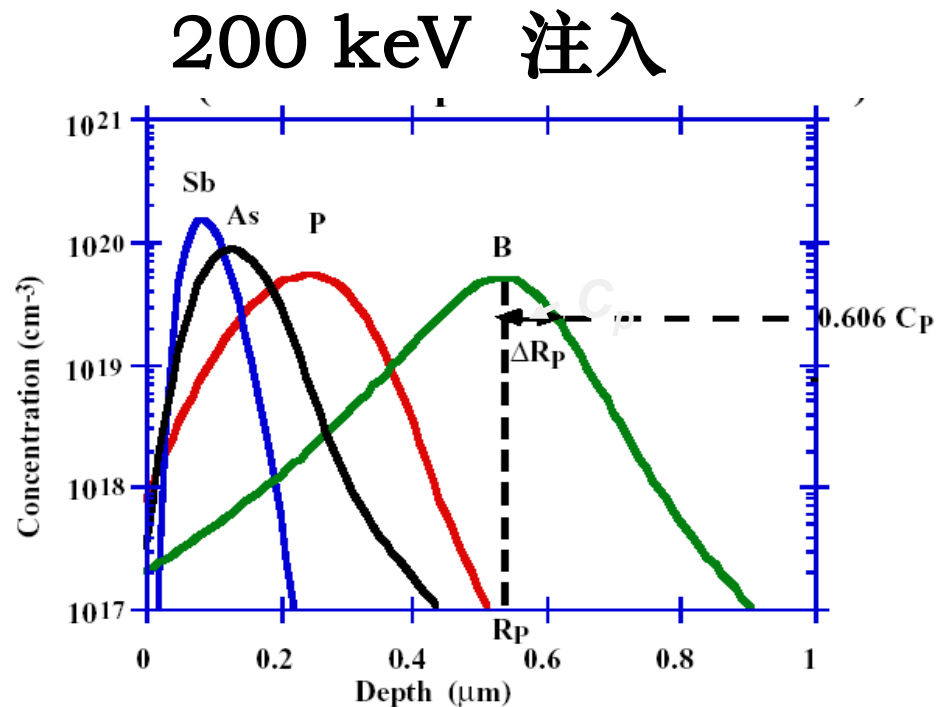
# 第六章 离子注入

## 注入离子的浓度分布

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

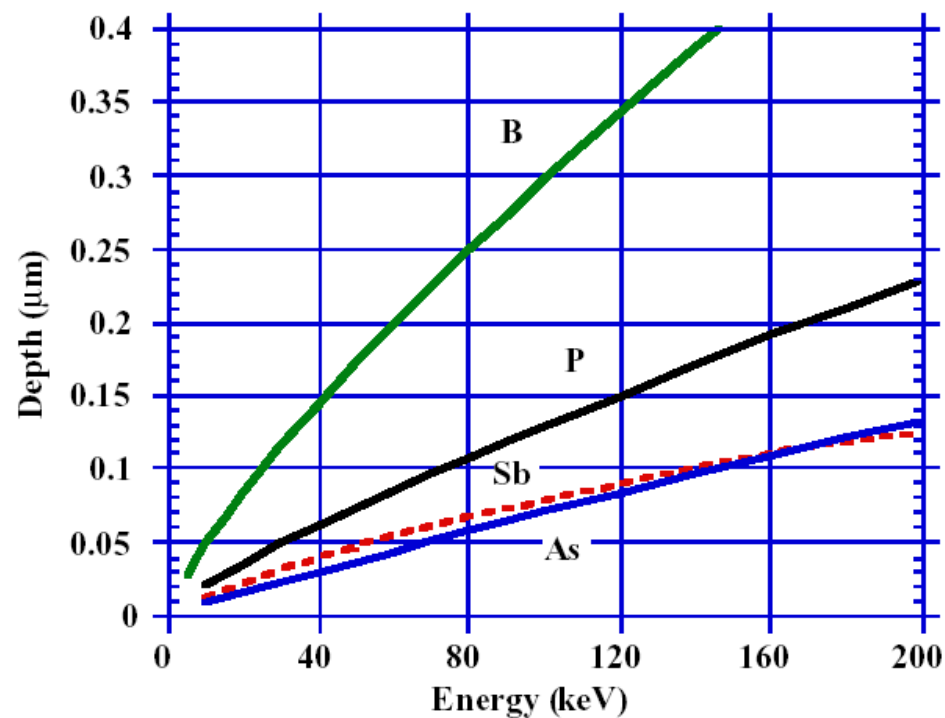
$$C(x) = C_p \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x - R_p}{\Delta R_p} \right)^2 \right]$$

元素	原子质量
Sb	122
As	74
P	31
B	11

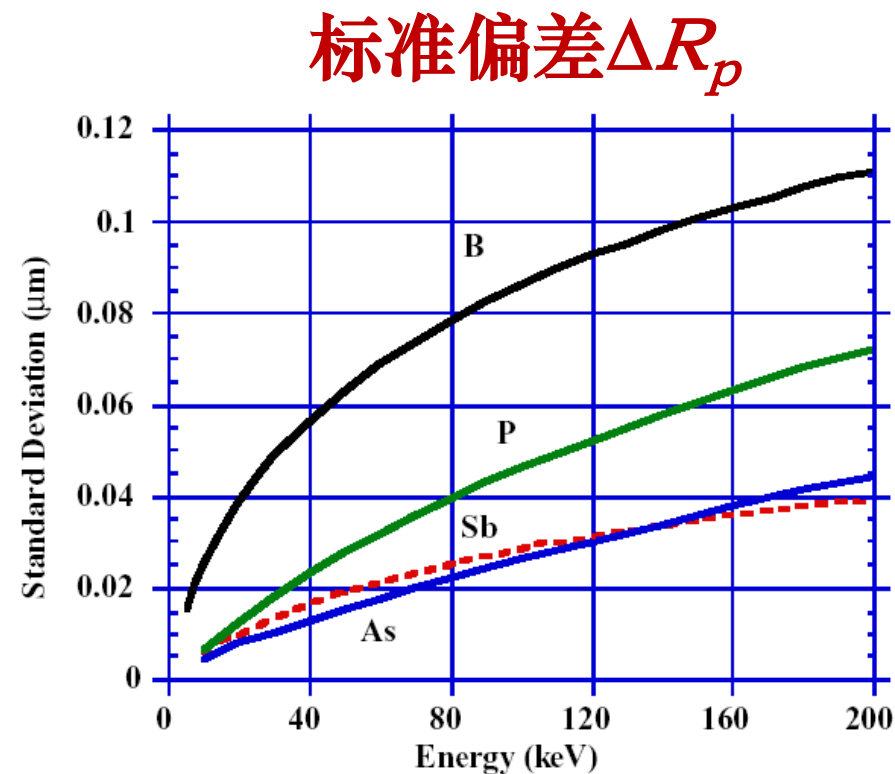


## 第六章 离子注入

### 常用注入离子在不同注入能量下的特性

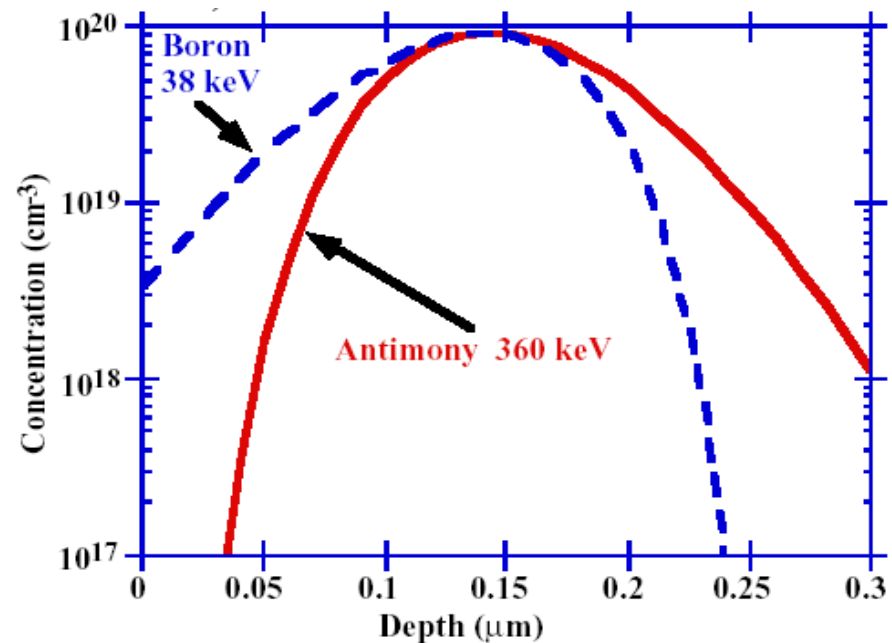
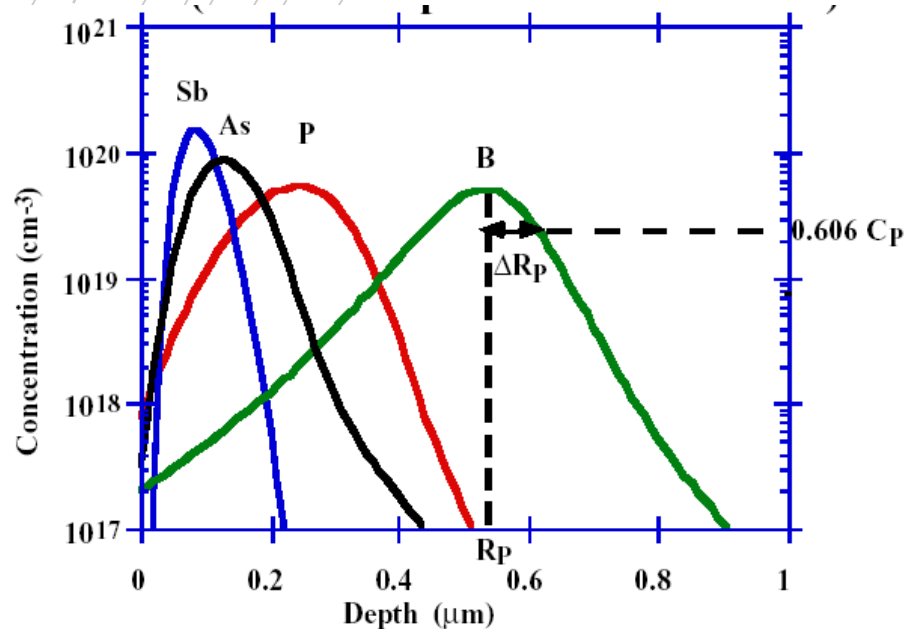


平均投影射程  $R_p$



# 第六章 离子注入

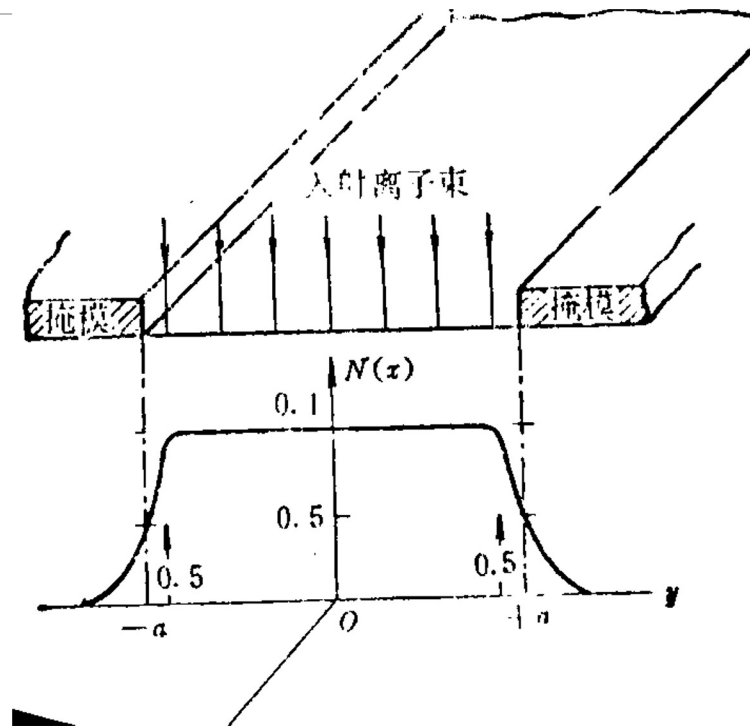
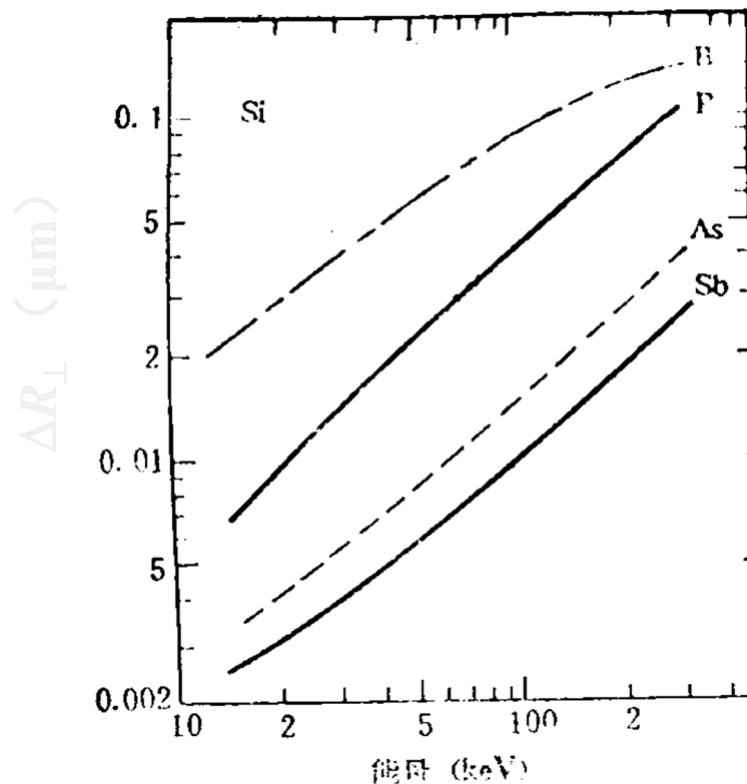
## 注入离子的真实分布



- ❖ 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。

## 第六章 离子注入

**横向效应：**指的是注入离子在垂直于入射方向平面内的分布情况



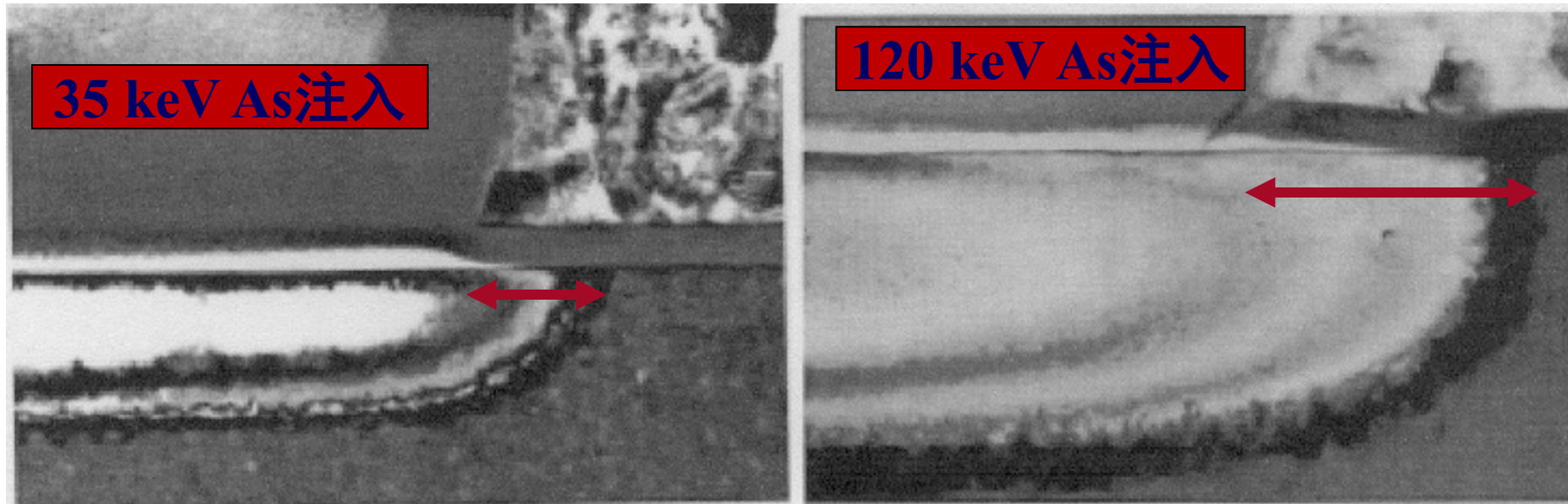
$$C(x, y) = \frac{C(x)}{\sqrt{2\pi}\Delta R_{\perp}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\Delta R_{\perp}}\right)^2\right]$$

横向效应影响MOS晶体管的有效沟道长度。



## 第六章 离子注入

---



# 第六章 离子注入

## 离子注入退火后的杂质分布

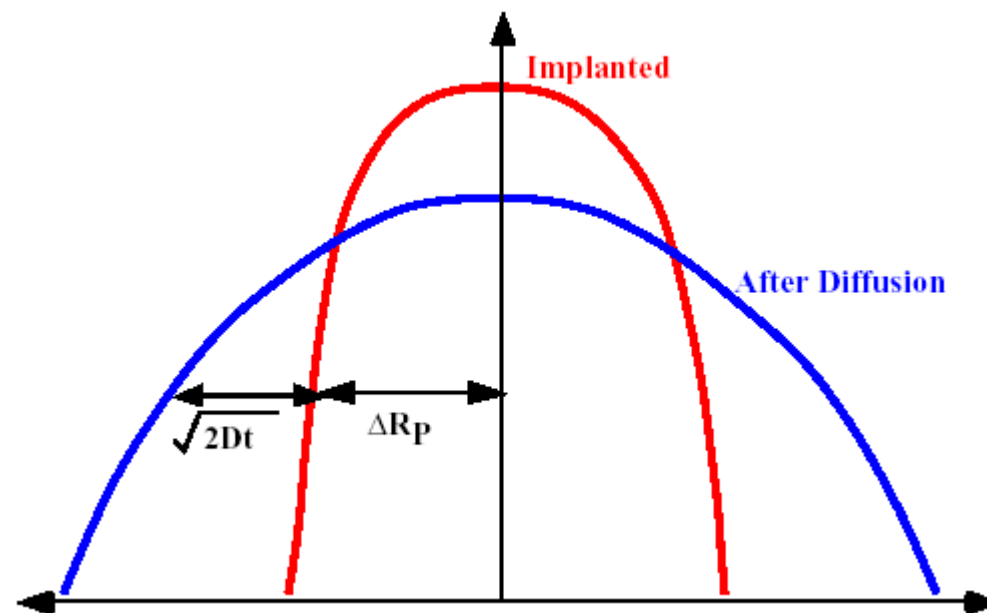
$$C(x,t) = \frac{Q}{2\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)$$

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

$$\frac{(\Delta R_p)^2}{2} = D_0 t_0$$

$$Dt \Leftrightarrow D_0 t_0 + Dt$$

$$C(x,t) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi(\Delta R_p^2 + 2Dt)}} \exp\left[-\frac{(x - R_p)^2}{2(\Delta R_p^2 + 2Dt)}\right]$$

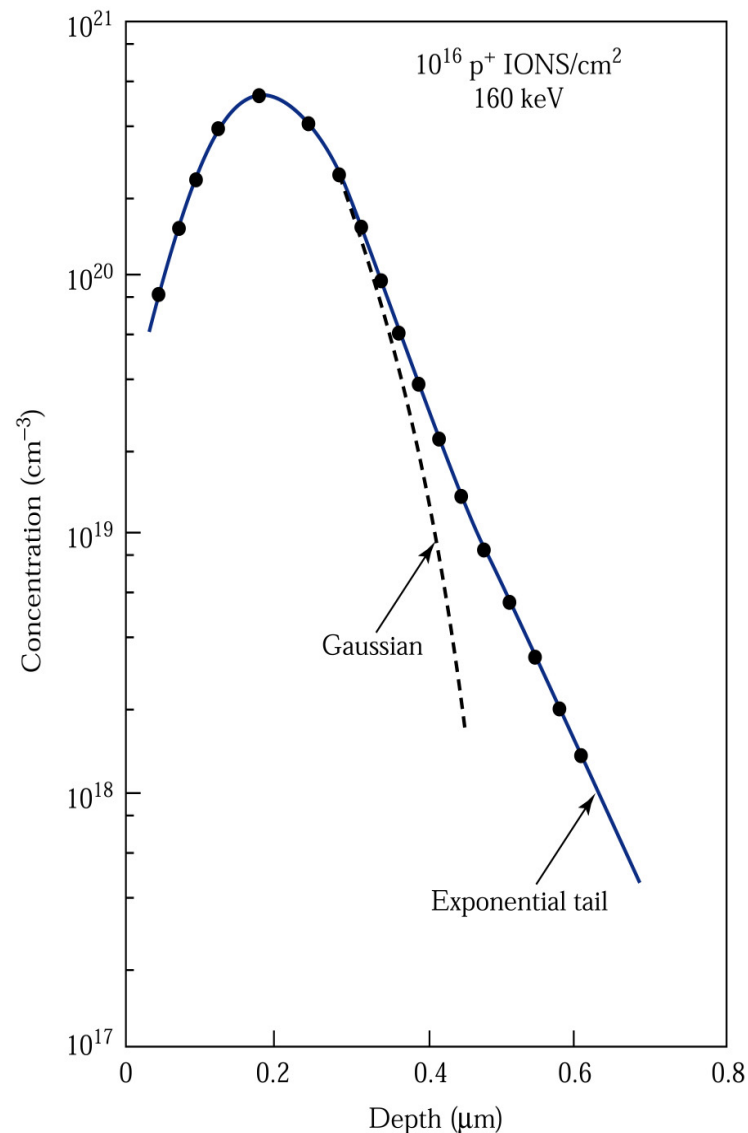


一个高斯分布在退火后仍然是高斯分布，其标准偏差和峰值浓度发生改变。

## 第六章 离子注入

### 离子注入的沟道效应

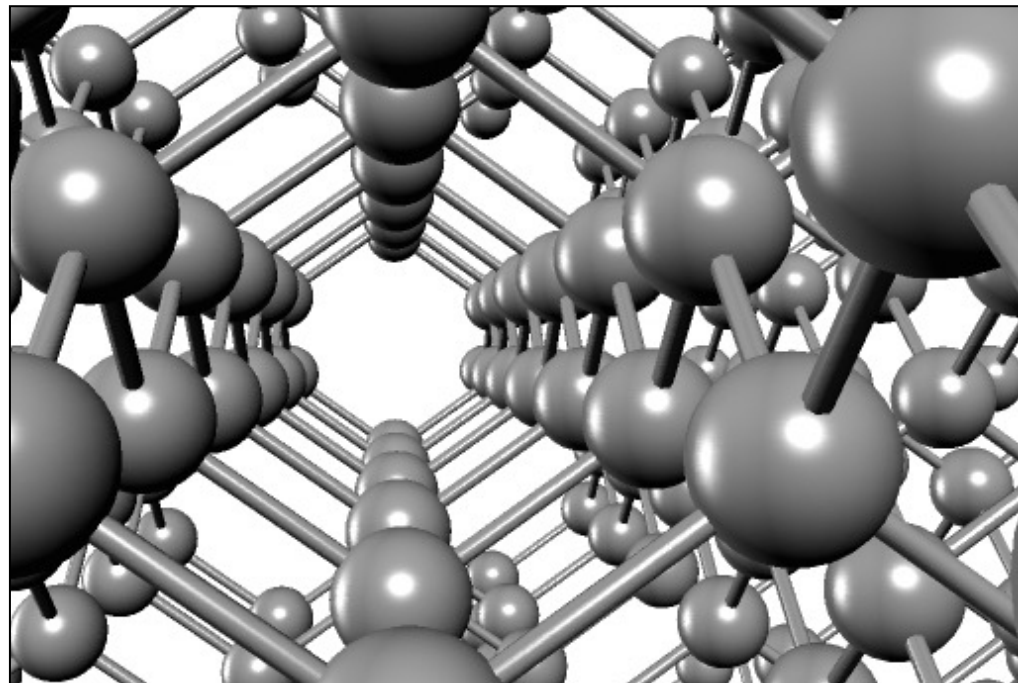
前述高斯分布的投影射程及投影射程的标准偏差能很好地说明非晶硅或小晶粒多晶硅衬底的注入离子分布。只要离子束方向偏离低指数(low-index)晶向(如 $\langle 111 \rangle$ )，硅和砷化镓中的分布状态就如在非晶半导体中一样。在此情况下，靠近峰值处的实际杂质分布，即使延伸到低于峰值一至两个数量级处也一样，如右图所示。然而即使只偏离 $\langle 111 \rangle$ 晶向 $7^\circ$ ，仍会有一个随距离而成指数级 $\exp(-x/\lambda)$ 变化的尾区，其中 $\lambda$ 典型的数量级为 $0.1\mu\text{m}$ 。



## 第六章 离子注入

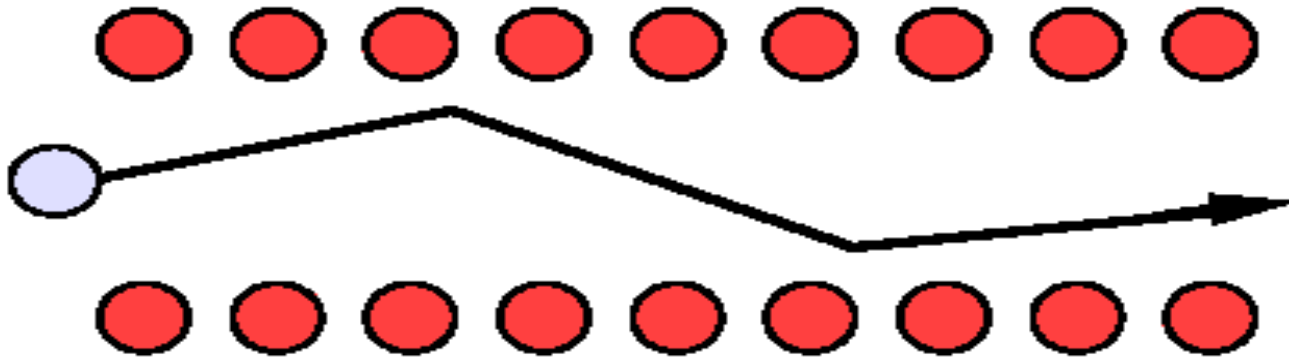
指数型尾区与离子注入沟道效应有关，当入射离子对准一个主要的晶向并被导向在各排列晶体原子之间时，沟道效应就会发生。

图为沿 $\langle 110 \rangle$ 方向观测金刚石晶格的示意图。离子沿 $\langle 110 \rangle$ 方向入射，因为它与靶原子较远，使它在和核碰撞时不会损伤大量能量。对沟道离子来说，唯一的能量损伤机制是电子阻止，因此沟道离子的射程可以比在非晶硅靶中大得多。



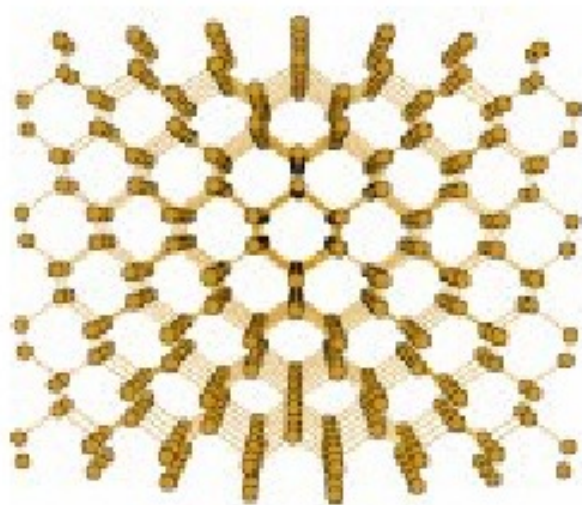
## 第六章 离子注入

•**沟道效应 (Channeling effect)**：当离子沿晶轴方向注入时，大部分离子将沿沟道运动，几乎不会受到原子核的散射，方向基本不变，可以走得很远。





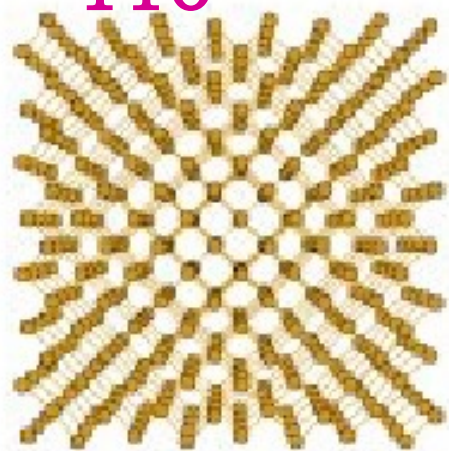
## 第六章 离子注入



110



111



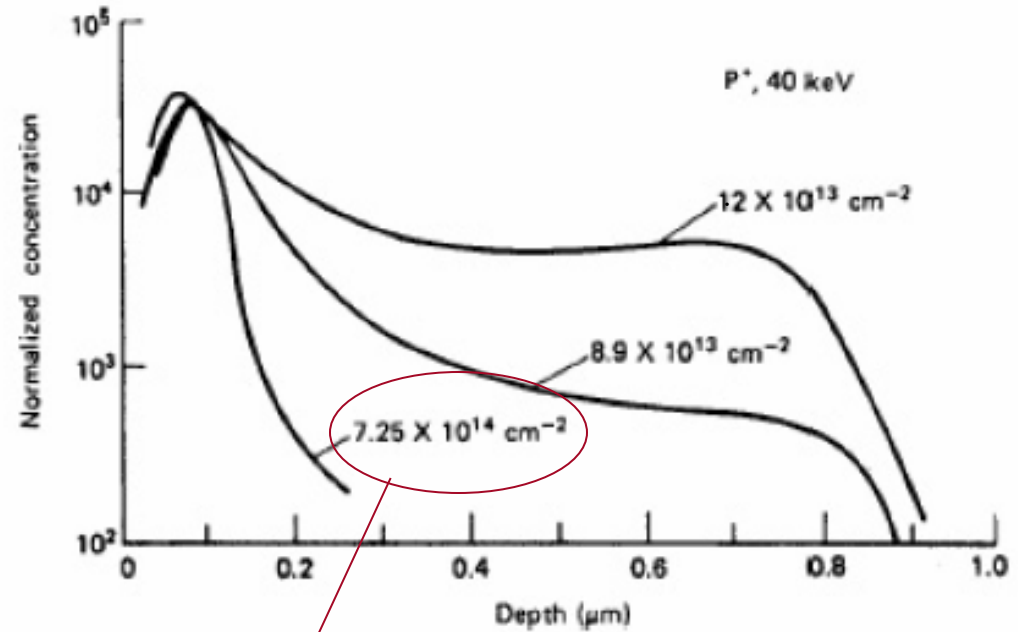
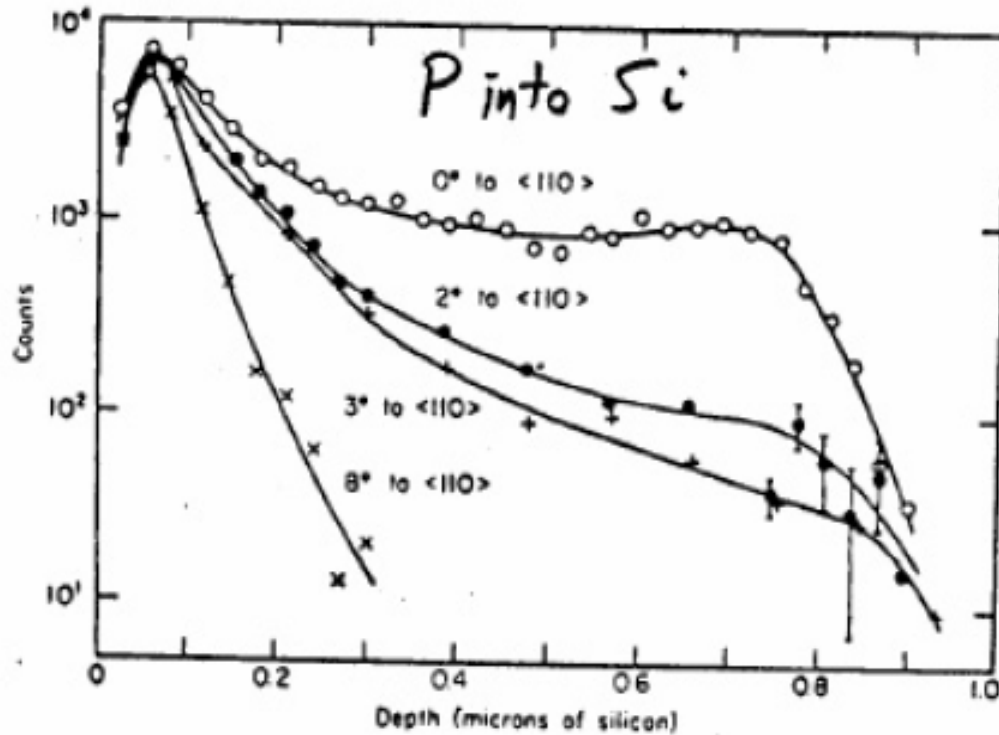
100



倾斜旋转硅片后的无序方向

## 第六章 离子注入

### 沿<110>的沟道效应



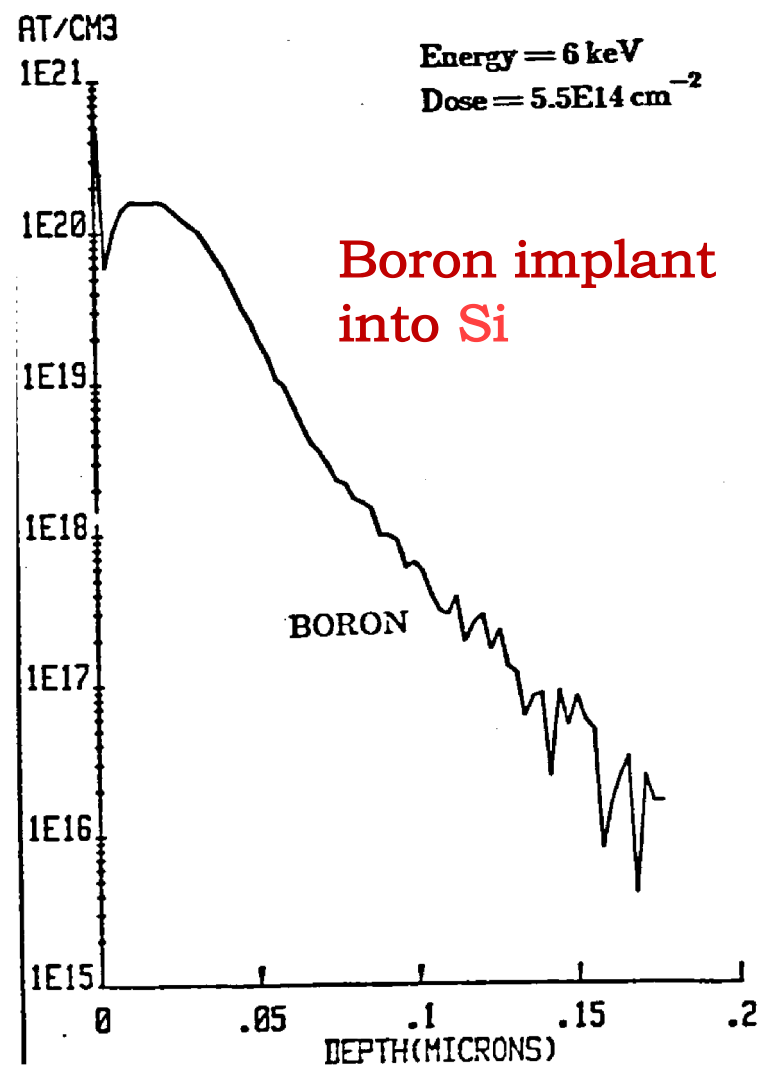
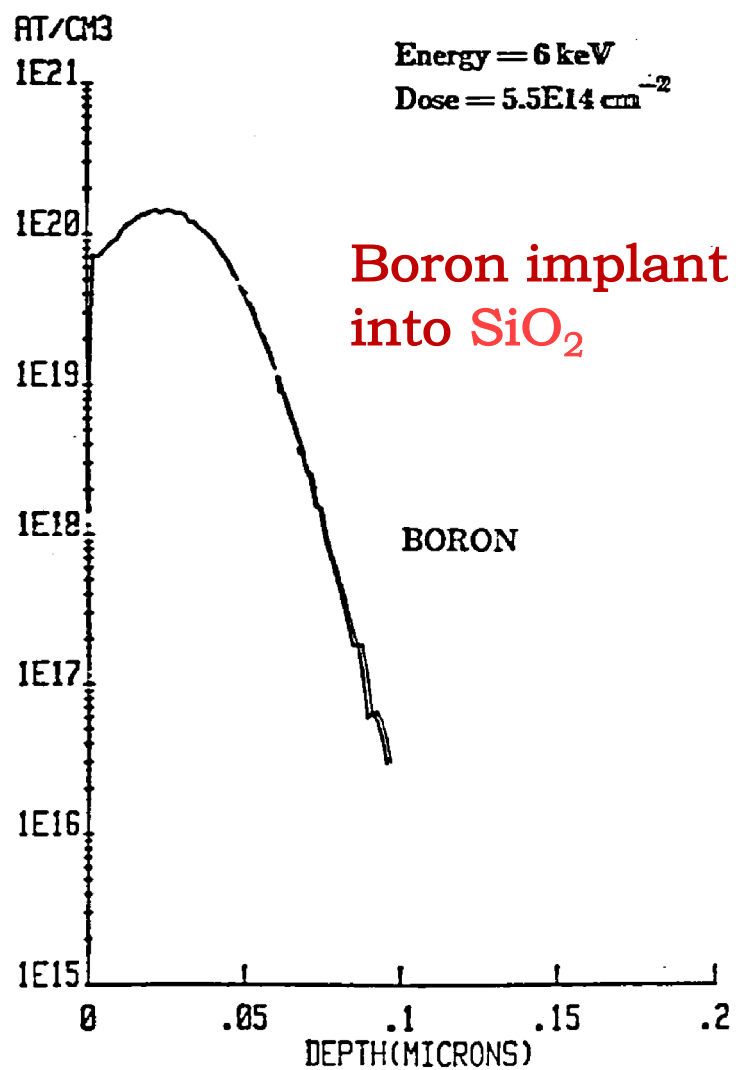
产生非晶化的剂量

•**浓度分布：** 由于沟道效应的存在，在晶体中注入将偏离LSS理论在非晶体中的高斯分布，浓度分布中出现一个相当长的“尾巴”



# 第六章 离子注入

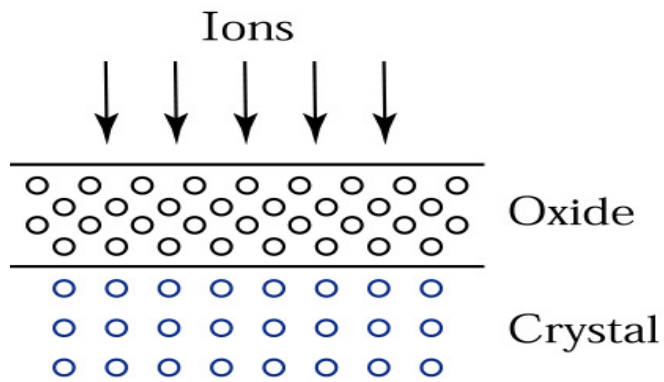
## 表面非晶层对于沟道效应的作用



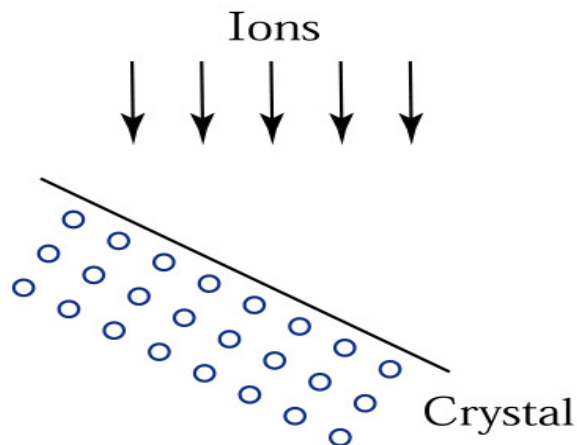
## 第六章 离子注入

**减少沟道效应的措施：** (a) 覆盖一层非晶体的表面层； (b) 将硅片旋转一定角度；  
(c) 在硅晶片表面制造一个损伤的表层。

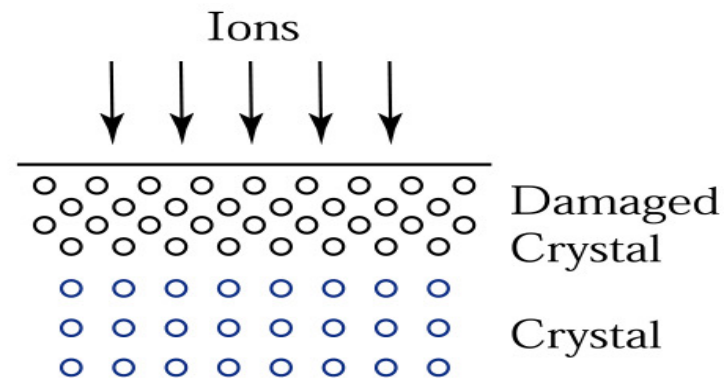
常用的覆盖非晶体材料只是一层薄的氧化层[图(a)]，此层可使离子束的方向随机化，使离子以不同角度进入硅晶片而不直接进入晶体沟道。将硅晶片偏离主平面 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ ，也能有防止离子进入沟道的效果[图(b)]。利用这种方法，大部分的注入机器将硅晶片倾斜 $7^{\circ}$ 以防止沟道效应。先注入大量硅或锗原子以破坏硅晶片表面，可在硅晶片表面产生一个损伤层[图(c)]。然而，这种方法需要使用昂贵的离子注入机。



(a)



(b)

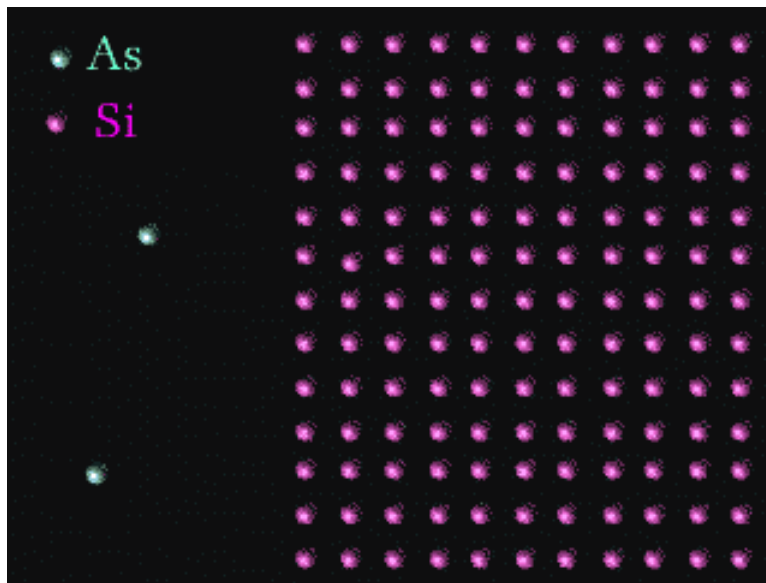


(c)

## 第六章 离子注入

### 什么是注入损伤

**晶格损伤：**高能离子注入硅片后与靶原子发生一系列碰撞，可能使靶原子发生位移，被位移原子还可能把能量依次传给其它原子，结果产生一系列的空位—间隙原子对及其它类型晶格无序的分布。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。



## 第六章 离子注入

---

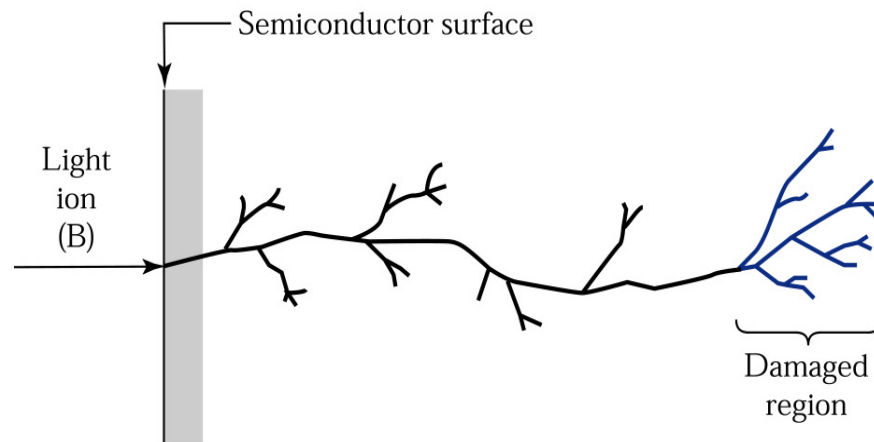
### 损伤的产生

- **移位原子**：因碰撞而离开晶格位置的原子。
- **移位阈能  $E_d$** ：使一个处于平衡位置的原子发生移位，所需的最小能量. (对于硅原子,  $E_d \approx 15\text{eV}$ )
- 注入离子通过碰撞把能量传给靶原子核及其电子的过程，称为**能量传递过程**

# 第六章 离子注入

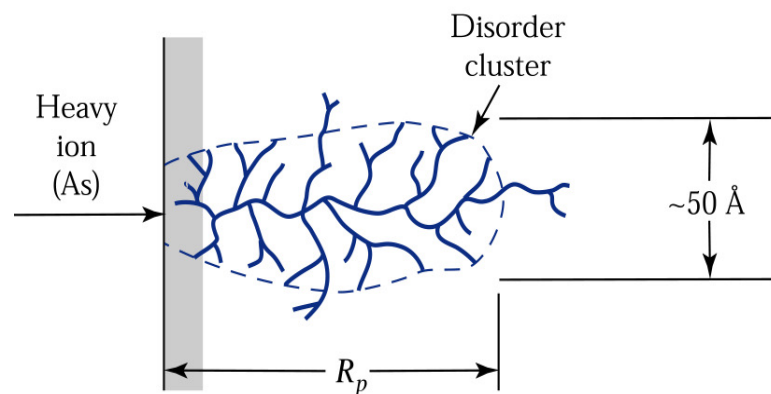
## 损伤区的分布

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，因此，注入离子运动方向的变化大，产生的损伤密度小，不重叠，但区域较大。呈锯齿状。



(a)

•重离子每次碰撞传输给靶的能量较大，散射角小，获得大能量的位移原子还可使许多原子移位。注入离子的能量损失以核碰撞为主。同时，射程较短，在小体积内有较大损伤。重离子注入所造成的损伤区域小，损伤密度大。



(b)

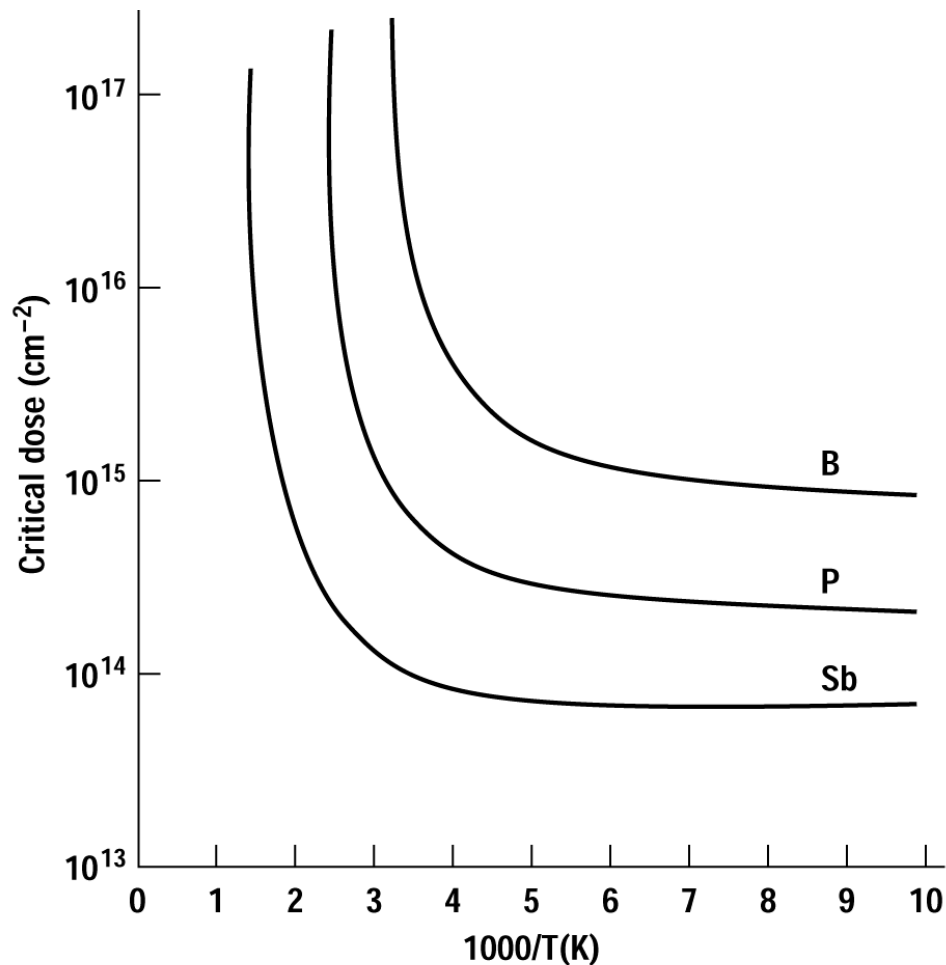
# 第六章 离子注入

## 非晶化 (Amorphization)

□ 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：使晶格完全无序的剂量。
- 临界剂量和注入离子的质量有关



# 第六章 离子注入

## 损伤退火 (Damage Annealing)

- 被注入离子往往处于半导体晶格的间隙位置，对载流子的输运没有贡献；而且也造成大量损伤。
- 注入后的半导体材料：
  - 杂质处于间隙  $n \ll N_D$ ;  $p \ll N_A$
  - 晶格损伤，迁移率下降；少子寿命下降
  - 热退火后：  $n \uparrow \rightarrow n = N_D$  ( $p = N_A$ )
  - $\mu \uparrow \rightarrow \mu_{bulk}$
  - $\tau \uparrow \rightarrow \tau_0$

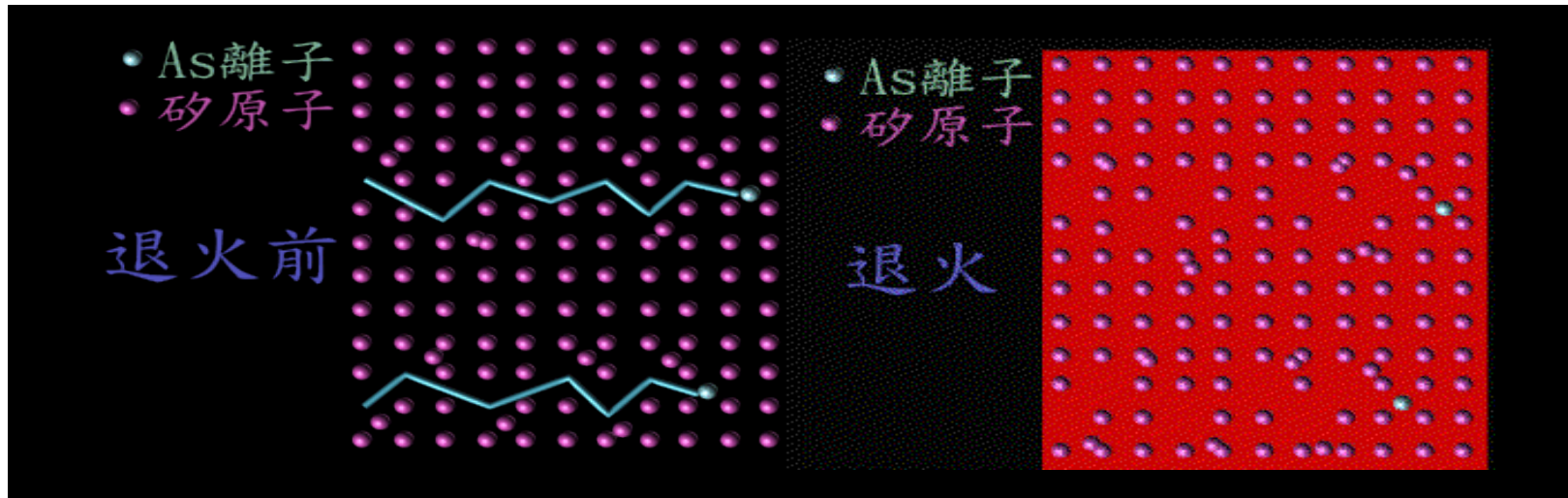


# 第六章 离子注入

## 损伤退火的目的

- ❑ 去除由注入造成的损伤，让硅晶格恢复其原有完美晶体结构
- ❑ 让杂质进入电活性（electrically active）位置—替位位置。
- ❑ 恢复电子和空穴迁移率

注意：退火过程中应避免大幅度的杂质再分布



## 第六章 离子注入

---

### a) 退火

一定温度下，通常在Ar、N<sub>2</sub>或真空条件下  
退火温度取决于注入剂量及非晶层的消除。

**修复晶格：**退火温度600 °C以上，时间最长可达数小时

**杂质激活：**退火温度650—900 °C ，时间10—30分钟

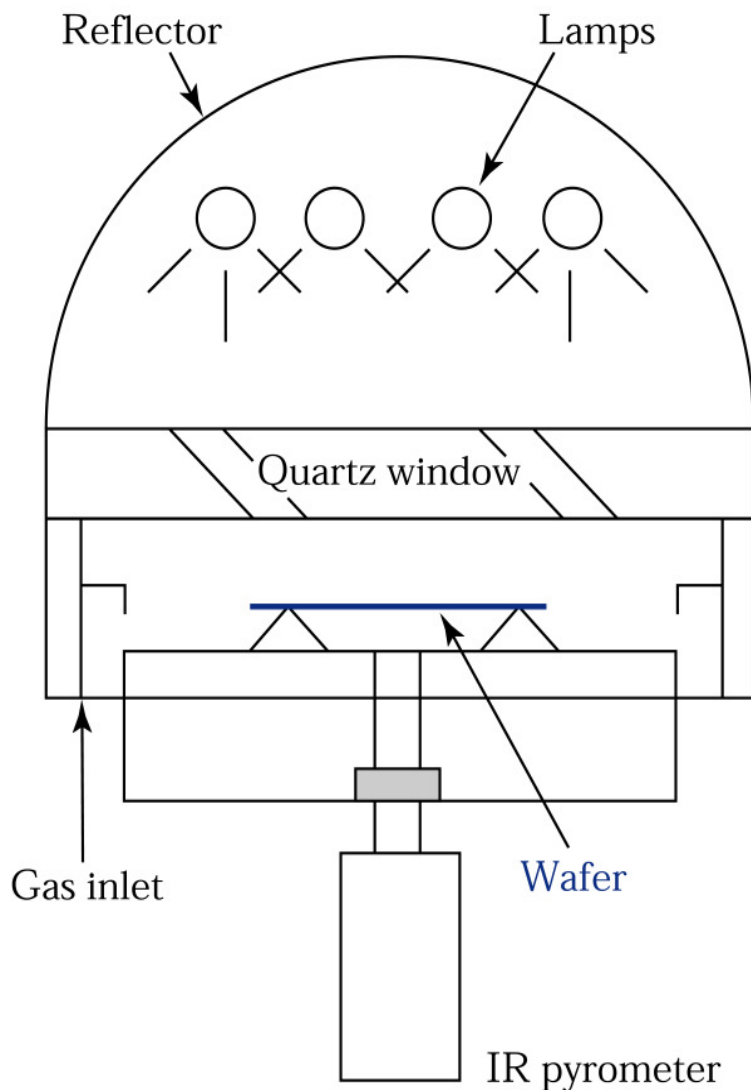
- \* 方法简单
- \* 不能全部消除缺陷
- \* 对高剂量注入激活率不够高
- \* 杂质再分布

## 第六章 离子注入

### b) 快速热退火, RTP

- 。 高功率激光束辐照退火
- 。 电子束退火
- 。 高强度的光照退火
- 。 其它辐射退火

RTP主要优点是掺杂的再分布大大降低, 对制备浅结器件特别有利

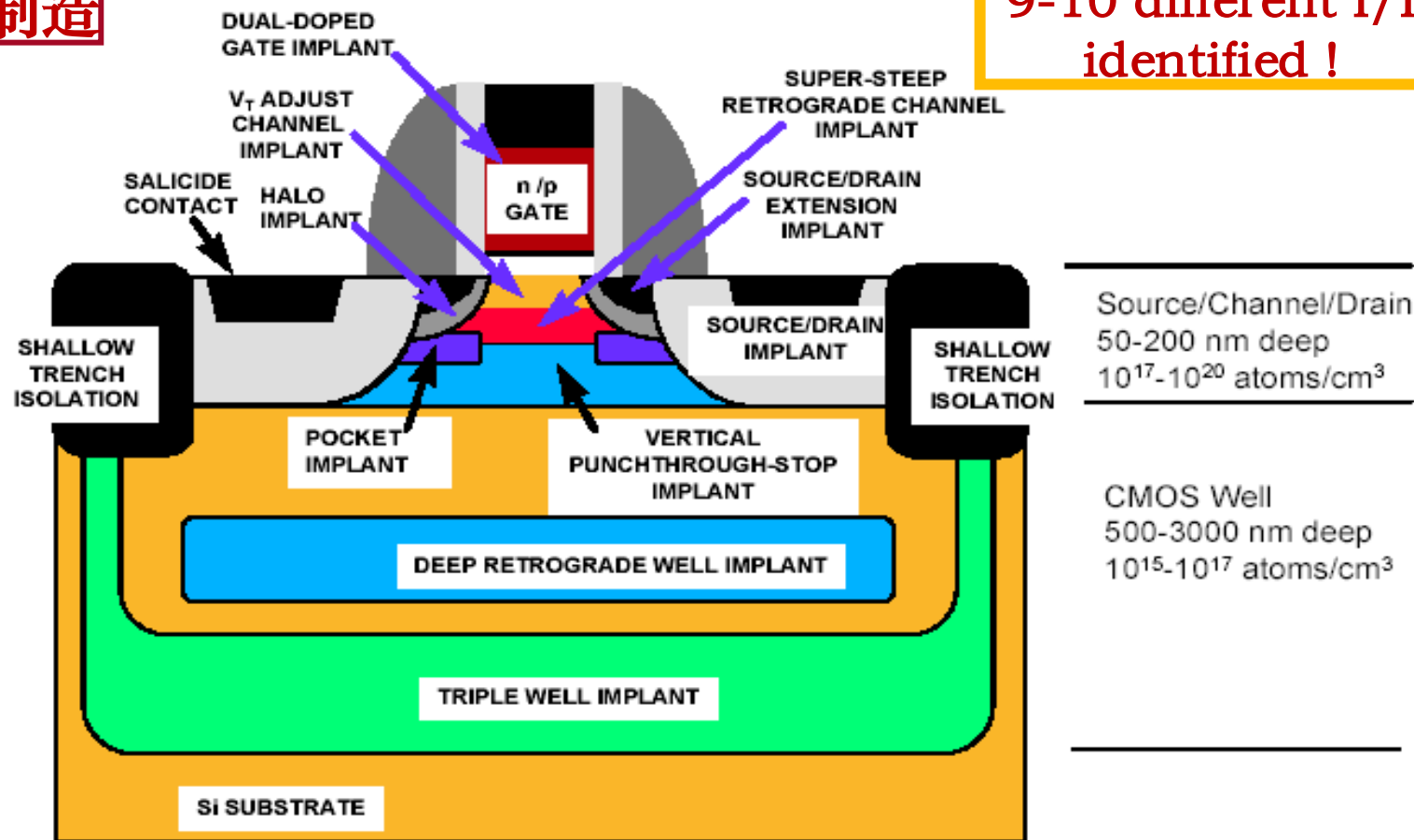


# 第六章 离子注入

## 离子注入在集成电路中的应用

CMOS制造

9-10 different I/I  
identified !



# 第六章 离子注入

---

## 双极型制造 (Bipolar fabrication)

- 。高能注入形成埋层
- 。LOCOS下方的p-n结隔离
- 。形成基区注入
- 。砷注入多晶硅发射区

# 第六章 离子注入

## 热扩散与离子注入的比较:

内 容	热扩散	离子注入
动力	高温、杂质的浓度梯度，平衡过程	动能，5-500KeV，非平衡过程
杂质浓度	受固溶度限制掺杂浓度过高、过低都无法实现	浓度不受限
结深	结深控制不精确，适合深结	结深控制精确，适合浅结
横向扩散	严重，约是其纵向扩散线度的0.75-0.87倍	较小，在快速退火时，几乎可忽略
均匀性	电阻率波动约5%以上	电阻率波动约1%
温度	高温工艺，约在950~1170℃	常温注入，热退火温度约在600~950℃
掩膜	二氧化硅	光刻胶、二氧化硅或金属薄膜
工艺卫生	易沾污	高真空、常温注入，清洁
晶格损伤	小	损伤大，退火也难以完全消除
设备、费用	设备简单、价廉	复杂、费用高
应用	深层掺杂，如大功率器件	浅结的超大规模电路

# 第六章 离子注入

离子注入的主要特点？  
LSS理论？阻止本领的含义？

精确控制掺杂，浅结、浅掺杂，  
纯度高，低温，多种掩模，...

对在非晶靶中注入离子的射程分布的研究

— 离子注入的杂质分布？退火后？

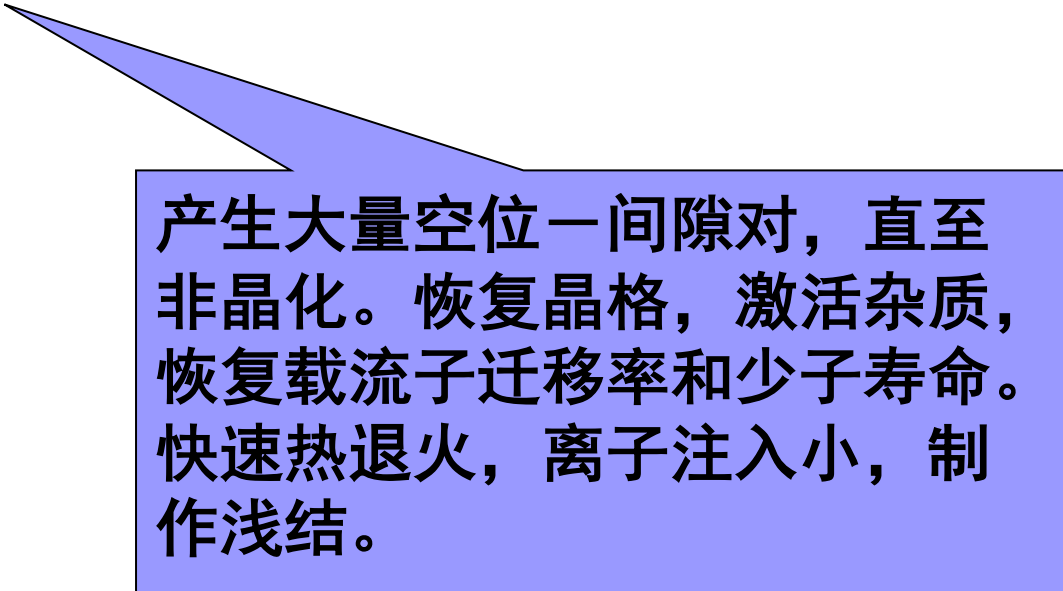
非晶靶。能量损失为两个彼此独立的过程(1) 核阻止与(2) 电子阻止之和。能量为  $E$  的入射粒子在密度为  $N$  的靶内走过  $x$  距离后损失的能量。



## 第六章 离子注入

---

什么是离子注入损伤？退火的目的？什么是RTP？



产生大量空位-间隙对，直至非晶化。恢复晶格，激活杂质，恢复载流子迁移率和少子寿命。快速热退火，离子注入小，制作浅结。

## 第六章 离子注入

(1) 注入离子在靶内的纵向浓度分布可近似取高斯函数形式

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

(2) 在平均投影射程  $x=R_p$  处有一最高浓度，最大浓度与注入剂量关系

$$C_p = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \Delta R_p} \approx \frac{0.4Q}{\Delta R_p}$$

(3) 平均投影射程两边，注入离子浓度对称地下降。离平均投影射程越远，浓度越低。

