Universidade de São Paulo
Escola Politécnica
Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos

PSI-5761 - Introdução aos Processos de Fabricação em Microeletrônica

Oxidação Térmica

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

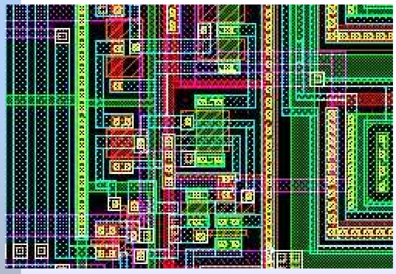
Introdução

- Uso de diferentes tipos de filmes - 4 grupos:
  - Óxidos térmicos
  - Camadas dielétricas
  - Silício Policristalino e
  - Metais.

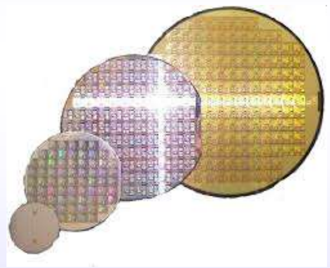
2

Na fabricação dos CIs:

O projetista de Circuitos Integrados gera um desenho com regiões com condutividades diferentes!

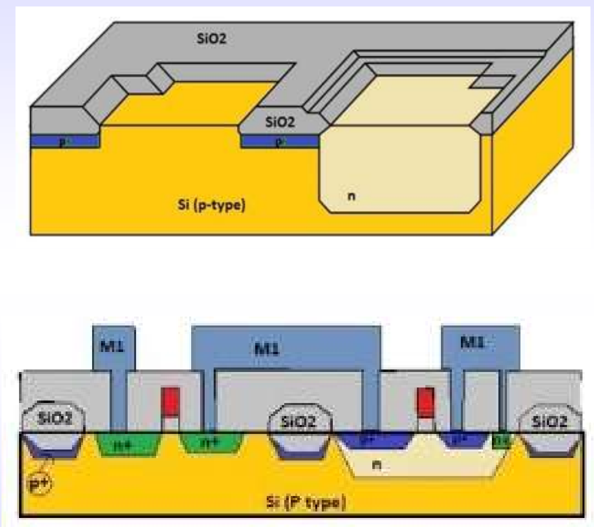


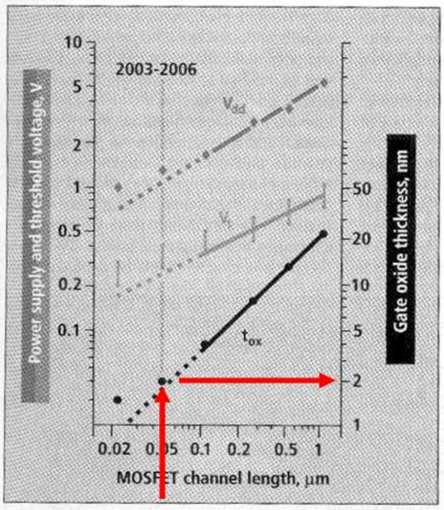
Projeto de CI



CI sobre o Silício

O projeto do CI exige a definição de regiões N e P





[1] As IC manufacturing techniques progress, CMOS devices with shorter channel lengths will switch faster and use less power. Lower power-supply and threshold voltages (V_{dd} and V_t) and thinner gate oxides (t_{ox}) will accompany the shrinking channel lengths. Transistors built between the years 2003 and 2006 will have a minimum channel length of 0.05 µm, a power supply voltage of 1.2 V, and a threshold voltage near 0.25 V.

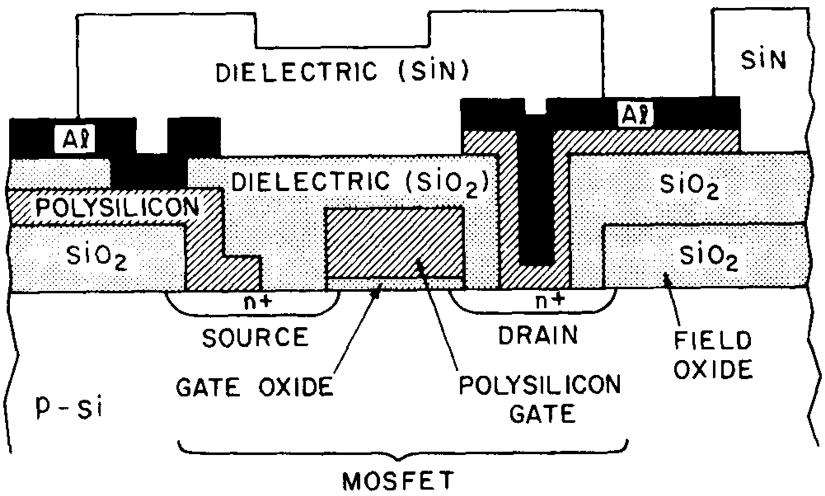
Encolhimento do Transistor

Em 1999 previa-se que teríamos em 2003 um comprimento de canal de 0,05 µm

Atualmente já se estuda o uso de uma espessura do óxido de 2 nm ou 20 angstrons !!

5

MOSFET



Schematic view of a MOSFET cross section.

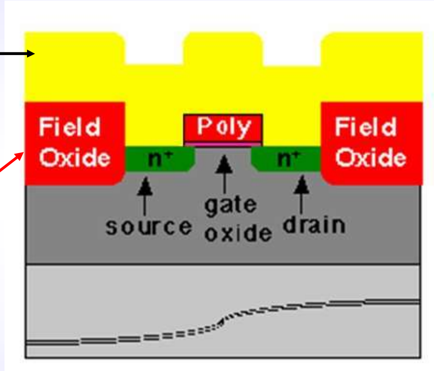
6

Principais usos de um óxido no CI

Vários óxidos são crescidos ou depositados para isolar ou proteger a formação do transistor

Óxido da Porta (*gate*) é o melhor óxido que se possa obter.

Óxidos de isolação são depositados para isolar os transistores das camadas de interconexão que serão depositadas sobre eles



Óxidos de Campo (*Field*) são crescidos para isolar cada transistor do transistor adjacente.

Óxidos de passivação são depositados no fim do processo sobre todos os transistores a fim de proteger a superfície de qualquer dano.

Tipos de Oxidação

- Podemos separar em dois grupos:
  - Térmica
  - Anodização eletroquímica
  - Deposição (CVD) e
  - Reação por plasma

Crescimento do SiO_2 utilizando o substrato como fonte de silício

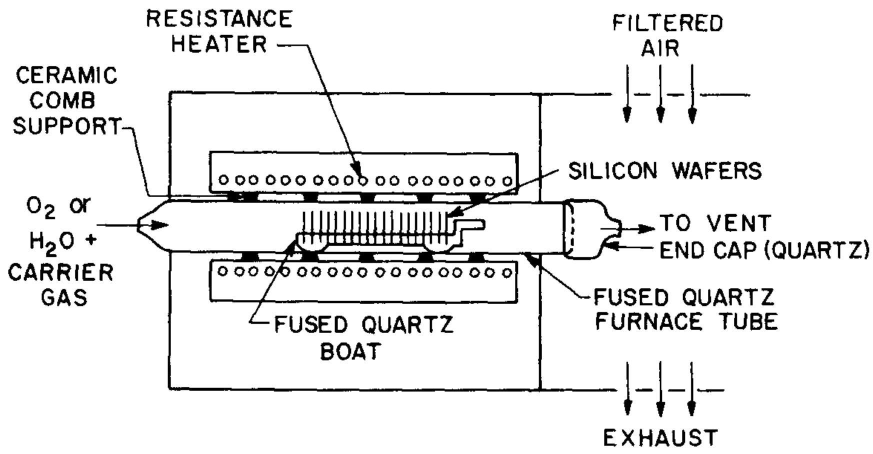
Deposição do SiO_2 com o silício vindo de outra fonte independente do substrato de silício

8

Slide 8

F1 Fernando; 31/03/2020

O Forno de Oxidação



Schematic cross section of a resistance-heated oxidation furnace. The silicon wafer loading area is shown in a laminar hood.

O Forno de Oxidação

Fornos de oxidação:

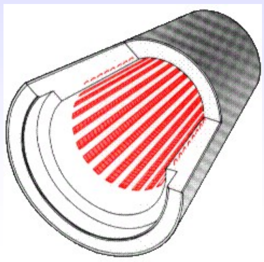
- pressão atmosférica (tubo aberto)
- elevado controle de Temperatura
- automático

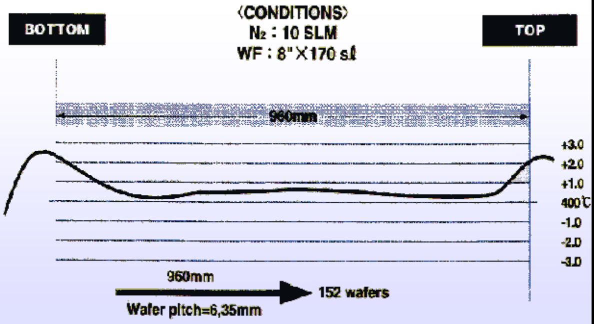
O Forno de Oxidação

11

Elementos do Forno de Oxidação

Elemento resistivo





Fornos de oxidação:

- precisão da temperatura

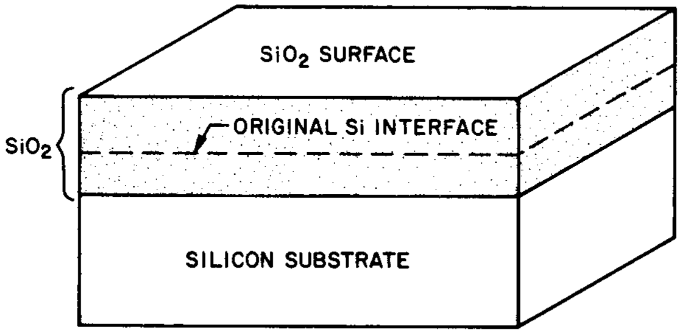
Variação < 1°C na região de trabalho

12

A reação química do processo de crescimento do óxido de silício

$$Si(solid) + O_2(gas) \longrightarrow SiO_2(solid)$$

$$Si(solid) + 2H_2O(gas) \longrightarrow SiO_2(solid) + 2H_2(gas)$$



Growth of silicon dioxide by thermal oxidation.

Volume e Espessura do óxido crescido

$$\frac{\text{Molecular weight of Si}}{\text{Density of Si}} = \frac{28.09 \ \ g/mole}{2.33 \ \ g/cm^3} = 12.06 \ \ cm^3/mole \ .$$

The volume of 1 mole silicon dioxide is

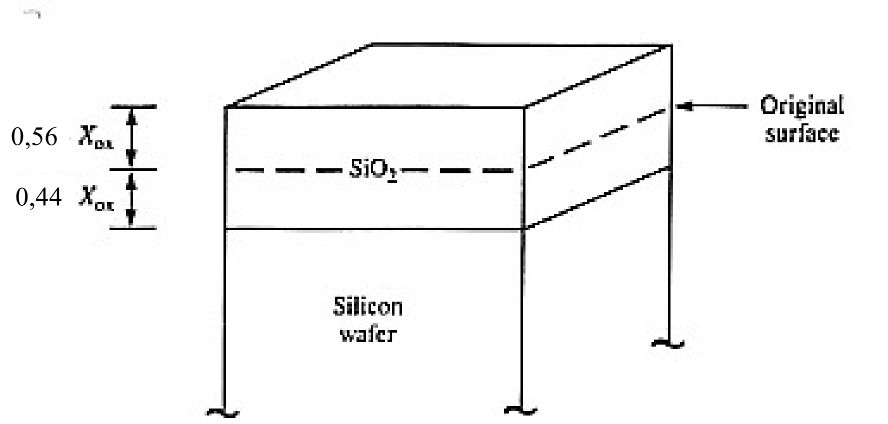
$$\frac{\text{Molecular weight of } SiO_2}{\text{Density of } SiO_2} = \frac{60.08 \ g/mole}{2.21 \ g/cm^3} = 27.18 \ cm^3/mole \ .$$

$$\frac{\text{Thickness of Si} \times \text{area}}{\text{Thickness of } SiO_2 \times \text{area}} = \frac{\text{volume of 1 mole of Si}}{\text{volume of 1 mole of } SiO_2}$$

$$\frac{\text{Thickness of Si}}{\text{Thickness of } SiO_2} = \frac{12.06}{27.18} = 0.44$$

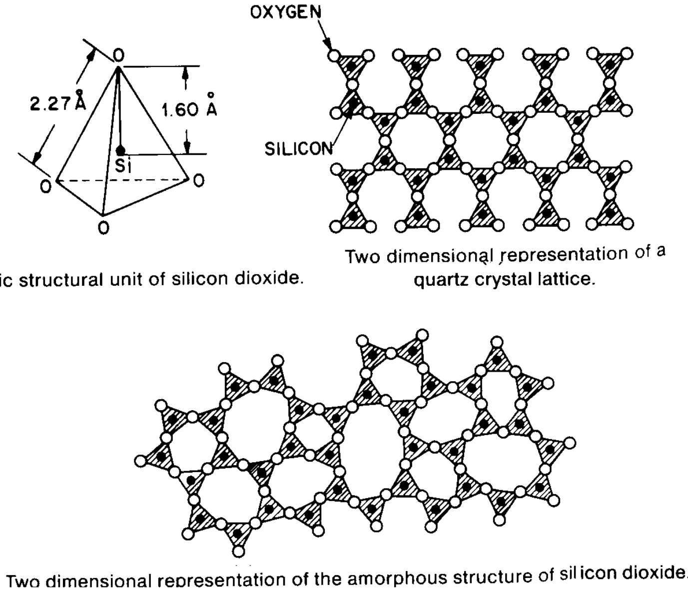
Thickness of silicon $= 0.44$(thickness of SiO_2).

Superfície inicial x Superfície final



15

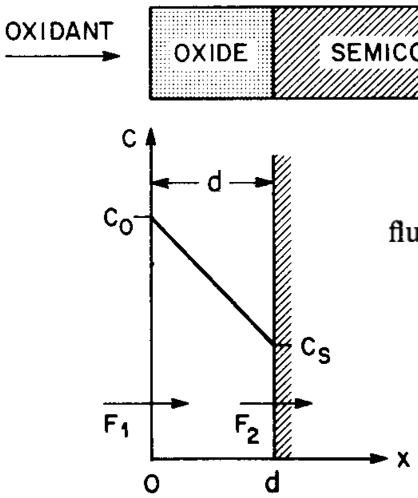
Estrutura do SiO_2



Basic structural unit of silicon dioxide.

Two dimensional representation of a quartz crystal lattice.

Two dimensional representation of the amorphous structure of silicon dioxide.



Basic model for the thermal oxidation of silicon.

$$\text{flux} \quad F_1 = D\frac{dC}{dx} \simeq \frac{D(C_0 - C_s)}{x}$$

C_0 is 5.2×10^{16} molecules/cm^3

C_s at the surface of silicon

D is the diffusion coefficient

x is the thickness of the oxide layer already present.

Equacionamento do Processo de Oxidação

$$F_1 = D\frac{dC}{dx} \simeq \frac{D(C_0 - C_s)}{x}$$

$$F_2 = kC_s$$

k is the surface reaction rate constant for oxidation.

$$F_1 = F_2 = F.$$

$$F = \frac{DC_0}{x + (D/k)}.$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{F}{C_1} = \frac{DC_0/C_1}{x + (D/k)}$$

$$x^2 + \frac{2D}{k}x = \frac{2DC_0}{C_1}(t + \tau) \qquad \tau \equiv (d_o^2 + 2Dd_o/k)C_1/2DC_0$$

$$x = \frac{D}{k}\left[\sqrt{1 + \frac{2C_0k^2(t + \tau)}{DC_1}} - 1\right]$$

Equação de crescimento do óxido

$$X_{ox} = \frac{A}{2}\left[\sqrt{1 + \frac{(t+\tau)}{A^2/4B}} - 1\right]$$

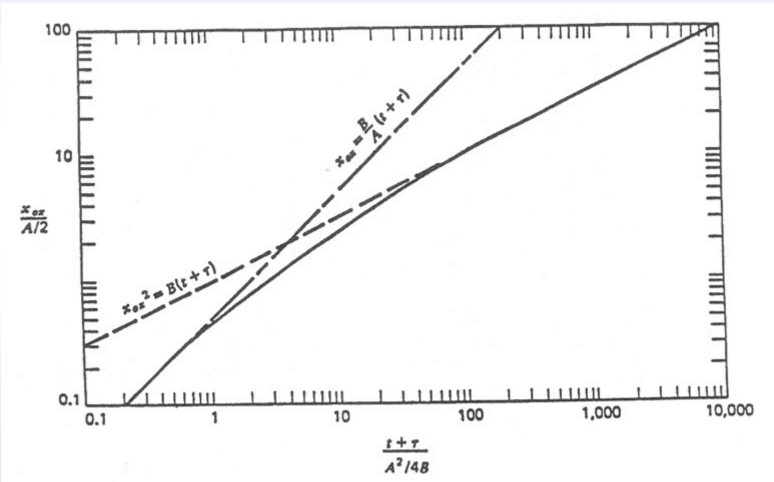
Nos momentos iniciais ($t \ll \tau$) a espessura do óxido não depende da difusão dos oxidantes ➔ lei de crescimento linear

$$X_{ox} = \frac{B}{A}(t+\tau) \qquad x \simeq \frac{C_0 k}{C_1}(t+\tau)$$

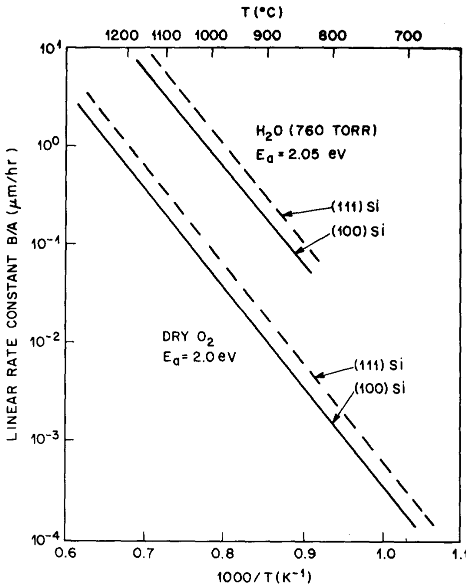
Para tempos longos ($t \gg \tau$) o processo é controlado por difusão do oxidante através do óxido ➔ lei de crescimento parabólico

$$X_{ox}^2 = Bt \qquad x \simeq \sqrt{\frac{2DC_0}{C_1}(t+\tau)}$$

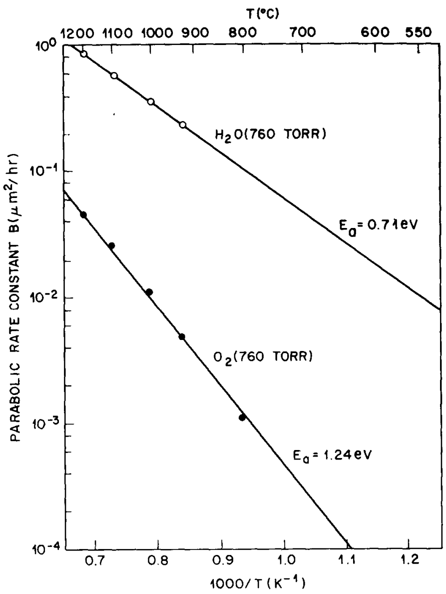
Espessura X tempo de crescimento



Taxa Linear e Parabólica

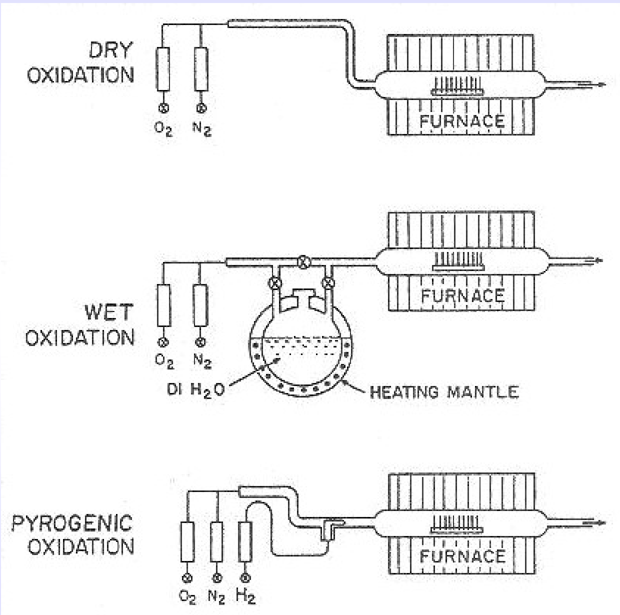


Linear rate constant versus temperature.



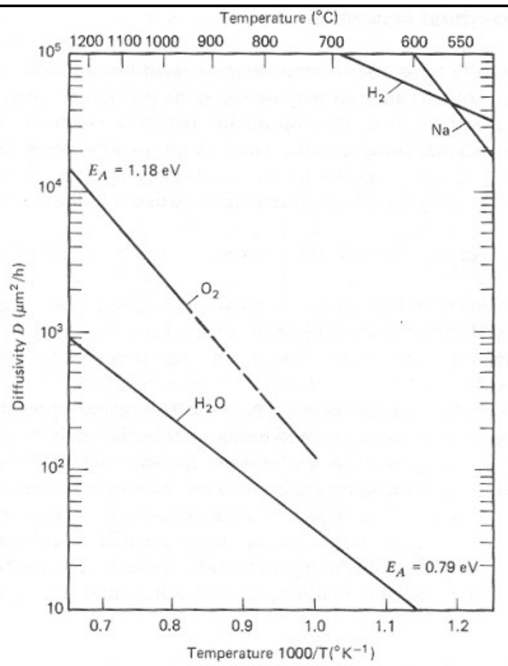
Parabolic rate constant versus temperature.

Tipos de Oxidação



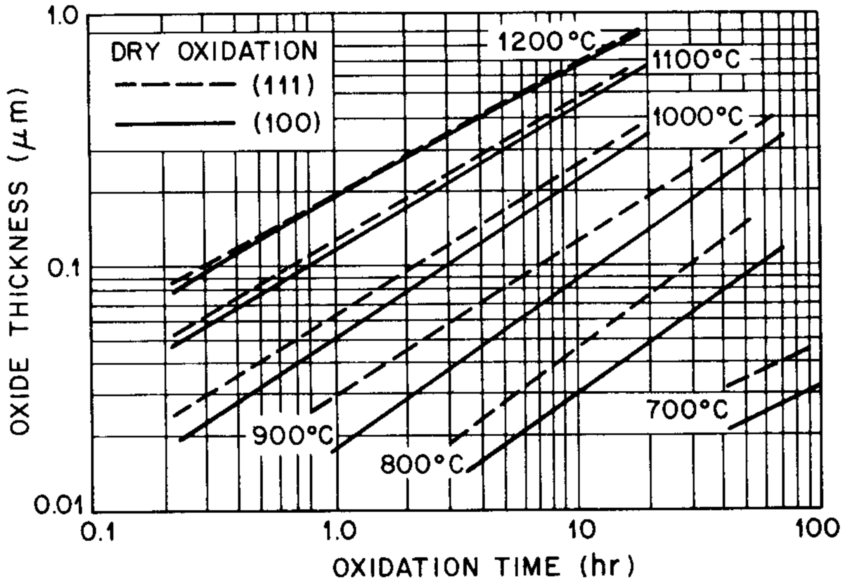
Difusividade

Explica a velocidade do processo de oxidação e auxilia na escolha do tipo de oxidação

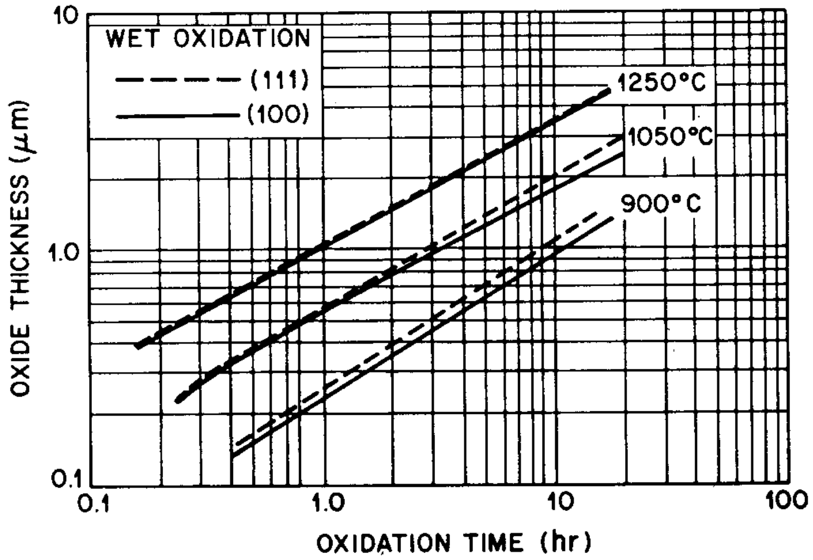


Diffusivities of hydrogen, oxygen, sodium, and water vapor in silica glass.

Oxidação Seca (*Dry Oxidation*)



Oxidação Úmida (*Wet Oxidation*)



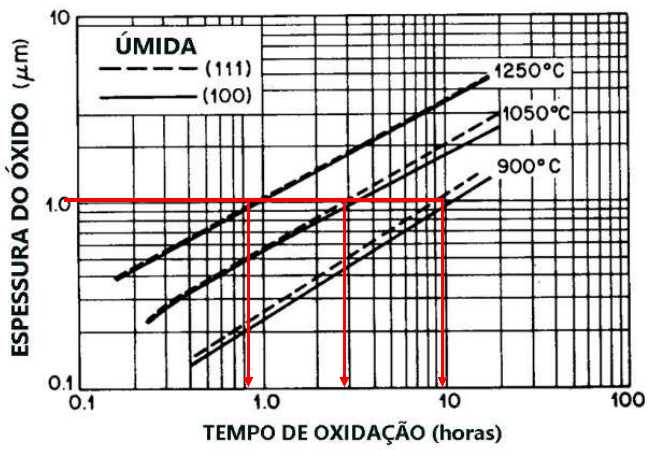
Oxidação Úmida (*Wet Oxidation*)

Uma espessura de 1 μm pode ser obtida por:

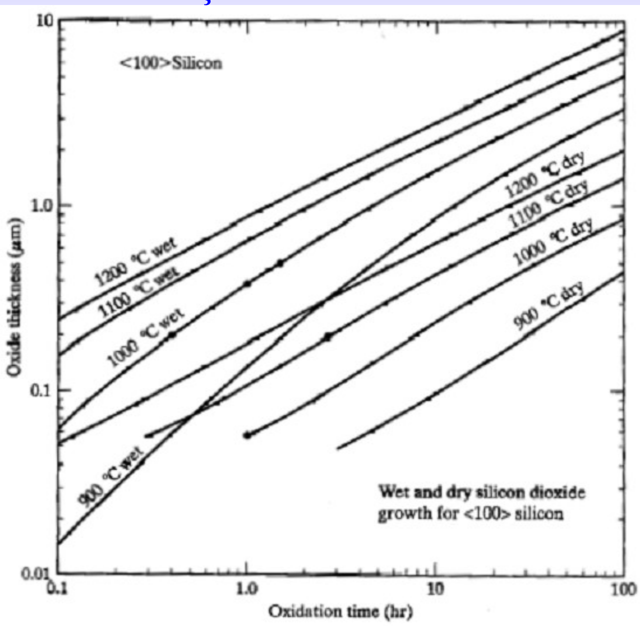
1h a 1250^{O}C

3,2h a 1050^{O}C

10,2h a 900^{O}C



Oxidação Úmida x Seca

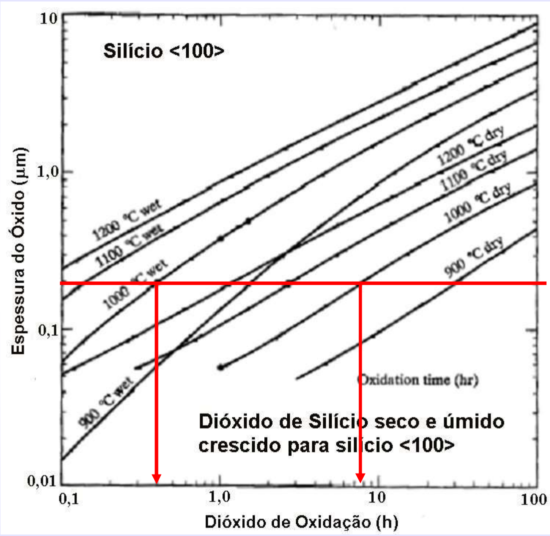


Oxidação Úmida x Seca

Uma espessura de 0,2 µm pode ser obtida por:

0,4h a 1000°C (úmida)

8h a 1000°C (seca)



Oxidação em substrato tipo P dopado com BORO

Redistribuição dos dopantes devido à oxidação

Oxidação em substrato tipo N

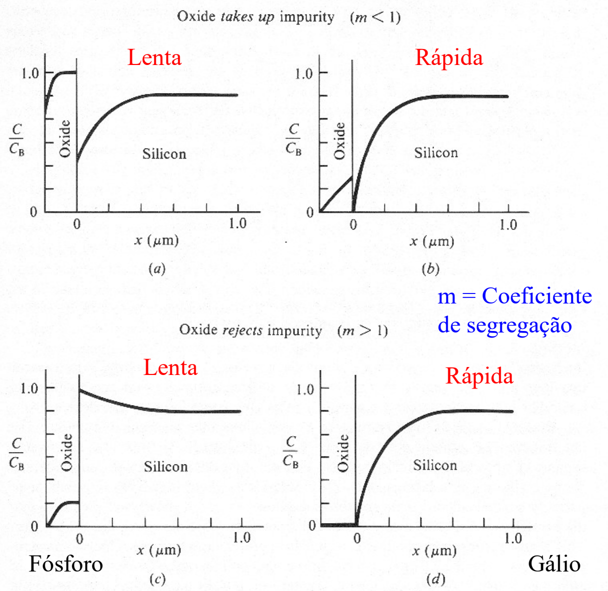
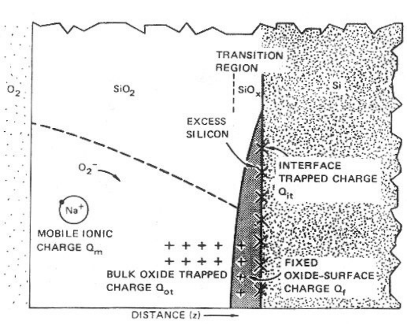
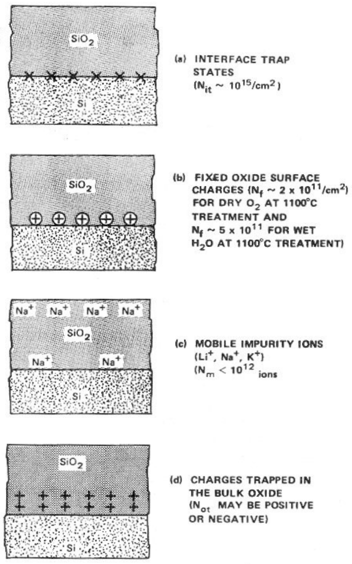


Figure 3-18 Dopant redistribution due to oxidation. (*a*) Diffusion in oxide slow (e.g., boron). (*b*) Diffusion in oxide fast. (*c*) Diffusion in oxide slow (e.g., phosphorus). (*d*) Diffusion in oxide fast (e.g., gallium). (*Figures are reprinted from Ref. 28, p. 70, by permission of the publisher. Copyright 1967, John Wiley & Sons. Original credit is given to Ref. 35. Reprinted by permission of the publisher, The Electrochemical Society, Inc.*)

Location of oxide charges in thermally oxidized silicon structures

(From Brodie, I. and J. J. Muray, *The Physics of Microfabrication*, Plenum Press, New York, 1989. With permission.)

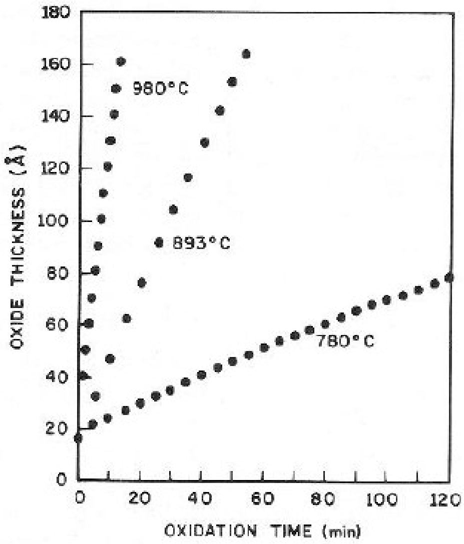




Cargas no óxido

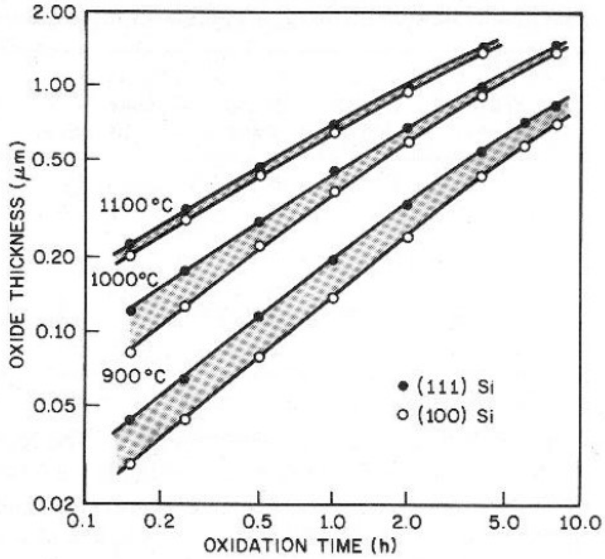
30

Espessura x Tempo de crescimento



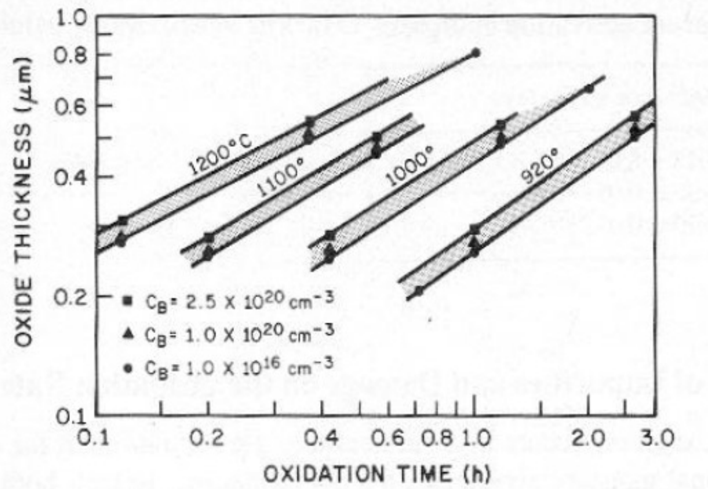
Oxide thickness versus oxidation time at 780, 893, and 980°C in dry oxygen.

Oxidação úmida em função da orientação cristalográfica



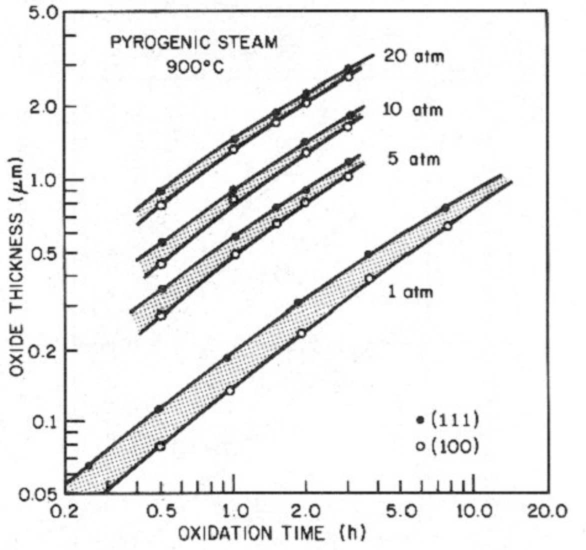
Oxide thickness versus oxidation time for silicon in H_2O at 640 Torr.

Oxidação úmida em função da dopagem do substrato



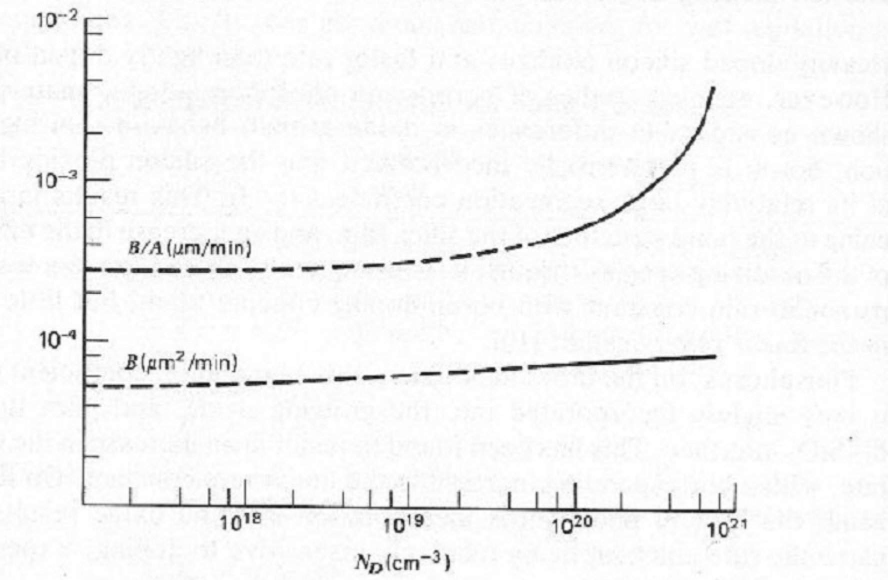
Oxidation of boron-doped silicon in wet oxygen (95°C H_2O) as a function of temperature and con centration

Oxidação pirogenica em função da dopagem do substrato



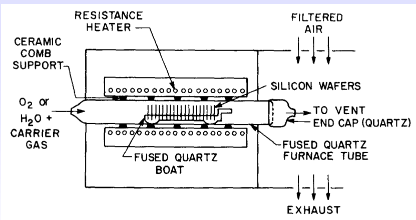
Oxidation thickness versus oxidation time for pyrogenic steam at 900°C for (100) and (111) silicon and pressures up to 20 atm.

Coeficiente de oxidação x dopagem do substrato

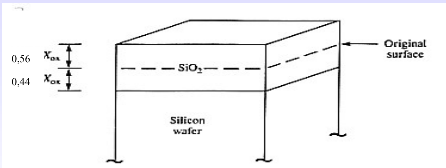


Rate constant versus substrate phosphorus doping level for oxidation at 900°C.

35



Schematic cross section of a resistance-heated oxidation furnace. The silicon wafer loading area is shown in a laminar hood.



FIM

Uma espessura de 1 µm pode ser obtida por:

1h a 1250ºC

3,2h a 1050ºC

10,2h a 900ºC