

# Cap 9

## Implantação de Íons

Jacobus W. Swart  
CCS e FEEC - UNICAMP

# Sumário

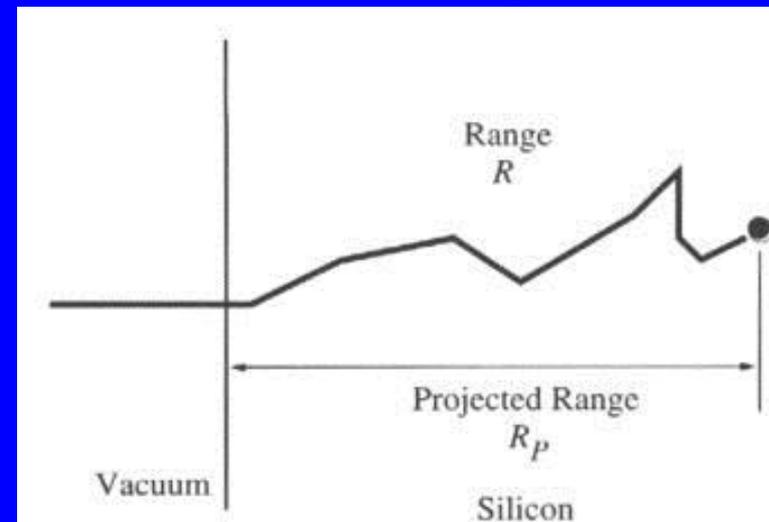
1. Introdução
2. Desenvolvimento Histórico e Conceitos Básicos
3. Equipamento e Métodos de Manufatura
4. Métodos de Medidas
5. Modelos e Simulações
6. Limites e Tendências Futuras Tecnológicas e em Modelos.

# 9.1 Introdução

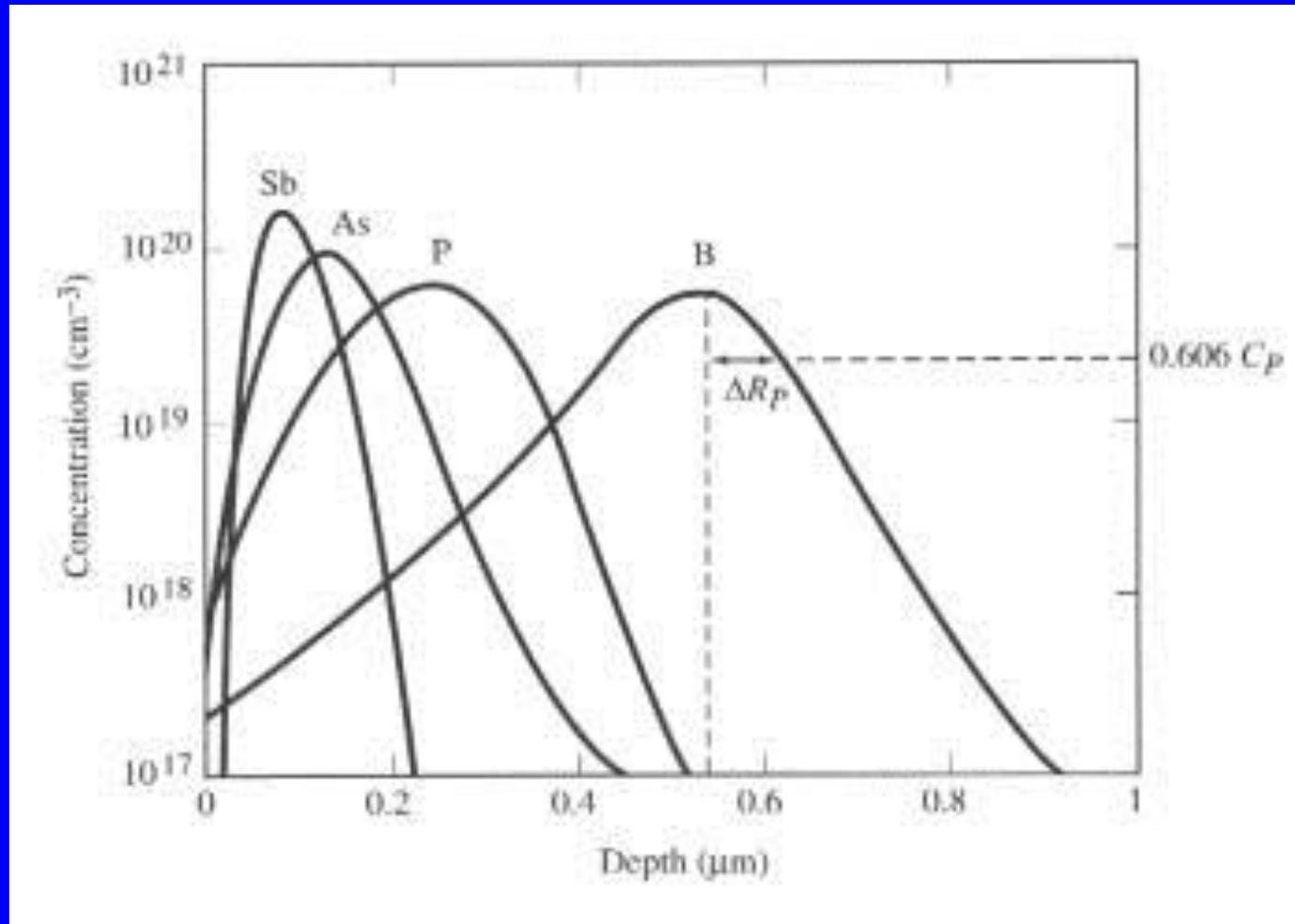
- Técnica dominante de dopagem nos últimos 20 anos.
- Continuará sendo no futuro previsível.
- Íons são acelerados a centenas a milhares de eV.
- São atirados contra o Si.
- Cria cascata de defeitos na sua trajetória no Si, deslocando milhares de átomos de Si / íon incidente.
- Porque este é o método preferido?
- Foi proposto e patenteado por W. Shockley em 1954.
- Foi aceito na indústria a partir de final dos anos 70.
- Estudaremos: controle preciso de posição e dose.
- Examinaremos recozimento de danos e ativação dos dopantes.

## 9.2 Desenvolvimento Histórico e Conceitos Básicos

- Permite contagem precisa do no. de íons – coleta em copo de Faraday.
- Dose de  $10^{12}$  a  $10^{16}$  átomos/cm<sup>2</sup> é rotineiro
- Doses menores e maiores são também possíveis.
- Veja processo CMOS – Capítulo 3.
- Embora preciso na dose, o processo é randômico: trajetória aleatória com seqüência de colisões – repouso em alguma posição.
- O no. de íons é muito grande  $\Rightarrow$  profundidade média de cada íon pode ser calculado.



- Qual a distribuição de íons implantados a dada energia?



- Íon pesado param antes, para mesma energia (200 keV).
- Distribuição com máx. em  $R_p$  e desvio padrão  $\Delta R_p$
- Se  $E \uparrow \Rightarrow R_p \uparrow$  e  $\Delta R_p \uparrow$

- Distribuição estatística de primeira ordem = Gaussiana simétrica.

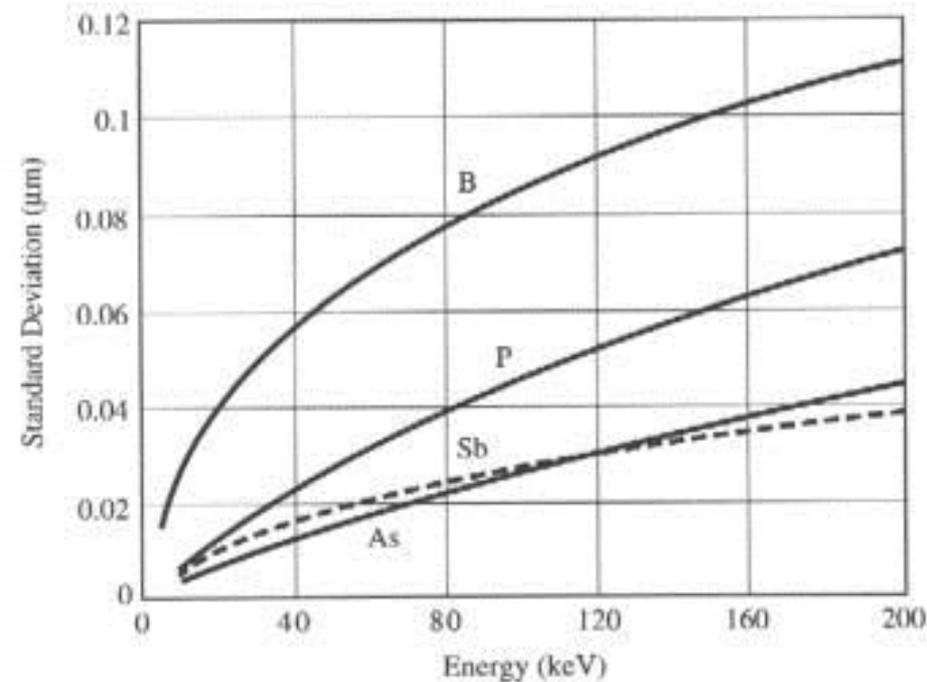
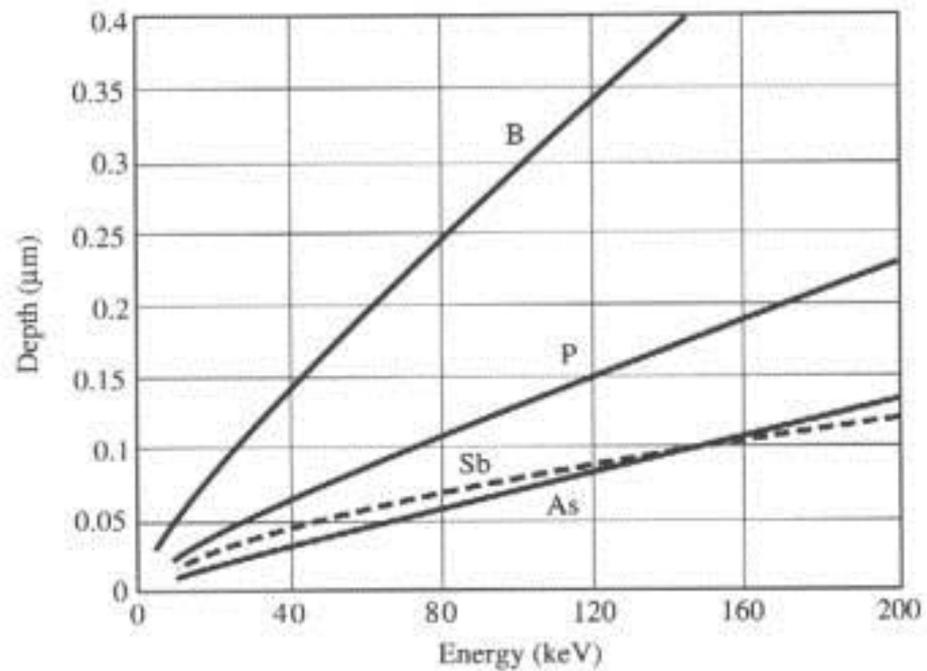
$$C(x) = C_P \exp\left(-\frac{(x - R_P)^2}{2\Delta R_P^2}\right)$$

- Dose = Q:

$$Q = \int_0^{\infty} C(x) dx$$

- Para perfil Gaussiano:

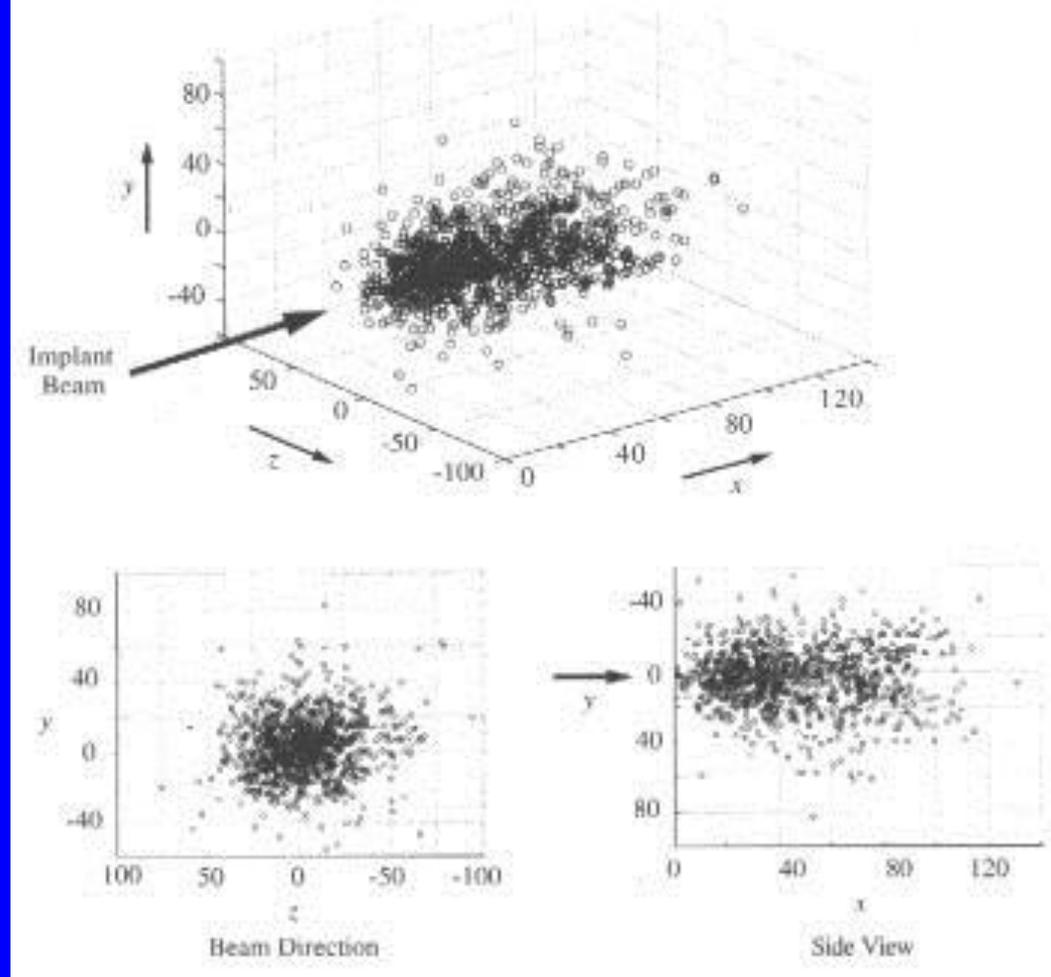
$$Q = \sqrt{2\pi} \Delta R_P C_P$$



Anterior: Implantação uniforme na superfície.

Caso implantação focado em 1 ponto:  $(x,y,z = 0,0,0)$  ?

Simulação Monte Carlo de 1000 íons implantados:



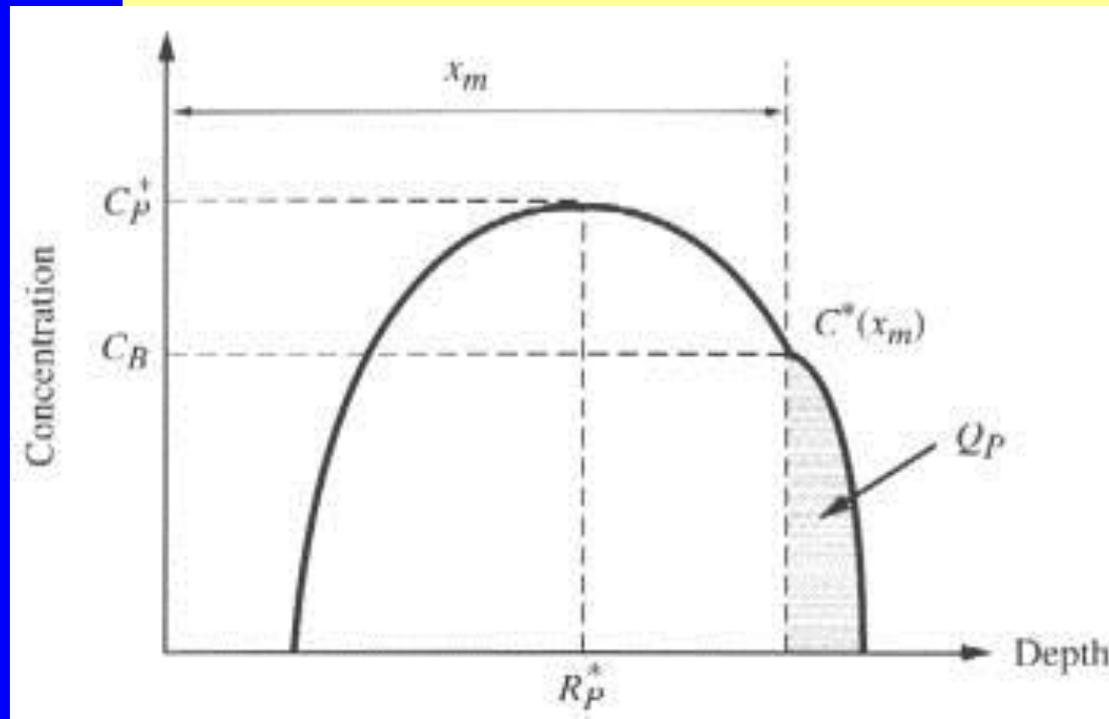
- Em profundidade: Gaussiana dada acima.
- Lateral: desvio padrão  $\Delta R_{\perp}$
- Na borda de uma janela, assume-se:

$$C(x, y) = C_{vert}(x) \exp\left(-\frac{y^2}{2\Delta R_{\perp}^2}\right)$$

# Material e espessura de Máscara:

- Processo a frio: maior liberdade de materiais – óxido, nitreto, metal, fotorresiste, etc.
- Espessura: tal que perfil fique limitado na máscara.
- Devemos ter:

$$C^*(x_m) = C_P^* \left( \exp \left( - \frac{(x_m - R_P^*)^2}{2\Delta R_P^{*2}} \right) \right) \leq C_B$$



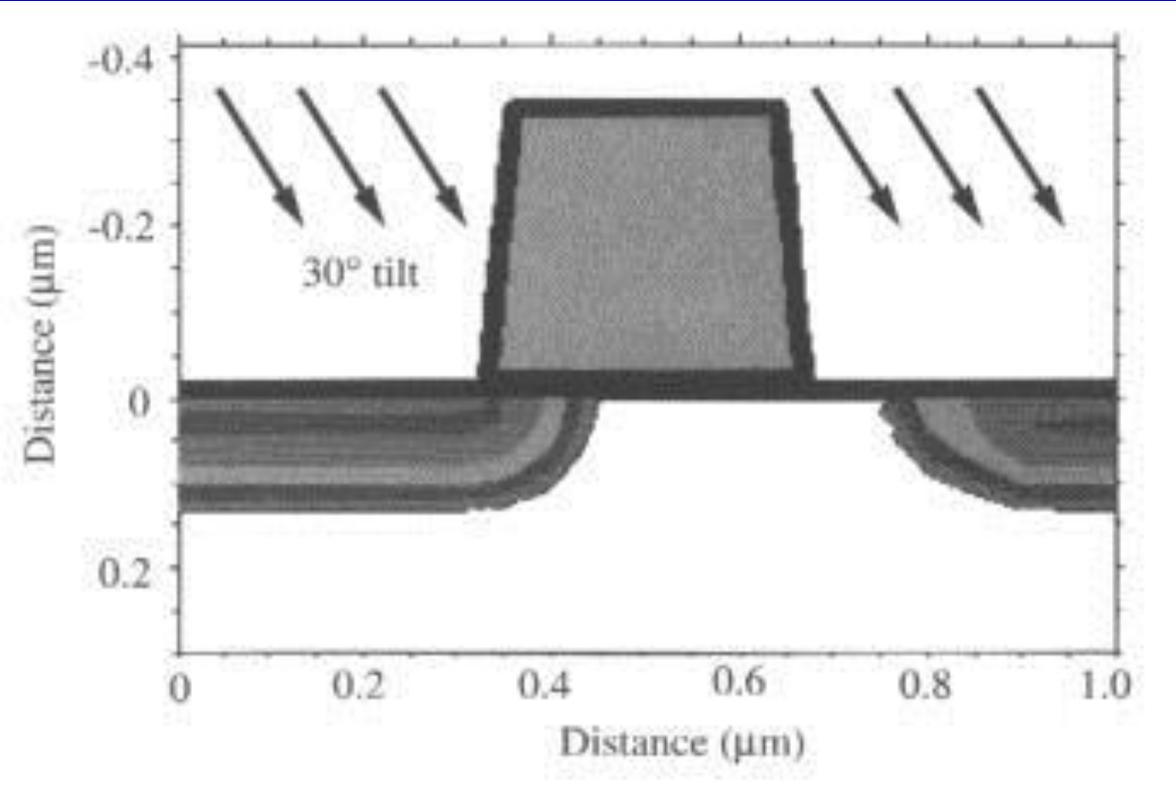
Do gráfico anterior temos:

$$x_m = R_P^* + \Delta R_P^* \sqrt{2 \ln \frac{C_P^*}{C_B}} = R_P^* + m \Delta R_P^*$$

$$Q_P = \frac{Q}{\sqrt{2\pi\Delta R_P^*}} \int_{x_m}^{\infty} \exp - \left[ \frac{x - R_P^*}{\sqrt{2\Delta R_P^*}} \right]^2 dx$$

$$\Rightarrow Q_P = \frac{Q}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{x_m - R_P^*}{\sqrt{2\Delta R_P^*}} \right)$$

- Caso a borda da máscara tenha inclinação ou se a implantação for feita com ângulo, o perfil na borda da janela será mais complexa. Veja exemplo na figura:



Solução: simulação  
numérica  
– ex. TSUPREM  
(50 keV  $^{31}\text{P}^+$ )

- Implantação em ângulo permite por ex. obter estrutura “halo” – região p mais dopado na borda do S/D – reduzir efeito de canal curto.
- Com rotação da lâmina – estrutura simétrica.

## Evolução do perfil com recozimento:

- Podemos comparar o perfil implantado com perfil de difusão após pré-deposição de função delta: ambas são Gaussianas:

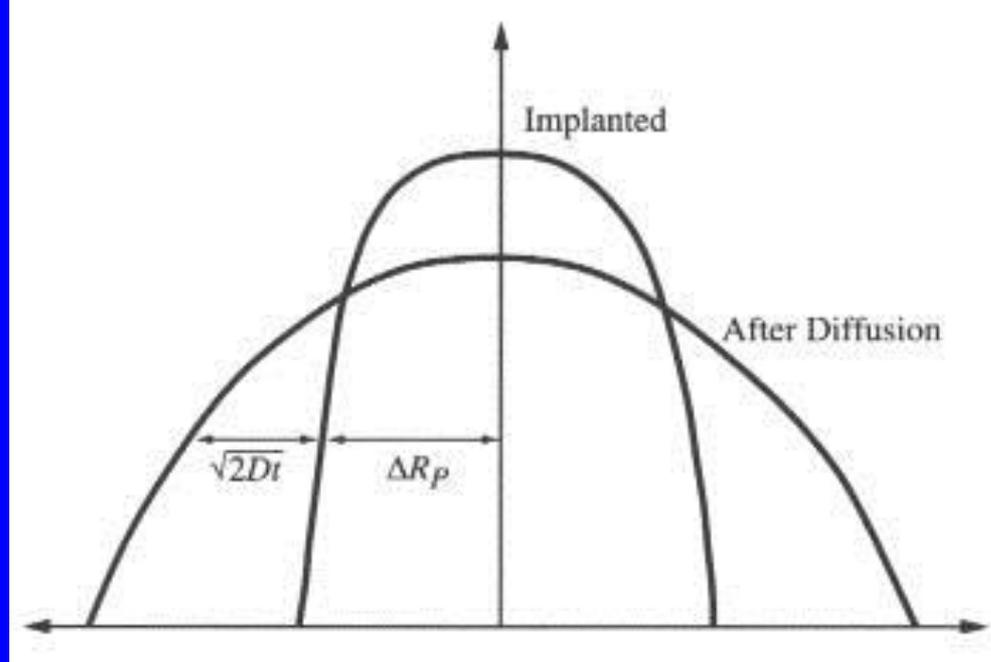
$$C(x) = C_P \exp\left(-\frac{(x - R_P)^2}{2\Delta R_P^2}\right)$$

$$C(x) = C(0) \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)$$

- Como difusões sucessivas:  $(Dt)_{\text{eq}} = \sum(Dt)$ , podemos considerar a Gaussiana da implantação com um  $Dt_1$ , ou:

$$\Delta R_P = \sqrt{2Dt_1}$$

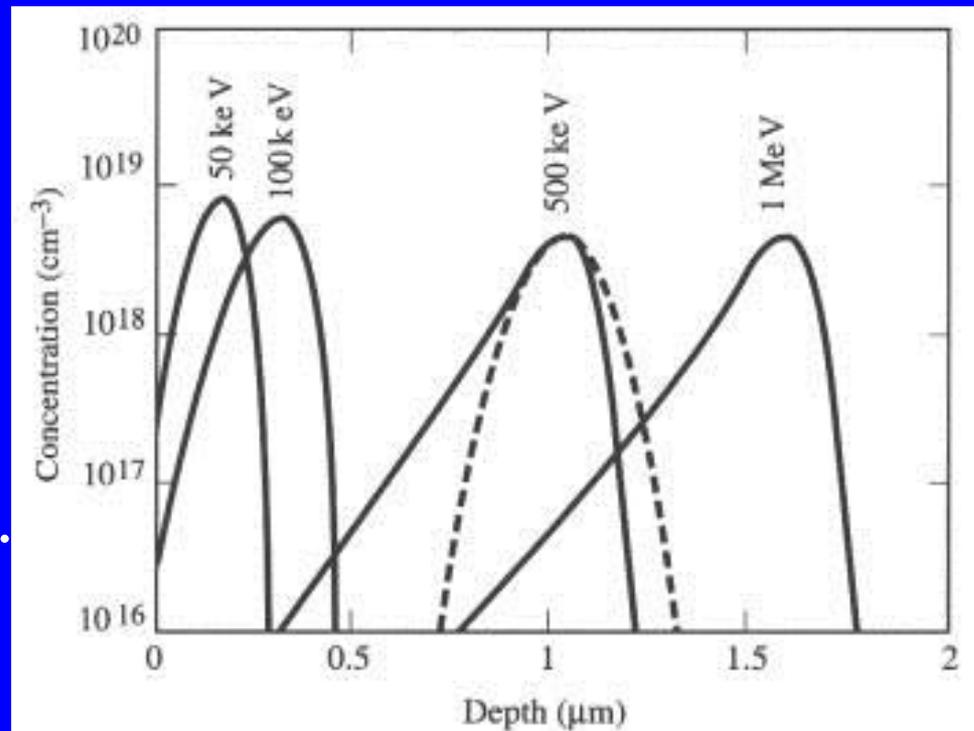
$$\Rightarrow C(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi(\Delta R_P^2 + Dt)}} \exp\left(-\frac{(x - R_P)^2}{2(\Delta R_P^2 + 2Dt)}\right)$$



## Desvios do perfil implantado da Gaussiana

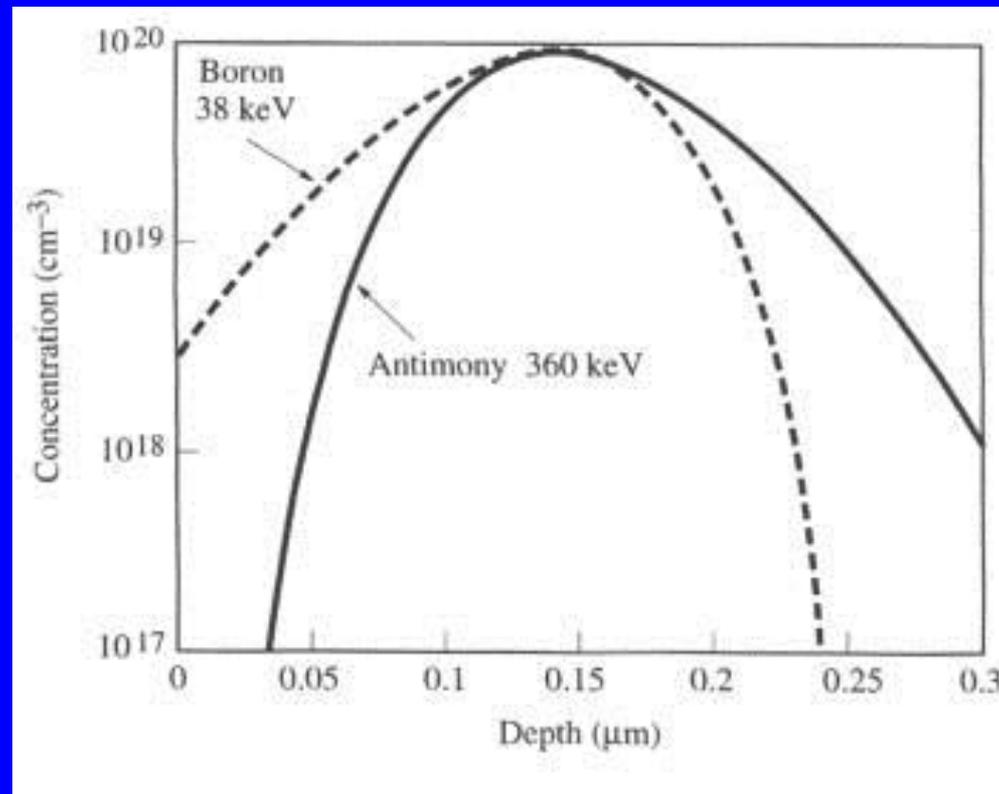
Ex.: B em a-Si.

- Gaussiana p/  $E \downarrow$  e pico.
- Desvio p/ superfície.



## Origem do desvio p/ superfície:

- Íons leves → “backscattering” ↑
- Íons pesados (contrário) → “backscattering” ↓



- Necessitamos de distribuições com momentos de maior ordem que apenas  $R_p$  e  $\Delta R_p$ .

# Distribuição e seus momentos:

- 1º Momento:  
alcance projetado
- 2º Momento:  
desvio padrão
- 3º Momento:  
“skewness”
- 4º Momento:  
“kurtosis”.

$$R_P = \frac{1}{Q} \int_{-\infty}^{\infty} xC(x)dx$$

$$\Delta R_P = \sqrt{\frac{1}{Q} \int_{-\infty}^{\infty} (x - R_P)^2 C(x)dx}$$

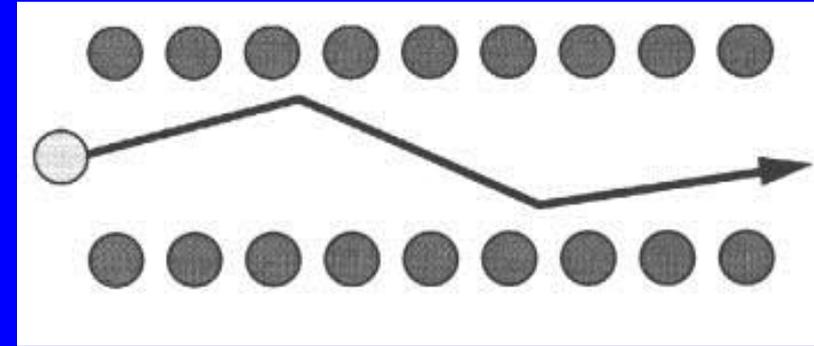
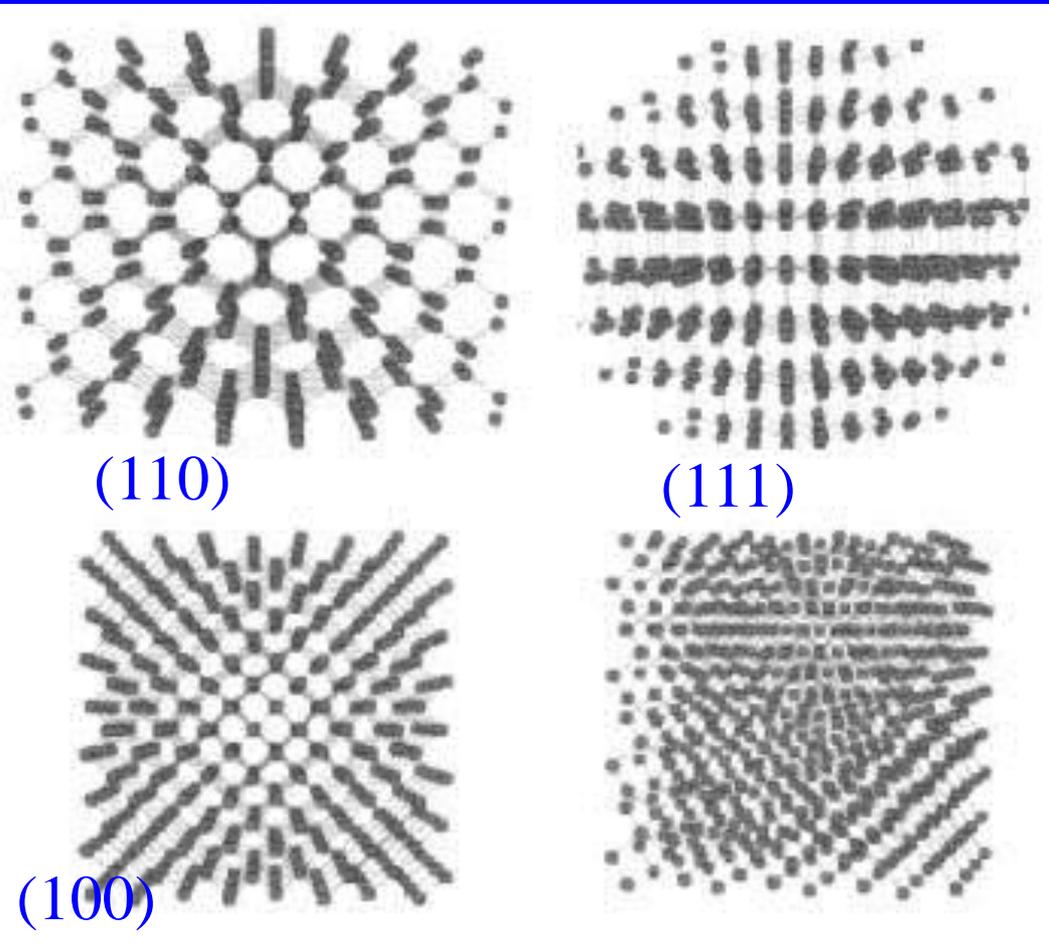
$$\gamma = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (x - R_P)^3 C(x)dx}{Q\Delta R_P^3}$$

$$\beta = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (x - R_P)^4 C(x)dx}{Q\Delta R_P^4}$$

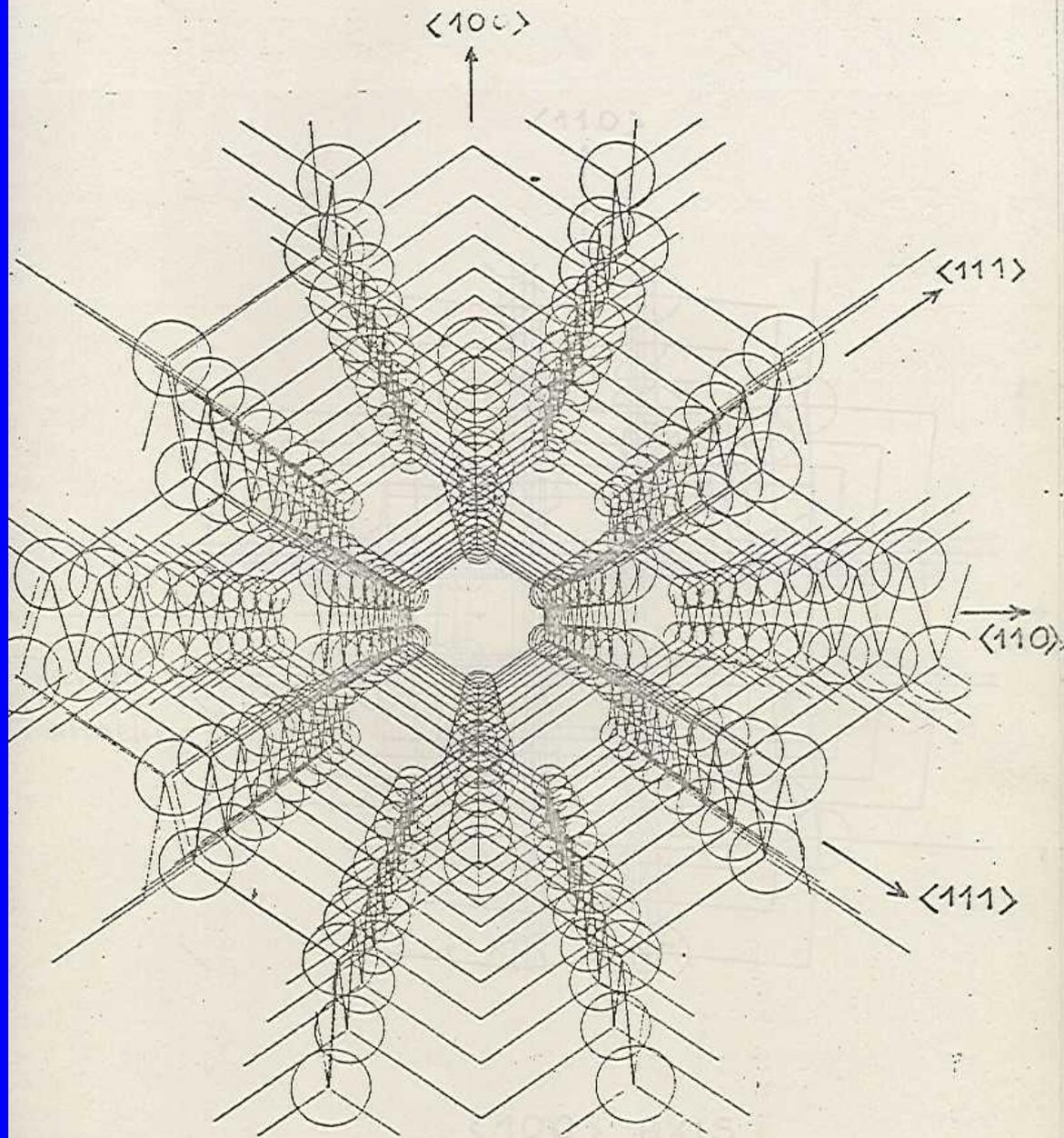
Na prática usa-se momentos equivalentes por equações de Pearson (sem integral). Valores tabulados tb existem –slide 6

## Perfil em amorfo vs cristalino:

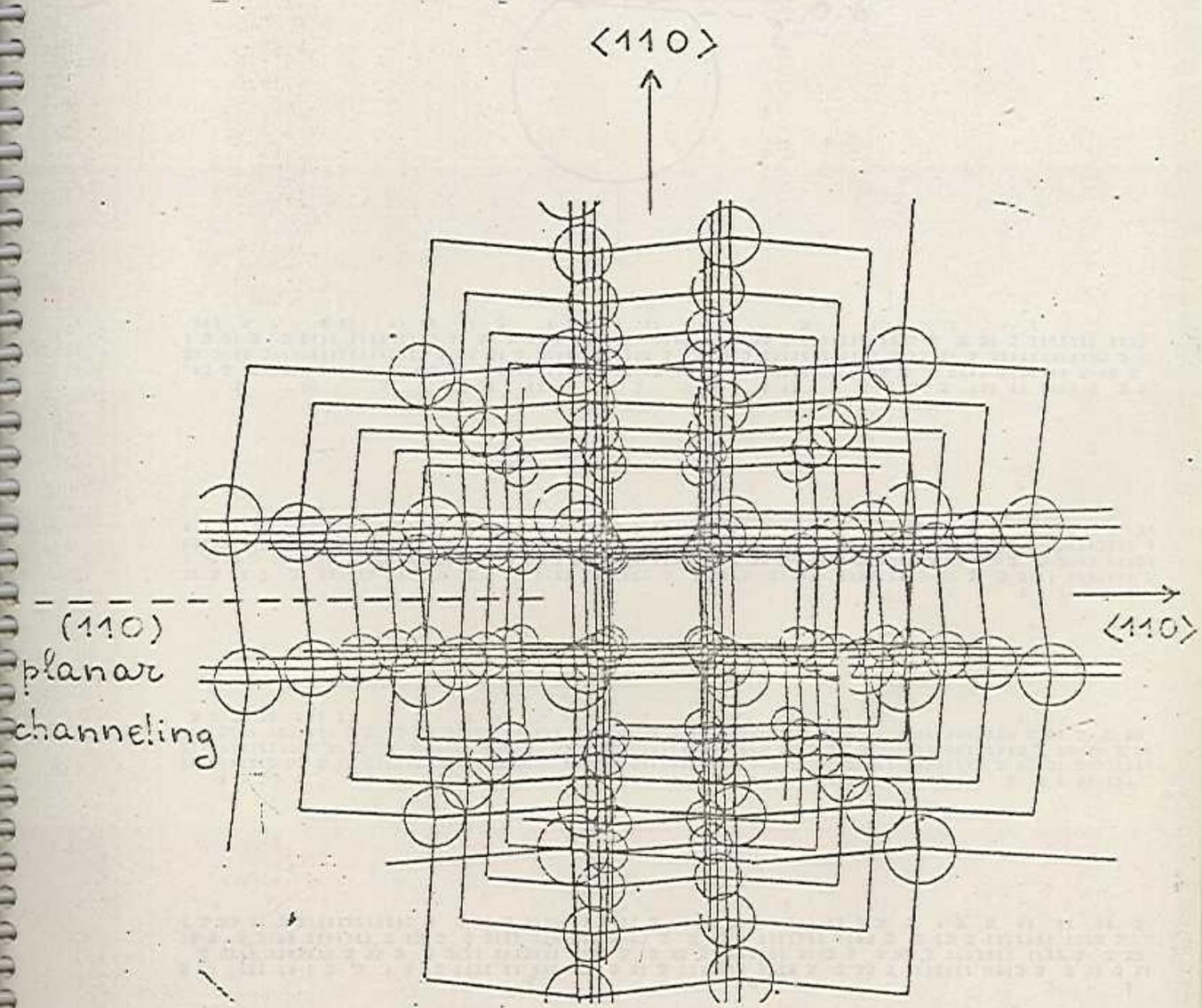
- Descrição acima, valido para amorfo e não cristalino.
- Aplica-se para poli c/ grão fino, cristal com cobertura de filme amorfo e/ou p/ cristal c/ inclinação adequada.
- Em cristal, íon pode ser canalizado (surfando no canal):



←c/ inclinação e rotação  
tem aparência amorfa  
reduz canalização.

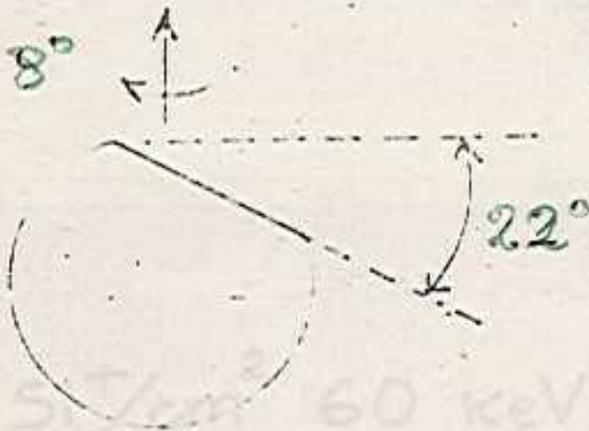


$\langle 110 \rangle$  AXIS



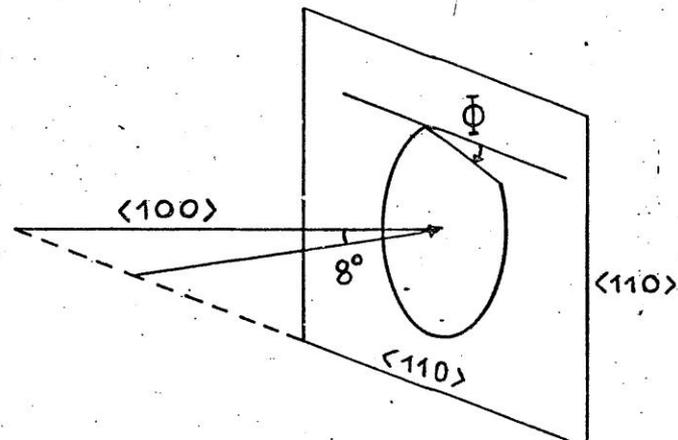
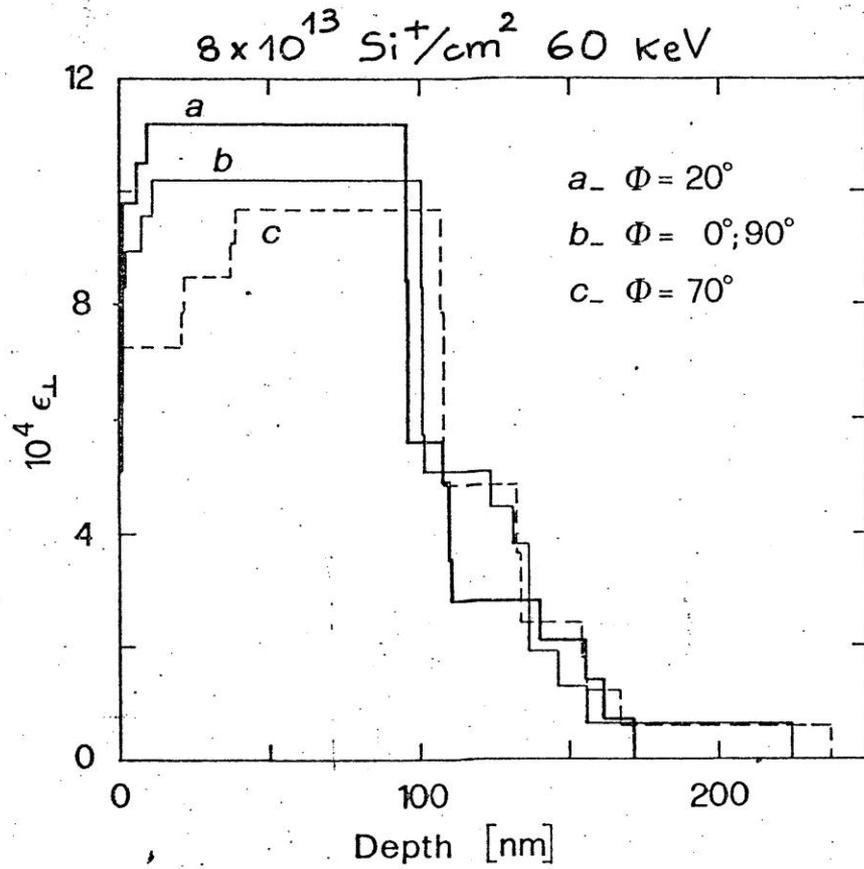
$\langle 100 \rangle$  AXIS





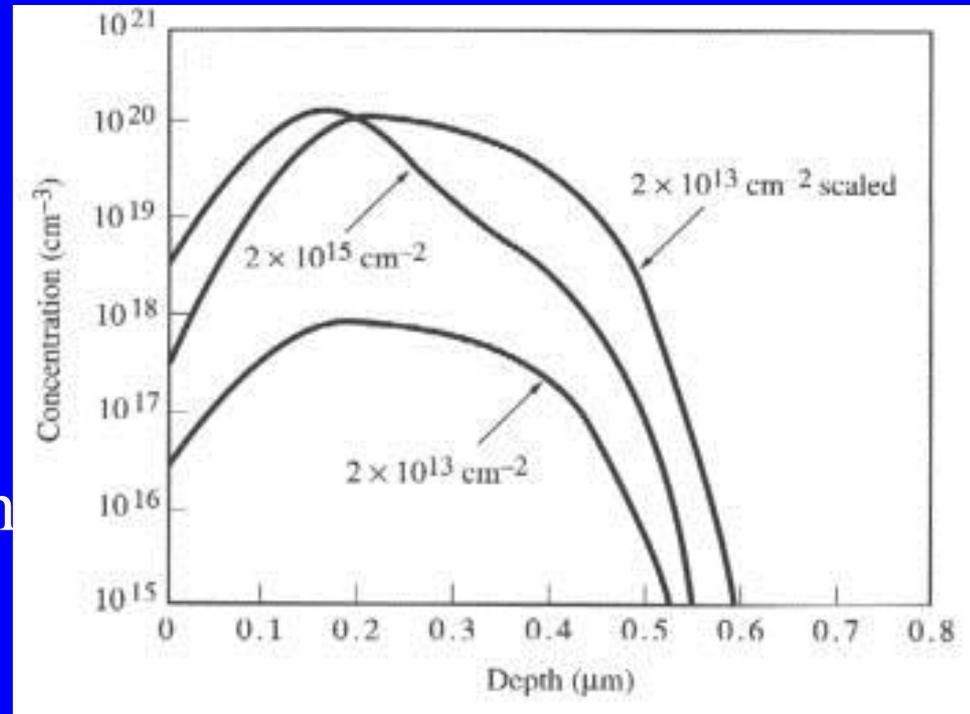
$8 \cdot 10^{13}$   $5 \text{ cm}^2$  60 keV

1	1111	11 2	11 11	11 11	1111	1111	11 2	11 11	11 11	2 11	12
11 11	11 11	2111	1211	1121	11111	11111	2111	1211	1211	1211	1111
112	1111	121	1111	1111	1111	121	121	112	1111	1111	2
111	1111	121	121	1111	1111	1111	211	121	1112	11111	11
1121	1112	11111	11111	1211	1121	1121	11 11	11 11	2 11	1111	
11 11 11	2 11	1111	1111	11 2	11 11	11 11	1111	1111	11 11	11 2	1
1111	1111	11 2	11 11	11 11	2 11	1111	1111	11 11	11 11	2 11	
111	11 11	11 11	2 11	1111	1111	1112	11111	11111	1211	1211	
11111	1211	1211	1121	11111	1111	211	121	112	1111	1111	
121	112	1111	1111	1111	121	1111	1111	1111	1111	121	
1111	1111	1111	211	121	112	1111	1111	211	121	1111	11
111	111	111	1 11	11 11	2 11	1111	1111	11 11	11 11	11 11	
11 1	1 11 1	1 11 1	1 11 1	1 111	1 111	1 11 1	1 11 1	1 11 1	1 11 1	1 11 1	111
1	11 1	1 11	11	11	11	11	1 1	11	11	11	11
1 11	1 11	111	111	1 11	1 11	1 11	1 11	111	111	1 2	1 11
1	1111	11 2	11 11	11 11	1111	1111	1111	11 11	11111	2111	12
11 11	11111	2111	1211	1121	11111	11111	11111	121	121	1111	
11	121	121	1111	1111	1111	211	121	112	1111	1111	2
112	1111	1111	1111	211	121	1111	1111	1111	1111	121	121
11	1111	121	121	112	1111	1111	1211	1121	1112	11111	11
1121	1112	11111	11111	2111	1121	1111	11 11	11 11	2 11	1111	
11 11 11	2 11	1111	1111	11 2	11 11	11 11	1111	1111	11 2	1	
1111	1111	1111	11 11	11 11	2 11	1111	1111	11 11	11 11	11 11	
111	11 2	11 11	11 11	1211	1211	1112	11111	11111	1211	1211	
11111	2111	1211	112	1111	1111	211	121	121	1111	1111	
121	121	1111	1111	1111	121	121	1111	1111	1111	211	
1111	1111	211	121	112	1111	1111	1111	1111	121	121	1111
1 11	111	1111	11 11	11 11	2 11	1111	1111	11 2	11 11	11 11	
1 11 1	1 11 1	1 11 1	1 111	1 111	1 111	1 111	1 11 1	1 11 1	1 11 1	1 2 1	111
1	11 1	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
1 11	1 11	111	111	1 11	1 11	1 11	1 11	111	111	1 2	1 11
1	1111	11 2	11 11	11 11	2 11	1111	1111	11111	11111	2111	12
11111	11111	2111	1211	1211	1112	11111	1111	121	121	1111	
1	121	121	112	1111	1111	211	121	112	1111	1111	2
112	1111	1111	1111	121	121	1111	1111	1111	1111	121	121



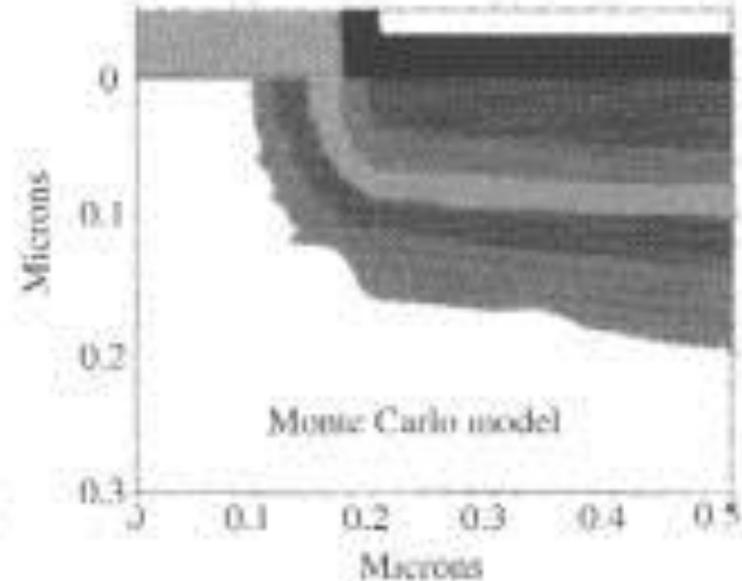
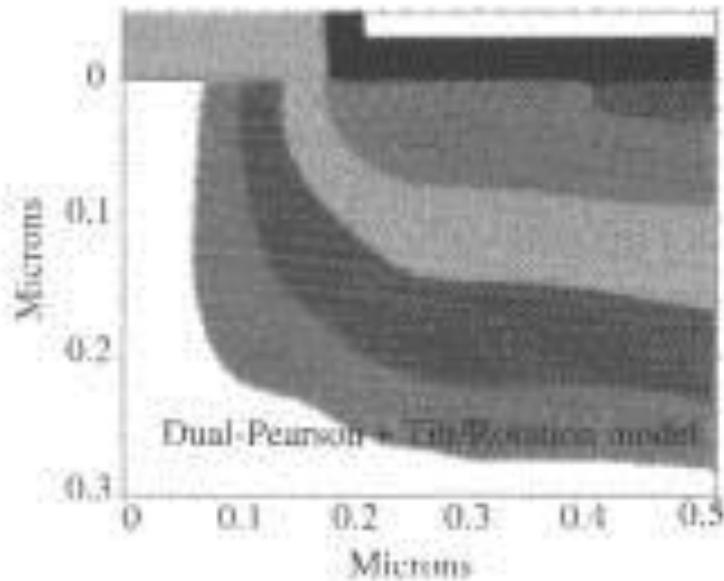
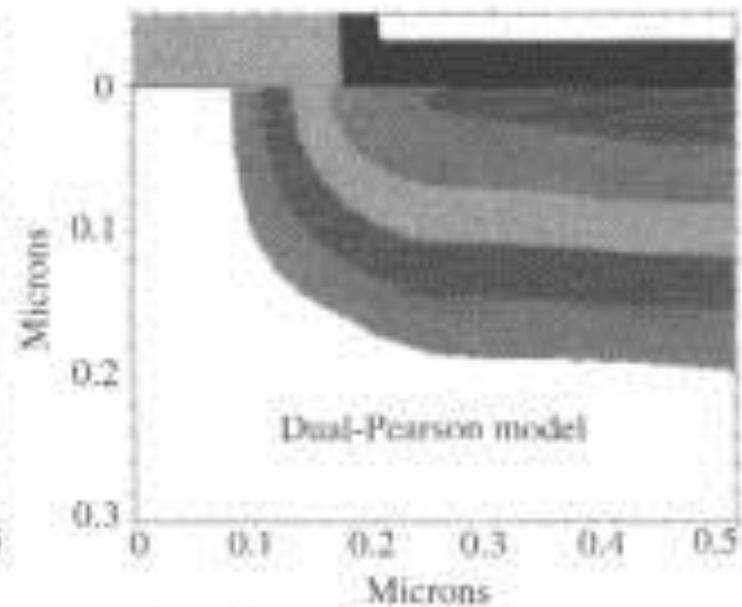
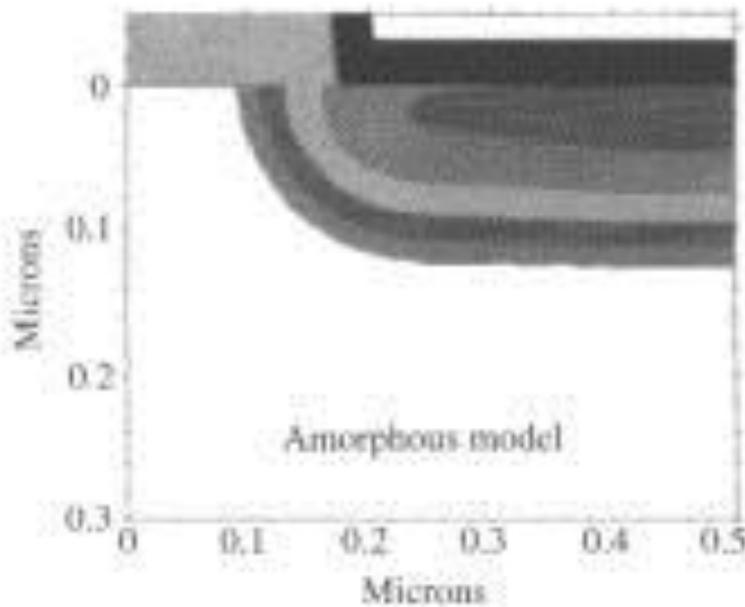
# I/I de $^{11}\text{B}^+$ a 35 keV em Si (100) s/ inclinação e rotação

- Perfil composto por 2 parte: - principal + canalizada.
- Requer descrição por mais momentos – “dual-Pearson approach”, c/ parâmetro adicional da fração canalizada e + 1 parâmetro de dependência de dose!
- Doses altas  $\rightarrow$  mais danos, menos canalização.

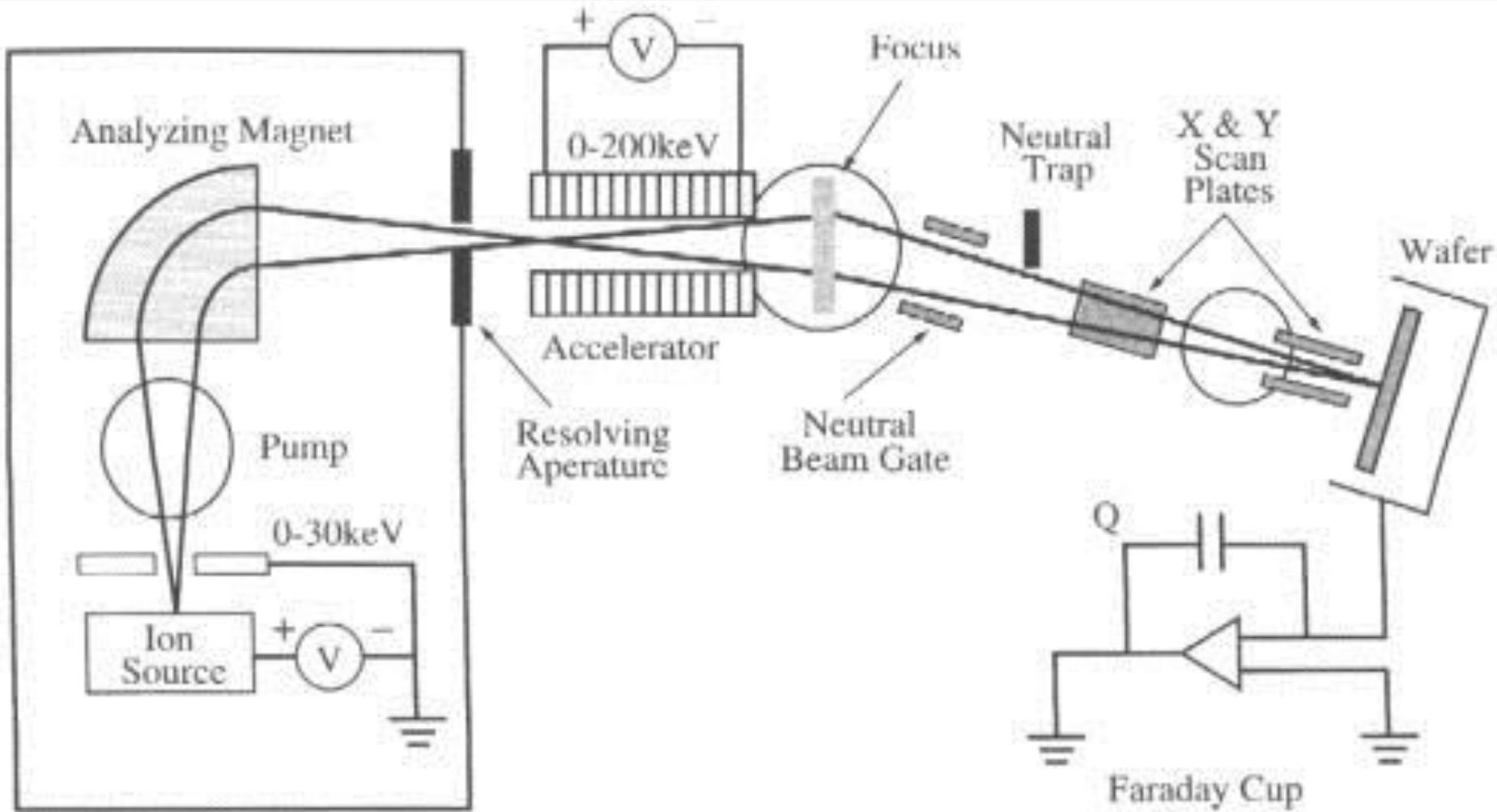


# Efeitos de modelos sobre perfil na borda da janela:

- Monte Carlo é atômico e mais completo.
- Os outros resultam de estudos 1D, com rebate lateral.
- Materiais e estrutura da borda têm efeito forte sobre o resultado.



## 9.3 Equipamento e Métodos de Manufatura



- É similar a aceleradores lineares de partículas, onde teve origem.

## Requisito: fonte de íons com densidade apropriada:

- Fonte sólida com evaporação ou fonte gasosa.
- Ex: pó de As, P (+ seguro) ou  $\text{AsH}_3$ ,  $\text{PH}_3$ ,  $\text{BF}_3$  diluído em  $\text{H}_2$  (15%), são tóxicos, porém facilita troca de fonte.
- Ionização do gás por descarga de elétrons de filamento quente ou descarga de plasma.
- Extração dos íons por orifício e potencial  $V = \leq 30 \text{ kV}$   
 $\Rightarrow$  os íons saem com energia cinética  $E = kqV = 0.5mv^2$ ,  
onde  $k =$  nível de ionização  $\Rightarrow$

$$v = \sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{2kqV}{m}}$$

- Seleção em massa – eletro-ímã de raio  $R \Rightarrow$  igualdade entre força de Lorentz e força centrífuga  $\Rightarrow$

$$q \cdot \vec{v} \times \vec{B} = \frac{mv^2}{R}$$

Combinando as duas equações, obtém-se a massa selecionada:

$$\sqrt{m} = B \cdot R \cdot \sqrt{\frac{kq}{2V}}$$

onde :  $B \propto I$

- Como  $R = \text{fixo}$ ,  $V = \text{fixado}$ , ajusta-se  $I$  (ou  $B$ ) para extrair o íon desejado.
- Separação de isótopos.
- Mais difícil para massa elevada (sem problemas para dopantes de Si).

- Estágio de aceleração adicional, se desejado.
- Desvio dos íons, filtrando os neutralizados.
- Varredura do feixe em  $x$  e  $y$  e/ou mecânica da lâmina.
- Medida da dose pela integração da corrente, com a lâmina dentro de um copo de Faraday:

$$Q = \frac{1}{A} \int \frac{I_{\text{feixe}}}{q} dt$$

# Implantações de Alta Energia ( $\sim\text{MeV}$ )

- Usual:  $E = 30$  a  $200$  keV
- Se desejamos alta energia:
  - Íons com dupla ionização (feixe menos denso!)
  - Acelerador com alta energia (sala e projeto especial)
- Aplicações de I/I de MeV:
  - Ajuste de perfil MOS: ilha, punchthrough e  $V_T$ , numa seqüência de implantações.
  - CMOS com ilha retrogradual
  - CMOS com I/I de ilhas após etapa de LOCOS – economiza etapas
  - Camada SOI

# Implantações com Energia Ultra-baixa

- Roadmap CMOS requer  $x_J < 100$  nm.
- Uso de MBE – possível, porém caro.
- Implantação de Íons:
  - Redução da  $V$  de extração:  $\rightarrow$  reduz corrente:

$$J \propto V^{1.5} d^{-2}$$

$d$  = distância com  $V$  aplicado.

- Desacelerar após seletor:  $\rightarrow$  instabilidade do feixe, pois pode haver neutralização de íons, com redução de desaceleração  $\Rightarrow$  várias E.
- Solução: re-projeto da máquina, otimizando extração c/ baixa energia,  $< 250$  V.

## Aquecimento pelo Feixe de Íons:

- Aumento de T depende de: Q, V,  $t_{\text{Lâmina}}$ .

$$E_{dep} = V \int Idt = VQ$$

- Limitar T a 120 °C (pelo fotorresiste)
- Normalmente é satisfeito.
- Possível problema: remoção de fotoresiste após I/I e alta dose.

## 9.4 Métodos de Medidas

- Perfil de dopagem: como descrito no cap. 8
- Após I/I, muitos danos e baixa ativação elétrica.
- Após recozimento apropriado, maior parte será ativada, a menos que C muito alta: precipitação, formação agregados, etc.

## 9.5 Modelos e Simulações

- Subsídios preliminares:
  - 1911, Rutherford: ~0.01% de partículas  $\alpha$  são retro-espalhados, na incidência em folha de Al.
  - Bohr, íons perdem energia por interação a) nuclear, p/ os núcleos dos átomos, b) eletrônica, p/ os elétrons livres do sólido.
  - 1963, Lindhart, Scharff, Schiott, teoria LSS, prevê trajetória dos íons a partir do conhecimento dos fatores de freamento nuclear e eletrônico.

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

$$R = \int_0^R dx = \frac{1}{N} \int_0^{E_0} \frac{dE}{S_n(E) + S_e(E)}$$

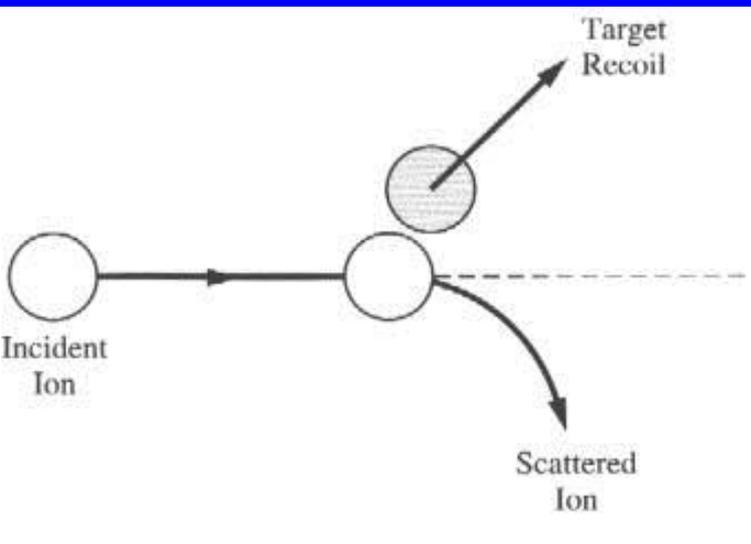
# Freamento Nuclear

- Colisão elástica, com potencial Coulombiano, converte energia cinético em potencial.
- Conservação de momentum e energia.
- Projétil é desviado e alvo recua. O quanto, depende do parâmetro de impacto  $p$ , massas e energia.

- Núcleos “pelados”:
- Núcleos do alvo parcialmente

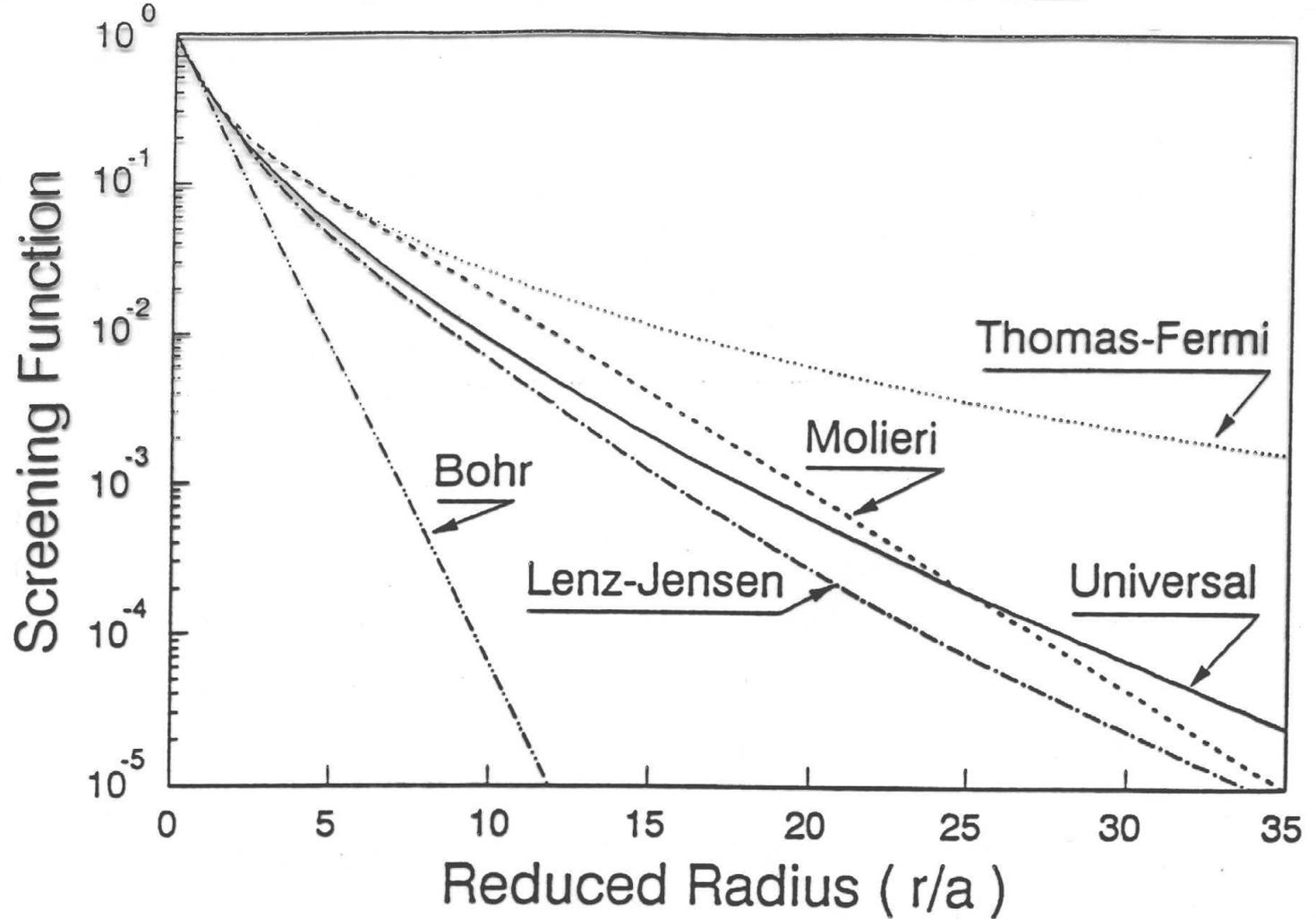
blindados:

$$V(r) = \frac{q^2 Z_1 Z_2}{4\pi \epsilon r}$$
$$V(r) = \frac{q^2 Z_1 Z_2}{4\pi \epsilon r} \phi\left(\frac{r}{a}\right)$$



Onde:  $\phi(r/a)$  = função de blindagem,  
 $a$  = comprimento de blindagem.

## Funções de Blindagem:



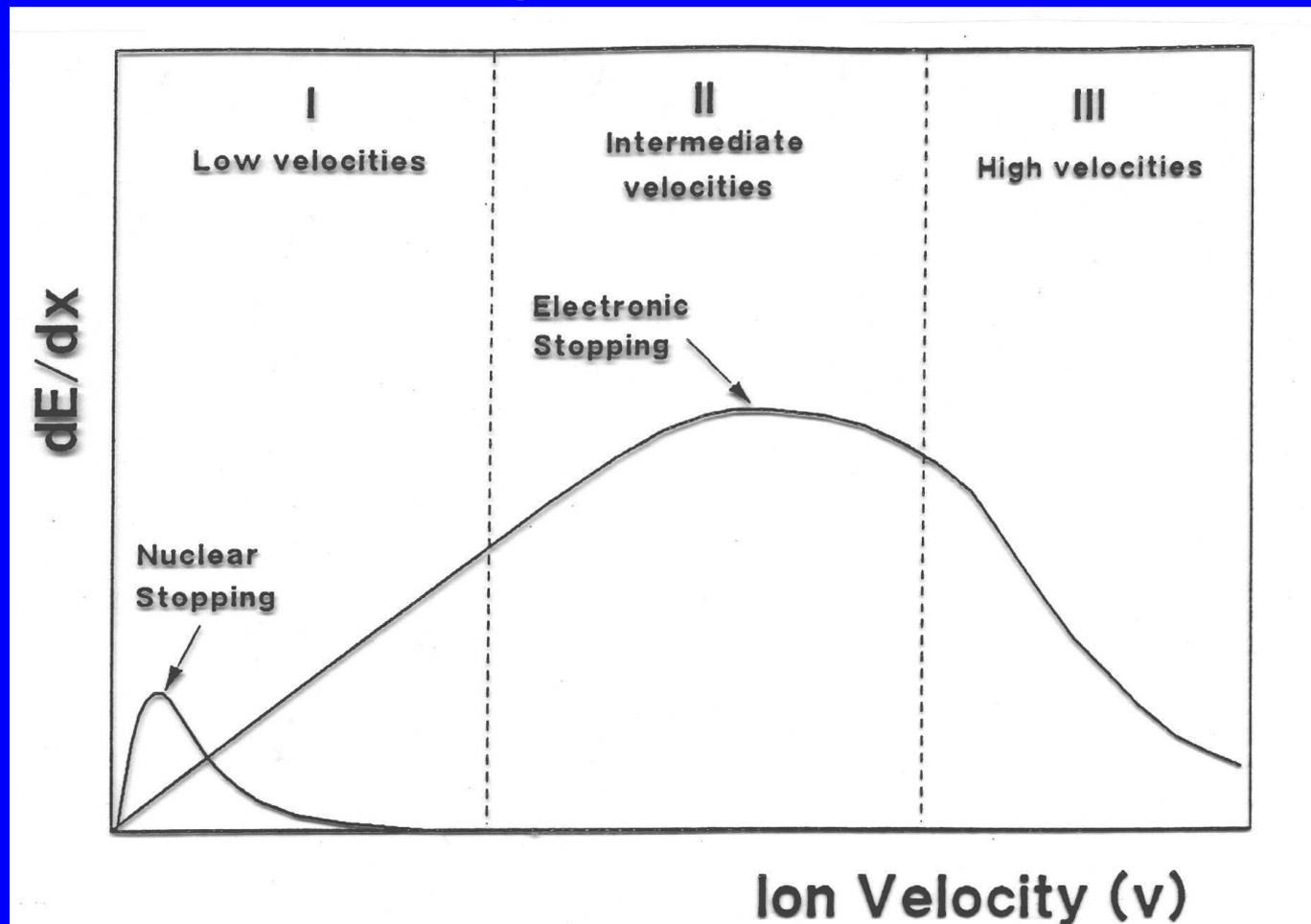
Função de Thomas-Fermi: Em colisão frontal, máx E transferida:

$$\phi\left(\frac{r}{a}\right) = \exp\left(-\frac{r}{a}\right)$$

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

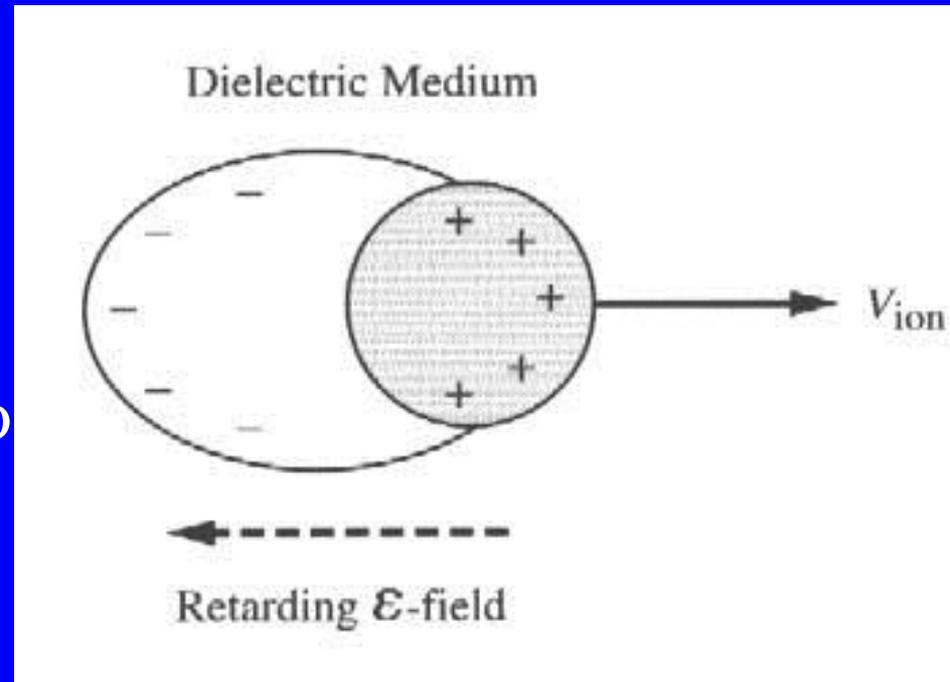
## Freamento Nuclear – cont.:

- Íons com alta energia, têm menos tempo para interação  
→  $S_n \downarrow$
- Íons com baixa energia:  $S_n > S_e \Rightarrow$  mais defeitos  
(domínio no final da trajetória).



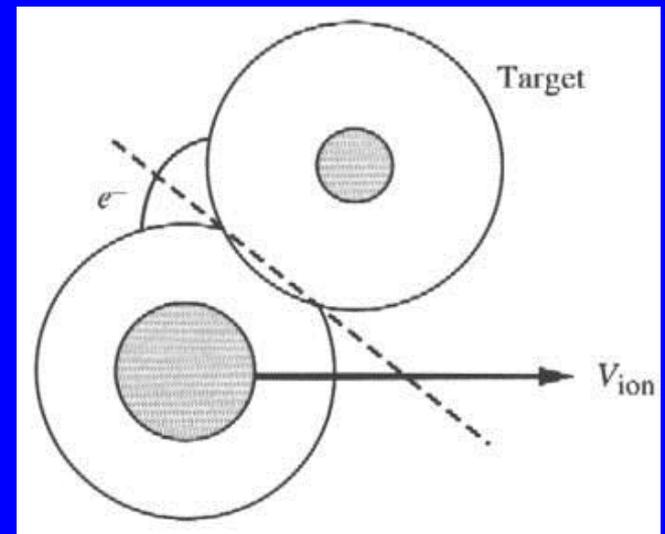
# Freamento Eletrônico não local

- Relacionado ao arraste da nuvem de elétrons do projétil no meio viscoso do alvo:
- Não-local, pois depende do efeito médio do meio.
- Dissipa energia.
- Não altera direção do projétil.



# Freamento Eletrônico Local

- Colisões com elétrons e transferência de momentum e de carga.



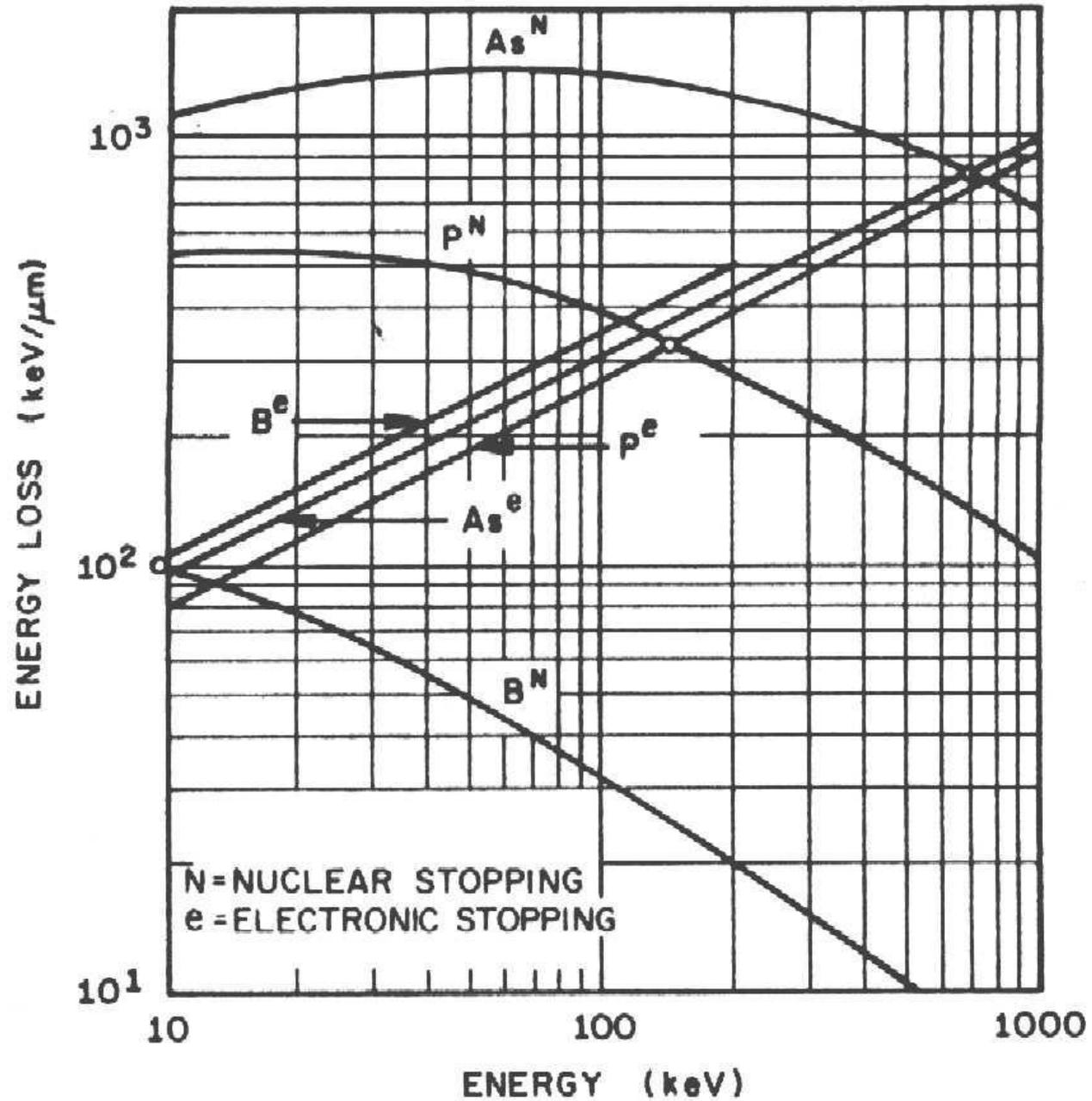
# Freamento Eletrônico

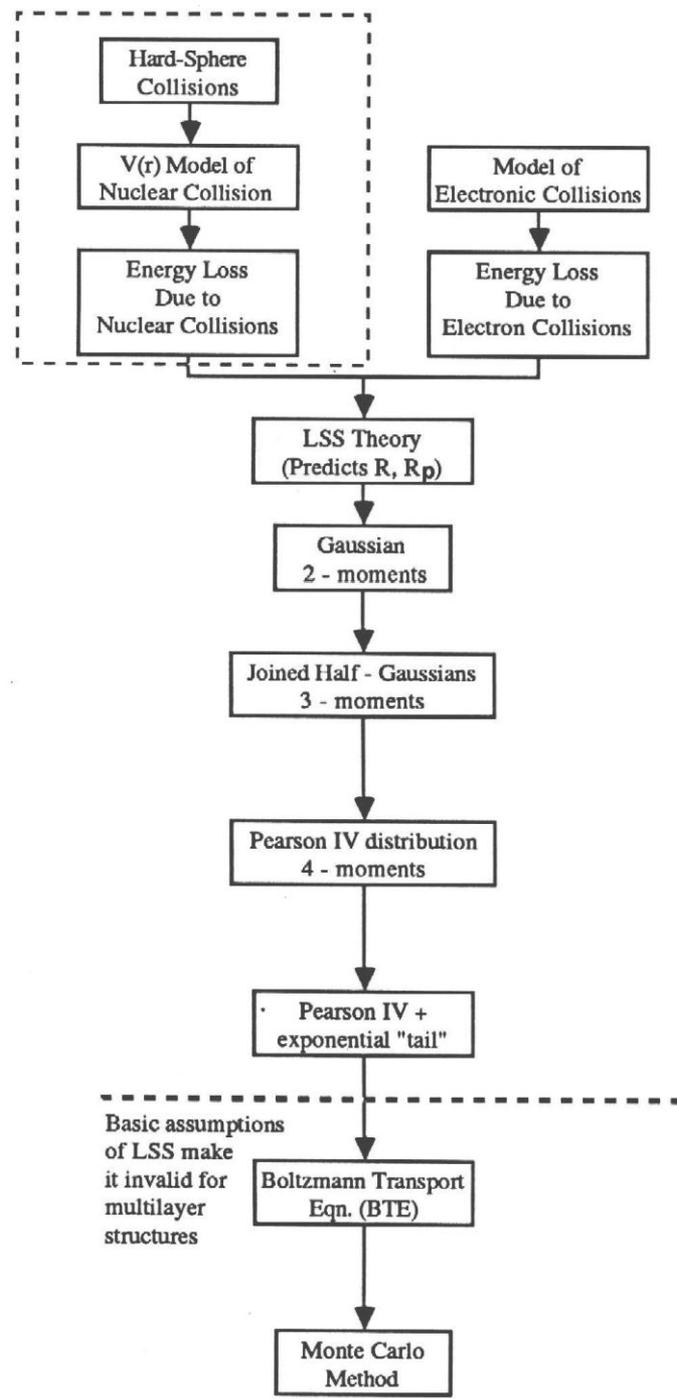
- É inelástico.
- Ionização, excitação eletrônica e aquecimento
- Não altera trajetória do projétil.

$$S_e(E) = k\sqrt{E}$$

$$k \approx 0.2 \times 10^{15} \text{ eV}^{1/2} \text{ cm}^2$$

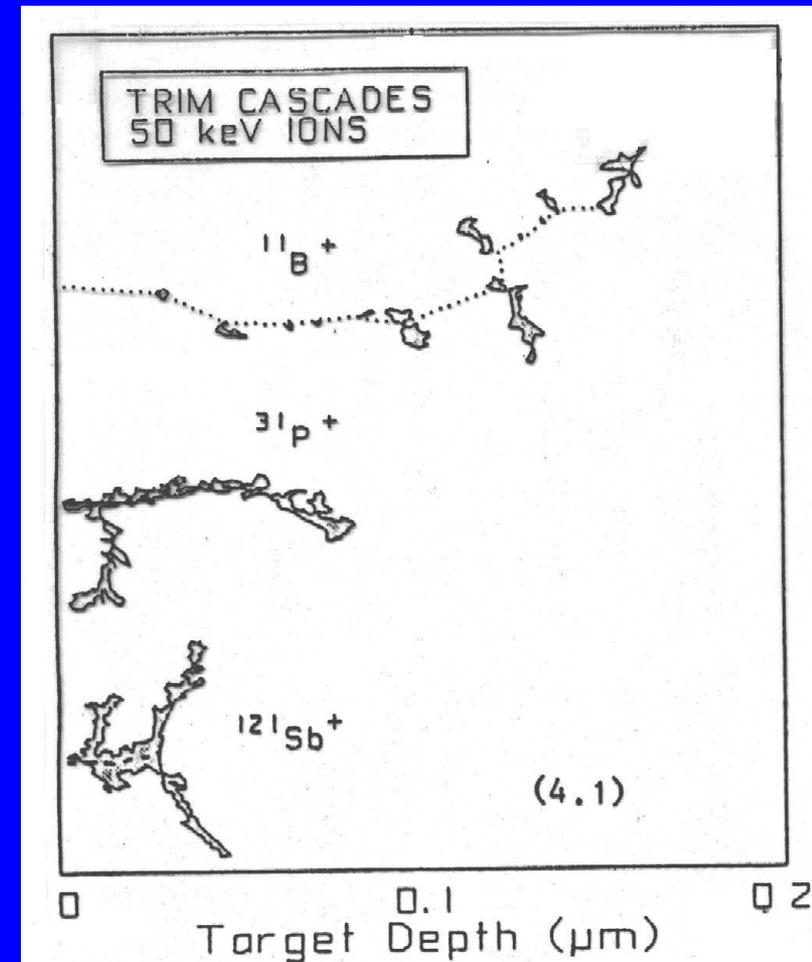
# Freamento Total





# Produção de Danos

- Se  $E_{\text{transf}} > 15 \text{ eV}$  (em Si)  $\Rightarrow$  par Frenkel (vacância + auto-intersticial) estável.
- Implantações típicas (keV) produz muitos deslocamentos.
- Defeitos: vacâncias, intersticiais, complexos (defeitos primários).
- Se  $E_{\text{transf}} \gg 15 \text{ eV}$   $\Rightarrow$  cascata de deslocamentos.
- Se íon pesado:
  - Nº deslocamentos  $\uparrow$
  - Trajetória  $\sim$  retilínea.



# Produção de Danos

- As cascatas de defeitos têm estrutura amorfa:
  - centro – rico em vacâncias
  - periferia – rico em intersticiais
- Ocorre também a recombinação de defeitos = “dynamic annealing” =  $f(T)$ .
- A própria I/I pode aumentar T

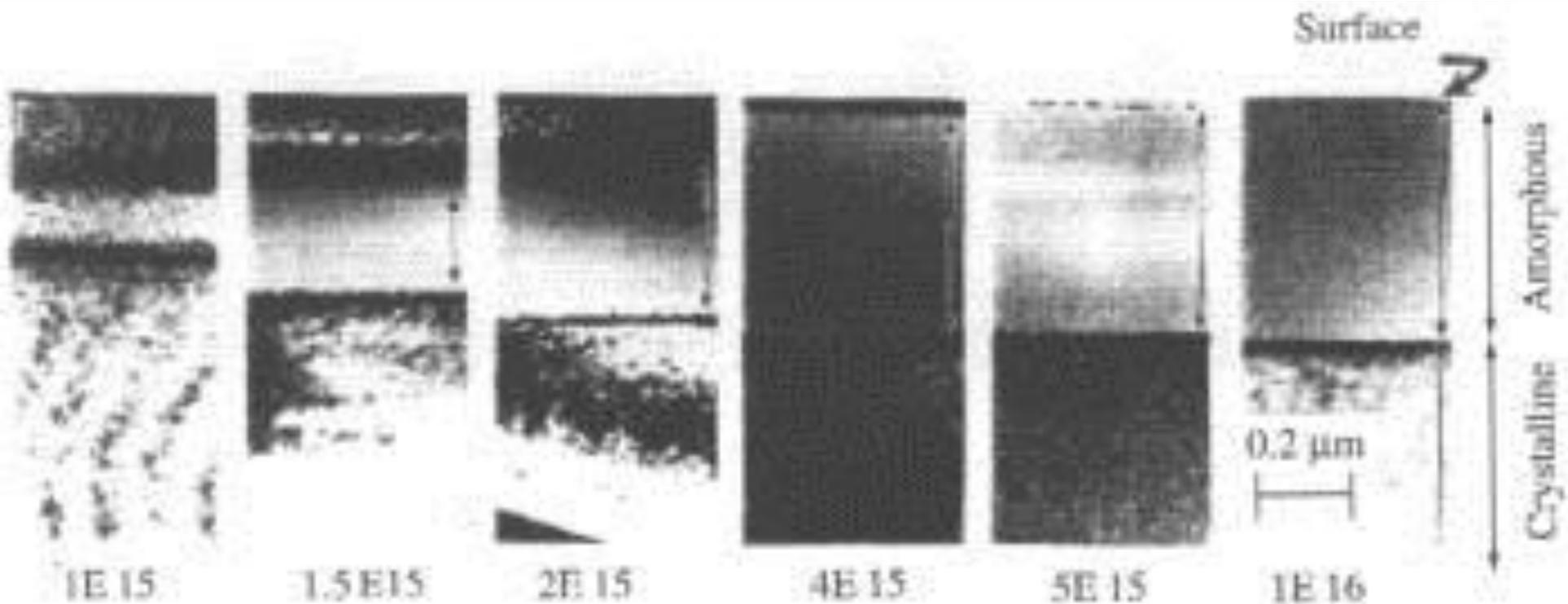
## Amorfização

- A) Modelo heterogêneo: quando ocorre acúmulo e sobreposição das cascatas individuais; aplica-se ao caso de íons pesados.

# Amorfização

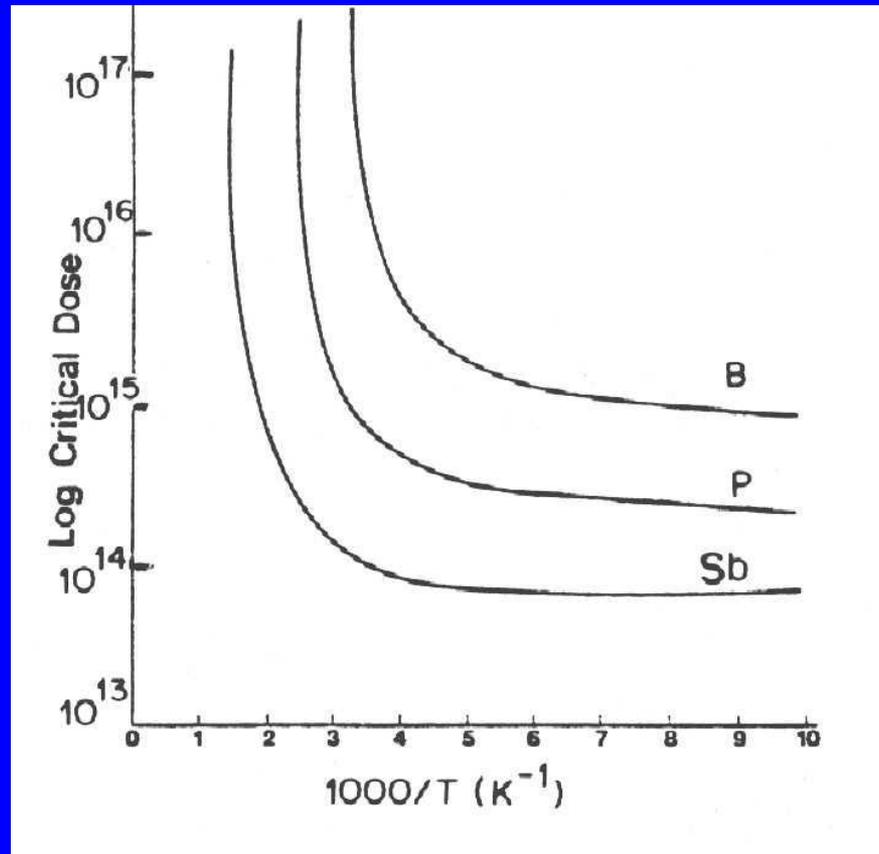
## B) Modelo homogêneo:

- q<sup>do</sup> concentração de defeitos = nível crítico (~10%), o cristal torna-se termodinamicamente instável, transforma-se em amorfo.
- aplica-se ao caso de íons leves.
- outro critério: qdo. energia depositada  $> 10^{21}$  keV/cm<sup>3</sup> (p/ Si).



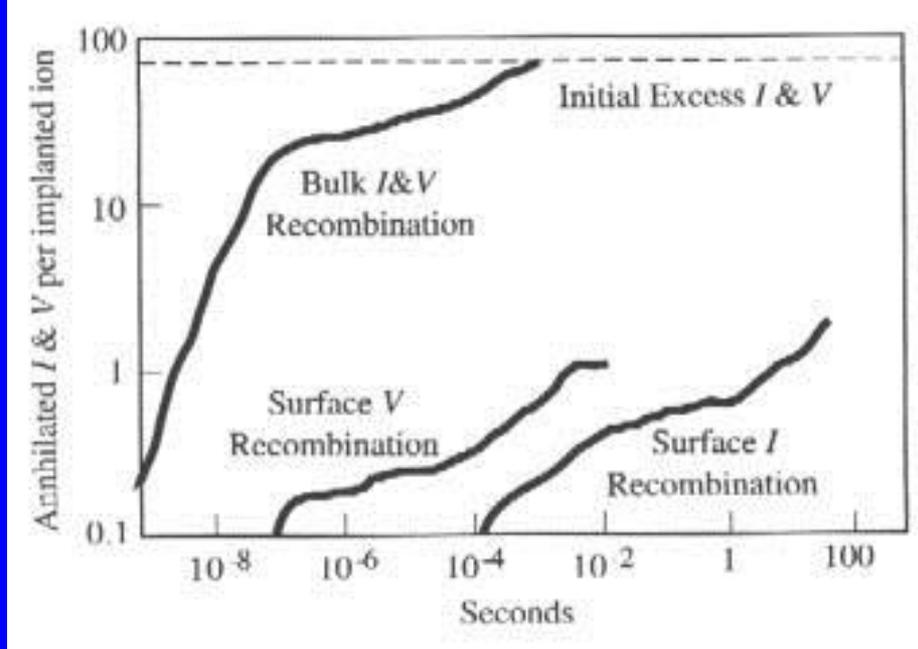
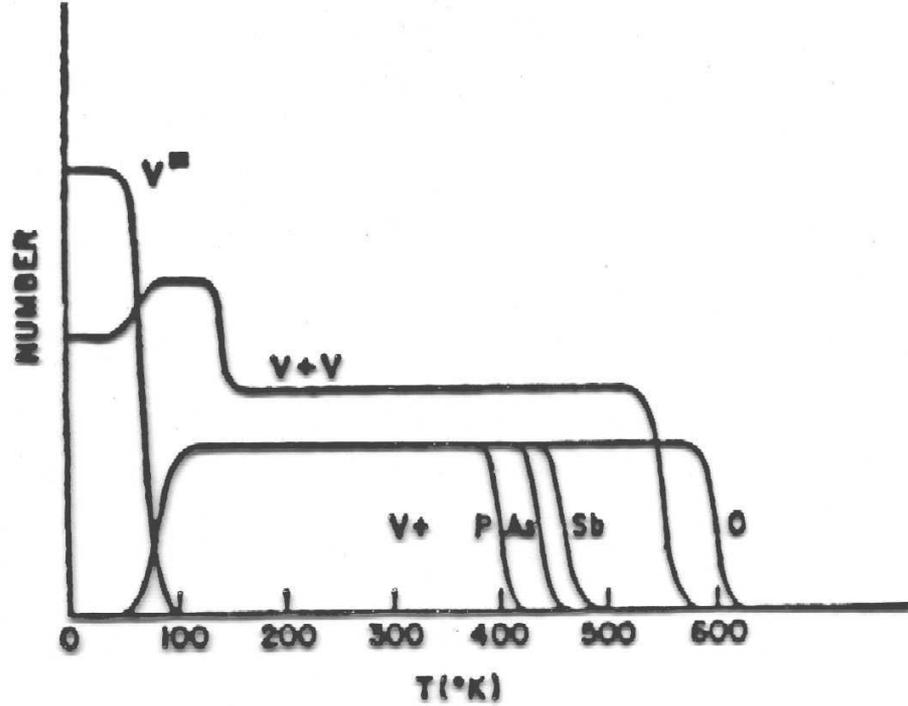
# Amorfização e Recozimento Dinâmico –R.D.

- Causa desvio no critério da energia crítica depositada.
- R.D. depende de:
  - T da implantação
  - Densidade de corrente de íons (maior p/ corrente menor)
  - tipo de cristal (GaAs > Si)

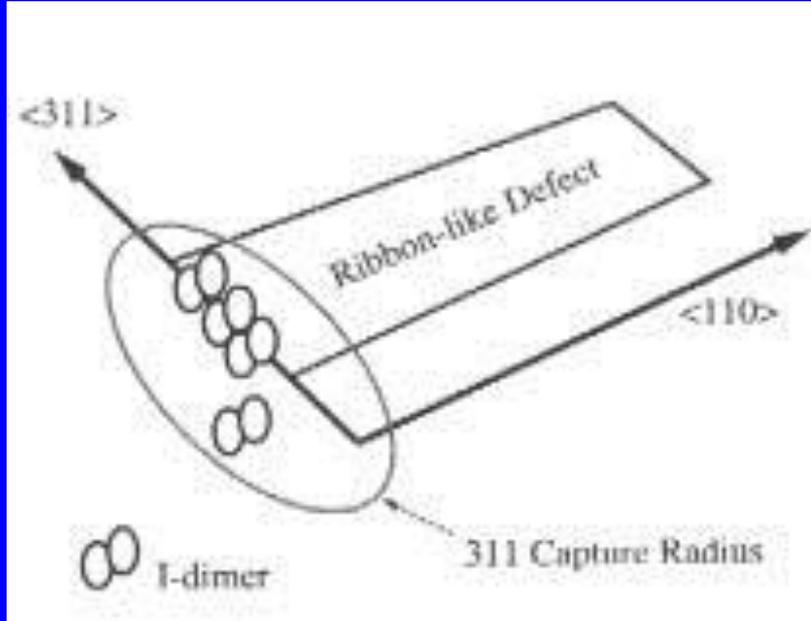


# Recozimento de Danos

- Defeitos:
  - Introduzem níveis profundos na banda proibida.
  - São centros de espalhamento  $\Rightarrow \mu \downarrow$
  - Influenciam a difusão de dopantes.
- Objetivos:
  - Remover danos produzidos pela I/I.
  - Recolocar átomos de Si nos seus sítios da rede cristalina.
  - Colocar dopantes em sítios substitucionais.
- Recozimento começa já a 400 °C:
  - Complexos de vacâncias (defeitos primários) dissociam-se.
  - Recombinação de pares Frenkel.
  - Formação de agregados de Si (barra ou cinta de átomos de Si ~10 nm).
  - Dissolução dos agregados de Si (para T mais alta).

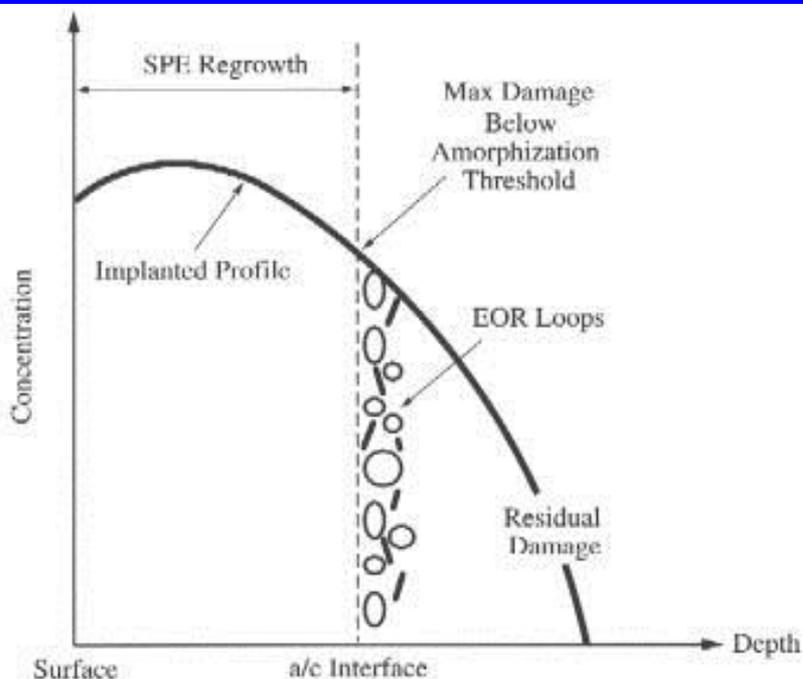


$T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ao final sobra Si intersticial  $\rightarrow$  forma agregados.



## Evolução dos agregados de Si (barras):

- Se densidade < crítico  $\rightarrow$  todos são dissolvidos por recozimento.
- Se densidade > crítico  $\rightarrow$  transformam-se em discordâncias em anel, que são mais difíceis de remoção. Constituem um plano extra circular de Si do tipo  $\{111\}$ .
- Os anéis formam-se para doses altas e/ou após a interface a/c = chamado EOR (End Of Range).



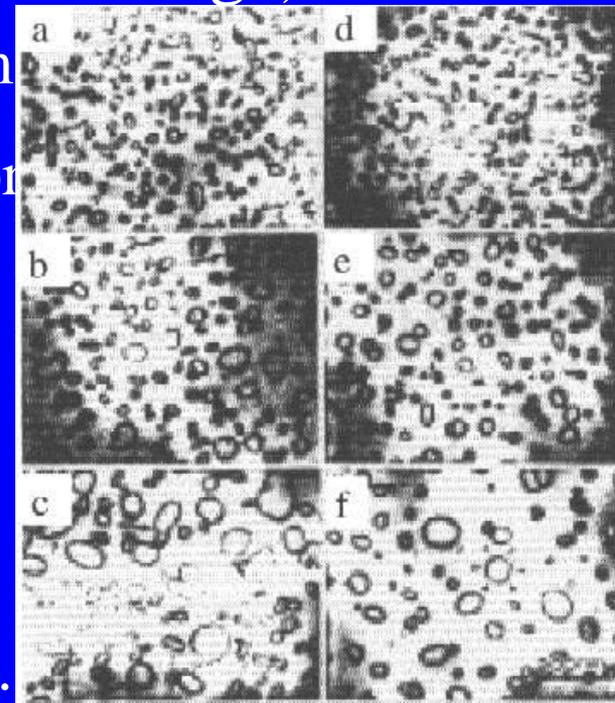
$\phi \sim 10\text{nm} \rightarrow 20\text{nm}$

a, b, c: 850 °C por  
5, 60 e 960 min.

d, e, f: a 1000 °C  
por 1, 60 e 400s

São estáveis!

T=1100 °C pode  
removê-los event.

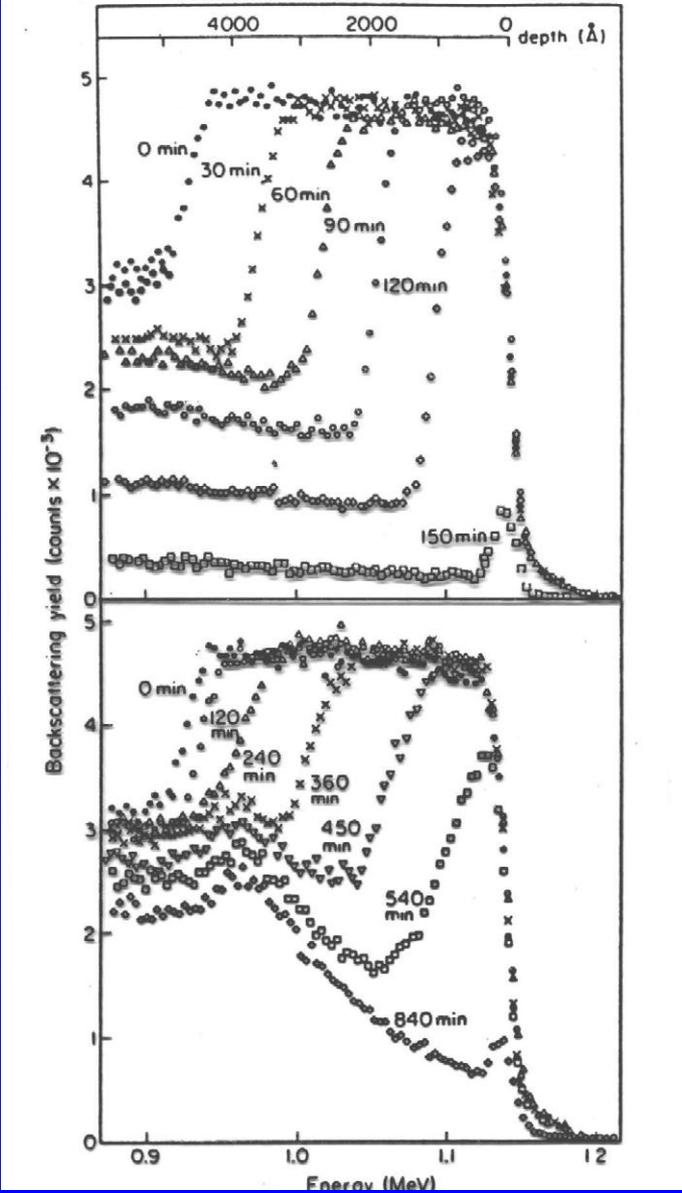


## Alternativa para reduzir anéis EOR:

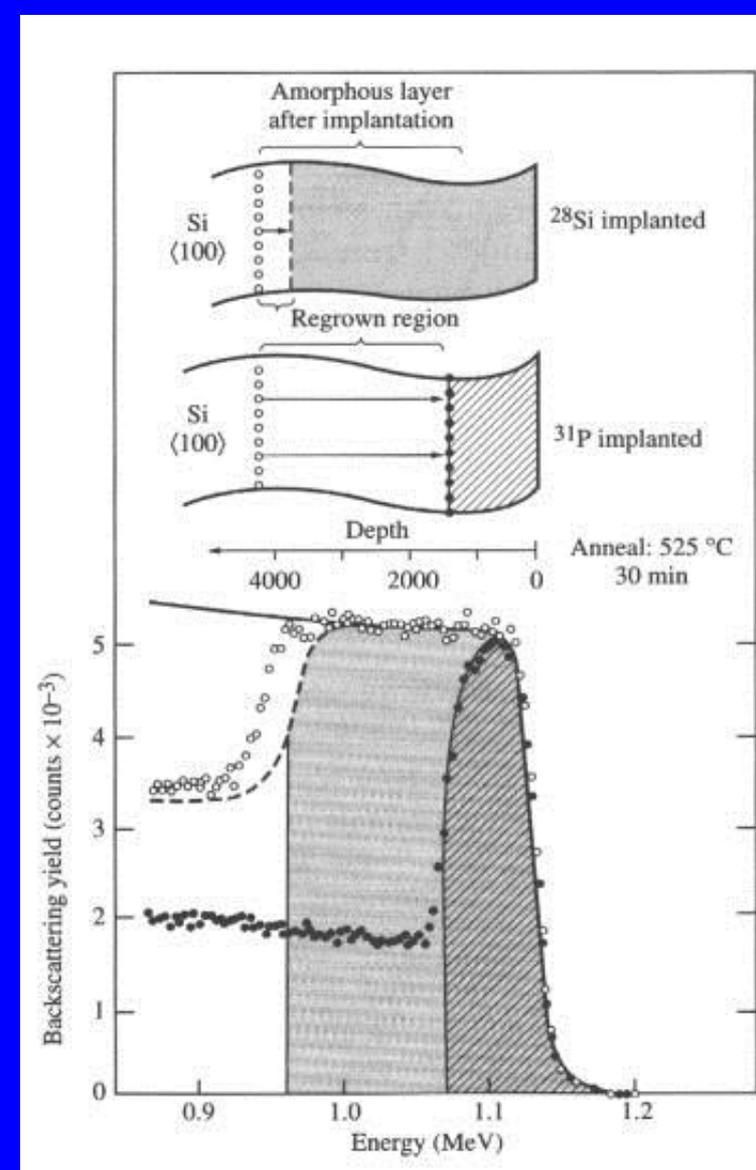
- Implantação a  $T = NL$  (Nitrogênio Líquido):
  - Amorfiza com dose menor.
  - Interface a/c mais abrupta.
  - Menos defeitos abaixo da interface a/c.
  - Ex: após I/I e recozimento a  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  15 min: se  $T = RT$  -  $\sim 10^{10}$  anéis/ $\text{cm}^2$ ; se  $T = NL$  – não se observa anéis.

## Epitaxia em Fase Sólida - SPE:

- Recrescimento, camada a camada, a partir da interface a/c.
- Ocorre p/  $T > 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Se camada amorfa enterrada: SPE a partir das duas interfaces (pode não combinar, defeito tipo zíper).



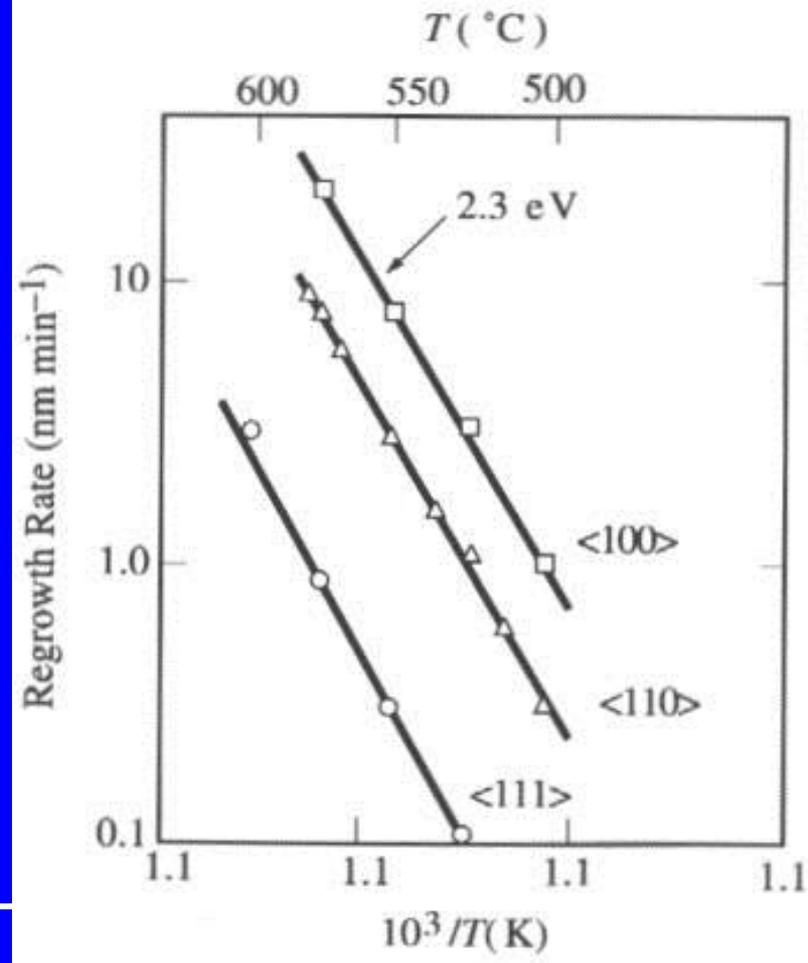
I/I de Si a T=NL e recozimento =  
 a) 400 °C, orientação (100)  
 b) 550 °C, orientação (111)



Não dopada x dopada:  
 P aumenta velocidade.

## Taxa de re-crescimento e energia de ativação

- $(100) > (110) > (111)$
- $E_A = 2.3 \text{ eV}$
- $v = A \exp\left(-\frac{2.3}{kT}\right)$
- $A = f(\text{orient.}, \text{dopagem})$
- Dopante é incorporado substitucionalmente.



tucionalmente. Boa ativação, mesmo a T baixa.

- Não ocorre TED, pois T é baixa e DP são eliminados na camada amorfa.
- Único problema: EOR remanescentes.

## Defeitos Remanescentes após Recozimento:

- Cat. I: EOR – já visto
- Cat. II: “subthreshold damage” – similar ao EOR, porém caso sem amorfização e em  $x \sim R_p$ , defeitos em barra e discordâncias em anel.
- Cat. III: Erros de SPE, micro-germinações e discordâncias tipo “hairpin”. Têm relação com rugosidade da interface a/c.
- Cat. IV: defeito zíper – já visto.
- Cat. V: caso dopagem  $>$  solubilidade sólida  $\rightarrow$  precipitados e discordâncias em anel.

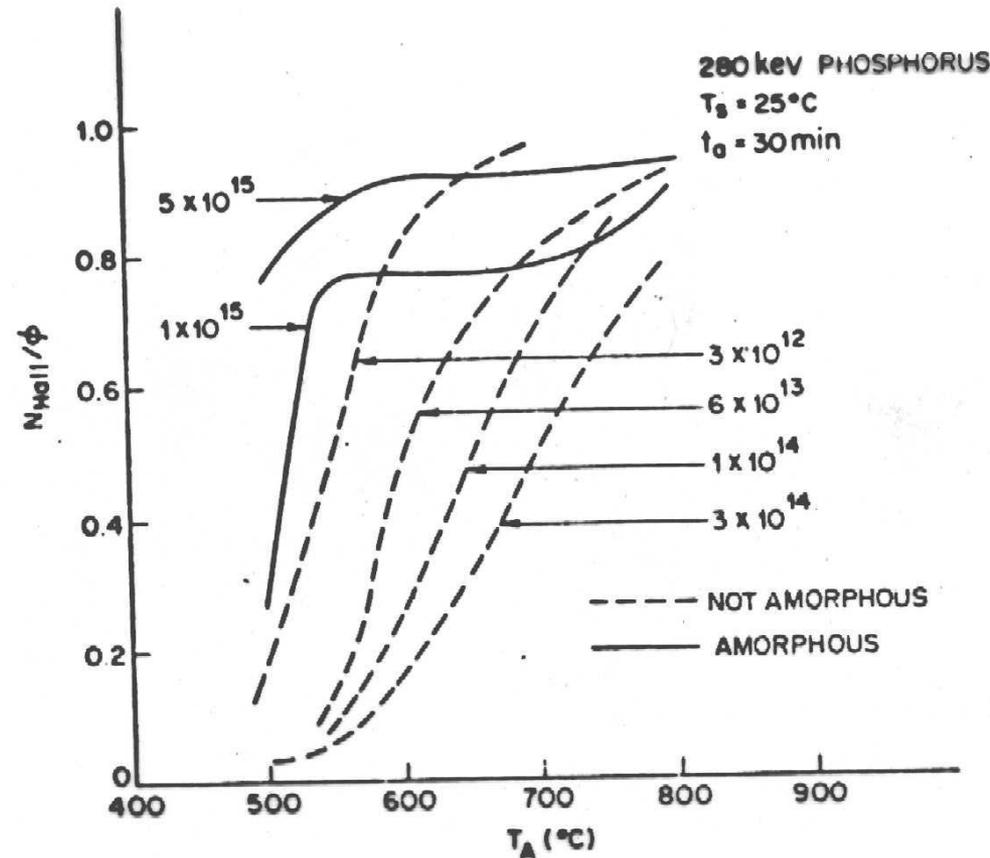
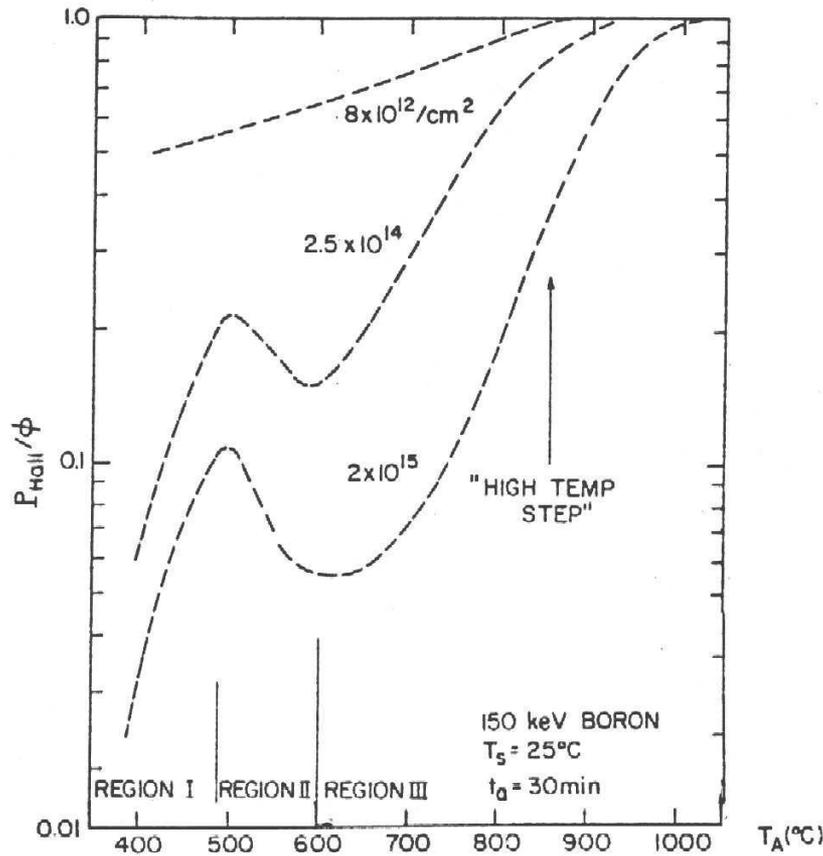
# Ativação de Dopantes:

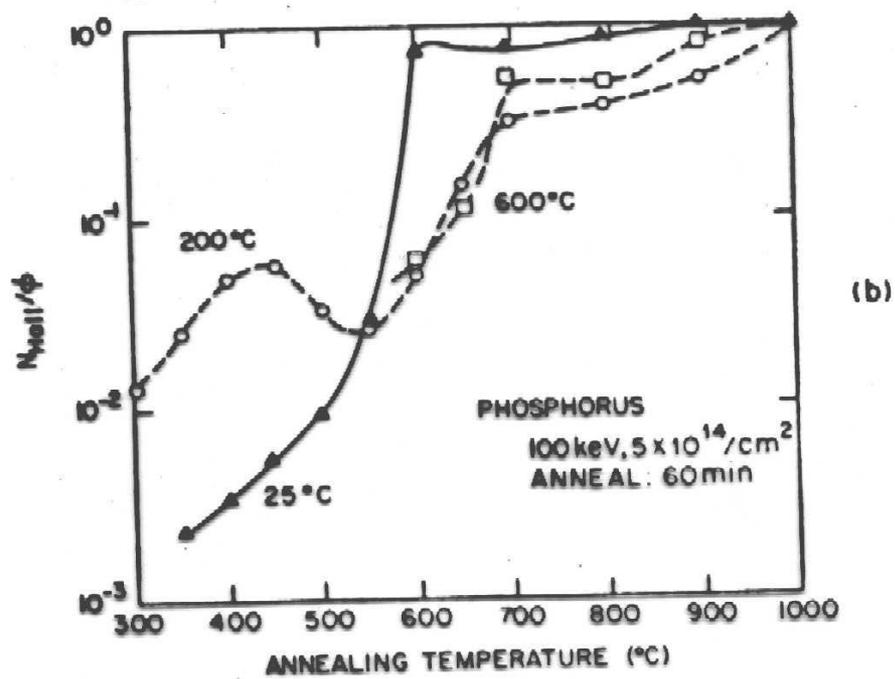
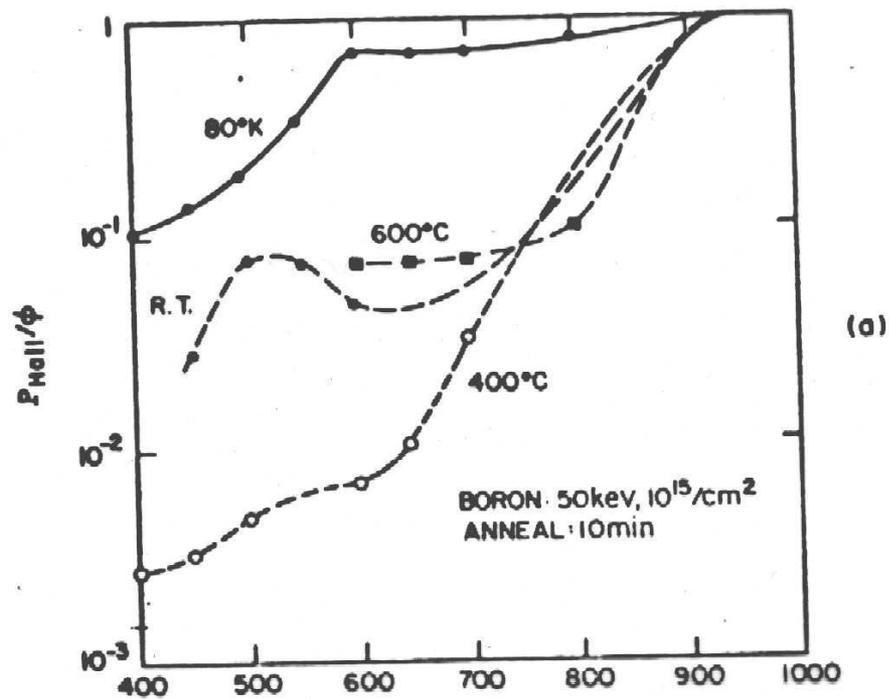
## Objetivos do recozimento:

- Aumentar a concentração de portadores livres, ativação dos dopantes.
- Reduzir a desordem cristalina, aumento de mobilidade.

## Amorfização facilita o processo:

Recozimento reverso:  
-Si intersticial compete com dopante.  
-Formação de complexos V-B inativos.





## 9.6 Limites e Tendências Futuras Tecnológicas e em Modelos.

### Implantação iônica a energias ultra-baixas - Junções rasas -

Meta do ITRS para tecnologia de 100 nm

- profundidade de junção: 20-33 nm
- resistência de folha: 200-625  $\Omega/\square$

Método mais utilizado atualmente:

- implantação iônica a energias ultra-baixas
- Tratamento térmico rápido (RTP)

## Dificuldades inerentes ao método

- alta saturação de interstícios causa difusão excessiva (Transient Enhanced Diffusion) dos dopantes
- aglomeração ou precipitação de dopantes limita a ativação elétrica

Estes são os principais desafios a serem vencidos para manter-se a taxa atual de escalamento

Ativação de dopantes em Si:

Comparação entre implantações de B, BF<sub>2</sub>, As e P

Mokheri et al. *IEEE Trans. Electron Dev.* 49 (7) Julho 2002

Utilizar Implantações a energias ultra-baixas e tratamento térmico rápido para investigar os mecanismos de ativação dos dopantes

## Ativação de dopantes em Si:

### Comparação entre implantações de B, BF<sub>2</sub>, As e P

#### Condições de Implantação em silício:

Dose:  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$

Energias:

B: 0.25, 0.5 e 1 keV

BF<sub>2</sub>: 1.1 e 2.2 keV

As: 0.5, 1 e 2 keV

P: 0.25, 0.5 e 1 keV

Tratamento térmico:

temperaturas de 900 a 1025°C para vários tempos

# Ativação de dopantes em Si:

## Comparação entre implantações de B, BF<sub>2</sub>, As e P

### Caracterização:

- medida Hall

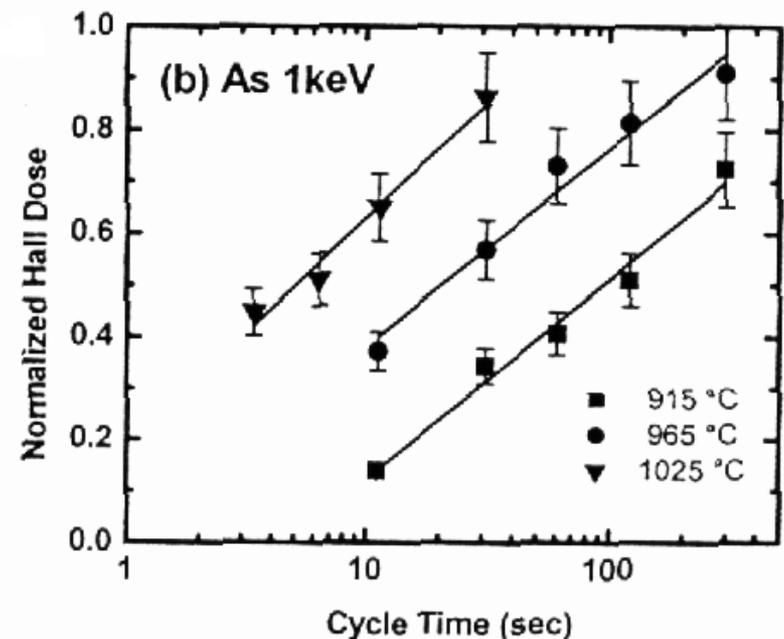
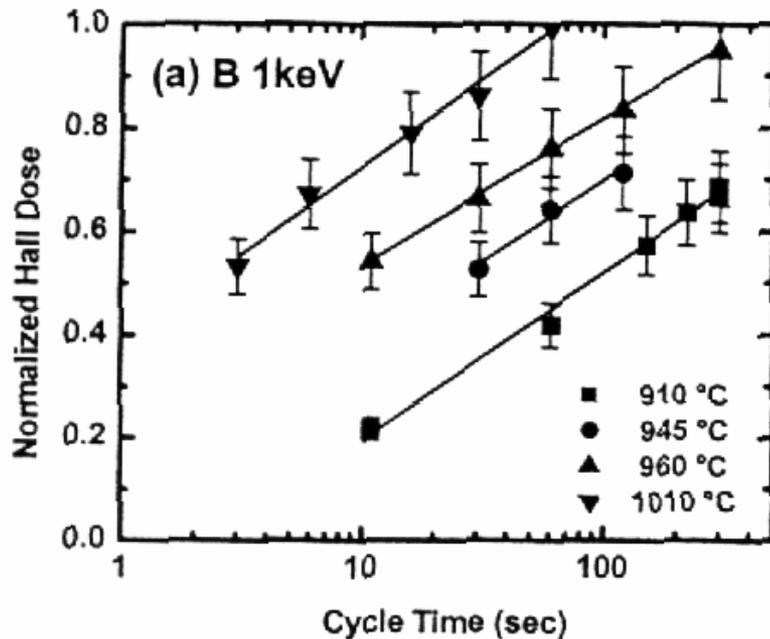
  - eficiência na ativação elétrica (dose Hall)

  - medida da energia de ativação

- SIMS (Espectroscopia de massa dos íons secundários)

  - profundidade da junção

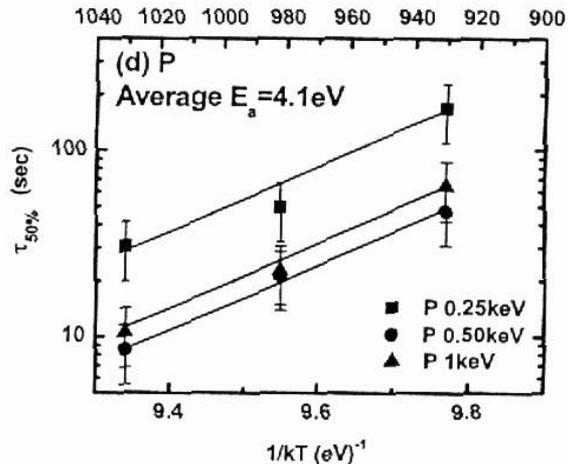
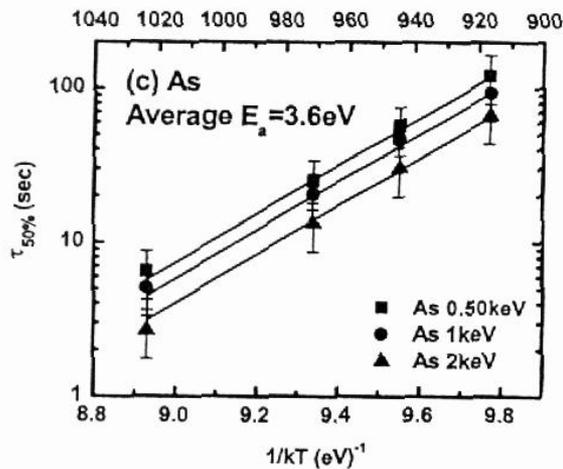
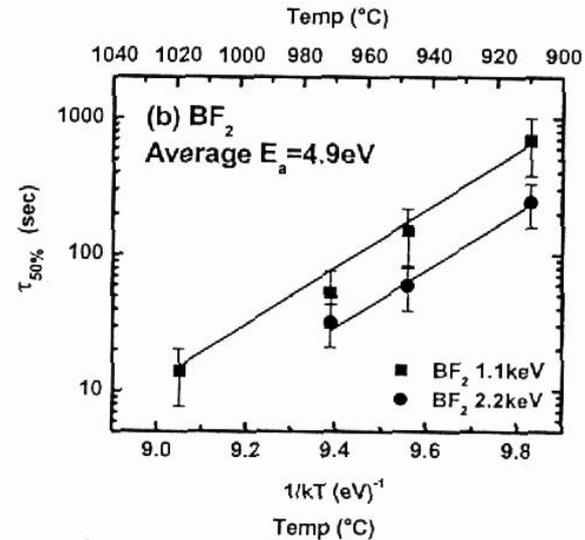
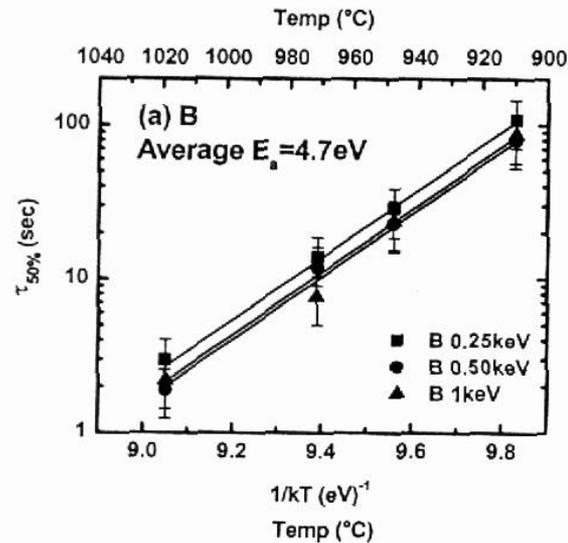
# Ativação de dopantes (dose Hall) para B e As em função da temperatura e tempo de tratamento.



# Energia de ativação para as quatro espécies implantadas

$\tau_{50\%}$  = tempo p/ atingir 50% da ativação elétrica

$E_a$  = energia média obtida pelo ajuste de todos os dados

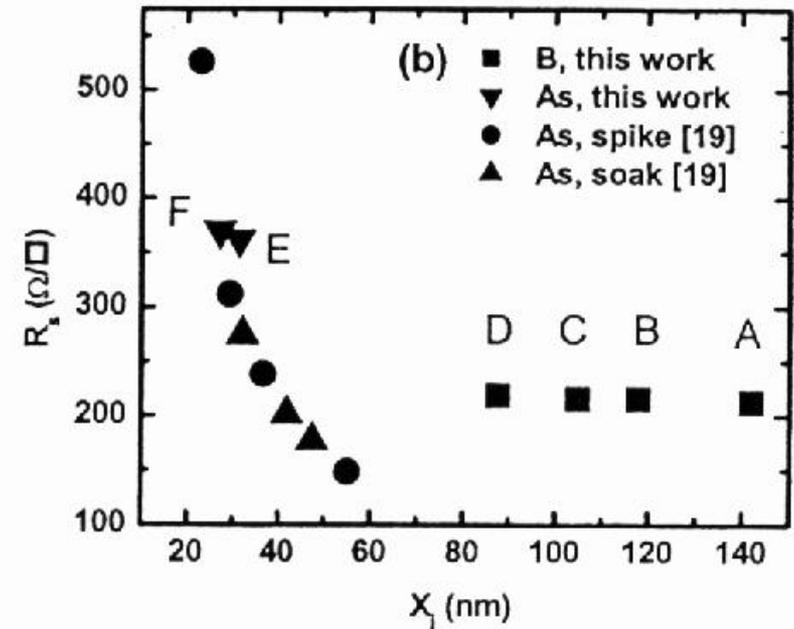
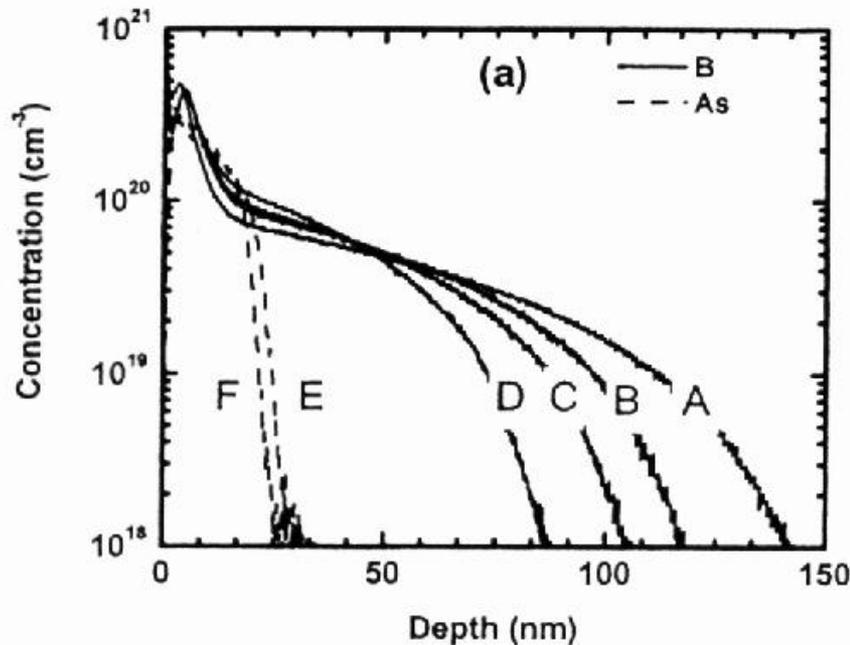


## (a) Perfis em profundidade obtidos por SIMS para diversos tratamentos térmicos

(A) 910°C/220s; (B) 945°C/60s; (C) 960°C/30s; (D) 1100°C/5s;  
(E) 945°C/30s; (F) 1025°C/2s;

## (b) $x_j$ e resistência de folha

estão incluídos resultados para o As obtidos da literatura, p/ comparação



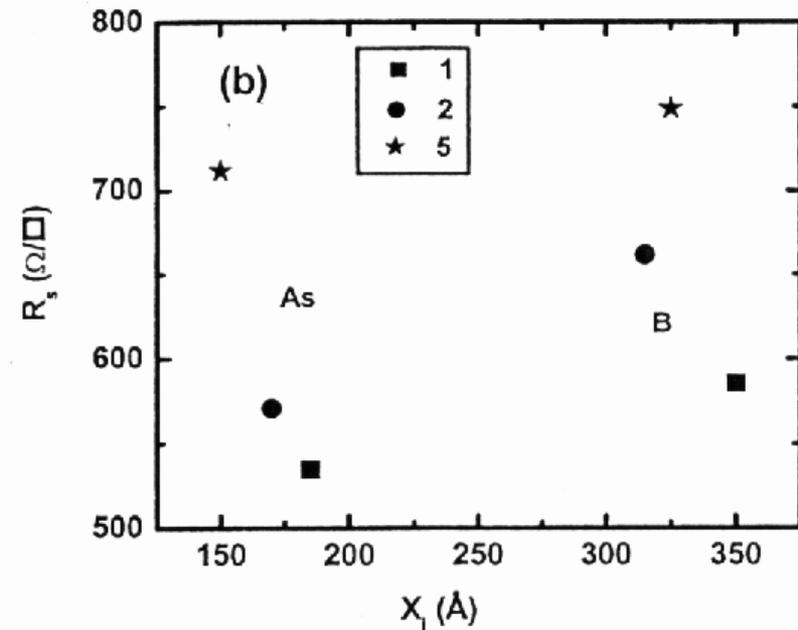
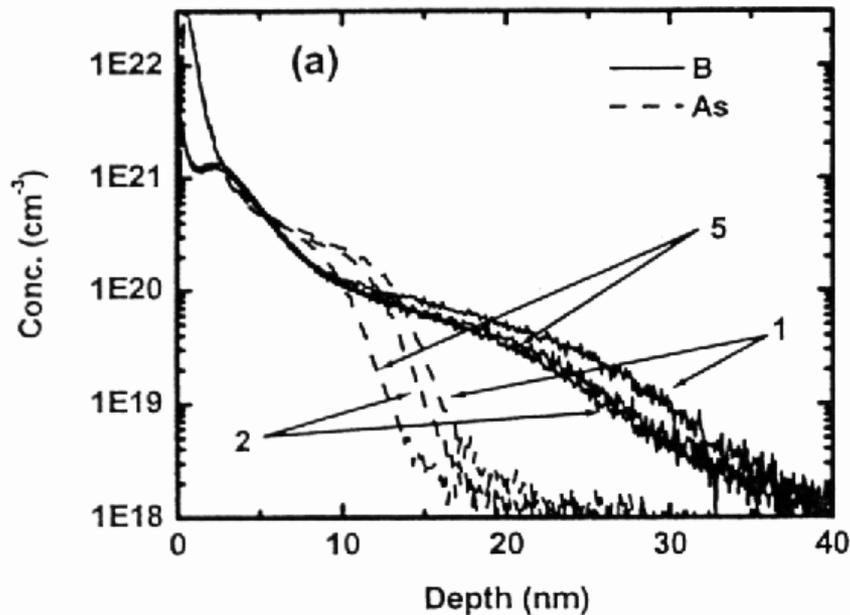
Note que a mudança nas condições de tratamento resulta somente no movimento da curva, conservando o mesmo perfil

# Efeito da rampa de temperatura:

## (a) resultados de SIMS

Ramp-up/ramp-down: (1) 150-75°C/s; (2) 250-90°C/s;  
(5) 400-135°C/s

## (b) $x_j$ e resistência de folha



Perfil do As é mais sensível à mudança de rampa, mas com aumento da resistência de folha

## Sumário

- A energia de ativação do boro, 4,7 eV está relacionada à interação com os defeitos pontuais, mas o papel destes ainda não está esclarecido. As energias do arsênio e do fósforo (3,6 e 4,1 eV) parecem estar relacionadas à difusão dos dopantes
- Para cada temperatura há uma rampa ótima, que produz junções rasas com baixa resistência de folha
  - Rampas lentas aumentam a difusão
  - Rampas rápidas reduzem a ativação dos dopantes
- Para o boro a melhor condição é alta temperatura e baixo tempo