

ESTUDO DO COMPORTAMENTO TERMODINÂMICO DE

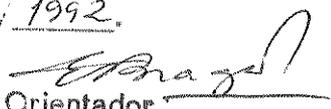
DISPOSITIVOS MOS

SUBMETIDOS A RADIAÇÕES IONIZANTES

DOUGLAS DE FREITAS TAKEUTI

ORIENTADOR: PROF. DR. EDMUNDO DA SILVA BRAGA

Este exemplar corresponde à redação final da tese  
defendida por Douglas de Freitas Takeuti  
e aprovada pela Comissão  
Ju'gadora em 28 / 5 / 1992.

  
Orientador

TESE APRESENTADA COMO  
PRÉ-REQUISITO PARA  
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
DEMIC-FEE-UNICAMP.

055 9724 02

AO ÚNICO QUE É DIGNO  
DE RECEBER A HONRA,  
A GLÓRIA, A FORÇA  
E O PODER;  
AO REI ETERNO,  
IMORTAL, INVISÍVEL,  
DEUS ÚNICO,  
HONRA E GLÓRIA  
ETERNAMENTE.

A TRÊS GERAÇÕES DE LUTADORAS:  
MARIA DO CARMO DE FREITAS OLIVEIRA  
DIVA DE FREITAS XAVIER TAKEUTI  
DELAINÉ DE FREITAS TAKEUTI

## AGRADECIMENTOS.

Ao Prof. Dr. Edmundo da Silva Braga, pela disponibilidade, interesse e cuidado demonstrados como orientador.

Ao Departamento de Cristalografia do Instituto de Física Gleb Wataghin, pela ajuda prestada com as irradiações.

Ao Godoy, por sua dedicação profissional.

A todo o pessoal do LED, em especial Emílio, Daniel, Patrícia, Mara, Sílvia e Márcia, pela ajuda prestada.

Ao Prof. Dr. Bernard Waldman, pelas proveitosas discussões (de curvas C-V a poesia).

Ao Marco Antônio, por toda a ajuda, sugestões e questionamentos.

À Maria Helena, por participar do meu processo de restauração como pessoa.

Ao Marcelo, pela amizade.

A Marie, pelos desenhos e apoio moral.

Ao José Alexandre Diniz e ao Prof. Dr. Peter Jürgen Tatsch, pela colaboração no trabalho com RTA.

Aos meus amigos: Tião, Marcão, J.R., Rosa, Marquinho & Aninha, Ricardo, Sils, Dirço, Gi, Zeus & Dri, Rinaldinho e Helga, Zé (Vozes do Além e suas extensões), Alvaro, Luís, povo de Morungaba; pessoal do "fica com isso": Maria Helena, Dora, João Marcos & Iára, Dedé, Élcio & Selma, Norberto, Beth, Di e aos gringos Bill & Aída, pelo apoio espiritual, emocional, afetivo, moral, psicológico, alimentar, logístico, financeiro, etc...

## RESUMO.

Estudamos o comportamento de capacitores Metal-Óxido-Semicondutor (MOS, alumínio-SiO<sub>2</sub>-Si) após irradiação por raios-X (Cu K- $\alpha$ ) e seu posterior tratamento térmico na faixa de temperatura (350 - 450).C.

Os óxidos foram crescidos termicamente, em ambiente de O<sub>2</sub>+TCE, sobre substratos Si(100), tipos-n e p, com concentrações de dopantes da ordem de  $N_{A,D} \approx 10^{15} \text{cm}^{-3}$ , espessura  $t_{ox} = 100 \text{nm}$ , área  $A = 500 \times 500 \mu\text{m}^2$ . Apresentaram densidade de cargas móveis de  $N_m \approx 5.10^9 \text{cm}^{-2}$  (medida a 205.C), densidade de cargas fixas de  $N_f \leq 1.10^{10} \text{cm}^{-2}$  e densidade de cargas capturadas na interface de  $D_{it} \approx 4.10^{10} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$  (caracterização feita por técnicas C-V quase estática-QSCV, alta frequência-HFCV e de varredura triangular em tensão-TVS).

A irradiação dos dispositivos provocou alta densidade de estados de interface ( $D_{it} = 5.10^{11} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ ), em contraste com baixa densidade de cargas capturadas no óxido ( $N_{ot} \approx 4.10^{10} \text{cm}^{-2}$ ).

Os recozimentos foram feitos em etapas sucessivas, com atmosfera de N<sub>2</sub>, usando fornos convencionais e de processamento rápido e indicam que o tempo de recozimento dos defeitos induzidos é da ordem de 5 minutos a 420.C. Para tempos maiores, observou-se aumento de  $D_{it}$  e a criação de histereses nas curvas HFCV.

## Índice.

|   |    |
|---|----|
| I - Introdução                                      | 1  |
| I.1- A estrutura MOS                                | 2  |
| I.2- Cargas no óxido                                | 9  |
| A) Cargas móveis                                    | 10 |
| B) Cargas capturadas na interface                   | 14 |
| C) Cargas capturadas no óxido                       | 18 |
| D) Cargas fixas                                     | 20 |
| II - Método de medida C-V                           | 25 |
| II.1 - Capacitância em baixas frequências           | 27 |
| II.2 - Capacitância em altas frequências            | 32 |
| a) Tempo de resposta de portadores                  | 32 |
| b) Circuitos equivalentes                           | 35 |
| c) Aproximação                                      | 38 |
| II.3 - Extração de propriedades do SiO <sub>2</sub> | 40 |
| a) Espessura do óxido                               | 41 |
| b) Concentração efetiva de dopantes                 | 41 |
| c) Densidade de cargas fixas                        | 41 |
| d) Densidade de cargas móveis                       | 43 |
| e) Dens. cargas capturadas no óxido                 | 45 |
| f) Dens cargas capturadas na interface              | 46 |
| III - Efeitos da radiação                           | 55 |
| III.1 - Introdução                                  | 55 |
| III.2 - Materiais eletrônicos                       | 55 |
| III.3 - Curvas C-V                                  | 56 |
| III.4 - Cargas capturadas no óxido                  | 57 |
| III.5 - Geração de estados de interface             | 62 |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| III.6 - Tratamento térmico            | 65  |
| IV - Parte experimental               | 72  |
| IV.1 - Processo de fabricação         | 72  |
| IV.2 - Etapas do experimento          | 75  |
| a) Medidas de cargas móveis           | 75  |
| b) Medidas C-V                        | 78  |
| c) Irradiação                         | 81  |
| d) Reozimento                         | 84  |
| V - Análise                           | 92  |
| V.1 - Irradiação                      | 92  |
| V.2 - Reozimento térmico convencional | 93  |
| V.3 - Reozimento térmico rápido       | 96  |
| VI - Conclusões                       | 100 |

Definição dos símbolos empregados.

C - capacitância diferencial:  $C \equiv \frac{dQ_T}{dV_G}$ .

$\Delta C$  - diferença entre as curvas em alta e baixa frequência na região de depleção;

$(\Delta C/C_{ox})$  - diferença normalizada entre as capacitâncias quase estática e baixa frequência

$C_D$  - capacitância na depleção

$C_{est}$  - capacitância estática:  $C_{est} \equiv \frac{Q_T}{V_G}$ ,

$C_{FB}$  - capacitância de banda plana

$C_I$  - capacitância na inversão

$C_{it}$  - contribuição para a capacitância dos estados de interface

$C_H/C_{ox}$  - capacitância em alta frequência normalizada

$C_{max}$  - capacitância máxima em alta frequência ( $\approx C_{ox}$ )

$C_{mg}$  - capacitância para encurvamento de bandas correspondente ao meio da banda proibida

$C_{min}$  - capacitância mínima em alta frequência

$C_{ox}$  - capacitância do óxido por unidade de área,  $C_{ox} \equiv \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$

$C_s$  - capacitância diferencial em baixa frequência do silício por unidade de área,  $C_s(\psi_s) \equiv -\frac{dQ_s}{d\psi_s}$ ;

$D_{it}(mg)$  - densidade de estados de interface no meio da banda proibida

$D_{min}$  - valor mínimo do gráfico  $D_{it} \times t_{rec}$

$e^- - h^+$  - par elétron-lacuna

$E_c$  - limite inferior da banda de condução

$E_F$  - nível de Fermi extrínseco no semiconductor.

$E_{FS}, E_{FM}$  - níveis de Fermi do semiconductor e do metal

$E_i$  - nível intrínseco

$E_v$  - limite superior da banda de valência  
 $E_{vac}$  - referência no nível de vácuo  
 $F(U_s, U_B)$  - expressão para o campo elétrico adimensional  
 $F_{ox}$  - campo elétrico sobre o óxido  
 $G_{gr}$  - condutância por geração/recombinação  
 $k$  - constante de boltzmann  
 $n$  - concentração de elétrons  
 $n_i$  - concentração intrínseca de elétrons,  $n_i = (M_v M_c) \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$   
 $n_s$  - concentração de elétrons na superfície do silício  
 $n_T$  - concentração de defeitos profundos  
 $N_{A,D}$  - concentração de impurezas aceitadoras  $N_D$  - conceetração de impurezas doadoras  
 $N_{A,D}^*$  - concentração efetiva de dopantes  
 $N_f$  - densidade de cargas fixas  
 $N_{it}$  - densidade de cargas capturadas na interface  
 $N_m$  - densidade de cargas móveis  
 $N_{ot}$  - densidade de cargas capturadas no óxido  
 $N_{st}$  - densidade de estados lentos ou anômalos ( $N_{st}$ )  
 $N_T$  - possível densidade de cargas associadas ao histerese pós-recozimento  
 $ovst$  - dados obtidos pelo método gráfico de Van Overstraeten  
 $p$  - concentração de lacunas  
 $p_s$  - concentração de lacunas na superfície do silício  
 $q$  - carga do elétron;  
 $Q_T$  - densidade de carga total no substrato  
 $Q_s$  - é a densidade de carga na superfície do silício;  
 $Q_s$  - carga superficial total por unidade de área:  
 $t_{ox}$  - espessura do óxido

$t_{ideal}$  - tempo para o qual  $D_{min}$  ocorre

$t_{rec}$  - tempo de recozimento

T - temperatura absoluta

$u(x) = \frac{q \phi(x)}{kT}$  potencial adimensional no semiconductor

$u_s = \frac{q \phi_s}{kT}$  potencial adimensional de superfície

$u_B = \frac{q \phi_B}{kT}$  potencial adimensional de Fermi

$v(x) = \frac{q \psi(x)}{kT}$  encurvamento de bandas adimensional

$v_s = \frac{q \psi_s}{kT}$  encurvamento de bandas adimensional total

$V_{FB}$  - tensão de banda plana

$V_T$  - tensão de limiar

$V_G$  - tensão de porta

$V_G$  - polarização aplicada

$v_{so}$  - encurvamento de bandas independente do tempo

$v_m$  - encurvamento de bandas para o qual a concordância das curvas na aproximação de Lindner ocorre

$\Delta V$  - deslocamento entre as curvas C-V acumulação  $\rightarrow$  inversão e inversão  $\rightarrow$  acumulação (histerese)

$\Delta V_I$  - histerese pós-irradiação

$\Delta V_R$  - histerese pós-recozimento

WB - dados obtidos pelo método gráfico de Wagner & Berglund

$W_d$  - largura da camada de depleção:

$W_{max}$  - largura máxima da camada de depleção

$\epsilon_s$  - coeficiente de permissividade elétrica do silício;

$\epsilon_{ox}$  - constante de permissividade dielétrica do óxido

$\gamma$  - taxa de variação da tensão na porta ( $\frac{dV_G}{dt}$ ).

$\phi_B$  - potencial no corpo do semiconductor ("bulk potential"), por simplicidade tratado como potencial de Fermi

$\phi_K$  e  $\phi_{sm}$  - funções trabalho do metal e do semiconductor

$\phi_{MS}$  - diferença de funções trabalho metal-semicondutor  
 $\phi(x) = E_f - E_i(x)$  - potencial no semicondutor  
 $\phi_s$  - potencial de superfície  
 $\psi_s$  - encurvamento de bandas  
 $\mu$  - mobilidade de portadores  
 $\rho_n$  - seção de captura de elétrons  
 $\rho_p$  - seção de captura lacunas  
 $\tau_{maj}$  - tempo de resposta dos portadores majoritários  
 $\tau_D$  - tempo de relaxação dielétrica,  
 $\tau_{min}$  - tempo de resposta de portadores minoritários  
 $\chi_s$  e  $\chi_o$  - afinidades eletrônicas do semicondutor e do isolante  
 $\omega$  - frequência angular

## I - INTRODUÇÃO.

O fenômeno de danos causados por radiação ionizante em dispositivos eletrônicos é bem conhecido. A existência de etapas de processos de fabricação inerentemente radiativas e o interesse em construir dispositivos resistentes à radiação tornam necessário o estudo de seus efeitos.

Os dispositivos MOS são os mais sensíveis a alterações em seu comportamento. Após irradiados, podem apresentar aumento das densidades de cargas no óxido e interfaces. Essas cargas são eliminadas por tratamento térmico a baixas temperaturas (400°C-450°C, H<sub>2</sub> ou N<sub>2</sub>).

Capacitores MOS têm se revelado muito úteis na caracterização de processos de fabricação de estruturas MOS. Aliados às técnicas C-V, permitem medidas rápidas e adequadamente sensíveis para muitas aplicações.

No presente capítulo, apresentaremos a estrutura MOS com o correspondente diagrama de energia e um resumo sobre cargas no óxido. O capítulo II discutirá as técnicas C-V. Os efeitos da radiação nos capacitores, bem como o recozimento das cargas induzidas, serão discutidos no capítulo III. O capítulo IV será dedicado ao procedimento experimental, seguido de análise (capítulo V) e conclusões (capítulo VI).

## A Estrutura MOS

### I.1 - A ESTRUTURA MOS.

A estrutura MOS constitui-se de um substrato semiconductor onde foi crescida ou depositada uma fina camada isolante e sobre ela um material condutor.

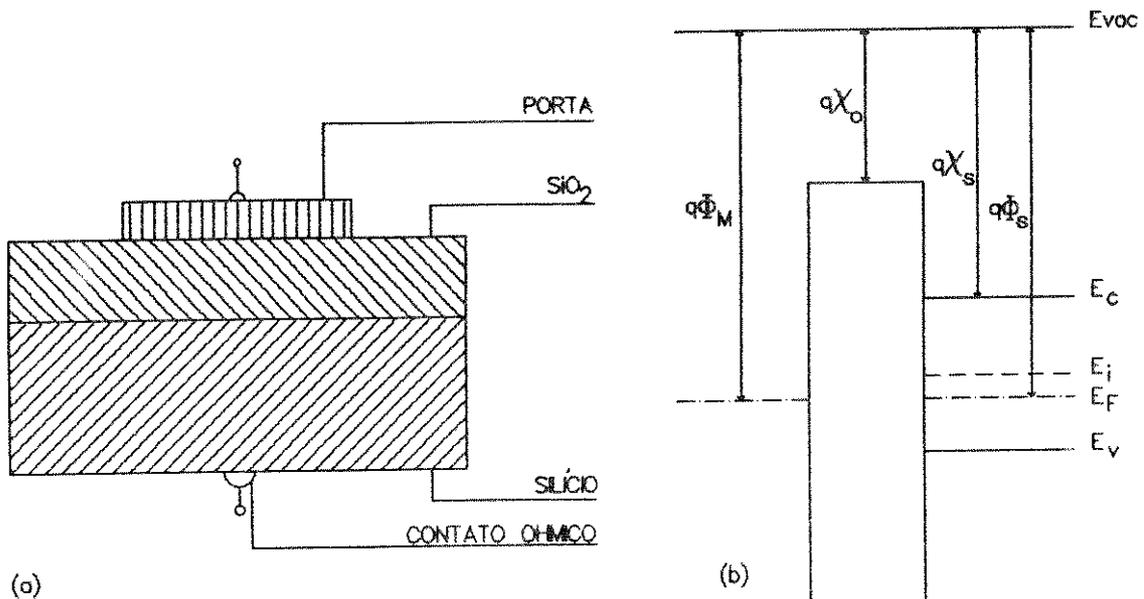


Figura I.1 (a) Seção transversal de um capacitor MOS<sub>1</sub> (b) Diagrama de bandas de energia para um capacitor MOS ideal.

Baseamos este resumo na referência <sup>1</sup>. A figura I.1 mostra um esquema representativo do capacitor MOS ideal em equilíbrio termodinâmico (a) e seu respectivo diagrama de bandas de energia (b). Entendemos por ideal um capacitor em que não há cargas presentes no óxido ou interface SiO<sub>2</sub>-Si, desuniformidades na distribuição de dopantes, nem diferença entre as funções-trabalho do metal e semiconductor. Na figura estão representadas as funções trabalho do metal e do semiconductor ( $\phi_M$  e  $\phi_{SM}$ ), as afinidades eletrônicas do semiconductor e do

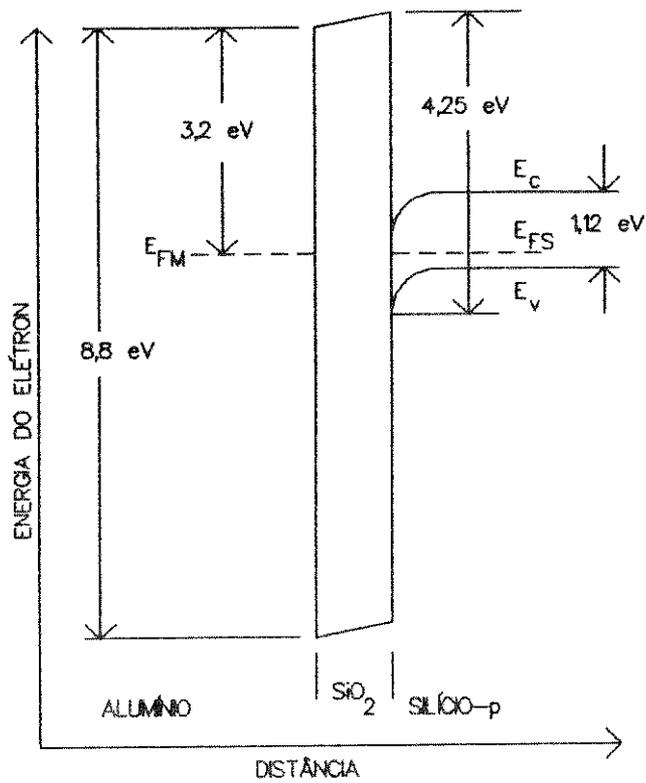


Figura 1.2 Diagrama de bandas de energia para um capacitor MOS construído sobre silício-p.

isolante ( $\chi_s$  e  $\chi_o$ ), o limite inferior da banda de condução ( $E_c$ ), o limite superior da banda de valência ( $E_v$ ), o nível intrínseco ( $E_i$ ) e os níveis de Fermi do semiconductor ( $E_{FS}$ ) e do metal ( $E_{FM}$ ), bem como a referência no nível de vácuo ( $E_{vac}$ ). Mostramos um diagrama com valores teóricos na figura 1.2, onde pode-se perceber o encurvamento de bandas devido à diferença entre funções trabalho metal - semiconductor.

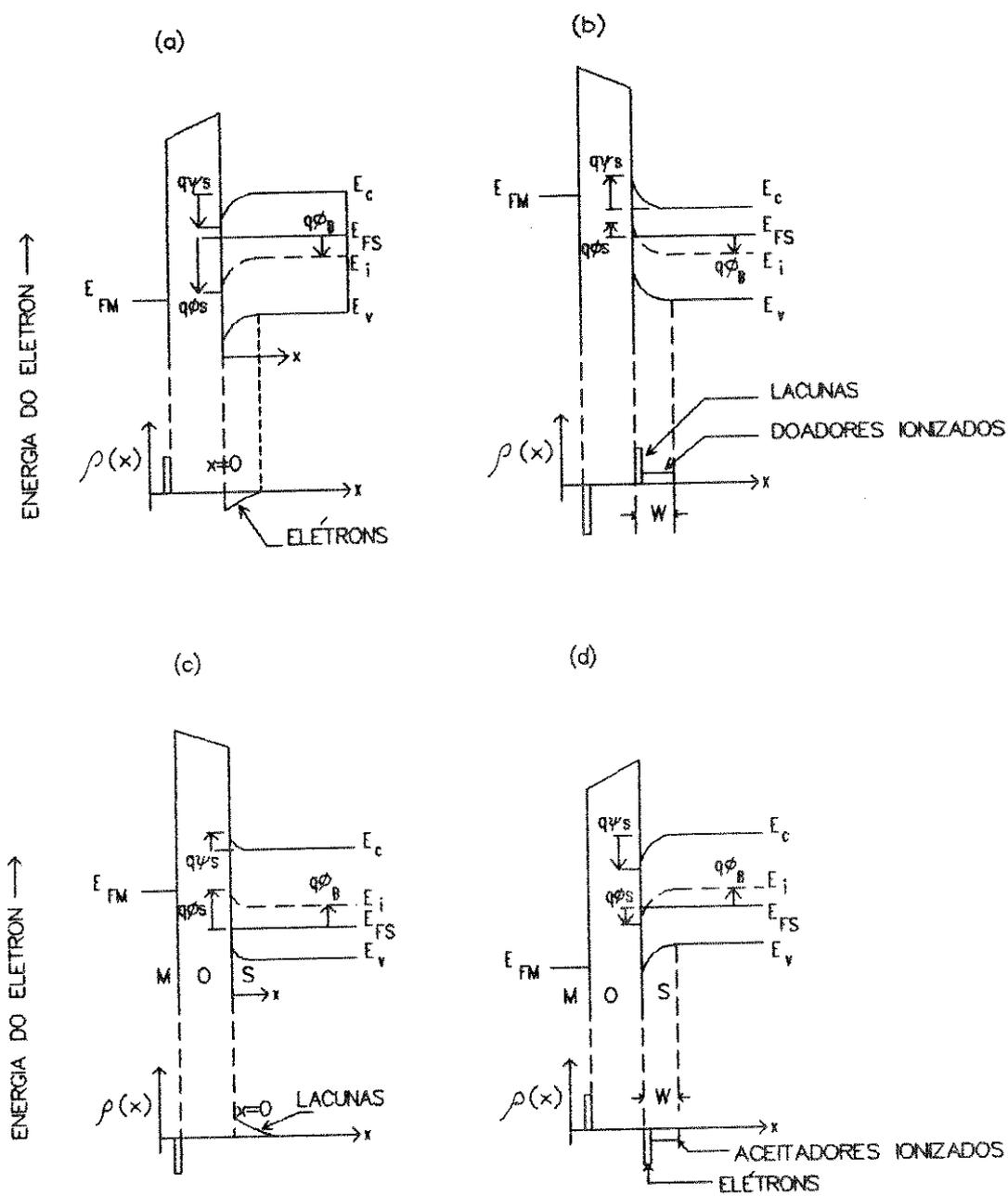


Figura I.3 Diagrama de bandas de energia para capacitores MOS com substratos Si-n (a-acumulação, b-inversão) e Si-p (c-acumulação, d-inversão), apresentando os vários potenciais utilizados na análise da estrutura.  $\psi_s$  é o encurvamento de bandas total,  $\phi_s$  é o potencial de superfície,  $\phi_B$  é o potencial de Fermi no volume do semiconductor,  $E_{FS}$  é o nível de Fermi no semiconductor e  $E_{FM}$  o nível de Fermi no metal. Abaixo de cada diagrama está a correspondente distribuição de portadores no perfil do dispositivo.

Analiseemos o capacitor MOS polarizado, sob o ponto de vista do diagrama de bandas de energia. A aproximação usada assume que o único efeito provocado pelo campo elétrico aplicado é o deslocamento de todos os níveis de energia de um valor constante, determinado pelo potencial no ponto considerado. A densidade de estados nas bandas de valência e de condução não se altera. Esta consideração é válida para semicondutores não-degenerados, campos não muito intensos ( $<10^6$  V/cm) e temperatura ambiente. A figura I.3 define os potenciais envolvidos nessa análise. Vemos que a energia do elétron cresce no sentido de baixo para cima, como indicado pela seta. Deste modo, setas para cima indicam potenciais negativos. O potencial no semiconductor é

$$\phi(x) = E_F - E_i(x),$$

onde  $E_F$  é o nível de Fermi extrínseco no semiconductor. Longe da superfície ( $x \rightarrow \infty$ ),  $E_i(x)$  é constante e paralelo a  $E_F$ ;  $\phi(x)$  é chamado de potencial no corpo do semiconductor ( $\phi_B = \text{"bulk potential"}$ ), por simplicidade tratado como potencial de Fermi. Na superfície do silício ( $x=0$ ),  $\phi(x)$  é chamado de potencial de superfície ( $\phi_s$ ). O encurvamento de bandas é definido como

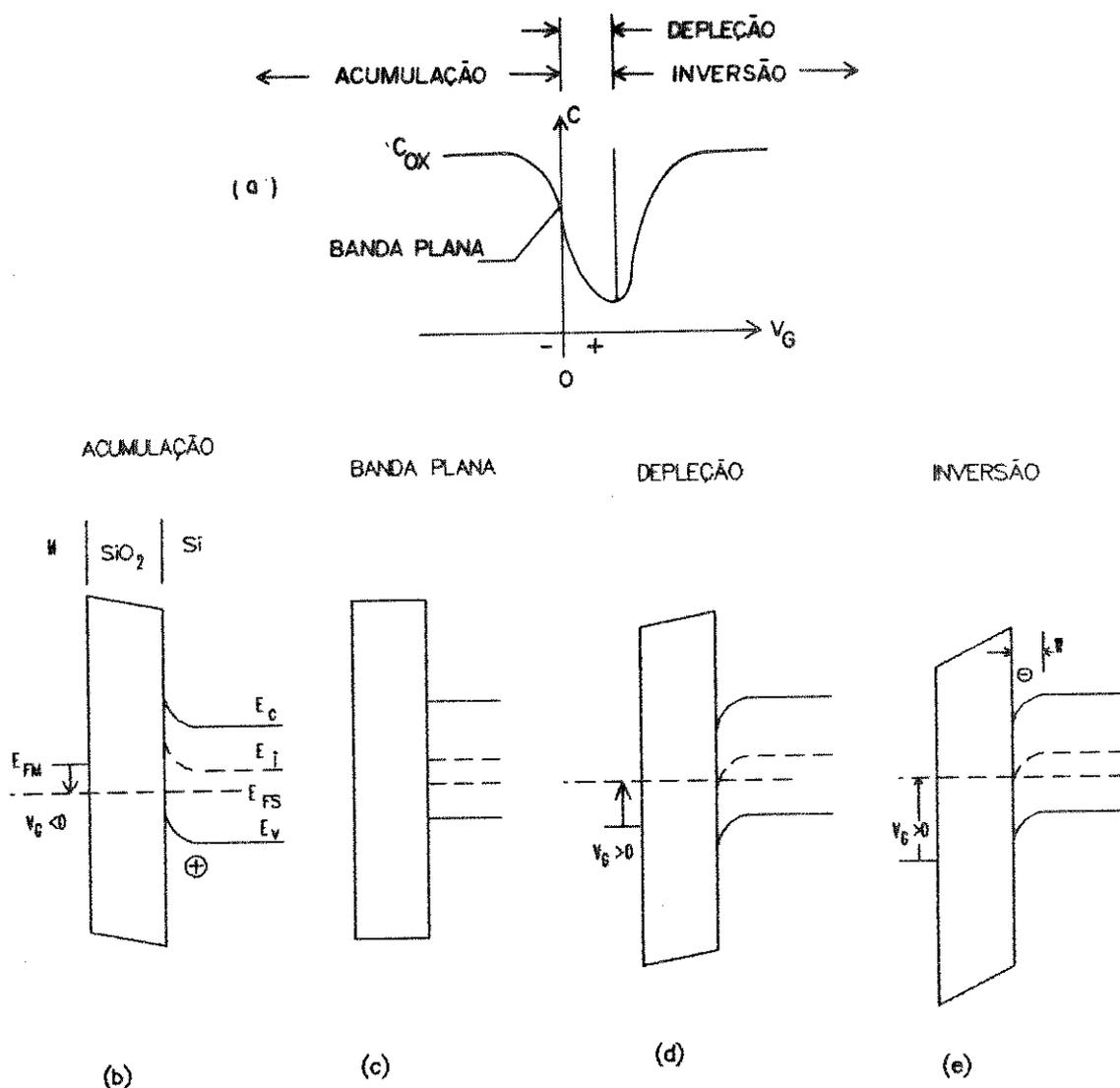
$$\psi(x) = \phi(x) - \phi_B$$

e seu valor na superfície é chamado de encurvamento de bandas total ( $\psi_s$ ). Podemos ainda definir potenciais adimensionais para cada um dos potenciais acima:

$$u(x) = \frac{q \phi(x)}{kT}, \quad v(x) = \frac{q \psi(x)}{kT};$$

$$u_s = \frac{q \phi_s}{kT}, \quad u_B = \frac{q \phi_B}{kT}, \quad v_s = \frac{q \psi_s}{kT}.$$

Quando aplicamos ao metal (porta) do capacitor um potencial negativo em relação ao substrato ( Si-p ), lacunas são atraídas para a superfície do silício. Cria-se uma camada de acumulação de portadores majoritários junto à interface. Com o aumento da concentração de lacunas, o nível de Fermi aproxima-se da banda de valência ( $E_V$ ). Como o nível de Fermi permanece



**Figura I.4** Diagrama de bandas de energia e a correspondente curva C-V (a) para um capacitor MOS de substrato Si-p. (b) Acumulação. (c) Condição de banda plana. (d) Depleção. (e) Inversão.  $W$  é a largura da camada de depleção.

constante no equilíbrio térmico, a consequência é o encurvamento de bandas mostrado na figura I.4(b). A curva C-V em baixa frequência correspondente é apresentada em (a) e será explicada posteriormente.

Se tornarmos o potencial menos negativo, a concentração de lacunas junto à superfície diminuirá. Continuando a fazê-lo, haverá um ponto em que as concentrações de portadores na superfície serão as mesmas do corpo do semiconductor. O diagrama de bandas não apresentará encurvamento. Esta é a chamada situação de banda plana - *flatband*. O valor da tensão de polarização associado a este ponto é conhecido como tensão de banda plana [ $V_{FB}$ -figura I.4.(c)]. Para valores maiores que  $V_{FB}$ , as lacunas são depletadas da superfície. O campo elétrico é compensado pelas impurezas aceitadoras ionizadas e gera-se uma região de depleção de portadores. O nível de Fermi aproxima-se do meio da banda proibida e ocorre o encurvamento de bandas mostrado na figura I.4(d). A largura  $W_d$  dessa região é proporcional ao encurvamento de bandas:

$$W_d = \left( \frac{2\epsilon_s \psi_s}{qN_{A,D}} \right)^{\frac{1}{2}},$$

onde  $\epsilon_s$  é o coeficiente de permissividade elétrica do silício;

$q$  é a carga do elétron;

$N_{A,D}$  são, respectivamente, as concentrações de dopantes aceitadores e doadores.

Para um determinado valor de tensão de polarização ( $V > V_{FB}$ ), as concentrações de portadores igualam-se ao valor intrínseco ( $n=p=n_i$ ) e os níveis de Fermi e intrínseco assumem o mesmo valor no diagrama de bandas de energia (os dois níveis se cruzam). A partir desse ponto, onde  $\phi_s = \phi_F$ , a inversão do semiconductor começa a ocorrer. Portadores minoritários (elétrons) são atraídos para a superfície Si-SiO<sub>2</sub>. Ocorre a formação da camada de inversão. Qualquer acréscimo na polarização (mantidas as condições de equilíbrio) causará um aumento na concentração superficial de elétrons e não mais alargamento da camada de depleção. Nestas condições,  $\psi_s$  satura. Para conseguirmos uma alteração significativa em  $\psi_s$  é preciso uma grande variação na polarização. Uma boa aproximação neste caso é  $\psi_s = 2\phi_F$ , quando a camada de depleção atinge a largura máxima ( $W_{max}$ ):

$$W_{max} = \left[ \frac{2\epsilon_s}{qN_A} 2\phi_F \right]^{\frac{1}{2}}$$

O nível de Fermi aproxima-se da banda de condução ( $E_c$ ) e o encurvamento de bandas correspondente é mostrado na figura I.4(e). Para campos muito intensos ( $>10^6$  V/cm), a superfície pode tornar-se degenerada e efeitos quânticos passam a ser importantes. O modelo apresentado não se adequa mais. Uma abordagem mais abrangente em relação à quantização está fora do escopo deste estudo.

## A Estrutura MOS

### I.2 - CARGAS NO ÓXIDO.

Um esquema da estrutura MOS não ideal é mostrado na figura I.5. Segundo Deal<sup>2</sup>, são quatro os tipos de cargas observados nos óxidos crescidos termicamente:

- A) cargas móveis -  $N_m$ ;
- B) cargas capturadas na interface -  $N_{it}$ ;
- C) cargas capturadas no óxido -  $N_{ot}$ ;
- D) cargas fixas -  $N_f$ .

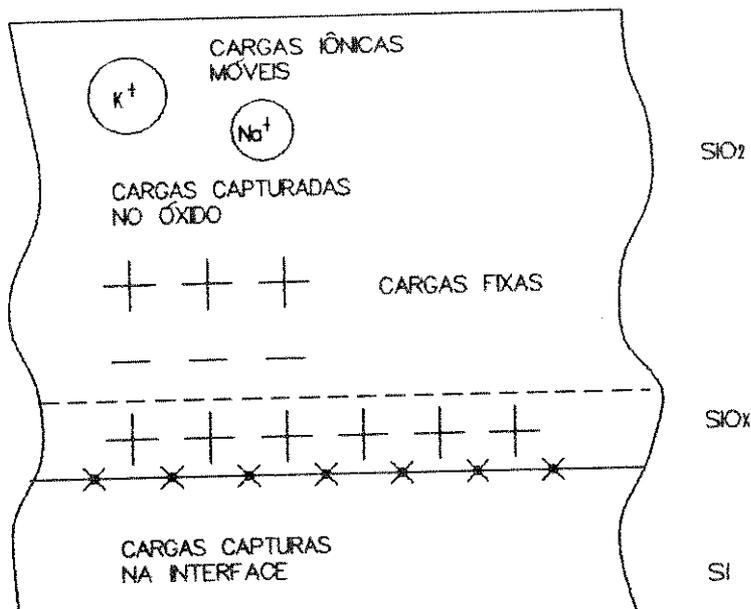


Figura I.5 Cargas normalmente observadas em óxidos de porta. <sup>2</sup>

Os termos "N" representam o número de cargas por unidade de área ( $cm^{-2}$ ). Associamos "Q" às densidades de cargas ( $Q_f, Q_m$ , etc), dadas em  $Coulomb.cm^{-2}$ . No entanto, N (dado em  $cm^{-2}$ )

## A Estrutura MOS

costuma ser denominado na literatura como densidade de carga. Essas definições causam alguma confusão, mas podemos entender  $N$  como a densidade normalizada de carga, uma vez que  $N = \frac{Q}{q}$ .

### A) Cargas Móveis - $N_m$

A presença de íons de metais alcalinos (como sódio, potássio e lítio) durante o processo de oxidação contamina o  $\text{SiO}_2$  com esses elementos, que são móveis sob ação de campo elétrico e positivamente carregados. O sódio é considerado o mais importante, por sua abundância na natureza e rápido transporte no dióxido de silício.

A contaminação por cargas móveis produz instabilidades no comportamento de dispositivos. Nos transistores MOS, o principal efeito é a alteração da tensão de limiar (threshold -  $V_T$ ). Os transistores canal-n tipo enriquecimento são os mais afetados. Uma vez que a polarização de porta é positiva, os íons são deslocados para a interface, induzindo cargas-imagem negativas no silício. Assim, a tensão de porta ( $V_G$ ) requerida para produzir uma dada corrente no canal é reduzida. A figura I.6 ilustra esse efeito. As partes (a) e (c) representam o transistor MOS com os íons de sódio respectivamente na porta e na interface com o silício. A parte (b) apresenta as características corrente-tensão nos dois casos. A linha contínua corresponde à parte (a) e a linha tracejada à parte (b). Essas cargas também agem como centros de espalhamento de portadores em movimento, diminuindo a mobilidade no canal do transistor. A consequência é

## A Estrutura MOS

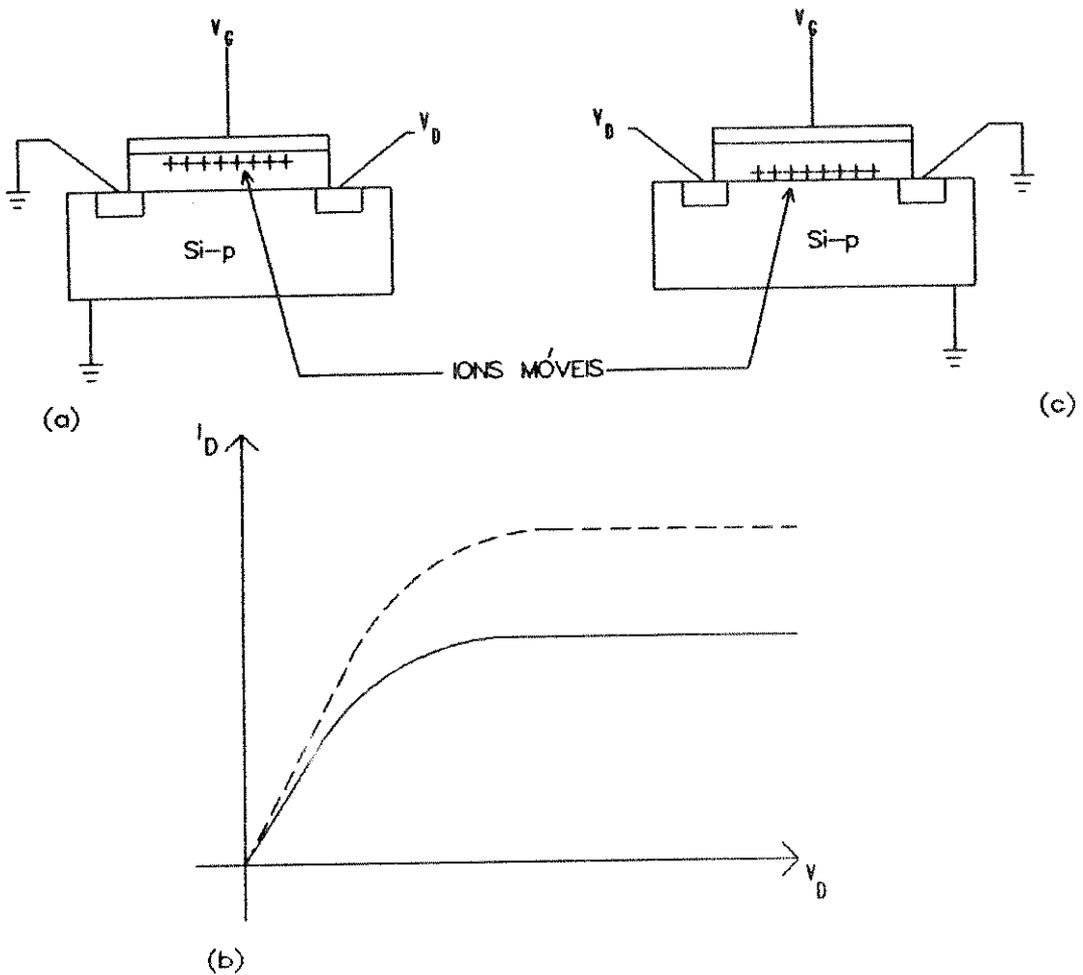


Figura I.6 (a) Seção transversal de um MOSFET canal-n com íons de sódio no metal. (b) A linha contínua representa a característica corrente-tensão de dreno quando os íons estão na interface metal-SiO<sub>2</sub>. A linha tracejada corresponde aos íons na interface SiO<sub>2</sub>-Si. (c) Seção transversal de um MOSFET canal-n com íons de sódio na interface SiO<sub>2</sub>-Si.

uma perda na transcondutância. Densidades de cargas móveis de  $10^{10}$  íons/cm<sup>2</sup> medidas a 200°C causam  $\Delta V_T$  da ordem de  $10^{-2}$  V em transistores MOS com óxido de porta de 100nm de espessura; instabilidade considerada suficientemente baixa para aplicações em circuitos integrados (embora possa ser importante em VLSI).

Nos transistores planares npn, a polarização reversa da

## A Estrutura MOS

junção coletor-base gera no óxido, próximo à interface, um campo elétrico que pode deslocar íons móveis em direção à base<sup>1</sup> (figura I.7 ). Dependendo da concentração de contaminantes, é possível inverter a superfície da base. Entretanto, isto só ocorre para altos níveis de contaminação ( $N_a \approx 10^{11} - 10^{12}$ ), pois a base em geral é fortemente dopada ( $N_a \approx 10^{17} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ). Em determinados casos de tecnologia bipolar, densidades de cargas móveis da ordem de  $10^{11} \text{ cm}^{-2}$  podem ser toleráveis.

A eliminação da contaminação por cargas móveis depende do conhecimento de suas fontes. As etapas críticas para introdução de contaminantes são apresentadas abaixo, junto com os cuidados específicos de limpeza que demandam.

- Metalização: uso de alumínio de alta pureza e de filamentos de evaporação livres de sódio; uso de evaporadoras de canhão de elétrons em vez de filamentos.
- Oxidação: seca ( $\text{O}_2$ ) com HCl e recozimento pós oxidação; tubos e borbulhadores de quartzo de alta pureza; uso de oxidação pirogênica em vez de vapor d'água para óxidos de campo; limpeza do tubo de quartzo do forno com HCl: $\text{O}_2$  a altas temperaturas; passivação com fosforosilicato.
- Difusão e "pos-bake": existem poucos estudos publicados a respeito.
- Etapas químicas: controle dos níveis de  $\text{Na}^+$  nos reagentes; último banho de cada etapa deve ser

## A Estrutura MOS

de água D.I. 18MΩ.

- Manuseio geral: controle de presença humana; paramentação e costumes adequados: uso de luvas e roupas adequadas, cuidados com manipulação, respiração, etc.

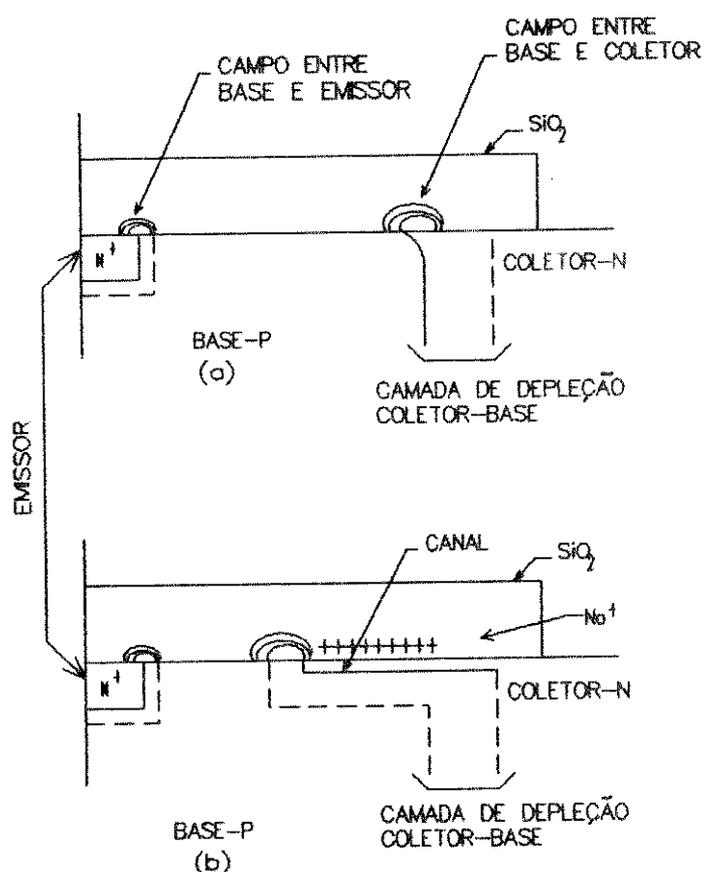


Figura I.7 (a) Esquema da seção transversal de um fototransistor npn, mostrando os campos de borda gerados pelas junções emissor-base e coletor-base no  $\text{SiO}_2$ , antes de ocorrer o transporte de cargas móveis. (b) Com os íons presentes na interface  $\text{SiO}_2$ -Si, um canal vai sendo formado progressivamente em direção ao emissor.

## A Estrutura MOS

### B) Cargas capturadas na interface - Nit.

São defeitos localizados na interface Si-SiO<sub>2</sub>, que introduzem estados quânticos na banda proibida do silício. Estando em comunicação elétrica com o semicondutor, podem mudar seu estado de carga capturando ou emitindo portadores, conforme o potencial de superfície. Possuem uma distribuição ao longo da banda proibida. Geralmente o valor da densidade de estados de interface no meio da banda proibida é encontrado na literatura e denominado  $D_{it}$ . Sua origem é atribuída às características intrínsecas à interface:

- deformação abrupta da rede cristalina do silício na interface;
- existência de ligações insaturadas nos átomos de silício e de oxigênio;
- presença de impurezas metálicas.

$D_{it}$  depende de vários fatores do processo:

- temperatura de oxidação;
- ambiente de oxidação:  $D_{it}(H_2O) > D_{it}(O_2)$ ;
- orientação:  $D_{it}(111) > D_{it}(110) > D_{it}(100)$ , correspondendo à densidade relativa de ligações na interface;
- recozimento a alta temperatura: produção de  $D_{it}$  durante recozimento pós-oxidação em atmosfera de N<sub>2</sub> por tempo prolongado;
- presença de impurezas interfaciais: relacionadas a oxidação, difusão e implantação;

## A Estrutura MOS

- etapas radiativas: litografia (e-beam, R-X, UV), metalização (evaporação usando feixe de elétrons), implantação iônica, plasma, sputtering;
- recozimento a baixa temperatura: presença ou não de hidrogênio.

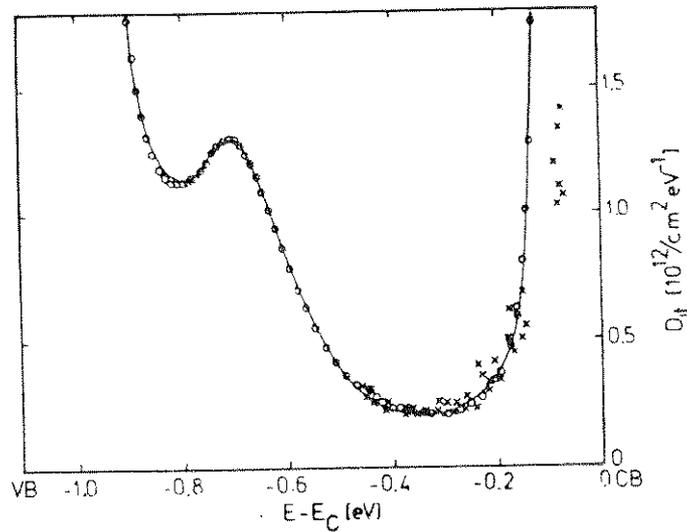


Figura I.8 Distribuição de estados de interface ao longo da banda proibida. CB-Banda de Condução; VB-Banda de Valência. As medidas, obtidas através da técnica da condutância(x) e quase estática(°), são comparadas para uma estrutura MOS com alta densidade de estados de interface.

A densidade de estados de interface apresenta uma distribuição ao longo da banda proibida. É geralmente admitida na literatura como máxima nos extremos e mínima no meio da banda proibida (forma de "U"). A figura I.8<sup>3</sup> mostra uma distribuição de  $D_{it}$  em função da energia, tendo como referência a banda de

## A Estrutura MOS

condução. As medidas foram obtidas usando a técnica C-V quase-estática (o) e o método da condutância (x). A estrutura apresenta alta densidade de estados ( $D_{it} > 10^{11} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ ) e um pico a 0,3 eV acima da banda de valência. Um ou mais picos são freqüentemente relatados nessa alta densidade e costumam ser interpretados como diferentes tipos de defeitos existentes na interface. O método quase estático fornece a densidade total de estados de interface. Sher et al.<sup>4</sup>, através de medidas de condutância, separaram-nos em três tipos de estados, como ilustra a figura I.9. A curva 1 representa a densidade total de estados de interface (QSCV), enquanto as curvas 2, 3 e 4 mostram respectivamente as densidades de estados lentos, estados rápidos e estados fluorados. Estados lentos são estados com constante de tempo grande (em certos casos até alguns dias); estados rápidos, ao contrário, têm constante de tempo muito pequena (da ordem de mili e microssegundos). Estados fluorados não foram definidos na referência.

Outros picos são observados<sup>5,6</sup>, especialmente após irradiação. Suas origens não estão bem estabelecidas.

O recozimento pós metalização na presença de hidrogênio permite reduzir fortemente a densidade de cargas capturadas na interface, como mostra a figura I.10. É aceito comumente o modelo em que o hidrogênio satura ligações insaturadas no óxido e interface com o silício, removendo os estados de interface. Todo o conhecimento sobre como obter baixas densidades de estados foi desenvolvido empiricamente. Hofmann e Schulz<sup>7</sup> mostraram que o

## A Estrutura MOS

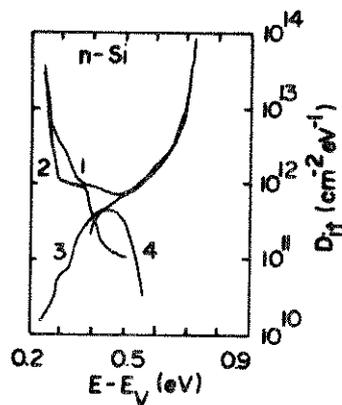


Figura I.9 Distribuição da densidade de estados de interface  $D_{it}$  como função da energia  $E-E_v$ . A oxidação da amostra de silício tipo-n (100) até a espessura de 25nm foi efetuada em  $O_2$  seco a 1150°C sem exposição a hidrogênio. Um filme de 25nm de  $LaF_3$  foi evaporado sobre o óxido por "eletron-beam". 1. C-V quase estática,  $D_{it}$  total; 2. Condutância, estados lentos; 3, 4. Condutância, estados rápidos; 4. Condutância, estados fluorados.

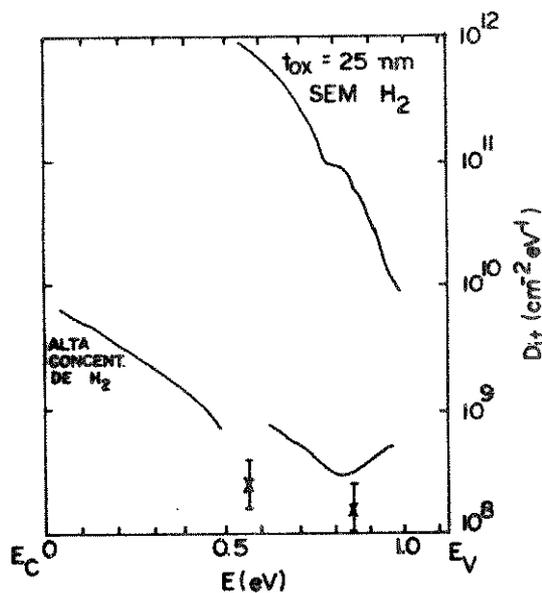


Figura I.10 Distribuição de estados de interface por energia. Um decréscimo constante em relação à banda de condução é geralmente observado. A densidade cai com o recozimento em hidrogênio.<sup>3</sup>

## A Estrutura MOS

recozimento pós oxidação em presença de  $N_2$  a temperaturas baixas ( $T < 900, C$ ) pode aumentar  $D_{it}$ , concluindo que o procedimento imediatamente após a oxidação (recozimento e resfriamento) é importante na criação de estados de interface.

### C) Cargas capturadas no óxido - Not.

São cargas que podem estar localizadas ao longo de todo o volume do óxido, inclusive nas interfaces com o metal e com o semicondutor<sup>6</sup>. Estão associadas a tensões e defeitos no óxido, como ligações quebradas e impurezas. Tais defeitos, normalmente neutros, são carregados com a introdução de elétrons e lacunas no óxido. Diferentes das cargas capturadas na interface, que variam com a polarização, as cargas capturadas no óxido são independentes da polarização de porta. Existem várias maneiras de carregar os defeitos intrínsecos ao  $SiO_2$ <sup>8</sup>:

- injeção de portadores por fotoemissão interna;
- injeção de portadores por avalanche;
- tunelamento de portadores do silício ou da porta, no caso de óxidos muito finos;
- exposição a radiação ionizante com energia maior que o gap do  $SiO_2$  (8,8eV).

Durante a operação, os portadores podem ser acelerados pelas diferenças de potencial entre as várias regiões que constituem os dispositivos, causando injeção e captura de portadores "quentes" no óxido. Isso pode ser evitado de várias maneiras:

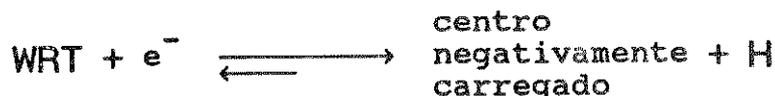
## A Estrutura MOS

- operando os dispositivos a tensões baixas o suficiente para que não ocorra injeção ( $V < 3,2V$ );
- uso de canal enterrado para manter os portadores quentes longe da interface Si-SiO<sub>2</sub>;
- fazendo junções de tal modo que o rompimento por avalanche não ocorra próximo à interface;
- projetando estruturas que evitem campos muito intensos.

A natureza dos centros de captura de cargas no óxido é desconhecida. Segundo Nicollian & Brews<sup>9</sup>, os dois tipos de defeitos intrínsecos mais importantes são os centros de captura relacionados à presença de água (Water-Related Traps - WRT) e os centros intrínsecos de captura de lacunas (Intrinsic Hole Traps - IHT). Suas características mais importantes são:

### a) WRT

- captura elétrons (a seção de captura é  $\rho_n = 1,5 \cdot 10^{-17} \text{cm}^{-2}$ )<sup>10</sup>;
- densidade proporcional à quantidade de água presente no óxido;
- natureza química desconhecida;
- a captura pode envolver reação eletroquímica:



- podem ser descarregados termicamente por aquecimento a 200°C durante 15 minutos,

## A Estrutura MOS

com energia de ativação de 0,35 eV, mas não o são opticamente.

### b) IHT

- captura lacunas ( $\rho_p \approx 10^{-13} - 10^{-14} \text{ cm}^{-2}$ )<sup>11</sup>;
- carregamento  $10^3 - 10^4$  mais rápido que WRT para elétrons;
- natureza química desconhecida;
- não experimentam mudança química quando uma lacuna é capturada;
- podem ser descarregados termicamente a temperaturas na faixa (150-400).C, com energia de ativação de 0,35eV e por fotoemissão de elétrons.

### D) Cargas fixas - $N_f$

Em óxidos com baixas densidades de cargas móveis e submetidos a tratamento térmico para eliminação de  $N_{it}$  e  $N_{ot}$ , é possível observarmos um deslocamento  $\Delta V_{FB}$  maior que o devido a  $\phi_{MS}$ . Este fato geralmente é interpretado como outro tipo de carga no óxido: as cargas fixas. São cargas localizadas espacialmente que não mudam seu estado de carga pela troca de portadores com o silício. Segundo Nicollian<sup>12</sup>, medidas experimentais indicam que localizam-se na chamada região de óxido tensionado (até 3nm da interface Si-SiO<sub>2</sub>). Nessa região de transição, onde o óxido é considerado não-estequiométrico (composição do tipo SiO<sub>x</sub>), as tensões existentes entre os átomos têm sido apontadas como as

## A Estrutura MOS

responsáveis pela ocorrência de cargas fixas.

Estados de interface próximos às bandas de condução ou de valência geram um deslocamento  $\Delta V_{FB}$  da curva C-V sem estiramento (stretchout) significativo. Portanto, não está claro se as chamadas cargas fixas são estados de interface próximos às bordas das bandas do silício ou estados com constante de tempo muito grande. Como a técnica C-V não nos permite avaliarmos a densidade destes estados com precisão significativa, estes são considerados como cargas fixas na interpretação das curvas. Também não se sabe se estados de interface e cargas fixas têm a mesma origem química ou não.

Do ponto de vista elétrico, podemos considerar  $N_f$  como uma folha de cargas localizada na interface, com centróide igual à espessura do óxido, dada à sua proximidade com a interface. Um transistor MOS canal-n com espessura de óxido de porta de 50nm (1000°C, O<sub>2</sub> seco,  $N_A=2.10^{15} \text{cm}^{-3}$ ) e  $N_f \approx 1.10^{11}$ , teria  $V_T$  da ordem de (0,2-0,3)V<sup>13</sup>.

Como os estados de interface,  $N_f$  é dependente da orientação do substrato, do ambiente de oxidação (seco ou úmido) e das etapas de tratamento térmico. Depende ainda da temperatura de oxidação e da pressão de O<sub>2</sub> durante a etapa de oxidação. Segundo Deal<sup>14</sup>, para amostras submetidas a recozimento pós metalização, a densidade de cargas fixas diminui com o aumento da temperatura de oxidação. O gráfico da figura I.11(b) apresenta  $N_f$  em função dos caminhos de oxidação e recozimento para capacitores fabricados sobre substratos tipo n e tipo p. A parte (a)

## A Estrutura MOS

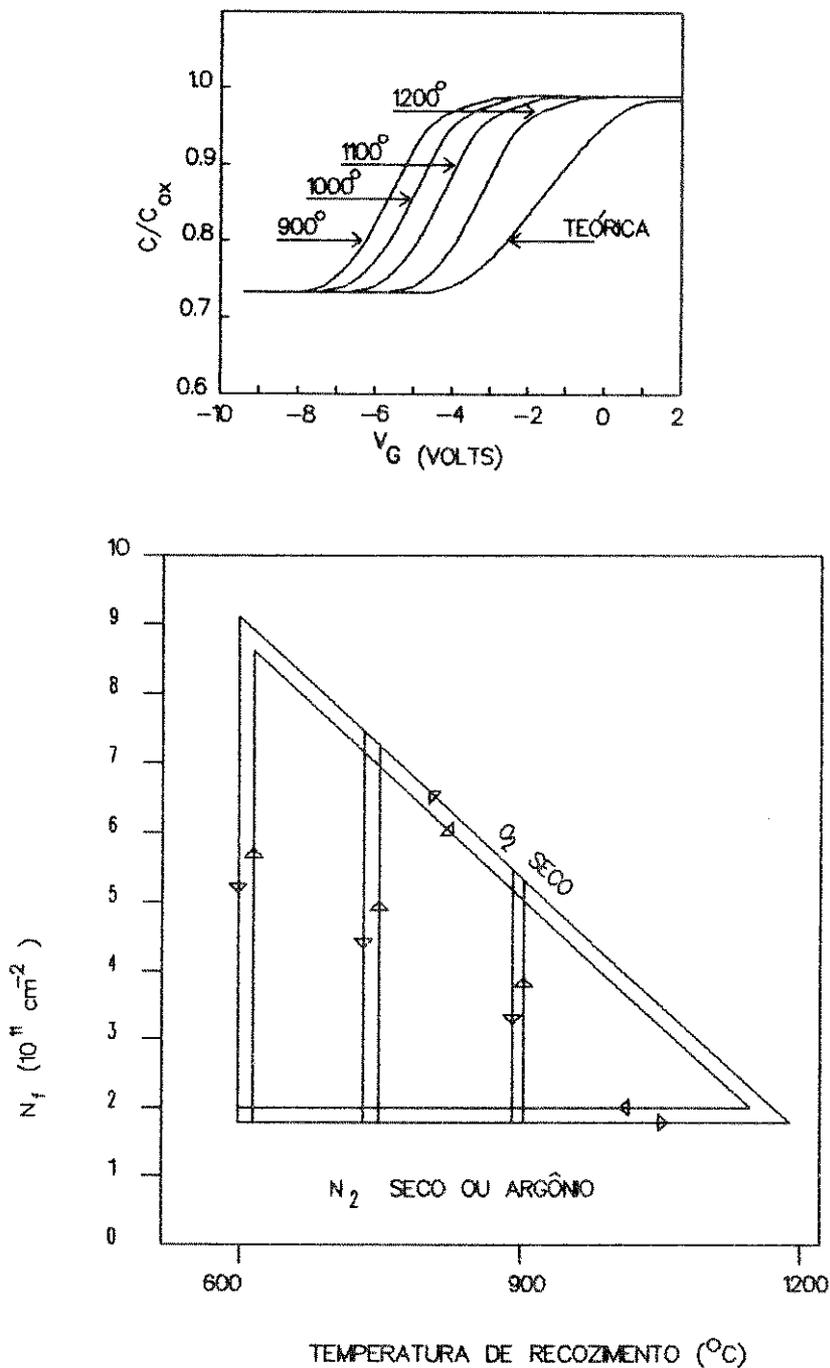


Figura I.11 (a) Curvas C-V alta frequência de capacitores MOS com óxidos crescidos a diferentes temperaturas em  $O_2$  seco.  $t_{ox}=200\text{nm}$ ,  $N_D=1,4 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , orientação (111). A curva teórica foi calculada com  $Q_f = Q_{it} = \phi_{ms} = 0$ . (b) Densidade de cargas fixas em função da temperatura de recozimento, para tempos de recozimento de uma hora ou menos, mostrando os caminhos de oxidação-recozimento. <sup>15</sup>

## A Estrutura MOS

apresenta uma série de curvas C-V de capacitores com óxidos crescidos em diferentes temperaturas, sobre substrato tipo n, na presença de O<sub>2</sub> seco. O deslocamento no sentido negativo indica que as cargas têm sinal positivo.

Outro fator importante na determinação da densidade de cargas fixas é a taxa de resfriamento da lâmina após a oxidação. Quanto mais rápido o resfriamento, menor N<sub>f</sub>. Entretanto, a possibilidade de criar defeitos no substrato ou empenar a lâmina introduz um limite na taxa de resfriamento. Uma solução é conduzir o resfriamento lentamente em ambiente inerte, evitando que a reação de oxidação continue ocorrendo durante o resfriamento.

### Referências.

- 1 E.H. Nicollian and J.R. Brews, *MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology*, p. 763, John Wiley & Sons, New York, 1982.
- <sup>2</sup>B.E. Deal, *IEEE Transact. Electron Devices*, Vol. ED-27, No. 3, p. 607, 1980.
- <sup>3</sup>S.A. Schwartz, M.J. Schulz, *VLSI Electronics Microstructure Science*, Vol. 10, p. 35, 1985.
- <sup>4</sup>A. Sher, Y.H. Tsuo, P. Su, and W.E. Miller, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 36, p. 991, 1980.

## A Estrutura MOS

- <sup>5</sup>Y. Nishioka, E.F. da Silva Jr., and T.P. Ma, *IEEE Transact. Nucl. Sci.*, Vol. 35, no. 6, pp. 1227-1233, 1988.
- <sup>6</sup>C.T. Sah, *Solid-State Electronics*, Vol. 33, no.2, pp. 147-167, 1990.
- <sup>7</sup>Citado em Schwartz & Schulz (ref.3), P. 66, fig. 25.
- <sup>8</sup>Nicollian & Brews (ref.1), p. 493.
- <sup>9</sup>Idem, p. 532.
- <sup>10</sup>E.H. Nicollian, C.N. Berglund, P.F. Schmidt, and J.M. Andrews, *J. Appl. Phys.*, Vol. 42, p. 5654, 1971.
- <sup>11</sup>J.M. Aitken and D.R. Young, *IEEE Transact. Nuclear Sci.*, Vol. NS-29, no. 6, p. 21-28, 1977.
- <sup>12</sup>Nicollian & Brews, p. 523.
- <sup>13</sup>Nicollian & Brews, p. 787.
- <sup>14</sup>B.E. Deal, M. Sklar, A.S. Grove, and E.H. Snow, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 120, p. 90, 1973.

## II - MÉTODO DE MEDIDAS C-V.

A técnica C-V é largamente empregada em medidas de controle de processos MOS por apresentar as seguintes vantagens:

- rapidez: é possível obter curvas C-V em alta e baixa frequência em poucos minutos;
- boa sensibilidade para aplicações não VLSI, permitindo detectar densidades de cargas no óxido de até  $10^{10} \text{ cm}^{-2}$  (para  $N_{A,D} \approx 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ );
- simplicidade da montagem experimental;
- não destrutiva;
- foi bastante estudada.

Usando diferentes procedimentos de medida, é possível obtermos das curvas C-V, entre outras, as seguintes características:

- capacitância de banda plana ( $C_{FB}$ );
- espessura do óxido ( $t_{ox}$ );
- concentração efetiva de dopantes ( $N_{A,D}^*$ );
- densidade de cargas capturadas na interface ( $D_{it}$ );
- densidade de cargas móveis ( $N_m$ );
- densidade de cargas fixas ( $N_f$ );
- densidade de cargas capturadas no óxido ( $N_{ot}$ ).

Com relação à capacitância em função da polarização aplicada a um capacitor MOS, podemos definir dois tipos de capacitância:

## A técnica C-V

■ capacitância estática:  $C_{est} \equiv \frac{Q_T}{V_G}$ ,

onde  $Q_T$  é a densidade de carga total no substrato e  $V_G$  é a polarização aplicada;

■ capacitância diferencial:  $C \equiv \frac{dQ_T}{dV_G}$ .

Como  $Q_T$  no capacitor MOS pode variar não linearmente com a tensão, geralmente  $C_{est} \neq C$ . A menos que especifiquemos, é da capacitância diferencial que trataremos neste trabalho.

A resposta de um capacitor a um sinal alternado apresenta uma diferença de fase, em relação ao sinal aplicado, dependente da capacitância. Os aparelhos de medida baseiam-se neste princípio. Para medir-se a capacitância em função da polarização, um sinal alternado de pequena amplitude ( $\approx 50\text{mV}$ ) é superposto ao nível DC aplicado. Dependendo da frequência deste sinal e do tempo de resposta dos portadores, a curva C-V

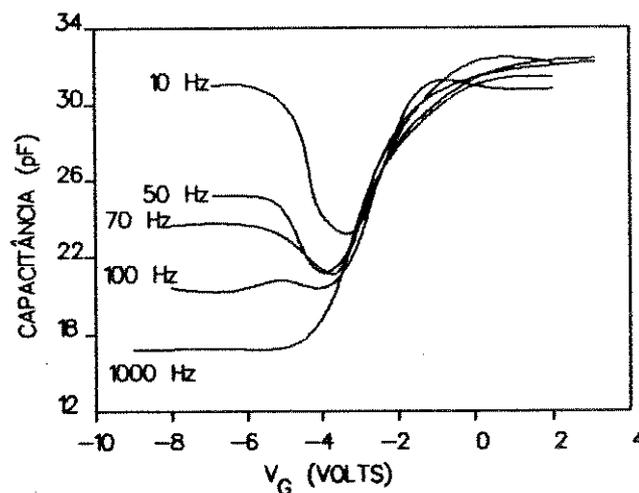


Figura II.1 Capacitância em função da polarização medida a 300K, com a frequência como parâmetro. A amostra é tipo-n, orientada na direção (100). O diâmetro da porta é  $1,2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  e a capacitância do óxido  $2,84 \cdot 10^{-8} \text{ F/cm}^2$ .

A técnica C-V

resultante apresenta um determinado comportamento, como mostra a figura II.1.

### II.1 - Capacitância em baixas frequências.

Se o período de um sinal alternado é bem maior que o tempo de resposta de portadores minoritários, estes conseguem acompanhar o sinal aplicado e um estado estacionário é mantido. É o que chamamos de baixa frequência. Em termos práticos, situa-se na faixa (5 a 100)Hz. Nestas condições, um estado de quase equilíbrio ou estado estacionário é mantido. Isto significa que os parâmetros macroscópicos do sistema não variam no tempo ou variam senoidalmente no tempo com amplitudes constantes. A consequência direta desta suposição é que as grandezas relevantes dependentes do tempo ( $V_G(t)$ ,  $\psi_s(t)$ ,  $Q_s(t)$ ) podem ser escritas como a soma de duas componentes: uma constante e outra variando no tempo [ $V_G(t) = V_G + \delta V_G$ , por exemplo]. Partindo da lei de Gauss e considerações acima, calculamos a expressão para a capacitância do capacitor MOS ideal:<sup>1</sup>

$$\boxed{\frac{1}{C} = \frac{1}{C_s(\psi_s)} + \frac{1}{C_{ox}}} \quad \text{II-1}$$

onde  $C_s$  é a capacitância diferencial em baixa frequência do silício por unidade de área,

$$C_s(\psi_s) \equiv - \frac{dQ_s}{d\psi_s};$$

$\psi_s$  é o encurvamento de bandas de energia independente do tempo causado por  $V_G$ ;

$Q_s$  é a densidade de carga na superfície

## A técnica C-V

do silício;

$C_{ox}$  é a capacitância do óxido por unidade de área,  $C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$

$\epsilon_{ox}$  = constante de permissividade dielétrica do óxido;

$t_{ox}$  = espessura do óxido.

A expressão II-1 permite-nos elaborar um modelo para o funcionamento do capacitor MOS em baixas frequências, como mostra-nos a figura II.2. Temos uma associação série entre a capacitância do óxido (que é constante) e a do silício (dependente da polarização).

O cálculo de  $C_s(\psi_s)$  parte da solução unidimensional da equação de Poisson para o caso de concentração uniforme de dopantes e está sujeito aos seguintes limites e suposições:<sup>2</sup>

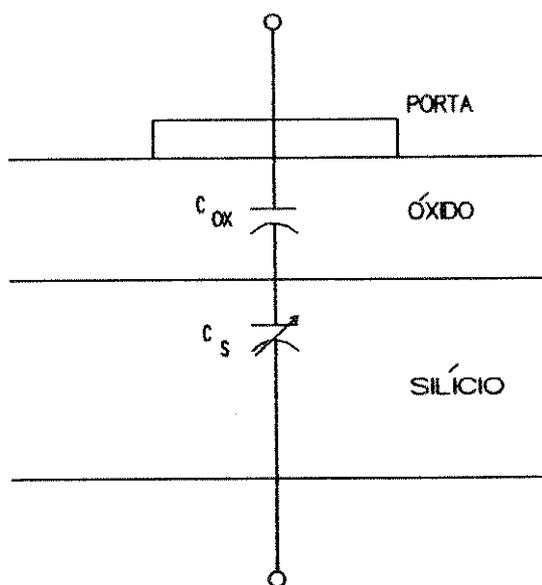


Figura II.2 Seção transversal de um capacitor MOS mostrando um circuito equivalente simplificado. O capacitor  $C_s$  é desenhado com um capacitor variável para representar a dependência com a polarização.

## A técnica C-V

- efeitos de borda são desprezíveis, ou seja, as dimensões da área da porta são bem maiores que espessura do óxido ( $t_{ox}$ );
- a interface é uniformemente dopada;
- o semiconductor é não degenerado;
- os campos presentes não são muito intensos ( $<10^6 V/cm$ );
- temperaturas não muito baixas;
- a aproximação de encurvamento de bandas é válida.

Unindo a lei de Gauss à expressão para o campo elétrico adimensional, [ $F(u_s, u_B)$ -decorrente da solução de Poisson na forma adimensional] obtemos a carga superficial total ( $Q_s$ ) por unidade de área:

$$Q_s = \frac{\epsilon_s}{\lambda_1} \left( \frac{kT}{q} \right) \text{Sgn} (u_B - u_s) F(u_s, u_B) \quad \text{II-2}$$

onde  $\epsilon_s$  é a constante de permissividade dielétrica do silício;

$$\lambda_1 \equiv \left( \frac{\epsilon_s kT}{2q^2 n_1} \right)^{1/2} \text{ comprimento de Debye intrínseco}$$

$$F(u_s, u_B) = 2^{1/2} \left[ (u_B - u_s) \text{senh} u_B - \text{cosh} u_B + \text{cosh} u_s \right]^{1/2}$$

$k$ - constante de boltzmann

$T$ - temperatura absoluta

$q$ - carga do elétron

$n_1 = (M_v M_c) \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$  concentração intrínseca de portadores.

## A técnica C-V

Diferenciando em relação a  $\phi_s$ , obtemos:

$$C_s = -\text{Sgn}(u_B - u_s) \left( \frac{\epsilon_s}{\lambda_1} \right) \frac{\sinh u_s - \sinh u_B}{F(u_s, u_B)} \quad \text{II-3}$$

Novamente usando a lei de Gauss, podemos relacionar o campo no óxido à carga por unidade de área no silício:

$$V_G = -\frac{Q_s}{C_{ox}} + \frac{kT}{q} (u_B - u_s) \quad \text{II-4}$$

Com as expressões II-1 a II-4, podemos calcular a curva do capacitor MOS ideal em baixa frequência.

Qualitativamente, podemos descrever o comportamento da capacitância da seguinte maneira. A figura I.4 apresenta os diagramas de bandas de energia e a curva C-V em baixa frequência de um capacitor MOS fabricado sobre de silício-p. Ao polarizá-lo em acumulação, lacunas serão atraídas para a superfície. Devido à alta concentração de cargas, o valor da capacitância diferencial se eleva até que  $C_s \gg C_{ox}$ . Da equação II-1 concluímos que  $C = C_{ox}$  na acumulação. Para valores de polarização menos negativos,  $C_s$  será comparável a  $C_{ox}$ . Em consequência,  $C$  será menor que  $C_{ox}$ . Quando  $V_G$  for igual a zero, estaremos na condição de banda plana. A formação da região de carga espacial será provocada por uma tensão de porta positiva, provocando depleção dos portadores. O aumento da largura da camada de depleção faz com que  $C_s$  assumam valores cada vez menores, o mesmo acontecendo com a capacitância total  $C$ . Com a inversão da superfície ( $\psi_s > \phi_B$ ),  $C_s$  começa a

A técnica C-V

aumentar, assim como C. Para voltagens positivas, tais que provoquem encurvamento de bandas  $\psi_s \geq 2\phi_B$ , a camada de inversão estará formada. Sua capacitância, devido à grande concentração de portadores minoritários na superfície, nos dará novamente a condição  $C_s \approx C_{ox}$ . C tomará o valor de  $C_{ox}$ .

As expressões aproximadas para  $C_s$  no caso Si-p são apresentadas a seguir:

II-5

$$C_s = - \frac{\text{Sgn}(-v_s)}{\sqrt{2}} \frac{\epsilon_s}{\lambda_p} \frac{\left[ \left( \frac{n_i}{N_A} \right)^2 \exp(v_s) - \exp(-v_s) + 1 \right]}{\left[ (v_s - 1) + \left( \frac{n_i}{N_A} \right) \exp(v_s) - \exp(-v_s) \right]^{1/2}}$$

onde  $\lambda_p = \left( \frac{kT\epsilon_s}{q^2 N_A} \right)$  = comprimento extrínseco de Debye para Si-p;

Um gráfico de  $C_s$  em função do encurvamento de bandas ( $T=300^\circ\text{C}$ ) é apresentado na figura II.3.

Na condição de banda plana: ( $v_s=0$ )

$$\text{II-6} \quad C_{FBS} = \frac{\epsilon_s}{\lambda_p} \quad \boxed{C_{FB} = \frac{C_{FBS} C_{ox}}{C_{FBS} + C_{ox}}}$$

Na acumulação:  $\left( \frac{p_s}{N_A} \gg \frac{n_s}{N_A} ; \frac{p_s}{N_A} \gg 1 \right)$

$$\text{II-7} \quad \boxed{C_A = \frac{C_{FBS}}{\sqrt{2}} \exp\left(\frac{-v_s}{2}\right)}$$

Na depleção:  $\left( \frac{p_s}{N_A} = \frac{n_s}{N_A} = 0 \right)$

$$\text{II-8} \quad \boxed{C_D = \frac{C_{FBS}}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{(v_s - 1)}}$$

A técnica C-V

Na inversão forte:  $\left( \frac{n_s}{N_A} \gg \frac{p_s}{N_A} ; \frac{n_s}{N_A} \gg (U_s - U_B - 1) ; \frac{n_s}{N_A} \gg 1 \right)$

$$\text{II-9} \quad C_I = \frac{C_{FBS}}{2} \frac{n_i}{N_A} \exp\left(\frac{V_s}{2}\right)$$

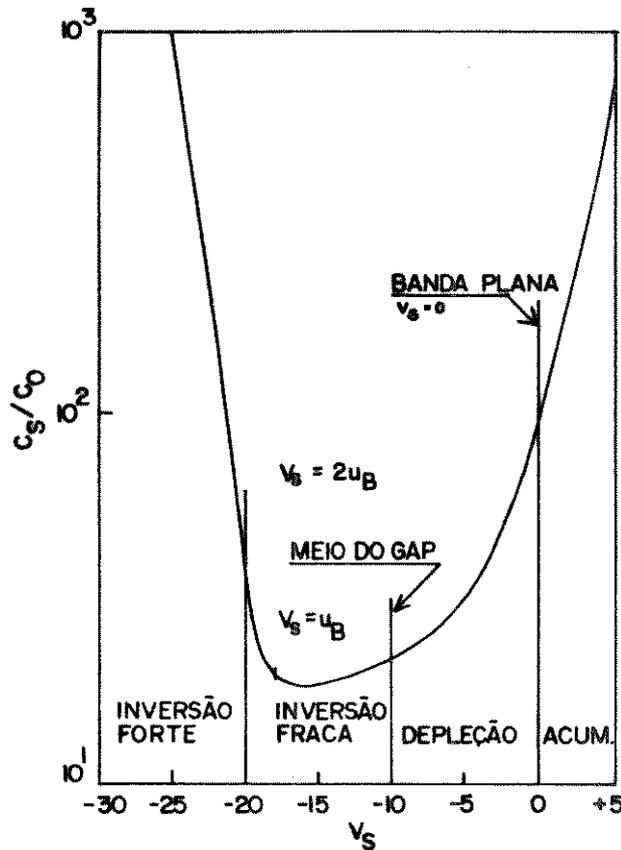


Figura II.3 Capacitância da superfície do silício em função do encurvamento de bandas, calculado através da expressão II-5.<sup>1</sup>

II.2 - Capacitância em altas frequências.

II.2.a Tempo de resposta de portadores.

Quando saímos da faixa considerada de baixa frequência,

## A técnica C-V

precisamos levar em conta o tempo de resposta dos portadores no silício. Para as frequências de interesse neste trabalho (1MHz), o tempo de resposta dos portadores majoritários ( $\tau_{maj}$ ) é suficiente para acompanhar o sinal ac. Na acumulação e depleção, onde a resposta de majoritários ao sinal aplicado determina a capacitância, a condição para tal é:

$$\frac{1}{\omega} \gg \tau_D, \quad \text{onde } \tau_D \text{ — tempo de relaxação dielétrica,}$$
$$\omega \text{ — frequência angular do sinal.}$$

A expressão para  $\tau_{maj}$  vem de um modelo de perturbação localizada do potencial:

$$\tau_{maj} = \frac{\epsilon_s}{q\mu n}.$$

Seus valores podem variar de  $\tau_{maj} \approx 10^{-6}$  s, na interface depleta de um capacitor MOS, até  $\tau_{maj} \approx 10^{-12}$  s, próximo à borda da camada de depleção. Embora a estimativa acima indique que os majoritários próximos à interface podem não seguir o sinal ac na região desde o meio do gap até a inversão, este fato não afeta a capacitância em alta frequência, que é dominada pelos majoritários na borda da camada de depleção.

Na inversão, o tempo de resposta dos portadores minoritários ( $\tau_{min}$ ) determina a capacitância. Como  $\tau_{min}$  varia entre 0,001s e 1s à temperatura ambiente (considerando apenas processos térmicos de geração), a capacitância depende da frequência, como mostra a figura II.1. Essa dependência advém do atraso dos portadores minoritários em relação ao sinal ac. Tal atraso produz uma perda de energia que deve ser compensada pela fonte ac. Fazendo uma analogia com um circuito R-C, a constante

## A técnica C-V

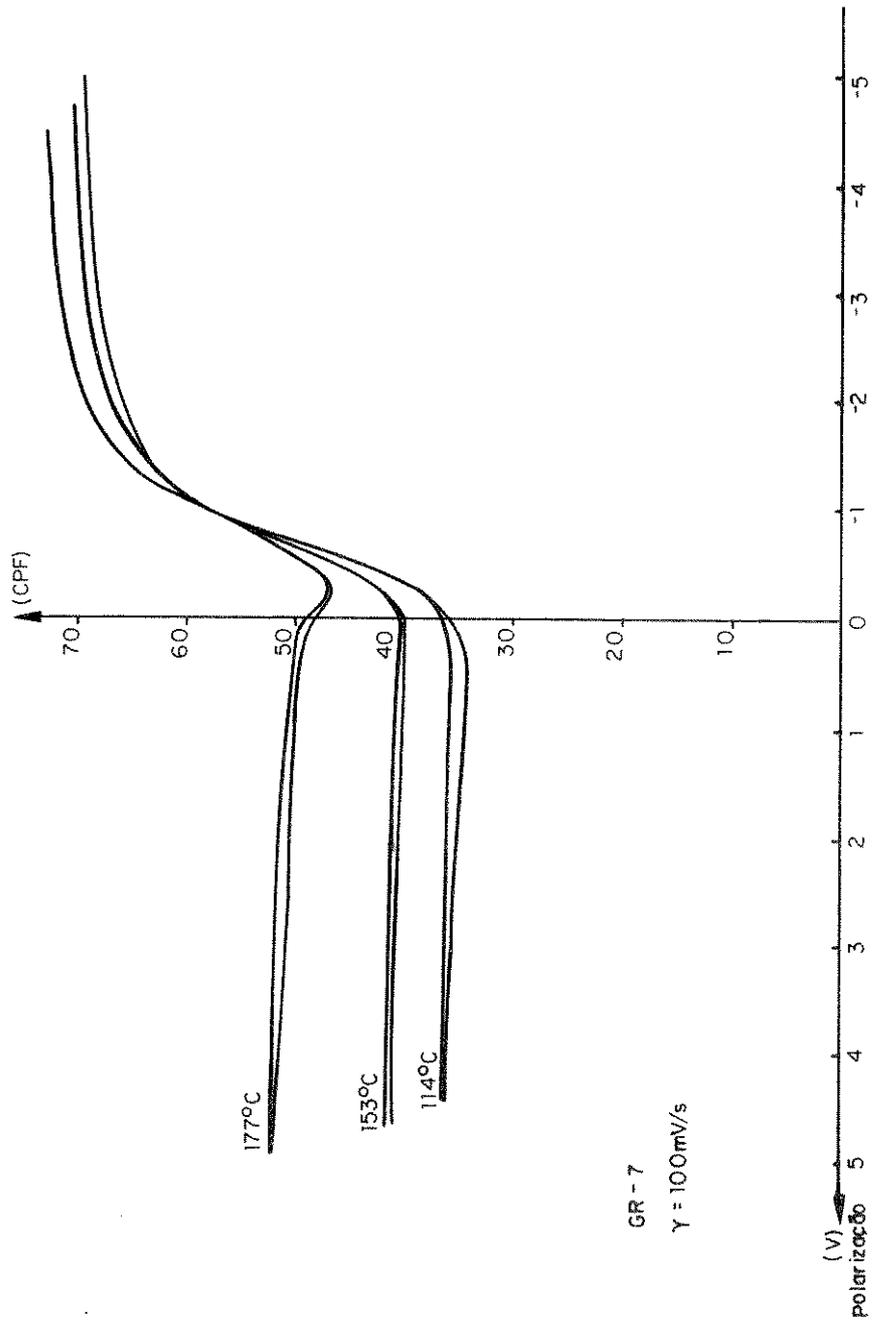


Figura II.4 Curvas C-V em alta frequência, tendo a temperatura como parâmetro. Observa-se que acima de 153°C a geração de portadores no contato e sua difusão através do corpo do semiconductor é o mecanismo dominante do fornecimento de minoritários para a camada de inversão.

## A técnica C-V

de tempo seria o tempo de resposta de minoritários e a perda de energia ocorreria na resistência.

Existem três mecanismos determinantes do fluxo de portadores minoritários de e para a camada de inversão:

- geração de portadores no contato, seguida de difusão através do corpo do semiconductor e deriva pela região de depleção;
- geração e recombinação na camada de depleção;
- fornecimento de minoritários por uma camada de inversão externa.

Os mecanismos 1 e 2 dependem da temperatura. À temperatura ambiente, a geração/recombinação na camada de depleção é dominante. Conforme a temperatura aumenta, o mecanismo de difusão destaca-se. Para a amostra da figura II.4, a difusão domina acima de 153°C. Abaixo dessa temperatura, a camada de inversão é suprida pela geração/recombinação de portadores minoritários na camada de depleção. É possível assim elaborarmos circuitos equivalentes a esses fenômenos.

### II.2.b Circuitos Equivalentes

A figura II.5(a),(b) mostra os circuitos equivalentes para o capacitor MOS, não levando em conta geração/recombinação de minoritários na camada de depleção. Os termos CB e VB indicam as bordas das bandas de condução e de valência, respectivamente. O substrato é tipo n. Na parte (a), o capacitor está em depleção. Um contato é feito com a porta e outro com a banda de condução do

## A técnica C-V

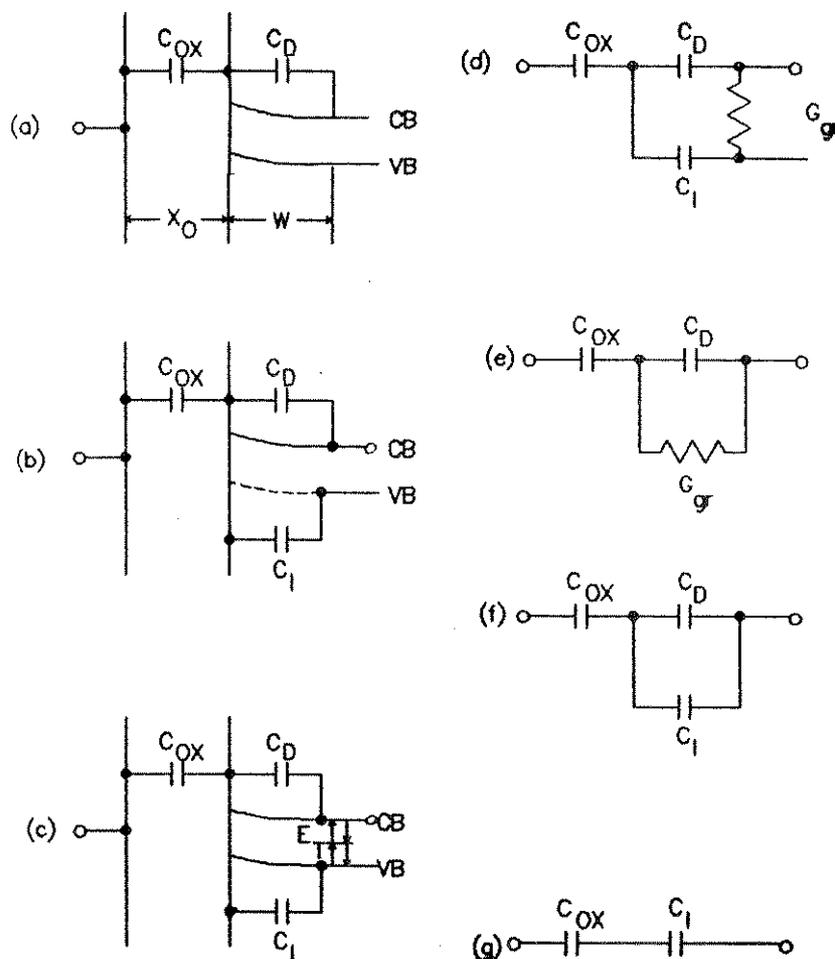


Figura II.5 Circuitos equivalentes para o capacitor MOS mostrando como vários elementos do circuito comunicam-se com as bandas de condução e de valência; CB e VB representam as bandas de condução e de valência, respectivamente. terminais externos são designados por circunferências.

silício. A capacitância da camada de depleção está conectada à banda de condução porque  $C_D$  é carregada e descarregada pelo fluxo de majoritários entrando e saindo da borda da camada de depleção através do contato ôhmico. Não há contato com a banda de valência porque não há meios para que ela se comunique com o contato. Na parte (b), o capacitor está em inversão forte. A capacitância da camada de inversão está em contato com a interface e com a banda

## A técnica C-V

de valência. Apesar de estar em contato com a capacitância do óxido através da interface, não há comunicação com a banda de condução e  $C_i$  não contribui para a capacitância total.

As partes (c) a (g) da figura II.5 levam em conta a geração e recombinação de minoritários na camada de depleção. Uma representação geral do circuito é feita em c, onde podemos observar a comunicação elétrica entre as bandas através do nível  $E_T$ , situado próximo ao meio do gap.  $E_T$  representa os níveis de energia de defeitos no semicondutor responsáveis pelo processo de geração/recombinação de portadores minoritários.

Durante geração ou recombinação, pode ocorrer perda de energia no semicondutor. Considere um substrato tipo n polarizado em inversão, sujeito ao sinal ac. Durante a parte negativa do ciclo, lacunas são solicitadas pela camada de inversão e supridas por geração através de defeitos na camada de depleção. A energia para gerar pares elétron-lacuna provém da rede do semicondutor, mas esta energia retorna para a rede assim que as lacunas geradas termalizam na camada de inversão e os elétrons termalizam no corpo do silício. Em altas frequências, a demanda de lacunas excede sua geração. O sinal ac aplicado diminui a energia média das lacunas na camada de inversão. Quando as lacunas da região de depleção vão para a camada de inversão, perdem energia para a rede ao ocupar níveis de energia mais baixos. Analogamente, durante a parte positiva do ciclo, lacunas são ejetadas da camada de inversão com energia provida pela rede. Como a recombinação não vence o número de lacunas ejetadas, a energia média das

## A técnica C-V

lacunas da camada de inversão torna-se maior que a energia das lacunas do corpo do semiconductor. Após certo intervalo de tempo, quando a recombinação ocorre, esta energia excedente é perdida para a rede cristalina do material. Nos dois casos, a energia perdida é suprida pela fonte de sinal.

Se a concentração de defeitos profundos ( $n_T$ ) é pequena, efeitos capacitivos associados à captura/emissão podem ser desprezados e o circuito equivalente é o da figura II.5(d). No caso de inversão forte, o valor de  $C_i$  eleva-se e passa a funcionar como um curto-circuito em série com  $G_{gr}$  (condutância por geração/recombinação), pois  $\omega C_i \gg G_{gr}$  [fig.II.5(e)]. Para frequências muito baixas, a geração/recombinação supre a demanda de portadores minoritários da camada de inversão. Como não há atraso na resposta dos portadores ou perda de energia (o equilíbrio se mantém),  $G_{gr}$  é desprezível e temos o circuito da figura II.5(f). No caso de inversão forte,  $C_i \gg C_D$  e a capacitância da camada de inversão prevalece. O circuito equivalente está representado em g. Além disso, como  $C_i$  torna-se muito maior que a capacitância do óxido,  $C_{ox}$  prevalece na associação série e a capacitância total em baixa frequência assume o valor de  $C_{ox}$ .

### II.2.C - Aproximação

Como vimos anteriormente, as diferenças significativas entre curvas de capacitância em alta e baixa frequência se dão a partir da inversão fraca até a inversão forte, quando a

## A técnica C-V

concentração de portadores minoritários na camada de depleção passa a ser comparável ou maior que a concentração de portadores majoritários. A capacitância em alta frequência na superfície do silício pode ser expressa por:

II-10

$$C_s = 2C_{FBS} \left\{ 1 - \exp(-v_{so}) + \left( \frac{n_i}{N_A} \right)^2 \left[ (\exp(v_{so}) - 1) \frac{\Delta}{1 + \Delta} + 1 \right] \right\} F(v_{so}, U_B)$$

$$F(v_{so}, U_B) \equiv 2^{1/2} \left\{ v_{so} + \exp(-v_{so}) - 1 + \exp(2U_B) [\exp(v_s) - 1] \right\}$$

onde  $v_{so}$  é o encurvamento de faixas independente do tempo, estabelecido pela polarização;

$$\Delta \approx \frac{F(v_{so}, U_B)}{\exp(v_{so}) - 1} \left\{ \int_0^{v_{so}} dv_s \left[ \frac{\exp(v_s) - \exp(-v_s) - 2v_s}{F^3(v_s, U_B)} \right] - 1 \right\}$$

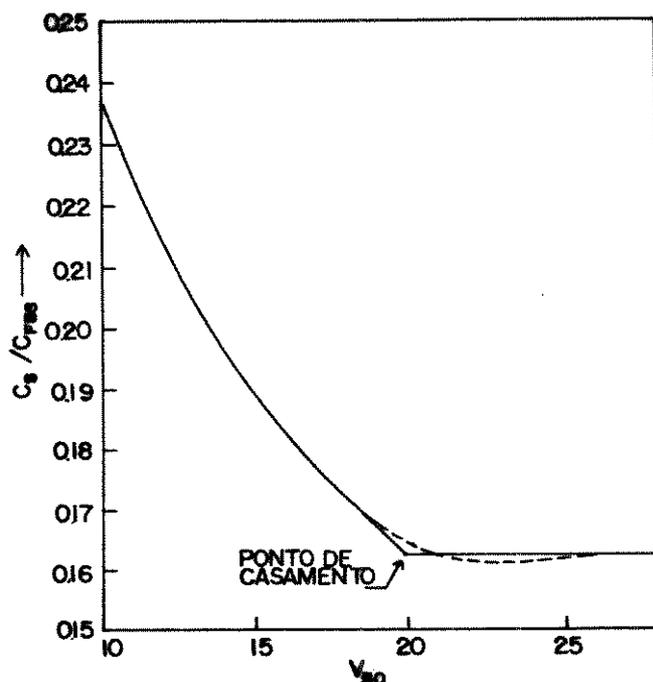


Figura II.6  $C_s/C_{FBS}$  em função de  $v_{so}$ . A curva tracejada foi calculada usando II-10; a curva contínua é a capacitância aproximada, calculada das equações II-11 a II-13. Uma densidade de aceitadores de  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  foi usada nestes cálculos. O ponto de casamento corresponde a  $v_m = v_l - 0,75$ .

## A técnica C-V

Lindner<sup>3</sup> elaborou uma aproximação mais tarde aperfeiçoada por Brews<sup>4</sup>, cujo desvio é menor que 1,5% em relação aos valores reais de inversão. O método consiste em dividir a curva em duas partes, como podemos ver na figura II.6: uma dependente da polarização e outra constante. Para a primeira parte, usa-se a aproximação da expressão II-10 na inversão fraca (si-p):

$$\text{II-11} \quad C_s = C_{FBS} [1 - \exp(-v_{so})] F^{-1}(v_{so}, U_B) \quad ; \quad v_{so} \leq 2U_B$$

e  $F(v_{so}, U_B)$  reduz-se a

$$\text{II-12} \quad F(v_{so}, U_B) = 2^{1/2} [v_{so} - 1 + \exp(-v_{so})]^{1/2}$$

A seguir, determinamos o ponto de casamento ou concordância entre as duas partes da curva. A partir daí, a capacitância é constante:

$$\text{II-13} \quad v_m = 2,10U_B + 1,33 \quad \text{onde}$$

$v_m$  é o encurvamento de bandas para o qual a concordância das curvas ocorre.

A figura II.6 compara o cálculo numérico da expressão II-10 com a aproximação II-11 a II-13.

### II-3 - Extração de propriedades do SiO<sub>2</sub> das curvas C-V.

Neste ítem abordaremos a maneira de obter das curvas C-V, as grandezas listadas na introdução deste capítulo.

## A técnica C-V

### II.3.a - Espessura do óxido ( $t_{ox}$ ).

Do patamar de acumulação na curva C-V, obtemos o valor de  $C_{ox}$ . Desprezando a resistência em série do contato, temos:

$$II-14 \quad t_{ox} = \frac{A\epsilon_{ox}}{C_{ox}}$$

### II.3.b - Concentração efetiva de dopantes ( $N_{A,D}$ ).

No processo de dopagem do silício, parte das impurezas permanecem eletricamente inativas. A técnica C-V só nos permite medir as impurezas eletricamente ativas. O método mais simples de fazê-lo usa os valores máximo e mínimo da curva C-V em alta frequência. Supondo concentração uniforme de dopantes e desprezando a largura da camada de inversão, podemos usar a expressão II-15:

$$II-15 \quad \frac{N_{A,D}^*}{\ln(N_{A,D}^*/n_i) + \frac{1}{2}\ln[2\ln(N_{A,D}^*/n_i) - 1]} = \frac{4kT\epsilon_{ox}^2}{q^2\epsilon_s t_{ox}^2} \left( \frac{C_{ox}}{CHF(\min)} - 1 \right)^{-2}$$

O valor de  $N_{A,D}^*$  pode ser obtido iterativamente.

Na prática, como não temos concentração uniforme de dopantes, o valor de  $N_{A,D}^*$  obtido é uma média sobre  $W_{max}$  do perfil de dopagem. Um gráfico de II-15 é apresentado na figura II.7, permitindo obter graficamente os valores de  $N_{A,D}^*$ . Os dados apresentados foram obtidos a partir deste método<sup>5</sup>.

### II.3.c - Densidade de cargas fixas ( $N_f$ ).

Como explicado no item I.2.D, a densidade de cargas fixas é medida após o recozimento de  $N_{ot}$  e  $D_{it}$ . Mede-se o desvio  $\Delta V_{FB}$  e usa-se a expressão:

$$II-16 \quad N_f = \frac{C_{ox}}{q} (\Delta V_{FB} + \phi_{MS})$$

A técnica C-V

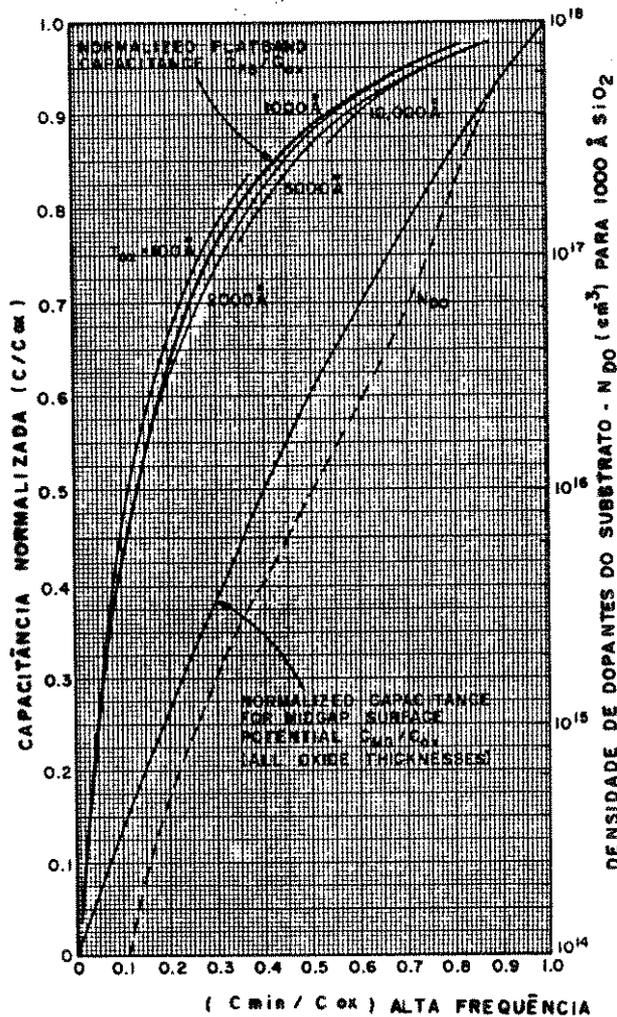


Figura II.7 Capacitância de banda plana, capacitância do meio da banda proibida, e concentração de dopantes no substrato, obtidas da curva experimental C-V em alta frequência. 1. Determine a capacitância mínima em alta frequência normalizada ( $C_{min}/C_{ox}$ ) do experimento. 2. Determine  $N_{D0}$  do gráfico. A concentração de dopantes do substrato é  $N_D = N_{D0}(100nm/t_{ox})^2$ . 3. Do gráfico, determine a capacitância normalizada na banda plana ( $C_{FB}/C_{ox}$ ) ou no meio da banda proibida ( $C_{mg}/C_{ox}$ ).

$$\phi_{MS} = -0,62(\text{alumínio}) - \phi_f; \quad \phi_f = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_{A,D}}{n_i}$$

$V_{FB}$  pode ser encontrado usando o seguinte procedimento:

- tomamos o valor de  $N_{A,D}$  do item II.3.b;
- calculamos  $C_{FB}$  usando II-6;

## A técnica C-V

■ na curva C-V HF determinamos  $V_{FB}$ .

$C_{FB}$  pode ser obtida diretamente do gráfico da figura II.7.

O valor de  $N_f$  obtido dessa maneira supõe que  $N_{it}$ ,  $N_{ot}$  e  $N_s$  assumem valores muito baixos. Na realidade, esta é uma medida da carga líquida total no óxido e interface. Existe ambigüidade entre  $N_f$  e  $N_{ot}$ . Após irradiação e recozimento, é possível que  $N_{ot}$  induzida não tenha sido totalmente eliminada. Por desconhecermos a evolução do recozimento de  $N_{ot}$ , a convenção estabelece que a densidade de cargas medidas após recozimento é  $N_f$ <sup>6</sup>.

### II.3.d - Densidade de cargas móveis.

O método utilizado para medir a densidade de cargas móveis foi o método de varredura triangular em tensão (TVS), desenvolvido por Yamin.<sup>7</sup>

Aquecemos o capacitor MOS a uma temperatura constante, na faixa de (150-400)°C. Aplicamos uma rampa de tensão e medimos a corrente de deslocamento no capacitor. Num óxido sem contaminação iônica aquecido a 300°C,  $n_i$  é elevado e  $C \approx C_{ox}$  qualquer que seja o valor de polarização. Num óxido contaminado, quando a polarização inverte seu sinal, os íons deslocam-se da interface onde inicialmente localizavam-se para a interface oposta. O fluxo de íons no óxido solicita uma componente a mais na corrente. Desta maneira, registramos um pico em corrente, próximo ao zero de tensão.

A técnica C-V

$$\text{II-17} \quad N_m = \frac{1}{\gamma q} \int_{-V_G}^{V_G} dV_G (I_G - \gamma C_{ox})$$

ou seja,  $N_m = \frac{\text{Área}}{\gamma q}$ ,

onde  $\gamma$  é a taxa de variação da tensão na porta  $(\frac{dV_G}{dt})$ .

De acordo com a equação II.17, a densidade de cargas móveis é proporcional à área delimitada entre a curva obtida e a curva ideal (sem cargas móveis). A linha contínua na figura II.8 representa a curva quase estática (ver item II.4.b) a 25°C. A linha com traços e pontos é a curva ideal a 300°C, enquanto a curva tracejada corresponde ao pico de cargas móveis de uma amostra contaminada.

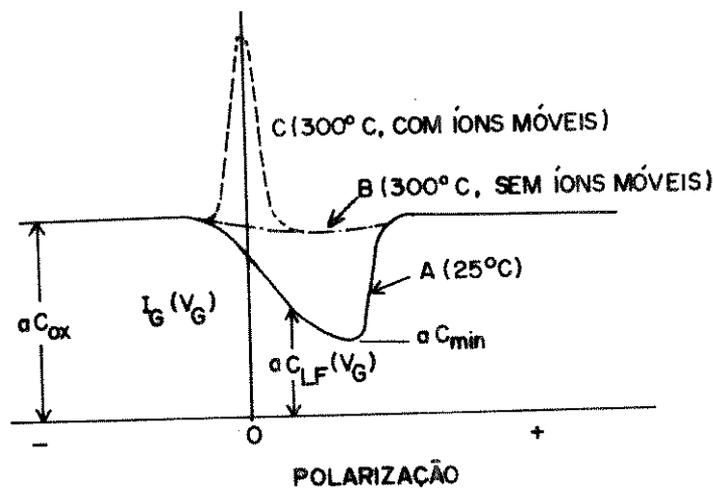


Figura II.8 Corrente de porta em função da polarização de porta, em resposta a uma rampa de voltagem linear, em um capacitor MOS com substrato tipo-p. As curvas A(25°C) e B(300°C) seriam medidas se não houvessem íons móveis no óxido. A curva C representa a corrente de deslocamento devida à deriva de cargas móveis do volume do óxido para a interface.<sup>1</sup>

## A técnica C-V

Outra maneira de determinarmos  $N_m$  é através do método B-t, em que traçamos a curva HFCV antes e depois de um esforço de polarização sob aquecimento. As curvas apresentam um deslocamento entre si proporcional a  $N_m$ :

$$N_m = \Delta V \frac{C_{ox}}{q}$$

No entanto, a técnica TVS oferece as seguintes vantagens sobre o método B-T:

- $N_m$  é medido com precisão, mesmo com grande aumento em  $D_{it}$ , o que é freqüente em capacitores expostos a R-X ou submetidos a B-T;
- é possível separar espécies iônicas diferentes, como sódio e potássio, pois a uma dada temperatura, o pico em corrente de cada uma ocorre em valores de polarização diferentes<sup>8</sup>;
- é mais sensível, podendo medir densidades de até  $10^9$  íons/cm<sup>2</sup> ;
- pode usar temperaturas mais baixas que em B-T;
- é mais rápida, pois necessita apenas de uma curva.

A desvantagem do método é que a interpretação da curva obtida é mais complexa.

### II.3.e - Densidade de cargas capturadas no óxido ( $N_{ot}$ ).

A medida de  $N_{ot}$  é feita em relação a um padrão. Por exemplo: podemos avaliar a densidade de cargas criadas num

## A técnica C-V

experimento de irradiação medindo o deslocamento  $\Delta V_{FB}$  em relação à curva inicial. Podemos ainda, por comparação entre curvas iniciais e finais, constatar a eliminação de cargas capturadas no óxido após uma etapa de recozimento. Não é possível uma medida absoluta, pois os dados são obtidos a partir de  $\Delta V_{FB}$ . Para que tenhamos segurança na medida, precisamos conhecer o comportamento de  $N_f$  durante o processo ao qual submetemos o capacitor. Devemos ainda ter baixa densidade de cargas móveis, para que a instabilidade em  $V_{FB}$  não prejudique a medida de  $N_{ot}$ . Assim, a densidade de cargas será :

$$\text{II-18} \quad N_{ot} = \Delta V_{FB} \frac{C_{ox}}{q}$$

### II.3.f-Densidade de cargas capturadas na interface( $D_{it}$ )

Dois métodos são utilizados. Um deles consiste na comparação das curvas C-V em alta e baixa frequência, desenvolvido por Castagné e Vapaille<sup>9</sup>. Na curva em baixa frequência, os estados de interface seguem o sinal aplicado e a capacitância dessa densidade de cargas é incluída. Em alta frequência (1MHz), supomos que os estados de interface não acompanham o sinal ac. Dessa forma, a curva não inclui a carga capturada na interface. Portanto, podemos avaliar a densidade de carga nas regiões onde as curvas deveriam coincidir, caso fossem ideais.

Quantitativamente, podemos obter  $D_{it}$  da seguinte maneira:

- alta frequência - da lei de Gauss,

A técnica C-V

$$\text{II-19} \quad C_{ox}(V_G - \psi_s) = -Q_{it}(\psi_s) - Q_s(\psi_s)$$

Para uma variação infinitesimal de  $V_G$ ;

$$\text{II-20} \quad C_{ox} dV_G = [C_{ox} + C_{it}(\psi_s) + C_s(\psi_s)] d\psi_s$$

$$C_{it} \equiv - \frac{dQ_{it}}{d\psi_s}; \quad C_s \equiv - \frac{dQ_s}{d\psi_s}$$

De II-20, concluímos que, para dado  $dV_G$ ,  $d\psi_s$  será inversamente proporcional a  $C_{it}(\psi_s)$ . Isto leva ao estiramento da curva C-V, mostrado na figura II.9.

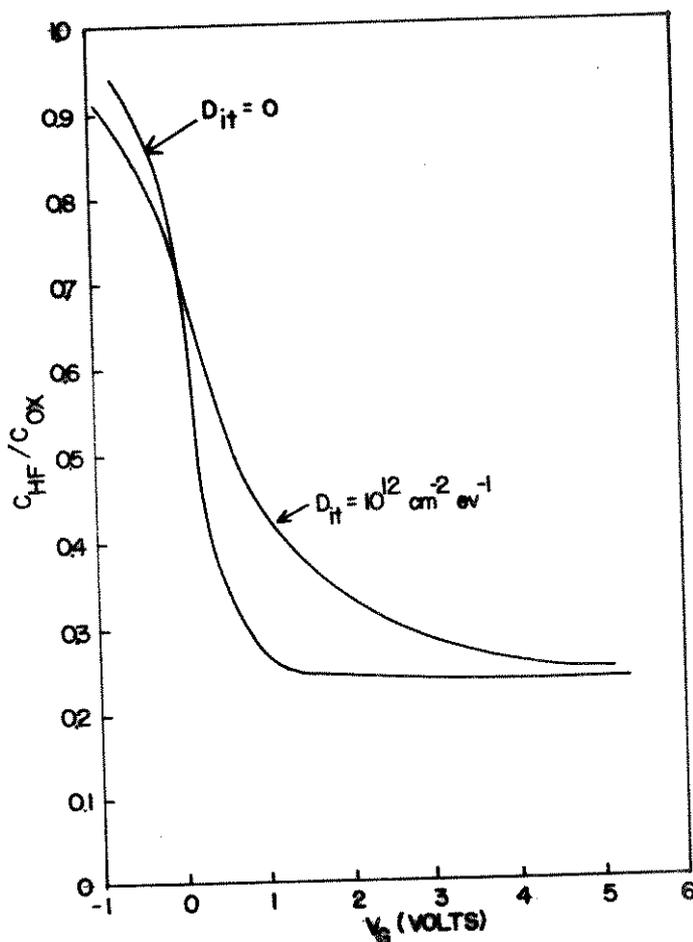


Figura II.9 Uma curva C-V teórica de alta freqüência com estiramento devido a estados de interface, comparada a uma curva teórica sem estados de interface. Os parâmetros são  $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $t_{ox} = 100 \text{ nm}$ ,  $D_{it} = 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ .

## A técnica C-V

■ baixa frequência,

$$\text{II-21} \quad C_{LF} \equiv \frac{dQ_T}{dV_G}; \quad Q_T = -(Q_s + Q_{it})$$

$$\begin{aligned} \text{II-22} \quad C_{LF} &= \frac{dQ_T}{d\psi_s} \frac{d\psi_s}{dV_G} \\ &= (C_s + C_{it}) \frac{C_{ox}}{C_{ox} + C_s + C_{it}} \end{aligned}$$

Portanto, além do estiramento, a capacitância em baixa frequência é incrementada com a presença de  $D_{it}$ . Em altas frequências,  $C_{it}(\omega)=0$ , e II-21 reduz-se a :

$$\text{II-23} \quad C_{HF} = \frac{C_s C_{ox}}{C_s + C_{ox}}$$

II-21 pode ser reescrita como:

$$\text{II-24} \quad C_{it} = \left[ \frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_{ox}} \right]$$

Substituindo II-22 em II-23:

$$\text{II-25} \quad C_{it} = \left[ \frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_{ox}} \right]^{-1} - \left[ \frac{1}{C_{HF}} - \frac{1}{C_{ox}} \right]^{-1}$$

Dessa forma, podemos obter  $C_{it}$  diretamente das curvas.

Esta equação não é válida na inversão, onde os portadores minoritários não seguem o sinal de alta frequência. O método gráfico proposto por Wagner & Berglund<sup>10</sup>, apresentado na figura II.10, é uma plotagem das equações apresentadas e nos fornece diretamente os valores de  $D_{it}$ . Sua precisão é estimada em  $1 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$

Em função de algumas dificuldades experimentais na determinação de  $\Delta C$ , um outro método gráfico, desenvolvido por Van Overstraeten et al.<sup>11</sup> também foi usado, baseado na alteração do mínimo da curva em baixa frequência. Apesar de ser susceptível desuniformidades na dopagem, sua precisão também é estimada em  $1 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ . Os gráficos são apresentados nas figuras II.11 e II.12.

## A técnica C-V

Uma boa síntese dos possíveis comportamentos observados em curvas C-V está no trabalho de N. Fontela<sup>12</sup>. A figura II.13 mostra as curvas normalmente encontradas, cujas considerações passamos a citar resumidamente:

- I-dobras ou distorções: alta densidade de cargas capturadas na interface e/ou existência de não uniformidades grosseiras em  $t_{ox}$ ,  $N_A, D$  e contaminantes;
- II-depleção profunda na inversão: velocidade de rampa muito alta e/ou óxido com fuga;
- III-C( $V_G$ ) crescente na inversão (curva HFCV): frequência do sinal alternado não suficientemente alta e/ou alta velocidade de geração/recombinação de minoritários;
- IV-deslocamentos (histereses) para sinais de rampa crescentes e decrescentes: a) velocidade de rampa muito alta, b) carga capturada no óxido, c) movimentação de cargas móveis.

A técnica C-V

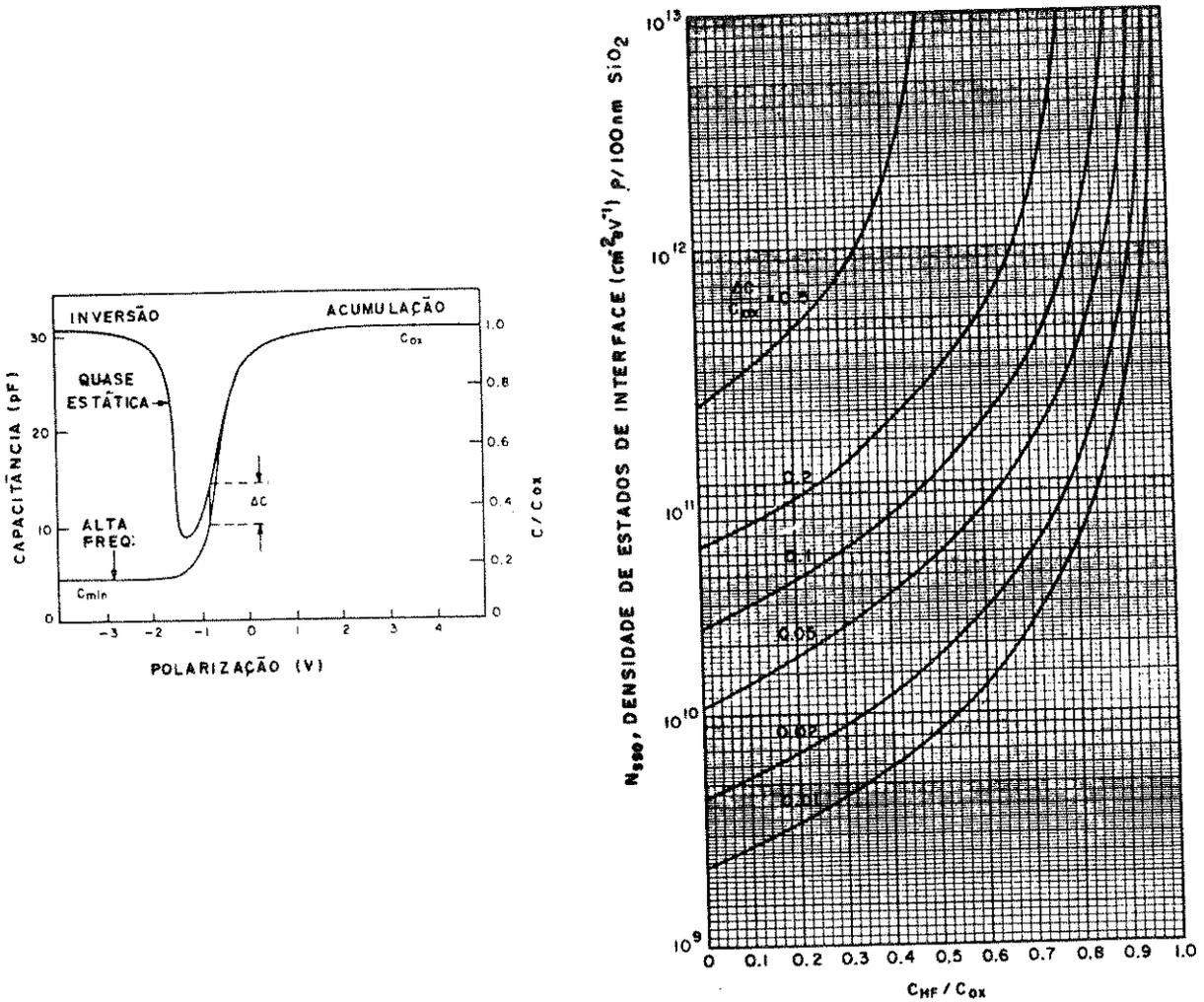


Figura II.10 Densidade de estados de interface obtida das curvas experimentais em alta freqüência e quase estática. 1. Determine a capacitância em alta freqüência normalizada ( $C_{HF}/C_{ox}$ ) no valor de polarização de interesse ( $C_{FB}/C_{ox}$  ou  $C_{mg}/C_{ox}$ ). 2. Das curvas experimentais, determine a diferença normalizada entre as capacitâncias quase estática e baixa freqüência ( $\Delta C/C_{ox}$ ) nesta voltagem. 3. Determine  $N_{SSO}$  do gráfico. A densidade de estados de interface é  $D_{it} = N_{SSO}(100nm/t_{ox}) \cdot 10$

A técnica C-V

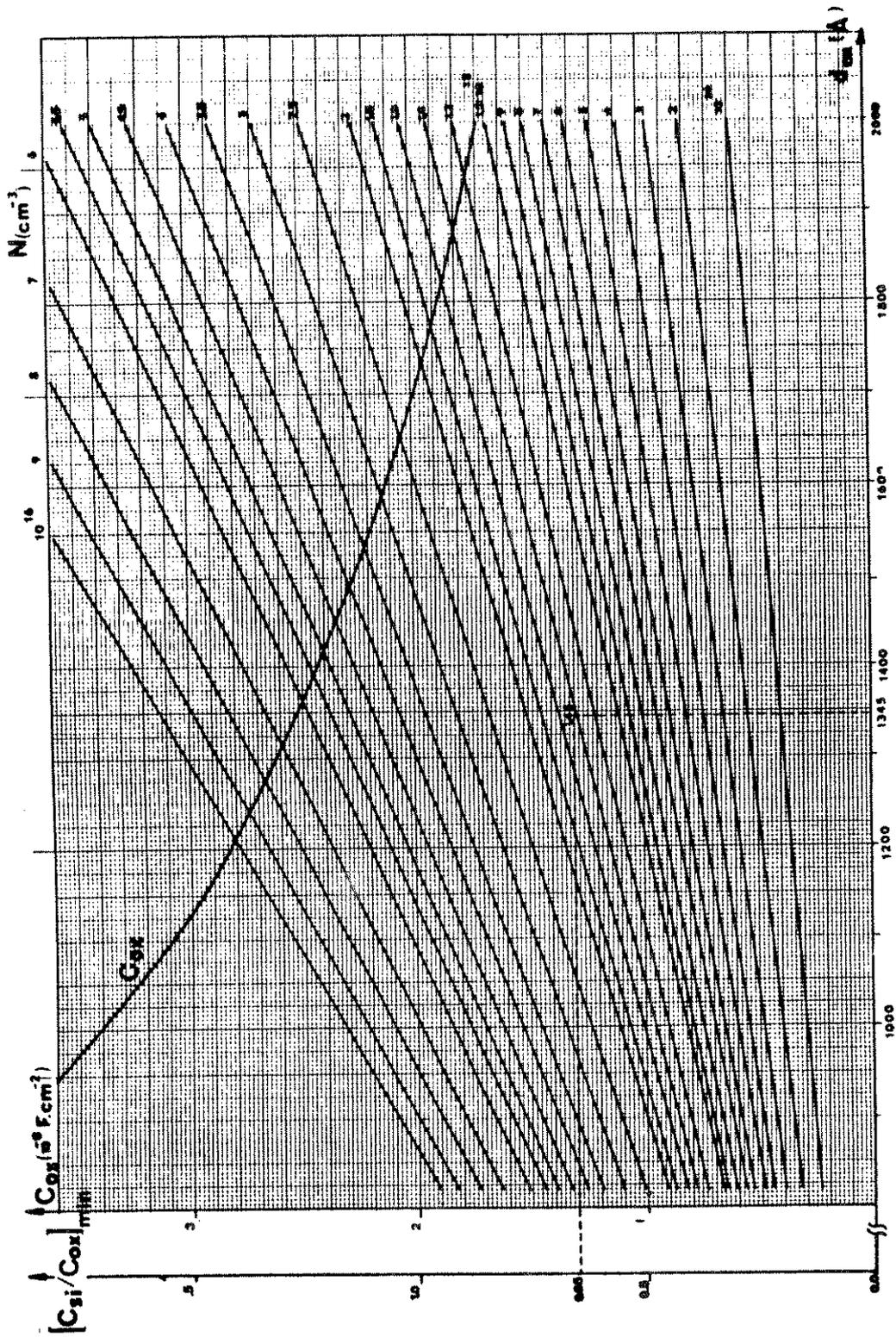


Figura II.11 Método gráfico de Van Overstraeten para determinação da densidade de estados de interface. Valores de  $(C_{si}/C_{ox})_{min}$  em função de  $N$  e  $d_{ox}(=t_{ox})$ .<sup>11</sup>

A técnica C-V

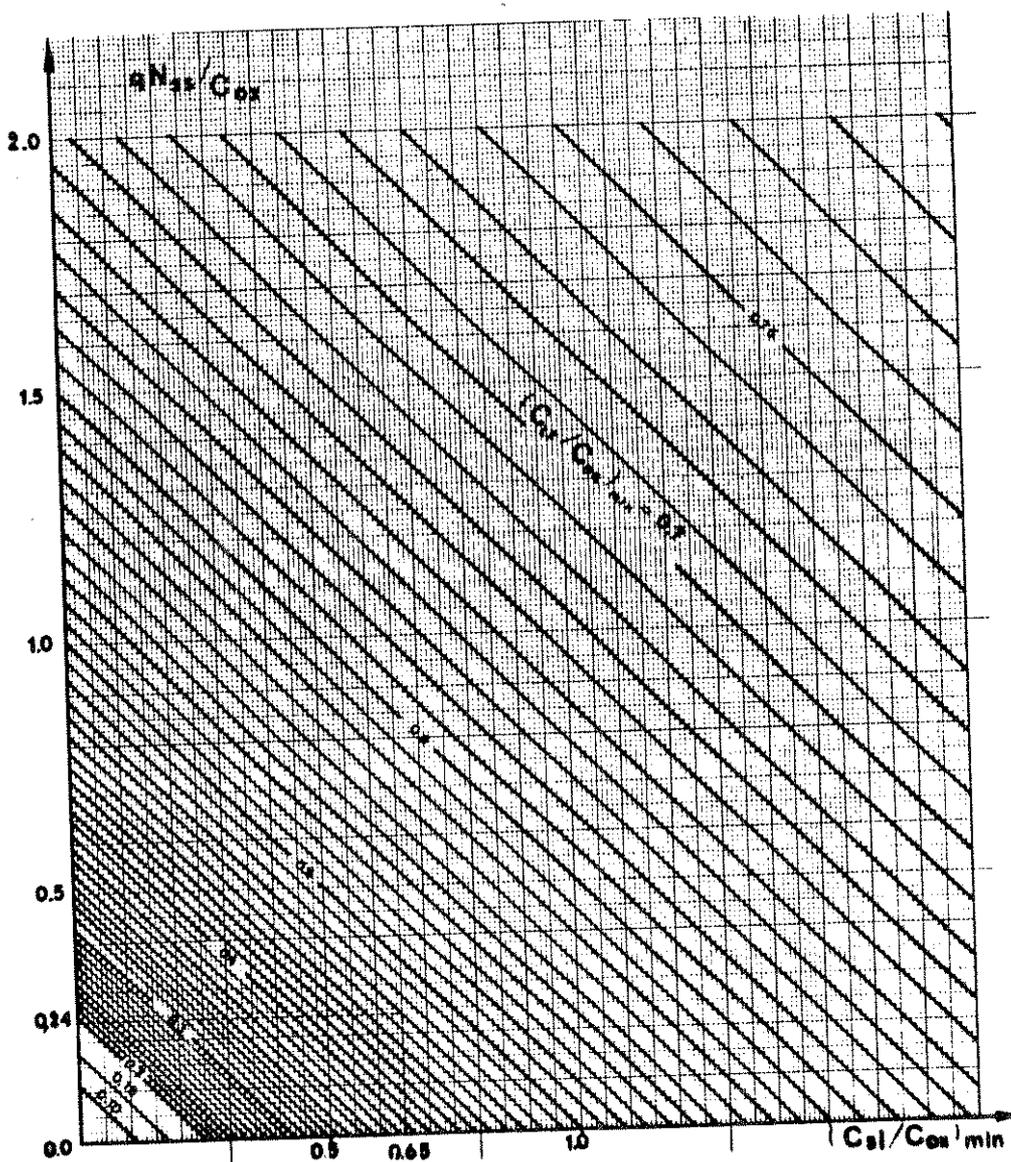


Figura II.12 Determinação de  $D_{1t}$  em função do valor  $(C_{sl}/C_{ox})_{\min}$ , obtido na figura II.11 e da grandeza  $(CLF/C_{ox})_{\min}$ , determinada experimentalmente.  $D_{1t} = N_{ss}$ . <sup>11</sup>

## A técnica C-V

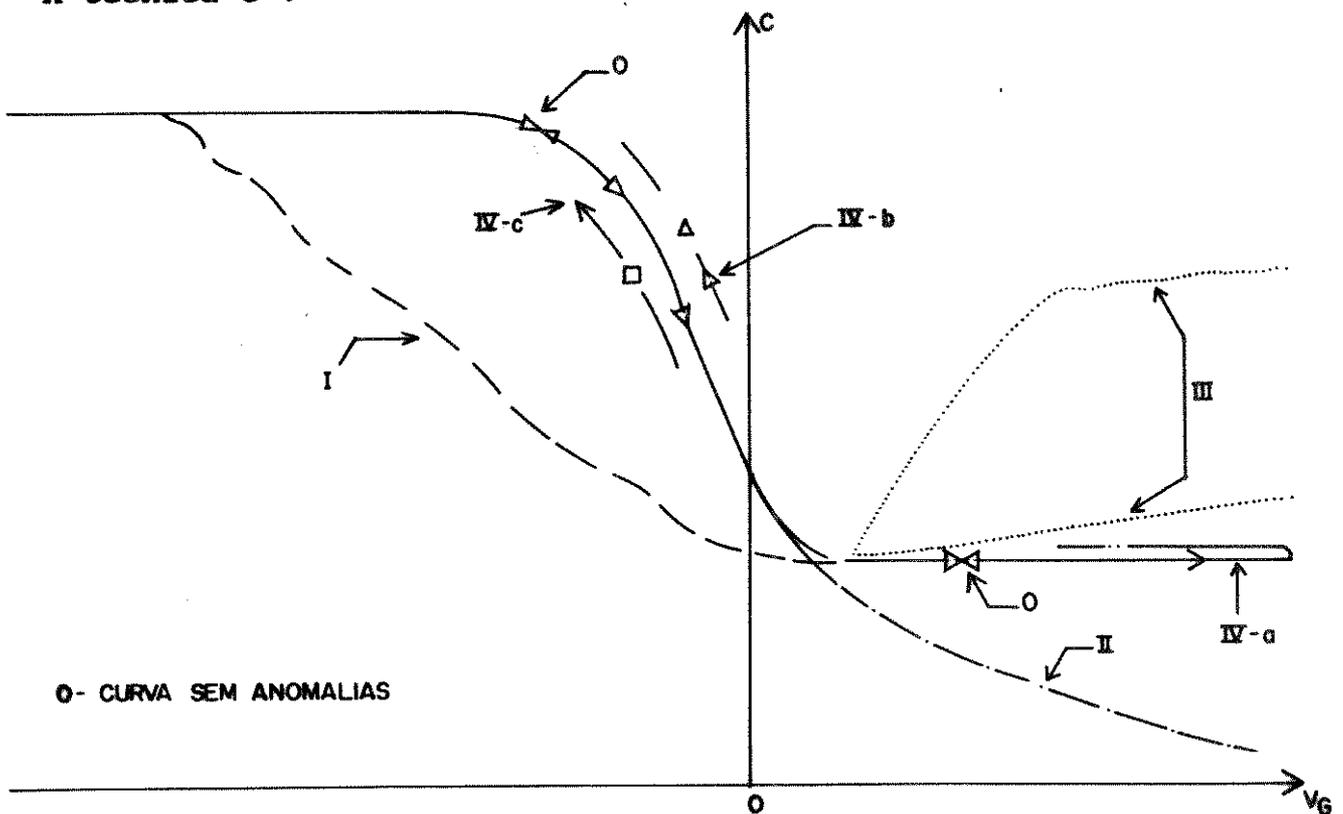


Figura II.13 Diversos efeitos observados em curvas C-V alta frequência. As explicações estão no texto<sup>12</sup>

### Referências.

<sup>1</sup>Nicollian & Brews, p. 74.

<sup>2</sup>Idem, p. 46.

<sup>3</sup>R. Lindner, *Bell Syst. Tech. J.*, Vol. 41, p. 803, 1962.

<sup>4</sup>J.R. Brews, *Solid-State Electron.*, Vol. 20, p. 607, 1977

<sup>5</sup>S. Wagner and C.N. Berglund, *The Review of Scientific Instruments*, Vol. 43, No. 12, p. 1775-1777, 1972.

<sup>6</sup>B.E. Deal, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. ED-27, No. 3, p. 606, 1980.]

A técnica C-V

- <sup>7</sup>M. Yamin, *IEEE Transactions on Electron Devices*, ED-12, p. 88, 1965.
- <sup>8</sup>G.F. Derbenwick, *J. Appl. Phys.*, Vol. 48, p. 1127, 1977.
- <sup>9</sup>R. Castagné and A. Vapaille, *Surface Science*, Vol. 28, pp. 157-193, 1971.
- <sup>10</sup>Ver ref. 5.
- <sup>11</sup>R. Van Overstraeten, G. Declerck, and G. Broux, *J. Electrochem. Soc.*, Vol 120, No.12, p. 1785-1787, 1973.
- <sup>12</sup>N.G. Fontela, *Tese de Mestrado*, Escola politécnica-USP.

### III - EFEITOS DA RADIAÇÃO.

#### III.1 - Introdução.

É importante estudarmos os efeitos da radiação em dispositivos semicondutores porque:

- é preciso conhecer o funcionamento dos dispositivos submetidos a etapas de processos de fabricação inerentemente radiativas;
- pode haver necessidade de operação de dispositivos em ambientes radiativos.

A radiação ionizante pode ser classificada da seguinte maneira:

- fótons de alta energia - raios-X, raios- $\gamma$ , luz ultravioleta;
- partículas carregadas aceleradas: elétrons, prótons, partículas  $\alpha$ ,  $\beta$ .

#### III.2 - Efeitos de radiação em materiais eletrônicos.

Seus efeitos em materiais eletrônicos também podem ser divididos em dois grupos:

- criação de pares elétrons-lacuna ( $e^-h^+$  - ionização);
- criação de defeitos por deslocamento de átomos de sua posição inicial na estrutura do material.

Segundo Nicollian<sup>1</sup>, a ionização pode ser causada tanto por partículas como por fótons. A energia perdida pela radiação

## Efeitos da radiação

incidente ao longo do seu trajeto no material é o que determina o número de pares  $e^-h^+$  gerados, não a natureza da radiação.

Danos por deslocamento são bem menos prováveis que ionização e dependentes do tipo de radiação incidente (fótons ou partículas). Causam defeitos semipermanentes ou permanentes nos sólidos, servindo como centros de espalhamento e geração/recombinação de portadores, diminuindo o tempo de vida de portadores em excesso. Como consequência, o ganho em corrente nos transistores bipolares para baixas correntes de coletor é reduzido, assim como a transcondutância nos transistores MOS. A corrente reversa em diodos aumenta.

Nosso estudo será restrito aos efeitos de raios-X sobre capacitores MOS, caso em que somente o fenômeno de ionização é observado.

### III.3 - Curvas C-V.

As alterações normalmente observadas nas curvas C-V após irradiação são (ver figura IV.7):

- deslocamento  $\Delta V$  das curvas como um todo ao longo do eixo de polarização;
- estiramento da curva (stretchout);
- aumento da diferença  $\Delta C$  entre as curvas em alta e baixa frequência na região de depleção;
- um deslocamento ( $\Delta V_R$ ) entre as curvas HFCV acumulação→inversão e inversão→acumulação (histerese).

## Efeitos da radiação

Esse comportamento tem sido interpretado como consequência dos seguintes eventos:

- aumento da densidade de cargas capturadas na interface Si-SiO<sub>2</sub> (N<sub>it</sub>);
- aumento da densidade de cargas capturadas no óxido (N<sub>ot</sub>);
- aumento da densidade de cargas fixas (N<sub>f</sub>);
- aumento da densidade de cargas capturadas na interface Al-SiO<sub>2</sub>; <sup>2</sup>
- aumento da densidade de estados lentos ou anômalos (N<sub>st</sub>) <sup>3</sup>.

### III.4 - Cargas capturadas no óxido.

O modelo comumente aceito para explicar a correlação entre exposição a raios-X e alterações nas características elétricas de capacitores MOS é baseado em considerações sobre ionização e mobilidade de portadores no SiO<sub>2</sub>. <sup>4</sup>

A figura III.1 representa o fenômeno de ionização. O fóton de R-X incidente excita um elétron da banda de valência para a banda de condução do SiO<sub>2</sub>. Logo após, ocorre recombinação parcial dos pares gerados, dependendo do campo elétrico aplicado e da energia da radiação. Sob a ação do campo elétrico aplicado ao óxido, elétrons e lacunas movem-se em direção aos eletrodos. Medidas de mobilidade de portadores no dióxido de silício têm apontado que elétrons movem-se muito mais rapidamente ( $\mu_n=20\text{cm}^2/\text{V.s}$ ) <sup>5</sup> que lacunas ( $\mu_p=2.10^{-5}\text{cm}^2/\text{V.s}$ ) <sup>6</sup> à temperatura

## Efeitos da radiação

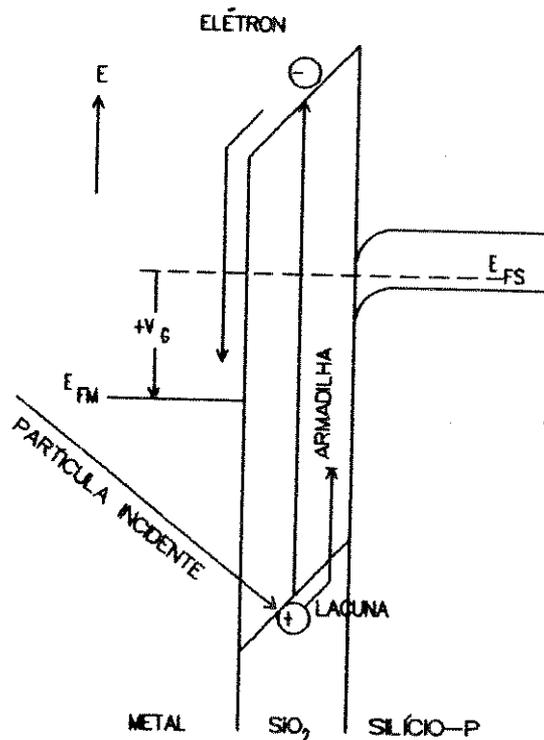
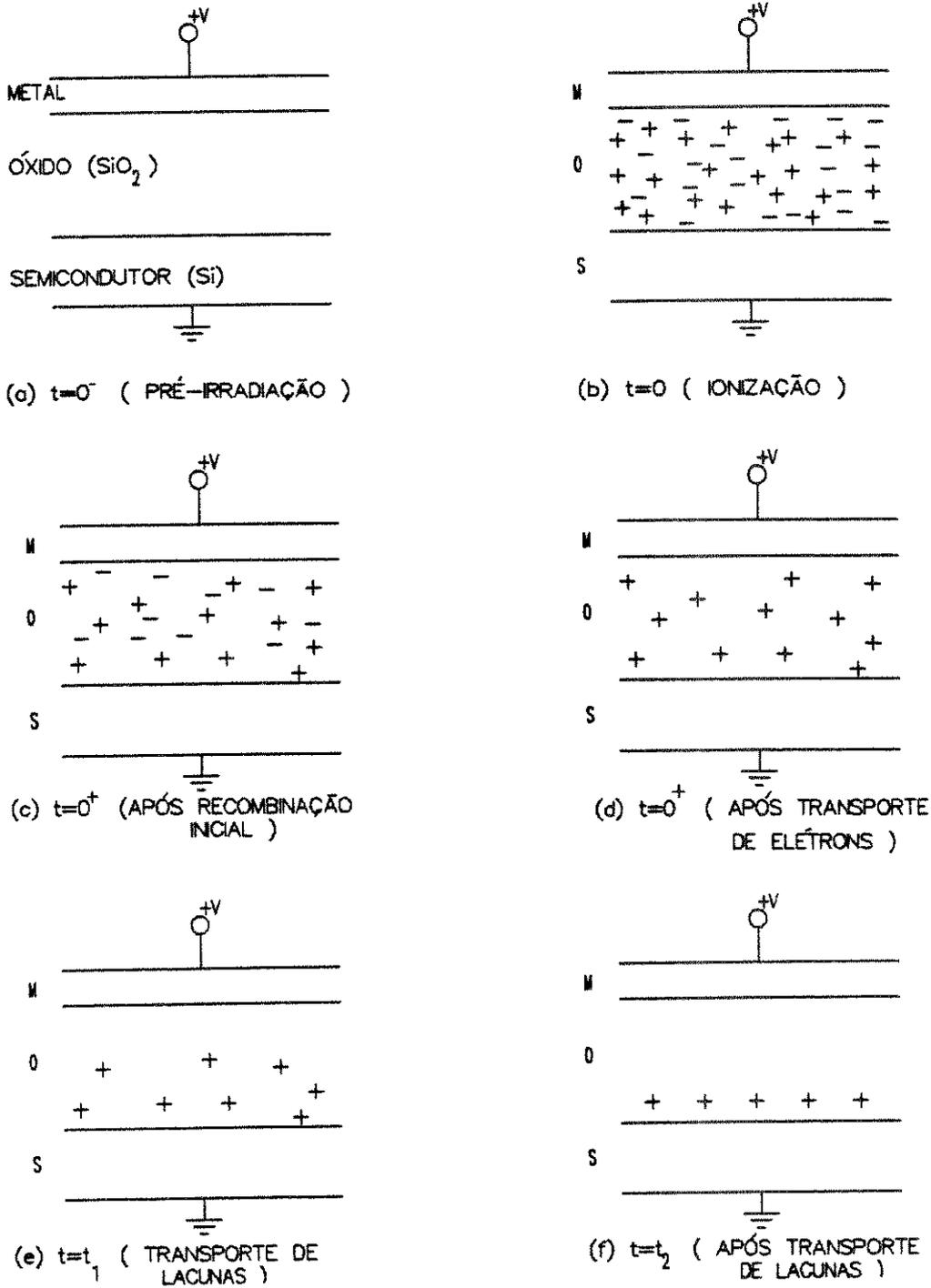


Figura III.1 A partícula incidente excita um elétron no óxido, criando um par elétron-lacuna.<sup>5</sup>

ambiente. Para campos maiores que  $F_{ox} > 2 \cdot 10^6 \text{ V/cm}$ , Snow et al.<sup>7</sup> consideram a recombinação desprezível, pois observaram saturação da fotocorrente gerada em capacitores MOS durante a exposição a raios-X. A figura III.2 ilustra melhor o mecanismo de ionização e transporte de portadores no óxido

Powell et al.<sup>8</sup> verificaram experimentalmente o transporte de lacunas através do óxido ao irradiarem com luz ultravioleta capacitores ( $t_{ox} = 200 \text{ nm}$ ) de porta semitransparente. No comprimento de onda utilizado ( $\approx 140\text{-}120 \text{ nm}$ ), o coeficiente de absorção no SiO<sub>2</sub> é alto o suficiente para que seja possível

Efeitos da radiação



**Figura III.2** Ionização e transporte no SiO<sub>2</sub>. (a) Capacitor MOS polarizado positivamente. (b) Durante a ionização, pares elétron-lacuna são gerados. (c) Ocorre recombinação parcial dos pares gerados. (d) Os elétrons são rapidamente transportados para a porta. (e) As lacunas são transportadas para a interface com o substrato. (f) Lacunas fica capturada próximo à interface.

## Efeitos da radiação

controlar a penetração da luz nos 10nm iniciais da interface metal-SiO<sub>2</sub>. Procederam à irradiação com uma polarização positiva de 20V aplicada à porta durante o experimento. A seguir, levantaram a distribuição das cargas capturadas no óxido através de experimentos de corrosão (etch-off). Os resultados mostraram que, a menos do erro experimental, toda a carga capturada encontrou-se a menos de 30nm da interface SiO<sub>2</sub>-Si. Além disso, verificou-se a persistência da fotocorrente por um certo tempo, após cessada a iluminação.

O mecanismo de transporte de lacunas é desconhecido. Alguns pesquisadores<sup>9</sup> sugerem que as lacunas deslocam-se até a interface por um processo chamado "polaron hopping". Um polaron é uma distorção localizada na rede que se desloca junto com a lacuna ao longo de seu percurso através do óxido. A lacuna "saltaria" ou tunelaria de pequenas distâncias várias vezes, até chegar à interface ou ser capturada em um defeito. Quando a distorção associada à lacuna atingisse uma ligação tensionada Si-Si (vacância de oxigênio), a ligação seria quebrada e um evento de captura ocorreria. No entanto, um trabalho recente de Dauksher & Reisman<sup>10</sup> sugere inexistência de correlação entre stress em SiO<sub>2</sub> e cargas fixas criadas por exposição à radiação. Eles mediram stress em óxidos crescidos termicamente em O<sub>2</sub> seco a 1000,°C e 800,°C, com e sem HCl, com espessuras entre 20nm e 110nm. Nenhum dos óxidos crescidos, fossem eles recozidos após oxidação ou não, apresentou mudanças no stress quando expostos a uma dose de  $8.5 \cdot 10^6$  rad de raios-X (Al-K $\alpha$ ). Esta dose resultou numa

## Efeitos da radiação

densidade de cargas fixas da ordem de  $10^{12} \text{cm}^{-2}$ . Sabe-se que o transporte depende do processo oxidação (a mobilidade é menor em óxidos úmidos), do campo elétrico aplicado ao óxido e da temperatura.

Sob polarização negativa, não se observou captura de lacunas. Devido à proximidade da interface metal-SiO<sub>2</sub>, a grande maioria seria rapidamente transportada para a porta. As poucas lacunas capturadas nessa interface seriam eliminadas por elétrons injetados pela porta.

O deslocamento da curva C-V  $\Delta V_{FB}$  no sentido negativo do eixo de polarização também indica predominância de captura de lacunas, como sugere o modelo. Conforme o capítulo 1, os dois tipos de armadilhas mais importantes citados na literatura são as WRT (Water-Related Traps) e as IHT (Intrinsic Hole Traps). A saturação das IHT não necessariamente implica em que todas as armadilhas foram carregadas, mas que foi estabelecido um equilíbrio entre os mecanismos de captura e emissão de portadores.

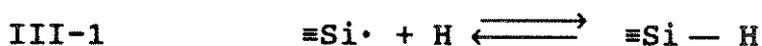
Walters e Reisman<sup>11</sup> chamam a atenção para o fato de que o modelo apresentado supõe que a radiação não cria armadilhas; somente carrega as já existentes. No entanto, ele foi elaborado a partir de observações de deslocamentos  $\Delta V_{FB}$ , que só medem alterações na carga coulombiana líquida no óxido. Não é possível constatar-se mudanças na densidade de defeitos neutros por esse método. Técnicas de medida de injeção de portadores indicam que a radiação ionizante gera defeitos que podem capturar lacunas. Não

## Efeitos da radiação

se sabe se esses possíveis centros de captura são os mesmos que as pré-existentes IHT, nem qual é seu papel, ao lado das IHT, no estabelecimento da carga positiva no óxido. Outro fator a considerar é a possível geração de cargas fixas, o que torna mais evidente que o modelo de captura de lacunas em armadilhas pré-existentes é ambíguo.

### III.5 - Geração de estados de interface.

A correlação entre a geração de estados de interface e exposição a radiação é bem documentada<sup>12,13</sup>, mas seu processo de geração é controverso. Alguns autores defendem que dois estágios estão envolvidos nesse processo. No primeiro, que ocorreria em tempos da ordem de 1 ms, as lacunas seriam capturadas próximas à interface, recombinando com elétrons que tunelam do substrato e formando estados de interface com a energia liberada. No segundo, o hidrogênio liberado durante a irradiação iria para a interface Si-SiO<sub>2</sub>, provocando a reversão de uma das reações abaixo:



O modelo supõe que o hidrogênio é liberado pela quebra de radicais Si-OH no corpo do óxido e/ou de ligações  $\equiv\text{Si}-\text{H}$  na interface Si-SiO<sub>2</sub>. A radiação incidente, os elétrons energéticos gerados, a recombinação inicial pós irradiação, a distorção associada ao transporte de lacunas ou mesmo a energia liberada na recombinação entre lacunas capturadas na interface e elétrons

## Efeitos da radiação

injetados pelo semicondutor podem liberar o hidrogênio dessas ligações e permitir que se difunda ou seja drenado através do óxido. O hidrogênio pode ser introduzido intencionalmente, por recozimento em *forming gas* ou involuntariamente, por contato com o ar, presença de traços de água no óxido, durante a metalização com alumínio (que pode conter hidróxido), etc.

Buchanan e DiMaria<sup>3</sup> afirmam, baseados em experimentos de injeção de portadores, que a geração de estados de interface é dependente do número de eventos de recombinação, mas independe do campo elétrico médio sobre o SiO<sub>2</sub> durante a injeção de elétrons. Eles argumentam que é possível que os estados de interface que se acreditam gerados pelo aumento da concentração de hidrogênio junto à interface possam ainda ser gerados por recombinação, uma vez que havia uma grande quantidade de lacunas capturadas nos experimentos que levaram àquelas conclusões. As duas etapas seriam eventos de recombinação imediatos e tardios.

Schwerin et al.<sup>14</sup> verificaram, através da injeção de portadores quentes em óxidos de transistores MOS, que um aumento da densidade de estados de interface em função do tempo, era acompanhado da diminuição da densidade de lacunas capturadas, favorecendo o modelo de duas etapas de recombinação. Na realidade, a diminuição observada é da densidade efetiva de cargas, que se supõe ser composta praticamente de lacunas. Outros experimentos de injeção de portadores em transistores, demonstraram que a geração de estados de interface é máxima quando a injeção de lacunas e elétrons é simultânea, não

## Efeitos da radiação

encontrando evidência para um modelo de duas etapas<sup>15</sup>.

Se o que acontece é de fato expresso pelas equações III-1 e/ou III-2, ligações incompletas do silício seriam produzidas. Essas ligações aparecem como centros spin-ativos Pb em experimentos de ressonância paramagnética de elétrons. Centros Pb são anfóteros (geram dois estados na banda proibida do silício) e seria de se esperar uma correlação 1:2 com respeito aos estados de interface gerados. Trombetta *et al.*<sup>16</sup> não encontraram qualquer correlação entre centros Pb e  $D_{it}$ . Portanto, não está claro se a formação da densidade de estados de interface em estruturas MOS irradiadas é devido à liberação e difusão de hidrogênio, à recombinação elétron-lacuna ou a uma combinação dos dois mecanismos.

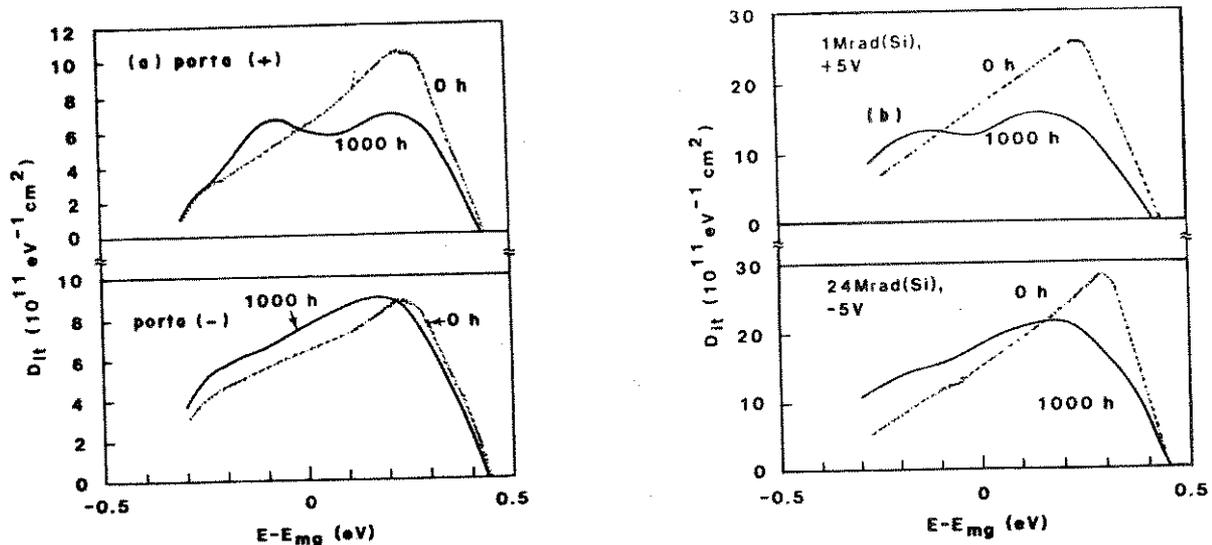


Figura III.3 Comparação entre a distribuição de estados de interface para polarizações positivas e negativas imediatamente após (—) e após 1000 h (---) da injeção de elétrons quentes (a) e irradiação por raios-X (b).<sup>18</sup>

## Efeitos da radiação

Devemos ainda ressaltar que parte do conhecimento sobre estados de interface vem de experimentos de injeção de portadores. As inferências colhidas desses experimentos são mescladas a interpretações de experimentos de irradiação, como se fossem um só fenômeno. A equivalência entre os estados de interface gerados por radiação e por injeção de elétrons foi pesquisada por Nishioka e Ma<sup>17</sup>, que usaram capacitores Al-SiO<sub>2</sub>-Si fabricados sobre Si(100) tipo-n. Os óxidos foram crescidos termicamente, em presença de O<sub>2</sub> seco e tricloroetano (TCA), a 900.C, e recozidos em N<sub>2</sub> à mesma temperatura. O alumínio foi depositado por sputtering e recozido em "forming gas" a 450.C por 30 minutos. Através de medidas C-V, compararam a distribuição de estados de interface gerados por raios-X com a distribuição de estados gerados por injeção de elétrons. Como é possível notar na figura III.3, os resultados são muito parecidos, sugerindo que os mesmos estados são gerados pelos dois processos.

### III.6 - Tratamento Térmico.

Pouco se sabe sobre tratamento térmico de cargas criadas por radiação. A figura III.4 mostra uma série de curvas de  $V_r$  em função do tempo de recozimento, utilizando a temperatura como parâmetro. As amostras são transistores MOS canal-p irradiados com raios-X e polarizados com  $V_G=+2V$  durante a exposição.  $N_D=10^{16} \text{cm}^{-3}$ ,  $t_{ox}=120\text{nm}$ . Dados de Snow et al.<sup>7</sup>

Existe um consenso de que o recozimento de estruturas Al-SiO<sub>2</sub>-Si em ambiente inerte, na faixa de temperatura de

## Efeitos da radiação

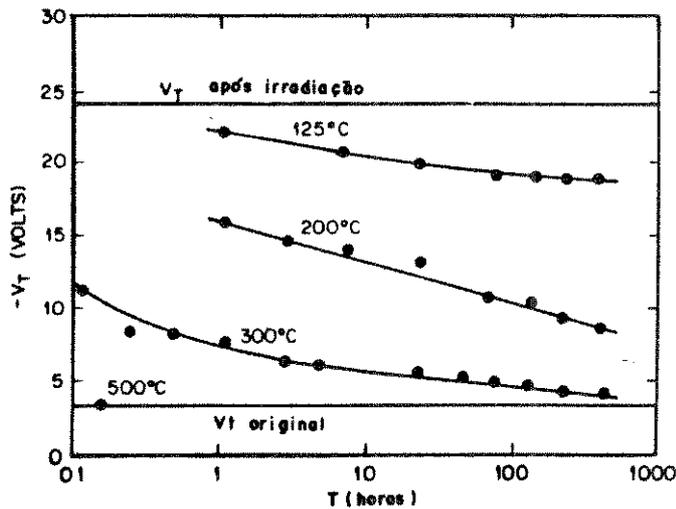


Figura III.4 Recozimento de cargas induzidas por radiação como função do tempo e temperatura. Transistores MOS canal-p,  $t_{ox}=120\text{nm}$ ,  $N_D=1.10^{16}\text{cm}^{-3}$ . Polarização de  $V_G=+2\text{V}$  durante a irradiação.

(250-450)°C, elimina a carga induzida por radiação. O conhecimento na área é empírico. Todos os modelos apresentados são especulativos e apenas explicam qualitativamente fatos relacionados ao recozimento.

Entre os experimentos usuais, está o recozimento isocronal, com a elaboração dos dados num gráfico de Arrhenius. Experimentos desse tipo não puderam fornecer uma energia de ativação única para o processo, pois as curvas não são lineares.

A possibilidade de se estabelecer um modelo para o recozimento está ligada à existência de um modelo que explique bem as cargas no óxido. Como discutimos anteriormente, tal modelo ainda não existe. Outro problema é o fato dos experimentos de recozimento também serem ambíguos, pois não se conhece o

## Efeitos da radiação

comportamento do recozimento de  $N_{it}$ ,  $N_{ot}$  e  $N_f$  separadamente, nem ao certo quais das espécies presentes no ambiente de oxidação (ou mesmo na lâmina) são de fato responsáveis pela eliminação das cargas.

Deal et al.<sup>18</sup> propuseram em 1969 um modelo para explicar o recozimento térmico de estados de interface pós-metalização considerado até hoje. No caso do alumínio, a presença de água (introduzida durante a oxidação, metalização ou qualquer outra etapa) iniciaria as seguintes reações:



O hidrogênio atômico difunde-se para a interface Si-SiO<sub>2</sub>, onde reage com ligações incompletas do silício, que seriam os estados de interface.

As evidências experimentais que apoiam este modelo são:

- uma camada de nitreto, situada entre o metal e o óxido, bloqueia a migração de hidrogênio, não se observando redução de estados de interface;
- em amostras sem metal de porta, H foi mais efetivo que H<sub>2</sub> na redução de  $D_{it}(mg)$ ;
- metais ativos (Al, Mg), que podem reagir com H, levam a  $D_{it}(mg)$  menor que metais menos ativos (Au, Pt).

Alguns dos resultados deste trabalho de Deal são mostrados na figura III.5. O comportamento da densidade de estados de interface no meio do gap em função da temperatura de

## Efeitos da radiação

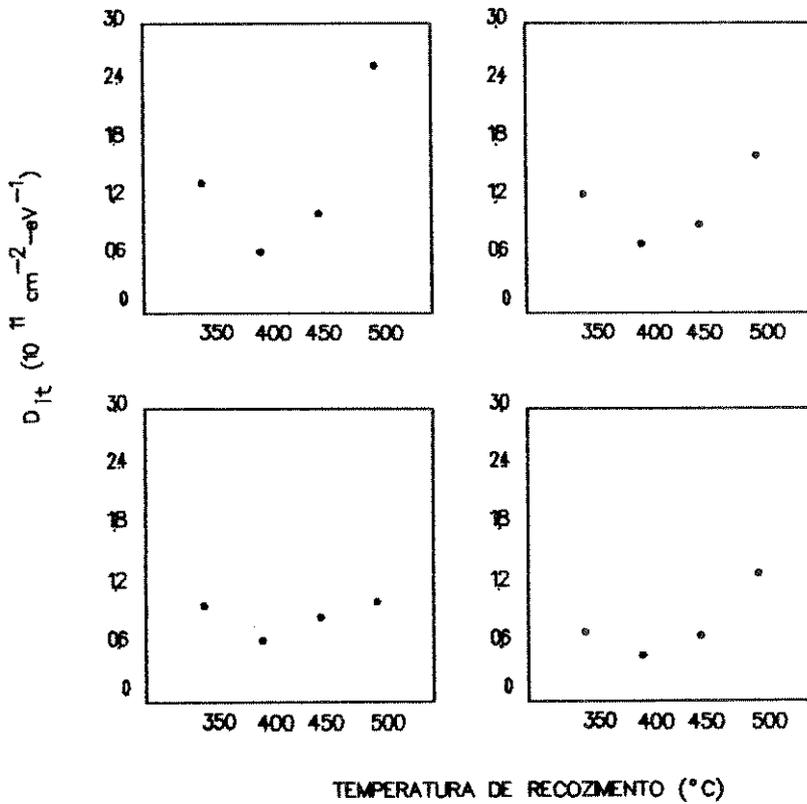


Figura III.5  $D_{it}$  (mg) em função da temperatura de recozimento com a porcentagem de H<sub>2</sub> no ambiente como parâmetro. Medidas Alta-baixa frequência e recozimentos de 10min. Capacitores sobre Si-n (111), com porta de alumínio e óxido térmico seco  $t_{ox}=200\text{nm}$ . (a) 0% H<sub>2</sub> em N<sub>2</sub>; (b) 10% H<sub>2</sub>; (c) 25% H<sub>2</sub>; (d) 50% H<sub>2</sub>.<sup>20</sup>

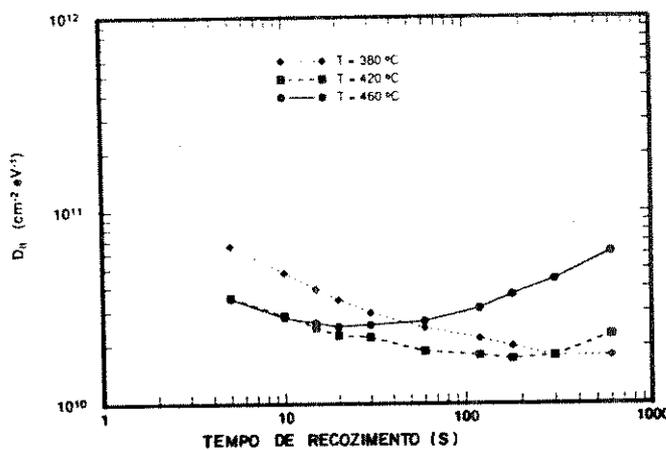


Figura III.6 Densidade de estados de interface em função do tempo de recozimento térmico rápido a 380, 420, e 450  $^{\circ}\text{C}$  em N<sub>2</sub>.  $D_{it}$  inicial é  $\approx 3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ .<sup>21</sup>

## Efeitos da radiação

recozimento é apresentado, tendo a porcentagem de hidrogênio como parâmetro. A existência do mínimo neste gráfico é explicada da seguinte maneira. A velocidade da reação de saturação tem uma dependência direta com a temperatura. Assim, para um tempo de recozimento fixo, a densidade de estados de interface decresce à medida em que a temperatura aumenta, pois a velocidade de reação aumenta e mais ligações são saturadas. A partir de certa temperatura, a decomposição térmica das ligações Si-H passa a ser predominantemente e  $D_{it}$  aumenta. De acordo com este modelo, pode-se esperar equilíbrio entre os dois mecanismos a uma dada temperatura, após determinado intervalo de tempo. Em conseqüência, prevê-se que  $D_{it}$  tornar-se-ia independente do tempo e cresceria monotonicamente com a temperatura.

Reed e Plummer<sup>19</sup> estudaram o comportamento de  $D_{it}(mg)$  em função do tempo de recozimento térmico rápido pós-metalização de capacitores de porta de alumínio, utilizando a temperatura como parâmetro. Seus resultados são mostrados na figura III.6 e enquadram-se dentro da previsão citada apenas para temperaturas até 380°C. Acima de 420°C, um mínimo no gráfico  $D_{it} \times t_{rec}$  passa a ser notado, com um aumento da densidade de estados de interface com o passar do tempo. Estes resultados contradizem as previsões de Deal, mas são utilizados pelos autores para mostrar a validade do modelo de dissociação térmica dos defeitos passivados, através de considerações sobre a cinética das reações envolvidas.

## Efeitos da radiação

### Referências.

- <sup>1</sup>Nicollian & Brews, p.550
- <sup>2</sup>C.T. Sah, *Solid-State Electronics*, Vol. 33, No. 2, pp. 147-167, 1990.
- <sup>3</sup>D.A. Buchanan and D.J. DiMaria, *J. Appl. Phys.*, Vol. 67, No. 12, 1990
- <sup>4</sup>Nicollian & Brews, p. 564.
- <sup>5</sup>J.R. Srour, D.M.Long, D.G. Millward, R.L. Fitzwilson and W.L. Chadsey, "Radiation Effects and Dose Enhancement of Electronic Materials, p.55, Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, USA, 1984.
- <sup>6</sup>R.C. Hughes, *Phys. Rev.*, Vol. B-15, p..2012, 1977.
- <sup>7</sup>E.H. Snow, A.S. Grove, D.J. Fitzgerald, *Proc. IEEE*, Vol. 55, No. 7, 1967.
- <sup>8</sup>R.J. Powell and G.F. Derbenwick, *IEEE Transact. Nucl. Sci.*, Vol. NS-22, No. 6, p. 2227, 1975.
- <sup>9</sup>A.J. Lelis, T.R. Oldham, H.E. Boesch, Jr., and F.B. McLean, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 36, No. 6, p. 1808, 1989.
- <sup>10</sup>W. Dauksher and A. Reisman, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 138, no. 10, p. 3112, 1991
- <sup>11</sup>M. Walters and A. Reisman, *J. Appl. Phys.*, Vol. 67, No. 6, p. 2992, 1990.

## Efeitos da radiação

- <sup>12</sup>J.R. Schwank, P.S. Winokur, F.W. Sexton, D.M. Fleetwood, et al.,  
*IEEE Transact. Nucl. Sci.*, Vol. NS-33, No. 6, p. 1178,  
1986.
- <sup>13</sup>Z. Shanfield and M.M. Moriwaki, *IEEE Transact. Nucl. Sci.*, Vol.  
NS-32, No. 6, p. 3929, 1985.
- <sup>14</sup>A.v. Schwerin, M.M. Heyns, and W. Weber, *J. Appl. Phys.*, Vol. 67,  
No. 12, p. 7595, 1990
- <sup>15</sup>N.S. Saks, P.L. Heremans, H.E. Maes, R.F. De Keersmacker, and  
G.J. Declerk, *IEEE Transactions on Electron Devices*,  
Vol. ED-33. p. 1529, 1986.
- <sup>16</sup>L.P. Trombetta, G.J. Gerardi, D.J. DiMaria, and E. Tierney, *J.*  
*Appl. Phys.*, Vol. 64, No. 12, p. 7439, 1990.
- <sup>17</sup>Y. Nishioka, E.F. Silva, Jr., and T.P. Ma, *Appl. Phys., Lett.*, Vol.  
52, No. 9, p. 720, 1988.
- <sup>18</sup>B.E. Deal, E.L. McKenna, and P.L. Castro, *J. Electrochem. Soc.*,  
Vol. 116, p. 997, 1969.
- <sup>19</sup>M.L. Reed and J.D. Plummer, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 51, No. 7,  
p. 514, 1987.

## IV - PARTE EXPERIMENTAL

### IV.1 - Processo de Fabricação

Foram usados capacitores Al-SiO<sub>2</sub>-Si com as seguintes características (ver máscaras na figura IV.1):

- Si-n <100>, N<sub>D</sub>=6.10<sup>15</sup> cm<sup>-3</sup> (medidas C-V);
- t<sub>ox</sub>=100nm (medidas C-V);
- área=500×500μm<sup>2</sup>.

O processo de fabricação dos capacitores, esquematizado em ordem de execução na figura IV.2, foi o seguinte:

Caracterização. Lâminas Wacker, Si-n, ρ ≈ 1 Ω.cm, 300μm de espessura.

Limpeza inicial, em soluções de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> : H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>OH : H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> : H<sub>2</sub>O, HF : H<sub>2</sub>O e HCl : H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> : H<sub>2</sub>O, conforme Instrução para Execução de Processo (IEP) LP-023. IEP's são procedimentos laboratoriais detalhados para execução de processos em microeletrônica utilizados no laboratório de fabricação de dispositivos do Departamento de Microeletrônica (DEMIC-FEE).

Oxidação. Oxidação inicial por via úmida a 1083°C, como descrita na IEP OX-001. Oxidação de porta por via seca, com tricloroetileno (TCE) a 0,5%, 1083°C, como descrito na IEP OX-005.

Passivação do óxido de porta em atmosfera de oxiclreto de fósforo (POCl<sub>3</sub>) a 925°C por 5 minutos, seguida de recozimento em atmosfera de nitrogênio por 10 minutos, conforme IEP DF-020.

## Parte Experimental

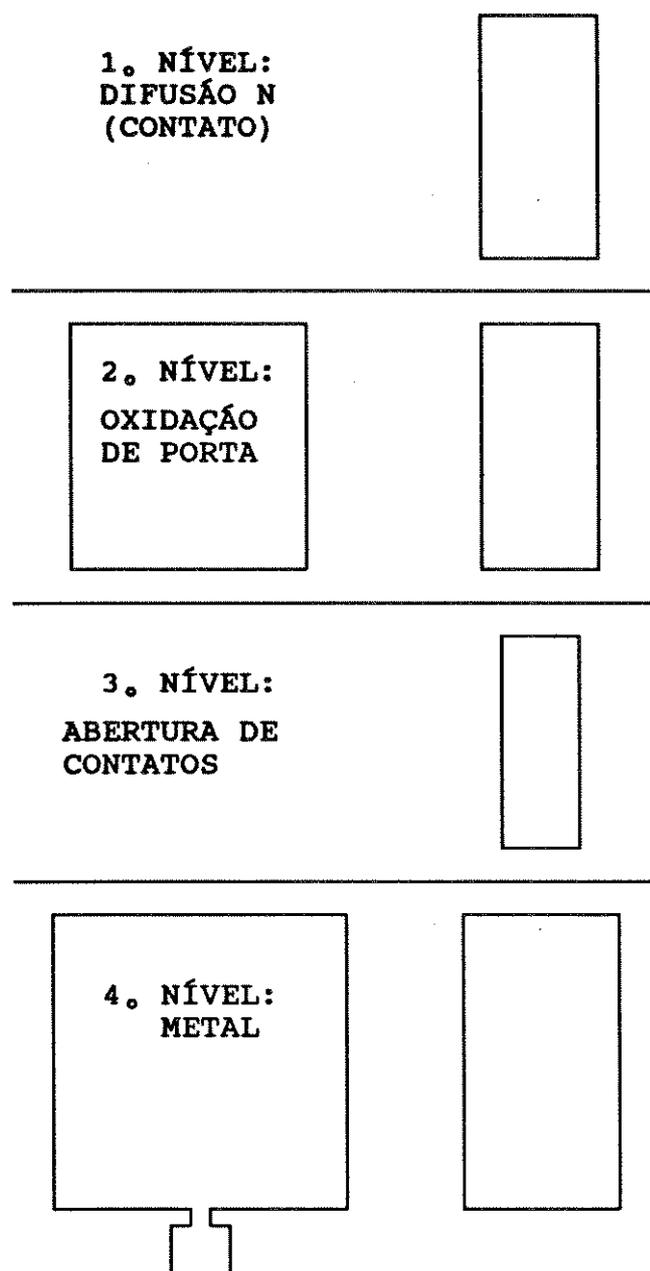


Figura IV.1 Máscaras dos quatro níveis de fotolitografia do processo de fabricação dos capacitores.

Difusão: efetuada em oxiclreto de fósforo( $\text{POCl}_3$ ), 900.C, 30 min. para deposição e 1000.C, 120min. para penetração, conforme IEP DF-012.

Fotogravação por via úmida, com ácido fluorídrico, conforme IEP FL-005.

## Parte Experimental



Figura IV.2 Seqüência do processo de fabricação de capacitores.

Deposição de alumínio. Empregou-se um evaporador com canhão de elétrons Edwards E-19E, operando a  $1.10^{-6}$  torr, tensão de aceleração de 10 kV e corrente do feixe de elétrons de  $300\mu\text{A}$ .

## Parte Experimental

A espessura do filme depositado ( $1\mu\text{m}$ ) foi monitorada com um detector de cristal.

Fotografação de alumínio. Efetuada por via úmida, usando-se fotorresiste AZ1350-J e ácidos fosfórico e nítrico. de acordo com a IEP FL-009.

### IV.2 - Etapas do Experimento

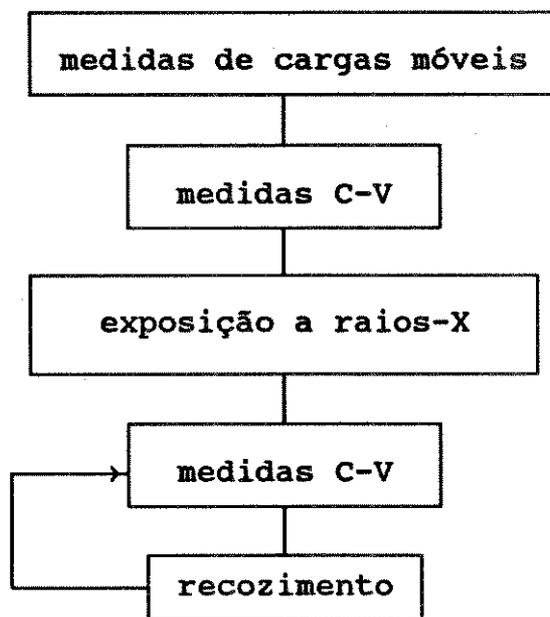


Figura IV.3 Seqüência de etapas do experimento.

#### IV.2.a - Medidas de cargas móveis.

Um diagrama em blocos da medida de cargas móveis é apresentado na figura IV.6(b). O capacitor é ligado em série com um gerador de rampa e um eletrômetro Keithley 602C. Uma variação linear de tensão é aplicada sobre o capacitor e a corrente de deslocamento e a tensão de varredura são registradas num traçador X-Y. Um elemento aquecedor, constituído de um suporte ("chuck") apropriado e resistências, é usado em conjunto com um controlador de temperatura, para aquecer a amostra. As medidas são feitas no

Parte Experimental

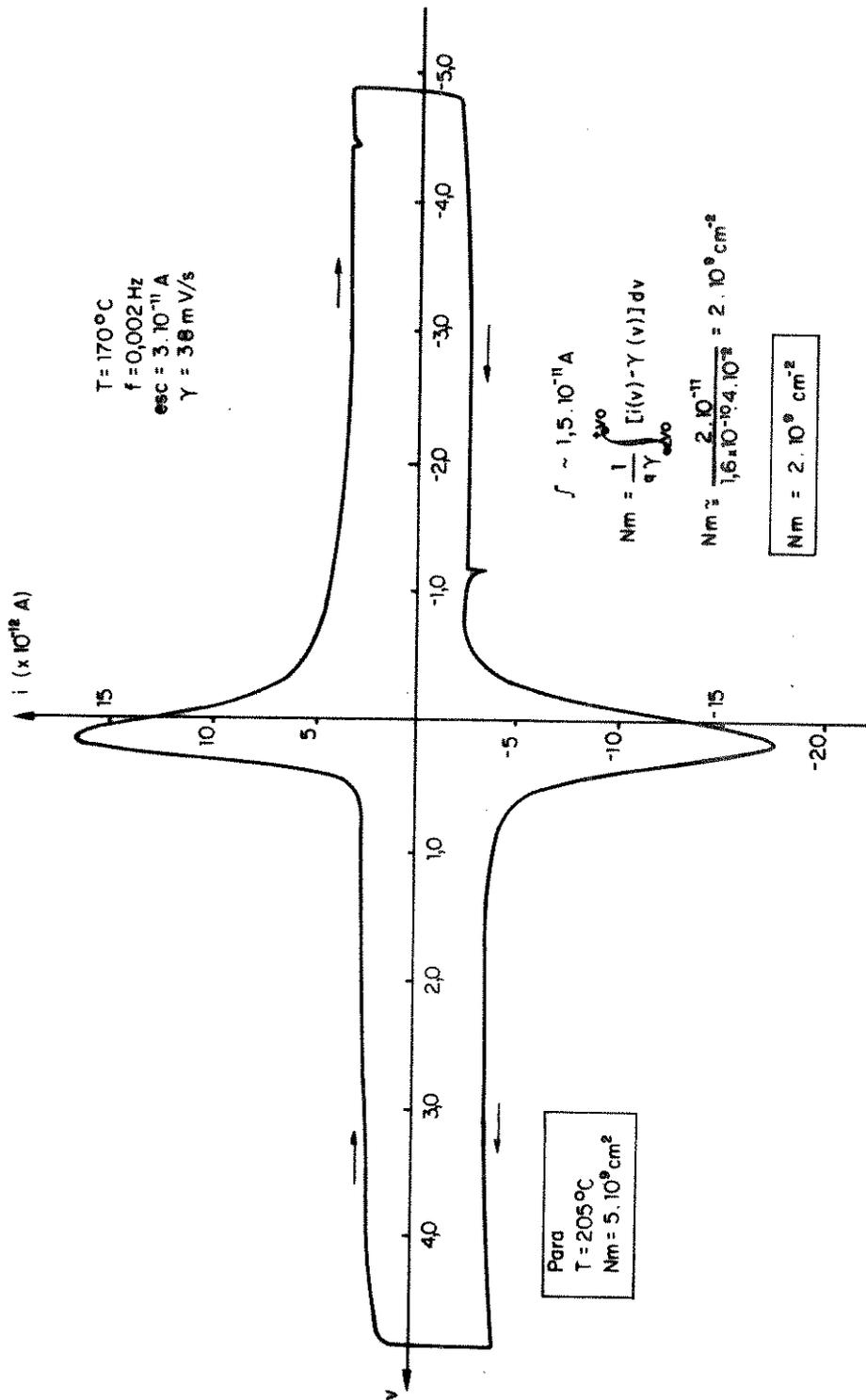


Figura IV.4 Medida de cargas m3veis pelo m3todo TVS.

## Parte Experimental

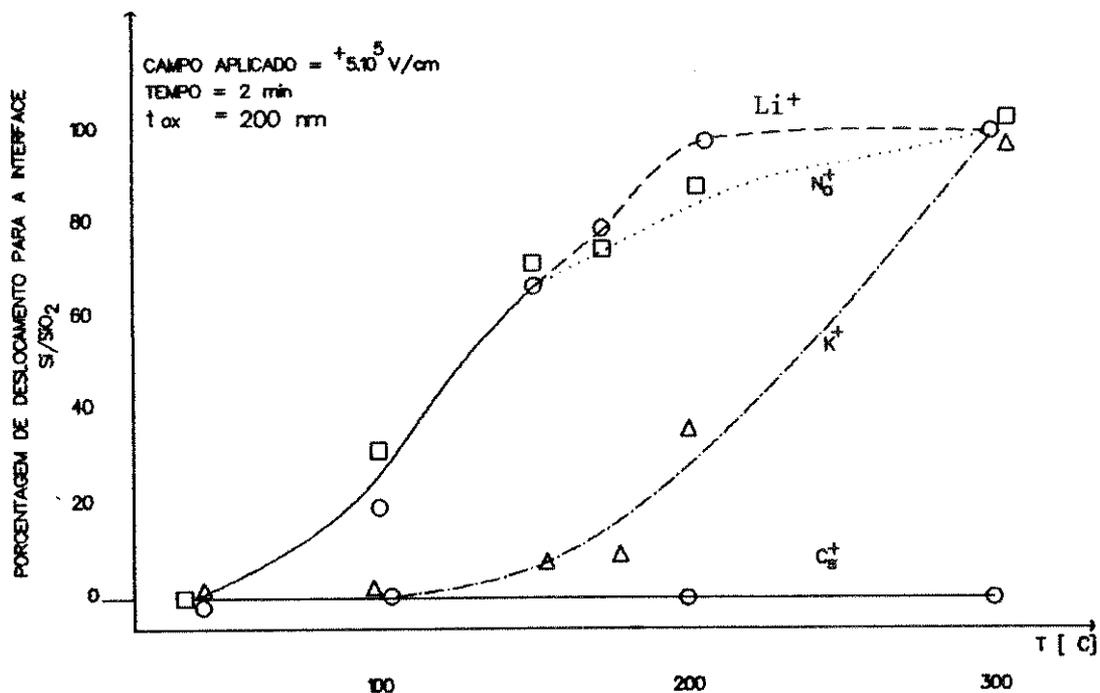


Figura VI.5 Porcentagem de carga iônica deslocada em SiO<sub>2</sub> em função da temperatura.<sup>1</sup>

escuro e em caixa blindada.

A figura IV.4 mostra a curva obtida a 170°C. A velocidade de rampa foi  $\gamma=38$  mV/s, obtida ao selecionarmos a frequência de  $f=2 \cdot 10^{-3}$  Hz e amplitude de  $V_{pp}=9,6$  V. Usamos a escala F.E. (fundo de escala)=30 pA do eletrômetro no modo "fast", para que a curva não fosse distorcida pelo tempo de resposta grande do eletrômetro nessa escala. O valor da densidade de cargas móveis por unidade de área é  $N_m=2 \cdot 10^9$  cm<sup>-2</sup>. A 205°C, temperatura para a qual o gráfico da figura IV.5 aponta que 90% do sódio e 100% do lítio são deslocados de uma interface para a outra, o valor obtido foi  $N_m=5 \cdot 10^9$  cm<sup>-2</sup>. Medimos a área sob o pico na figura IV.4

## Parte Experimental

através de uma aproximação por triângulos. A 205°C, fizemos uma proporção massa/área de papel. Como os valores de  $Nm$  são menores ou iguais à precisão das demais medidas C-V ( $1 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ), assegura-se que o experimento não é influenciado por cargas móveis.

### IV.2.b - Medidas C-V

O equipamento utilizado nas medidas C-V está descrito no esquema da figura IV.6. As medidas são feitas numa caixa blindada e no escuro. Existem três procedimentos para a obtenção das curvas.

- a) Curva em alta frequência (HFCV): o capacitor é ligado à entrada do capacitômetro Boonton 72B, que aplica-lhe tanto o sinal ac como a polarização. Esta é uma onda triangular de frequência muito baixa ( $\approx 10^{-3} \text{ Hz}$ ), de modo que o estado estacionário se mantém e a polarização adquire um caráter de nível dc, quando sua frequência é comparada ao sinal ac de 1MHz. Registrando a capacitância em função da polarização num registrador X-Y, temos a curva HFCV.
- b) Curva C-V em baixa frequência (QSCV): o método citado, de aplicarmos um sinal alternado de pequena amplitude para levantarmos a curva C-V, apresenta problemas com ruído quando a frequência é baixa. Em vez disso, utilizamos a técnica chamada quase estática (QSCV). Ao aplicarmos uma rampa muito lenta de tensão ( $\gamma \approx 40 \text{ mV/s}$ ) ao capacitor, haverá uma

## Parte Experimental

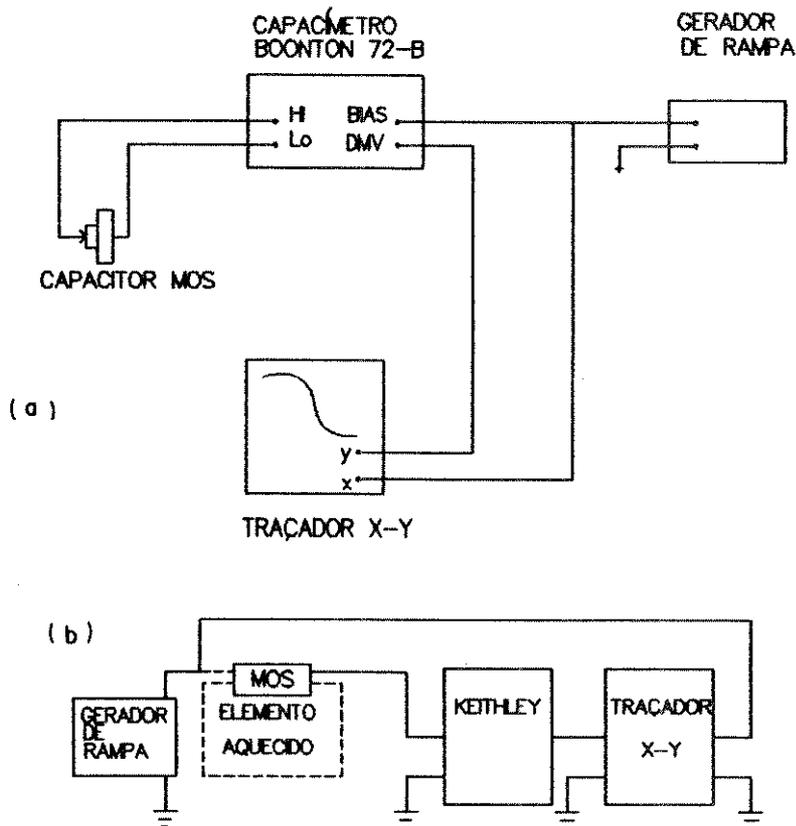


Figura IV.6 Diagrama em blocos da montagem experimental da medida C-V em alta frequência (a), quase estática e TVS (b).

pequena corrente de deslocamento sobre ele:

$$IV-26 \quad i = C \frac{dV}{dt}$$

Como  $\gamma = \frac{dV}{dt}$  é constante, a corrente será proporcional à capacitância. Alguns cuidados devem ser tomados nessa medida:

- a velocidade de rampa  $\gamma$  deve ser lenta o suficiente para que o equilíbrio seja mantido (<100mV/s);
- a escala deve ser a mesma que a da curva HFCV;
- a blindagem da caixa e dos cabos deve ser eficiente;

## Parte Experimental

• é preciso um bom contato com o substrato.

A corrente de deslocamento no capacitor é medida por um eletrômetro Keithley 602C. Todas as medidas foram feitas usando velocidade de rampa  $\gamma=50\text{mV/s}$ , um valor conveniente por várias razões. Para  $\gamma\approx 10\text{mV/s}$ , o ruído na medida quase estática é comparável ao sinal a ser medido, pois é necessário usar a escala F.E.=1pA no modo "fast". Nessas condições, o tempo de resposta é da ordem de 2 segundos, distorcendo a curva. Outro fator de distorção é a corrente de fuga apresentada pelos capacitores, - em alguns casos, até  $i=15\text{pA}$  - que nos obriga a elevarmos a velocidade de rampa até que a corrente de deslocamento para o capacitor seja pelo menos 10 vezes maior que a corrente de fuga. Por outro lado, se  $\gamma$  é muito elevada, outras distorções podem ser introduzidas porque os portadores minoritários não acompanham a

| DISPOSITIVO | $D_{it}-mg(\text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1})$ |                   | $N_f(\text{cm}^{-2})$  |
|-------------|--|-------------------|------------------------|
|             | WB   | OVST              |                        |
| AD-1a       | $1 \cdot 10^{10}$                          | $4 \cdot 10^{10}$ | $\leq 1 \cdot 10^{10}$ |
| AD-1b       | $8 \cdot 10^{10}$                          | $5 \cdot 10^{10}$ | $\leq 1 \cdot 10^{10}$ |
| AD-2a       | $3 \cdot 10^{10}$                          | $6 \cdot 10^{10}$ | $\leq 1 \cdot 10^{10}$ |
| AD-2b       | $3 \cdot 10^{10}$                          | $5 \cdot 10^{10}$ | $\leq 1 \cdot 10^{10}$ |
| C-4a        | $2 \cdot 10^{10}$                          | $4 \cdot 10^{10}$ | $\leq 1 \cdot 10^{10}$ |
| C-4b        | $1 \cdot 10^{10}$                          | $4 \cdot 10^{10}$ | $\leq 1 \cdot 10^{10}$ |
| C-5a        | $1 \cdot 10^{10}$                          | $4 \cdot 10^{10}$ | $\leq 1 \cdot 10^{10}$ |
| C-5b        | $1 \cdot 10^{10}$                          | $3 \cdot 10^{10}$ | $\leq 1 \cdot 10^{10}$ |
| C-7a        | $3 \cdot 10^{10}$                          | $5 \cdot 10^{10}$ | $\leq 1 \cdot 10^{10}$ |
| C-7b        | $6 \cdot 10^{10}$                          | $9 \cdot 10^{10}$ | $\leq 1 \cdot 10^{10}$ |

Tabela IV.1 Medidas C-V iniciais.  $D_{it}-mg$  é a densidade de cargas capturadas na interface no meio da banda proibida. Dois métodos gráficos fornecem seus valores: o de Wagner e Berglund (WB) e o de Van Overstraeten (OVST).  $N_f$  é a densidade de cargas no óxido, medida a partir da comparação entre os valores experimentais e teóricos da tensão de banda plana ( $V_{FB}$ ).

## Parte Experimental

polarização. Nas curvas a alta frequência,  $\gamma$  muito alta pode levar o capacitor a depleção profunda.  $\gamma=50\text{mV/s}$  foi um valor que manteve todos estes fatores de distorção sob controle. Os valores obtidos nesta etapa estão colocados na tabela IV.1.

### IV.2.c - Irradiação

Utilizamos um tubo Rigaku Denki 400 LA2 com alvo de cobre, trabalhando a 30 kV de tensão de aceleração e corrente de 15mA. Não medimos a intensidade do feixe incidente na amostra, porque os detetores disponíveis eram adequados apenas para intensidades muito baixas. Descartamos o uso de filmes fotográficos por causa do tempo consumido. Ao invés disso, encontramos, por tentativa e erro, um posicionamento entre tubo e amostra tal que o controle da dose incidente fosse feito pelo tempo de irradiação. A dificuldade está na repetibilidade do processo, pois o feixe intenso na janela do tubo satura numa fração de segundo a densidade de cargas induzidas nos capacitores. Além disso, estes não resistem à experiência, tendo o óxido rompido após algumas medidas. Nesses testes, irradiamos capacitores com feixes de raios-X policromático e Cu-K $\alpha$  (obtido colocando um filtro de níquel na janela do tubo; o comprimento de onda dos fótons correspondentes à linha K $\alpha$  do espectro de raios-X do cobre é  $\lambda_{K\alpha}=1,542\text{\AA}$ ; a energia é  $E_{K\alpha}=8\text{keV}$ ). Nessas medidas, utilizamos capacitores com características diferentes (resumidas na tabela IV.2) daqueles usados nos recozimentos, mas submetidos ao mesmo processo de fabricação.

Distanciando os dispositivos de 5 cm da janela e usando

## Parte Experimental

| Disp. | Área<br>( $\mu\text{m}^2$ ) | r-X       | $D_{it}$ (mg)<br>$\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ | $N_{ot}$<br>( $\text{cm}^{-2}$ ) |
|-------|-----------------------------|-----------|---|----------------------------------|
| PA-4  | $(500\mu\text{m})^2$        | pol       | $2 \cdot 10^{11}$                               | $1 \cdot 10^{11}$                |
| PA-5  | $(1000\mu\text{m})^2$       | pol       | $2 \cdot 10^{11}$                               | $1 \cdot 10^{11}$                |
| GR-9  | $(1000\mu\text{m})^2$       | pol       | $5 \cdot 10^{11}$                               | $8 \cdot 10^{11}$                |
| C-1   | $(500\mu\text{m})^2$        | $K\alpha$ | $7 \cdot 10^{10}$                               | $3 \cdot 10^{10}$                |

Tabela IV.2 Capacitores usados em testes preliminares. Substratos tipo-p,  $N_A=4 \cdot 10^{15}\text{cm}^{-3}$ ,  $t_{ox}=110\text{nm}$ .

o filtro de níquel, atenuamos a intensidade do feixe e encontramos o tempo ótimo de 14 minutos para irradiar os capacitores. Nesta condição, os efeitos da radiação são bastante notáveis, a deformação das curvas C-V não é tão grande que dificulte a interpretação, o erro no tempo de exposição (0,5%) é desprezível e os capacitores não chegam à saturação. Os resultados estão colocados na tabela IV.3. A repetibilidade é muito boa: somente um capacitor apresentou desvio de 50% da média de  $5 \cdot 10^{11}\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$  de  $D_{it}$ ; todos os outros apresentaram desvio menor que 10% (calculados com dados OVST). Essa é a nossa base para supormos que os dispositivos AD-2a e AD-2b, que não foram medidos após a irradiação, apresentam  $D_{it}=5 \cdot 10^{11}\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ . A figura IV.7 mostra a evolução de  $D_{it}$ , obtido das curvas C-V durante o experimento.

Parte Experimental

| DISPOSITIVO | Dit-mg (cm <sup>-2</sup> eV <sup>-1</sup> ) |                      | N <sub>ot</sub> (CM <sup>-2</sup> ) | ΔV <sub>I</sub> (V) |
|-------------|---|----------------------|-------------------------------------|---------------------|
|             | WB  | OVST                 |                                     |                     |
| AD-1a       | 5.10 <sup>11</sup>                          | 5,4.10 <sup>11</sup> | 1.10 <sup>10</sup>                  | 0,1                 |
| AD-1b       | 2.10 <sup>11</sup>                          | 2,6.10 <sup>11</sup> | 3.10 <sup>10</sup>                  | 0,05                |
| AD-2a*      | 5.10 <sup>11</sup>                          | 5.10 <sup>11</sup>   | —                                   | —                   |
| AD-2b*      | 5.10 <sup>11</sup>                          | 5.10 <sup>11</sup>   | —                                   | —                   |
| C-4a        | 6.10 <sup>11</sup>                          | 5,4.10 <sup>11</sup> | 1.10 <sup>10</sup>                  | 0,15                |
| C-4b        | 5.10 <sup>11</sup>                          | 5,1.10 <sup>11</sup> | 3.10 <sup>10</sup>                  | 0,15                |
| C-5a        | 5.10 <sup>11</sup>                          | 5,0.10 <sup>11</sup> | 1.10 <sup>10</sup>                  | 0,2                 |
| C-5b        | 5.10 <sup>11</sup>                          | 5,2.10 <sup>11</sup> | 2.10 <sup>10</sup>                  | 0,1                 |
| C-7a        | 5.10 <sup>11</sup>                          | 5,0.10 <sup>11</sup> | 4.10 <sup>10</sup>                  | 0,1                 |
| C-7b        | 5.10 <sup>11</sup>                          | 5,0.10 <sup>11</sup> | 3.10 <sup>10</sup>                  | 0,05                |

Tabela IV.3 Medidas C-V pós-irradiação. N<sub>ot</sub> é a densidade de cargas capturadas no óxido, medida a partir do deslocamento da curva a 1 MHz. N<sub>st</sub> é a densidade de cargas correspondente ao histerese gerado na curva de alta frequência (estados lentos). \*Suposição.

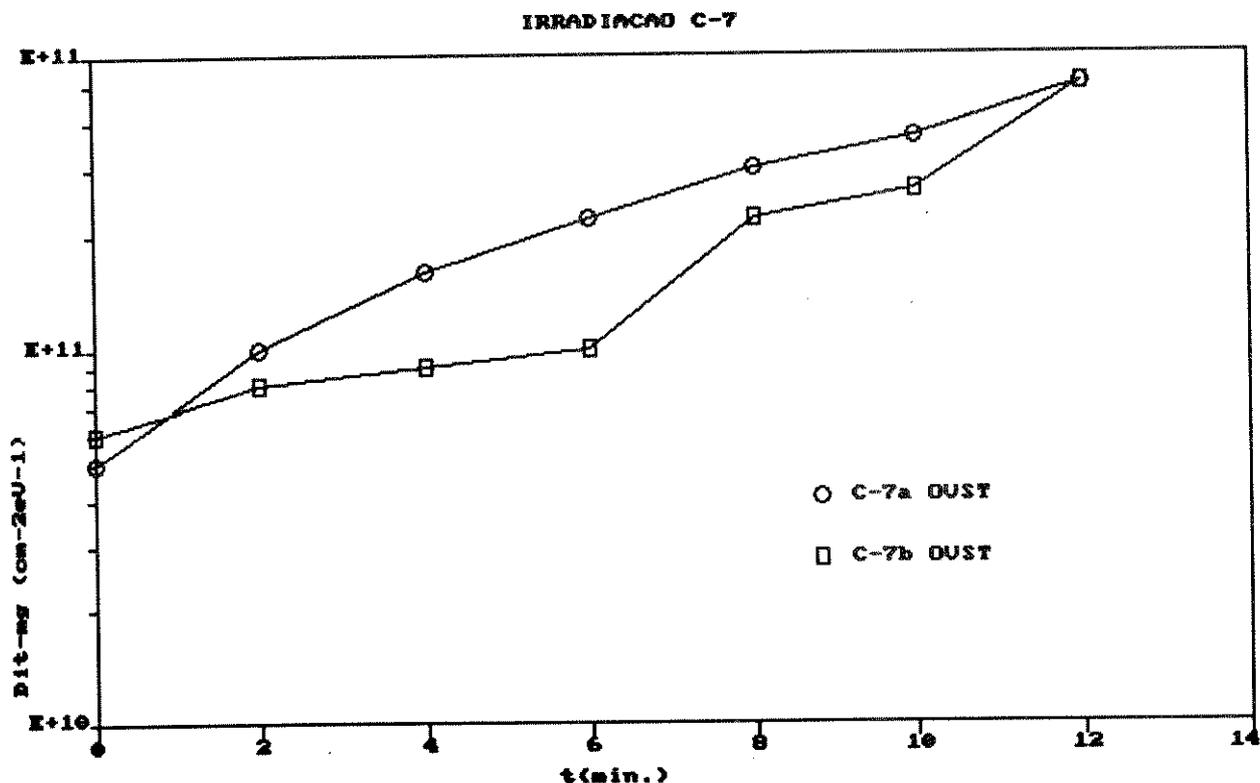


Figura IV.7 Irradiação de C-7. Dit em função do tempo de irradiação de dois dispositivos.

## Parte Experimental

### IV.2.d - Recozimento

Depois de irradiados, submetemos os capacitores a recozimento térmico convencional (amostras C-4, C-5 e C-7) e recozimento térmico rápido (amostras AD-1 e AD-2).

Recozimento térmico convencional. Empregamos um forno de tubo de quartzo, com fluxo de N<sub>2</sub> de 2 lpm (litros por minutos, para recozermos os dispositivos a três temperaturas diferentes: 380,0C (C-7), 420,0C (C-5) e 450,0C (C-4). Recozemos sucessivamente os capacitores por períodos de 5 minutos, intercalados por medidas C-V. A figura IV.8 nos mostra a evolução do experimento, a tabela IV.4 resume os resultados e as figuras IV.9 e IV.10 os apresentam num gráfico.

# Parte Experimental

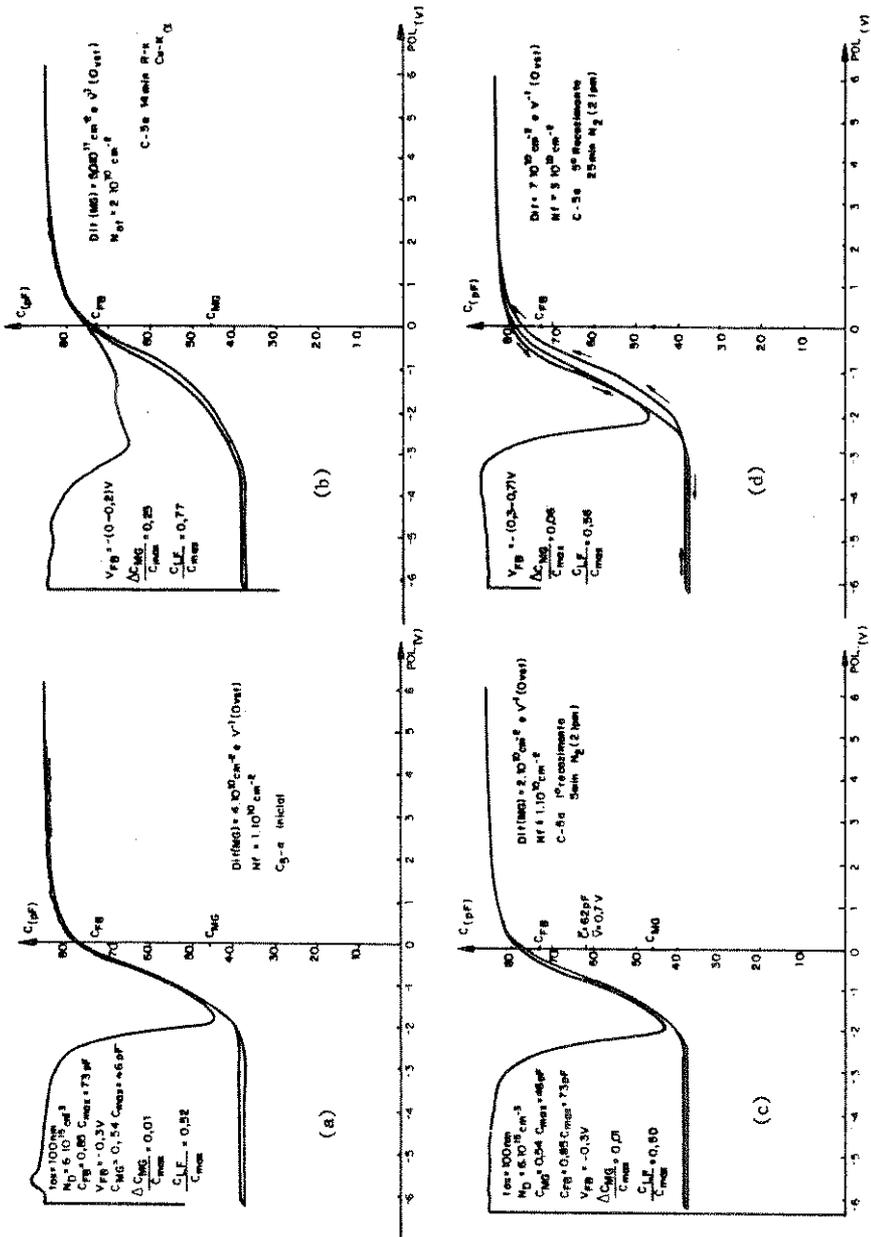


Figura IV.8 Curvas C-V em alta e baixa frequência: (a) antes da irradiação; (b) após 12 min. de irradiação; (c) após 5 min. de recozimento; (d) após 25 min. de recozimento.

Parte Experimental

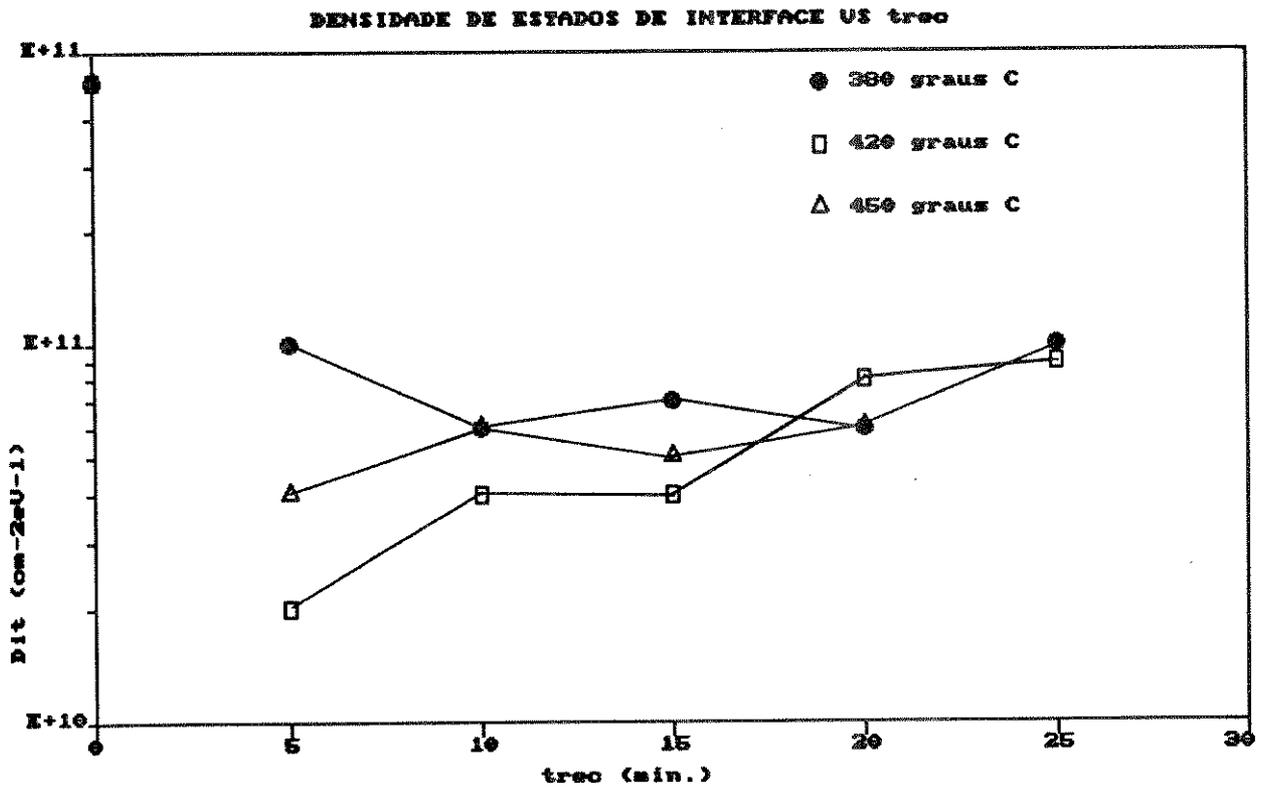


Figura IV.9 Recozimento convencional.  $D_{it}$  é apresentado em função do tempo de recozimento, a três temperaturas diferentes.

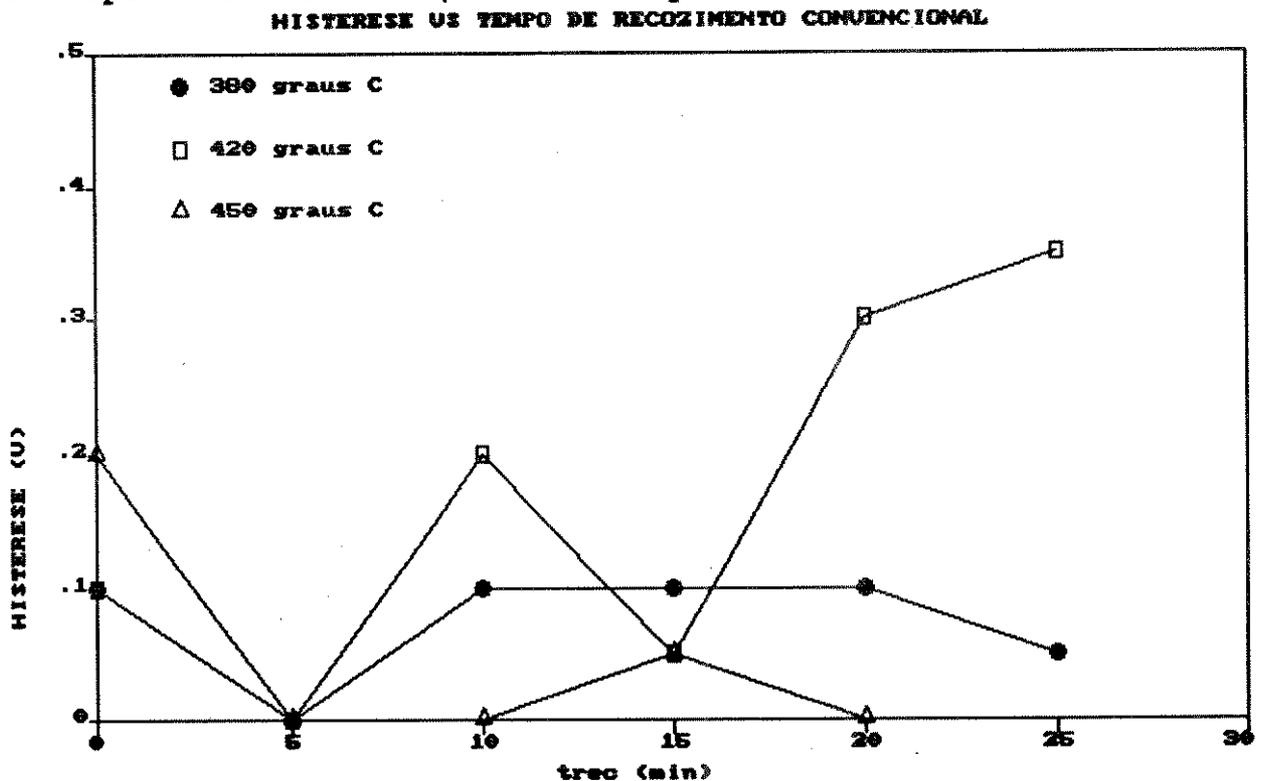


Figura IV.10 Histerese pós-recozimento em função do tempo de recozimento.

Parte Experimental

| RECOZIMENTO<br>(MINUTOS) |                     | DISPOSITIVOS |                      |                      |                    |                    |                      |                    |
|--------------------------|---------------------|--------------|----------------------|----------------------|--------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
|                          |                     | 380.C        |                      | 420.C                |                    | 450.C              |                      |                    |
|                          |                     | C-7a         | C-7b                 | C-5a                 | C-5b               | C-4a               | C-4b                 |                    |
| 5                        | D <sub>it</sub>     | WB           | 1.10 <sup>11</sup>   | 1.10 <sup>11</sup>   | 1.10 <sup>10</sup> | 2.10 <sup>10</sup> | 1,4.10 <sup>11</sup> | 3.10 <sup>10</sup> |
|                          |                     | OVST         | 1,3.10 <sup>11</sup> | 1,3.10 <sup>11</sup> | 2.10 <sup>10</sup> | 4.10 <sup>10</sup> | 1,8.10 <sup>11</sup> | 4.10 <sup>10</sup> |
|                          | ΔV <sub>R</sub> (V) | 0            | 0                    | 0                    | 0                  | 0,05               | 0                    |                    |
| 10                       | D <sub>it</sub>     | WB           | 6.10 <sup>10</sup>   | 6.10 <sup>10</sup>   | 3.10 <sup>10</sup> | 3.10 <sup>10</sup> | 1.10 <sup>11</sup>   | 5.10 <sup>10</sup> |
|                          |                     | OVST         | 6.10 <sup>10</sup>   | 7.10 <sup>10</sup>   | 4.10 <sup>10</sup> | 5.10 <sup>10</sup> | 9.10 <sup>10</sup>   | 6.10 <sup>10</sup> |
|                          | ΔV <sub>R</sub> (V) | 0,05         | 0,1                  | 0                    | 0,20               | 0,10               | 0                    |                    |
| 15                       | D <sub>it</sub>     | WB           | 1.10 <sup>11</sup>   | 7.10 <sup>10</sup>   | 1.10 <sup>10</sup> | 5.10 <sup>10</sup> | 1.10 <sup>11</sup>   | 3.10 <sup>10</sup> |
|                          |                     | OVST         | 1,4.10 <sup>11</sup> | 3.10 <sup>10</sup>   | 4.10 <sup>10</sup> | 4.10 <sup>10</sup> | 2,9.10 <sup>11</sup> | 5.10 <sup>10</sup> |
|                          | ΔV <sub>R</sub> (V) | 0,10         | 0,10                 | 0                    | 0,05               | 0,20               | 0,05                 |                    |
| 20                       | D <sub>it</sub>     | WB           | 1.10 <sup>11</sup>   | 6.10 <sup>10</sup>   | 1.10 <sup>11</sup> | 1.10 <sup>11</sup> | 5.10 <sup>10</sup>   | 6.10 <sup>10</sup> |
|                          |                     | OVST         | 1,4.10 <sup>11</sup> | 6.10 <sup>10</sup>   | 8.10 <sup>10</sup> | 9.10 <sup>10</sup> | 5.10 <sup>10</sup>   | 6.10 <sup>10</sup> |
|                          | ΔV <sub>R</sub> (V) | 0,30         | 0,10                 | 0,10                 | 0,30               | 0,15               | 0                    |                    |
| 25                       | D <sub>it</sub>     | WB           | 4.10 <sup>11</sup>   | 1.10 <sup>11</sup>   | 6.10 <sup>10</sup> | 7.10 <sup>10</sup> | _____                | _____              |
|                          |                     | OVST         | 3,0.10 <sup>11</sup> | 7.10 <sup>10</sup>   | 9.10 <sup>10</sup> | 9.10 <sup>10</sup> | _____                | _____              |
|                          | ΔV <sub>R</sub> (V) | 0,40         | 0,05                 | 0,35                 | 0,35               | _____              | _____                |                    |

Tabela IV.4 Recozimento térmico convencional. Dispositivos recozidos em N<sub>2</sub> por períodos sucessivos de 5 minutos, intercalados com medidas C-V. D<sub>it</sub> definido nas tabelas anteriores. ΔV<sub>R</sub> é a histerese nas curvas C-V após o recozimento. C-7a e C-7b recozidas a 380.C; C-5a e C-5b a 420.C; C-4a e C-4b a 450.C.

Recozimento térmico rápido. Utilizamos um forno de lâmpadas halogênicas, (construído no LED, como projeto de mestrado de José Alexandre Diniz) para recozermos os capacitores a duas temperaturas: 390.C (AD-2) e 415.C (AD-1). A taxa de aquecimento/resfriamento foi da ordem de 20.C/s, na faixa de potência em que trabalhamos: 3kW (20% da potência total). Como o forno estava sem a janela de quartzo que separa a câmara de

## Parte Experimental

processos das lâmpadas, houve muita perda de calor e a taxa de aquecimento foi pequena. Isso dificulta a medida do tempo de recozimento, pois antes de chegar à temperatura nominal, o capacitor já experimentou algum recozimento a temperaturas mais baixas. A figura IV.11 apresenta um gráfico temperatura×tempo de recozimento. Diante disso, definimos como tempo de recozimento o período em que a temperatura permanece acima de 250°C, que é em geral a temperatura em que os recozimentos começam a ocorrer<sup>2,3</sup>. O ambiente inerte foi provido por um fluxo de N<sub>2</sub> de 2lpm. A figura IV.12 apresenta D<sub>it</sub> em função de tempo de recozimento.

| RECOZIMENTOS |                     | DISPOSITIVOS |                    |                      |                    |                    |
|--------------|---------------------|--------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------|
|              |                     | 415°C        |                    | 390°C                |                    |                    |
|              |                     | AD-1a        | AD-1b              | AD-2a                | AD-2b              |                    |
| 1º           | D <sub>it</sub>     | WB           | 2.10 <sup>11</sup> | 1.10 <sup>10</sup>   | 3.10 <sup>10</sup> | 3.10 <sup>10</sup> |
|              |                     | OVST         | 5.10 <sup>10</sup> | 1,4.10 <sup>10</sup> | 6.10 <sup>10</sup> | 7.10 <sup>10</sup> |
|              | ΔV <sub>R</sub> (V) | 0,05         | 0                  | 0                    | 0                  |                    |
| 2º           | D <sub>it</sub>     | WB           | 2.10 <sup>10</sup> | 6.10 <sup>10</sup>   | 3.10 <sup>10</sup> | 3.10 <sup>10</sup> |
|              |                     | OVST         | 6.10 <sup>10</sup> | 7.10 <sup>10</sup>   | 6.10 <sup>10</sup> | 6.10 <sup>10</sup> |
|              | ΔV <sub>R</sub> (V) | 0,10         | 0                  | 0                    | 0                  |                    |
| 3º           | D <sub>it</sub>     | WB           | 3.10 <sup>10</sup> | 5.10 <sup>10</sup>   | 2.10 <sup>10</sup> | 3.10 <sup>10</sup> |
|              |                     | OVST         | 7.10 <sup>10</sup> | 7.10 <sup>10</sup>   | 7.10 <sup>10</sup> | 5.10 <sup>10</sup> |
|              | ΔV <sub>R</sub> (V) | 0,15         | 0,05               | 0                    | 0                  |                    |

Tabela IV.5 Progressão de D<sub>it</sub>-mg e ΔV<sub>R</sub> durante recozimento térmico rápido de capacitores MOS. Recozimentos sucessivos em N<sub>2</sub> intercalados com medidas C-V. Os tempos de recozimento estão colocados na figura IV.12.

## Parte Experimental

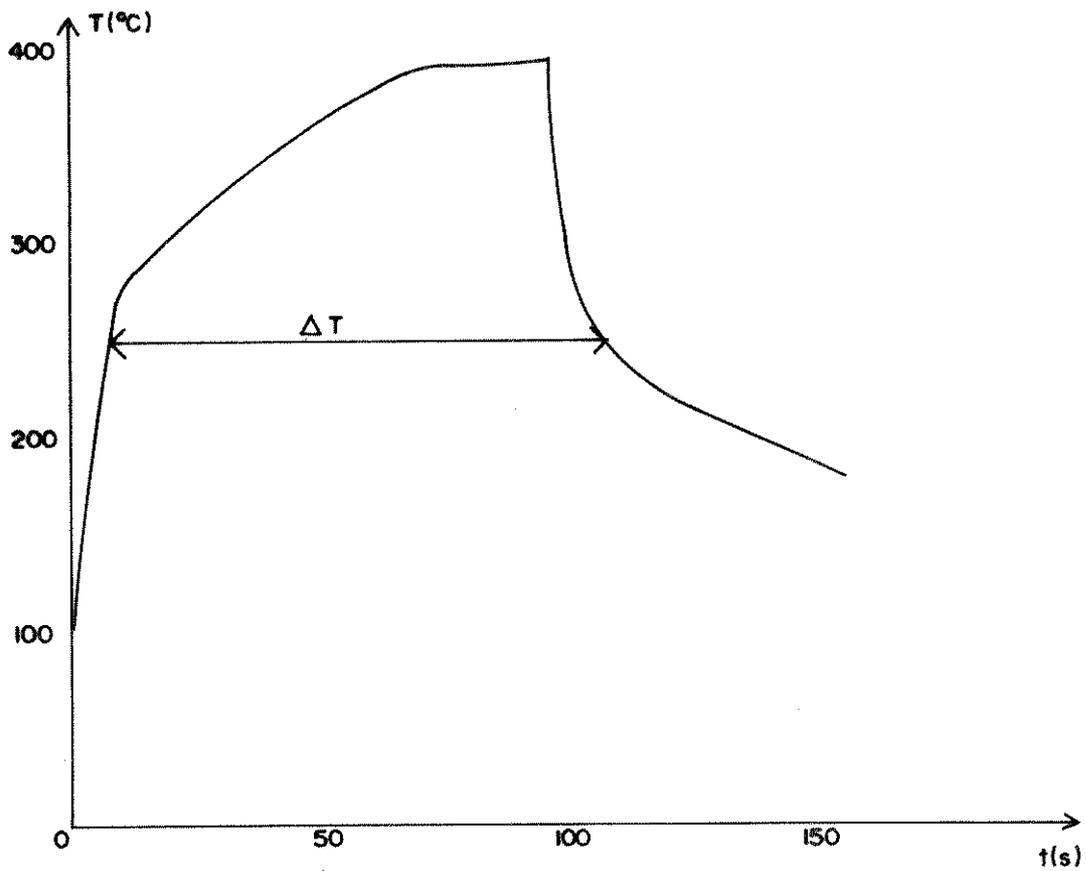


Figura IV.11 Definição do tempo de recozimento rápido para cada etapa do experimento.

## Parte Experimental

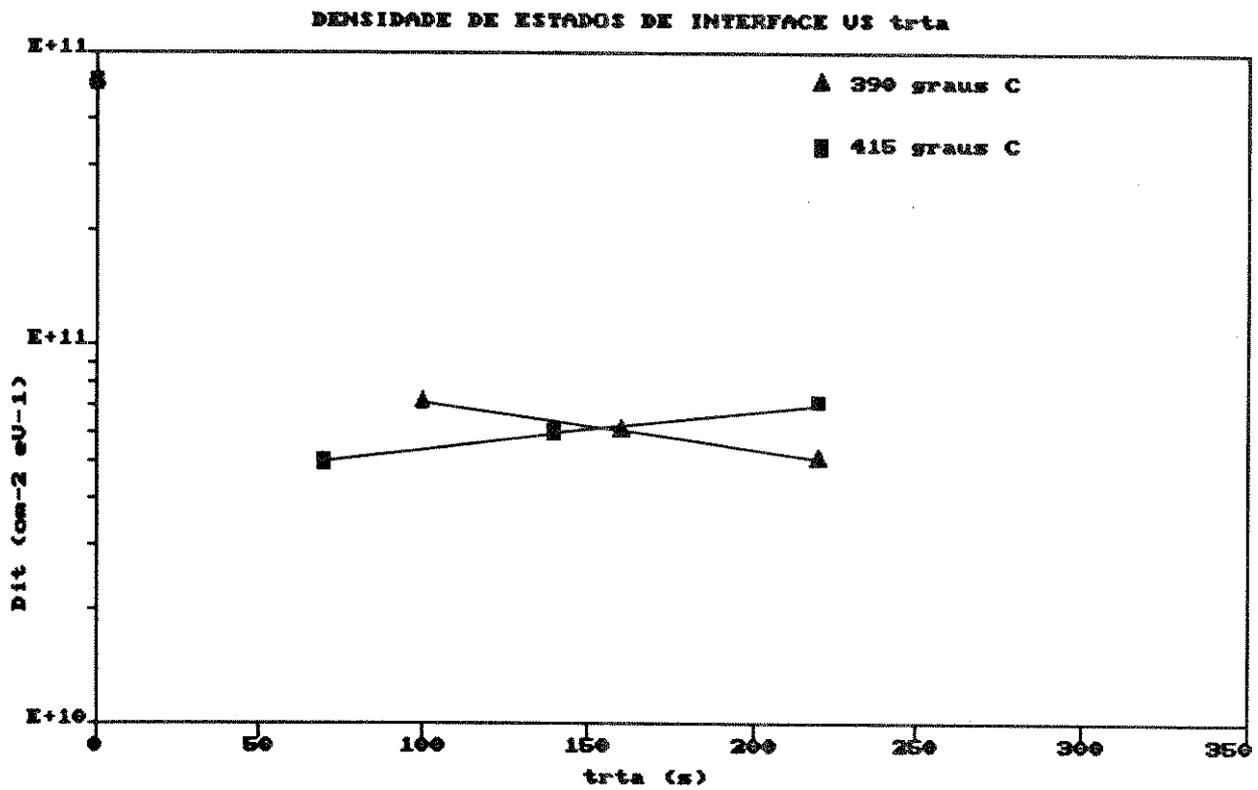


Figura IV.12 Recozimento térmico rápido.  $D_{it}$  em função do tempo de recozimento em  $N_2$  a 390°C (—) e 415°C (----).

## Parte Experimental

### Referências.

- <sup>1</sup>N.G. Fontela, *Tese de Mestrado*, Escola politécnica-USP.
- <sup>2</sup>L. Do Thanh and P. Balk, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 135, No 7, p. 1797, 1988.
- <sup>3</sup>M.L. Reed, J.D. Plummer, *J. Appl. Phys.*, Vol. 63, No. 12, 1988.

## V - ANÁLISE.

### V.1 - IRRADIAÇÃO

A análise dos resultados obtidos nos mostrou uma grande diferença na média da relação Dit:Not (cargas criadas por radiação) entre os capacitores usados nos testes preliminares e aqueles usados nos experimentos de recozimento. Enquanto nos estudos iniciais Dit:Not foi da ordem de 3:2, nos dispositivos a serem recozidos, a proporção foi da ordem de 40:1, muito acima dos valores preliminares. Todavia, não foram feitos estudos complementares para analisarmos esta diferença. Na fase inicial, nosso objetivo era encontrar a melhor posição dos capacitores em relação à janela do tubo de raios-X. Os capacitores apresentam várias diferenças entre si que podem estar entre as possíveis causas, como a história térmica das lâminas; tipo (R-X Cu-policromático ou Cu-K $\alpha$ ), dose e taxa de dose de radiação e dopagem do substrato. Acreditamos que a causa mais provável do fenômeno está indiretamente relacionada com a taxa de dose de radiação. Durante o período em que eram submetidas à radiação, as amostras ficavam sobre um apoio de vidro. Raios-X também geram pares elétron-lacuna no vidro, (óxido de silício amorfo com grande concentração de impurezas) polarizando-o. Ao retirarmos as amostras, estas permaneciam presas ao vidro devido ao campo eletrostático criado. Este campo pode polarizar os capacitores, aumentando a captura de lacunas. Nos estudos preliminares, a alta taxa de dose foi comum entre as irradiações dos dispositivos. A baixa taxa de dose foi característica das irradiações

## Análise

posteriores. Desse modo, o suporte de vidro tinha tempo de se descarregar e a irradiação era efetuada a  $V_G=0$ . Estudos que determinem conclusivamente a causa deste fenômeno serão muito úteis aos estudos de estados de interfaces, se permitirem elaborar amostras onde seu comportamento possa ser observado sem influências muito fortes de cargas fixas e cargas no óxido.

A histerese ( $\Delta V_i$ ) observada é conhecida como tipo injeção. Esta pode ser entendida através do modelo proposto para estados lentos. Estados lentos ou anômalos são defeitos localizados no óxido ou interface. Geram estados quânticos na banda proibida do silício e mudam sua ocupação com o potencial. Porém, a constante de tempo é bem maior que a dos estados de interface (também chamados de estados rápidos). Já foi observada a presença de estados lentos na região próxima à banda de valência (ver figura I.9). Se estes estados são aceitadores<sup>1</sup>, carregam-se na acumulação do Si-n. No retorno à inversão, os estados descarregam-se lentamente. Se a constante de tempo for suficientemente grande, a curva acumulação→inversão apresentará um deslocamento para a direita em relação à curva inversão→acumulação.

### V.2 - Recozimento Térmico Convencional

Neste experimento, qualquer tempo maior que 10 minutos fez com que efeitos deletérios, como aumento de  $D_{it}$  ou histereses nas curvas C-V, fossem observados<sup>2</sup>. Dados bibliográficos<sup>3</sup> mostram que o recozimento de estados de interface se dá muito mais rapidamente que o padrão estabelecido de (15-45) minutos a

## Análise

(400-450).C. O recozimento mais demorado seria necessário para capacitores de porta de silício policristalino, nos quais a passivação seria uma reação limitada pelo transporte de hidrogênio até a interface, mas não no caso do alumínio (ou outros metais reativos), em que o hidrogênio atômico seria fornecido pelos traços de água e hidróxidos presentes no óxido e interface Al-Si.

Uma das conseqüências da dependência das taxas de passivação e geração de estados de interface para com a temperatura (item III.6), é que tanto  $D_{\text{min}}$  como o tempo ideal de recozimento variam com a temperatura. Definimos o tempo ideal de recozimento ( $t_{\text{ideal}}$ ) como o tempo de recozimento para o qual  $D_{\text{it}}$  é mínimo, a uma dada temperatura. A figura V.1 mostra que a 380.C, a taxa de passivação ainda é lenta, uma vez que após 5 minutos, o valor de  $D_{\text{it}}$  decresce de  $5 \cdot 10^{11} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$  para  $1 \cdot 10^{11} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$  e seu valor mínimo ( $D_{\text{min}} = 6 \cdot 10^{10} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ ) se dá para  $t_{\text{ideal}} \approx 15 \text{ min}$ , com histerese pós-recozimento bastante alta. A 420.C, (figura IV.9) a taxa de passivação é elevada, com  $D_{\text{it}} = 2 \cdot 10^{10} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$  após 5 minutos. É possível que  $t_{\text{ideal}} \leq 5 \text{ min}$ , pois  $D_{\text{it}}$  é crescente a partir 5 minutos e não estudamos seu comportamento antes disso. A 450.C, o valor de  $D_{\text{min}}$  eleva-se, devido ao fato da taxa de geração de estados de interface tornar-se dominante nos 5 minutos iniciais; conseqüentemente,  $t_{\text{ideal}}$  seria menor que 5min. Medidas feitas a 435.C (1 e 2 min, com capacitores diferentes, expostos a diferentes doses), apesar de confirmarem esta tendência, indicam que a alta taxa de geração inicial também é responsável pela

## Análise

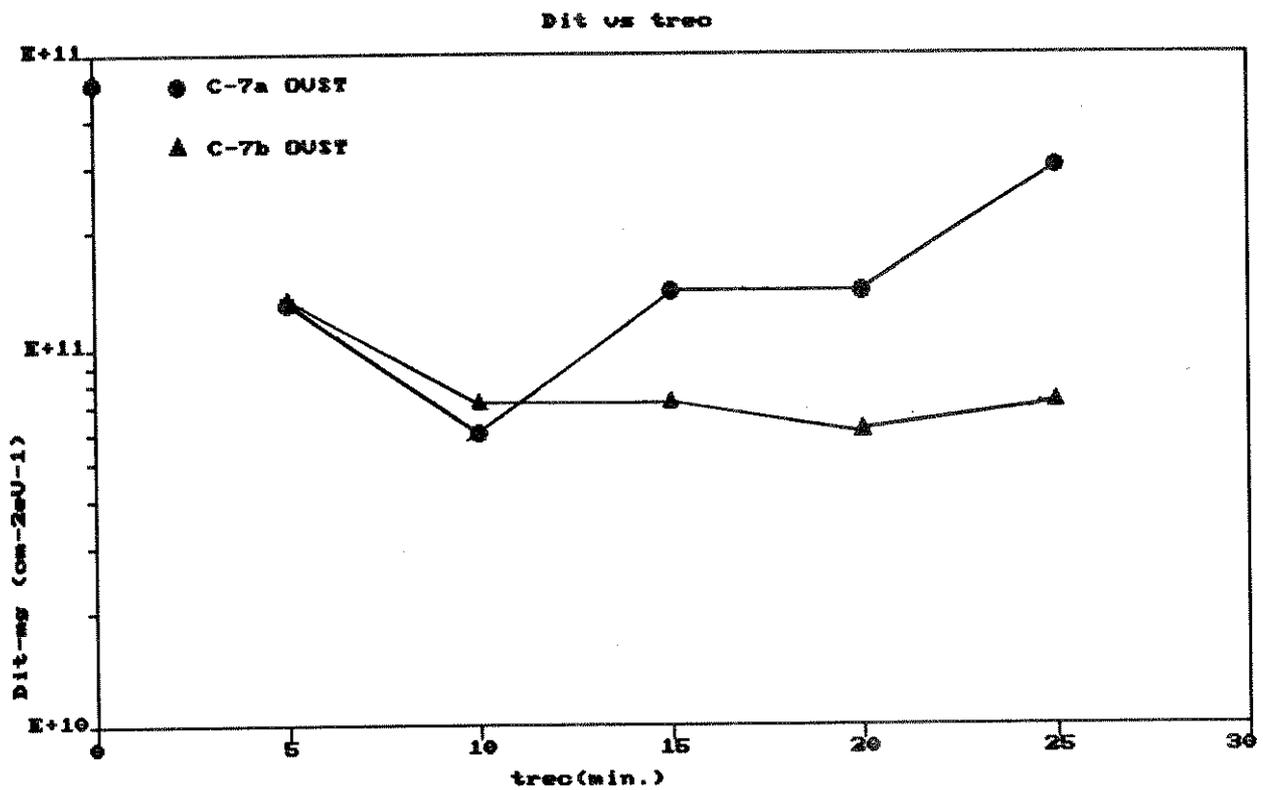


Figura V.1 Densidade de estados de interface ( $D_{it}$ ) em função de tempo de recozimento convencional ( $t_{rec}$ ) a  $380^{\circ}\text{C}$ , em atmosfera de  $\text{N}_2$ .

elevação de  $D_{in}$ , logo dominando sobre a taxa de passivação e não permitindo que a eliminação dos defeitos se dê de maneira mais completa.

A histerese observada após o recozimento é do tipo polarização. A curva acumulação  $\rightarrow$  inversão desloca-se para a

## Análise

esquerda, ao contrário da histerese pós-irradiação. O comportamento é semelhante à deriva de carga iônica próximo à interface. O hidrogênio atômico ( $H^+$ ) seria o íon capaz de ser deslocado sob a ação de um campo elétrico à temperatura ambiente. Com a dissociação térmica, o hidrogênio liberado dos defeitos passivados permaneceria no óxido e interface, sendo deslocado para a interface toda vez que uma polarização positiva fosse aplicada à porta. Teríamos assim uma carga positiva na interface que se mostraria na curva C-V como um deslocamento sem estiramento, no sentido negativo do eixo de polarização. Na inversão, o hidrogênio seria deslocado em direção à porta e o potencial na interface criado por essas cargas seria reduzido. A curva C-V aproximar-se-ia da curva ideal. Este é precisamente o comportamento observado neste experimento. Contudo, não existem evidências experimentais conclusivas sobre o transporte de hidrogênio sob forma iônica que comprovem este modelo. Algum tipo de transporte de lacunas capturadas na região próxima à interface causaria o mesmo efeito. Procuramos correlação entre  $D_{it}$  e  $\Delta V_R$  e encontramos uma concordância de 60% entre as inclinações das retas que ligam cada ponto nos gráficos  $D_{it} \times t_{rec}$  e  $\Delta V_R \times t_{rec}$ . Isto indica que os dois efeitos têm alguma ligação em sua origem, mas não nos permite afirmar se um é consequência ou dependente do outro.

### V.2 - Recozimento Térmico Rápido.

Pode haver um erro considerável na medida do tempo de recozimento devido ao procedimento de recozimentos sucessivos.

## Análise

Além disso, as histórias térmicas são diferentes para dispositivos recozidos sucessiva ou diretamente. No caso de recozimento convencional, os tempos de entrada e saída ( $\approx 10-15s$ ) do forno são bem menores que o tempo de recozimento ( $\approx 300s$ ). No caso do recozimento rápido, adiciona-se ao problema da definição do tempo de recozimento, a definição da temperatura do ciclo. Nossa suposição é que a faixa mais elevada de temperatura do ciclo é muito mais significativa em termos de recozimento, devido à dependência da taxa de passivação com a temperatura. Não é nosso intuito discutir exaustivamente essa questão. O que temos a acrescentar são os resultados de Reed e Plummer, que compararam os dois métodos e obtiveram excelente correspondência entre eles (ver figura V.2).

Resta-nos ainda discutir a validade da medida de  $D_{it}$  no meio da banda proibida como representativa da densidade total de estados de interface. Supondo que os estados de interface são

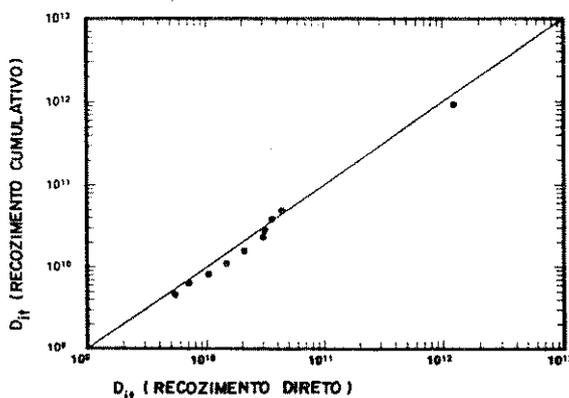


Figura V.2 Densidade de estados de interface medida para recozimentos diretos e cumulativos.

## Análise

centros Pb, vários autores, entre eles Reed<sup>3</sup> e Buchanan<sup>4</sup>, argumentam que a distribuição de estados de interface ao longo da banda proibida é simétrica, em forma de "U", com o mínimo próximo ao meio da banda proibida. Com o aumento da densidade de estados ( $\approx 10^{12} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ ), picos são notados e a assimetria passa a dominar a distribuição. Uma solução é integrar a distribuição ao longo do banda proibida, mas a medida de  $D_{it}$  próximo às bandas de condução e de valência é difícil e o tempo de resposta dos estados de interface decresce exponencialmente à medida que nos afastamos do meio da banda proibida. Outra solução é integrar sobre um intervalo central da banda proibida ( $E_i \pm 0,30 \text{eV}$ ), mas os erros ainda persistem. Embora Shanfield e Moriwaki<sup>5</sup>, numa avaliação do método, afirmem que podem ocorrer erros de até um fator de quatro, recomendam estudos caso a caso. Em nossos experimentos,  $D_{it}$  máximo foi  $6 \cdot 10^{11} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ . De acordo com a literatura, esta densidade é suficientemente baixa para que não tenhamos muita assimetria. Juntando-se a isto a dificuldade de integração da distribuição a possibilidade de aumentarmos o erro e o uso extremamente difundido da medida na literatura, cremos ser justificável a utilização de  $D_{it}$ -mg.

## Referências.

- <sup>1</sup>P.V. Gray and D.M. Brown, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 8, No. 2, p. 32, 1966.

Análise

- <sup>2</sup>D.F. Takeuti, J.A. Diniz, E.S. Braga, and P.J. Tatsch, " Study of rapid Thermal and Conventional Annealing of Radiation-Induced Interface States *Thin Solid Films*, submetido a publicação.
- <sup>3</sup>M.L. Reed and J.D. Plummer, *J. Appl. Phys.*, Vol. 63, No. 12, p. 5776-5793, 1988.
- <sup>4</sup>D.A. Buchanan and D.J. DiMaria, *J. Appl. Phys.*, Vol. 67, No. 12, 1990
- <sup>5</sup>Z. Shanfield and M.M. Moriwaki, *IEEE Transact. Nucl. Sci.*, Vol. NS-32, No. 6, p. 3929, 1985.

## VI-CONCLUSÕES.

### Recozimento Térmico Convencional.

Analisando os dados obtidos, concluímos que:

- qualquer que seja a temperatura de recozimento, o gráfico  $D_{it} \times t_{rec}$  apresenta um mínimo ( $D_{min}$ );
- após 20 minutos de recozimento,  $D_{it}$  é crescente para qualquer das temperaturas usadas no experimento;
- as melhores condições para eliminação de  $D_{it}$  se deram para  $t_{rec}=5min$ ,  $T_{rec}=420,0C$ ;
- todos os capacitores apresentaram histerese entre as curvas C-V acumulação→inversão e inversão→acumulação: aos 5 min, nenhum dos capacitores sofre o efeito; após 10 minutos, 2/3 dos dispositivos apresentam histerese e aos 20 minutos, todos já foram afetados em algum momento;
- histereses pós-recozimento ( $\Delta V_R$  - tipo polarização) tem caráter diferente de histereses pós-irradiação ( $\Delta V_I$  - tipo injeção);
- não encontramos correlação plausível entre  $\Delta V_R$  e  $\Delta V_I$ .

### Recozimento Térmico Rápido.

Da análise dos dados obtidos, podemos concluir que:

- o comportamento de  $D_{it}$  com a temperatura é semelhante ao recozimento convencional, com  $D_{min}(415,0C) < D_{min}(390,0C)$ ,  $t_{ideal}(415,0C) < t_{ideal}(390,0C)$ ;
- os tempos de recozimento são menores, com  $t_{ideal} \approx 100s$  a  $415,0C$ ;

■ a histerese é reduzida, principalmente nos recozimentos a 390°C.

Este estudo de efeitos de raios-X Cu-K $\alpha$  sobre capacitores MOS revelou-se bastante adequado para a análise do recozimento dos estados de interface criados por radiação. Verificamos que o tempo ótimo de recozimento (alguns minutos) é bem menor que o citado na literatura em geral (30 minutos) e que o recozimento térmico rápido pode ser uma boa alternativa para o tratamento térmico de amostras sujeitas a histereses pós-recozimento.

Para continuidade deste trabalho, sugerimos que amostras fabricadas sobre substrato tipo-p e n sejam irradiadas com raios-x de comprimentos de onda diferentes, com doses e taxas de dose diferentes. A oxidação deverá ser com e sem TCE. Suportes isolantes e condutores (aterrados) deverão ser utilizados durante as irradiações. Desse modo, podemos investigar a origem da desproporção em  $N_{ot}$  e  $D_{it}$  induzidas. A histerese pós-recozimento poderá ser melhor estudada se tempos mais curtos de recozimento térmico rápido forem utilizados. Poderemos então recozer amostras fabricadas em processos com e sem hidrogênio e investigar a correlação  $D_{it} \times t_{ra}$ .