

PSI-5761 Introdução aos Processos de Fabricação em Microeletrônica

Curso de pós-graduação - 2016

Aula05 - Dopagem e Implantação Iônica

Laboratório de
Microeletrônica
Escola Politécnica
Universidade de São Paulo

Prof. Roberto K. Onmori sala C2-70 (tel. + 55 11 3091 5251)

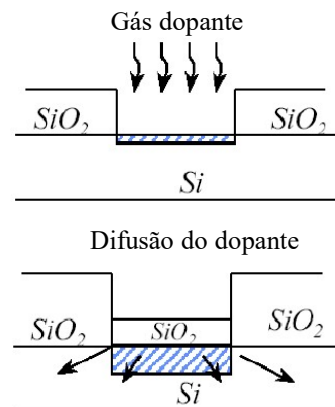
email: rkonmori@lme.usp.br ou onmori@usp.br

Prof. Fernando J. Fonseca sala C2-65 (tel. + 55 11 3091 0730)

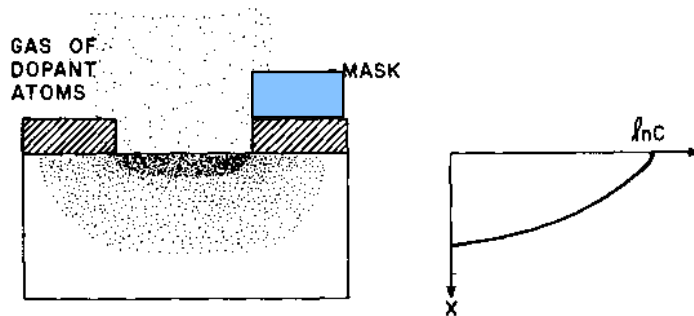
email: Fernando.epusp@gmail.com.br

Introdução

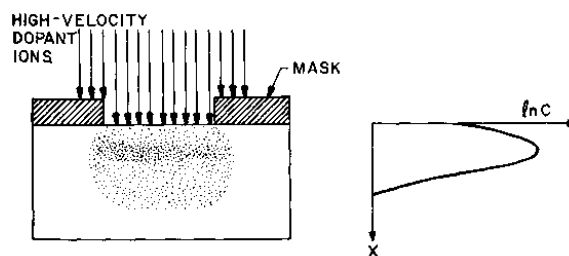
- Historicamente, necessidade de introduzir impurezas por difusão para obter regiões do tipo n (P, As) ou p (B) no silício.
- Dopagem é a exposição da lâmina de Si em uma fonte contendo P, As ou B (deposição) e
- e a sua difusão em alta temperatura



- Até 1970, uso de deposição em elevadas temperaturas em fase gasosa.
 - Perfil da deposição:

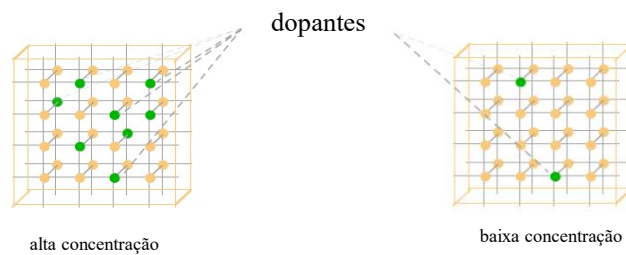


- A partir de 1970, o processo de dopagem passou a ser via implantação iônica com o seguinte aspecto:



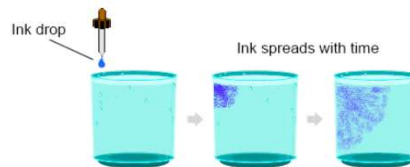
Processo de Difusão

- Altas temperaturas: 600-1200 °C
- Equação de Fick
- Perfil de Difusão
- Máscaras para a Difusão



Equação de Fick

1855 – teoria da difusão

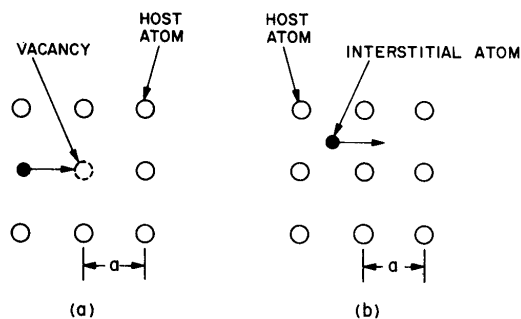


Flux of ink

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

Proportionality constant (Diffusion coefficient)

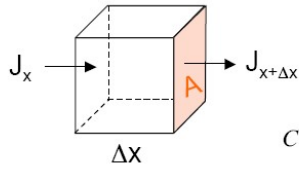
driving force



Models of atomic diffusion mechanisms for a two-dimensional lattice, where a is the lattice constant. (a) Vacancy mechanism. (b) Interstitial mechanism.¹

Balço de Massa

$$\{\text{Fica acumulado}\} = \{\text{entrada}\} - \{\text{saída}\}$$



$$C \equiv \left[\frac{\#}{\text{cm}^3} \right]$$

$$J \equiv \left[\frac{\#}{\text{cm}^2 \text{ s}} \right]$$

$$C_{t+\Delta t} \Delta x - C_t \Delta x = J_x \Delta t - J_{x+\Delta x} \Delta t$$

$$\frac{C_{t+\Delta t} - C_t}{\Delta t} = - \frac{J_{x+\Delta x} - J_x}{\Delta x} \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial J}{\partial x}$$



PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica

Modelo para 1 D

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

$$G_n = R_n = 0$$

Fick's diffusion equation.
$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2}$$

diffusion coefficients
$$D = D_o \exp \left[\frac{-E_a}{kT} \right]$$

Necessita de 1 condição inicial e 2 condições de contorno



Perfil de difusão

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

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

Table 1 Error Function Algebra

$$\operatorname{erf}(x) \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy$$

$$\operatorname{erfc}(x) \equiv 1 - \operatorname{erf}(x)$$

$$\operatorname{erf}(0) = 0$$

$$\operatorname{erf}(\infty) = 1$$

$$\operatorname{erf}(x) \cong \frac{2}{\sqrt{\pi}} x \text{ for } x \ll 1$$

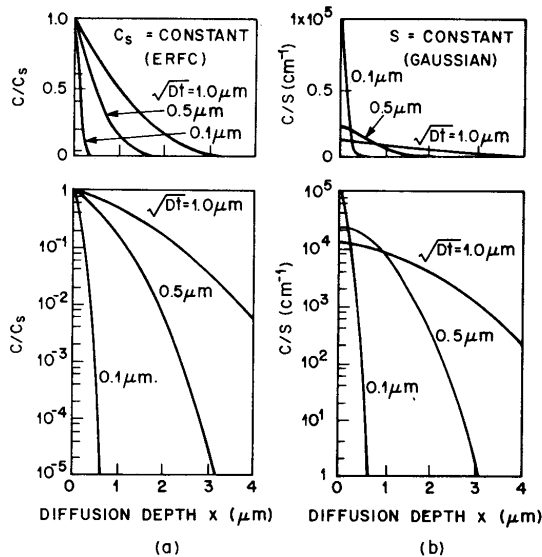
$$\operatorname{erfc}(x) \cong \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{e^{-x^2}}{x} \text{ for } x \gg 1$$

$$\frac{d}{dx} \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2}$$

$$\frac{d^2}{dx^2} \operatorname{erf}(x) = -\frac{4}{\sqrt{\pi}} x e^{-x^2}$$

$$\int_0^x \operatorname{erfc}(y') dy' = x \operatorname{erfc}(x) + \frac{1}{\sqrt{\pi}} (1 - e^{-x^2})$$

$$\int_0^\infty \operatorname{erfc}(x) dx = \frac{1}{\sqrt{\pi}}$$

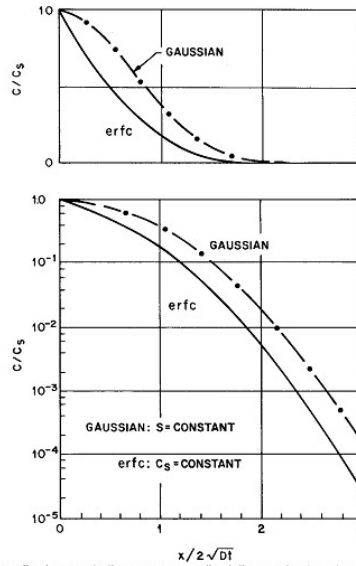


SixOyPz
SixOyBz

Fig. 4 Diffusion profiles. (a) Normalized complementary error function (erfc) versus distance for successive diffusion times. (b) Normalized Gaussian function versus distance for successive times.



Distribuição Gaussiana x erfc



Donors (Electron-increasing Dopants)

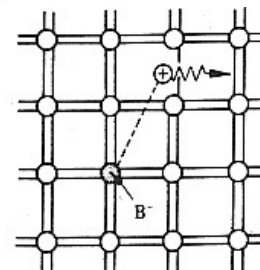
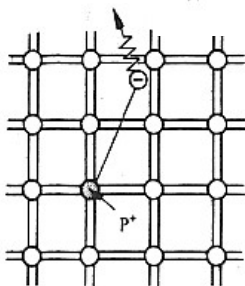
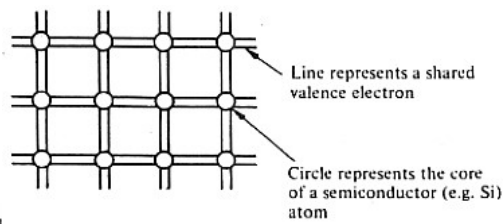
Acceptors (Hole-increasing Dopants)

$P \leftarrow$
 As
 Sb

Column V
elements

$B \leftarrow$
 Ga
 In
 Al

Column III
elements



Intersticial

O, Cu, Au, Fe, Ni

$E_A \approx 0.5 - 1 \text{ eV}$

Vacância

P, B, As, Al, Ge, In

$E_A \approx 3 - 4 \text{ eV}$

PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica

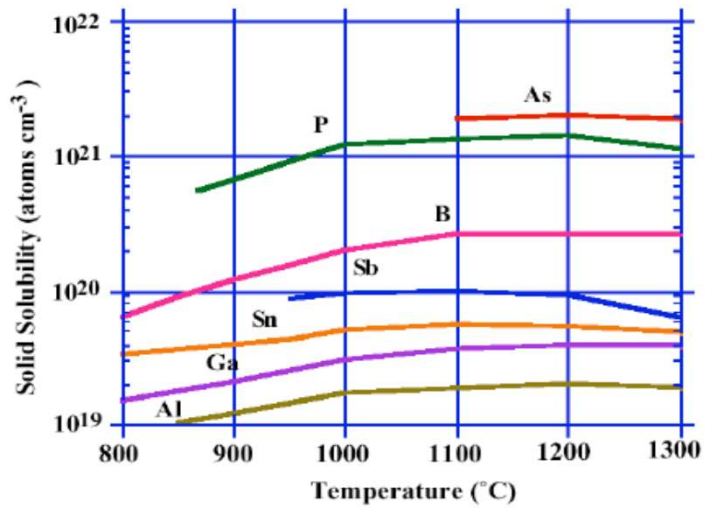
Difusão no Silício

Diffusion of B in Si:

T	D
800 °C	$10^{-16} \text{ cm}^2/\text{s}$
1200 °C	$10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$

PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica

Solubilidade



Deposição

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2}$$

IC $C(x,0) = 0$

BCs $C(0,t) = C_S$

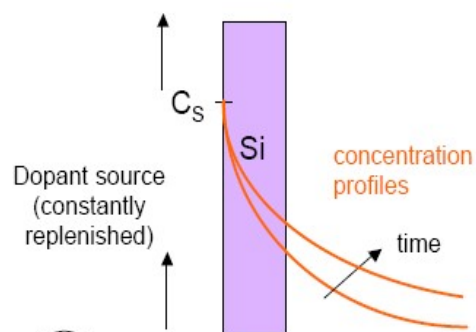
$C(\infty,t) = 0$

Solution:

$$C(x,t) = C_S \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right]$$

complementary error function

Diffusion length



Penetração

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2}$$

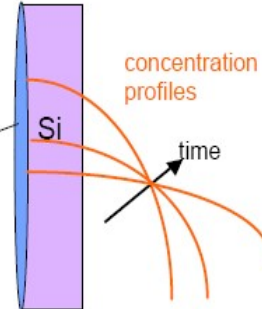
Dirac delta function

IC $C(x,0) = Q_0 \delta(x)$

BCs $\frac{\partial C(0,t)}{\partial x} = 0$

$$C(\infty,t) = 0$$

Thin surface layer with total impurity present of Q_0 [atoms/cm²]

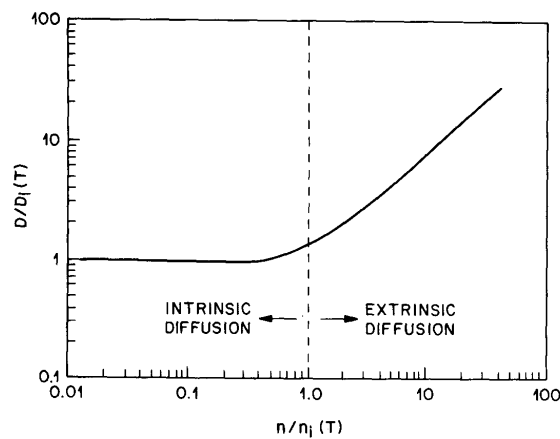


Solution:

$$C(x,t) = \frac{Q_0}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-x^2/4Dt}$$



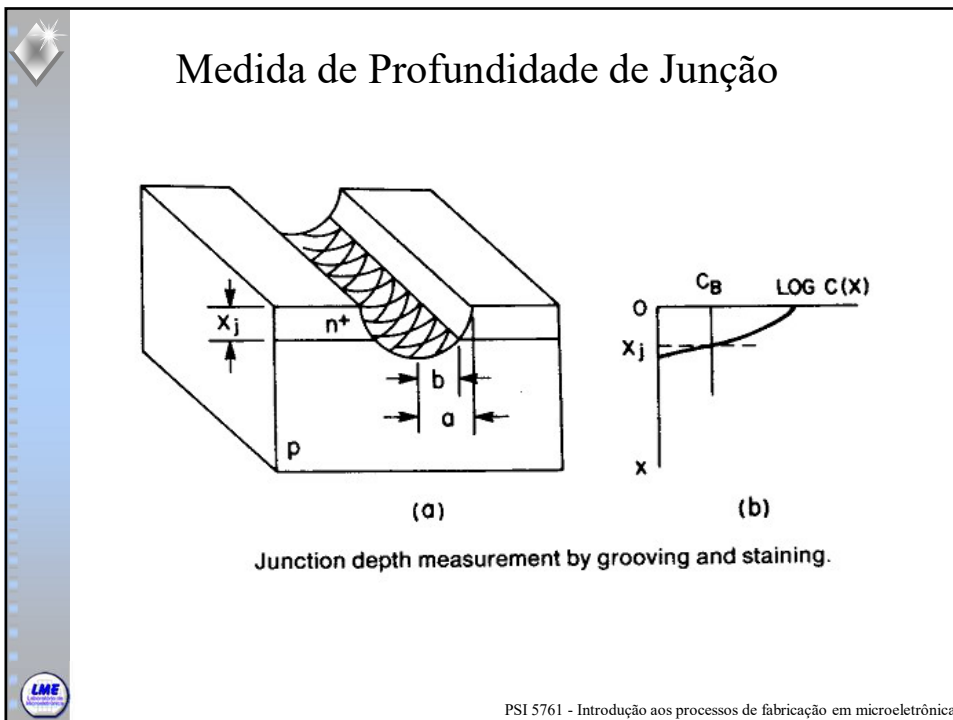
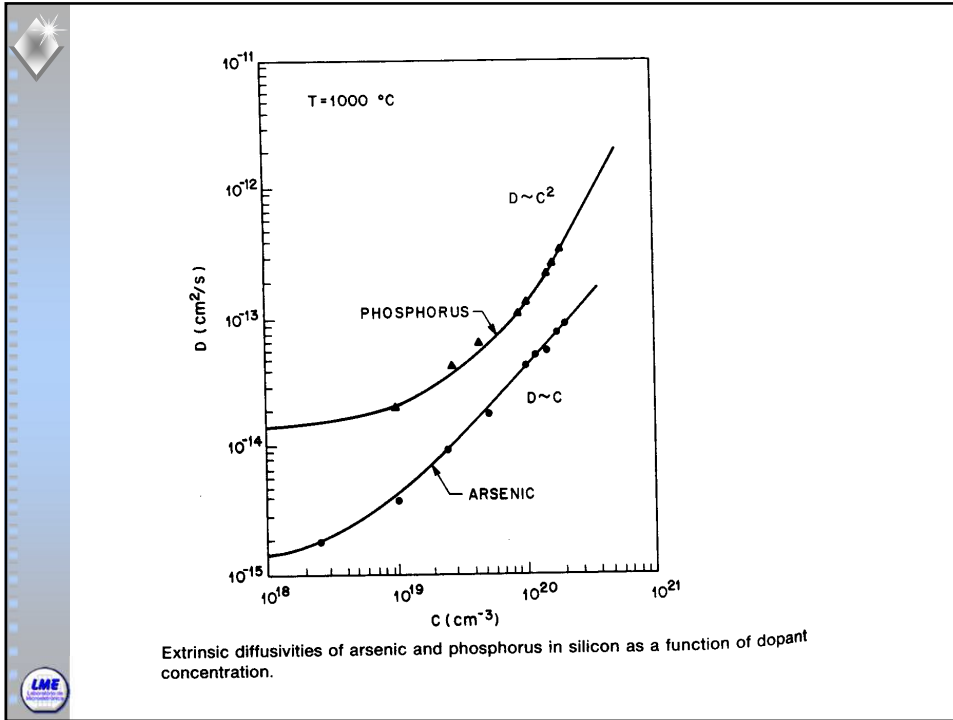
PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica



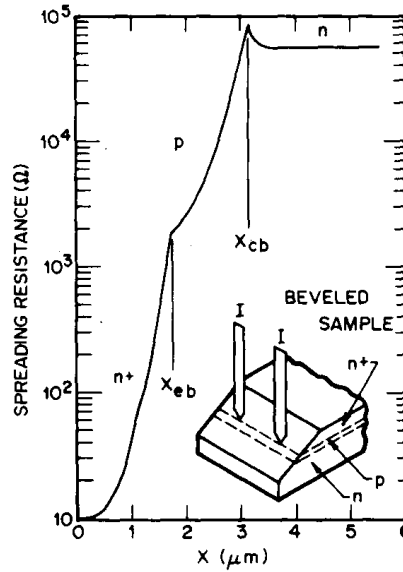
Donor impurity diffusion coefficient versus electron concentration showing regions of intrinsic and extrinsic diffusion.



PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica

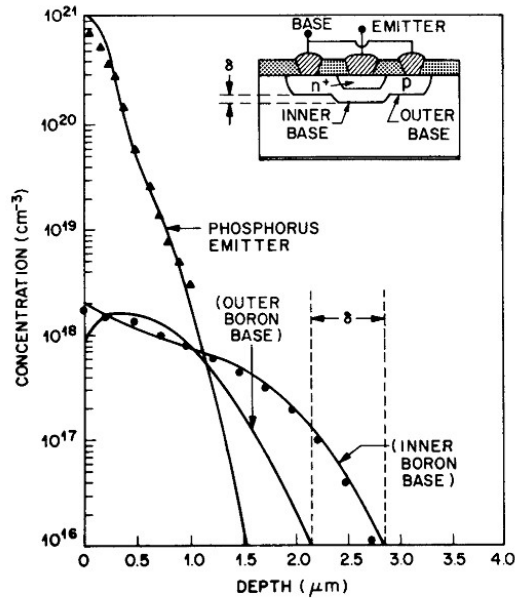


Spread Resistance Probe



The spreading resistance profile of an n-p-n transistor structure.
 x_{eb} = the emitter-base junction depth = 1.7 μm ; x_{cb} = the collector-base junction depth = 3.2 μm .

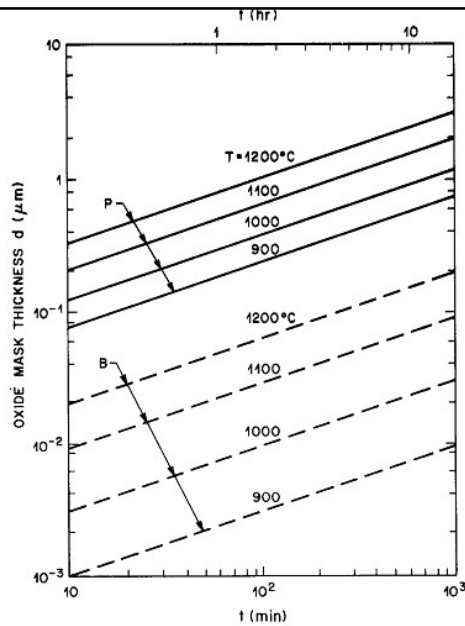
PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica



Calculated and measured boron and phosphorus n-p-n transistor profile showing the emitter push effect. Emitter diffusion is at 1000° C, for 1 hr, followed by a 900° C, 45-min steam oxidation.

PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica

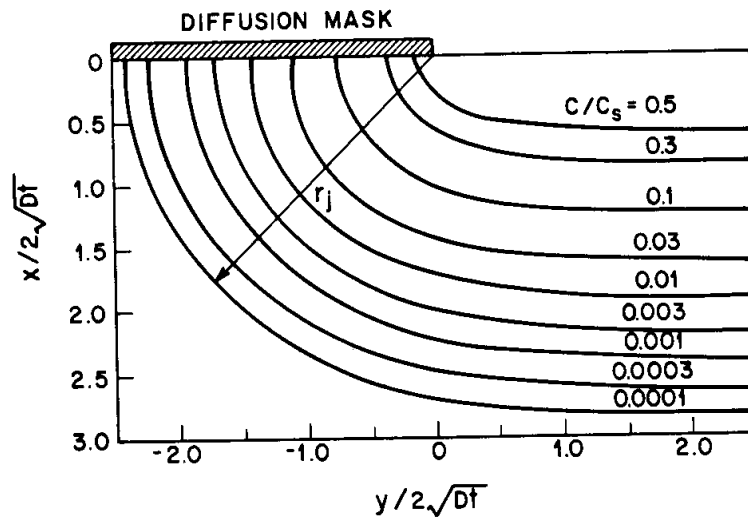
Óxido como Máscara



Minimum thickness of dry-oxygen-grown SiO₂ required to mask against phosphorus and boron as a function of diffusion time with diffusion temperature as a parameter.

PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica

Difusão Lateral



Diffusion contours at the edge of an oxide window, where r_j is the radius of curvature.

PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica

PSI-3552 Fabricação e Caracterização de Dispositivos Nanoeletrônicos

Aula 03 - Dopagem Implantação Iônica

Laboratório de
Microeletrônica
Escola Politécnica
Universidade de São Paulo

Prof. Roberto K. Onmori sala C2-70 (tel. 3091-5251)

email: RKONMORI@LME.USP.BR

Prof. Fernando J. Fonseca sala C2-65 (tel. 3091-0730)

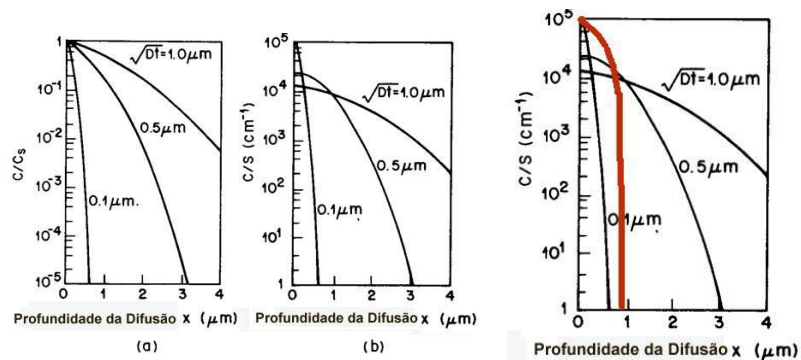
email: FERNANDO.EPUSP@GMAIL.COM

Problema a ser resolvido:

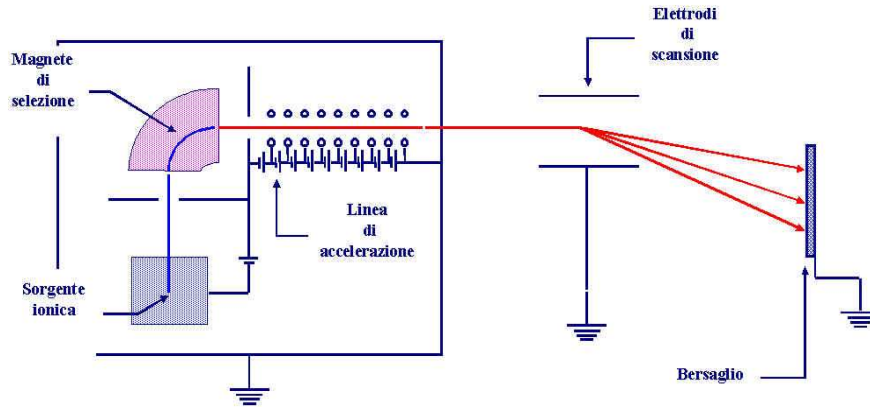
A cada evolução de uma tecnologia ...

As dimensões superficiais ficam menores e

E elas devem ser mais dopadas;



Implantação Iônica



Dose depende do da **corrente iônica** e **tempo** de implantação
Profundidade depende da **energia** do íon

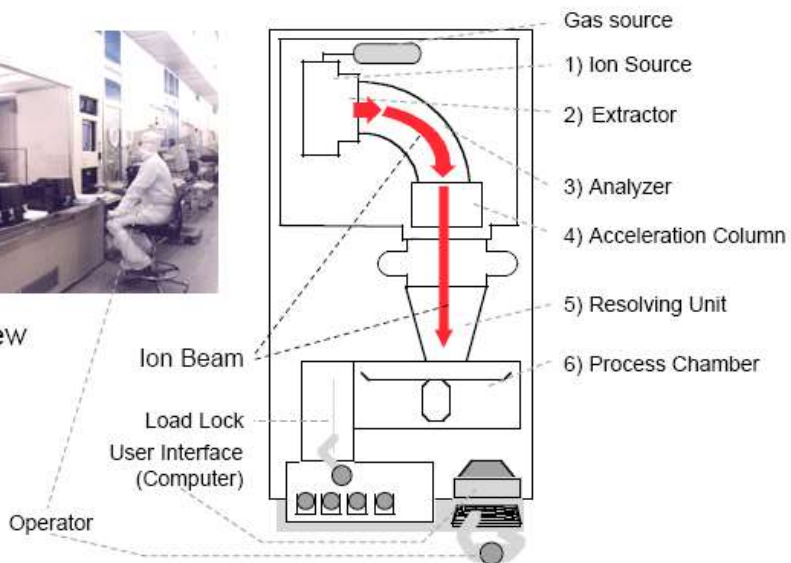


PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica

Equipamento de Implantação Iônica



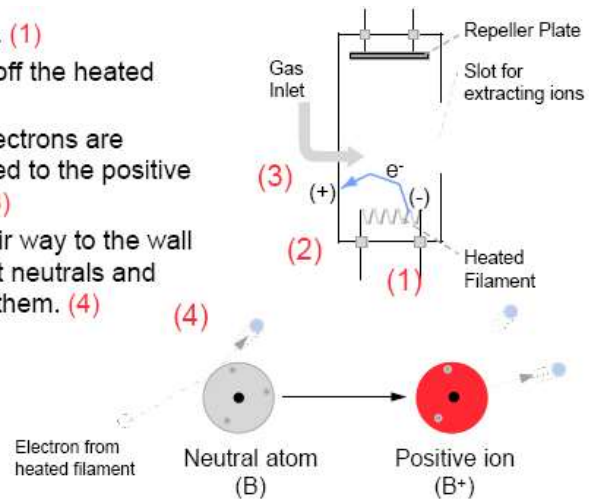
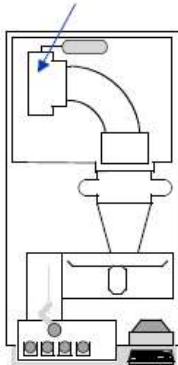
Outside view



PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica

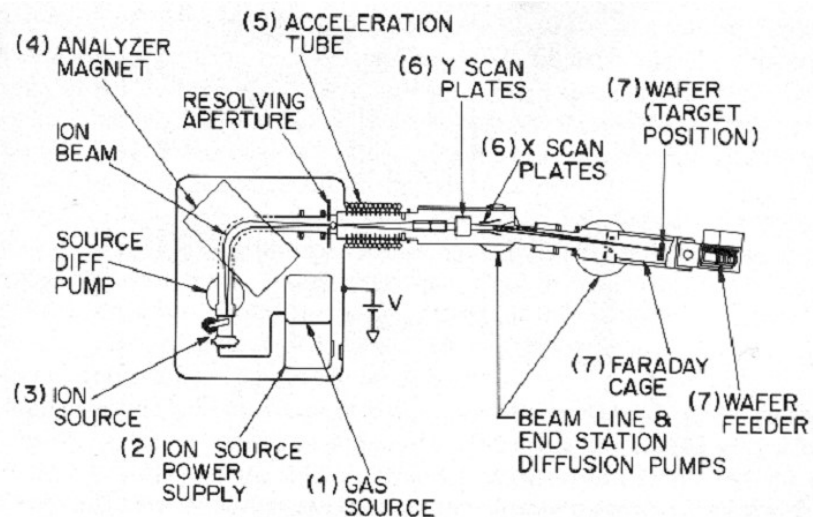
O Implantador Iônico

- The filament is heated. (1)
- Electrons are "boiled" off the heated filament. (2)
- The electrons are attracted to the positive wall. (3)
- On their way to the wall they hit neutrals and ionize them. (4)



PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica

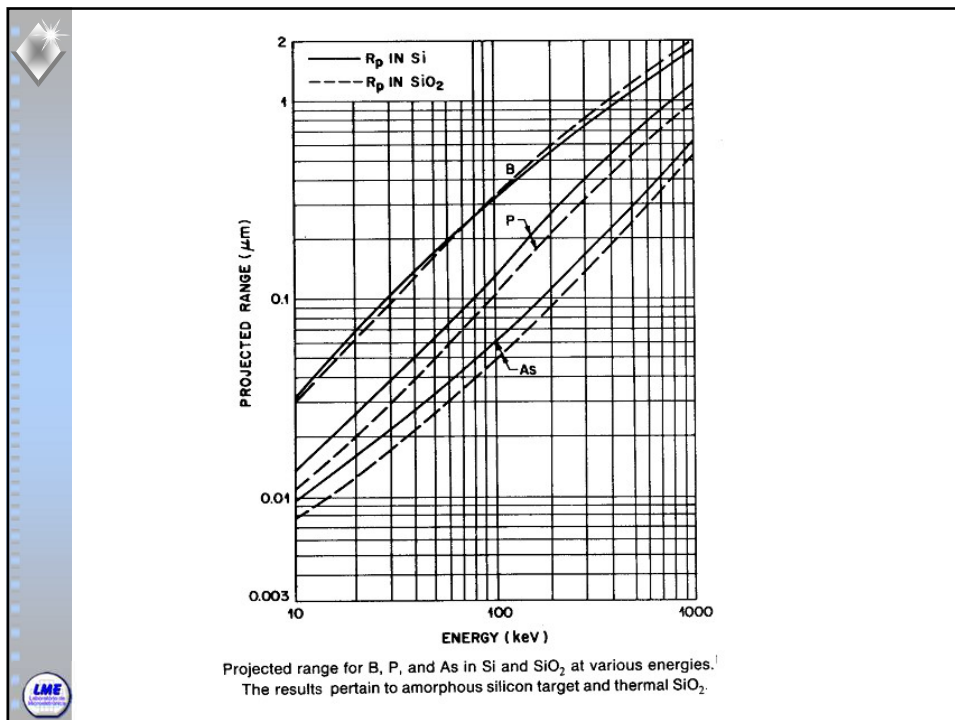
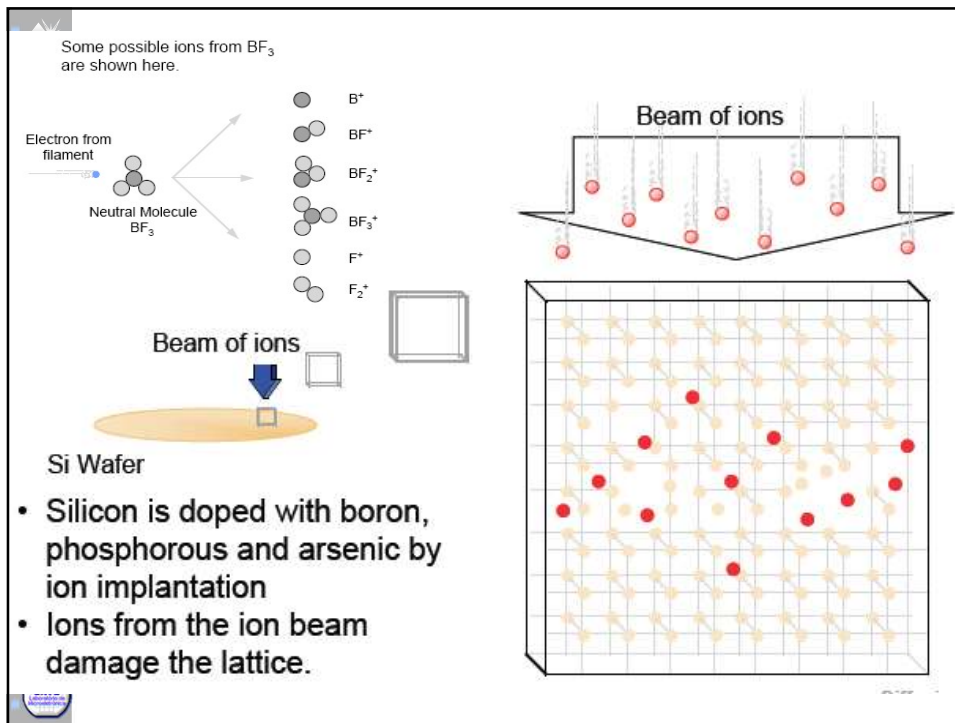
Implantação Iônica



Schematic diagram of a typical commercial ion implant system.



PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica



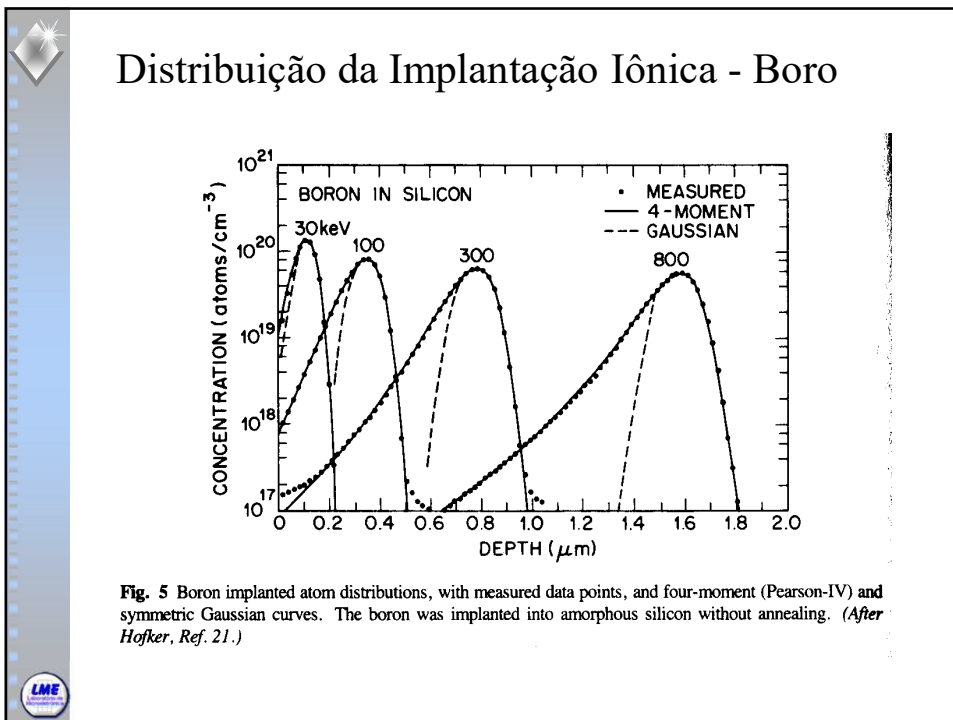
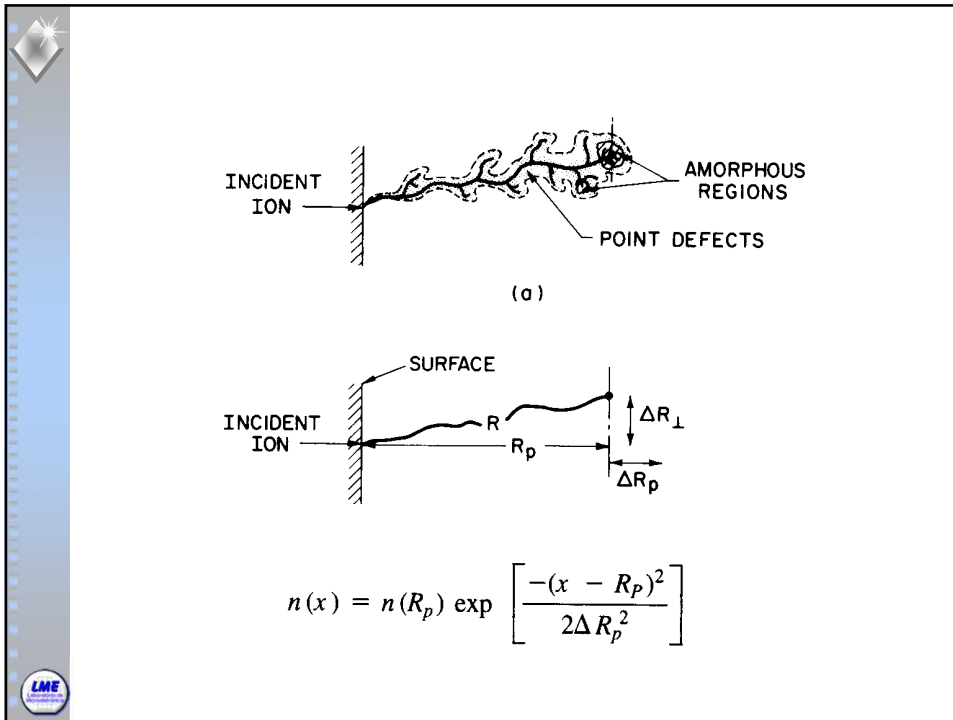


Fig. 5 Boron implanted atom distributions, with measured data points, and four-moment (Pearson-IV) and symmetric Gaussian curves. The boron was implanted into amorphous silicon without annealing. (After Hofker, Ref. 21.)

Danos na Estrutura Cristalina

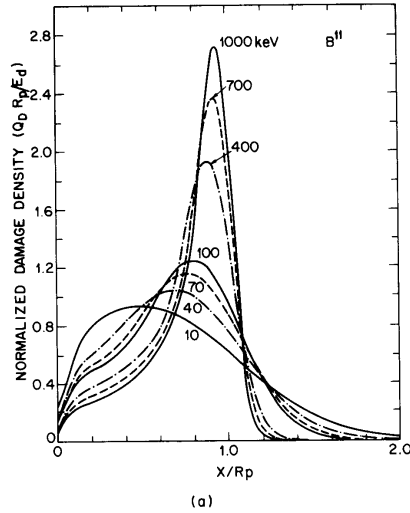
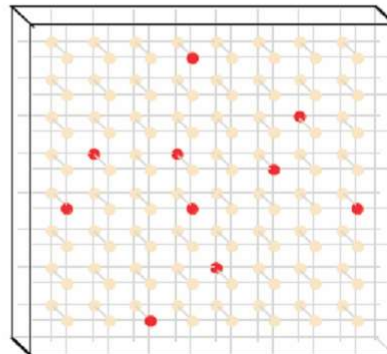


Fig. 12 Calculated damage density profiles of (a) boron and (b) arsenic. (After Brice, Ref. 30.) The values of deposited energy Q_D are obtained by multiplying the normalized damage density by E_d/R_p (eV/Å). Some values of E_d/R_p for B are 12.9 (10 keV) and 6.1 (100 keV); for As they are 91.4 (10 keV) and 99.3 (100 keV).

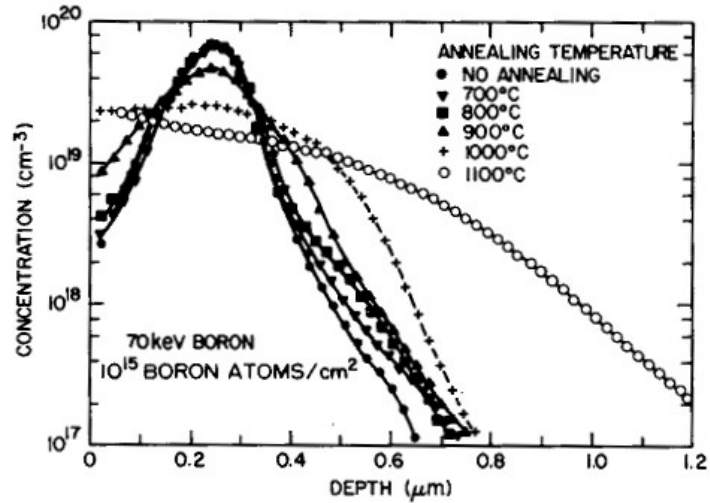
Annealing



- Annealing is a process where the wafer is heated to repair the damage to the lattice
- The dopant ions become part of the crystal lattice (Activation)
- The ions also spread out during anneal (Diffusion)

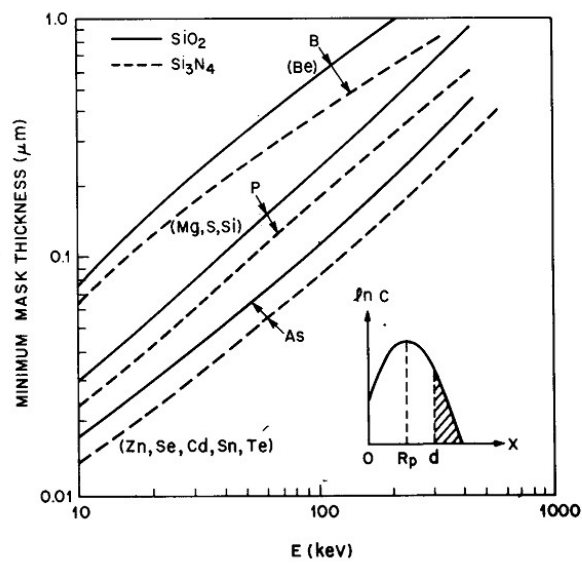


Annealing



Boron atom concentrations as a function of annealing at various temperatures. The anneal time is 35 minutes. (After Hofker, Ref. 21.)

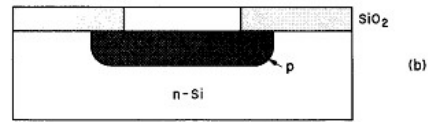
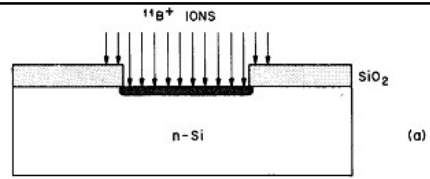
Proteção contra a Implantação Iônica



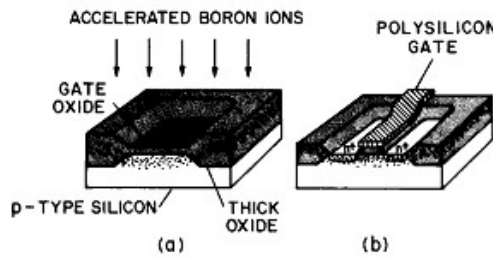
Minimum thickness of SiO_2 and Si_3N_4 for a masking effectiveness of 99.99%.
Insert shows ion penetration beyond a depth d .

Usos

- Ajuste na tensão limiar V_{th} de um transistor MOS
- Dopagem nos contatos de Gate de um MOSFET



(a) Predeposition using ion implantation. (b) After drive-in diffusion.



Threshold voltage adjustment using boron ion implantation.²⁹

Parâmetros de Implantação

Equipamento:

Tempo
Corrente

Energia

Ângulo de incidência
Na lâmina

Resultado:

Dose

Profundidade

Uniformidade

“Channeling”

(110) (111)
 (100)

- Ions in beam 3 will hit the atoms or bonds in the lattice and stop early.

Cargas no processo de Implantação

Wafer surface

(100) tilted

Cargas no processo de Implantação

Target
 (2) Electrons from target
 (1) Electrons from filament
 Filament
 (3) Positively charged wafer

PSI 5761 - Introdução aos processos de fabricação em microeletrônica 2013 Aula 05 – Dopagem e Implantação Iônica Rkonmori 05.42

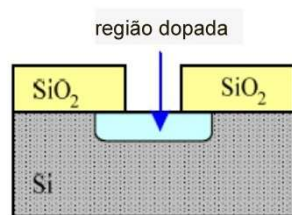
Comparação

Difusão

Alta Temperatura,
Máscara densa (SiO_2)

Perfil de dopagem ISOtrópico

NÃO consegue controlar
INDEPENDENTEMENTE
a concentração e a
profundidade da junção

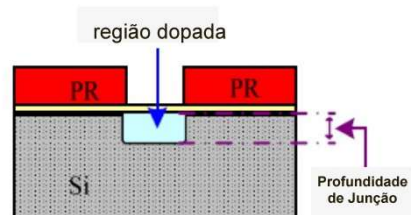


Implantação Iônica

Baixa Temperatura,
Máscara de Fotoresiste (FR)


Perfil de dopagem ANISOtrópico

CONSEGUE controlar
INDEPENDENTEMENTE
a concentração e a
profundidade da junção



Contaminantes

- Podem vir de:
 - • Metálicos – impactos nas paredes....
 - Fe, Cr, Ni.
 - • resíduos – várias espécies de dopantes (P, As, B...)
 - • Na, Ca, Mg,
 - • Óleo da Bomba difusora, carbono, oxigênio, nitrogênio...



Tema p Artigo - Difusão e Implantação Iônica

Problemas nos perfis de dopagem (p ou n)

- técnicas de detecção
- novos modelos matemáticos

