

EDMUNDO DA SILVA BRAGA

"Mestre em Ciências Físico - Matemáticas"

"TECNOLOGIA MOS CANAL N COM PORTA DE SnO_2 "

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Campinas da UNICAMP como requisito parcial para obtenção do Título de "Doutor em Engenharia Elétrica"

Orientadora: Profa. Dra. Alaide Pellegrini Mammana

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia de Campinas
Departamento de Engenharia Elétrica
Centro de Componentes Semicondutores
Laboratório de Eletrônica e Dispositivos

Novembro 1983

Este trabalho foi realizado com o apoio financeiro das seguintes entidades:

- Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq.
- Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP.
- Telecomunicações Brasileiras S/A - TELEBRAS.
- Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

A

Ione ...

AGRADECIMENTOS

À Professora Alcide Pellegrini Mammara pelo carinho, dedicação e coragem de ter-me aceito como orientado ...

Ao Professor Carlos Ignacio Zamitti Mammara pela abnegada co-orientação através de idéias e sugestões imprescindíveis à realização deste trabalho e pela confiança manifestada quanto a continuação do mesmo. ...

Aos Professores Rogério C.C. Leite e José E. Ripper Filho por terem confiado e estendido a mão em momentos difíceis ...

Aos meus amigos Anísio V. Ferraz, pelas lições de vida e José A. Cáu, pela pureza de alma e abnegação desinteressada no difícil início da implantação dos processos.

Ao pessoal do LED, tanto da equipe técnica quanto de apoio, pela contribuição decisiva para a realização deste trabalho ...

Aos colegas dos Laboratórios de Cristalografia e de Física das Superfícies do Instituto de Física "Gleb Wataghin" pelas medidas efetuadas ...

Aos meus nenês Alexandre e Ricardo pela espera nem sempre paciente ...

A todos aqueles que um dia também foram crianças ...

RESUMO

Este trabalho define uma tecnologia para a fabricação de dispositivos de canal N e de porta de SnO_2 . Foi desenvolvido um conjunto de processos de processamento para as condições de nossa laboratório.

Preliminarmente os fenômenos de superfície da estrutura $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ e $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ foram estudados através das técnicas de medida e avaliação pelo método CxV. Os resultados obtidos para a densidade de cargas fixas menores do que $3 \times 10^{10}/\text{cm}^2$, para a densidade de cargas móveis $5 \times 10^{10}/\text{cm}^2$ e para a densidade de cargas capturadas na interface $1.3 \times 10^{10}/\text{cm}^2$, são bem inferiores aos valores para as estruturas de porta de Al fabricados neste processo e comparáveis aos valores existentes na literatura para silício polycristalino.

Foram analisados também os efeitos da cloagem resultante do processo de deposição de SnO_2 assim como a influência da radiação ionizante na densidade das cargas da estrutura de SiO_2/Si .

Foram estudados também transistores de efeito de campo de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$, com eletrodo de fonte e dreno de SnO_2 , transistores de efeito de campo com porta de SnO_2 e eletrodos de fonte e dreno de Al, transistores de efeito de campo com porta de SnO_2 , utilizando a propriedade do SnO_2 formar uma camada delgada de SiO_2 na interface SnO_2/Si , com eletrodos de fonte e dreno de Al e transistores de efeito de campo de $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ para fins de comparação.

As estruturas de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ demonstraram através dos resultados obtidos serem uma excelente alternativa para a fabricação de dispositivos e CMOS com as vantagens

ser um processo de baixo custo e principalmente por ser executado a baixas temperaturas.

LISTA DOS PRINCIPAIS SÍMBOLOS UTILIZADOS NESTE TRABALHO

E_F	- Nível de Fermi (eV)
ϕ_M	- Função trabalho do Alumínio (eV)
$E_{g_{ox}}$	- Banda proibida do dióxido de silício (8 eV)
χ_{ox}	- Afinidade eletrônica do dióxido de silício (0,9 eV)
$E_{g_{Si}}$	- Banda proibida do silício a 300°K (1,1 eV)
E_C	- Extremo da banda de condução do silício (eV)
E_V	- Extremo da banda de valência do silício (eV)
E_i	- Nível de energia intrínseco do silício (eV)
χ_{Si}	- Afinidade eletrônica do silício (4,05 eV)
k	- Constante de Boltzman ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$)
ϕ_F	- Diferença de potencial entre o nível de Fermi E_F e o nível de energia intrínseco do silício E_i (V)
q	- Carga do elétron ($1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$)
n_i	- Concentração intrínseca de portadores do silício ($1,149 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$)
ϕ_{Si}	- Função trabalho do semiconductor (eV)
T	- Temperatura em graus Kelvin (°K)
ϕ_S	- Potencial de superfície (V)
ϕ_{MS}	- Diferença de funções trabalho do metal e do semiconductor (eV)
Q_f	- Cargas fixas na interface (C/m^2)
Q_m	- Cargas móveis na interface (C/cm^2)
Q_{it}	- Cargas capturadas na interface (C/cm^2)
Q_R	- Cargas produzidas por radiação ionizante (C/cm^2)

N	- Densidade de cargas na interface ($\frac{Q}{q}$) (cargas/cm ⁻²)
N_A^*	- Concentração efetiva de majoritários (cm ⁻³)
C	- Capacitância do óxido de silício (F/cm)
ϵ_{ox}	- Permissividade dielétrica do óxido de silício
A	- Área do capacitor (cm ²)
t_{ox}	- Espessura do óxido de silício (cm)
C_d	- Capacitância da região de depleção = ($\frac{F}{cm}$)
ϵ_{Si}	- Constante dielétrica do silício
X_d	- Largura da região de depleção (cm)
Q_d	- Carga espacial na região de depleção (C)
Q_s	- Cargas presentes na interface SiO ₂ /Si (C/cm ²)
V_{FB}	- Tensão de banda plana (V)
V_P	- Tensão de porta (V)
V_D	- tensão de dreno (V)
V_T	- Tensão de limiar (V)
V_{ox}	- Queda de tensão no óxido isolante (V)
W	- Largura do canal de um transistor MOS (cm)
L	- Comprimento do canal de um transistor MOS (cm)
μ_n	- Mobilidade dos portadores minoritários no canal (cm ² /V.S)
β	- Fator de ganho de um transistor MOS (A/V ²)
R_{FD}	- Resistividade efetiva entre os eletrodos de dreno e fonte
g_m	- Transcondutância de um transistor MOS (Ω^{-1})
ϕ_{SS}	- Diferença de funções trabalho do SnO ₂ e do Si
q_{SnO_2}	- Função trabalho do SnO ₂ (eV)
N_D	- Concentração de doadores no semicondutor (cm ⁻³)

- X_{Si} - Distância da região de depleção do Si (cm)
- X_{SnO_2} - Distância da região de depleção do SnO_2 (cm)
- ϵ_{SnO_2} - Constante dielétrica do SnO_2
- Δ_E - Descontinuidade de energia na banda (eV)
- m^* - Massa efetiva do elétron ($m^* = 0,16 m_0$)
- h - Constante de Planck ($6,62 \times 10^{-34}$ J.S)
- m_0 - Massa de repouso do elétrons ($9,1 \times 10^{-31}$ Kg)
- E_r - Barreira tunelada (eV)
- S - Etapas de tunelamento

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Filmes Finos de SnO ₂	2
1.2. Objetivos deste Trabalho	4
2. A ESTRUTURA DE SnO ₂ /SiO ₂ /Si	6
2.1. A Estrutura MOS	6
2.2. Cargas Presentes no Óxido e Propriedades da Interface do SiO ₂ /Si	8
2.2.1. Cargas Fixas no Óxido (Q _f)	9
2.2.2. Cargas Móveis no Óxido (Q _m)	10
2.2.3. Cargas Capturadas na Interface (Q _{it}) ...	11
2.2.4. Cargas Produzidas por Radiação (Q _R)	12
2.3. A Capacitância de uma Estrutura MOS	15
2.3.1. Acumulação	15
2.3.2. Depleção	15
2.3.3. Inversão	17
2.3.4. Efeitos de Cargas do Isolante na Capaci- tância	18
2.4. Transistores de Efeito de Campo (MOS) de uma Estrutura MOS	20
2.4.1. Tensão de Limiar (V _T)	25
2.4.2. As características Terminais do Transis- tor MOS	31
2.4.3. Mobilidade e Transcondutância de um Transistor MOS	40
2.5. A Capacitância de uma Estrutura de SnO ₂ /SiO ₂ /Si	43
2.6. Heterojunções de SnO ₂ /Si	50
2.7. Transistores de SnO ₂ /SiO ₂ /Si	60

3. TÉCNICAS EXPERIMENTAIS	64
3.1. Construção dos Dispositivos	64
3.1.1. Máscaras	65
3.1.2. Processos de Fabricação	74
3.1.3. Deposição dos Filmes Finos de SnO ₂	77
3.1.4. Fotogração dos Filmes de SnO ₂	79
3.1.4.a. Ataque dos Filmes de SnO ₂ por Via Úmida	81
3.1.4.b. Ataque dos Filmes de SnO ₂ por Via Seca	82
3.2. Métodos de Medidas	83
3.2.1. Caracterização dos Filmes Finos	83
3.2.2. Cargas Presentes no Óxido na Interface SiO ₂ /Si	84
3.2.3. Determinação do Campo Elétrico de Ruptura do Óxido Isolante	90
3.2.4. Características Elétricas dos Transistores	91
4. RESULTADOS	93
4.1. Propriedades dos Filmes Finos de SnO ₂	93
4.2. Fotogração dos Filmes Finos de SnO ₂	95
4.3. Capacitores de SnO ₂ /SiO ₂ /Si	97
4.4. Campo Elétrico de Ruptura do Óxido Isolante	106
4.5. Características dos Transistores	106
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES	134
5.1. Filmes Finos de SnO ₂	135
5.2. Capacitores de SnO ₂ /SiO ₂ /Si	138
5.3. Campo Elétrico de Ruptura e do Óxido Isolante ..	158
5.4. Transistores	159
5.4.1. Transistores de Al/SnO ₂ /Si	159
5.4.2. Transistores de SnO ₂ /SiO ₂ /Si	162
5.4.3. Transistores de Al/SnO ₂ /Si	169

5.5. Conclusões	170
6. APÊNDICE	174
7. BIBLIOGRAFIA	184

1. INTRODUÇÃO

A idéia da fabricação de um dispositivo semicondutor utilizando o efeito da modulação da condutividade de uma camada delgada de semicondutor foi proposta por W.Shockley e G.L. Pearson [1] em 1948. Entretanto apesar da obtenção experimental da condutividade modulada ter sido reconhecida na época como conquista importante, de maneira nenhuma poder-se-iam prever suas implicações tecnológicas que desencadeariam a chamada Revolução Microeletrônica.

Um marco importante deste desenvolvimento tecnológico foi sem dúvida a descrição por D. Khang e M. M. Atalla [2], em 1960, do funcionamento do primeiro transistor de efeito de campo com isolação de porta, hoje conhecido como transistor MOS. Todavia foi o desenvolvimento da tecnologia planar ainda em 1960, que permitiu obter superfícies mais estáveis e um controle mais preciso da geometria dos dispositivos. Foi a partir daí que novos horizontes se abriram para as aplicações dos dispositivos MOS, com vantagens em relação às válvulas ou mesmo em relação aos transistores bipolares, principalmente pelo menor custo de sua fabricação. Ainda assim permaneciam para serem resolvidos diversos problemas em seu desempenho, entre eles a deterioração das características por migração de cargas. Assim mesmo, em 1964, foram produzidos os primeiros circuitos integrados confiáveis e reprodutíveis, após alguns refinamentos nos processos de fabricação.

Melhores dispositivos e rendimentos cada vez maiores na produção foram sendo alcançados, após 1967, com um controle mais exigente dos processos e das condições ambientais durante as etapas mais críticas de processamento. Esta melhoria, vale assinalar, foi consequência, também, de um melhor conhecimento dos fenômenos de superfície, extremamente importantes no desempenho dos dispositivos MOS. Desde então a obten-

ção de dispositivos cada vez melhores, em decorrência da melhoria na qualidade dos equipamentos de produção e dos materiais em si, encorajaram a busca desenfreada pela redução das dimensões dos dispositivos e circuitos. A drástica diminuição dos dispositivos MOS requer camadas cada vez mais finas, de espessuras não excedendo um milhar de angstroms. Para atender a essa exigência novas técnicas de processamento vêm sendo pesquisadas, em particular aquelas operadas a baixas temperaturas, de modo a permitir um melhor controle das pequenas espessuras das camadas.

Pesquisas anteriores em óxidos metálicos transparentes e semicondutores [3,4] fizeram-nos vislumbrar a possibilidade de emprego destes materiais na confecção de transistores de efeito de campo, em substituição ao alumínio ou mesmo ao polissilício, tendo em vista suas propriedades físicas, químicas e elétricas as quais descreveremos a seguir.

1.1. Filmes Finos de SnO₂

Dióxido de estanho (SnO₂) puro é um material semicondutor de larga banda proibida e condutividade tipo n. Cristaliza na forma da rutila tetragonal e sua célula unitária tem dois átomos de estanho e quatro de oxigênio, com parâmetros de rede $a = b = 4,757 \text{ \AA}$ e $c = 3,185 \text{ \AA}$ [5], sendo que os filmes finos podem ser obtidos tanto na forma policristalina como amorfa [6].

Várias técnicas têm sido empregadas na obtenção de filmes finos de SnO₂. Dentre as técnicas físicas citamos a evaporação térmica [7] e a pulverização catódica (sputtering) [8] enquanto que dentre as químicas se incluem as técnicas de deposição a partir de vapor [9], a vaporização ou atomização (spraying) [10] e a anodização [11].

Segundo Z.M. Leski [12] as propriedades elétricas desses óxidos dependem diretamente do desvio em sua composição estequiométrica, atribuindo-se sua condutividade tipo n à vacância de oxigênio ou a átomos de estanho, em excesso, os quais podem atuar como centro doadores. Também da natureza e da concentração de átomos estranhos incorporados à rede cristalina dependem as propriedades elétricas destes filmes. Não considerando-se as possíveis impurezas que podem ser incorporadas aos filmes durante seu crescimento foi difícil definir até hoje que defeitos predominam nos filmes de SnO_2 , bem como se processa efetivamente a dopagem pela introdução proposital dessas impurezas. C.A. Vincent [13] publicou um estudo sobre filmes de SnO_2 dopados com antimônio (Sb) onde concluiu que este elemento entra na estrutura na forma de óxido antimonioso (Sb_2O_3). O comportamento de outras impurezas na rede cristalina de SnO_2 é desconhecido, sendo que suas posições na tabela periódica é que parecem determinar sua atuação como doadoras ou aceitadoras [14].

Conforme se pode depreender do exposto, as propriedades elétricas dos filmes de SnO_2 ainda não foram totalmente entendidas. Os estudos dos mecanismos de condutividade, mobilidade e resistividade efetuados por vários autores [15, 16, 17] não levaram a resultados conclusivos, indicando que os comportamentos observados parecem depender do método e das condições de obtenção dos filmes. Um resultado que parece coincidir para os diversos autores é que a concentração de elétrons livres se situa na faixa de 10^{18} a 10^{20} portadores por cm^3 , para filmes de SnO_2 não dopados, e que esta concentração não depende da temperatura, o que indica que estes filmes são quasi-degenerados [18]. Quanto aos mecanismos de espalhamento, Arai [19] chegou à conclusão de que o espalhamento Coulombiano dos elétrons quase-livres pelos átomos ionizados é o predominante em filmes finos transparentes de SnO_2 .

As propriedades ópticas dos filmes de SnO_2 foram estudadas desde a região ultra-violeta (200 nm) até o infravermelho longínquo (2500 nm) através da medida da transmitância óptica [15,20]. Os vários autores concordam que a introdução do antimônio é responsável pelo aumento da condutividade elétrica e pela redução da absorção do filme comparativamente ao filme não dopado [15,16,17]. A transmitância óptica dos filmes de SnO_2 não dopados obtidos por diversas técnicas é sempre superior a 85%, na faixa de 350 nm a 1200 nm [15,19], caindo para comprimentos de onda acima destes. A largura da banda proibida foi determinada como sendo da ordem de 3.8 eV [9] enquanto que o índice de refração é citado como estando na faixa de 1.7 a 2.0 [19,21].

Várias são as aplicações dos filmes finos de SnO_2 tendo em vista suas propriedades ópticas, físicas e elétricas sendo quase que desnecessário enfatizar aqui a importância tecnológica desse material, hoje, na fabricação de contatos transparentes, em películas anti-refletoras ou mesmo em dispositivos fotovoltaicos e em conversores de imagem.

1.2. Objetivos deste Trabalho:

Muito esforço vem sendo despendido tanto em novas técnicas de obtenção de filmes finos de SnO_2 como em suas novas aplicações em dispositivos. Neste caso se insere o estudo aqui proposto do emprego desse material na fabricação de circuitos integrados em substituição ao alumínio e ao polissilício em dispositivos MOS, o qual pode ser resumido em dois objetivos fundamentais:

1. O desenvolvimento de um processo para a fabricação de dispositivos MOS, com canal N, utilizando filmes de SnO_2 como porta em substituição ao alumínio e ao polissilício.

2. O estudo das vantagens e desvantagens dessa utilização as sim como o estudo dos fenômenos da interface, quando dessa substituição.

Quatro tipos de dispositivos foram construídos e estudados: transistores com eletrodos de porta, fonte e dreno de SnO_2 ; transistores com porta de SnO_2 , e eletrodos de fonte e dreno de alumínio; transistores com porta de SnO_2 sem oxidação de porta (com eletrodos de fonte e dreno de alu mínio); e transistores MOS convencionais com os três eletro-dos de alumínio para comparação.

2. A ESTRUTURA DE $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$

Neste capítulo descrevemos a estrutura de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$, objeto de estudo deste trabalho, procurando estabelecer um modelo que permita prever seu comportamento elétrico, o qual será posteriormente estudado do ponto de vista experimental. Todavia como os elementos básicos da estrutura são semelhantes aos de uma estrutura MOS convencional de alumínio, dióxido de silício e silício, iniciaremos nossa discussão por estas estruturas de modo a podermos introduzir os conceitos fundamentais e definir a terminologia. Discutiremos a seguir a estrutura de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ preparando-nos para a posterior discussão comparativa dos resultados experimentais, para ambas as estruturas, conforme objeto deste trabalho.

2.1. A Estrutura Metal Óxido-Semicondutor (MOS)

A estrutura MOS é constituída por uma camada metálica, em geral de alumínio, sobre um isolante, em geral óxido de silício, que a separa de um substrato semicondutor de silício. Na figura 2.1 mostramos esquematicamente esta estrutura para o caso de substrato de silício tipo p. Na figura 2.2 está representado seu diagrama de bandas de energia correspondente à situação de equilíbrio, onde a linha denotada por $E = 0$ corresponde à referência da energia potencial, no vácuo; E_F é o nível de Fermi; ϕ_M é a função de trabalho do alumínio; $E_{g_{\text{ox}}}$ é a banda proibida do dióxido de silício, tomada como da ordem de 8 eV [22]; χ_{ox} é a afinidade eletrônica do óxido, da ordem de 0.9 eV [22]; $E_{g_{\text{si}}}$ é a banda proibida do silício à 300°K, da ordem de 1.1 eV [22]; E_V e E_C são respectivamente os extremos da banda de valência e de condução do silício; E_i corresponde ao nível de energia intrínseco do silício; χ_{si} é a afinidade eletrônica do silício,

tomada como da ordem de 4.05 eV [22]; ϕ_F é a diferença de potencial entre o nível de Fermi E_F e o nível intrínseco de Fermi E_i , determinada pela dopagem do silício, e $q\phi_{Si}$ é a função de trabalho do semiconductor que é igual a [22]. Pelo exame da figura 2.2 pode-se facilmente estabelecer a relação:

$$q\phi_{Si} = q\chi_i + E_{g_{Si}}/2 + q\phi_F \quad (2.1)$$

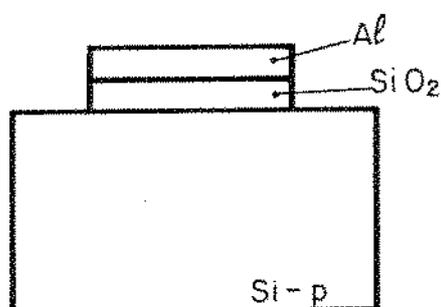


Figura 2.1 - Representação esquemática de uma estrutura MOS convencional onde está representada a camada i solante de SiO_2 , separando as camadas de alumí nio e de silício p.

O potencial ϕ é definido como zero no interior do semiconductor e é medido em relação ao nível intrínseco de Fermi E_i . Na superfície do semiconductor $\phi = \phi_s$, onde ϕ_s é chamado de potencial de superfície. O potencial de superfície é uma medida do encurvamento das bandas na superfície do semiconductor uma vez que depende da diferença de funções de trabalho do metal e do semiconductor $\phi_{MS} = \phi_M - \phi_{Si}$, para tensão nula aplicada entre o metal e o semiconductor.

A presença de cargas no interior do óxido isolante também afeta, por sua vez, a distribuição de potencial

na superfície do semiconductor, conforme discutiremos a seguir.

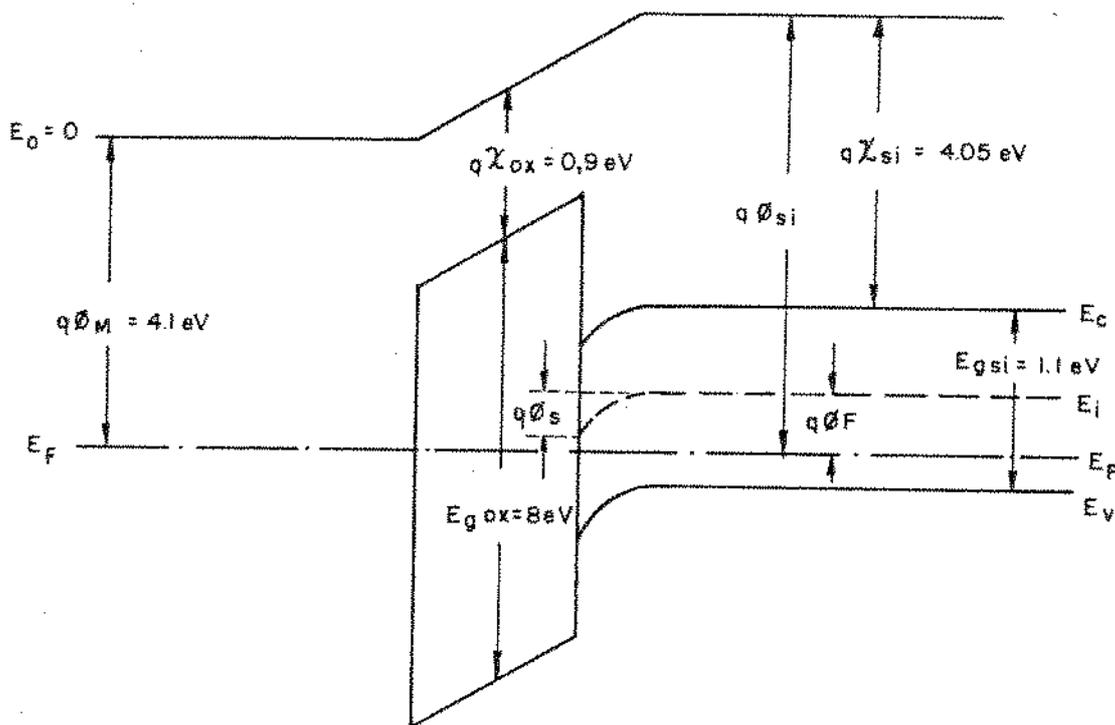


Figura 2.2 - Diagrama de bandas de energia para uma estrutura MOS, no equilíbrio, sem cargas presentes no óxido.

2.2. Cargas Presentes no Óxido e Propriedades na Interface do SiO₂/Si

Geralmente quatro tipos de cargas estão associadas às estruturas de silício oxidadas termicamente. São elas as cargas fixas no óxido, identificadas por Q_F ; as cargas móveis no óxido, identificadas por Q_m ; as cargas capturadas na interface, identificadas por Q_i ; e as cargas produzidas por radiação ionizante Q_R . Na figura 2.3 é mostrada uma representação esquemática da distribuição destas cargas ao longo da

camada de óxido. Para todas estas cargas vale a relação $Q = qN$ onde q é a carga do elétron e N é o número de cargas por unidade de área.

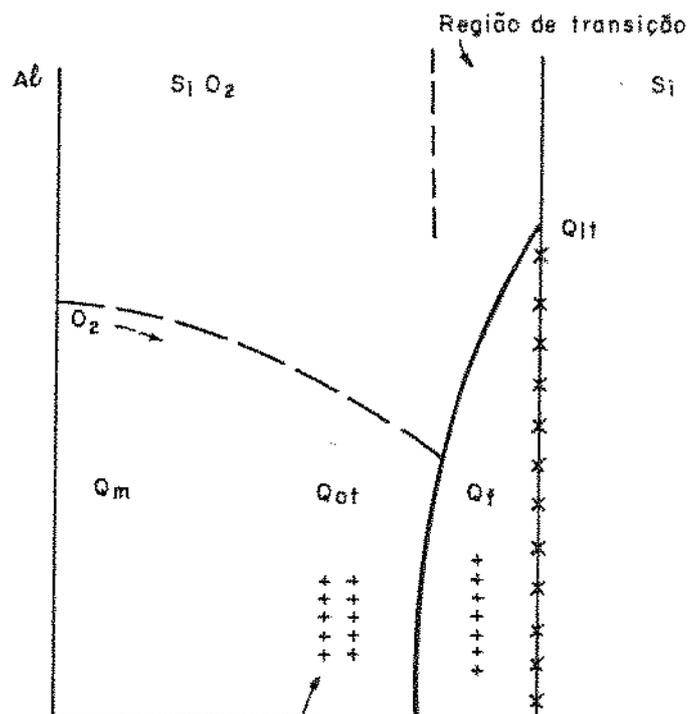


Figura 2.3 - Cargas presentes na camada isolante de SiO_2 de uma estrutura MOS [29].

2.2.1. Cargas Fixas no Óxido (Q_f)

São cargas positivas que se distribuem na região do dióxido de silício próxima a interface com o silício, nos primeiros 20 a 100 Å, conforme Powel [23] e Powel e Berglund [24]. Esta carga é em geral atribuída a defeitos na estrutura do óxido de silício na região da interface com o silício, não se tendo chegado ainda a um resultado conclusivo sobre sua origem apesar do grande número de trabalhos publicados até agora. Muitos autores convergem ao atribuírem a origem destas cargas à oxidação incompleta do silício [25]

enquanto outros a atribuem à presença de vacâncias de oxigênio ou de silício ou ainda a presença de impurezas metálicas ou não metálicas incorporadas involuntariamente durante o processo de oxidação [26].

As principais características das cargas Q_f são [27]:

- a) são estáveis quando se submete o óxido a tensões elevadas em temperaturas elevadas (ensaio de tensão e temperatura);
- b) não são afetadas pelo potencial de superfície por aplicação de tensão externamente;
- c) sua densidade depende da orientação do substrato, sendo maior no caso de substratos de orientação (111) do que no de substratos (100), isto é, $Q_F(111) > Q_F(100)$;
- d) sua densidade depende das condições de oxidação e de recozimento.

As cargas fixas Q_F exercem importante influência nos parâmetros de um dispositivo MOS [28], uma vez que por sua proximidade da interface, afetam a distribuição de potencial na superfície do semicondutor.

A densidade de cargas fixas, Q_f , pode ser reduzida pelo tratamento em temperaturas na faixa de 600 a 1000° C, em atmosfera de oxigênio, nitrogênio e hélio [25].

2.2.2. Cargas Móveis no Óxido (Q_m)

São cargas positivas presentes no óxido devido, principalmente, a íons de metais alcalinos, Na^+ , K^+ , Li^+ e C_s^+ , ou a prótons móveis (H^+) [30,31,32]. Admite-se que estas cargas:

- a) podem estar presentes nas lâminas de silício antes do processamento;
- b) podem ser introduzidas durante o processo de oxidação;
- c) podem resultar da contaminação da superfície antes ou durante o processo de metalização;
- d) podem estar presentes em resíduos deixados durante o processo de limpeza.

A principal característica das cargas móveis é que, sob a ação de campos elétricos a temperaturas acima da ambiente, elas se deslocam em direção a uma ou a outra interface da camada isolante, dependendo da polaridade da tensão aplicada, ocasionando desta forma a instabilidade dos dispositivos MOS.

Uma outra característica dessa carga é poder ser neutralizada pela ação da clorina (Cl^{-1}) adicionada durante o processo de oxidação do silício. Normalmente a presença de Cl^{-1} é garantida pela adição de vapor de ácido clo rídrico (HCl), de cloro gasoso (Cl_2) ou de tricloroetileno (TCE) durante o processo de oxidação.

2.2.3. Cargas Capturadas na Interface (Q_i)

A rede cristalina do silício sofre interrupção na interface com o dióxido de silício e, em consequência, o potencial periódico sofre uma descontinuidade abrupta neste ponto. Esta descontinuidade é responsável pelo aparecimento de estados eletrônicos permitidos na banda proibida de energia, aos quais denominamos estados de interface, N_i . Também o rearranjo dos átomos na superfície do silício, com modificações nas distâncias interatômicas, é responsável por esta dos de interface adicionais localizados na banda proibida. Estes estados eletrônicos são em geral classificados como rá

pidos tendo em vista a rapidez com que eles interagem com a região de carga espacial no silício. Estes estados de interface tanto podem ser doadores como aceitadores, dependendo de sua posição na banda em relação ao nível de Fermi [23].

Os mesmos fatores que influenciam a densidade de cargas fixas, Q_f , afetam a densidade de estados na interface, quais sejam, a orientação do substrato de silício e as condições de oxidação e de recozimento, tendo sido determinada experimentalmente uma correlação entre Q_f e N_i [34]. Apesar dos resultados experimentais indicarem esta correlação entre N_i e Q_f , a natureza física destes estados N_i não é ainda completamente entendida [29]. De um modo geral procura-se associar estes estados às ligações incompletas ou não saturadas do silício. A densidade de estados de interface influe no comportamento elétrico da estrutura MOS, uma vez que estes estados capturam cargas ao cruzarem o nível de Fermi, conforme varia a tensão aplicada externamente à estrutura. A densidade de cargas capturadas nestes estados é expressa por $Q_i = q N_i$ e sua variação contribue diretamente para a capacitância da estrutura.

Apesar da presença de estados rápidos de superfície causar efeitos pronunciados nas características elétricas de dispositivos MOS, é importante observar que avanços na tecnologia do silício têm permitido reduzir a densidade destes estados a níveis tais que seus efeitos fiquem desprezíveis.

2.2.4. Cargas Produzidas por Radiação (Q_R)

Quando radiação ionizante atravessa o óxido isolante de uma estrutura MOS, pares de elétrons e lacunas são gerados, conforme mostrado na figura 2.4. As lacunas são relativamente imóveis e, ou ficam presas em armadilhas presen-

tes no óxido, ou se recombina^m com elétrons antes que estes deixem o isolante [35]. Estas armadilhas são, em geral, atribuídas a ligações incompletas no SiO_2 ou a impurezas incorporadas no óxido durante o processo de crescimento [36]. Os elétrons, por sua vez, são móveis e se dirigem para o eletrodo positivo, que no caso da figura 2.4 é o metal. Como não há condições do silício suprir elétrons para compensar este deslocamento, dada a barreira de potencial presente na interface Si/SiO_2 , acumula-se uma carga positiva Q_R , distribuída espacialmente na região próxima a interface.

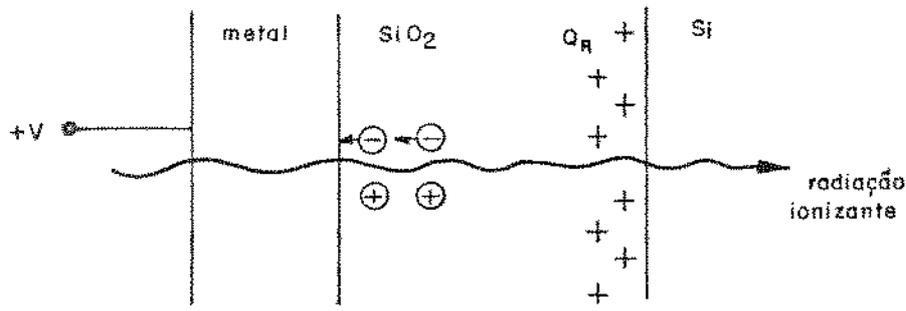
À medida em que esta carga positiva aumenta, diminui, no óxido, o campo elétrico criado pela tensão aplicada externamente até que, ao atingir o valor nulo, não ocorrerá mais acumulação de carga, a menos que se aumente a tensão aplicada.

Baseando-se neste modelo pode-se prever que:

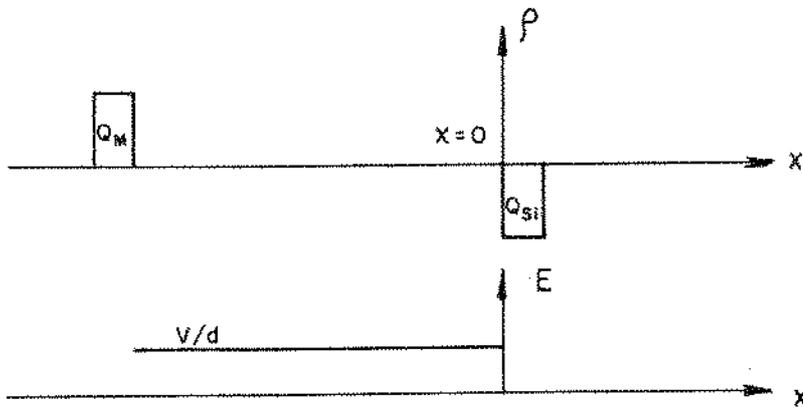
- a) a carga Q_R depende da dose total de radiação, ou seja, depende do número de pares elétrons - lacunas criados; não depende da taxa em que a dose é recebida.
- b) a carga Q_R aumenta linearmente com a tensão aplicada, para ambas as polaridades.
- c) para uma dada tensão aplicada a carga Q_R satura, ainda que se aumente a dose de irradiação, uma vez que se anula o campo elétrico no interior do óxido.

A carga Q_R altera a distribuição de potencial na superfície do semicondutor, sendo seu efeito muito mais importante quando ela está próxima da interface SiO_2/Si (para tensão positiva no metal).

Além dos efeitos apontados a radiação ionizante provoca também o aumento da densidade de estados rápidos na



a)



b)

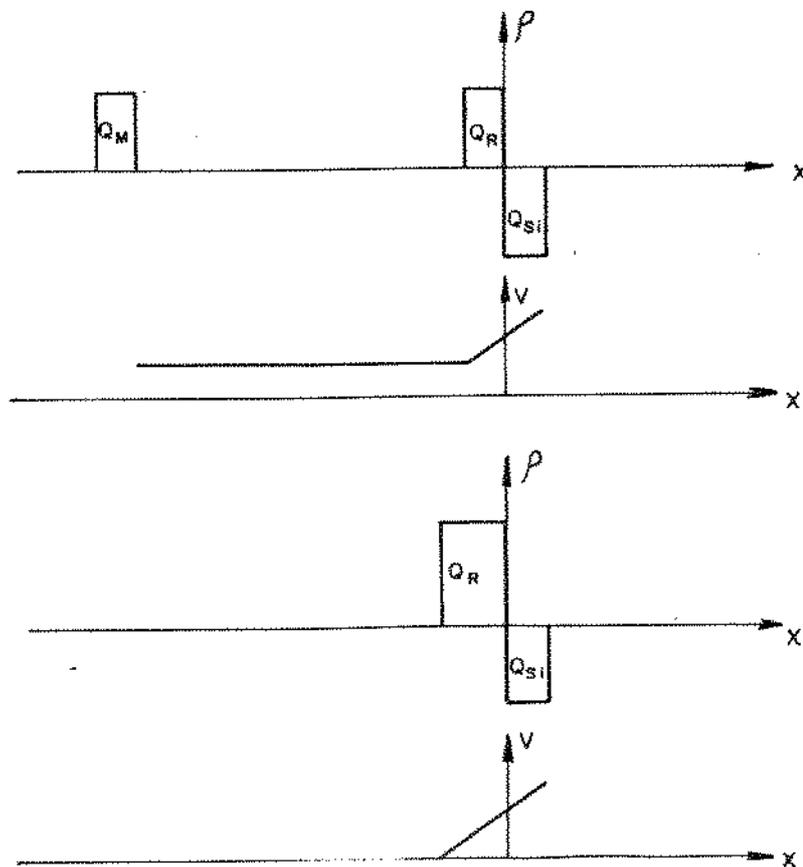


Figura 2.4.a) - Efeito da radiação ionizante numa estrutura MOS [35].

2.4.b) - Distribuição de cargas em função do tempo, podendo-se observar a formação de carga Q_R próxima à interface SiO_2/Si . É mostrada também a distribuição do campo elétrico no óxido.

interface do SiO_2/Si |37|.

Do mesmo modo como para as cargas fixas, as cargas por radiação podem ser neutralizadas por tratamento térmico, neste caso a temperaturas inferiores a 500°C |38|.

2.3. A Capacitância de uma Estrutura MOS

A capacitância de uma estrutura MOS de substrato tipo p, apresenta três regiões de interesse, quando estudada em função da tensão aplicada. São elas a região de acumulação, de depleção e de inversão.

2.3.1. Acumulação

Para tensões suficientemente negativas no metal, os portadores majoritários positivos (lacunas) são atraídos à superfície do silício onde terminam o campo elétrico que desta forma fica confinado ao óxido isolante. A alta concentração de cargas acumuladas na superfície do silício faz o papel de um segundo eletrodo do capacitor de placas paralelas cuja capacitância é expressa por |39|.

$$C = \frac{\epsilon_{\text{ox}} \cdot A}{t_{\text{ox}}} \quad (2.2)$$

onde A é a área do eletrodo metálico.

2.3.2. Depleção

A medida que a tensão no metal diminui, a concentração de lacunas na superfície do silício também diminui

até que se forma uma região de depleção no semiconductor, com aceitadores ionizados distribuídos espacialmente, nos quais termina o campo elétrico criado pelo metal. A região de depleção atua como um dielétrico em série com o óxido isolante, contribuindo para a capacitância da estrutura com o termo:

$$C_d = \frac{\epsilon_{Si} \cdot A}{x_d} \tag{2.3}$$

onde ϵ_{Si} é a constante dielétrica do silício e x_d é a largura da região de depleção, expressa por:

$$x_d = \left[\frac{2\epsilon_{Si}(\phi_s - \phi_{Fi})}{q \cdot N_A} \right]^{1/2} \tag{2.4}$$

Nela se armazena uma densidade de carga espacial Q_d igual a $qN_A x_d$ ou:

$$Q_d = - \left[2\epsilon_{Si} N_A (\phi_s - \phi_{Fi}) \right]^{1/2} \tag{2.5}$$

com N_A igual à concentração de aceitadores no substrato de silício.

A capacitância da estrutura MOS pode então ser atribuída a uma associação série da capacitância do óxido C_{ox} e da capacitância da região de depleção no semiconductor C_d , sendo expressa por (figura 2.5):

$$C(V) = \left[\frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_d} \right]^{-1} \tag{2.6}$$

2.3.3. Inversão

Com o aumento da tensão positiva aplicada ao metal ocorre o alargamento da região de depleção até um valor máximo $x_{dm\grave{a}x}$, quando os portadores minoritários (elétrons) começam a se deslocar para a superfície do silício, formando uma camada de inversão tipo n. No diagrama de bandas de energia este efeito corresponde a uma aproximação da banda de condução em relação ao nível de Fermi na região da superfície. Quando o potencial de superfície ϕ_S for igual a $2\phi_F$ de fine-se a condição de inversão forte em que o nível de Fermi estará bem próximo ao fundo da banda de condução, na região da superfície (figura 2.5).

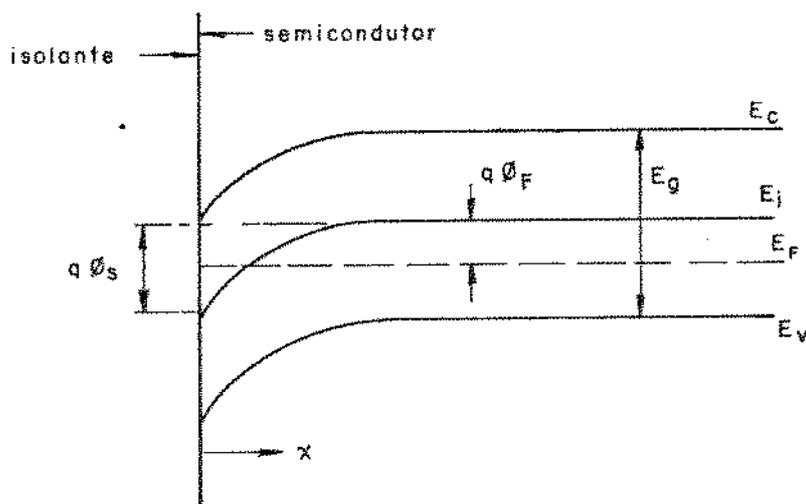


Figura 2.5. Diagrama de bandas de energia na superfície do semicondutor tipo p; ϕ_S é o potencial de superfície. Para $\phi_S < 0$ temos a condição de acumulação, para $\phi_F > \phi_S > 0$ temos a condição de depleção; para $\phi_S > \phi_F$ temos a condição de inversão; para $\phi_S = 2\phi_F$ temos a condição de inversão forte.

Formada a camada de inversão, a largura de região de depleção permanece praticamente constante, mesmo que se aumente a tensão aplicada ao metal, em condições de equilíbrio. Todavia, pequenas variações na largura da camada de depleção ocorrem em condições de não equilíbrio uma vez que a densidade da carga na camada de inversão é incapaz de acompanhar um pequeno sinal de alta frequência aplicado ao metal. Isto porque a carga de inversão se constitui de portadores minoritários que, segundo Hofstein e Warfield [40] podem ser obtidos por um ou mais dos mecanismos abaixo:

1. geração e recombinação na região de depleção imediatamente próxima à camada de inversão;
2. geração e recombinação através de estados de interface localizados entre o isolante e o semicondutor;
3. difusão de portadores através da camada de depleção.

Por esta razão a capacitância MOS, quando está presente a camada de inversão, é função da frequência do sinal aplicado entre o metal e o substrato. Em frequências baixas a capacitância da estrutura se reduz à capacitância do óxido C_{ox} , enquanto que em frequências altas será igual a associação série da capacitância do óxido e da camada de depleção em sua largura máxima.

A figura 2.6 mostra o comportamento da capacitância da estrutura MOS em função da tensão aplicada V com, respectivamente, sinais de baixa e alta frequência superpostos a V .

2.3.4. Efeitos de Cargas no Isolante na Capacitância de uma Estrutura MOS

A presença de cargas localizadas na região pró

xima a interface entre o isolante e o semiconductor tem um efeito sensível na superfície da região de carga espacial do semiconductor em virtude de provocar a indução, nesta região, de cargas de sinal oposto. Resumindo o que foi dito anteriormente, nesta região próxima a interface podem ser encontradas as cargas Q_f , positivas e fixas, as cargas iônicas Q_m , positivas e móveis, e as cargas Q_R , positivas e imóveis, que porventura possam ter sido criadas por efeitos de radiação, a soma das quais passaremos a denominar de cargas de superfície, Q_s . A presença destas cargas positivas é responsável pelo estabelecimento da condição de inversão para menores valores da tensão aplicada externamente entre o metal e o substrato. Isto porque, pela presença destas cargas, acentua-se o encurvamento das bandas mostradas na figura 2.2, onde havíamos considerado apenas a diferença de funções de trabalho entre o metal e o semiconductor, ϕ_{MS} . Naquela figura este encurvamento maior é representado pelas linhas tracejadas.

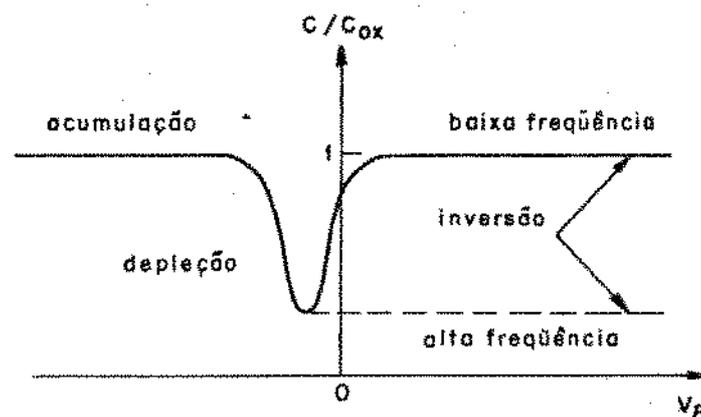


Figura 2.6 - Comportamento da capacitância em função da tensão de uma estrutura MOS sobre substrato P.

A tensão que se deve aplicar ao metal para compensar o encurvamento das bandas, trazendo o semicondutor à chamada condição de banda plana é definida como a tensão de banda plana, dada por:

$$V_{FB} = \phi_{MS} - \frac{Q_S}{C_{ox}} \quad (2.7)$$

É importante ressaltar que nas considerações acima não se levou em conta o movimento das cargas iônicas móveis dentro do óxido isolante. Este movimento de cargas, que pode ser provocado aplicando-se tensões em altas temperaturas na estrutura, é responsável pelo deslocamento da curva de capacitância em função da tensão uma vez que conforme os íons estejam mais ou menos próximos da interface de SiO_2/Si , será diferente o potencial de superfície ϕ_s . Em decorrência muda também o valor da tensão de banda plana expressa na equação 2.7.

2.4. Transistores de Efeito de Campo MOS

Na figura 2.7.a é mostrada esquematicamente a estrutura básica de um transistor MOS canal n, bem como sua representação elétrica 2.7.b. Ela consiste de um substrato de silício tipo p onde foram difundidas duas regiões n^+ , a fonte (F) e o dreno (D), fisicamente idênticas, às quais se aplicam contatos metálicos. O eletrodo metálico denominado porta (P) é posicionado exatamente acima e cobre completamente a região do semicondutor situada entre a fonte e o dreno, da qual está isolado por uma fina camada de dióxido de silício, do mesmo modo como foi descrito na seção 2.1.

Pela sua grande proximidade do semicondutor o eletrodo de porta pode modular, por efeito de campo elétrico

a condutividade da região do semiconductor situada entre as duas regiões de fonte e dreno, que assim são denominadas em função das condições de polarização a que são submetidas. Assim o transistor MOS opera como um dispositivo controlado a tensão justamente porque o controle do fluxo de corrente entre fonte e dreno é exercido pelo eletrodo de porta, eletricamente isolado do substrato semiconductor.

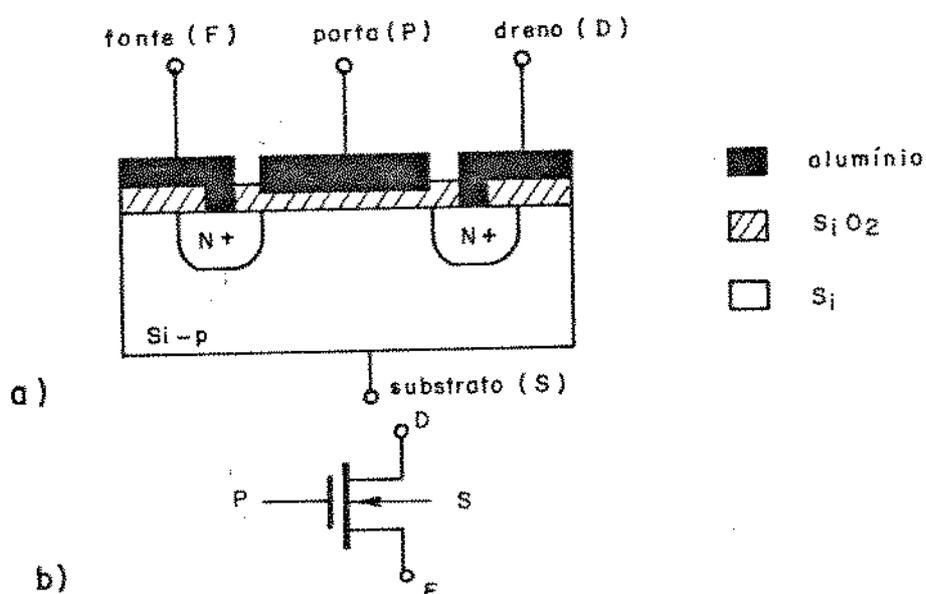


Figura 2.7 - Transistor de efeito de campo MOS

a) diagrama esquemático.

b) símbolo elétrico.

Como se pode facilmente depreender, o eletrodo de porta deve ser confeccionado com um material de alta condutividade. Apesar de usualmente se confeccionar este eletrodo com alumínio, há um grande volume de trabalho efetuado empregando o silício policristalino fortemente dopado, bem como outros metais como o ouro, o titânio, a platina, o níquel e o cromo. Apesar do eletrodo de porta não precisar ser necessariamente de metal e o isolante não precisar ser necessariamente de óxido, o termo metal-óxido-semiconductor (MOS) geralmente está relacionado com a estrutura convencional

constituída do eletrodo metálico separado por uma fina camada de óxido do substrato semiconductor.

Conforme já foi descrito na seção 2.3, se não considerarmos a presença de cargas no óxido isolante, dependendo do valor e da polaridade da tensão aplicada ao eletrodo de porta, pode-se formar na superfície do semiconductor uma camada de depleção (quando V_p é positiva e pequena), uma camada de acumulação (V_p negativa) e de inversão (V_p positiva e grande). Esta última condição é obtida quando a camada de depleção atinge uma largura suficientemente grande ($x_{dm\grave{a}x}$) e os portadores minoritários começam a se deslocar para a superfície do silício. Forma-se assim um canal ligando eletricamente o dreno e a fonte, conforme mostrado na figura 2.8, cuja espessura não ultrapassa 100 \AA [41]. Aplicando-se ao dreno uma pequena tensão positiva em relação à fonte estabelece-se um fluxo de corrente entre estas duas regiões, através do canal de condução, o qual atua como uma simples resistência. A corrente de dreno I_D é proporcional à tensão de dreno e o transistor é dito operando na região linear. Na figura 2.9 é representado o canal de um transistor operando na região linear, representando-se também a região de depleção próxima ao canal bem como as regiões de depleção das junções de fonte-substrato e de dreno-substrato.

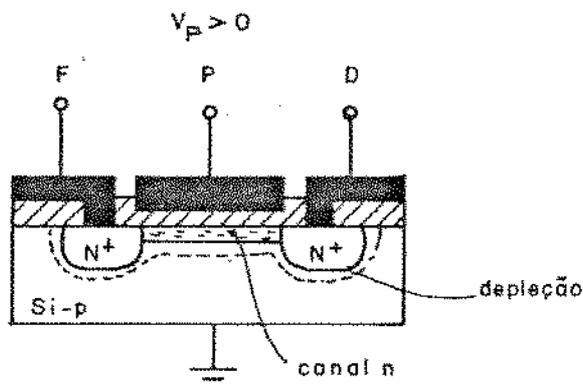


Figura 2.8 - Formação do canal de inversão num transistor MOS.

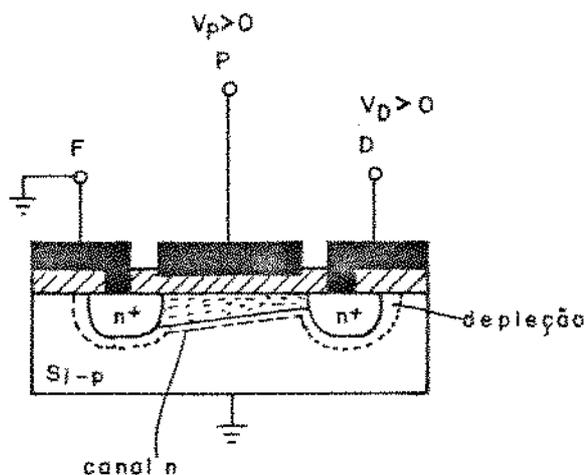


Figura 2.9 - Transistor de efeito de campo operando na região linear (V_D pequena).

Aumentando-se a tensão aplicada ao dreno, atinge-se um ponto em que a densidade de portadores minoritários junto ao mesmo é aproximadamente igual a zero, desaparecendo o canal. Temos então a chamada constrição do canal, conforme ilustrado na figura 2.10, onde C indica o ponto em que sua largura é nula. Para valores de tensão de dreno acima deste valor (V_{Dsat}) a corrente de dreno permanece essencialmente constante à medida em que aumenta a constrição do canal ou, em outras palavras, que o ponto C se desloca em direção à fonte. A este deslocamento corresponde também o avanço da região de depleção de dreno conforme mostrada na figura 2.11. Como a tensão no ponto C permanece igual a V_{Dsat} , o número de portadores, provenientes da fonte, que atingem este ponto, é sempre o mesmo. Assim a corrente que flui da fonte para o dreno permanece a mesma. Os portadores que atingem o ponto C são injetados na região de depleção do dreno do mesmo modo que na região de depleção da junção base-coletor de um transistor bipolar.

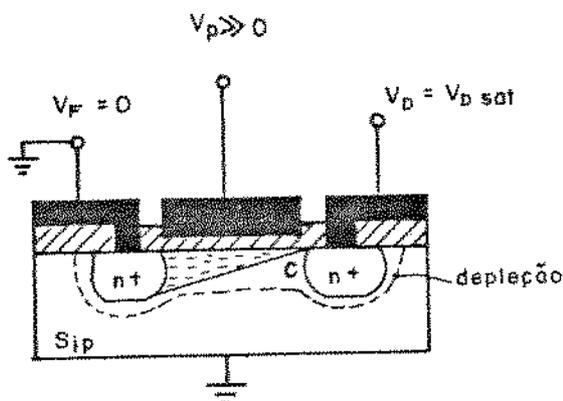


Figura 2.10 - Construção do canal de condução num transistor MOS de canal n.

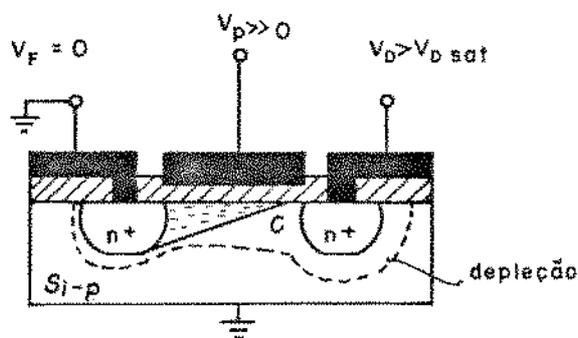


Figura 2.11 - Aumento da constricção do canal e avanço da região de depleção de dreno.

Aumentando-se ainda mais a tensão de dreno ocorre avalanche na junção de dreno substrato e conseqüentemente a corrente de dreno aumenta rapidamente com o aumento da voltagem de dreno [42].

O comportamento de um transistor MOS canal n

nas três regiões, linear, de saturação e de avalanche, foi descrito para um valor de tensão positiva aplicada à porta. Na figura 2.12 são mostradas as características típicas de corrente de dreno em função da tensão entre dreno e fonte para diferentes valores de tensão de porta, onde estão evidentes as três regiões de operação descritas.

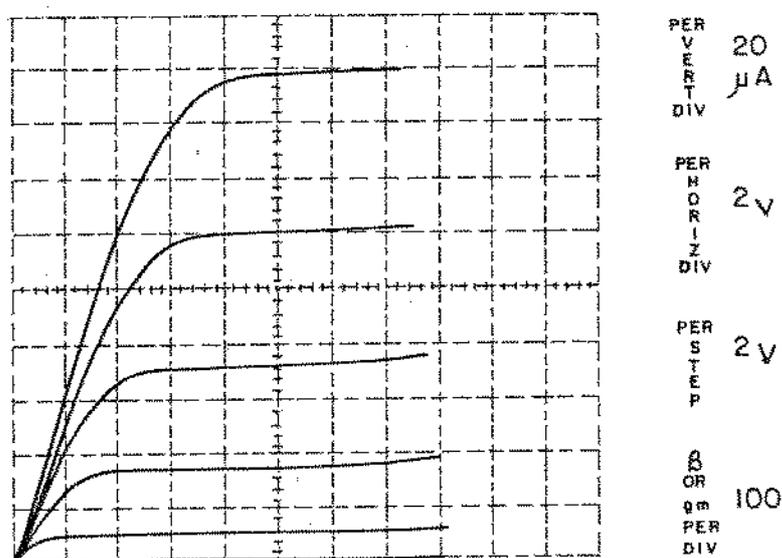


Figura 2.12 - Características de corrente de dreno I_D versus tensão de dreno V_D com tensão de porta V_P como parâmetro para um transistor MOS de canal n.

2.4.1. Tensão de Limiar (V_T)

Quando se aplica uma tensão de porta a um transistor MOS cujos eletrodos de fonte e de substrato estão conectados a um potencial comum, cria-se uma condição de neutralidade de carga, no equilíbrio, no volume compreendido pelo eletrodo de porta, pelo isolante de porta e pela região de carga espacial da superfície do silício. A figura 2.13 ilustra a distribuição de cargas, responsável por esta neutra

lidade, num transistor MOS de canal n cujo substrato de silício tipo p é uniformemente dopado. Na figura 2.13.a) esta distribuição é mostrada para pequenas tensões de porta, em que apenas a região de depleção está presente na superfície do silício. Nela se distribuem espacialmente entre $x = 0$ e $x = x_d$ os aceitadores ionizados indicados por Q_d (onde o índice d se refere a depleção). No óxido de silício está representada a densidade de cargas positivas Q_s , localizadas próximas à interface com o silício, já discutidas no item 2.3.4. Por sua vez Q_p é a densidade de cargas presentes no eletrodo de porta, que depende da tensão aplicada.

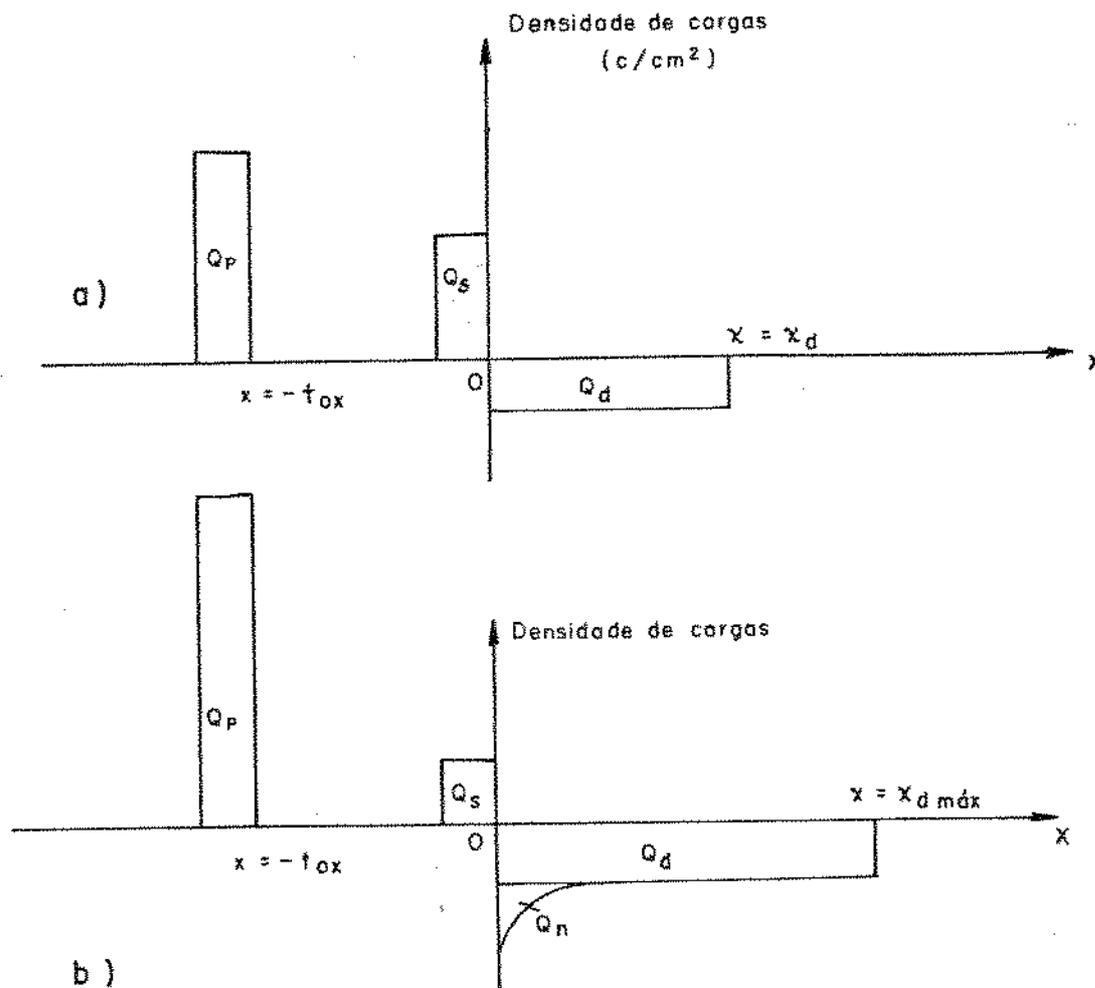


Figura 2.13 - Distribuição de cargas num transistor MOS de canal n.

a) antes da inversão.

b) depois da inversão.

A figura 2.13.b ilustra a situação em que a tensão de porta é suficientemente alta para inverter a distribuição de cargas na superfície do substrato de silício p de modo a criar a camada de inversão tipo n. Quando isto ocorre a camada de depleção atinge sua largura máxima $x = x_{dm\grave{a}x}$. Aparecem então na superfície do silício as densidades de carga Q_n e $Q_{dm\grave{a}x}$, respectivamente a densidade de carga contida na camada de inversão e a máxima densidade de carga contida na camada de depleção.

Ao se aplicar uma tensão V_p entre a porta e o substrato de um transistor MOS, ocorre queda de tensão no óxido isolante (V_{ox}) e na superfície do semiconductor (expressa pela potencial de superfície ϕ_s), além de ocorrer a compensação da diferença de funções de trabalho entre o metal e o semiconductor. Deste modo V_p pode ser expresso por:

$$V_p = V_{ox} + \phi_{MS} + \phi_s \quad (2.8)$$

Definimos tensão de limiar V_T de um transistor MOS a tensão mínima que se deve aplicar à porta para se atingir a condição de inversão forte para a qual a concentração de portadores minoritários na superfície se iguala a concentração de majoritários no semiconductor; isto é, quando o potencial de superfície ϕ_s é igual a $2\phi_F$. Neste caso:

$$V_T = V_{ox} + \phi_{MS} + 2\phi_F \quad (2.9)$$

Admitindo-se que a carga na camada de inversão Q_n seja nula quando $\phi_s = 2\phi_F$, a queda de tensão no óxido pode ser calculada como:

$$V_{ox} = \frac{Q_P}{C_{ox}} = \left(\frac{-Q_S - Q_{dm\acute{a}x}}{C_{ox}} \right) \quad (2.10)$$

Obtem-se finalmente para a tensão de limiar:

$$V_T = \left(\frac{-Q_S - Q_{dm\acute{a}x}}{C_{ox}} \right) + \phi_{MS} + 2\phi_F \quad (2.11)$$

Conhecendo-se o valor de ϕ_{MS} pode-se determinar a tensão de limiar em função da concentração de aceitadores N_A no substrato de silício uniformemente dopado, da qual depende ϕ_F . A tensão V_T é função ainda da densidade de cargas positivas Q_S no óxido, da densidade máxima de cargas $Q_{dm\acute{a}x}$ na camada de depleção e finalmente da espessura do óxido, t_{ox} . Devemos nos lembrar que no cômputo da carga Q_S está considerada a contribuição das cargas iônicas móveis Q_m , presente no óxido na região próxima à interface com o silício. Por sua própria natureza móvel estas cargas podem ser responsáveis por deslocamentos da tensão de limiar, conforme se movimentam ao longo da camada de óxido sob a ação de tensões de ambas as polaridades aplicadas à porta. Por exemplo, se a camada de óxido, contaminada com íons positivos de sódio, é submetida a uma tensão positiva aplicada à porta, os íons se deslocarão em direção à interface com o silício, onde terão o máximo efeito na tensão de limiar, que se tornará menos positiva. Por outro lado, quando uma grande tensão negativa é aplicada à porta, os íons de sódio serão atraídos para o eletrodo de porta onde não exercerão praticamente nenhum efeito nas características da distribuição de carga na superfície do silício, e neste caso a tensão de limiar se desloca para valores positivos.

Ao se obter a expressão da tensão limiar (equação 2.8) supôs-se que a fonte e o substrato se encontravam

conectados ao potencial comum de terra. No entanto a presença de uma diferença de potencial entre substrato e fonte, se bem que pouca influência tenha no ganho do dispositivo, influencia fortemente as características da camada de carga espacial e, em especial, a tensão de limiar. No caso do transistor MOS de canal n, a voltagem aplicada ao substrato deve ser negativa em relação à fonte, de modo que a junção entre fonte e substrato seja polarizada reversamente, conforme mostrado na figura 2.14

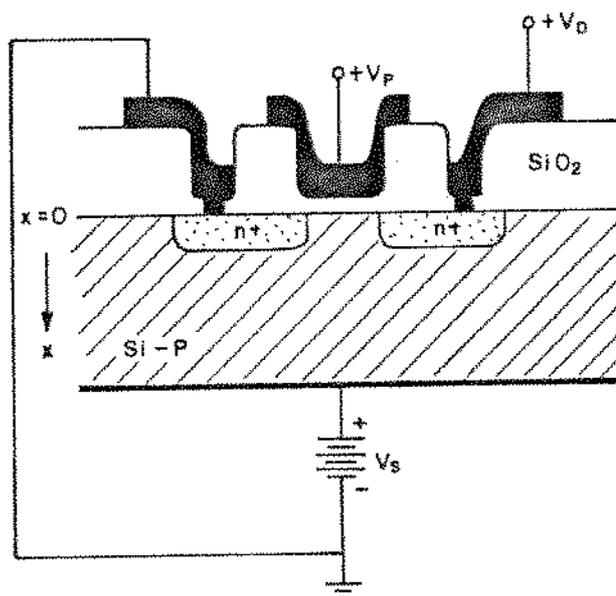


Figura 2.14 - Transistor MOS de canal n operando com polarização no substrato.

Se a tensão entre porta e fonte é suficientemente alta para garantir a formação de uma camada de inversão na superfície do silício, a aplicação de uma tensão negativa ao substrato p causará a polarização reversa da junção formada entre a camada de inversão e o substrato. Em consequência alarga-se a região de depleção do silício, além de seu valor máximo x_{dmax} , aumentando também o potencial de superfície ϕ_s , conforme mostrado na figura 2.15. À medida que aumenta

negativamente a tensão aplicada ao substrato em relação à fonte aumenta para valores mais positivos a tensão de limiar do transistor de canal n, uma vez que aumenta a densidade de carga na camada de depleção.

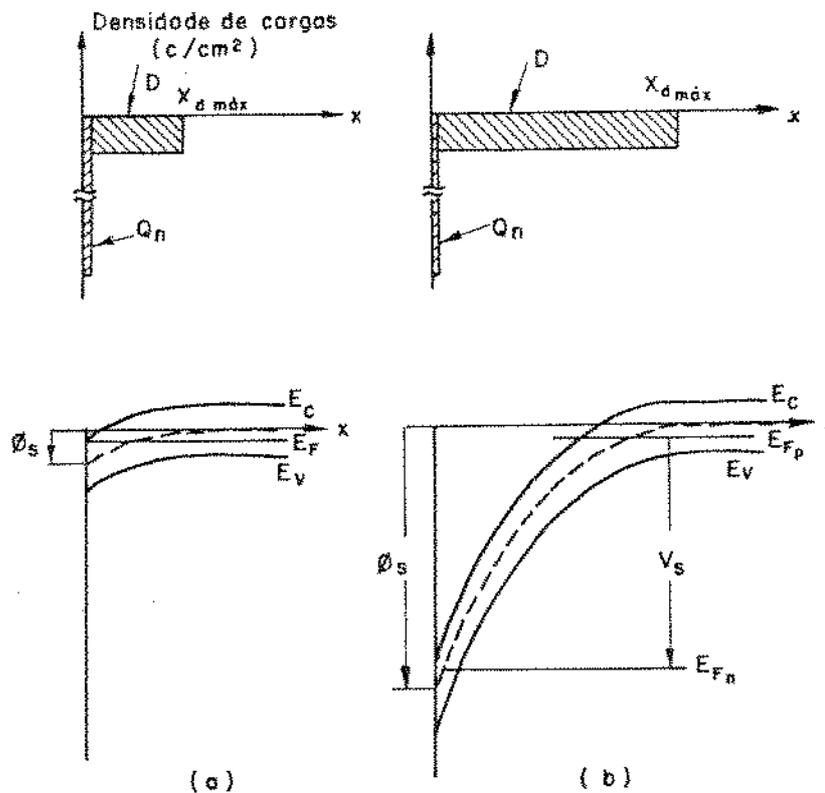


Figura 2.15 - Distribuição de carga e diagrama de bandas de energia na camada de inversão de um transistor MOS sobre substrato p, representados segundo uma normal à superfície, a uma certa distância da fonte:

- a) sem polarização de substrato ($V_S = 0$).
- b) com polarização de substrato ($V_S = -5V$) [42].

A expressão da tensão de limiar para um transistor MOS de canal n, com substrato polarizado em relação à fonte, pode ser calculada como [42]:

$$V_T = \left\{ \frac{-Q_S - Q_{dm\max}}{C_{ox}} + \frac{[(2\phi_F - V_S) / 2\phi_F]^{1/2}}{C_{ox}} \right\} t_{ox} + \phi_{MS} + 2\phi_F \quad (2.12)$$

onde $Q_{dm\max}$ é a densidade superficial de carga na camada de depleção de íons dopantes, e é dada por:

$$Q_{dm\max} = - \left[2\epsilon_{Si} \cdot N_A q (2\phi_F - V_S) \right]^{1/2} \quad (2.13)$$

2.4.2. Características de um Transistor MOS de Canal n

As características elétricas medidas nos terminais de um transistor MOS de canal n, conforme foi mostrado no início do capítulo, podem ser divididas em três regiões distintas de operação. Para pequenos valores de tensão aplicada ao terminal de fonte, a corrente de dreno cresce linearmente com a tensão de dreno e o transistor é dito operando na região de resistência variável. À medida que a tensão de dreno aumenta a corrente gradualmente satura a um nível quase constante que depende da tensão de porta. Esta região é dita de saturação. Finalmente, para valores ainda maiores da tensão de dreno, a corrente de dreno cresce rapidamente e a região é denominada de região de avalanche, uma vez que nela ocorre a ruptura da junção de dreno. Descrevemos a seguir as equações que relacionam a corrente de dreno com a tensão de dreno, em função dos demais parâmetros do transistor.

Na figura 2.16 mostra-se a característica de dreno de um transistor MOS de canal n operando na região linear, onde V_{GS} e V_{DS} são definidos a largura W e o comprimento do canal L . Denotando a diferença de potencial aplicada entre o terminal de fonte,

do que a diferença de potencial entre porta e fonte, a intensidade do campo elétrico no isolante, segundo a direção x , cresce à medida que aumenta y a partir da fonte. Define-se a resistência diferencial de um elemento dy do canal como sendo |42|:

$$dR = - \frac{dy}{Q_n(y) \mu_n W} \quad (2.14)$$

onde $Q_n(y)$ é a densidade superficial de cargas na camada de inversão tipo n , função de y , e μ_n expressa a mobilidade dos portadores minoritários no canal.

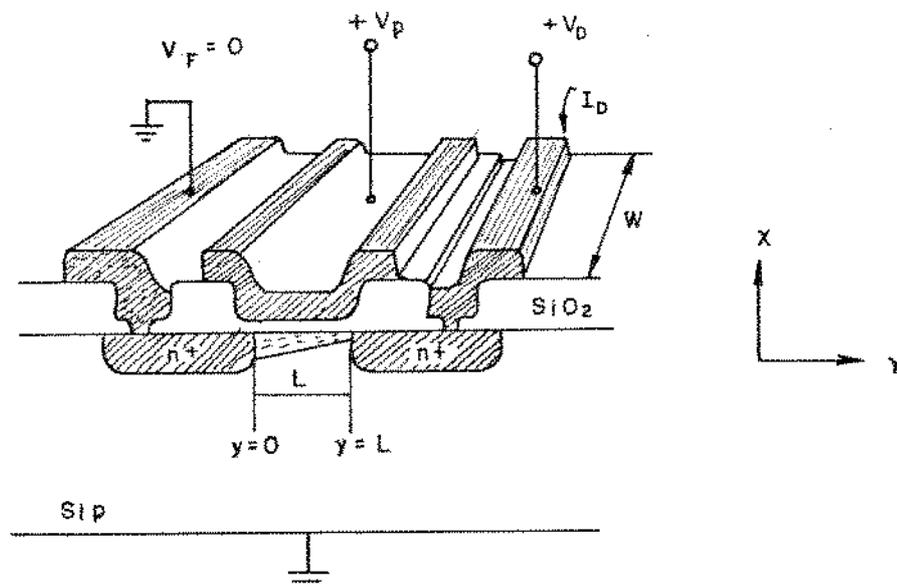


Figura 2.16 - Seção reta de um transistor MOS de canal n operando na região linear.

Calculando-se a queda de tensão no elemento resistivo tal que $dV = I_D dR$, e integrando para todo o comprimento do canal (de $y = 0$ até $y = L$), pode-se obter a corrente de dreno:

$$I_D = - \frac{\int_{V=0}^{V=V_D} Q_n(y) \mu_n W dV}{L} \quad (2.15)$$

Assumindo-se a condição de neutralidade de todas as cargas presentes na porta, no isolante e na superfície do silício, para todos os valores de y , a densidade total de cargas:

$$Q_{\text{total}}(y) = Q_n(y) + Q_{D_{\text{máx}}} \quad (2.16)$$

pode ser expressa como:

$$Q_{\text{total}}(y) = C_{\text{ox}} \left[\phi_S(y) - (V_P - V_{\text{FB}}) \right] \quad (2.17)$$

Em consequência da diferença de potencial entre fonte e dreno, quando a tensão entre substrato e fonte é mantida nula, tanto o potencial de superfície como a largura da camada de depleção da junção canal-substrato aumentam em função de y . Sob a condição de inversão forte ao longo de toda a superfície do silício, o potencial de superfície em função de y pode ser dado aproximadamente por:

$$\phi_S(y) \cong 2\phi_F + V(y) \quad (2.18)$$

onde $V(y)$ é a diferença de potencial na camada de depleção canal-substrato em função de y . Lembrando a equação 2.4, a largura máxima da camada de depleção $x_{d_{\text{máx}}}$ pode agora ser expressa em função de y como:

$$x_{dm\bar{a}x}(y) = \left[\frac{2\epsilon_{Si}\phi_S(y)}{qN_A} \right]^{1/2} \quad (2.19)$$

crescente com y . A densidade de carga espacial, por unidade de superfície, pode agora ser expressa por:

$$Q_{dm\bar{a}x}(y) = -qN_A x_{dm\bar{a}x}(y) = - \left\{ 2\epsilon_{Si}qN_A [2\phi_F + v(y)] \right\}^{1/2} \quad (2.20)$$

A densidade de cargas minoritárias $Q_n(y)$ móveis na camada de inversão pode ser obtida da expressão 2.16, substituindo-se $Q_{total}(y)$ e $Q_{dm\bar{a}x}(y)$ por suas expressões 2.17 e 2.20:

$$Q_n(y) = -C_{ox} [(V_P - V_{FB}) - \phi_S(y)] + \left\{ 2\epsilon_{Si}qN_A [2\phi_F + v(y)] \right\}^{1/2} \quad (2.21)$$

A corrente de dreno pode finalmente ser calculada pela substituição de 2.21 em 2.15 que após a integração nos dá |42|:

$$I_D = \frac{+\mu_n W C_{ox} \left\{ V_D [V_P - V_{FB} - 2\phi_F - V_D/2] - (2(2\epsilon_{Si}qN_A)^{1/2} / 3C_{ox}) \left[(V_D + 2\phi_F)^{3/2} - (2\phi_F)^{3/2} \right] \right\}}{L} \quad (2.22)$$

que, após as definições de:

$$\beta \equiv \frac{\epsilon_{ox}\mu_n W}{t_{ox}L} = \frac{\mu_n W C_{ox}}{L} \quad (2.23)$$

e

$$\phi \equiv \frac{(2\epsilon_{Si} q N_A)^{1/2}}{C_{ox}} \quad (2.24)$$

pode ser escrita mais simplesmente como |42|:

$$I_D = \beta \left\{ V_D \left(V_P - V_{FB} - 2\phi_F - \frac{V_D}{2} \right) - \frac{2}{3} \phi \cdot \left[(V_D + 2\phi_F)^{3/2} - (2\phi_F)^{3/2} \right] \right\} \quad (2.25)$$

A equação 2.25 descreve a operação de um transistor MOS de canal n para todas as tensões de dreno na região linear, isto é, quando o canal se estende ao longo de todo o comprimento L, conforme mostrado na figura 2.9.

Ainda na região linear, quando as tensões entre fonte e dreno são muito pequenas, tais que:

$$V_D \ll V_P - V_{FB} - 2\phi_F \quad (2.26)$$

e

$$V_D \ll 2\phi_F \quad (2.27)$$

a equação 2.25 é aproximadamente igual a:

$$I_D \approx \beta V_D \left[V_P - V_{FB} - 2\phi_F - Q_{dm\acute{a}x} \left(\frac{t_{ox}}{\epsilon_{ox}} \right) \right] \quad (2.28)$$

Lembrando as definições de V_{FB} e de V_T , expres-

nas relações 2.7 e 2.11, a equação acima (2.28) passa a ser escrita como:

$$I_D \cong \beta V_D (V_P - V_T) \quad (2.29)$$

A equação 2.29 descreve a característica elétrica de um resistor linear cuja resistência é inversamente proporcional à diferença entre as tensões de porta e de limiar ($V_P - V_T$). Em outras palavras, no limite de pequenas tensões de dreno a resistência efetiva existente entre os eletrodos de fonte e dreno é dada por:

$$\lim_{V_D \rightarrow 0} R_{FD} \cong [\beta (V_P - V_T)]^{-1} \quad (2.30)$$

A equação 2.30 se verifica na prática quando as tensões entre porta e fonte são suficientemente baixas para que a mobilidade dos elétrons μ_n possa ser tomada como constante e também quando as resistências parasitas presentes nos contatos de dreno e fonte sejam desprezíveis.

Aumentando-se a tensão entre dreno e fonte para uma dada tensão de porta, a resistência diferencial do canal aumenta gradualmente e a corrente de dreno começa a saturar. Nesta situação as equações 2.29 e 2.30 não mais se aplicam e a resistência variável começa a deteriorar quanto a linearidade. Neste caso a corrente de dreno deve ser calculada pela equação 2.25 a qual pode ser simplificada para [42]:

$$I_D = K(V_P)V_D - \Delta(V_D) \quad (2.31)$$

onde os parâmetros K e Δ são definidos como:

$$K(V_P) \equiv \beta(V_P - V_{FB} - 2\phi_F) \quad (2.32)$$

$$\Delta(V_D) \equiv \frac{1}{2} \beta V_D^2 + \frac{2\beta\phi}{3} \left[(V_D + 2\phi_F)^{3/2} - (2\phi_F)^{3/2} \right] \quad (2.33)$$

O fator Δ pode ser considerado como um fator de correção da linearidade da resistência variável controlada pela tensão de porta, sendo que seu efeito aumenta à medida que aumenta a tensão entre dreno e fonte, quando a inclinação da curva $I_D \times V_D$ diminui até que o transistor entre na saturação.

Quando a saturação ocorre, a inclinação da curva $I_D \times V_D$ deve cair a zero, conforme mostrado na figura 2.12. Todavia, na prática, uma pequena inclinação destas curvas, atribuída a efeitos de segunda ordem na corrente de saturação, é observada. Desprezar estes efeitos de segunda ordem equivale a supor que:

$$\frac{\partial I_D}{\partial V_D} = 0 \quad (2.34)$$

Calculando-se esta derivada para a expressão 2.25 obtêm-se que a tensão de dreno V_{Dsat} , para a qual a saturação ocorre, é dada por [42]:

$$V_{Dsat} = V_P - V_{FB} - 2\phi_F + \frac{\phi^2}{2} - \phi \left(V_P - V_{FB} + \frac{\phi^2}{4} \right)^{1/2} \quad (2.35)$$

A expressão 2.35 pode ser aproximada por:

$$V_{Dsat} \cong V_P - V_{FB} - 2\phi_F \quad (2.36)$$

para substratos pouco dopados (N_A pequeno) uma vez que os termos $\frac{\phi}{2}$ e $\phi(V_P - V_{FB} - \frac{\phi}{4})^{1/2}$ são muito pequenos. Neste caso a expressão 2.36 passa a ser escrita:

$$V_{Dsat} \cong V_P - V_T \quad (2.37)$$

Pode-se agora calcular o valor da corrente de dreno na saturação I_{Dsat} substituindo o valor de V_{Dsat} na expressão 2.25:

$$I_{Dsat} \cong \frac{\beta}{2} (V_P - V_T)^2 \quad (2.38)$$

A equação 2.38 expressa a dependência quadrática da corrente de dreno com a tensão de porta. Esta relação é válida para substratos pouco dopados para tensões de dreno maiores do que a diferença entre a tensão de porta e a de limiar, e menores do que a tensão de ruptura do diodo de dreno. Cumpre ressaltar que se supos neste caso que a corrente de dreno independa da tensão de dreno, o que na prática só se observa para transistores cujo comprimento do canal (L) é muito grande.

Quando o comprimento do canal é reduzido as características da saturação se deterioram, principalmente se os substratos têm alta resistividade. Os mecanismos aos quais se atribuem esta deterioração são:

- a. redução do comprimento efetivo do canal pelo alargamento da região de depleção do diodo de dreno, implicando na diminuição da resistência entre dreno e fonte.
- b. efeito do campo elétrico da região de depleção de dreno na distribuição de cargas da camada de inversão, quando o dreno passa a atuar como uma segunda porta no controle da condutância entre dreno e fonte. Este efeito implica na redução da resistência entre dreno e fonte pelo aumento da população das cargas de inversão. É mais importante nos substratos de alta resistividade, onde a camada de depleção é mais larga.
- c. efeito do avanço da região de depleção até atingir a fonte, denominado de perfuração ou "punch-through". Neste caso os portadores minoritários injetados na fonte são atraídos pelo forte campo elétrico transversal e coletados no dreno. A tensão de perfuração pode ser muito pequena para canais de pequenos comprimentos e substratos de alta resistividade. O fluxo de corrente, na condição de perfuração, é limitado pela carga minoritária injetada na fonte, a qual por sua baixa velocidade cria uma região de carga espacial próxima àquele eletrodo. Para transistores fabricados em substratos de baixa resistividade e com canais relativamente longos, a tensão de perfuração será relativamente grande e a ruptura do diodo de dreno será observada antes da perfuração.

A última região de operação de um transistor MOS a ser descrita é a região de ruptura. Ela ocorre quando, num transistor operando na região de saturação, a tensão aplicada ao dreno aumenta muito a ponto de causar a ruptura do diodo de dreno. Neste caso a corrente de dreno aumenta muito rapidamente (figura 2.12). A tensão de ruptura é tanto menor à medida em que aumenta a concentração de dopantes no lado menos dopado da junção [44].

2.4.3. Mobilidade no Canal e Transcondutância de um Transistor MOS

Num semicondutor como o silício, portadores livres em movimento experimentam colisões tanto com a rede como com impurezas. A mobilidade de um portador é determinada pelos diferentes mecanismos de espalhamento e pelo número de eventos de colisão ou de espalhamento experimentados pelo portador. Num período prolongado de tempo, os eventos sucessivos determinam uma velocidade média de deriva, a qual para pequenos valores de campo elétrico, é proporcional à intensidade do campo.

Num transistor MOS como a condução ocorre principalmente na região próxima à superfície do semicondutor, junto a interface com o isolante, outros mecanismos de espalhamento são observados os quais reduzem em até duas vezes a mobilidade dos portadores, particularmente para elevadas tensões aplicadas à porta.

Em particular a presença de campos elevados na superfície do semicondutor é responsável por atrair os portadores livres para a interface entre o semicondutor e o isolante, que, se fosse perfeita, refletiria especularmente os portadores não afetando sua mobilidade. Todavia a imperfei-ção da superfície é responsável pelo espalhamento difuso dos portadores, afetando tanto a componente y da velocidade como do momento e, portanto, sua mobilidade.

Observou-se, ainda que a mobilidade de portadores livres no canal depende da orientação cristalográfica do substrato, sendo maior em substratos de silício (100) do que em substratos (111) [45,46], este comportamento sendo atri-buído a diferença nas massas efetivas como função da orienta-ção.

A mobilidade dos portadores no canal depende ainda da tensão aplicada à porta, diminuindo quando esta última aumenta [47]. O efeito se torna mais pronunciado conforme aumenta a tensão de porta.

Em transistores de canal curto, aplicando-se tensões elevadas entre dreno e fonte pode-se atingir valores elevados de campo elétrico os quais passam a limitar a mobilidade. Acima de um valor crítico do campo elétrico ocorre a saturação da velocidade de deriva e a mobilidade passa a variar inversamente com o campo elétrico.

A transcondutância de um transistor MOS é definida como a relação entre a variação na corrente de dreno para a correspondente variação na tensão de porta para um valor fixo da tensão de dreno:

$$g_m = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_P} \right|_{V_D = \text{cte}} \quad (2.39)$$

Na região linear em que a corrente de dreno é expressa pela relação 2.29 a transcondutância de um transistor MOS pode ser calculada por:

$$g_m = \frac{I_{D2} - I_{D1}}{V_{P2} - V_{P1}} \cong \beta V_D \quad (2.40)$$

Este modelo de primeira ordem implica em que para acréscimos da tensão de porta, resultam acréscimos proporcionais da corrente de dreno para uma tensão de dreno fixa, o que garante que conforme a tensão de porta vá aumentando a corrente não terá um limite superior. Em outras palavras, este modelo prevê que a resistência entre dreno e fonte ten

de a zero para valores crescentes da tensão de porta. Toda via, conforme foi discutido anteriormente, a mobilidade dos portadores no canal degrada com o aumento da tensão de porta, o que causa a diminuição da transcondutância com o aumento da tensão de porta, conforme observado na prática. Um segundo fator limitante da condutância entre dreno e fonte é a presença de resistências parasitas nas regiões difundidas de dreno e fonte e nos contatos metálicos com estas regiões. Deste modo, a dependência da mobilidade com o campo de porta e os efeitos das resistências parasitas em série com o dreno e fonte limitam a condutância do transistor MOS operando na região linear [48,49].

A transcondutância de um transistor MOS, de canal n, operando na região de saturação, pode ser obtida diferenciando-se a equação 2.38 em relação à tensão de porta:

$$g_m \cong \frac{\partial I_{Dsat}}{\partial V_P} \cong \beta (V_P - V_T) = \frac{\mu_n W C_{ox} (V_P - V_T)}{L} \quad (2.41)$$

A relação 2.41 mostra a dependência da transcondutância com a tensão de porta, para um transistor operando na região de saturação.

Do mesmo modo como foi discutido para um transistor MOS operando na região linear os efeitos de degradação da mobilidade para elevadas tensões de porta e os efeitos de resistências parasitas em série com o dreno e fonte podem ter efeitos apreciáveis nas características elétricas do transistor operando na região de saturação. Em particular estes dois efeitos limitam a região em que vale a dependência quadrática da corrente de dreno com a tensão de porta (equação 2.41).

2.5. A Estrutura de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$

Baseando-nos nos conceitos introduzidos para uma estrutura MOS com alumínio, discutiremos aqui as características elétricas da estrutura de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$, do ponto de vista de seu diagrama de bandas, procurando estabelecer a validade do modelo até aqui estudado.

O sistema $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ é mostrado na figura 2.17, onde o dióxido de silício entra na constituição do eletrodo de porta.

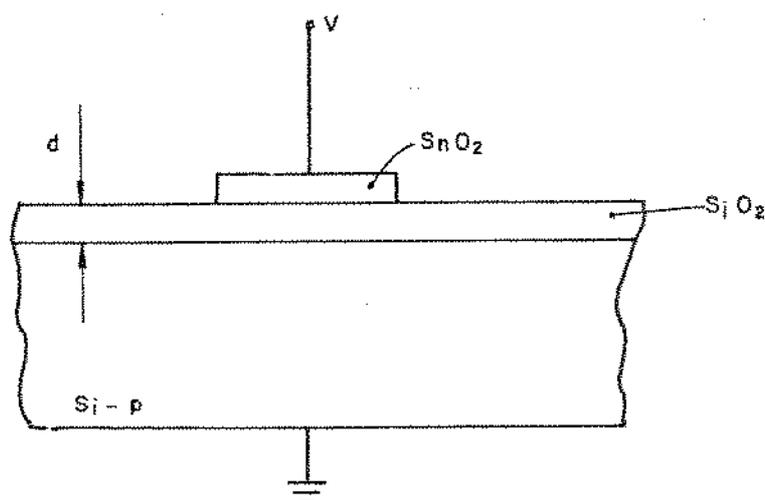


Figura 2.17 - Estrutura de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$.

O diagrama de bandas do sistema $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ é mostrado na figura 2.18 conforme proposto por Anderson [50], que levou em consideração as propriedades deste material já apresentadas no capítulo 1. Resumindo o que lá foi exposto o dióxido de estanho é um material de banda proibida $E_{g\text{SnO}_2}$ de 3.8 eV, que se comporta como um semicondutor degenerado tipo n, com densidade de portadores livres na faixa de 10^{18} a 10^{20} por cm^3 , densidade esta independente da temperatura [19].

Este comportamento permite supor que o nível de Fermi está muito próximo do extremo da banda de condução, entre 0.06 a 0.25 eV [51]. A afinidade eletrônica do SnO_2 ($q\chi_{\text{SnO}_2}$) é da ordem de 4.85 eV [52].

A equalização dos níveis de Fermi do SnO_2 e do Si, quando em contato através do SiO_2 , exige que um certo número de lacunas do silício se afaste da interface com o isolante causando o encurvamento das bandas, conforme mostrado na figura 2.18. O encurvamento das bandas, que poderia ocorrer de modo análogo no SnO_2 , é todavia desprezível uma vez que, por ser este material extremamente dopado, seu comportamento pode ser comparado ao de um metal. Isto equivale a dizer que no SnO_2 não se forma uma camada de depleção, ou seja, seu potencial de superfície $\phi_S(\text{SnO}_2)$ é nulo.

A partir das considerações acima o encurvamento das bandas no silício pode ser determinado analogamente ao que foi feito para o MOS pelas cargas porventura presentes no óxido de silício e pela diferença das funções de trabalho do SnO_2 e do Si, $q\phi_{SS}$, dada por:

$$q\phi_{SS} = q(\phi_{\text{SnO}_2} - \phi_{\text{Si}}) \quad (2.42)$$

com ϕ_{Si} definido pela equação 2.1.

Para a faixa de concentrações citada (entre 10^{18} e 10^{20} cm^{-3}) a função de trabalho do SnO_2 deve se situar entre:

$$q\psi_{\text{SnO}_2} - 0.06 \leq q\phi_{\text{SnO}_2} \leq q\phi_{\text{SnO}_2} - 0.25 \quad (2.43)$$

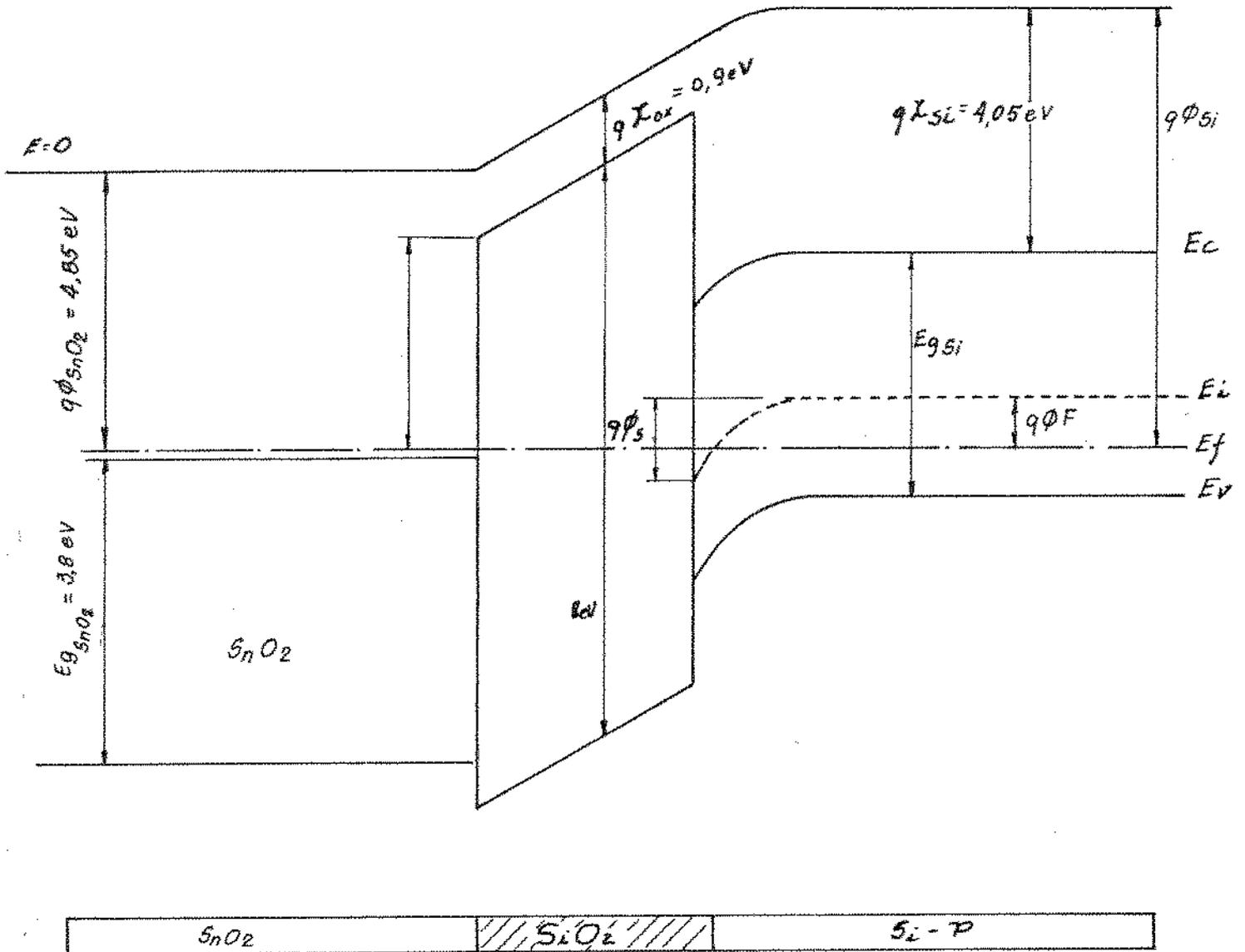


Figura 2.18 - Diagrama de bandas do sistema $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$.

o que lhe dá valores na faixa entre 4.60 eV e 4.79 eV. Toda via, a partir de agora vamos assumir, como aproximação, que a função de trabalho do SnO_2 é igual à sua afinidade eletrônica, isto é, $q\phi_{\text{SnO}_2} = 4,85$ eV, independentemente da concentração de portadores nele presentes. Esta aproximação leva a uma potencial $q\phi_{\text{SS}}$ em 2.42, como se pode ver:

$$q\phi_{\text{SS}} = 0.25 - q\phi_{\text{F}} \quad (2.43)$$

Em face ao que até aqui foi exposto podemos agora admitir que o sistema $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ apresenta um comportamento semelhante ao da estrutura MOS convencional no que se refere à capacitância, apresentando as três regiões já mencionadas, de acumulação, de banda plana e de inversão. A capacitância do sistema $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ é dada pelo paralelo do capacitor constituído pelo óxido isolante de SiO_2 (C_{ox}) em série com a capacitância de depleção no silício (C_{d}) conforme descrito pela equação 2.6, uma vez que não se forma uma camada de depleção no SnO_2 .

A tensão que se deve aplicar ao SnO_2 para levar o sistema à condição de banda plana é dada por:

$$V_{\text{FB}}(\text{SnO}_2) = \phi_{\text{SS}} - \frac{Q_{\text{S}}}{C_{\text{ox}}} \quad (2.44)$$

onde Q_{S} expressa as cargas por ventura presentes no óxido isolante. Supondo-se que as cargas presentes no óxido isolante da estrutura de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ sejam da mesma natureza e em densidade comparáveis às que foram prescritas para a estrutura convencional de alumínio, pode-se obter os valores de V_{FB} para ambas as estruturas obtendo-se:

$$V_{FB}(\text{SnO}_2) - V_{FB}(\text{Al}) = \phi_{SS} - \phi_{MS} = 0.75 \text{ eV} \quad (2.45)$$

desde que os substratos de silício tenham a mesma dopagem e que seja idêntica a espessura do óxido de silício na interface. A relação 2.45 expressa que a tensão que se deve aplicar ao SnO_2 para compensar o encurvamento das bandas do silício, no sistema $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$, é menor do que a tensão que se deve aplicar no alumínio para compensar o correspondente encurvamento no caso do MOS.

2.6. O Transistor de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$

Na figura 2.19 é mostrada esquematicamente a estrutura de um transistor de efeito de campo de canal n, com porta constituída por um filme fino de SnO_2 . Os eletrodos de dreno e fonte também são filmes finos de SnO_2 .

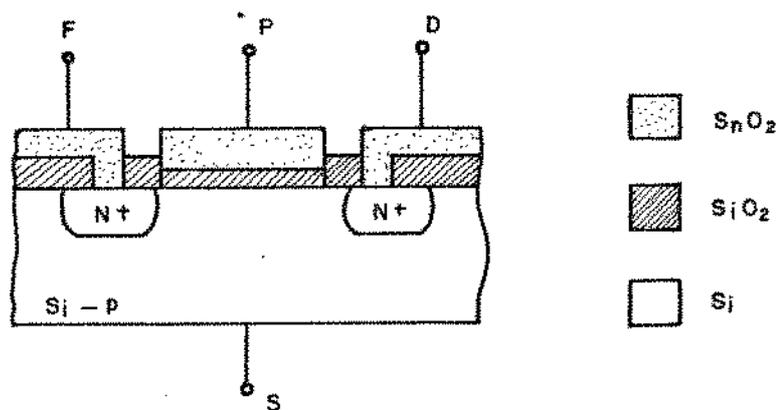


Figura 2.19 - Transistor de efeito de campo com porta de SnO_2 .

Pelas considerações efetuadas com relação às propriedades de semicondutor fortemente dopado que é o SnO_2 , é de se esperar que o princípio de operação do transistor de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ seja similar ao do transistor MOS discutido anteriormente. Assim a tensão aplicada externamente à porta V_P é que será responsável pela formação na superfície do silício, de uma camada de acumulação (V_P negativa), de uma camada de depleção (V_P positiva e pequena), ou de uma camada de inversão (V_P positiva e grande). A tensão V_P é expressa por:

$$V_P = V_{\text{ox}} + \phi_{\text{SS}} + \phi_S \quad (2.46)$$

com ϕ_{SS} sendo a diferença de funções de trabalho de SnO_2 do Si, calculada na expressão 2.42 e ϕ_S sendo o potencial de superfície no silício.

A tensão de limiar do transistor, responsável pela entrada na condição de inversão forte ($\phi_S = 2\phi_F$), é dada por:

$$V_T = V_{\text{ox}} + \phi_{\text{SS}} + 2\phi_F = \frac{-Q_S - Q_{\text{dmáx}}}{C_{\text{ox}}} + \phi_{\text{SS}} + 2\phi_F \quad (2.47)$$

onde Q_S representa toda a carga presente no óxido, na região próxima à interface, e $Q_{\text{dmáx}}$ é a carga na camada de depleção do silício, definida na equação 2.13.

É interessante compararmos o valor da tensão de limiar esperada para o transistor de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ com o valor para o transistor de $\text{Al}/\text{SnO}_2/\text{Si}$:

$$V_T(\text{SnO}_2) - V_T(\text{MOS}) = \phi_{\text{SS}} - \phi_{\text{MS}} = 0.25 \text{ V} \quad (2.48)$$

desde que os substratos de silício tenham a mesma dopagem, que seja idêntica a espessura no óxido isolante e principalmente que as densidades de carga nas camadas de depleção no limiar da condição de inversão forte sejam idênticas nos dois casos. A relação 2.48 expressa que num transistor de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ deve-se esperar que a tensão de limiar seja maior do que a tensão de limiar num transistor de $\text{Al}/\text{SnO}_2/\text{Si}$, ambos construídos sobre substratos idênticos e supondo-se idênticas as cargas Q_S e $Q_{dm\acute{a}x}$.

As considerações até aqui efetuadas para a estrutura de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$, indicam que os mesmos modelos propostos para o transistor MOS convencional continuam válidos para explicitar os princípios de operação dos transistores de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$. Assim sendo é de se esperar que as características terminais deste último, em particular as características de corrente de dreno em função da tensão de dreno tendo a tensão de porta como parâmetro, apresentem as regiões linear, de saturação e de ruptura.

Um raciocínio análogo ao que foi efetuado para o transistor MOS nos levaria a admitir para a região linear a validade da equação 2.22, deduzida para aquele dispositivo, bem como sua forma aproximada para pequenas tensões entre dreno e fonte:

$$I_D \cong \beta V_D (V_P - V_T) \quad (2.29)$$

Esta relação implica em se admitir uma resistência entre dreno e fonte expressa pela equação (2.30):

$$\lim_{V_D \rightarrow 0} R_{FD} \cong \left[\beta (V_P - V_T) \right]^{-1} \quad (2.30)$$

Todavia neste modelo não foi considerada a presença das heterojunções de SnO_2/Si nos eletrodos de dreno e fonte, as quais devem influir nas características terminais $(I_D \times V_D)_{V_P=\text{cte}}$.

2.6. Heterojunções de SnO_2/Si

Na figura 2.20 é mostrado o diagrama de bandas de energia de uma heterojunção de SnO_2/Si [53] construído a partir dos valores das afinidades eletrônicas do SnO_2 ($\chi_{\text{SnO}_2} = 4.85$ eV) e do Si ($\chi_{\text{Si}} = 4.05$ eV); das bandas proibidas do SnO_2 ($E_{g\text{SnO}_2} = 3.8$ eV) e do Si ($E_{g\text{Si}} = 1.1$ eV); da função de trabalho do SnO_2 assumida igual a sua afinidade eletrônica (o SnO_2 é um semicondutor degenerado) e da função de trabalho do Si (ϕ_{Si}) que depende de sua dopagem. No caso o Si é tipo n e fortemente dopado conforme convém às regiões de fonte e dreno. O nivelamento das energias de Fermi quando os dois materiais são postos em contato, ocorre às custas de uma transferência de elétrons do Si para o SnO_2 , o que causa o encurvamento das bandas de $V_{D\text{Si}}$ no lado do silício e de $V_{D\text{SnO}_2}$ no lado do dióxido de estanho tal que:

$$E_{F\text{Si}} - E_{F\text{SnO}_2} = V_{D\text{Si}} + V_{D\text{SnO}_2} \quad (2.49)$$

As regiões de transição estão completamente depletadas até às distâncias x_{Si} e x_{SnO_2} com:

$$x_{\text{Si}}/x_{\text{SnO}_2} = \frac{N_{D\text{Si}}}{N_{D\text{SnO}_2}} \quad (2.50)$$

satisfazendo a neutralidade de carga. A aplicação da equação

de Poisson por sua vez permite obter:

$$V_{D_{\text{SnO}_2}} = N_{D_{\text{SnO}_2}} x_{\text{SnO}_2}^2 / 2\epsilon_{\text{SnO}_2} \quad (2.51)$$

e

$$V_{D_{\text{Si}}} = N_{D_{\text{Si}}} x_{\text{Si}}^2 / 2\epsilon_{\text{Si}} \quad (2.52)$$

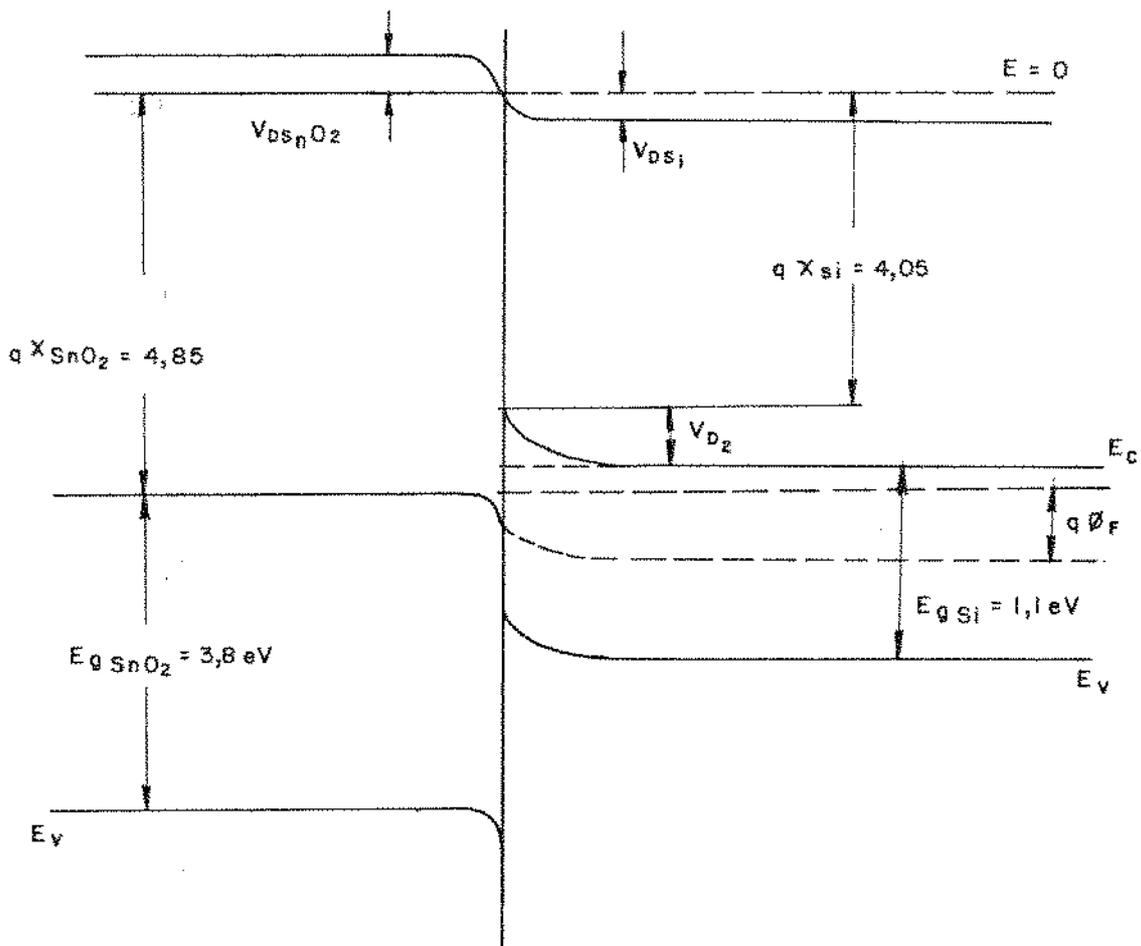


Figura 2.20 - Diagrama de bandas de uma heterojunção de SnO₂/Si-n⁺ no equilíbrio.

$$\frac{V_{D_{\text{SnO}_2}}}{V_{D_{\text{Si}}}} = \frac{N_{D_{\text{Si}}} \epsilon_{\text{Si}}}{N_{D_{\text{SnO}_2}} \epsilon_{\text{SnO}_2}} \quad (2.53)$$

assumindo $N_{D_{\text{Si}}} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ e $N_{D_{\text{SnO}_2}} \cong 10^{20}$ e com $\epsilon_{\text{Si}} = 12 \epsilon_0$ e $\epsilon_{\text{SnO}_2} = 14$, $V_{D_{\text{SnO}_2}} / V_{D_{\text{Si}}}$ é da ordem de $6,9 \times 10^{-3}$, podendo-se desprezar a queda de tensão no lado do SnO_2 .

A descontinuidade de energia na banda de condução é determinada por:

$$\Delta E_c = q(\chi_{\text{SnO}_2} - \chi_{\text{Si}}) = 0.80 \text{ eV} \quad (2.54)$$

convindo lembrar que os valores de afinidades eletrônicas não são determinados com precisão e que portanto se deve esperar um erro grande no cálculo de ΔE_c .

A descontinuidade na banda de valência é:

$$\Delta E_v = (E_{g_{\text{SnO}_2}} - E_{g_{\text{Si}}}) - q(\chi_{\text{Si}} - \chi_{\text{SnO}_2}) \quad (2.55)$$

com

$$\Delta E_c + \Delta E_v = E_{g_{\text{SnO}_2}} - E_{g_{\text{Si}}} \quad (2.56)$$

Na heterojunção isótipa da figura 2.20 a barreira de energia V_{D2} na banda de condução do silício se interpõe ao fluxo de elétrons deste material para o SnO_2 . Deste modo a estrutura se comporta como retificadora esperando-se que o sentido de condução direta ocorra quando o silício é polarizado negativamente, situação em que diminui V_{D2} .

Além da descontinuidade nas bandas, a presença de estados na interface do SnO_2 e do Si pode ter um efeito preponderante na barreira das heterojunções isótípicas, pois estes estados se constituem em armadilhas de cargas. Estes estados também favorecem o tunelamento entre bandas e a recombinação de portadores.

Os modelos aceitos para explicar os mecanismos de corrente direta nas heterojunções isótípicas baseiam-se fundamentalmente na hipótese de tunelamento e recombinação através de estados na interface, conforme mostrado na figura 2.21 [54] em que a corrente é expressa em função da tensão aplicada V é dada por pela expressão geral:

$$I = B(e^{AV} - 1) \quad (2.57)$$

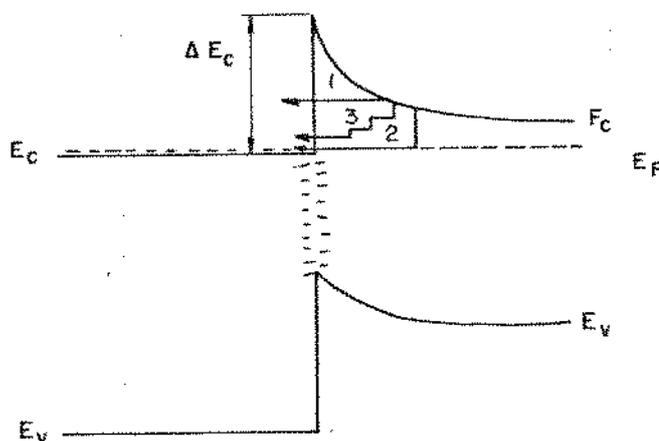


Figura 2.21 - Mecanismos de tunelamento e de recombinação e tunelamento combinados na condução de corrente em heterojunções de $\text{SnO}_2/\text{Si-n}$ [54].

Considerando-se a aproximação WKB e a energia de x (o que equivale a tomar o campo elétrico constante e igual a seu valor máximo $\mathcal{E}_{\text{máx}}$ na região de depleção, calcula-se a probabilidade de tunelamento através de uma barreira de altura E_b como sendo (para $N_{\text{DSnO}_2} \gg N_{\text{DSi}}$):

$$T(E_x) = \exp \left[- \frac{4}{3h} \frac{(2m^*)^{1/2}}{q} \frac{E_b^{3/2}}{\mathcal{E}_{\text{máx}}} \right] \quad (2.58)$$

onde m^* é a massa efetiva dos elétrons.

A densidade de corrente de tunelamento de elétrons através de uma barreira E_b , num intervalo de energias entre E e $E+dE$ pode ser expressa por: |55|

$$dJ = qp(E_x) v_x T(E_x) P(E_x) dE_x \quad (2.59)$$

onde $p(E_x)$ é o número de lacunas cuja componente de velocidade na direção do tunelamento é v_x ; $T(E_x)$ é a probabilidade de tunelamento; e $P(E_x)$ é a probabilidade de interação com fónons.

Este modelo de tunelamento aplicada à barreira Schottky correspondente ao mecanismo indicado por (1) na figura 2.21, prevê que a densidade de corrente de elétrons, supondo-se o Si muito menos dopado que o SnO_2 , é dada por |55|:

$$J = B \exp \left[- \frac{4}{3h} \frac{(2m^*)^{1/2}}{q} \frac{E_b^{3/2}}{\mathcal{E}_{\text{máx}}} \right] \quad (2.60)$$

onde:

$$E_b = q(V_D - V) \quad (2.61)$$

e:

$$\epsilon_{\max} = \left(\frac{2q N_{DSi}}{\epsilon_{Si}} \right)^{1/2} (V_D - V)^{1/2} \quad (2.62)$$

que permitem obter:

$$J = B \exp \left[- \frac{4}{3h} \left(\frac{m^* \epsilon_{Si}}{N_{DSi}} \right)^{1/2} (V_D - V) \right] \quad (2.63)$$

onde o coeficiente \bar{B} é expresso por:

$$\bar{B} = q N_{DSi} \left[\frac{2kT}{m^*} \right]^{1/2} P \quad (2.64)$$

em que P expressa a probabilidade de interação dos elétrons com fônons ao nível em que se processa o tunelamento, conforme descrito anteriormente. Por sua vez o coeficiente A da equação 2.57 é identificado com:

$$A = - \frac{4}{3h} \left(\frac{m^* \epsilon_{Si}}{N_{DSi}} \right)^{1/2} \quad (2.65)$$

Nos mecanismos indicados por (2) e (2') na figura 2.21 a condução ocorre pela queda dos portadores para estados permitidos na banda proibida e posterior tunelamento através de barreira E_b , sendo este último o mecanismo limitante da corrente direta, que é expressa por [56]:

$$J = b N_t \exp \left[- \frac{4}{3h} \frac{(2m^*)^{1/2}}{q} \frac{E_b^{3/2}}{\epsilon_{\text{m\~{a}x}}} \right] \quad (2.66)$$

onde b é uma constante e N_t é a densidade de estados na banda proibida supostos uniformemente distribuídos tanto em energia quanto espacialmente. Substituindo E_b e $\epsilon_{\text{m\~{a}x}}$ por seus valores dados nas relações (2.61) e (2.62) calcula-se a densidade de corrente, neste caso, como:

$$J = b N_t \exp \left[- \frac{4}{3h} \left(\frac{m^* \epsilon_{\text{Si}}}{N_{\text{DSi}}} \right)^{1/2} (V_D - V) \right] \quad (2.67)$$

O terceiro mecanismo possível, indicado por (3) na figura 2.21 envolve a ocupação dos níveis na banda proibida acompanhado de tunelamento agora em múltiplas etapas através dos estados na interface e respectiva recombinação com portadores minoritários.

Neste caso a probabilidade de tunelamento depende dos níveis de energia E_t dos estados na banda proibida, medidos a partir da borda da banda de condução, conforme proposto por Franz [57]:

$$T = \exp \left[- \frac{4}{3h} \frac{(2m^*)^{1/2}}{q} \frac{E_t^{3/2}}{\epsilon_{\text{m\~{a}x}}} \right] \quad (2.68)$$

E_t foi determinado empiricamente como sendo proporcional ao quadrado do campo elétrico máximo, que em termos da tensão da barreira pode ser expressa por:

$$E_t = R^{-1} q (V_D - V) \quad (2.69)$$

onde R expressa o número de etapas E_t em que a barreira é transposta.

A densidade de corrente de tunelamento é neste caso expresso como:

$$J = b N_t \exp \left[- \frac{4}{3h} \frac{(2m^*)^{1/2}}{q} \frac{R E_t^{3/2}}{\xi_{\max}} \right] \quad (2.70)$$

substituindo-se E_t e ξ_{\max} pelos seus valores expressos em 2.69 e 2.62 obtém-se finalmente para a densidade de corrente:

$$J = b N_t \exp \left[- \frac{4}{3h} \left(\frac{m^* \epsilon_{Si}}{N_{DSi} R} \right)^{1/2} (V_D - V) \right] \quad (2.71)$$

onde o coeficiente A da relação (2.57) passa a ser expresso por:

$$A = - \frac{4}{3h} \left(\frac{m^* \epsilon_{Si}}{N_{DSi} R} \right)^{1/2} \quad (2.72)$$

Também na corrente reversa das heterojunções de SnO_2/Si o tunelamento parece ser o principal mecanismo de transporte sendo válida a equação geral expressa em (2.60).

A barreira de energia E_b é neste caso igual a ΔE_c conforme se pode depreender da figura 2.22.

A corrente de tunelamento é expressa por [54]:

$$J_r = J_{ro} \exp \left[- \frac{4}{3h} \left(\frac{m^* \epsilon_{Si}}{N_{DSi}} \right)^{1/2} \left(\frac{\Delta E_c}{q} \right)^{3/2} (V_D - V)^{-1/2} \right] \quad (2.73)$$

onde J_{r0} é uma constante.

Esta equação quando representada em uma escala log-log aparece como sendo proporcional a uma potência m de V , com m maior que 3.

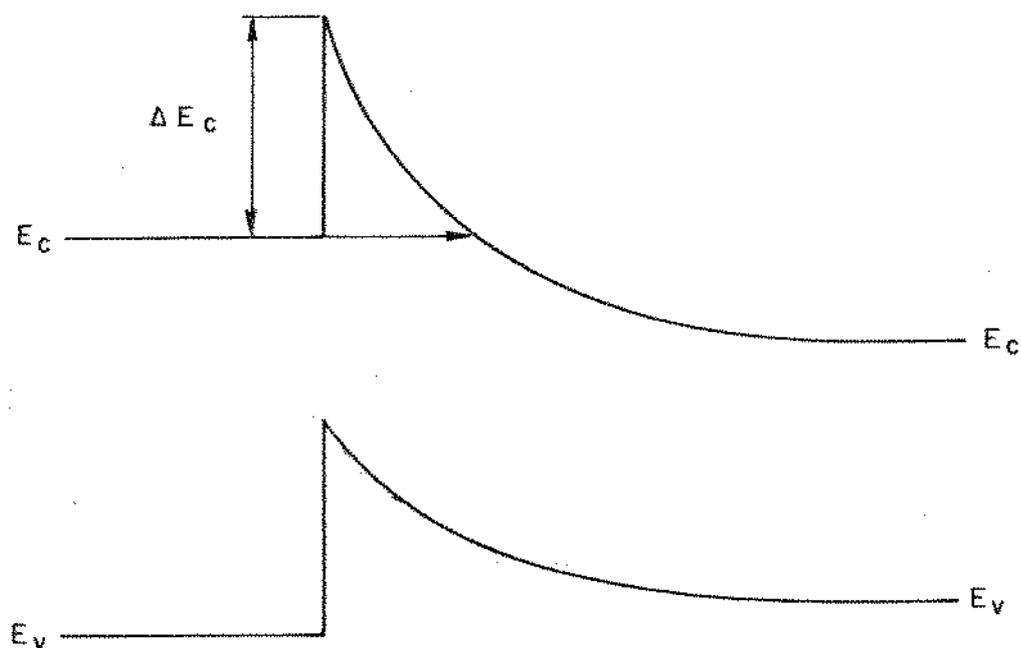


Figura 2.22 - Diagrama de bandas de energia de uma heterojunção de $\text{SnO}_2/\text{Si-n}$ polarizada reversamente, em que se mostra o mecanismo de tunelamento da corrente reversa.

O modelo de tunelamento representado pela equação (2.73) pressupõe, como num diodo tunel, a necessidade de se aplicar uma tensão reversa suficiente para que se alinhem os estados vazios na banda de condução do silício com os níveis de energia preenchidos com portadores no lado do SnO_2 . A observação experimental de que mesmo em tensões reversas muito baixas, a corrente é proporcional à tensão, levou Riben & Feucht [56] a propor o modelo de tunelamento em múltiplas etapas, através de estados permitidos na banda proibida, no qual os elétrons obtêm energia térmica da rede para atravessar os degraus. Supomos válida a probabilidade de tunelamento em múltiplas etapas através de estados na interface de energia E_r [57]:

$$T = \exp \left[- \frac{4}{3h} \frac{(2m^*)^{1/2}}{q} \frac{E_r^{3/2}}{\epsilon_{\text{máx}}} \right] \quad (2.74)$$

onde E_r é a barreira tunelada em cada etapa havendo S etapas de condução, isto é:

$$S = \frac{\Delta E_c}{E_r} \quad (2.75)$$

Do mesmo modo como no sentido direto de condução, é de se supor que a barreira E_r deva ser função do campo elétrico, todavia não se tem uma explicação física simples que permita expressar facilmente esta dependência funcional [56]. Neste caso a corrente reversa passa a ser expressa por:

$$J_r = J_{ro} \exp \left[-\frac{4}{3h} \frac{(2m^*)^{1/2}}{q} s \frac{(E_r)^{3/2}}{\mathcal{E}_{m\acute{a}x}} \right] \quad (2.76)$$

onde $\mathcal{E}_{m\acute{a}x}$ é o campo elétrico máximo definido na relação (2.62), o qual introduzido na relação (2.76), nos dá:

$$J_r = J_{ro} \exp \left[-\frac{4}{3h} \left(\frac{m^* \epsilon_{Si}}{N_{DSi}} \right)^{1/2} s \left(\frac{E_r}{q} \right) (V_D - V)^{-1/2} \right] \quad (2.77)$$

ou ainda lembrando a relação (2.75):

$$J_r = J_{ro} \exp \left[-\frac{4}{3h} \left(\frac{m^* \epsilon_{Si}}{N_{DSi}} \right)^{1/2} \frac{E_r^{1/2}}{q^{3/2}} \Delta E_c (V_D - V)^{-1/2} \right] \quad (2.78)$$

Estudos anteriores efetuados por nós [68] para os mecanismos de corrente em heterojunções de $\text{SnO}_2/\text{Si-n}$ confirmam a hipótese de um grande número de estados na banda proibida, próximo a interface de SnO_2/Si . Além disso outros resultados evidenciam também a presença de uma camada isolante de dióxido de silício na interface entre o SnO_2 e o Si, a qual é responsável pelo aparecimento de uma resistência em série com a estrutura, resistência esta de caráter não linear [69].

2.7. Transistores de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$

A presença, nos contatos de fonte e dreno, de heterojunções de SnO_2/Si , a primeira delas polarizada no sentido reverso e a segunda no sentido direto, deve ser responsável pela limitação da corrente de dreno do transistor de

$\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$, que não mais deverá apresentar a região linear. Em lugar disso, nessa região deve aparecer uma dependência da corrente de dreno com a tensão de dreno, proporcional a uma potência V^m , com $m > 3$, que expressa a corrente reversa por tunelamento na junção de SnO_2/Si em série com o eletrodo de fonte.

O transistor de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ deve ainda apresentar uma região de saturação, quando a tensão de dreno é dada pela equação 2.35, que para substratos pouco dopados pode ser aproximada por:

$$V_{\text{Dsat}} \cong V_{\text{P}} - V_{\text{FB}} - 2\phi_{\text{F}} = V_{\text{P}} - V_{\text{T}} \quad (2.79)$$

A corrente de dreno, na região de saturação é dada pela relação (2.38)

$$I_{\text{Dsat}} \cong \frac{\beta}{2} (V_{\text{P}} - V_{\text{T}})^2 \quad (2.80)$$

idêntica à que obtivemos para o transistor MOS convencional, a menos de efeitos de segunda ordem, desde que mantidos idênticos o comprimento do canal e a espessura do óxido.

É de se esperar que a última região de operação, ocorra para tensões de dreno suficientemente elevadas a ponto de causar a ruptura da junção de dreno, sendo tanto menor a tensão de ruptura quanto maior for a concentração de dopantes no lado menos dopado.

Os demais transistores objeto de estudo deste

trabalho, construídos com porta de SnO_2 e eletrodos de fonte e dreno de alumínio com e sem oxidação de porta devem apresentar um comportamento semelhante ao dos transistores MOS convencionais a menos das diferenças na tensão de limiar que, além de depender da diferença de funções de trabalho, vai depender da quantidade de cargas presentes no óxido isolante.

Resumindo o que foi exposto, o comportamento dos transistores de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$, se bem que similar em suas bases conceituais ao dos transistores MOS convencionais deve apresentar as seguintes diferenças fundamentais em relação àqueles dispositivos:

1. Tensão de limiar mais elevada, determinada pela diferença de funções de trabalho entre o SnO_2 e o Si, maior que a diferença entre as funções de trabalho do alumínio e do silício.
2. Não apresentar região linear de operação tendo em vista os diodos em série de dreno e fonte. Conseqüentemente a condutância de canal não é mais uma função simples da diferença entre a tensão de porta e a tensão de limiar.
3. Transcondutância menor do que a do transistor MOS convencional (em decorrência do V_T maior).

A menos destes fatores identificáveis a priori a partir do modelo simples, os efeitos de segunda ordem não podem ser previstos antecipadamente e sim apenas a partir dos resultados experimentais. Por outro lado as características do óxido isolante na interface com o silício são fortemente dependentes dos processos físico-químicos empregados na fabricação dos dispositivos. Assim a tensão de limiar dependerá das cargas presentes no óxido, e sobre estas nada se pode afirmar de antemão a priori. Uma análise cuidadosa das características elétricas dos dispositivos construídos com $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ permitirá que se tirem conclusões sobre a influ

ência dos particulares processos empregados na qualidade e desempenho dos dispositivos estudados.

Os transistores de $\text{Al/SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ com eletrodos de fonte e dreno de alumínio devem apresentar comportamento similar ao dos transistores de MOS convencionais a menos da diferença nas tensões de limiar.

3. TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

Para estudar a viabilidade do emprego de dióxido de estanho em substituição ao alumínio em dispositivos de efeito de campo, construímos diferentes transistores e capacitores, os quais permitem determinar o comportamento elétrico destes dispositivos bem como as propriedades da interface entre o óxido isolante de porta e o silício. Além disso foram construídos dispositivos de teste que permitem a caracterização das etapas de processamento.

Descrevemos neste capítulo as técnicas experimentais empregadas na construção e medida destes dispositivos, em particular o processo de obtenção de filmes finos de dióxido de estanho e o conjunto de máscaras utilizadas na construção dos dispositivos. Finalizamos com a descrição dos métodos de medidas empregados na caracterização dos dispositivos.

3.1. Construção dos dispositivos

De modo a atender os objetivos propostos neste trabalho utilizamos lâminas de silício monocristalino tipo p de resistividade na faixa de 4,5 Ωcm e diâmetros de 2", de qualidade MOS produzidas pela Wacker Co.

Foram processadas aproximadamente 20 lâminas, num total de 460 pastilhas e 19780 dispositivos de diferentes tipos e definidos pela sequência de máscaras que passamos a descrever. Esta descrição facilitará também o entendimento da sequência de processos que detalharemos a seguir. As lâminas foram identificadas numericamente ou com a notação LS-A até LS-T enquanto que as pastilhas foram numeradas matricialmente em cada lâmina.

3.1.1. Máscaras

O projeto do conjunto de máscaras utilizadas neste trabalho foi efetuado tendo em vista tanto a construção dos dispositivos objeto deste estudo como também de dispositivos de teste que permitam avaliar as diferentes etapas de processamento. Se bem que nem todos os dispositivos de teste tenham sido utilizados, a configuração proposta se constitui num conjunto completo de teste que poderá ser utilizado na caracterização de qualquer processo que venha a ser executado.

Projetamos e construímos um conjunto de máscaras para cinco níveis, quais sejam: difusão, oxidação de porta, abertura de contatos, fotogração do dióxido de estanho e fotogração do alumínio. Os seguintes dispositivos foram definidos em cada pastilha, num total de 43 dispositivos por cada pastilha:

- transistores de efeito de campo com porta, fonte e dreno de alumínio (MOS).
- transistores de efeito de campo com porta de dióxido de estanho e fonte e dreno de alumínio ($\text{Al}/\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$).
- transistores de efeito de campo com porta, fonte e dreno de dióxido de estanho ($\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$).
- transistores de efeito de campo com porta de dióxido de estanho, sem óxido isolante, com fonte e dreno de alumínio (SnO_2/Si com Al).
- capacitores de alumínio, dióxido de silício e silício ($\text{Al}/\text{SnO}_2/\text{Si}$).
- capacitores de dióxido de estanho, dióxido de silício e silício ($\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$).
- elementos de Van der Pauw para medida da resistividade do dióxido de estanho.

- elementos para a medida da resistividade e da largura das linhas difundidas.
- elementos para a medida de resistência de contato.
- diodos de dióxido de estanho e silício (SnO_2/Si).

A figura 3.1 mostra a máscara completa. Os quatro tipos de transistores mencionados foram construídos em três dimensões diferentes conforme relacionado na Tabela I. Sua identificação na pastilha é feita por um código de registro implantado no LED para arquivo das artes finais e essa numeração é do tipo L4-XXX.

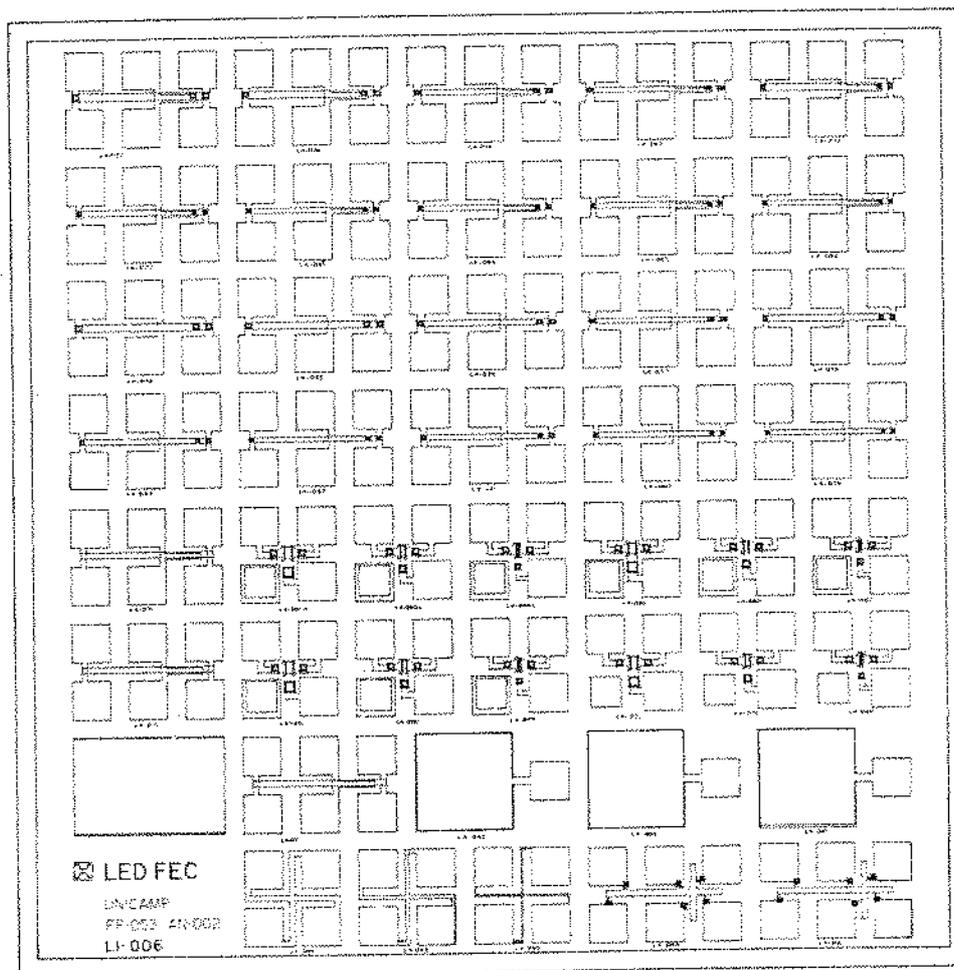


Figura 3.1 - Máscara utilizada para a confecção dos dispositivos estudados neste trabalho.

TABELA I
 RELAÇÃO DE TRANSISTORES DE CADA PASTILHA

Nº do Dispositivo	Fonte	Porta	Dreno	Comprimento do Canal L (μm)	Largura do canal W (μm)
L4-069	SnO ₂	SnO ₂ /SiO ₂	SnO ₂	6	60
L4-070	SnO ₂	SnO ₂ /SiO ₂	SnO ₂	15	60
L4-071	SnO ₂	SnO ₂ /SiO ₂	SnO ₂	30	60
L4-049	Al	SnO ₂ /SiO ₂	Al	6	60
L4-050	Al	SnO ₂ /SiO ₂	Al	15	60
L4-051	Al	SnO ₂ /SiO ₂	Al	30	60
L4-049-A	Al	SnO ₂ /Si	Al	6	60
L4-050-A	Al	SnO ₂ /Si	Al	15	60
L4-051-A	Al	SnO ₂ /Si	Al	30	60
L4-087	Al	Al/SiO ₂	Al	6	60
L4-088	Al	Al/SiO ₂	Al	15	60
L4-089	Al	Al/SiO ₂	Al	30	60

A figura 3.2 mostra a configuração dos transistores com os diferentes níveis de máscaras. Estes dispositivos vão permitir o estudo da tensão de limiar, da mobilidade, da transcondutância e das demais características de corrente e tensão.

Na tabela II relacionamos pelo número de identificação os capacitores e diodos construídos em cada pastilha, com suas respectivas dimensões

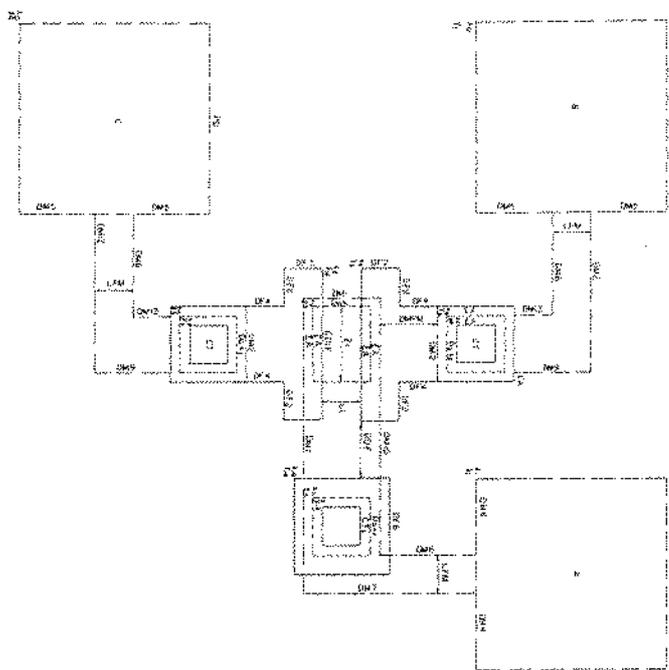


Figura 3.2 - Configuração dos transistores.

O objetivo da construção desses dispositivos foi a determinação de parâmetros tais como: espessura do ôxido de porta, concentrações efetivas de substratos N_A , densidade de cargas fixas, móveis e capturadas na interface, etc.

TABELA II

RELAÇÃO DE CAPACITORES E DIODOS DE CADA PASTILHA

NÚMERO	PORTA	ÁREA
L4-066	Capacitor de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$	$2,5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$
L4-092	Capacitor de $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$	$2,5 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-2}$
L4-067	Diodo de SnO_2/Si	$2,5 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-2}$

Na Tabela III, relacionamos os dispositivos para a medida de resistência de folha dos filmes de SnO_2 juntamente com o número de identificação na pastilha e respectivas dimensões.

TABELA III

ELEMENTOS DE VAN DER PAUW

NÚMERO	LARGURA DA LINHA
L4-095	10 μm
L4-095-A	20 μm
L4-095-B	30 μm

Na Tabela IV estão relacionados os elementos projetados para a medida da resistividade da camada difundida. Eles permitem também a medida da largura efetiva das linhas de difusão. Os dois elementos identificados por L4-061 e L4-084 são idênticos a menos dos contatos que são construídos com SnO_2 e Al respectivamente.

TABELA IV
ELEMENTOS PARA A MEDIDA DE RESISTIVIDADE DA
CAMADA DIFUNDIDA

NÚMERO	ELETRODOS
L4-061	SnO_2
L4-084	Al

A máscara permite ainda a medida de resistência de contato entre diferentes materiais tais como alumínio e dióxido de estanho e alumínio, cromo e dióxido de estanho, empregados para as conexões externas. Os elementos que permitem esta caracterização são identificados pelo código L4-071.

A resistência de contato entre o dióxido de estanho e o silício e entre o alumínio e o silício pode também ser medida nos dispositivos cuja configuração é mostrada na figura 3.3. Na Tabela V são identificados e relacionadas as dimensões dos dispositivos para a medida da resistência de contato entre SnO_2 e Si enquanto que na Tabela VI estão os dispositivos para a medida da resistência de contato entre o Al e o Si.

TABELA V
DISPOSITIVOS PARA MEDIDA DE RESISTÊNCIA
DE CONTATO ENTRE SnO₂/Si

NÚMERO	d (μm)	w (μm)	l_1 (μm)	l_2 (μm)	W (μm)
L4-074	20	20	40	600	40
L4-075	15	20	40	600	40
L4-076	10	20	40	600	40
L4-077	8	20	40	600	40
L4-078	10	10	40	600	30
L4-083	10	8	40	600	28
L4-082	8	10	40	600	30
L4-081	6	10	40	600	30
L4-080	6	8	40	600	28
L4-079	6	6	40	600	26

TABELA VI
DISPOSITIVOS PARA MEDIDA DE RESISTÊNCIA DE
CONTATO ENTRE Al/Si

NÚMERO	d (μm)	w (μm)	l_1 (μm)	l_2 (μm)	W (μm)
L4-057	20	20	40	600	40
L4-058	15	20	40	600	40
L4-059	10	20	40	600	40
L4-060	8	20	40	600	40
L4-073	10	10	40	600	30
L4-072	10	8	40	600	28
L4-065	8	10	40	600	30
L4-064	6	10	40	600	30
L4-063	6	8	40	600	28
L4-062	6	6	40	600	26

3.1.2. Processos de Fabricação

A sequência de etapas a que foram submetidas todas as lâminas de silício processadas é mostrada na figura 3.4. Além das etapas normalmente empregadas na fabricação de transistores MOS de canal n e porta metálica, que descrevemos sucintamente, são efetuadas ainda a deposição dos filmes de dióxido de estanho e sua fotogração, que descreveremos mais detalhadamente.

3.1.2.a. Caracterização das lâminas

Foram selecionadas lâminas de silício de boa qualidade (Wacker Co.), de condutividade tipo p, orientação cristalina (100), resistividade da ordem de 4.5 Ω cm e diâmetros de aproximadamente 2 polegadas conforme já dissemos anteriormente. A resistividade foi medida por quatro pontas.

3.1.2.b. Limpeza

Todas as etapas de limpeza seguiram as Instruções para Execução de Processos (IEP) implantadas no LED para a tecnologia MOS. A primeira etapa de limpeza consiste de lavagem em solvente orgânico (trícloretileno), seguida de lavagem em álcool metílico e água deionizada e posterior lavagem em solução oxidante para uma prévia oxidação da superfície do silício e remoção deste óxido por ácido fluorídrico. Este processo completo de limpeza está descrito na IEP LP-004 [58]. A etapa de limpeza que antecede a deposição de alumínio foi efetuada de acordo com o processo estabelecido na IEP LP-023 [59].

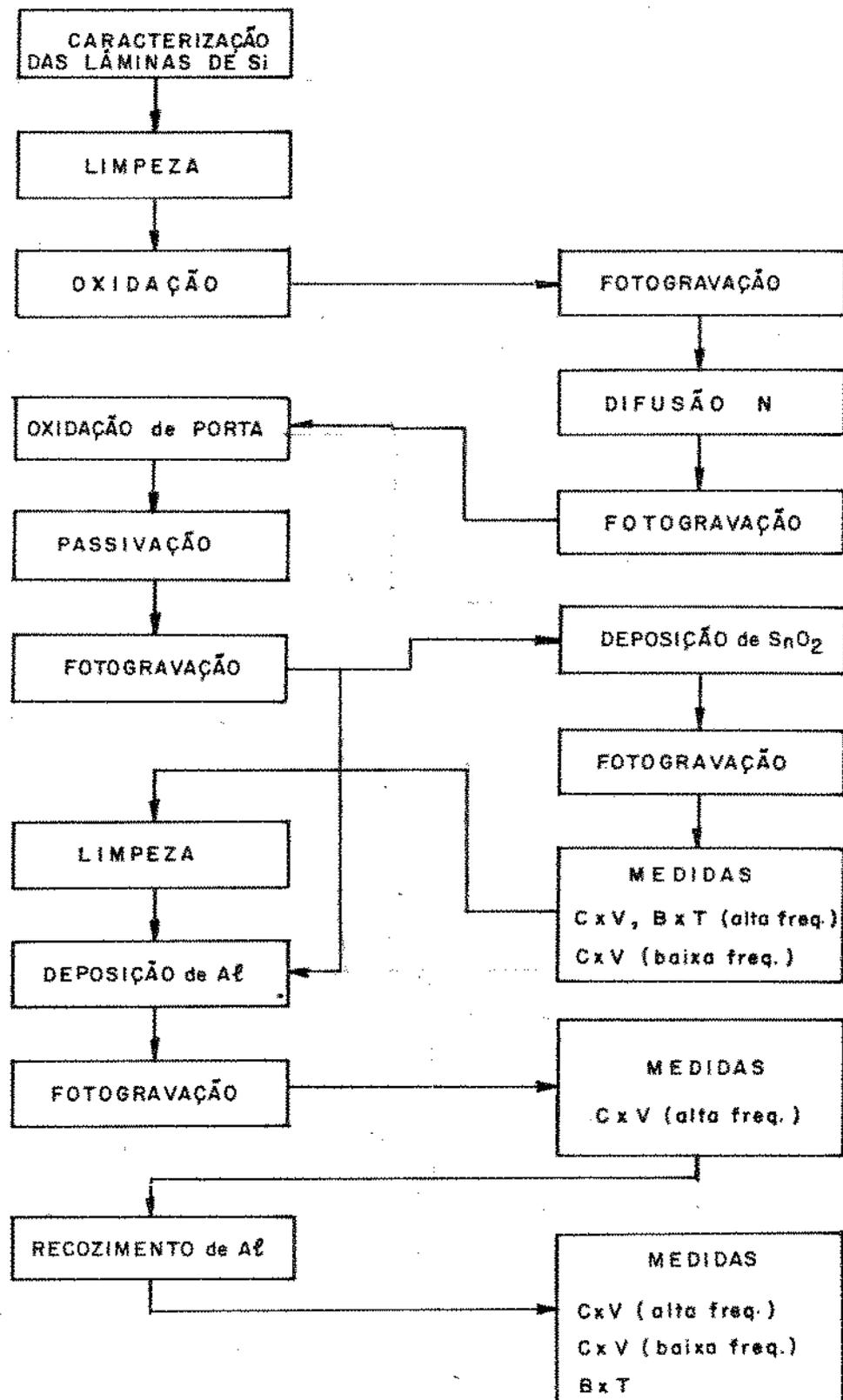


Figura 3.4. Sequência dos processos de fabricação dos transistores, capacitores e elementos de teste.

3.1.2.c. Oxidação e Passivação

A oxidação inicial do silício se processou por via úmida à temperatura de 1083°C seguindo-se as etapas de processamento descritas na IEP OX-001 |60|.

A oxidação de porta se processou por via seca, com e sem tricloroetileno (TCE) a 0.5%, à temperatura de 1083°C , de acordo com a IEP OX-005 |61|. Apenas 4 lâminas foram processadas sem TCE (LS-671,659,S e T) enquanto que as 18 anteriores foram processadas com TCE. A passivação do óxido de porta se processou a 925°C , durante 5 minutos, em atmosfera de oxiclreto de fósforo (POCl_3) seguida de recozimento em atmosfera de nitrogênio, por 10 minutos, conforme estabelecido na IEP DF-020 |62|.

3.1.2.d. Difusão

A difusão de fonte e dreno foi efetuada a partir de oxiclreto de fósforo (POCl_3) à temperatura de 900°C durante 30 minutos para a deposição e 1000°C durante 120 minutos para a penetração, conforme IEP DF-012 |63|.

3.1.2.e. Fotogravação do SiO_2

A fotogravação do SiO_2 para a definição das regiões de porta, fonte e dreno foi efetuada por via úmida empregando-se ácido fluorídrico, conforme sequência de etapas descritas na IEP FL-005 |64|.

3.1.2.f. Deposição, Recozimento e Fotogravação de Alumínio

A evaporação de alumínio foi feita empregando-se um evaporador com canhão de elétrons Edwards Modelo E-19E, operando a 10^{-6} torr, com tensão de aceleração de 10 KV e

corrente do feixe de elétrons de 0,3 mA. A espessura do filme depositado foi monitorada com um detetor de cristal.

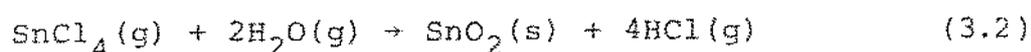
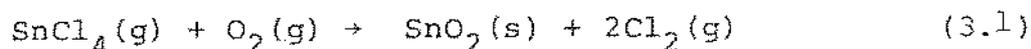
A fotografação do alumínio tanto sobre o Si e o SiO₂ como sobre o SnO₂ foi efetuada por via úmida usando-se fotorresiste AZ1350-J e ácidos fosfórico e nítrico, de acordo com o processo estabelecido na IEP FL-009 [65].

Os filmes de alumínio foram recozidos em atmosfera de nitrogênio (N₂) úmido à temperatura de 450°C, durante 30 minutos, de acordo com a IEP DF-008 [66].

3.1.3. Deposição dos Filmes Finos de SnO₂

Um estudo dos métodos de deposição de filmes finos de óxidos metálicos semicondutores descritos no capítulo 1, entre os quais a evaporação térmica simples e por canhão de elétrons, a evaporação de metais e posterior oxidação, a atomização (spraying), a deposição química a partir de vapor e a pulverização catódica (sputtering), culminou com o desenvolvimento, em nosso Laboratório, de uma técnica simples de deposição, denominada Método de Decomposição de Vapores [67, 68, 69].

A técnica de decomposição de vapores consiste na produção de tetracloreto de estanho na forma de vapor e posterior decomposição e oxidação deste vapor sobre os substratos em que se quer crescer os filmes de SnO₂. As reações químicas de oxidação que podem ocorrer são:



Emprega-se o sistema de deposição mostrado na figura 3.5 onde os vapores são produzidos pelo gotejamento da solução de partida sobre uma placa aquecida (câmara da calefação). Esses vapores são transportados por um fluxo de nitrogênio até a câmara de deposição onde sofrem a oxidação sobre os substratos aquecidos.

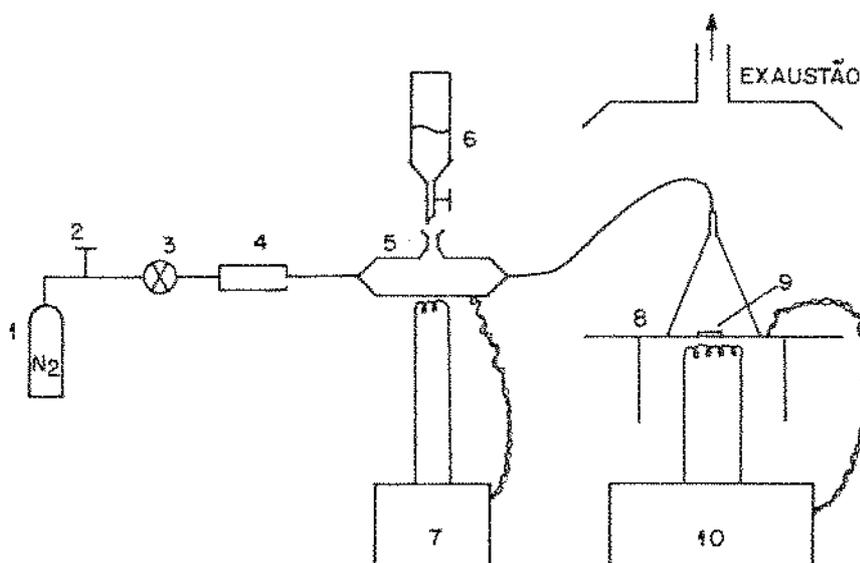


Figura 3.5 - Sistema de deposição de filmes de SnO_2 por decomposição de vapores com: sistema de controle de gás composto de cilindro de gás (1), válvula (2), manômetro (3) e rotâmetro (4); câmara de calefação (5); gotejador (6); controlador de temperatura até 200°C (7); câmara de deposição (8); substratos (9); e controlador de temperatura até 650°C (10).

A solução de partida empregada na deposição dos filmes finos de SnO_2 não dopados foi obtida a partir de:

- dissolução de 80g de cloreto estânico (SnCl_4) em 200 ml de ácido acético glacial.
- aquecimento até completa diluição.
- resfriamento.
- adição de metanol até dobrar o volume.
- adição de 20 ml de anidrido acético.

A introdução de dopantes, no caso o antimônio, é efetuada pela adição de cloreto de antimônio (SbCl_3) à solução de partida, em proporções adequadas.

Preparada para uso, a solução é acondicionada em frascos de vidro de cor âmbar, bem fechados. O volume total obtido para uma solução preparada segundo as condições acima é de aproximadamente 500 ml.

3.1.4. Fotografação dos Filmes de SnO_2

Embora existam, na literatura, referências a técnicas de ataque, por via úmida e eletroquímica, a filmes de óxidos semicondutores de um modo geral [70,71,72], estas técnicas se aplicam melhor ao óxido de índio (In_2O_3) e ao óxido misto de índio e estanho (ITO), dada a alta resistência química do dióxido de estanho. No caso deste último, de modo a garantir a obtenção de figuras de boa resolução, tivemos que rever o processo por via úmida citado [70], o qual relatamos detalhadamente a seguir. Por sua vez, o processo de ataque eletroquímico [71] não foi utilizado uma vez que tivemos sucesso no estabelecimento de uma técnica de ataque por via seca (plasma) que, sem dúvida nenhuma, apresenta vantagens em relação às técnicas por via úmida, conforme também relatamos a

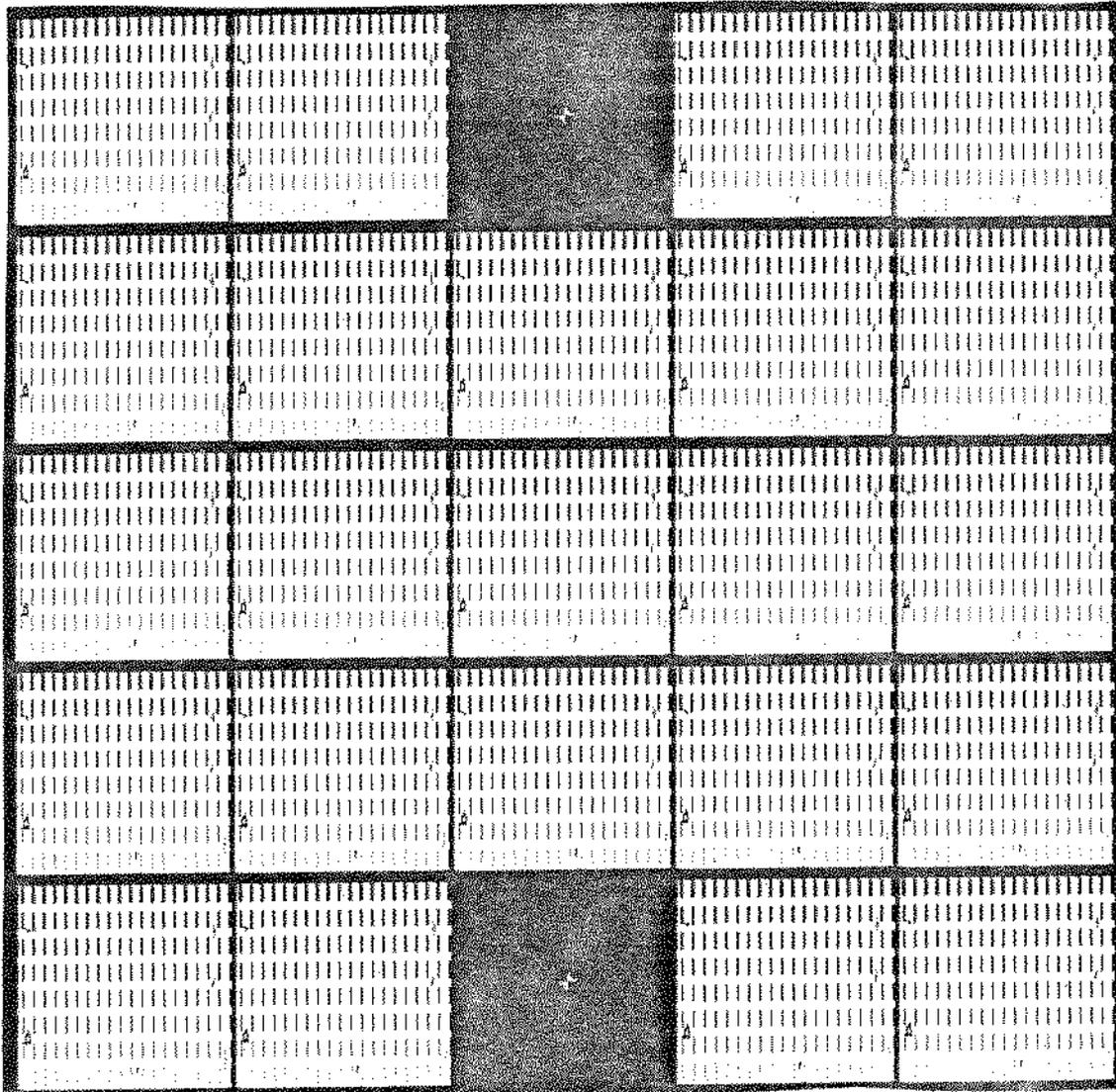


Figura 3.6 - Máscara utilizada para estudo da fotogravação de SnO₂.

seguir.

3.1.4.a. Ataque dos Filmes de SnO₂ por Via Úmida

O método se baseia na reação de redução do dióxido de estanho por hidrogênio ativo e ataque do estanho metálico por ácido clorídrico. O hidrogênio ativo é produzido na reação de ácido clorídrico com zinco metálico.

O processo de fotogração foi estudado empregando-se a máscara mostrada na figura 3.6, a qual consiste de fitas e linhas de várias larguras, entre 4.8µm e 80µ, por 400µm de comprimento. Esta máscara permite tanto a abertura de janelas como a produção de linhas nos filmes de SnO₂, nas dimensões acima citadas. Foi utilizado o fotorresiste 111-S da Shipley, aplicado por microcentrifugação a 5000 rpm, durante 20 segundos. A película, de espessura de aproximadamente 1µm, foi então recozida a 90°C durante 120 minutos, o que garante sua aderência e alta resistência química.

O método de ataque consistiu de duas etapas distintas as quais foram acompanhadas em um microscópio óptico da Bausch-Lomb. Na primeira etapa aplicamos em toda a superfície da lâmina uma camada fina e homogênea de uma pasta preparada com pó fino de zinco metálico e água (Zn:H₂O). O zinco em pó utilizado foi do tipo comum encontrado no mercado, sem especificação da concentração de impurezas. De modo a se conseguir um pó fino, o mesmo era triturado em almofariz e coado em uma peneira de malha fina, após o que se preparava a emulsão em água. As lâminas de silício recobertas com esta emulsão eram então mergulhadas em solução de ácido clorídrico, de qualidade P.A., em água na concentração de 1:15. Nesta fase parece-nos que a reação do zinco com o ácido produz hidrogênio responsável pela redução do dióxido de estanho.

Na segunda fase a lâmina de silício é mergulhada em solução de HCl concentrado onde, por agitação, se processa a parte final do ataque. O processo completo de ataque está descrito na IEP LP-021 |73|.

Apesar de notarmos nitidamente as duas fases do processo de ataque, as mesmas não puderam ser analisadas em virtude de não dispormos de condições para efetuar esta análise.

3.1.4.b. Ataque dos Filmes de SnO₂ por Via Seca

Utilizamos um sistema de ataque por plasmas projetado e construído no LED |74| o qual foi reprojeto e reconstruído por nós, conforme descrito no Apêndice A.

O método de ataque, por plasma, de filmes de SnO₂ foi desenvolvido por nós |75| para o que utilizamos o sistema descrito acima. As amostras de SnO₂, foram preparadas utilizando-se a aplicação de uma camada de fotorresista 1350H da Shipley, as quais foram expostas à luz ultra-violeta através de uma máscara apropriada para avaliação de resolução, e em seguida reveladas e submetidas a um pós-recozimento a 900°C durante 30 minutos |76|. As condições para ataque por plasma, foram obtidas em um campo de radio-freqüência operando a 13.56 MHz, com potência total de 100 W aplicada no eletrodo superior o que corresponde a uma densidade de aproximadamente 1,5 W/cm² para uma corrente de rádio freqüência de 0,6 A. A mistura reagente introduzida na câmara foi obtida pelo borbulhamento de um fluxo de 10 cm³/min de nitrogênio (N₂) através de tricloroetileno mantido a 23°C. A pressão no interior da câmara durante o processo foi mantida em 150 mtorr. O final do processo de ataque do SnO₂ foi detectado visualmente.

Se bem que na construção dos dispositivos estudados neste trabalho as etapas fotolitográficas tenham sido efetuadas principalmente por via úmida, estudaram-se as técnicas de ataque por plasma, em particular para o fotorresistente, o alumínio, o cromo, o dióxido de silício e para o silício [77]. Foram ainda estudadas técnicas de detecção de ponto final de ataque [78] bem como um método de medida de taxa de ataque "in situ" [79].

3.2. Métodos e Condições de Medidas

Nesta parte de nosso trabalho faremos uma exposição sucinta sobre os métodos e condições de medidas utilizados na caracterização dos filmes finos de SnO_2 e dos dispositivos objeto deste trabalho uma vez que estes métodos já estão detalhadamente estudados, na literatura.

3.2.1. Caracterização dos Filmes Finos de SnO_2

As características estruturais de filmes finos de SnO_2 foram estudadas usando-se difração de Raios X. Os diagramas de difração foram obtidos num difratômetro Rigaku-Denki SG8, com radiação de Cobre (linha $K\alpha$) filtrada com níquel. Um cálculo aproximado da dimensão dos grãos no filme foi feito usando-se a fórmula de Scherrer:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cdot \cos\theta} \quad (3.3)$$

onde K é uma constante com valor próximo de um, λ é o comprimento de onda da radiação utilizada, D o diâmetro dos cristalitos e β é a largura diferencial da linha, obtida por comparação com as linhas de um padrão de alumina ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) de

tamanho de grão controlado, de $1\mu\text{m}$ [80,81].

As medidas de transmitância ótica foram obtidas com um espectro de duplo feixe Zeiss DMR 21, operando na faixa de 180 a 3500 nm [68].

A observação da topografia da superfície foi efetuada com um microscópio eletrônico de varredura Cambridge com microsonda associada, a qual permitiu a microanálise química qualitativa dos filmes, pela técnica de análise da energia da radiação emitida [68].

A uniformidade e a espessura dos filmes de dióxido de estanho foi medida empregando-se um microscópio interferométrico Leitz, com iluminação monocromática de 546 nm, acoplado a uma câmera e a um receptor de TV.

A resistividade dos filmes de SnO_2 , assim como das lâminas de silício foi medida pelo método de quatro pontas, empregando-se um sistema da K. & Soffa e um milliometro Keithley. Depois do processo fotolitográfico utilizamos os elementos de Van der Pauw para essas medidas.

3.2.2. Método de Medida das Cargas Presentes no Óxido

3.2.2.1. Cargas na Interface de SiO_2/Si

A densidade de cargas na interface do sistema SiO_2/Si foi determinada pelo método CxV em alta frequência. Para tanto determina-se a capacitância diferencial de alta frequência (C) em função da tensão contínua de polarização (V) aplicada à porta do capacitor. A tensão em rampa aplicada é suficientemente lenta e sobreposta a ela, aplicamos um pequeno sinal alternado de frequência convenientemente elevada. A simples comparação da curva experimental obtida com

uma curva calculada para um capacitor ideal, com mesma diferença de funções de trabalho e carga nula na interface, permite determinar o deslocamento da tensão de banda plana (V_{FB}). Em outras palavras, utilizando-se o valor da capacitância de banda plana (C_{FB}) de uma estrutura ideal, calcula-se qual a carga positiva Q_S localizada próxima à interface, necessária para produzir este deslocamento V_{FB} , desde que se admita apenas o efeito desta carga neste deslocamento. A frequência suficientemente elevada do sinal alternado aplicado impede que os estados da interface se carreguem e descarreguem acompanhando o sinal, evitando desse modo a introdução de capacitâncias parasitas adicionais, as quais tornariam inviável o cálculo da capacitância de banda plana para o capacitor ideal necessário a essa comparação.

A velocidade suficientemente lenta da rampa utilizada garante que o semiconductor permaneça em equilíbrio com este sinal. Nesta condições, a determinação da curva CxV equivale a uma medida ponto a ponto, possibilitando que os estados de superfície acompanhem o sinal em rampa.

Na figura 3.7 é mostrada a montagem utilizada nestas medidas. O sinal diferencial é produzido no medidor de capacitância Boonton Mod. 72 B, na frequência de 1 MHz e sua amplitude não excede a 1 mV. A rampa é produzida por um gerador de funções HP 3310A operando a 0.01 Hz.

Durante as medidas de capacitância as amostras foram mantidas em ambiente escuro uma vez que a luz pode ter efeitos importantes na capacitância. Observamos esses efeitos no caso de algumas estruturas de $SnO_2/SiO_2/Si$ quando medimos as características de CxV em alta frequência iluminando as amostras com uma lâmpada de tungstênio-halogênio tipo ELH, simulando as condições de radiação solar AM1, com intensidade de 100 mW/cm^2 [72].

Ambas as medidas de CxV em alta frequência, com luz e sem luz, foram efetuadas aplicando-se pontas de tungstênio de diâmetro de 30 μ m sobre os eletrodos de porta, às quais estão conectados os circuitos externos. Todas as medidas descritas a seguir foram também efetuadas empregando-se estas pontas para as conexões sobre os eletrodos.

3.2.2.2. Cargas Móveis N_m

As curvas CxV de alta frequência obtidas após a submissão das amostras a esforços de tensão e temperatura (ensaio de BxT), permitem a determinação da densidade de íons móveis no óxido isolante. Para óxidos instáveis a tensão de banda plana se deslocará em função do tempo e da temperatura, para tensões positivas e negativas aplicada à porta do capacitor, este deslocamento estando associado ao movimento das cargas móveis no óxido. A concentração total de íons móveis pode ser obtida desde que a tensão e o tempo em que o esforço é aplicado a uma temperatura fixa sejam tais que o deslocamento da tensão de banda plana atinja uma saturação.

Em nosso trabalho, seguimos o seguinte roteiro para estas medidas:

1. Medida de CxV em alta frequência à temperatura ambiente.
2. Aplicamos uma tensão positiva à porta do capacitor de + 15V.
3. Elevamos a temperatura da amostra até 180°C.
4. Esfriamos a amostra à temperatura ambiente.
6. Removemos a tensão aplicada.
7. Executamos novamente a medida de CxV em alta frequência.
8. Determinamos o deslocamento da tensão de banda plana.
9. Calculamos em seguida o valor de N_m .

O aquecimento das amostras é obtido por efeito joule num sistema construído no LED especialmente para este fim, sendo que a tensão contínua aplicada durante o aquecimento é obtida de uma fonte de alimentação DC IT-026, projetada e construída no LED. Durante o ensaio a temperatura é determinada com um termopar de cromel-alumel. Em seguida as medidas de capacitância são efetuadas conforme descrito no item anterior, utilizando-se o arranjo da figura 3.7.

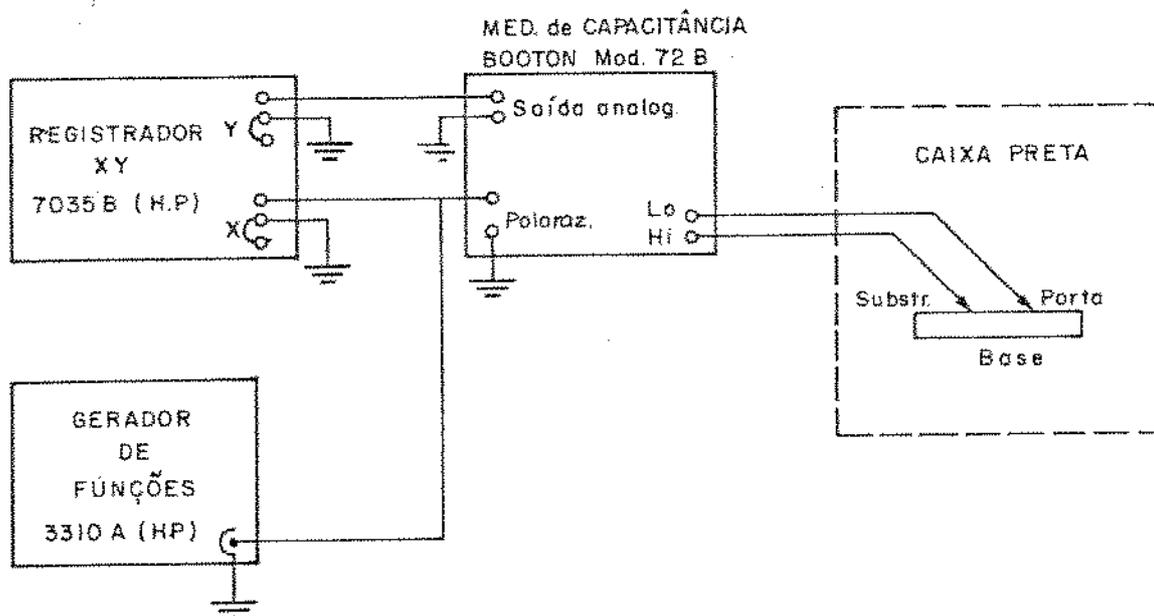


Figura 3.7 - Montagem utilizada para medição de $C_{\omega V}$ em alta frequência em capacitores de SnO_2/Si e de $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$

3.2.2.3. Cargas Capturadas na Interface Q_{it}

A densidade de cargas capturadas na interface Q_{it} é determinada pelo método IxV quase estático pelo qual se mede a corrente de carga de um capacitor MOS em função de uma tensão que varia linear e lentamente com o tempo, aplicada ao capacitor, $V = Kt$ com K da ordem de poucas dezenas de milivolts por segundo.

A corrente de carga no capacitor, medida em função da tensão aplicada, vale:

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{dQ}{dV} \cdot \frac{dV}{dt} = KC(V) \quad (3.4)$$

A curva IxV representa a capacitância em função da tensão, em baixas frequências, a menos do coeficiente multiplicador $1/K$. A variação lenta da tensão com o tempo garante o equilíbrio térmico do semicondutor com o sinal de rampa. Este método é também conhecido como método de varredura por tensão triangular (TVS) onde a condição de equilíbrio quase estático é verificada pela simetria da curva obtida para tensões de polarização de ambos os sinais e com a mesma taxa de variação no tempo (sinal triangular entre +V e -V) [29]. Esta condição também está garantida se o valor da capacitância de inversão se mantiver constante e igual a capacitância do óxido, o que significa que os portadores minoritários estão acompanhando o sinal aplicado.

O método em questão permite a determinação da densidade de estados na interface N_i . Se medirmos a capacitância mínima em baixa frequência, C_{LF} , a qual é suposta como resultante da associação série entre a capacitância do óxido C_{Ox} e a capacitância equivalente à associação em paralelo das capacitâncias do silício C_{Si} e da atribuída aos estados

de interface C_i , isto é:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{LF}} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{Si} + C_i} \quad (3.5)$$

A capacitância C_{Si} corresponde a capacitância diferencial do silício, em baixa frequência associada às camadas de depleção, acumulação e de inversão.

A partir da relação 3.5 C_i pode ser calculada como:

$$C_i = qN_i = \frac{C_{LF}}{1 - \frac{C_{LF}}{C_{ox}}} - C_{Si} \quad (3.6)$$

A técnica gráfica proposta por Van Overstraten et al [82] permite uma avaliação de C_i associada aos estados no meio da banda proibida desde que se conheça a dopagem do substrato (o que permite calcular C_{Si}), a espessura do óxido (o que permite calcular C_{ox}) e que se tenha o resultado experimental da capacitância mínima em baixa frequência (C_{LF}).

Na figura 3.8 é mostrado o arranjo experimental utilizado na medida das cargas capturadas na interface, onde se utilizou uma rampa de $K = 18 \text{ mV/s}$, empregando-se um gerador de sinais HP3310 operando a 0.001 Hz . A corrente de carga (ou de descarga) do capacitor foi medida num eletrômetro Keythley 610 C e registrada num registrador XY HP 7035-B.

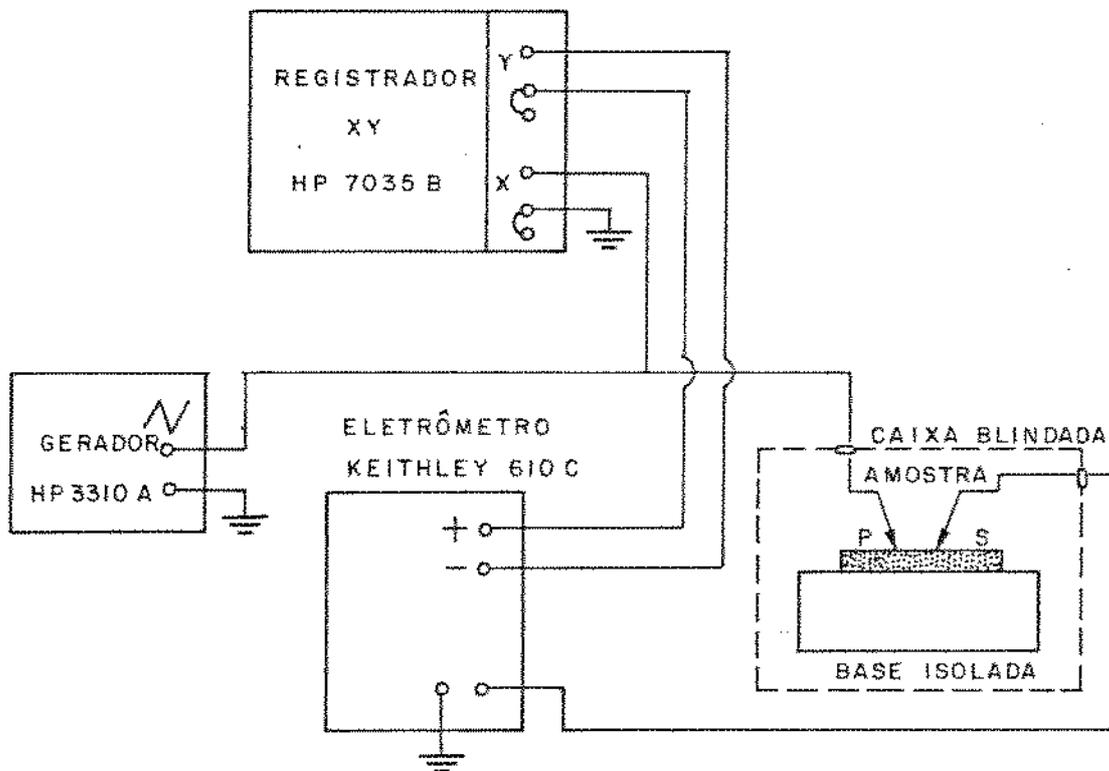


Figura 3.8 - Montagem utilizada para medidas $I \times V$ quasi-es
táticas.

3.2.3. Determinação do Campo Elétrico de Ruptura do Óxido Isolante (SiO_2)

O campo elétrico de ruptura (E_r) do óxido isolante de um capacitor de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ é medido aplicando-se tensão entre os eletrodos de porta e de substrato até que ocorra a ruptura dielétrica do SiO_2 . Determinada a tensão de ruptura V_r calcula-se E_r por:

$$E_r = \frac{|V_r|}{t_{\text{ox}}} \quad (3.7)$$

A polaridade da tensão aplicada deve ser negativa de modo a causar a acumulação na superfície do semicondutor, o que garante que toda a tensão externa esteja praticamente aplicada no óxido de silício.

A tensão de ruptura foi determinada num traçador de curvas Tektronix, ajustando-se manualmente a tensão negativa aplicada entre porta e substrato até se observar um aumento instantâneo da corrente de fuga. Este valor de tensão corresponde à tensão de ruptura V_R . Conhecendo-se a espessura do óxido (determinada pela curva CxV, por exemplo) calcula-se E_R .

3.2.4. Características Elétricas dos Transistores

Foram medidas as características de corrente de dreno I_D em função da tensão entre dreno e fonte V_D para diferentes valores de tensão aplicada à porta V_P . Utilizou-se inicialmente um traçador de curvas Tektronix e as curvas características foram fotografadas. As mesmas medidas foram efetuadas utilizando-se a montagem mostrada na figura 3.9, onde a tensão é fornecida por um gerador HP 3310 A operando a baixas frequências. A corrente é medida num eletrômetro Keythley 610 C e a tensão de porta V_P foi ajustada manualmente numa fonte de alimentação IT-026, fabricada no LED. As curvas de $(I_D \times V_D)_{V_P=cte}$ eram registradas num registrador XY HP 7035 B.

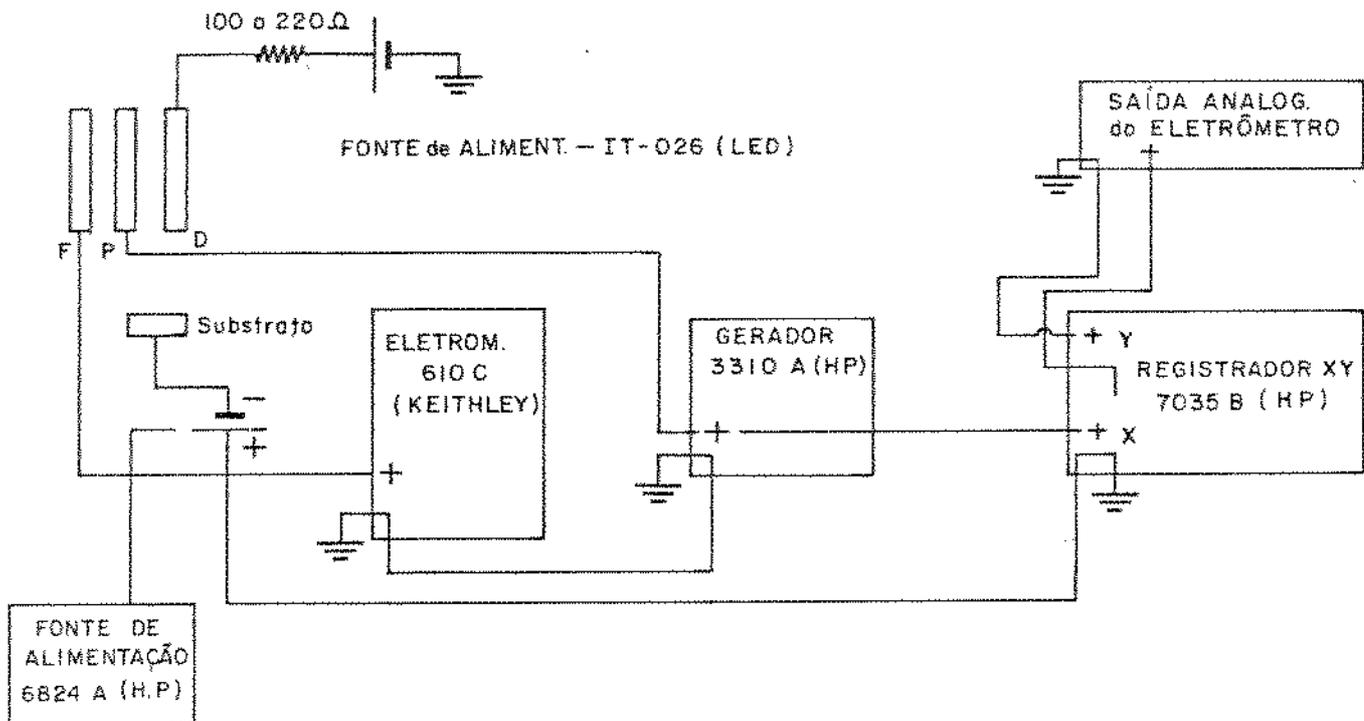


Figura 3.9 - Esquema utilizado para medida das características $I_D \times V_D$ com V_P como parâmetro dos transistores operando na região de saturação.

4. RESULTADOS

Neste capítulo apresentamos os resultados obtidos na caracterização dos filmes de SnO_2 e dos dispositivos de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$, em particular na caracterização da interface de SiO_2/Si . Os resultados obtidos para os dispositivos de MOS são também apresentados para comparação.

4.1. Propriedades dos Filmes Finos de SnO_2

O método de deposição por decomposição de vapores permitiu obter filmes uniformes, de baixa resistividade e boa aderência aos três tipos de substratos empregados, de quartzo, vidro e silício, para diferentes temperaturas dos substratos e diferentes composições da solução partida.

A espessura dos filmes finos de SnO_2 , medida por interferometria e por elipsometria, conforme descrito no ítem 3.2.1, situou-se na faixa de 1000 a 3000 Å, dependendo do tempo de deposição e da temperatura do substrato durante a deposição [67,68,69].

A resistividade elétrica dos filmes de SnO_2 foi estudada observando-se que ela depende da temperatura de deposição, diminuindo rapidamente de 20 a $5 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$, para temperaturas decrescendo de 300 a 350°C, e mais lentamente, de 5 a $5 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$, para temperaturas decrescendo de 350 a 400°C [67,68,69]. A introdução de antimônio como dopante permite diminuir ainda mais a resistividade dos filmes atingindo-se valores entre 5 e $1 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ para concentrações entre 0,01m% e 0,1m% de SbCl_3 na solução de partida e temperaturas de deposição de 350°C.

A transmitância óptica dos filmes de SnO_2 crescidos sobre vidro foi estudada na faixa de 400 nm a 2500 nm, obtendo-se valores acima de 85% entre 400 e 1200 nm, com uma diminuição sensível para comprimentos de ondas acima de 1200 nm [67,68,69]. A transmitância óptica depende da temperatura de deposição e da concentração de antimônio [67,68,69].

Nossos resultados confirmam os resultados de outros autores anteriormente apresentados de que o índice de refração dos filmes de SnO_2 varia na faixa de 1.7 a 2.0, a 600 nm, para diferentes temperaturas de deposição. Ele depende também da concentração de antimônio [67,68,69].

Quanto às propriedades cristalográficas dos filmes, obtidas pela técnica de difração de raios X citada no capítulo 3, verificou-se que os filmes de SnO_2 eram do sistema tetragonal e policristalinos para as temperaturas de deposição entre 300°C e 450°C. A partir dos cálculos de intensidades relativas dos picos, observou-se uma orientação preferencial na direção (200) no caso dos filmes depositados sobre substratos amorfos (vidro e quartzo). O tamanho médio dos grãos foi medido na faixa de 70 a 150 Å para espessuras dos filmes entre 500 e 1000 Å pela comparação com a largura dos picos para um padrão de Al_2O_3 de grãos de diâmetro de 1 µm [80 e 81].

Os filmes foram analisados por microscopia óptica e por microscopia eletrônica de varredura, tendo-se constatado sua homogeneidade e tamanho dos grãos da ordem de 100 Å comparável aos resultados obtidos por difração de raios X [67,68,69].

A composição química qualitativa dos filmes obtida com a microsonda eletrônica indicou a presença de traços de cloro em todas as amostras estudadas e do antimônio nas amostras em que foi propositalmente introduzido como

dopante. Nenhum outro contaminante foi detetado dentro dos limites de resolução da técnica. A análise química da superfície, efetuada por espectrometria de elétrons (ESCA), não indicou a presença de estanho na forma metálica ou de outras fases do óxido de estanho, como por exemplo, o SnO [67,68,69].

4.2. Fotogravação dos Filmes de SnO₂

Tendo em vista que, para a construção dos dispositivos, objeto de estudo deste trabalho, necessitamos fotografar figuras de 10µm de dimensões mínimas, caracterizamos inicialmente as técnicas fotolitográficas por via úmida e por plasma descritas no capítulo 3.

Obedecendo a sequência de etapas de fotogravação no ítem 3.1.4. várias sequências de ensaios em filmes finos de SnO₂ foram efetuadas obtendo-se boa reprodutibilidade no ataque de linhas de 10µm conforme observamos por microscopia óptica. Os resultados se repetiram para diferentes substratos não tendo sido observadas diferenças nas características do ataque destes filmes sobre vidro, quartzo, dióxido de silício e silício monocristalino de direções (111) e (100). As características do ataque também não foram diferentes para filmes obtidos em diferentes condições de deposição ou com diferentes concentrações de antimônio como dopante.

Ainda empregando a sequência de etapas descritas em 3.1.4 para fotolitografia por via úmida e utilizando a máscara de teste de resolução mostrada na figura 3.6, com largura de linhas que vão gradualmente desde 80µm até 4.8µm, obtivemos, nos filmes de SnO₂, as linhas mostradas na figura 4.1. A análise das linhas obtidas permite-nos supor que o limite de resolução da técnica não foi atingido, uma vez que estávamos limitados pela máscara utilizada, cujas dimensões mínimas eram de 4.8µm.

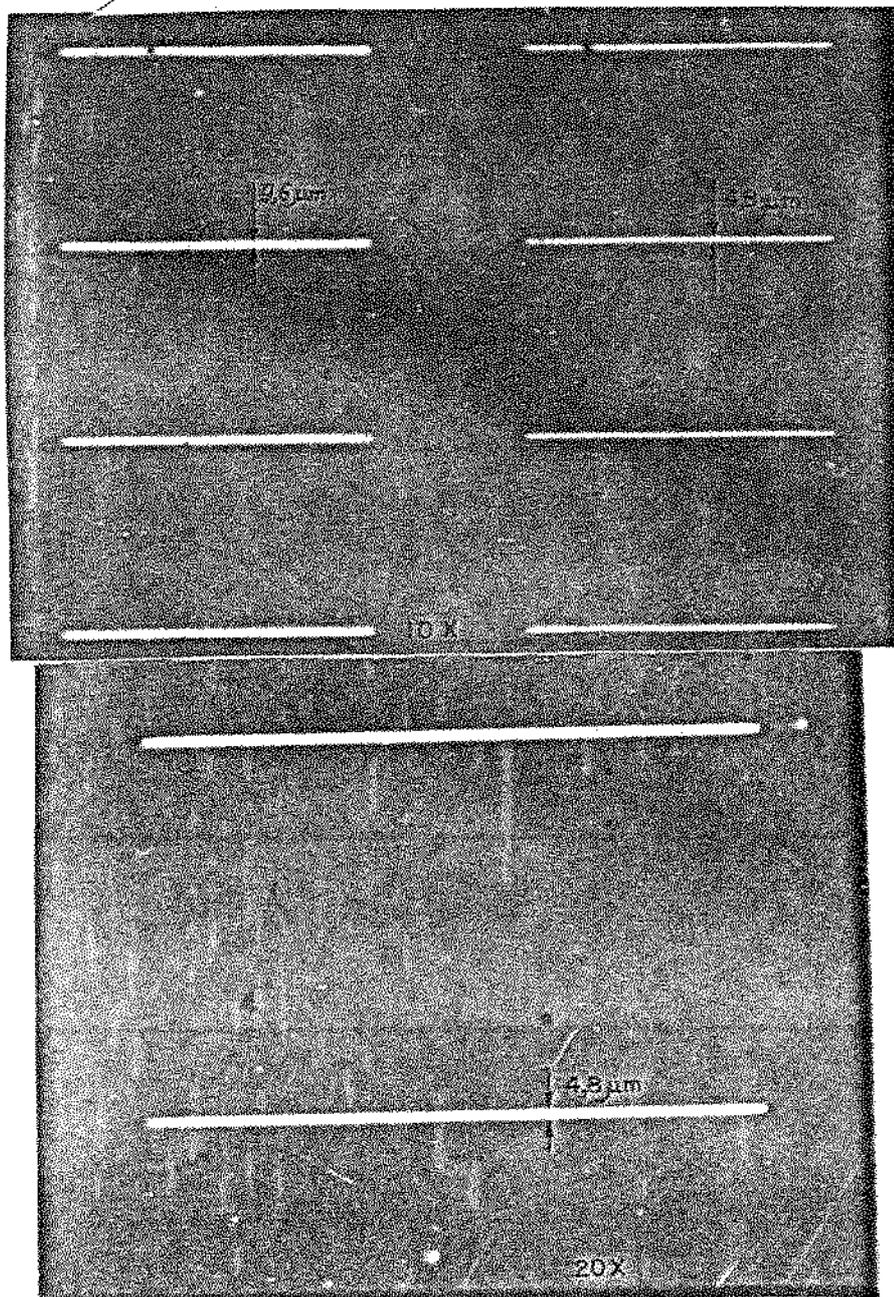


Figura 4.1 - Fotografias obtidas em microscópio, de linhas de $4.8\mu\text{m}$ e $9.6\mu\text{m}$, fotogravadas em filmes de SnO_2 , por via úmida: a) com aumento de 10x; b) com aumento de 20x.

A técnica de fotogração por plasma descrita também no ítem 3.1.4, mostrou-se repetitiva em diversas séries de amostras, sendo que as características do ataque não foram diferentes para os diversos substratos utilizados. Tão pouco os resultados dependem das condições de deposição dos filmes ou de sua dopagem com antimônio. A resolução neste caso foi determinada pelo emprego da máscara de teste mostrada na figura 4.2, cuja largura mínima de linha é de 6μ . Também neste caso o limite da técnica não pode ser determinado uma vez que estávamos limitados pela máscara utilizada, cujas dimensões mínimas eram de $6\mu\text{m}$.

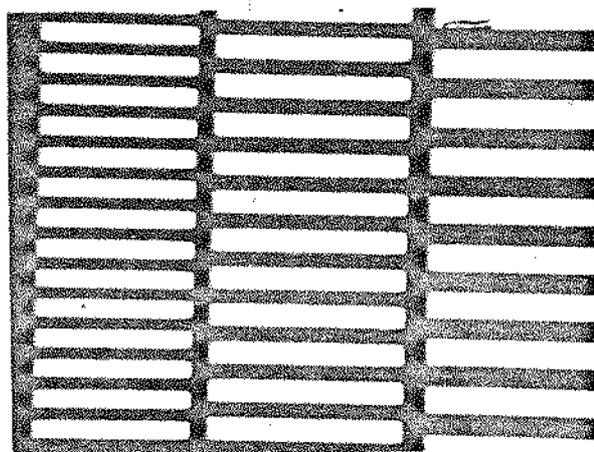


Figura 4.2 - Fotografia obtida em microscópio de linhas de $6\mu\text{m}$ gravadas em filmes de SnO_2 por via seca. As áreas claras correspondem ao Si e as escuras ao SnO_2 .

4.3. Capacitores de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$

Com o objetivo de se estudar a interface de

SnO₂/Si os capacitores de SnO₂/SiO₂/Si descritos no item 3.1.1 foram caracterizados pelas técnicas CxV em alta frequência, BxT e IxV quasi-estática, de modo a se determinar a densidade de cargas presentes na região próxima à interface, a densidade de íons móveis que contaminam o óxido isolante e a densidade de cargas em estados na interface.

Os capacitores foram construídos seguindo-se as etapas de processamento descritas no fluxograma da figura 3.4. De acordo com este fluxograma as medidas de CxV em alta frequência para os capacitores de SnO₂/SiO₂/Si puderam ser efetuadas nas seguintes etapas:

- a. após a deposição e a fotografação do SnO₂;
- b. após a metalização e a fotografação do alumínio;
- c. após o recozimento do alumínio.

As amostras de Al/SiO₂/Si com oxidação de porta com TEC foram tanto medidas logo após a metalização como também depois do recozimento do alumínio.

Foram ainda medidas as características CxV em alta frequência e BxT para amostras de SnO₂/SiO₂/Si e de Al/SiO₂/Si obtidas com oxidação de porta sem TCE, para comparação com amostras obtidas com TCE.

Na figura 4.3 mostramos as curvas típicas de capacitância em função da tensão, obtidas na frequência de 1 MHz pelo método descrito no item 3.2.2, para um capacitor de SnO₂/SiO₂/Si, com óxido de porta crescido por via seca com TCE, logo após a deposição e a fotografação do SnO₂. Este capacitor corresponde à estrutura L4-066, de 500x500µm, da pastilha (2,5) da lâmina LS-657. A partir desta curva determinaram-se a capacitância do óxido (C_{ox}); a espessura do óxido (t_{ox}); a concentração efetiva de portadores no substrato (N_A^{*}) obtida a partir da capacitância de depleção; a capacitância de banda plana para uma estrutura ideal (C_{FB}) e o des

locamento da tensão de banda plana em relação ao valor da estrutura ideal (V_{FB}). A densidade de cargas presentes na interface N_S é calculada a partir do deslocamento da tensão de banda plana. Na Tabela VII são mostrados os resultados obtidos para todas as grandezas acima acompanhados dos respectivos desvios avaliados, no caso da amostra mencionada (L4-066-(2,5) - LS-657).

Os mesmos resultados foram obtidos para as demais pastilhas (22) da mesma lâmina LS-657. Neste caso calcularam-se os valores médios e respectivos quadráticos médios, os quais estão mostrados na Tabela VIII. As mesmas medidas efetuadas para outras 30 pastilhas de diferentes lâminas levaram dos resultados mostrados na Tabela VIII, juntamente com os desvios quadráticos médios.

Na figura 4.4 é mostrado um resultado típico de CxV em alta frequência para os capacitores de Al/SiO₂/Si obtidos por oxidação com TCE, correspondente a amostra L4-092 da pastilha (2,5) da lâminas LS-656. Os valores obtidos para C_{ox} , t_{ox} , N_A^* , C_{FB} , V_{FB} e N_S estão também relacionados na Tabela VII.

Ainda na figura 4.3 é mostrado o comportamento da capacitância em função da tensão obtido sob iluminação solar simulada de 100 mW/cm², conforme descrito no item 3.2.2.1.

Na figura 4.5 é mostrado um resultado típico da medida CxV antes e após um esforço de tensão e temperatura (ensaio BxT) efetuado a 180°C durante 15 minutos para uma amostra de SnO₂/SiO₂/Si, correspondente ao dispositivo L4-066 da pastilha(2,5) da lâmina LS-A. A partir do deslocamento da tensão de banda plana (ΔV_{FB}) determinou-se a concentração de íons móveis N_m cujo valor médio para duas amostras está relacionado na Tabela I. As mesmas medidas foram efetuadas para os capacitores de Al/SiO₂/Si obtendo-se o valor médio para duas amostras também relacionado na Tabela VII.

Na figura 4.6 é mostrado o resultado da medi-
da da corrente de carga de um capacitor de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ quan-
do se aplica uma tensão variando lenta e linearmente com o

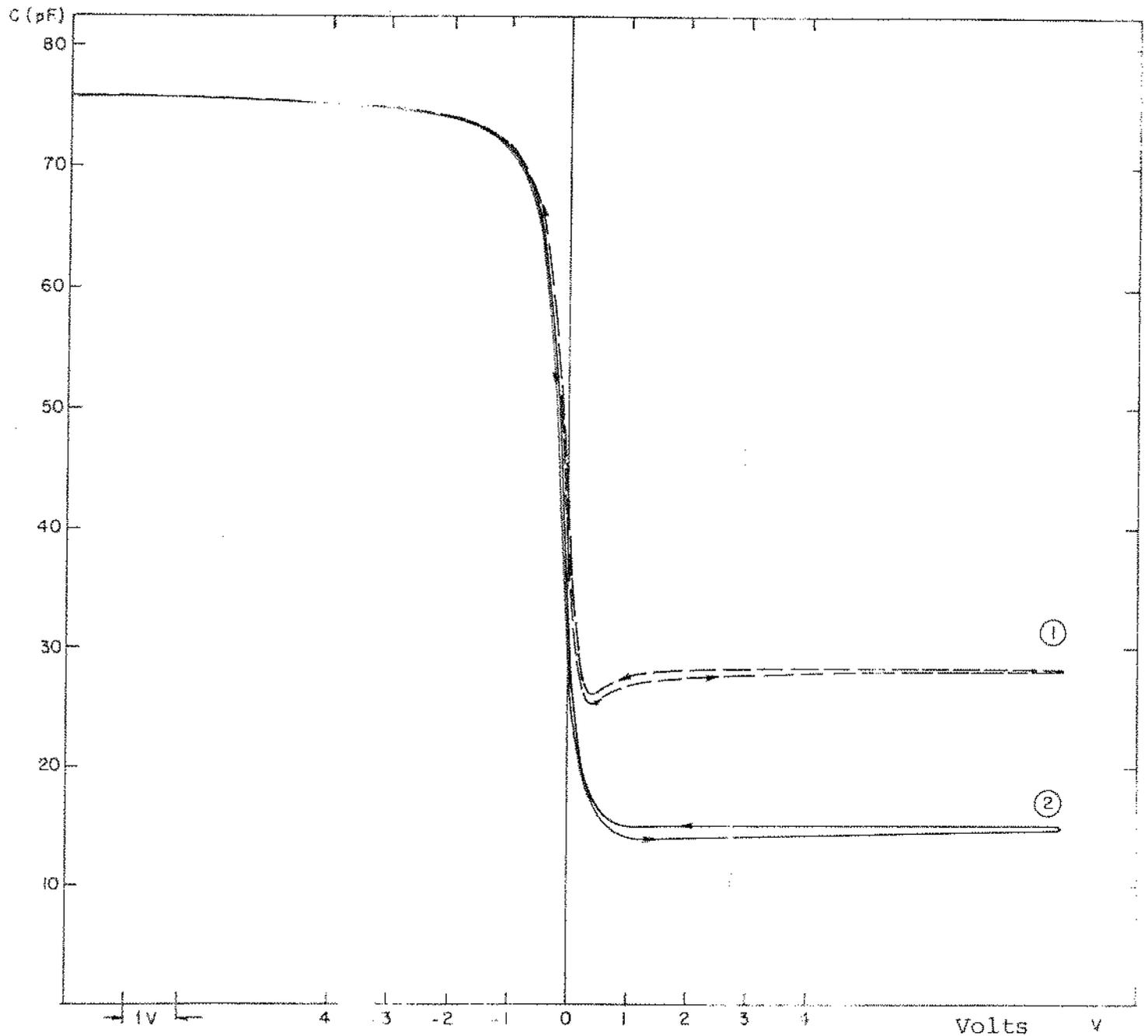


Figura 4.3 - Característica típica de $C \times V$ em alta frequência para o capacitor de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ correspondente à amostra L4-066, da pastilha (2,5) da lâmina LS-657, cujo óxido de porta foi obtido com B. 1) Sob iluminação solar simulada de 100 mW/cm² (AM1); 2) No escuro.

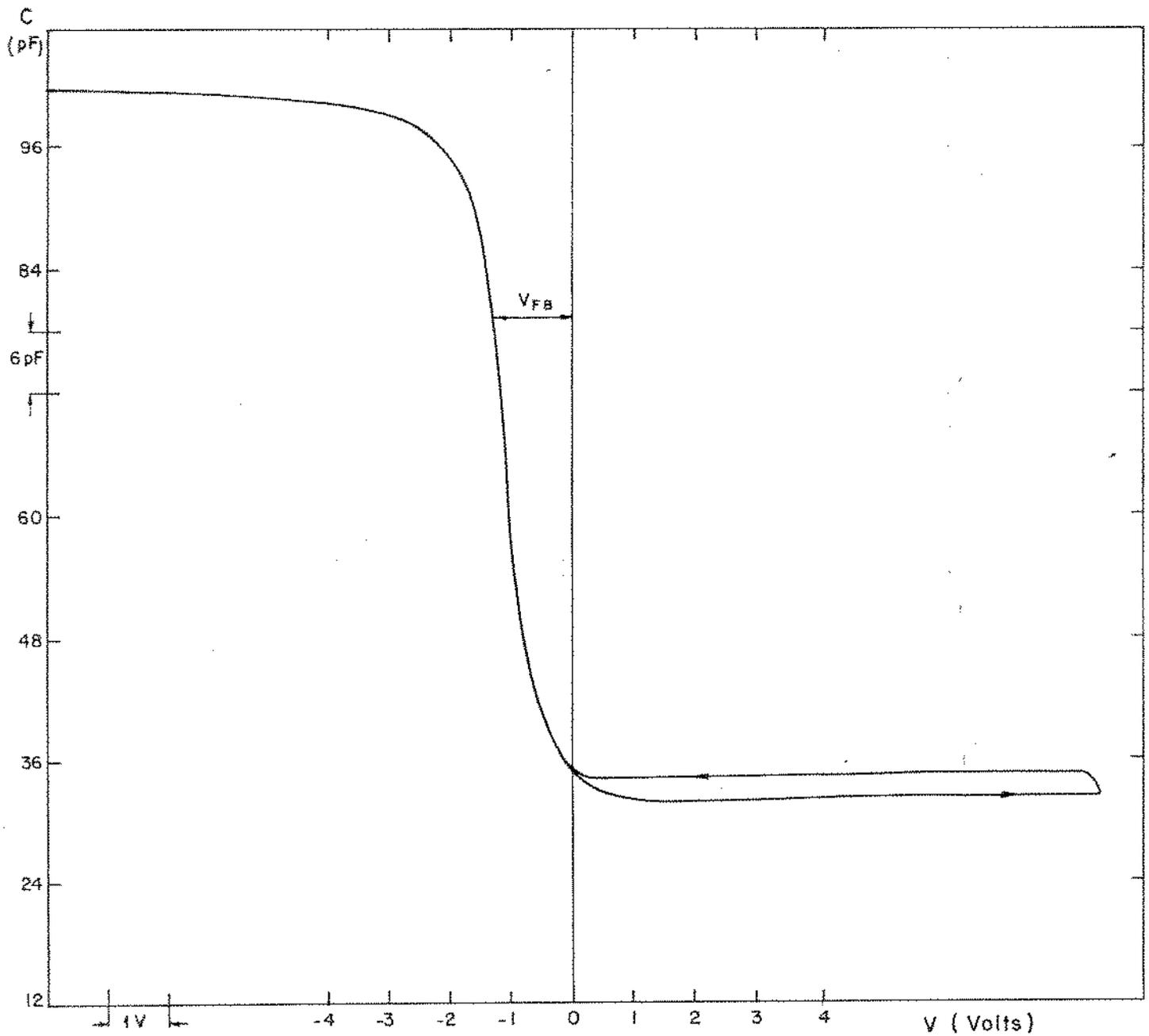


Figura 4.4 - Característica típica de $C \times V$ em alta frequência para o capacitor de $Al/SiO_2/Si$, amostra L4-092 da pastilha (2,5), lâmina LS-856, com óxido de porta obtido com TCE.

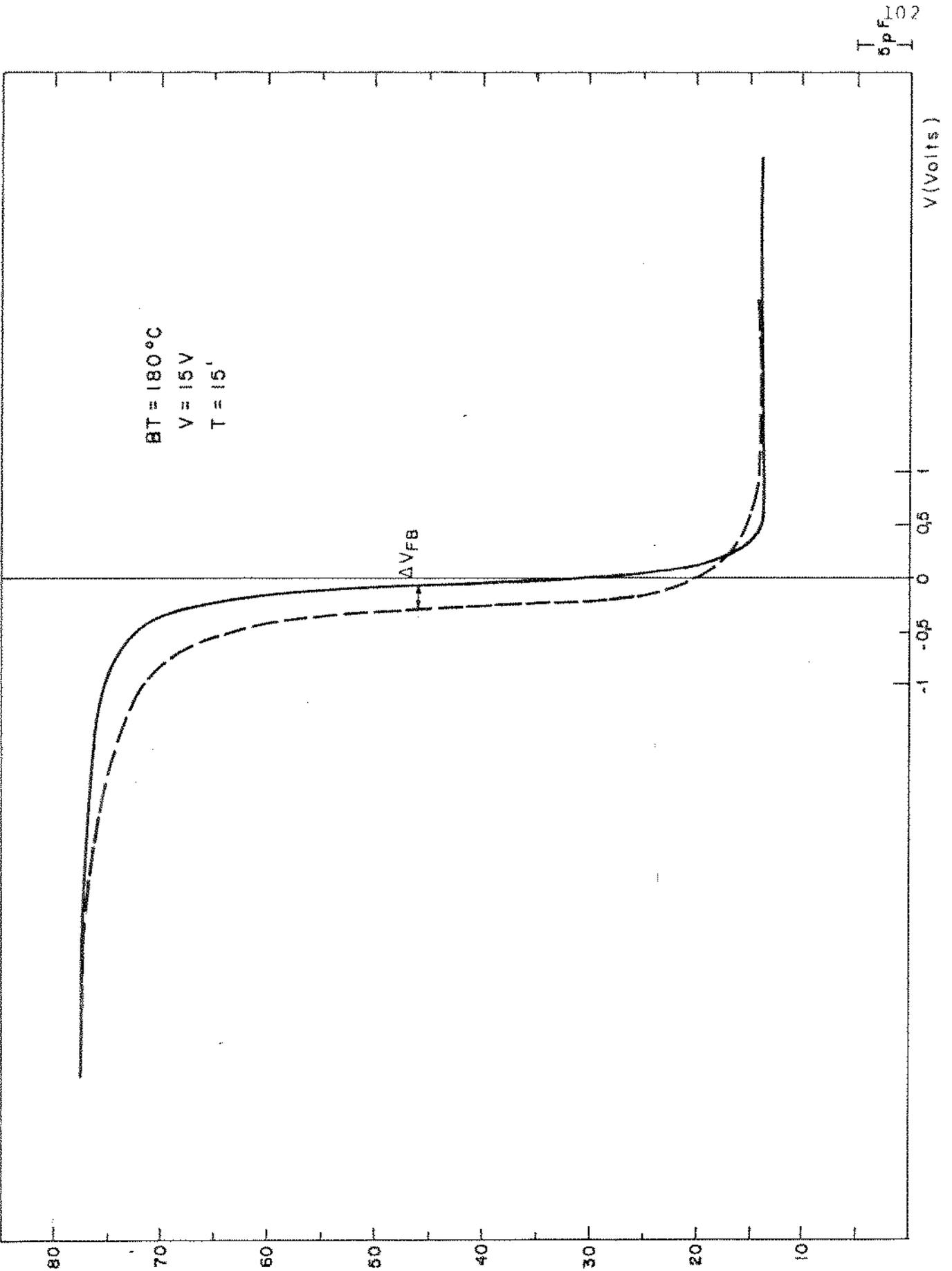


Figura 4.5 - Característica típica de C_xV em alta frequência para uma estrutura de $SnO_2/SiO_2/Si$, antes e após a aplicação de uma tensão de 15 V, a temperatura de 180°C, durante 15 minutos. (Amostra L4-066 da pastilha (2,5) da lamina LS-657 com óxido de porta obtido com TCF).

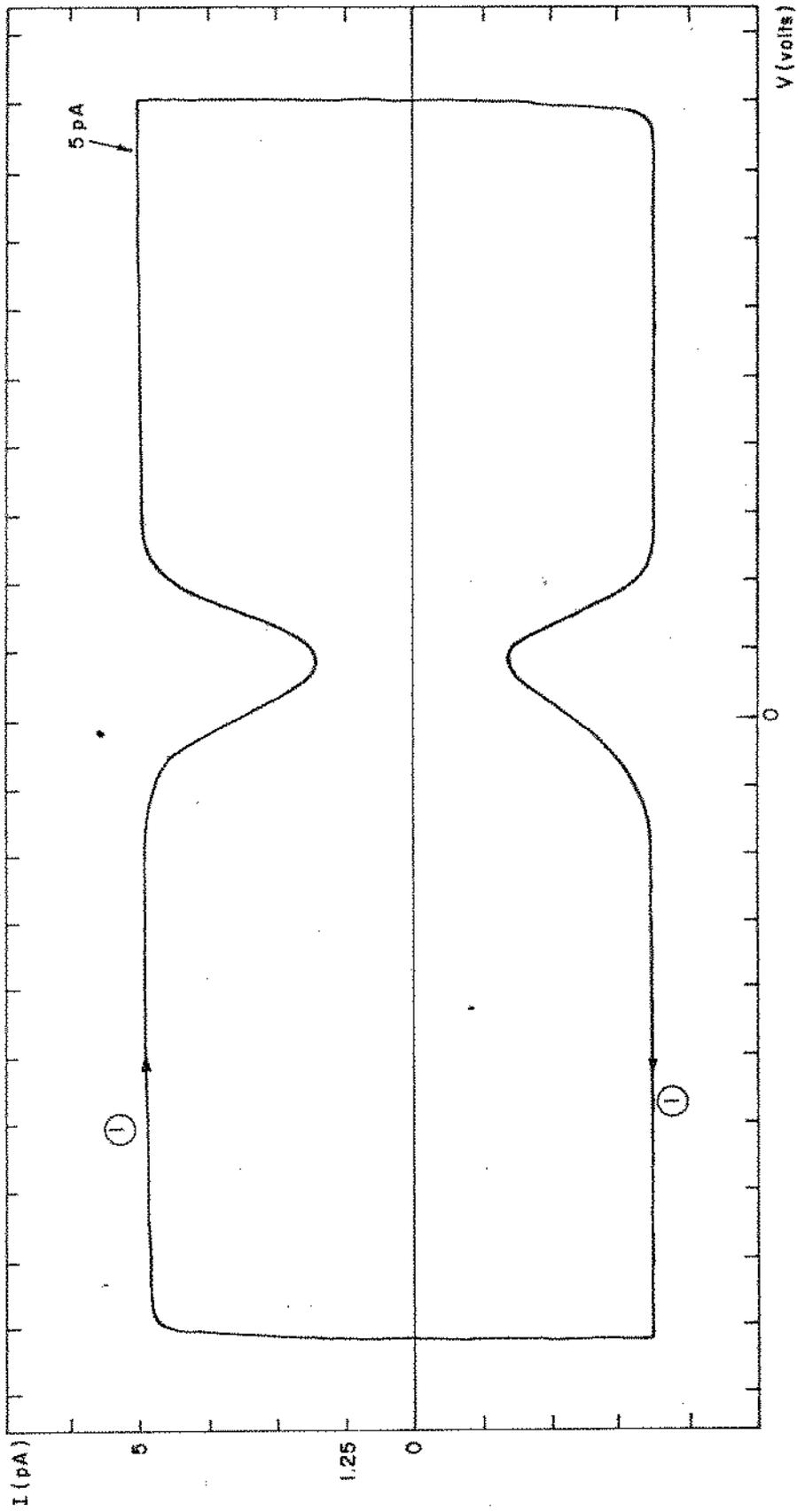


Figura 4.6 - Característica típica de IrV quase estática para um capacitor de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ (amostra L4-066 da pastilha (2,5) da lâmina LS-657, cuja oxidação de porta foi efetuada com TCE).

tempo à porta (medida IxV quase estática).

Calcula-se a capacitância associada ao armazenamento de carga nos estados de interface C_i do SiO_2/Si . de terminando-se a capacitância mínima em baixa frequência (C_{LF}) e admitindo-se que ela resulte da associação série entre a capacitância do óxido (C_{OX}) e a capacitância equivalente do semicondutor (C_{Si}) e da interface C_i , conforme foi discutido no ítem 3.2.2.3. Utilizando-se os ábacos gráficos de Van Overstraten [82] determinam-se C_{OX} , C_{Si} e a partir de C_{LF} determina-se N_i que corresponde a densidade de estados de interface distribuídos no meio da banda. Na Tabela VII é apresentado o valor médio de N_i obtido para duas amostras.

Na figura 4.7 encontra-se a contrapartida típica de IxV quase estática para uma amostra de $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$. O valor médio da densidade de estados na interface obtido para duas amostras encontra-se também na Tabela VII.

Na figura 4.8 são mostrados três resultados típicos de CxV em alta frequência obtidos para um capacitor de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ logo após a deposição e fotografação do SnO_2 (antes da metalização de Al), após a metalização de alumínio e após o tratamento térmico para recozimento do alumínio. Determinando-se o deslocamento da tensão da banda plana para os três casos calculou-se a variação da densidade de cargas próximas a interface Q_S , atribuindo-se esta variação a presença de cargas criadas por irradiação Q_R . Na Tabela IX estão relacionados os resultados obtidos de N_S e de N_R obtidos para uma média de 6 amostras.

Na figura 4.10 são mostradas as características típicas de CxV em alta frequência obtidas para dois capacitores de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ cujas oxidações de porta foram efetuadas em atmosfera de oxigênio com TCE e sem TCE. A partir dos des

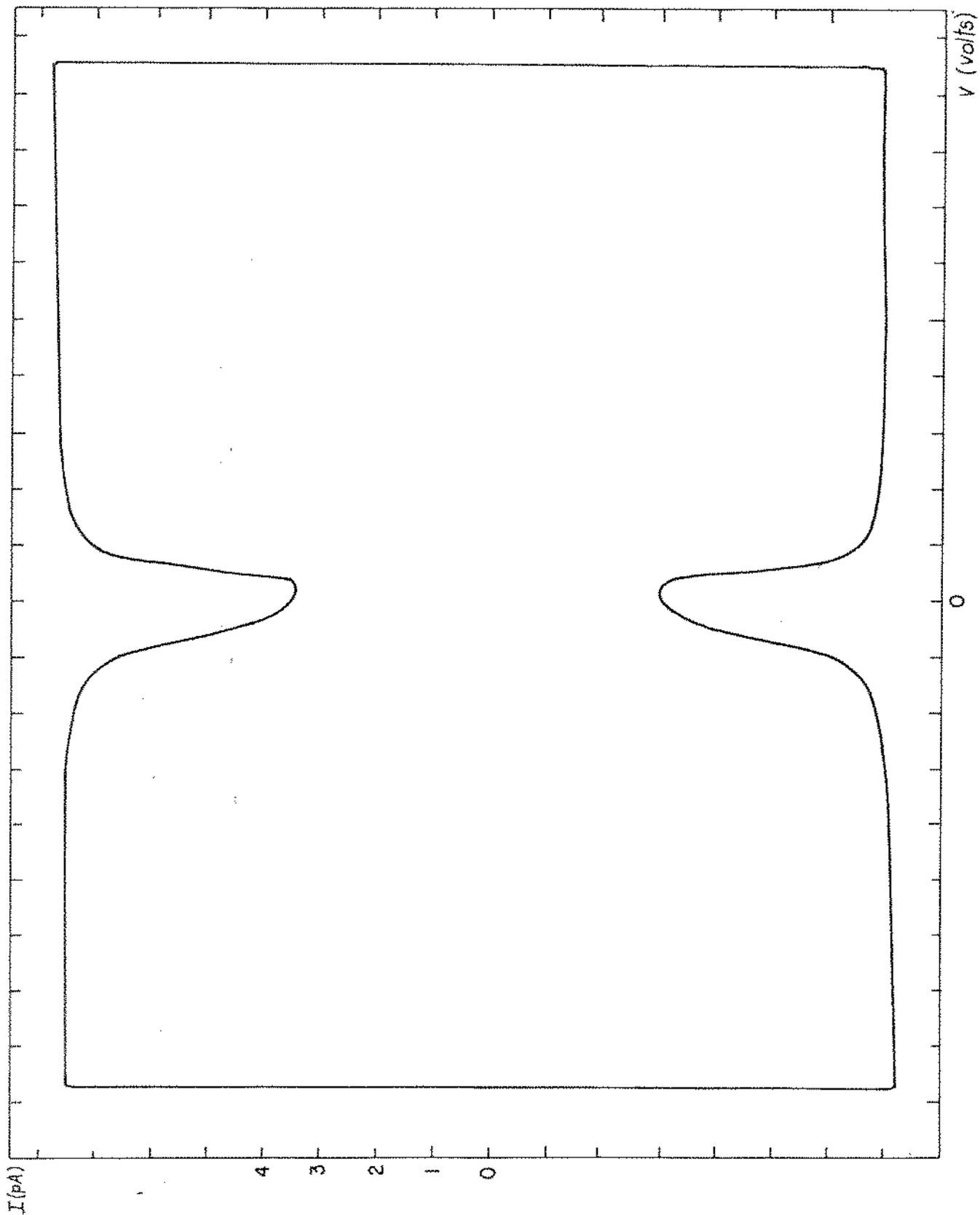


Figura 4.7 - Característica típica de $I \times V$ quase estática para um capacitor de $Al/SiO_2/Si$ (amostra L4-092, pastilha (2,5) da lâmina LS-656 cuja oxidação de porta foi efetuada com TCE).

locamentos da tensão de banda plana foram determinadas as densidades de cargas no óxido próximo à interface, N_s , nos dois casos e os resultados médios obtidos para 12 amostras encontram-se relacionadas na Tabela X. A contrapartida para as estruturas de $Al/SiO_2/Si$ é mostrada na figura 4.11 para duas amostras também oxidadas com e sem TCE. Os resultados médios obtidos para 12 amostras encontram-se também na Tabela IX.

A densidade de cargas móveis N_m foi ainda determinada para as estruturas de $SnO_2/SiO_2/Si$ e de $Al/SiO_2/Si$ oxidadas sem TCE a partir dos resultados de medidas B_xT , efetuadas nas condições descritas no item 3.2.2.2. Os resultados obtidos para N_m encontram-se também na Tabela IX, para a estrutura de $SnO_2/SnO_2/Si$, amostra L4-066 da pastilha (3,2), lâmina LS-T e para a estrutura de $Al/SiO_2/Si$, amostra L4-092, pastilha (3,3) lâmina LS-S.

4.4. Campo Elétrico de Ruptura do Óxido Isolante

O campo elétrico de ruptura do óxido isolante foi determinado para 15 amostras de $SnO_2/SiO_2/Si$, oxidadas com tricloroetileno, de acordo com o método descrito no item 3.2.4. O valor médio obtido foi de $E_r = 5,9 \times 10^6$ V/cm.

As mesmas medidas efetuadas em 15 amostras de $Al/SiO_2/Si$ também oxidadas com TCE, deram um resultado de $E_r = 5,5 \times 10^6$ V/cm.

4.5. Características dos Transistores

Cumprindo as etapas de processamento descritas na secção 3.1 foram construídos transistores de efeito de

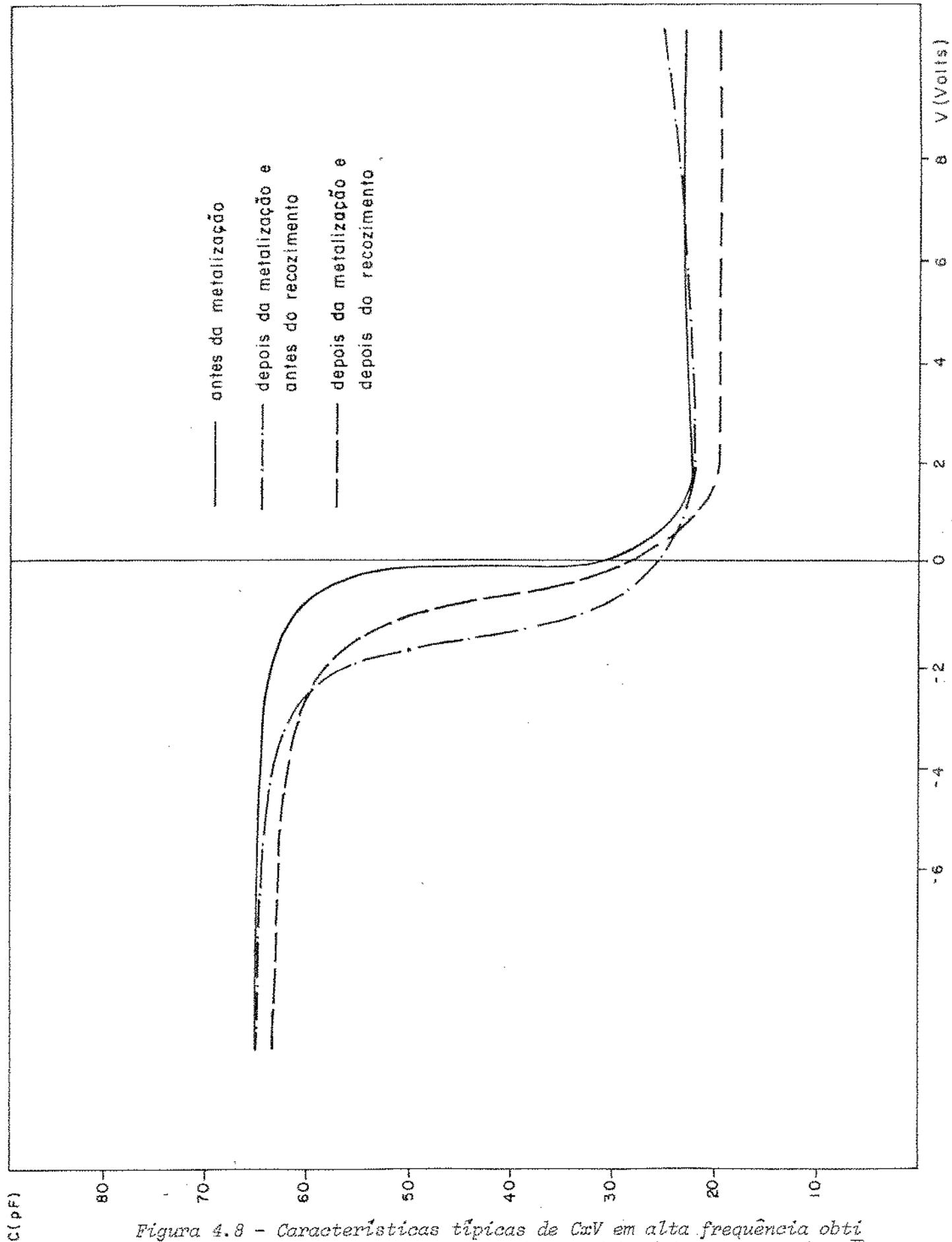


Figura 4.8 - Características típicas de $C \times V$ em alta frequência obtidas para um capacitor de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$: — antes da metalização; - · - · - depois da metalização e antes do recozimento; - - - depois da metalização e depois do recozimento (amostra L4-066, pastilha (2,3) da lâmina LS-E, oxidada com TCE).

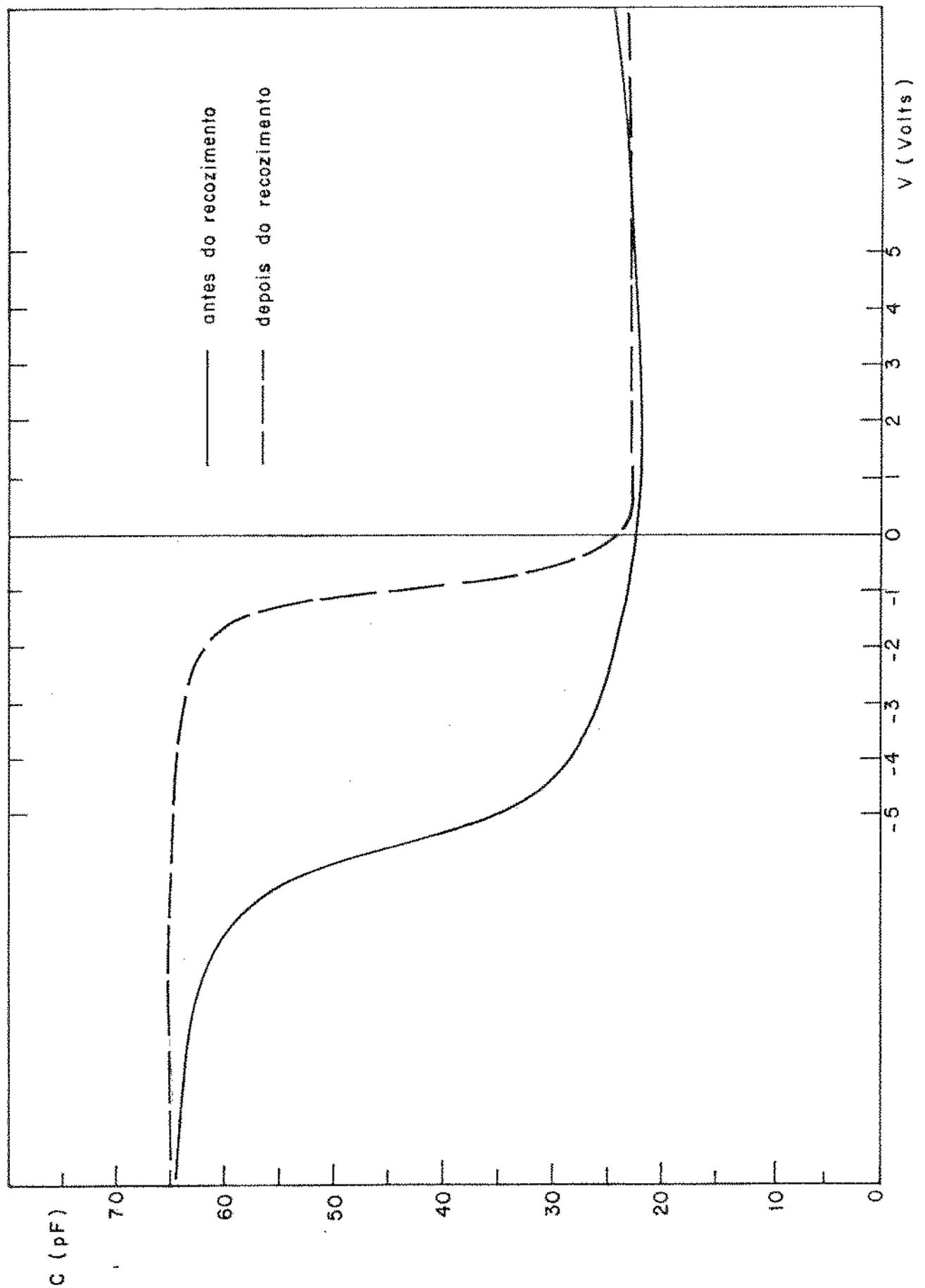


Figura 4.9 - Características típicas de $C \times V$ em alta frequência obtidas para um capacitor de $Al/SiO_2/Si$: — ante do recozimento; - - - depois do recozimento. (Amostra L4-092, pastilha (2,3) da lâmina LS-E, oxidada com TCE).

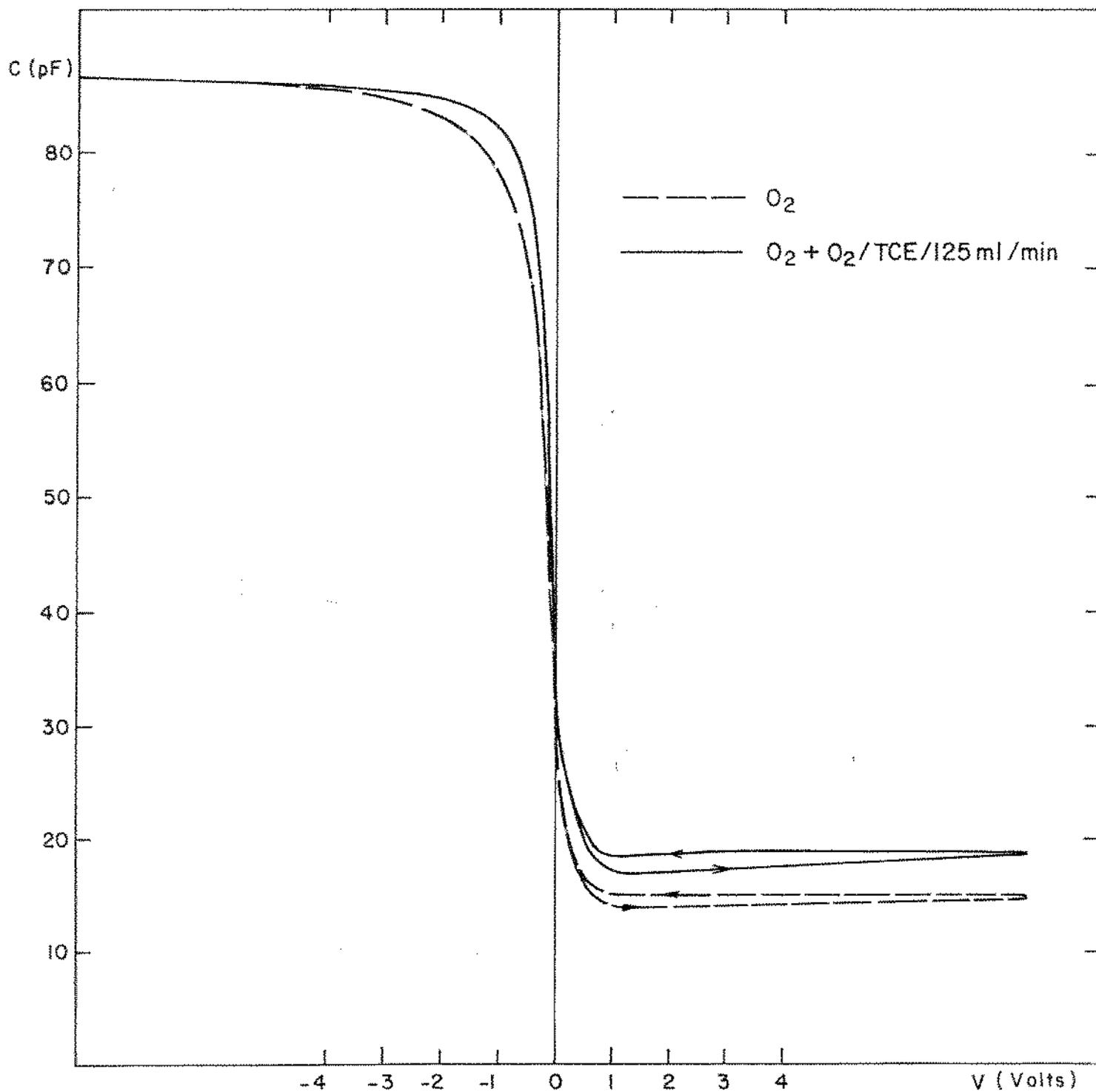


Figura 4.10 - Características típicas de $C \times V$ em alta frequência para os capacitores de $SnO_2/SiO_2/Si$ correspondentes às amostras L4-066 das pastilhas (3,3) das lâminas:
 — LS-A, oxidada com TCE;
 - - - LS-S oxidada sem TCE.

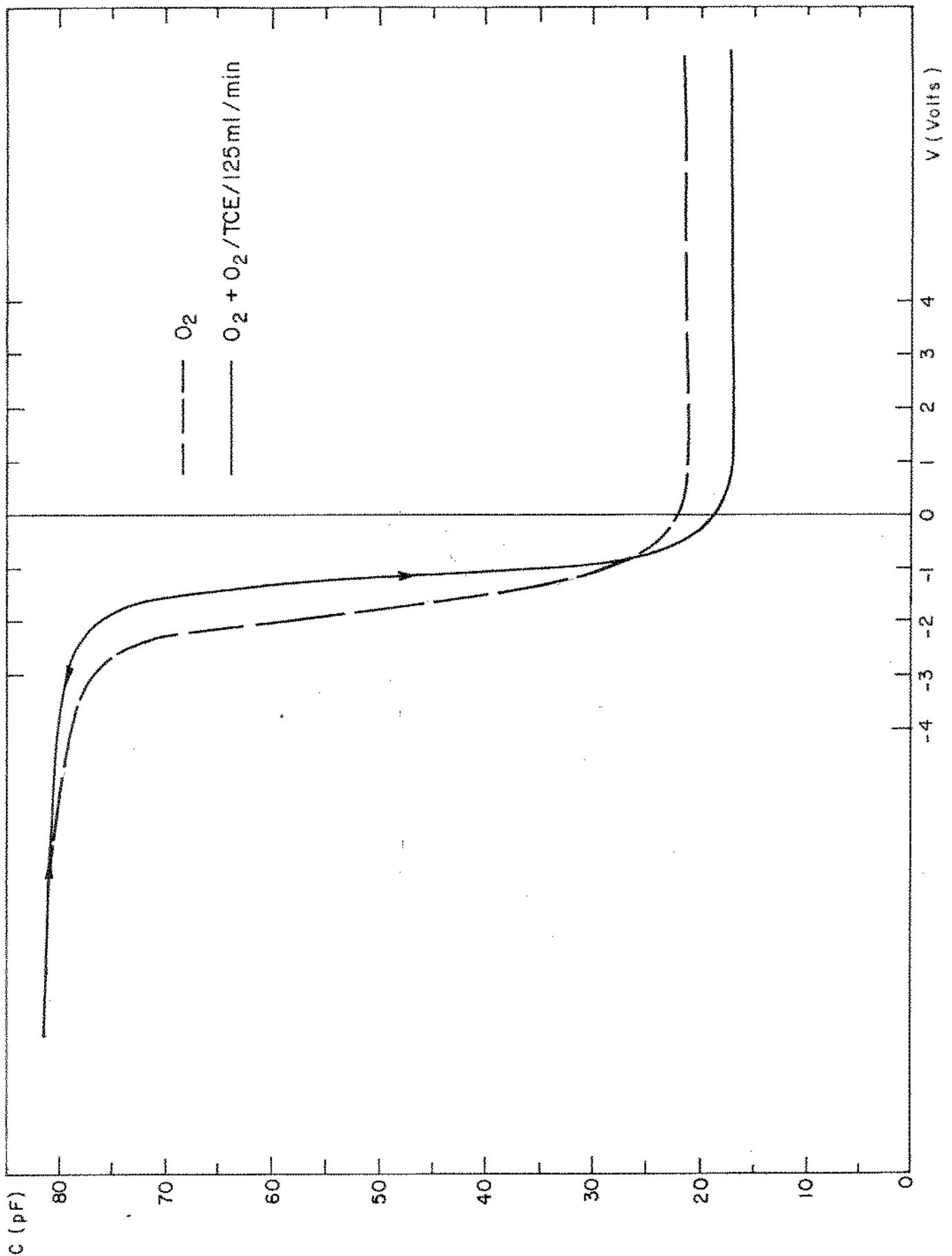


Figura 4.11 - Características típicas de $C \times V$ em alta frequência para os capacitores de $Al/SiO_2/Si$ correspondentes as amostras L4-092 das pastilhas (3,3) das lâminas:

— LS-A, oxidada com TCE;
 - - - LS-B, oxidada sem TCE.

TABELA VII

	SnO ₂ /SiO ₂ /Si LS-657 ; L4-066 (2,5)	Al/SiO ₂ /Si LS-656 ; L4-092 (2,5)
C _{ox} (pF)	76 ± 2	102 ± 2
C _{min} (pF)	15 ± 2	32 ± 2
t _{ox} (nm)	110 ± 3	83 ± 3
N _a (cm ⁻³)	4 E 15	5 E 15
N _a [*] (cm ⁻³)	(1,0 ± 0,3) E 15	(3,0 ± 0,3) E 15
C _{FB} (pF)	45 ± 2	70 ± 2
V _{FB} (V)	- (.2 ± .1)	- (1.2 ± .1)
N _S (cm ⁻²)	(2 ± 1) E 10	(9 ± 1) E 10
N _m (cm ⁻²)	(3 ± 1) E 10	(2 ± 1) E 11
N _i (cm ⁻²) (eV) ⁻¹	(1,5 ± 0,6) E 10	(2 ± 1) E 10

TABELA VIII

	Nº de Amostras	SnO ₂ /SiO ₂ /Si LS-657 ; L4-066	Nº de Amostras	Al/SiO ₂ /Si LS-656 ; L4-092
C _{ox} (pF)	23	79 ± 9	6	100 ± 2
C _{min} (pF)	23	16 ± 4	6	33 ± 2
t _{ox} (nm)	23	103 ± 14	6	84 ± 3
N _a (cm ⁻³)	1	4 E 15	1	5 E 15
N _A [*] (cm ⁻³)	23	(1,6 ± 1,4) E 15	6	(2,7 ± 0,3) E 15
C _{FB} (pF)	23	57 ± 2	6	77 ± 2
V _{FB} (V)	23	- (.2 ± .1)	6	- (1,3 ± .1)
N _S (cm ⁻²)	23	(2,6 ± 1,5) E 10	6	(9,3 ± 1,3) E 10
N _m (cm ⁻²)	1	(3 ± 1) E 10	1	(2 ± 1) E 11
N _i (cm ⁻²) eV ⁻¹	1	(1,0 ± 0,5) E 10	1	(2 ± 1) E 10
		SnO ₂ /SiO ₂ /Si		Al/SiO ₂ /Si
		L4-066		L4-092
		Diversas Lâminas		Diversas Lâminas
N _S (cm ⁻²)	30	(2,5 ± 1,3) E 10	30	(9,6 ± 1,7) E 10
		LS-A		LS-A
N _m (cm ⁻²)	1	(5 ± 1) E 10	1	(3 ± 1) E 11

TABELA IX

	SnO ₂ /SiO ₂ /Si L4-066, (1,1) ; LS-E			Al/SiO ₂ /Si L4-092, (1,1) ; LS-E	
	Antes da Metalização	Depois da Metalização	Depois do Recozimento	Após Metalização	Após Recozimento
C _{ox} (pF)	65 ± 2	65 ± 2	65 ± 2	65 ± 2	65 ± 2
C _{min} (pF)	25 ± 2	25 ± 2	25 ± 2	25 ± 2	25 ± 2
t _{ox} (nm)	130 ± 3	130 ± 3	130 ± 3	130 ± 3	130 ± 3
N _a (cm ⁻³)	-	-	-	-	-
N _a [*]	(2,0±0,5) E 15	(2,0±0,5) E 15	(2,0±0,5) E 15	(2,0±0,5) E 15	(2,0±0,5) E 15
C _{FB} (pF)	52 ± 2	52 ± 2	52 ± 2	52 ± 2	52 ± 2
V _{FB} (V)	-(0,3 ± 0,1)	-(1,9 ± 0,1)	-(0,8 ± 0,1)	-(6,4 ± 0,1)	-(1,4 ± 0,1)
N _S (cm ⁻²)	(3 ± 1) E 10	(3 ± 1) E 11	(8 ± 1) E 10	(9 ± 1) E 11	(9 ± 1) E 10
Δ N _S (cm ⁻²)	-	-	(6 ± 1) E 10	-	(7 ± 1) E 10
	Nº de Amostras	SnO ₂ /SiO ₂ /Si L4-066 Diversas Lâminas		Nº de Amostras	Al/SiO ₂ /Si L4-092 Diversas Lâminas
N _S (cm ⁻²)	12	(8,3 ± 1,3) E 10		12	(9,3 ± 1,3) E 10

TABELA X

	SnO ₂ /SiO ₂ /Si (L4-066, diversas lâminas)			Al/SiO ₂ /Si (L4-092, diversas lâminas)	
		Nº de Amostras		Nº de Amostras	
Oxidação de portas com TCE	N _S (cm ⁻²)	30	(2,5 ± 1,3) E 10	30	(9,3 ± 1,3) E 10
	N _m (cm ⁻²)	2	(4 ± 2) E 10	2	(2,5 ± 1,0) E 11
Oxidação de portas sem TCE	N _S (cm ⁻²)	30	(5,2 ± 2,7) E 10	15	(3,5 ± 1,2) E 11
	N _m (cm ⁻²)	1	(7 ± 1) E 10	1	(5 ± 1) E 11

campo de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ bem como de $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, conforme relacionado na Tabela I. Apresentamos a seguir os resultados dos efeitos obtidos para estas estruturas.

4.5.1. Transistores de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ e de $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$

Os transistores de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ foram construídos com os três eletrodos de SnO_2 conforme configuração mostrada na figura 4.12. Nesta mesma figura é mostrada a configuração dos transistores de $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$.

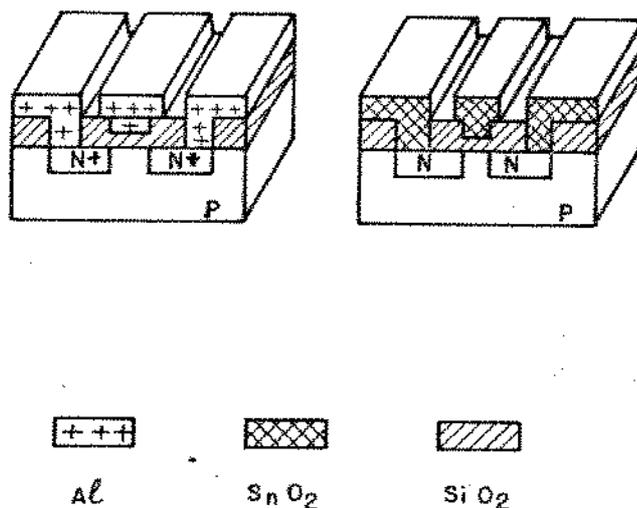


Figura 4.12 - Configuração dos transistores de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ e de $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ construídos nas dimensões especificadas na Tabela I.

Na figura 4.13 mostramos uma característica típica de $I_D \times V_D$ com V_p como parâmetro, para o transistor de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ na configuração acima, obtida com um traçador de curvas Tektronix conforme descrito no ítem 3.2.3. Os mesmos resultados são mostrados para o transistor de $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ na figura 4.14. As mesmas características são mostradas nas figuras 4.15 e 4.16, respectivamente para as estruturas de

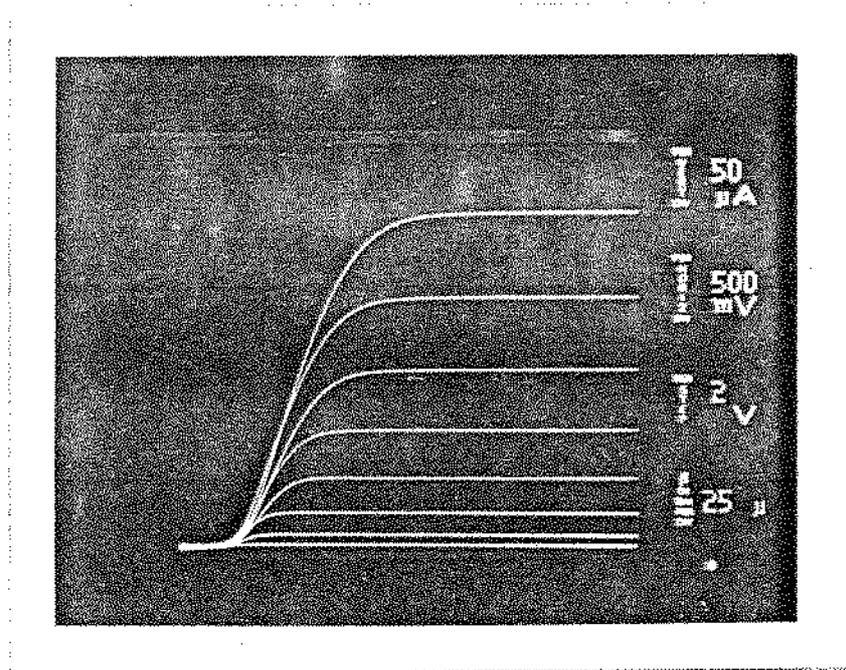


Figura 4.13 - Características típicas de $I_D \times V_D$ com V_P como parâmetro obtidas para um transistor de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$, com porta, fonte e dreno de SnO_2 . (Amostras L4-071, pastilha (2,4), lâmina LS-G).

$\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ e $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, agora obtidas num registrador XY conforme também descrito no ítem 3.2.3.

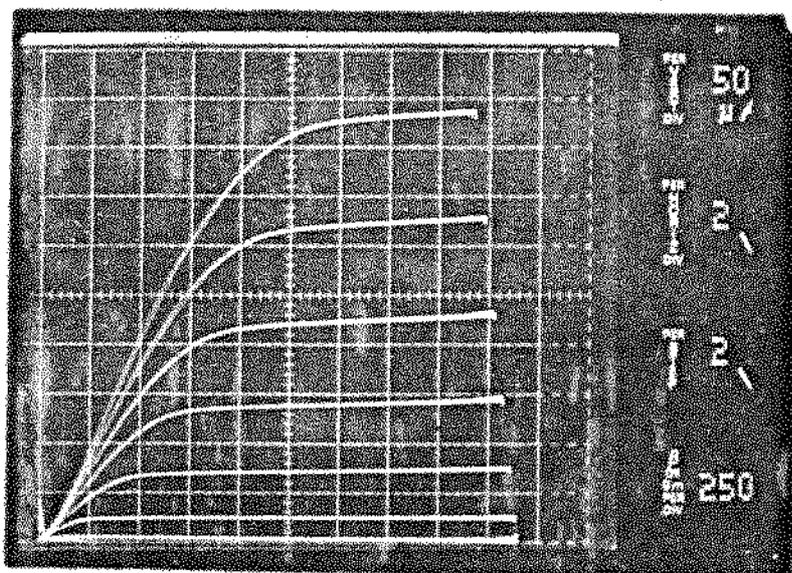


Figura 4.14 - Características típicas de $I_D \times V_D$ com V_P como parâmetro de um transistor de $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$. (Amostra L4-089, pastilha (2,4), lâmina LS-G).

Nas figuras 4.17 e 4.18 são mostrados os resultados de $|\sqrt{I_D} \times V_P|_{V_D=\text{cte}}$ obtidas das curvas acima para os transistores de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ e $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, operando na região de saturação, para polarização de substrato de 0V. A partir destes resultados determinou-se a tensão de limiar de condução V_T (secção 2.4.1) pela extrapolação da reta $\sqrt{I_D} \times V_P$ para V_P nulo, quando V_D igual a 20V. Os resultados obtidos tanto para o transistor de SnO_2 como para o de Al estão mostrados na Tabela X. Conhecidas as dimensões dos transistores e a capacitância do óxido de porta a inclinação das retas $|\sqrt{I_D} \times V_P|_{V_D=\text{cte}}$ permitem-nos determinar o valor da mobilidade μ_n conforme expresso na relação 2.23. Os valores obtidos para ambas as estruturas, de SnO_2 e de Al, encontram-se na Tabela XII.

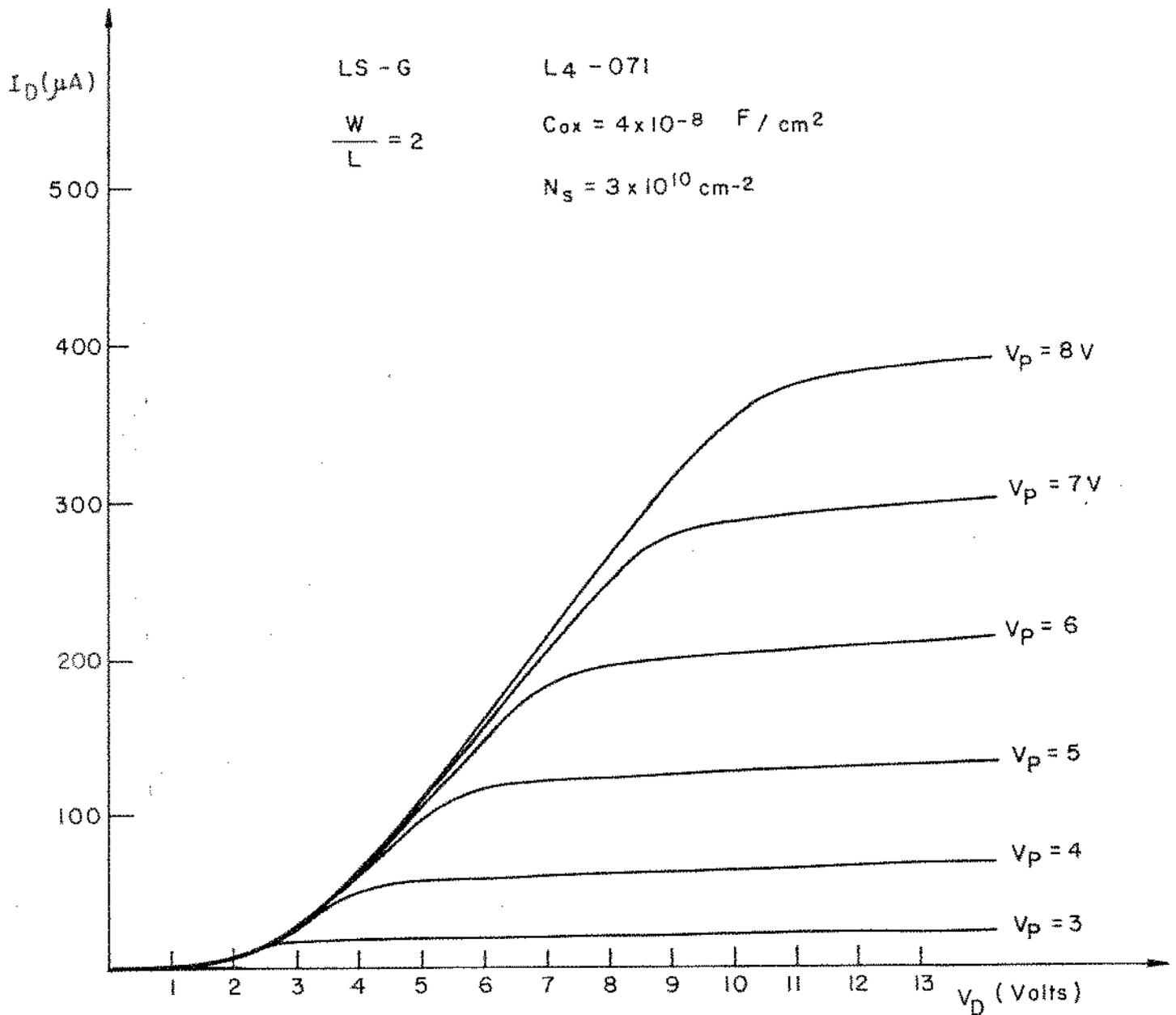


Figura 4.15 - Características típicas de $|I_D \times V_D|_{V_P=cte}$ para um transistor de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$, com porta, fonte e dreno de SnO_2 . (Amostra L4-071, pastilha (2,4), lâmina LS-G).

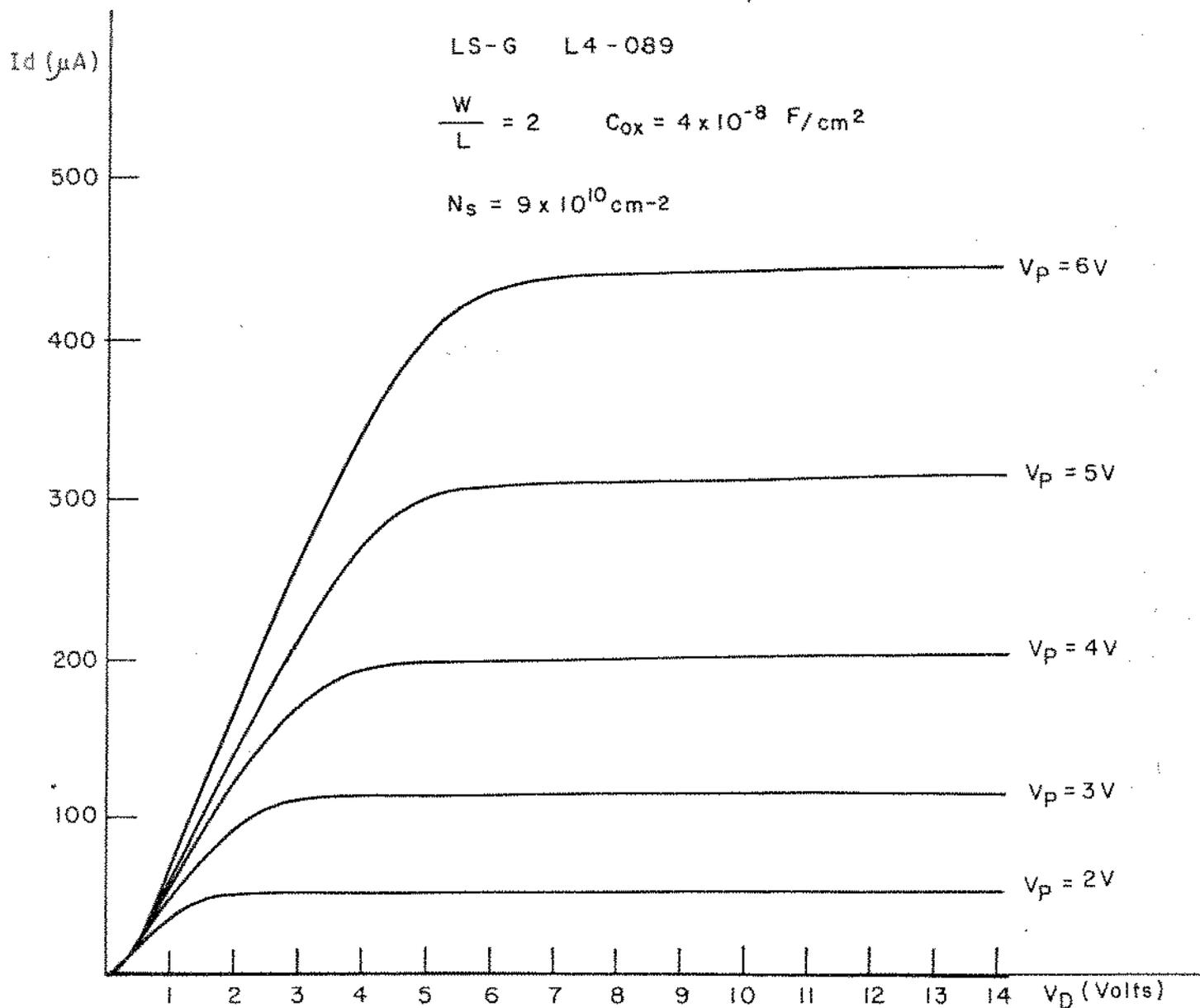


Figura 4.16 - Características típicas de $|I_D \times V_D|_{V_P = \text{cte}}$ para um transistor de Al/SiO₂/Si.
(Amostra L4-089, pastilha (2,4), lâmina LS-G).

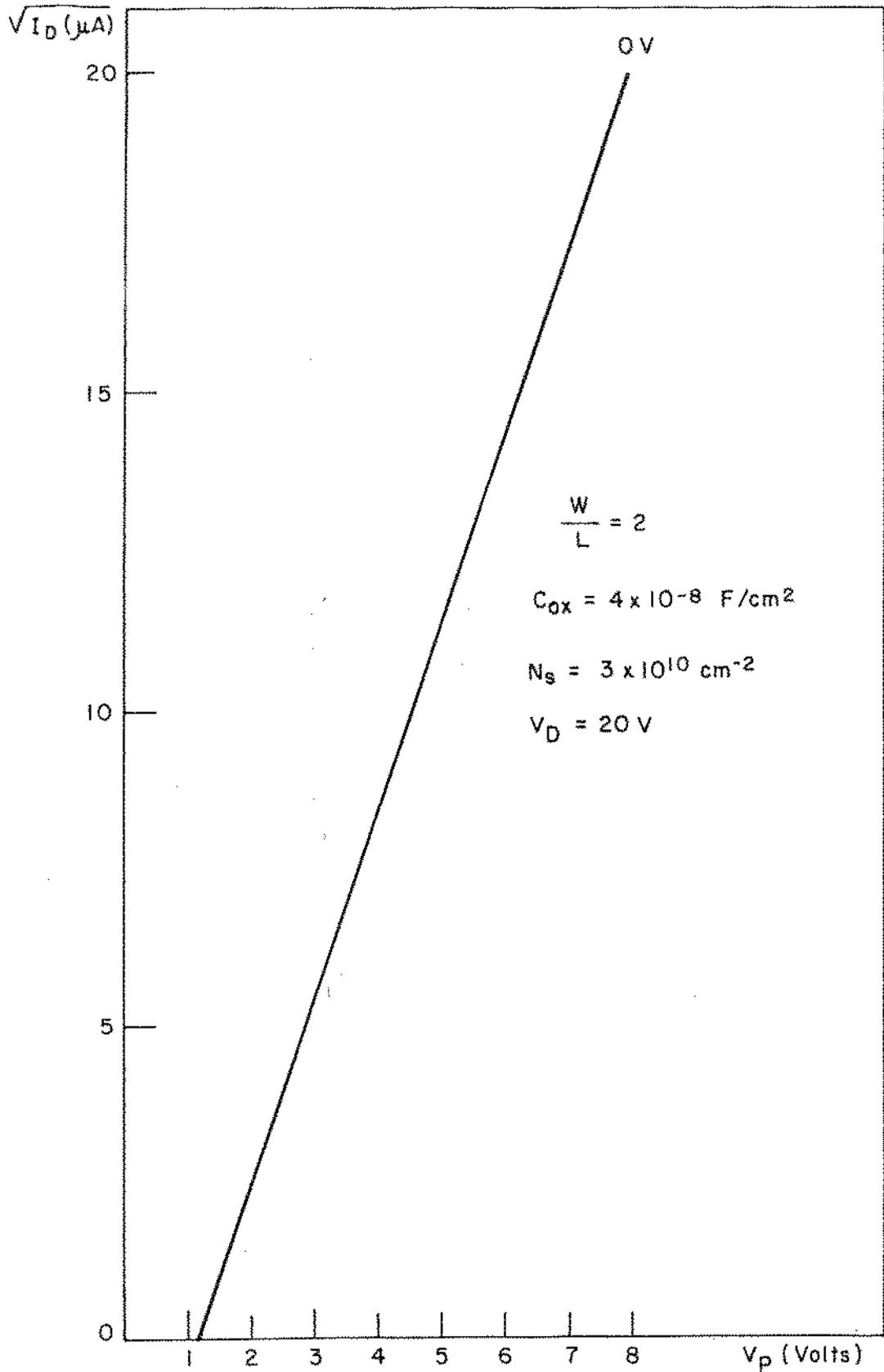


Figura 4.17 - Curva típica de $|\sqrt{I_D} \approx V_p|$ com $V_D = 20 \text{ V}$ obtida para um transistor de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ operando na região de saturação, para polarização de substrato de 0V. (Amostra L4-071, pastilha (2,4) e lâmina LS-G).

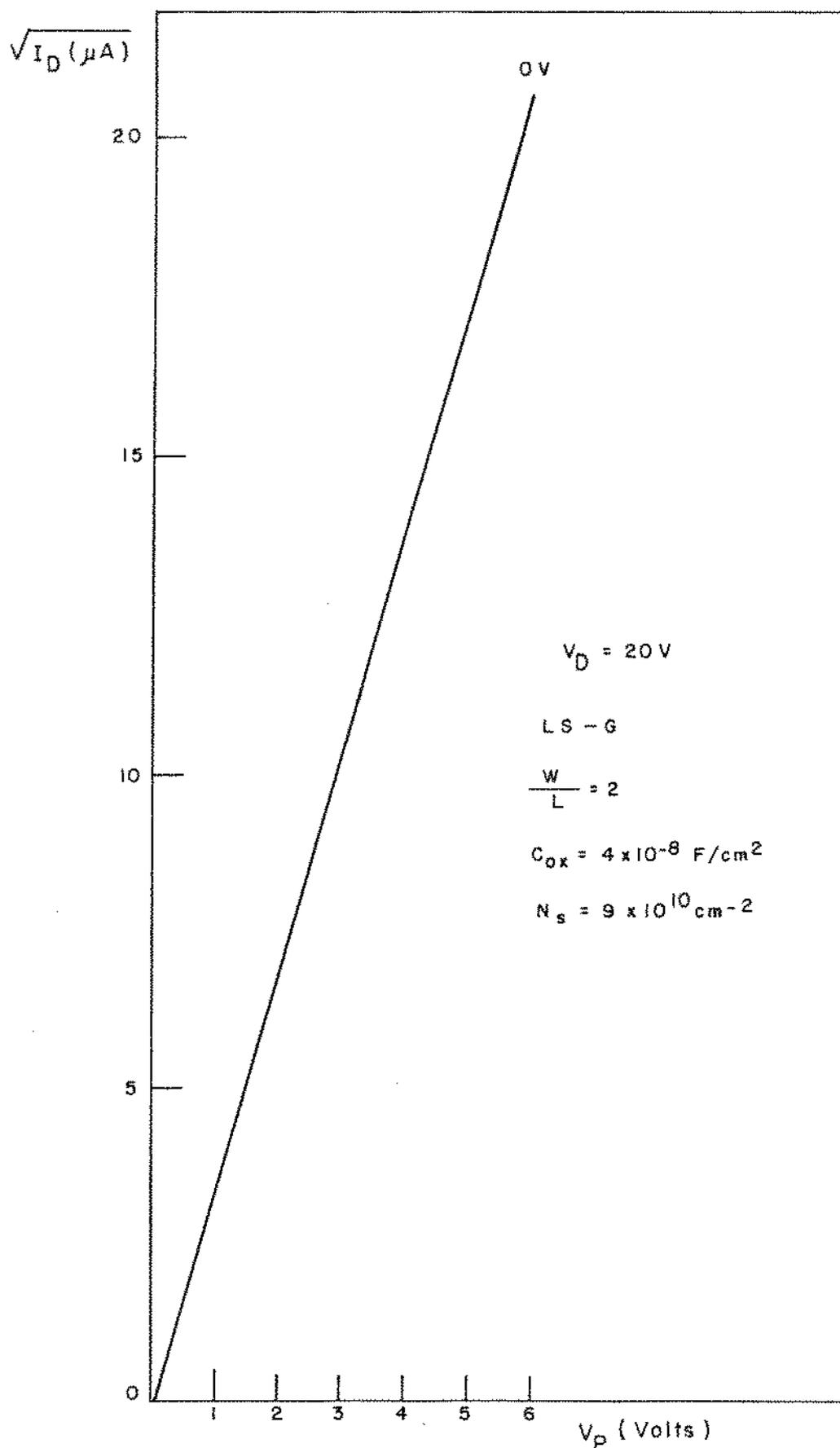


Figura 4.18 - Curva típica de $\sqrt{I_D} \times V_P |_{V_D=cte}$ de um transistor de Al/SiO₂/Si operando na região de saturação, para polarização de 0 Volts no substrato. (Amostra L4-089, pastilha (2,4), lâmina LS-G).

Os transistores de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$, com os três eletrodos de SnO_2 , foram ainda caracterizados quanto a $|\sqrt{I_D} \times V_P|_{V_{D=\text{cte}}}$ imediatamente após a etapa de metalização e após a etapa de recozimento do alumínio.

Nas figuras 4.19, 4.20 e 4.21 mostramos as curvas $|\sqrt{I_D} \times V_P|_{V_{D=\text{cte}}}$, antes da metalização, logo após a metalização e logo após o recozimento.

Os resultados obtidos para a tensão de limiar V_T , para a mobilidade μ_n , para a transcondutância g_m e para o fator de ganho β estão relacionados na Tabela XI.

4.5.2. Transistores de $\text{Al}/\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$

Os transistores de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ com fonte e dreno de Al foram construídos de acordo com a configuração mostrada na figura 4.22.

Na figura 4.23 são mostradas as características típicas de $|I_D \times V_D|_{V_P=\text{cte}}$ obtidas para o transistor de $\text{Al}/\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ no traçador Tektronix. As mesmas curvas obtidas num registrador XY são mostrados na figura 4.24. Na figura 4.25 são mostradas as características de $\sqrt{I_D} \times V_P$, com V_D igual a 20V e polarizações de substrato de 0 e -5V, para os transistores de $\text{Al}/\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$. Os valores de V_T e μ_n determinados conforme descrito no ítem anterior estão mostrados na Tabela XII.

4.5.3. Transistores de SnO_2/Si

Os transistores de SnO_2/Si obtidos sem oxidação de porta, com eletrodos de fonte e dreno de Al, foram

construídos de acordo com a configuração mostrada na figura 4.26.

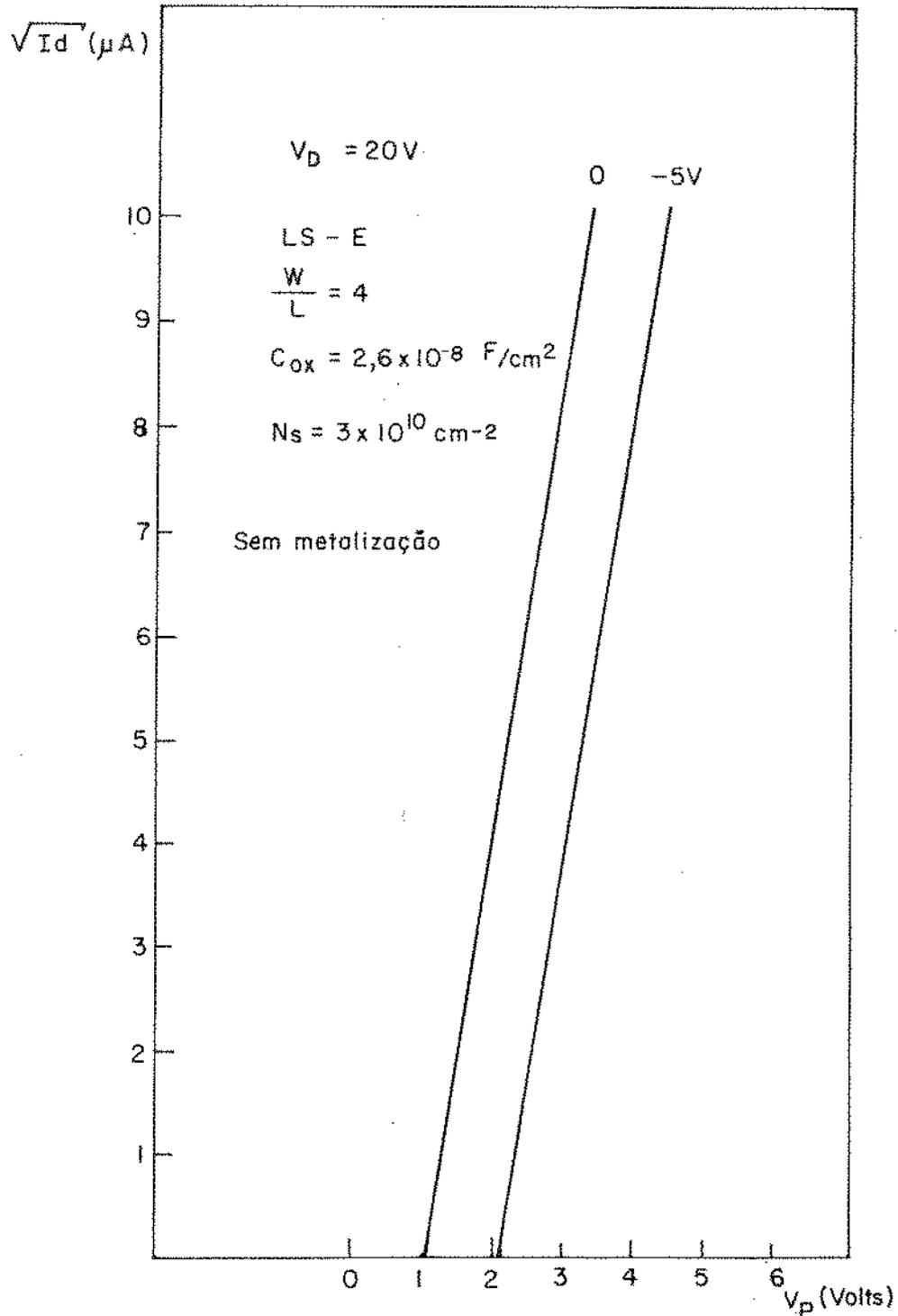


Figura 4.19 - Curva típica $|\sqrt{I_D} \propto V_p|_{V_D=cte}$ de um transistor de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ efetuada antes do processo de metalização para polarização de 0 e -5V no substrato. (Amostra L4-070, pastilha (3,2), lâmina LS-E).

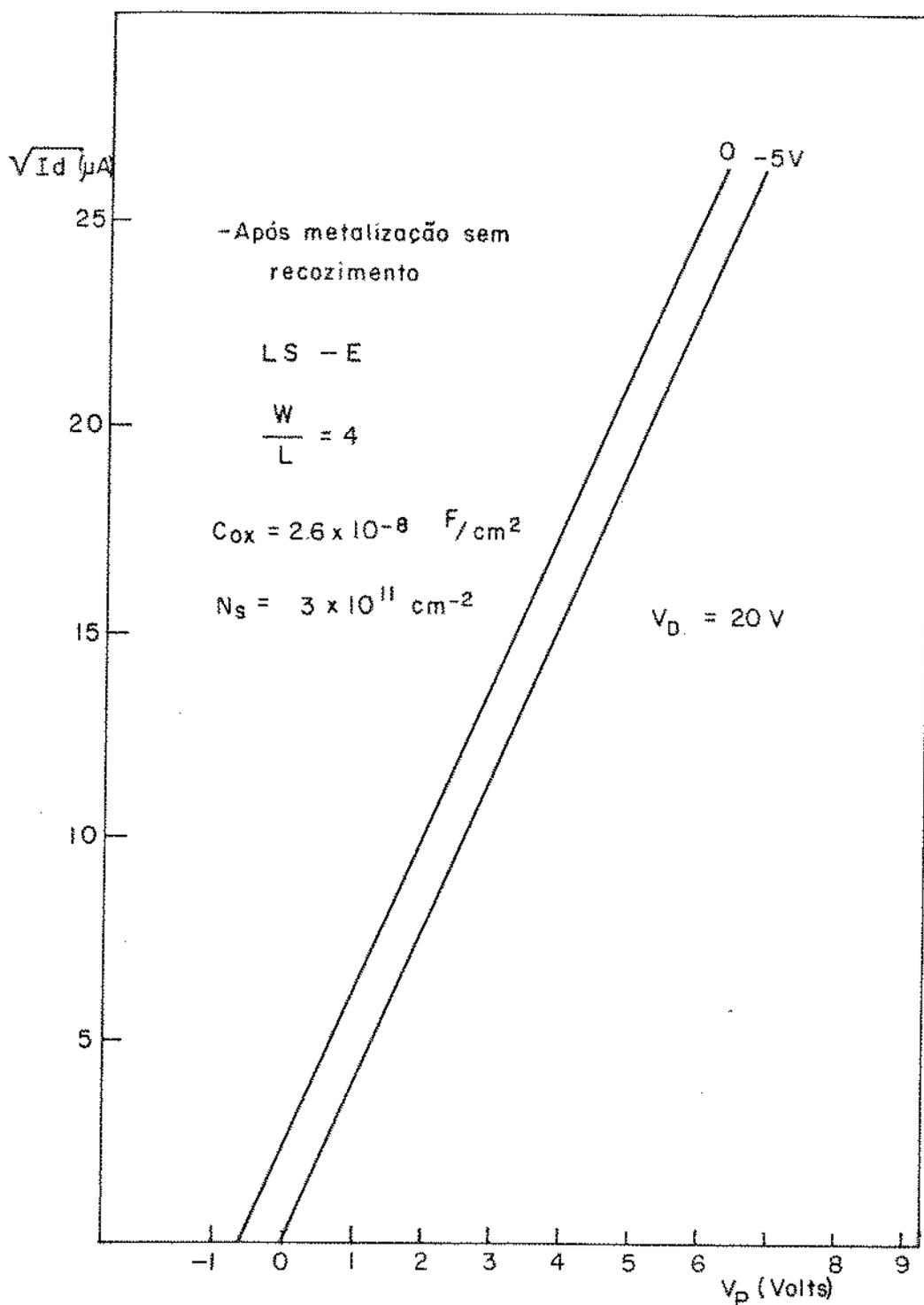


Figura 4.20 - Curva típica $|\sqrt{I_D} \times V_P|_{V_D=cte}$ de um transistor de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$, efetuada logo após a metalização mas antes do processo de recozimento, para polarização de 0 e -5V no substrato. (Amostra L4-071, pastilha (3,2), Lâmina LS-E).

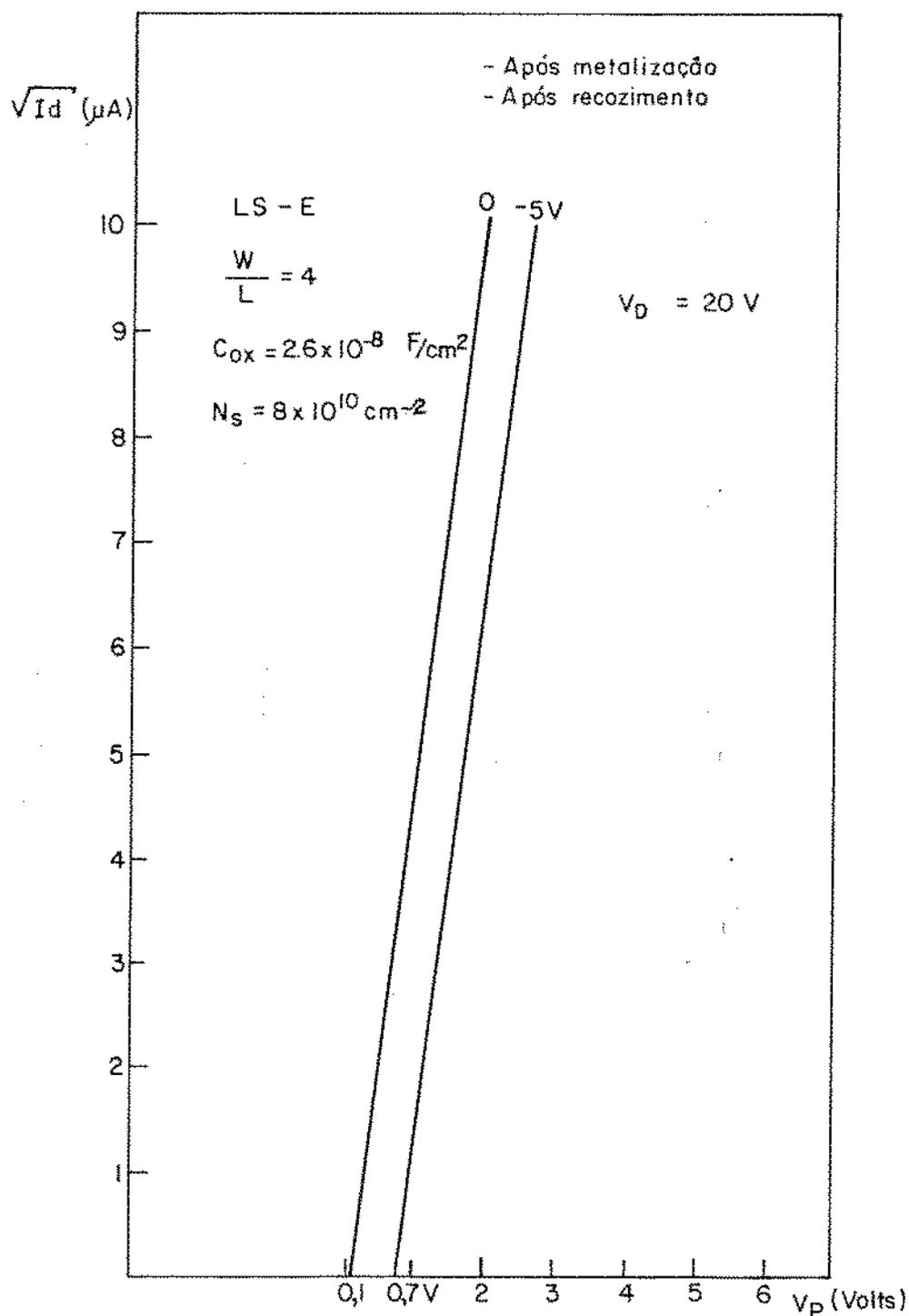


Figura 4.21 - Curva típica $|\sqrt{I_D} \approx V_P|_{V_D=cte}$ de um transistor de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ após a etapa de recozimento do alumínio, para polarização de 0 e -5V no substrato. (Amostra L4-070, pastilha (3,2), lâmina LS-E).

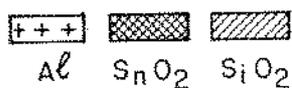
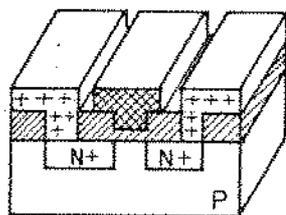


Figura 4.22 - Configuração dos transistores de $Al/SnO_2/SiO_2/Si$ construídos nas dimensões especificadas na Tabela I.

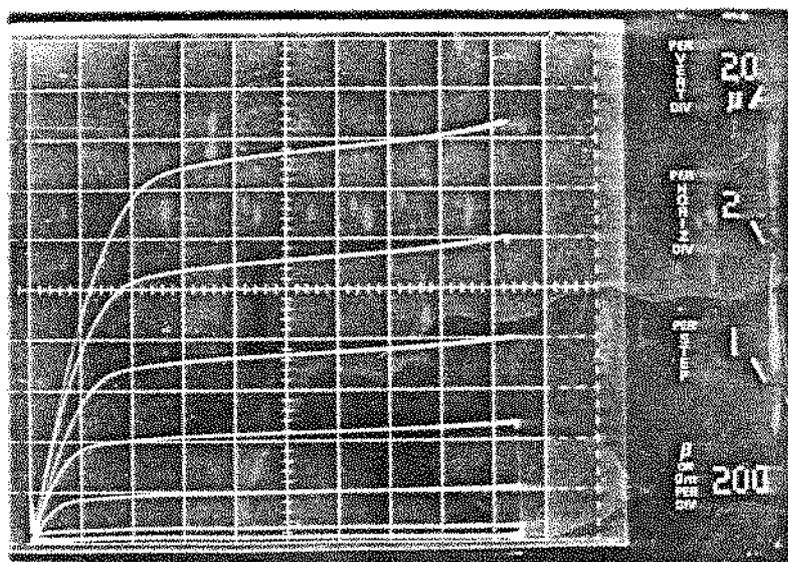


Figura 4.23 - Características típica de $|I_D \times V_D|$ com V_P como parâmetro obtidas para um transistor de $Al/SnO_2/SiO_2/Si$. (Amostra L4-051, pastilha (2,4), lâmina LS-G).

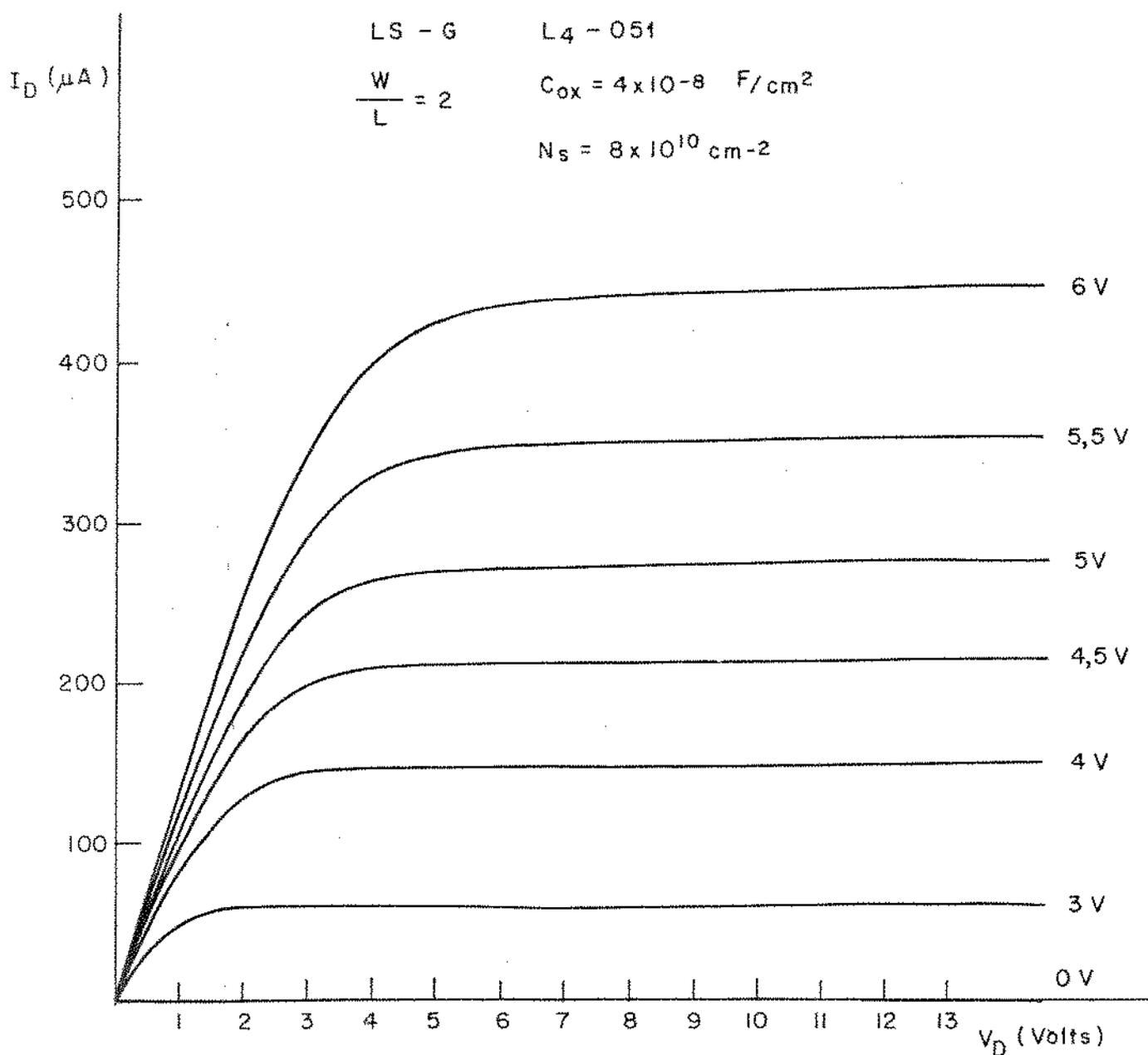


Figura 4.24 - Características típicas de $|I_D \approx V_D|$ com V_P como parâmetro obtidas para um transistor de $\text{Al/SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$. (Amostra L4-051, pastilha (2.4), lâmina LS-G).

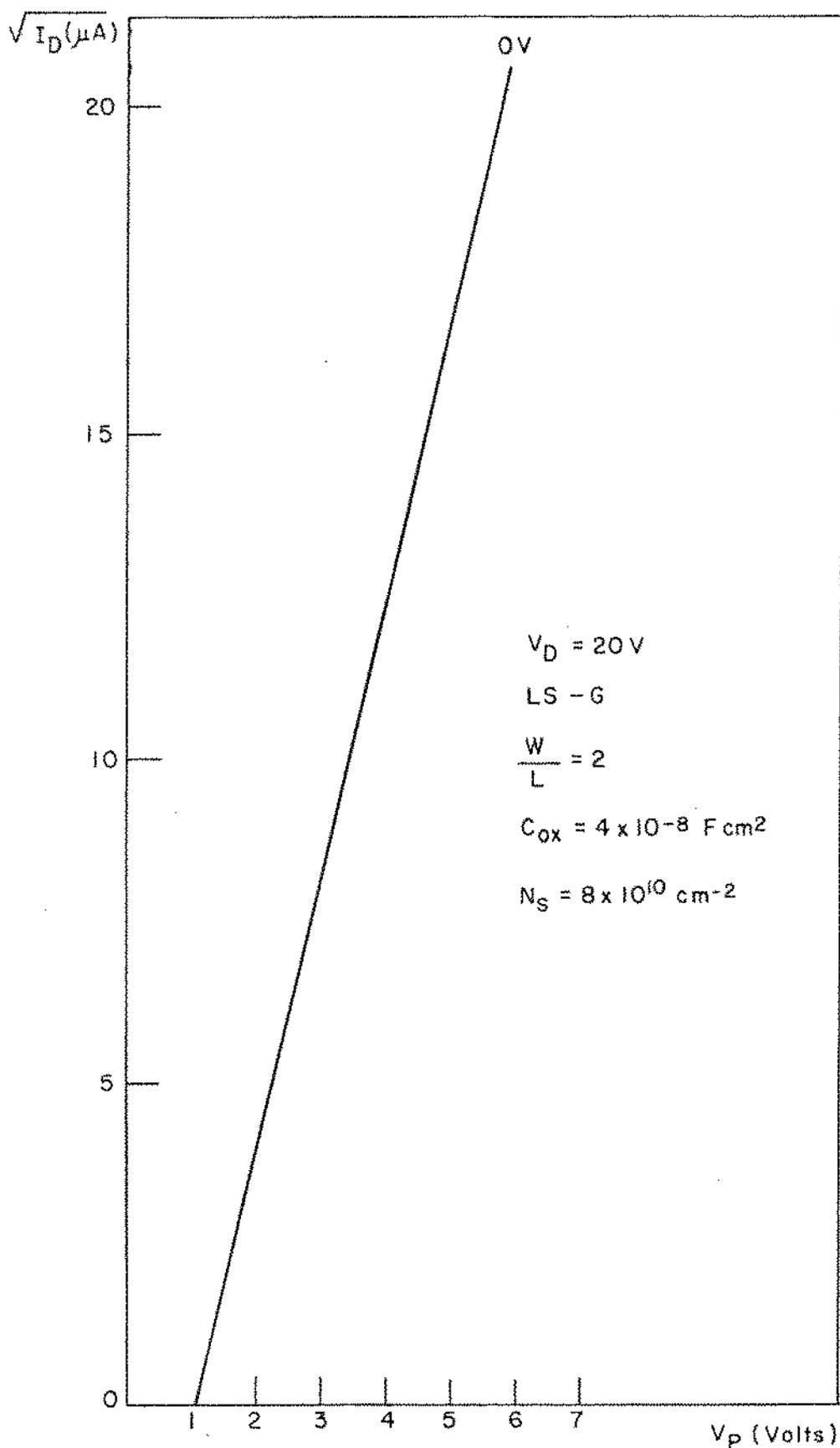


Figura 4.25 - Curva típica de $\sqrt{I_D} \times V_P$, para 0V de polarização de substrato, para um transistor de Al/SnO₂/SiO₂/Si operando na saturação. (Amostra L4-051, pastilha (2.4) da lâmina LS-G).

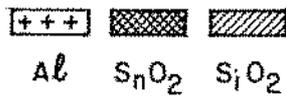
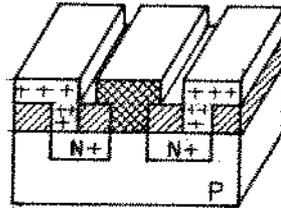


Figura 4.26 - Configuração dos transistores de SnO₂/Si, sem oxidação de porta, construídos nas dimensões especificadas na Tabela I.

Na figura 4.27 são mostradas as características típicas de $|I_D \times V_D|_{V_P = \text{cte}}$ obtidas para estes transistores no traçador Tektronix. Na figura 4.28 são mostradas as mesmas características de $\sqrt{I_D} \times V_P$ com V_D constante e igual a 20V e polarizações de substrato de 0 e -5V para os mesmos transistores. Os valores de V_T e μ_n determinados conforme descrito no item anterior estão mostrados na Tabela XII. Na Tabela XII estão mostrados também os valores de β (fator de ganho dos transistores) e g_m (transcondutância) para todos os tipos de transistores construídos.

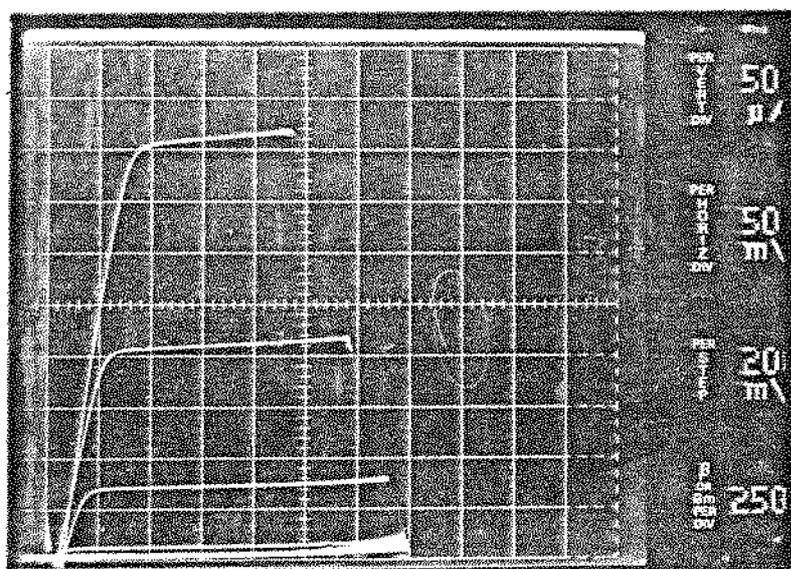


Figura 4.27 - Característica típica $I_D \times V_D$ com V_P como parâmetro de um transistor de SnO_2/Si , fonte e âreno de Al, sem oxidação de porta. (Amostra L4-051-A, pastilha (2,4), lâmina LS-G).

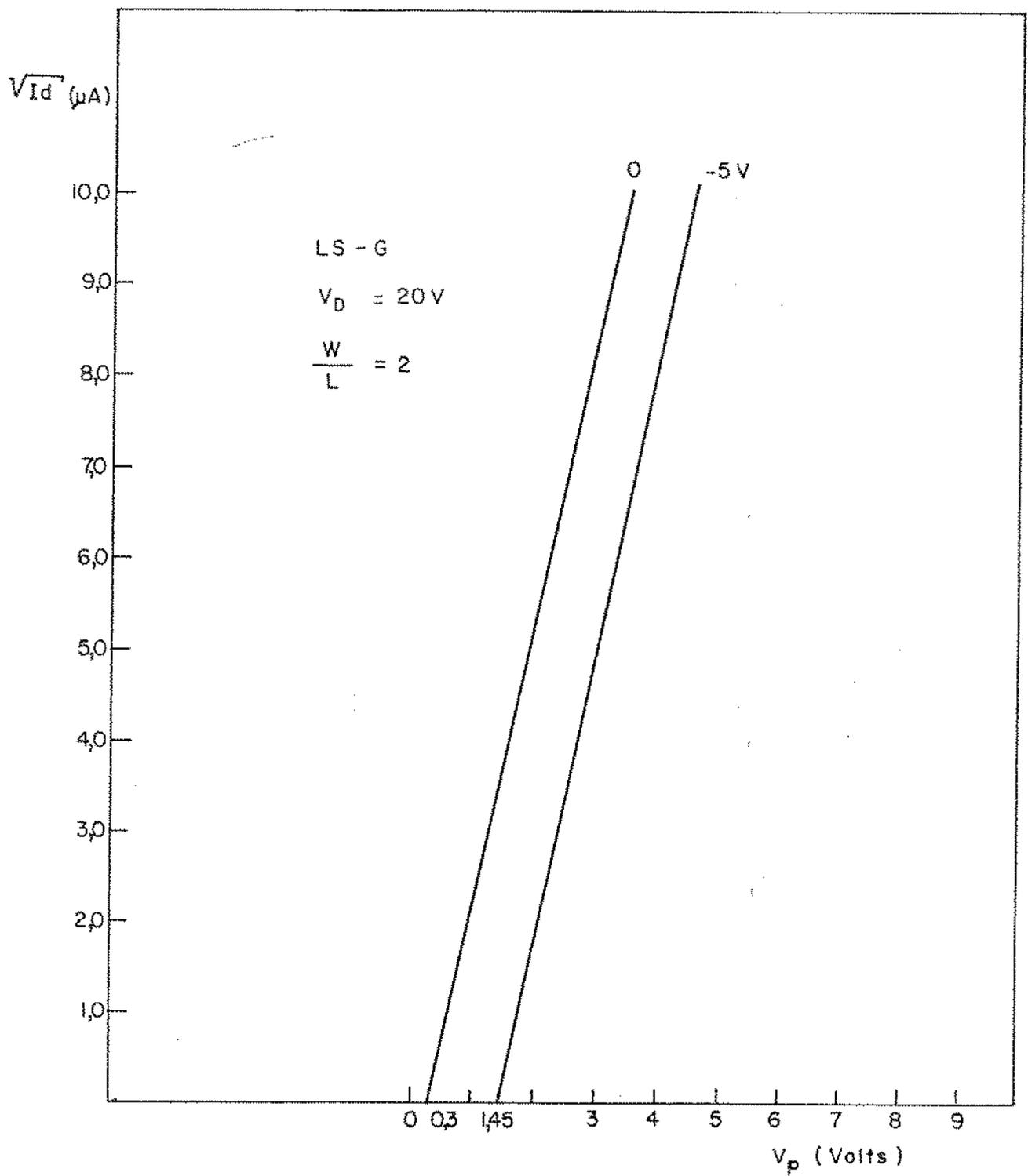


Figura 4.28 - Curva típica de $\sqrt{I_D} \approx V_P$ com V_D cte. e duas polarizações de substrato, de 0 e -5V, para o transistor de SnO_2/Si sem oxidação de porta, com fonte e dreno de Al. (Amostra L4-051-A, pastilha (2,4) da lâmina LS-G).

TABELA XII

	SnO ₂ /SiO ₂ /Si (L4-071)	Al/SnO ₂ /SiO ₂ /Si (L4-051)	Al/SiO ₂ /Si (L4-089)	Al/SnO ₂ /Si (L4-051-A)
V _T (0V)	1,2	1	0,1	0,2
β (A/V ²)	17 x 10 ⁻⁶	30 x 10 ⁻⁶	27,5 x 10 ⁻⁶	18 x 10 ⁻⁶
μ _n (cm ² /V.S)	220	375	344	-
g _m (A/V)	64,6 x 10 ⁻⁶	120 x 10 ⁻⁶	134 x 10 ⁻⁶	86 x 10 ⁻⁶
	30 Amostras diversas	15 Amostras diversas	15 Amostras diversas	6 Amostras diversas
V _T (0V)	(1,4 ± 0,4)	(0,7 ± 0,3)	(0,1 ± 0,2)	(0,2 ± 0,2)
β (A/V ²)	(18 ± 3) 10 ⁻⁶	(28 ± 4) 10 ⁻⁶	(27 ± 2) 10 ⁻⁶	(18 ± 4) 10 ⁻⁶
μ _n (cm ² /V.S)	(240 ± 30)	(350 ± 20)	(340 ± 25)	-
g _m (A/V)	(60 ± 12)	(122 ± 15) 10 ⁻⁶	(140 ± 14) 10 ⁻⁶	(90 ± 10) 10 ⁻⁶

Lâmina LS-G, pastilha (1,2)

V_P = 5VV_D = 20 V

TABELA XI

Transistores de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$		
Amostra L4-070, pastilha (1,1), LS-E	$V_T(0V)$	$V_T(-5V)$
Antes da Metalização	1,1	2,1
Após Metalização	- 0,7	- 0,1
Após Recozimento	0,2	0,7

Diversas Lâminas	Nº de Amostras	$V_T(0V)$	$V_T(-5V)$
Amostras não Metalizadas	30	$1,4 \pm 0,4$	$2,9 \pm 0,4$
Amostras Metalizadas e Recozidas	30	$0,7 \pm 0,3$	$1,3 \pm 0,4$

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

A viabilidade do emprego do dióxido de estanho em dispositivos de efeito de campo foi investigada a partir do estudo do método de obtenção e das propriedades físicas e elétricas dos filmes finos de SnO_2 , bem como do estudo das características elétricas dos transistores de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$. Para que as etapas de processamento pudessem ser acompanhadas, bem como estudada sua influência nas propriedades dos transistores objeto deste estudo, foram construídos dispositivos especiais que permitissem caracterizar essas etapas de processamento. Este princípio é que norteou o projeto da máscara citada no item 3.1.1, a qual além da construção dos transistores de efeito de campo propriamente ditos, permitiu também a construção de vários dispositivos de teste já devidamente descritos na seção 3.1.1. Em particular os capacitores são um instrumento importantíssimo na avaliação dos processos, por permitirem o estudo das propriedades do óxido isolante de SiO_2 , as quais determinam a qualidade final dos dispositivos e circuitos fabricados. Por outro lado os capacitores são um importante elemento de circuito, o que por si só justifica sua caracterização, sendo além disso, o elemento básico dos dispositivos acoplados a carga (CCD) e Bucket-Brigade Devices (BBD) empregados na confecção de sensores de imagem, em processamento de sinais analógicos e em memórias digitais.

Neste capítulo procederemos a uma análise dos resultados obtidos na construção dos capacitores e transistores de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$, estudando seu comportamento elétrico e procurando estabelecer relações entre este comportamento e suas condições de obtenção, sempre em comparação com os dispositivos fabricados pela tecnologia convencional MOS. Em particular analisaremos a técnica de decomposição de vapores

e a viabilidade de seu emprego no processamento de transistores de efeito de campo em substituição às técnicas convencionais de metalização com alumínio.

5.1. Filmes Finos de SnO₂ Obtidos por Decomposição de Vapores

Os filmes de SnO₂ obtidos pela técnica de decomposição de vapores apresentam baixa resistividade elétrica, na faixa de 5×10^{-3} a 3×10^{-3} $\Omega \cdot \text{cm}$, conforme resultados apresentados na secção 4.1, com base nas referências [67,68,69]. Estes resultados permitem sua utilização em lugar do metal na confecção de contatos e conexões elétricas. Se dopados com antimônio, a resistividade pode ser reduzida ainda mais atingindo valores tão pequenos quanto 1×10^{-3} $\Omega \cdot \text{cm}$ conforme relatamos na secção 4.1 [67,68,69]. Se bem que filmes dopados com outros elementos não tenham sido estudados por nós, os resultados de resistividade até aqui obtidos para filmes de SnO₂, dopados ou não com antimônio, confirmam resultados publicados na literatura para outras técnicas de deposição [15, 16,17]. Os resultados são ainda comparáveis aos obtidos para filmes de óxido de índio [72,83] na faixa de 10^{-2} a 10^{-3} $\Omega \cdot \text{cm}$, mas superiores aos relatados para filmes de óxido misto de índio e estanho (ITO), na faixa de 10^{-3} a 10^{-4} $\Omega \cdot \text{cm}$ [84,85,86, 87]. O mesmo pode ser dito com relação ao polissilício cujas resistividades são relatadas como estando na faixa de 10^{-3} a 10^{-4} $\Omega \cdot \text{cm}$ [86,88], todas elas superiores aos valores de resistividade do alumínio (10^{-6} $\Omega \cdot \text{cm}$) [89].

A elevada condutância dos filmes de SnO₂ é atribuída a um comportamento de semicondutor degenerado no qual deficiências de oxigênio, ou átomos de estanho em excesso, ou ainda átomos de elementos estranhos são responsabilizados pela criação de portadores negativos de carga (elétrons) na faixa de 10^{18} a 10^{20} portadores por cm^3 , conforme apresenta-

mos na secção 1.1 [12,14,15,16,17,18,19].

Os filmes de SnO_2 apresentam elevada transmitância (acima de 85%) a comprimentos de onda na faixa do visível (entre 400 e 1200 nm) a qual depende tanto da temperatura de deposição como da concentração de antimônio, conforme relatamos na secção 4.1.

Na faixa de temperaturas de deposição estudadas, os filmes são policristalinos [80,81], com grãos de tamanho bem pequeno, da ordem de 70 a 150 Å, conforme resultados apresentados na secção 4.1 tanto para as medidas por microscopia eletrônica de varredura como por difração de Raio X [67,68,69,80,81]. Não se estabeleceu uma correlação entre o tamanho dos grãos e a temperatura de deposição, a taxa de deposição, a concentração de dopantes ou as características cristalográficas dos substratos, se bem que estas últimas parecem provocar alguma orientação preferencial nos cristallitos de SnO_2 policristalino [80,81]. Os mecanismos de condução elétrica não foram ainda inteiramente entendidas no que se refere a influência do tamanho e orientação dos grãos no espalhamento de portadores [15,16,17].

O método de decomposição de vapores [90] mostrou-se adequado a obtenção dos filmes de SnO_2 , pelas propriedades físicas e elétricas apresentadas, aliadas a homogeneidade e uniformidade observadas ao longo de todas as lâminas, fossem elas processadas numa mesma fornada ou em fornadas distintas. O método apresenta ainda a conveniência de ser processado em baixas temperaturas, entre 350 e 450°C, o que não deixa de ser vantajoso em relação a outras técnicas de deposição química a partir de vapor as quais chegam a exigir temperaturas entre 400 e 900°C [91,92,93] para garantir a obtenção de filmes de baixa resistividade. Este método dispensa ainda a etapa de recozimento que, dependendo do mate-

rial e da técnica de obtenção, chega a exigir temperaturas e levadas, entre 400 e 1000°C [94,83,84,85,86]. O sistema de deposição empregado, conforme descrição efetuada na secção 3.1.3, é extremamente simples o que constitui uma vantagem em relação às outras técnicas de deposição citadas na secção 1.1 [7,8,9,10,11], em termos de custos e facilidade e rapidez de operação. Os equipamentos empregados são extremamente simples em face à complexidade de sistemas de vácuo, fontes de R.F., etc., necessários às técnicas de evaporação e pulverização catódica, por exemplo. As soluções químicas necessárias à deposição dos filmes, são de fácil preparação, conforme descrito na secção 3.1.3, tendo sido empregados produtos de qualidade Pró-Análise (P.A.).

Ainda que não se tenha procedido a um estudo sistemático do processo de deposição em termos das reações químicas que ocorrem, análises qualitativas da composição dos filmes mencionadas na secção 4.1 [67,68,69] permitem-nos supor que na câmara de vaporização são formados vapores abundantes dos produtos orgânicos presentes na solução de partida, os quais atuam como portadores dos vapores de tetracloreto de estanho. Isto porque nos filmes não se encontram traços de quaisquer destes elementos, a menos do cloro que foi detetado em todas as amostras analisadas. Os produtos orgânicos sofrem decomposição a temperaturas superiores a 300°C, garantindo a presença de oxigênio e de vapor d'água necessários às reações de oxidação do estanho expressas nas relações 3.1 e 3.2. Por sua vez o cloro, detetado nos filmes, deve resultar como produto das reações 3.1 e 3.2, devendo estar incorporado na rede de SnO₂ ao longo de toda a espessura dos filmes. Atribui-se a esta contaminação por cloro a alta condutividade observada nestes filmes, os quais são fabricados sem dopagem intencional [5,14,19].

Além das propriedades de elevada condutividade elétrica, elevada transmitância óptica, uniformidade, homoge

neidade e baixa contaminação por impurezas, os filmes de SnO_2 possuem a característica importante de aceitarem a fotografação seletiva em relação ao silício, dióxido de silício e nitreto de silício tanto por via úmida como por plasma. As duas técnicas foram estudadas por nós conforme resultados apresentados na secção 4.2, tendo-se obtido figuras de boa definição, com dimensões de até $4.8\mu\text{m}$ para via úmida e de $6\mu\text{m}$ para via seca [75,76]. Estas dimensões foram limitadas pelas máscaras utilizadas, mas acreditamos que larguras ainda menores possam ser atingidas principalmente por via seca, dada a direcionalidade do ataque por plasma. O ataque anisotrópico não foi investigado por nós, mas devido a sua importância na confecção de circuitos integrados em dimensões muito pequenas, deverá ser objetivo de um estudo no futuro. Isto só será possível com a introdução no sistema de plasma de um equipamento que permita o controle preciso dos fluxos de gases.

5.2. Capacitores de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ em Alta Frequência

Os capacitores de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ construídos na configuração L4-066 da figura 3.1, com área de $2,5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$, e caracterizados em função da tensão aplicada conforme resultado mostrado na figura 4.3, apresentaram o comportamento típico descrito na secção 2.3 para uma estrutura MOS convencional. As três regiões desta curva correspondem às três condições da superfície do silício discutidas na secção 2.3. Para o presente caso de um substrato tipo p, quando a tensão de porta é negativa, a superfície do silício apresenta acumulação de portadores majoritários, atuando como um condutor, em consequência do que a capacitância da estrutura é a mesma de um capacitor de placas paralelas com o óxido de silício como dielétrico: $C = C_{\text{ox}} = \epsilon_{\text{ox}}/t_{\text{ox}}$. Quando a tensão de porta é suficientemente positiva para formar uma região de depleção no silício, a capacitância da estrutura é devida à associação

série das capacitâncias do óxido e da região de depleção, $1/C = 1/C_{ox} + 1/C_d$, conforme discutido na secção 2.3.2. À medida em que a região de depleção se alarga, sua capacitância diminui e a capacitância total decresce. Finalmente, para tensões de porta suficientemente positivas uma camada de inversão se forma, a região de depleção atinge sua largura máxima e a capacitância não mais decresce, conforme discutido na secção 2.3.3.

Este comportamento da capacitância em função da tensão confirma que é irrelevante considerar a presença de uma camada de depleção do lado do SnO_2 conforme discutido na secção 2.6. Isto nos permite tratar o SnO_2 como um metal, o que é compatível com o que foi observado quanto a seu comportamento de semiconductor degenerado.

O valor da capacitância do óxido determinado a partir da figura 4.3 para a estrutura de $SnO_2/SiO_2/Si$ e relacionado na Tabela VII ($C_{ox} = (76 \pm 2)$ pF) corresponde a uma capacitância por unidade de área de 3×10^4 pF/cm². Este valor permite determinar a espessura do óxido de silício como sendo de (110 ± 3) nm se assumirmos que a permissividade elétrica do dióxido de silício é 3.38×10^{-13} F/cm. O valor de C_{ox} para a estrutura de $Al/SiO_2/Si$, obtido a partir da figura 4.4 e relacionado na tabela VII como (102 ± 2) pF, corresponde a uma capacitância por unidade de área de 4×10^4 pF/cm². Neste caso a espessura do óxido foi calculada como (83 ± 3) nm, assumindo-se o valor já mencionado para ϵ_{SiO_2} . Os desvios apresentados correspondem às incertezas avaliadas na leitura dos pontos do gráfico $C \times V$, os quais superam a precisão na leitura dos instrumentos de medida descritos na secção 3.2.2.

Os resultados de $C_{ox} = (79 \pm 9)$ pF e $t_{ox} = (103 \pm 14)$ nm relacionados na tabela VIII e obtidos a partir da média das 23 amostras de $SnO_2/SiO_2/Si$ da lâmina LS-657 e res

pectivos desvios médios quadráticos confirmam o resultado apresentado como típico na figura 4.3. Estes resultados, se comparados aos valores médios e respectivos desvios médios quadráticos de C_{ox} e t_{ox} para as 5 amostras de Al da lâmina LS-656, também relacionados na tabela VIII, indicam flutuações da ordem de 20% para lâminas submetidas às mesmas condições de processamento. Estas diferenças são atribuídas a flutuações no processo de oxidação de porta, em fornadas diferentes. A hipótese de que a permissividade elétrica do SiO_2 pudesse ser diferente nas duas estruturas de SnO_2 e de Al é inadmissível uma vez que aquele óxido é crescido em condições idênticas. A presença sobre o SiO_2 de uma camada de SnO_2 ou de Al não deve alterar substancialmente suas propriedades elétricas, conforme voltaremos a discutir mais adiante, em face a resultados obtidos para estas estruturas medidas numa mesma lâmina.

A diferença de aproximadamente 50% observada na capacitância mínima das estruturas de SnO_2 e de Al representadas na Tabela VII é confirmada pelos valores médios e respectivos desvios quadráticos para as 23 amostras de SnO_2 da lâmina LS-657 e para as 5 amostras de Al da lâmina LS-656, mostrados na Tabela VIII. Lembrando que a capacitância mínima de depleção é dada por (relações 2.3 e 2.19):

$$C_{min} = \frac{\epsilon_{Si} A}{\left[\frac{2\epsilon_{Si} \phi_S}{q N_A^*} \right]^{1/2}} = \frac{\epsilon_{Si} A}{\sqrt{4kT\epsilon_{Si} \ln(N_A^*/n_i)}} \quad (5.1)$$

foram calculados para a concentração efetiva de portadores na superfície do silício os valores de $(1 \pm 0,3)10^{15} \text{ cm}^{-3}$ e $(3 \pm 0,3)10^{15} \text{ cm}^{-3}$ respectivamente para as amostras típicas de SnO_2 e de Al, conforme Tabela VII. Estes valores são con-

firmados pelas médias nestas lâminas (ver Tabela VIII) resultados estes inferiores aos obtidos para estas lâminas a partir da medida da resistividade por quatro pontas ($N_A = 4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ para a lâmina LS-657 e $N_A = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ para a lâmina LS-656, também mostrado na Tabela VIII). A comparação destes resultados não nos permite afirmar se houve redistribuição de portadores na superfície da lâmina, por efeito da oxidação, tendo em vista a incerteza na medida por quatro pontas. Assim sendo o resultado obtido para a concentração efetiva N_A^* é o que deverá ser aceito como o melhor valor para a concentração de portadores na lâmina.

A tensão de banda plana V_{FB} , por sua vez, apresenta valores bem inferiores para os capacitores de SnO_2 , conforme havíamos previsto no capítulo 2, uma vez que ϕ_{SS} é menor que ϕ_{MS} (-0.06 V para o SnO_2/Si e 0.8 V para o Al/Si). A partir destes valores e dos resultados de C_{ox} para as estruturas de SnO_2 e de Al (respectivamente 76 pF e 100 pF) os valores de V_{FB} determinados experimentalmente para as estruturas de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ ($V_{FB} = 0.2 \text{ V}$) e de $\text{Al}/\text{SnO}_2/\text{Si}$ ($V_{FB} = -1.2 \text{ V}$) só podem ser explicados se admitirmos que a carga presente na interface (N_S) seja diferente nos dois casos.

5.2.2. Cargas Presentes na Região da Interface (N_S)

De acordo com o exposto no parágrafo anterior calculou-se a densidade de cargas N_S presentes na região próxima a interface do SiO_2/Si , utilizando-se a expressão 2.7. Obtivemos os valores de $N_S = (2 \pm 1) \text{ E } 10 \text{ cm}^{-2}$ para a amostra de SnO_2 (L4-066, (2,5) da lâmina 657) e $N_S = (9 \pm 1) \text{ E } 10 \text{ cm}^{-2}$ para a amostra de Al (L4-092, (2,5) da lâmina 656) conforme mostrado na Tabela VII. Os valores médios obtidos para as 23 pastilhas da lâmina LS-657, $|N_S = (2.6 \pm 1.5) \text{ E } 10 \text{ cm}^{-2}|$, bem como para 5 pastilhas da lâmina LS-656, $|N_S = (9.3 \pm 1.3) \text{ E } 10 \text{ cm}^{-2}|$, confirmam estes resultados ao longo destas lâmi-

nas, conforme mostrado na Tabela VIII. O mesmo comportamento foi observado em 30 amostras L4-066 medidas em diferentes lâminas conforme representado pelo valor médio e respectivo desvio quadrático médio, ainda na Tabela VIII. O mesmo se aplica para as 30 amostras de alumínio, de diferentes lâminas, cujo valor médio e respectivo desvio quadrático médio é também mostrado na Tabela VIII.

Como foi visto no item 3.2.2 a técnica CxV em alta frequência é sensível à presença de cargas no óxido na região próxima à interface, cuja densidade total foi identificada por N_S , a qual engloba a contribuição das cargas fixas N_f , das cargas móveis N_m e das cargas criadas por radiação N_R , conforme discutido no item 2.3.4. A maior densidade de cargas N_S obtida nas estruturas de Al, em comparação às de SnO_2 , faz-nos supor que os processos de metalização, fotogração e recozimento do Al sejam os responsáveis pelo valor maior de N_S , uma vez que as amostras de SnO_2 foram medidas antes destas etapas. Como as cargas N_m e N_R serão discutidas mais detalhadamente nas seções seguintes, compete-nos aqui apenas avaliar a contribuição das cargas fixas N_f para o valor de N_S , dado que a técnica CxV em alta frequência não permite determinar esta parcela separadamente. Como a origem das cargas N_f é atribuída a defeitos na estrutura do óxido de silício na região da interface, conforme discutido na seção 2.2.k, é de se esperar que influam em sua densidade a orientação cristalográfica da lâmina de Si, a concentração de impurezas no Si e as condições de oxidação, ambientais e de temperatura. Considerando que os resultados de N_S mencionados na Tabela VIII foram obtidos para lâminas de silício de mesma orientação cristalográfica, de mesma ordem de grandeza e tipo de dopagem e submetidas ao mesmo processo de oxidação (com TCE) é de se esperar que o valor de N_f seja o mesmo para ambas as estruturas de SnO_2 e de Al consideradas.

Por outro lado, nossa expectativa é de que N_f deva ser bem pequeno, em face aos resultados apresentados na literatura, uma vez que todas as lâminas:

- têm orientação (100). Deal et al [27] e Arnold et al [95] mostraram que a densidade de cargas fixas é menor para a orientação (100).
- foram processadas a 1000°C durante 10 minutos em atmosfera de nitrogênio na etapa de passivação e recozimento. Deal et al [27] mostraram que o recozimento após a oxidação, em alta temperatura e em atmosfera inerte, reduz N_f .

É importante assinalar que nenhum método de medida permite a detecção de N_f diretamente e que portanto, os valores de N_f citados na literatura são na verdade os valores de N_S , estes sim detetáveis diretamente pela técnica CxV. Apesar dessa confusão na literatura quanto a N_S e N_f , os modelos aceitos para explicar a origem de N_f são bastante coerentes e consistentes com os resultados experimentais obtidos para N_S , onde se consideram os fatores estruturais da interface de SiO_2/Si e sua dependência com as condições de processamento.

A partir das considerações feitas podemos concluir até aqui que os processos de metalização, fotogração e recozimento do Al sejam responsáveis pelo maior valor de N_S , através de maiores valores de N_m e N_R , no caso das estruturas de $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, já que não há nenhuma razão para suspeitarmos de diferentes valores de N_f nas duas estruturas, de SnO_2 e Al. Assim sendo, apenas a comparação das medidas de N_m e de N_R para ambas as estruturas é que permitirá uma análise mais conclusiva destes resultados. Por sua vez os resultados de N_S obtidos para lâminas oxidadas sem TCE, também serão discutidos mais adiante, mas também podemos adiantar que eles não são conclusivos quanto a sua influência em N_f parti

cularmente.

Nossos resultados de N_S para ambas as estruturas de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ e $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ são, por sua vez, comparáveis aos resultados relatados na literatura para estruturas de $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ [95], $\text{ITO}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ [86] e $\text{Si-poli}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ [86], para lâminas de orientação (100), oxidadas por via seca, na presença de cloro e recozidas à temperaturas elevadas ($\sim 1000^\circ\text{C}$) ou em R.F. [96]. É importante assinalar que o valor da afinidade eletrônica do silício ($\chi_{\text{Si}} = 4.05 \text{ eV}$) usado por nós no cálculo da diferença de funções de trabalho desfavorece essa comparação uma vez que todos os autores citados utilizaram o valor de 4.24 eV, o que redundava em valores menores para N_S .

5.2.3. Cargas Míveis (N_m)

Conforme relatado no item 4.3 calculamos a densidade de cargas míveis N_m presentes no dióxido de silício das estruturas de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ a partir das medidas BxT, obtendo-se os resultados de $(3 \pm 1) \times 10^{10}/\text{cm}^2$ para uma amostra da lâmina LS-657 (ver Tabela VII) e $(5 \pm 1) \times 10^{10}/\text{cm}^2$ para uma amostra da lâmina LS-A, relacionada na Tabela VIII. Já para as estruturas de $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ obtivemos os valores de $(2 \pm 1) \times 10^{11}/\text{cm}^2$ para uma amostra da LS-656 e de $(3 \pm 1) \times 10^{11}/\text{cm}^2$ para uma amostra da LS-A, conforme também mostrado nas Tabelas VII e VIII.

Lembrando o que foi dito no item 2.2.2 quanto a estas cargas, sua origem é atribuída à presença de íons de metais alcalinos ou de prótons (H^+) os quais podem ser introduzidos no óxido de silício durante o processo de fabricação dos dispositivos. Foi dito também que suas características principais são a capacidade de sofrer deslocamento sob uma tensão aplicada à porta [96] e a possibilidade de sua neutralização pela presença da clorina adicionada durante o proces

so de oxidação do silício. Assim sendo a maior densidade de cargas móveis detectada nas estruturas de $\text{Al}/\text{SnO}_2/\text{Si}$ permite-nos responsabilizar as etapas de metalização, fotogração e recozimento do alumínio pela maior contaminação com íons alcalinos ou mesmo prótons nas estruturas de $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, já que as estruturas de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ não foram submetidas a estas etapas de processamento. Pode-se suspeitar de que metais alcalinos presentes nos reagentes ou nas fontes de evaporação usadas no processo de metalização de porta possam ser responsáveis por esta contaminação. Por outro lado se considerarmos que os organismos vivos, em particular o homem, são uma importante fonte de sódio, o maior número de etapas de processamento sofrido pelas amostras de alumínio pode ser a causa da maior densidade destes íons nestas amostras, ainda que tomados os cuidados e precauções durante a manipulação das mesmas para minimizar esta contaminação. Deve-se ainda lembrar que prótons podem ser introduzidos pela água ou pelo álcool usados nas etapas úmidas, devendo portanto ser maior sua densidade conforme seja maior o número de etapas em que estes produtos sejam empregados.

A menor densidade de cargas móveis pode ainda estar associada ao aprisionamento e fixação (gettering) destas cargas por íons de cloro, efeito este que de alguma forma é mais intenso nas estruturas de SnO_2 do que nas de Al . Cumpre-nos notar que ambas as lâminas LS-657 e LS-A sofreram oxidação térmica com TCE, o que, à primeira vista, poderia fazer-nos supor efeitos iguais de fixação pelo cloro introduzido. Todavia a detecção de traços de cloro nos filmes de SnO_2 , conforme relatado na secção 4.1, leva-nos a suspeitar de que esse efeito de fixação seja mais acentuado nas estruturas de SnO_2 cabendo uma investigação mais cuidadosa sobre este comportamento, conforme voltaremos a discutir na secção 5.2.6.

Conforme foi exposto anteriormente, os íons $\text{m}\bar{\text{o}}$

veis presentes na interface contribuem para o deslocamento da tensão de banda plana medida pela técnica CxV em alta frequência, e portanto, para o valor de N_S . Pode, portanto, à primeira vista parecer estranho que o valor de N_m obtido pela técnica BxT seja comparável ao valor de N_S anteriormente analisado. Todavia é importante lembrar que naquele resultado contribuíram os íons localizados próximo à interface em quanto que na medida BxT a polarização positiva na porta em temperatura alta causa o deslocamento dos íons para a interface, aumentando, portanto, sua concentração nesta região. Nesse sentido, faz-se necessária uma medida mais cuidadosa, aplicando-se uma tensão negativa à porta, enquanto a amostra é submetida à temperaturas altas, de modo a se remover as cargas desta região. Inclusive temperaturas e tensões mais altas devem ser ensaiadas e vários ciclos repetidos, acompanhados da medida de N_m de modo a se poder reduzir a concentração de íons na região da interface, o que facilitaria a compreensão de sua influência em N_S . Por outro lado, resta-nos ainda identificar se são prótons ou íons alcalinos (e quais) os responsáveis pela instabilidade do SiO_2 , o que só pode ser feito pelas técnicas de análise com traçadores radioativos, análise por ativação com neutrons, fotometria de chama e espectroscopia de massa de íons secundárias, todas elas pouco acessíveis no momento [98].

Ainda no que se refere às cargas móveis, os valores das densidades por nós obtidas para as estruturas de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ são bastante inferiores aos obtidos por outros autores para as estruturas de $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, $\text{Si-poli}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ e $\text{ITO}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ [86]. Nossos resultados para as estruturas de $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ são, por sua vez comparáveis aos menores valores relatados na literatura, o que indica que a qualidade dos processos efetuados tanto para a fabricação de estruturas de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ como para as estruturas de $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ está no limite da técnica com relação a problemas de contaminação.

5.2.4. Cargas Capturadas na Interface (N_i)

Os resultados obtidos pela técnica Ixt quase es-
tática para a densidade de cargas capturadas na interface N_i
e relatados na secção 4.3 para as estruturas de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$
($N_i \approx (1,0 \pm 0,5) \text{ E } 10 \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$) e de $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ ($N_i \approx$
(2 ± 1) $\text{ E } 10 \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$) são comparáveis para as duas estrut
ras.

Conforme já referimos na secção 2.2.3 a princi-
pal característica dos estados de interface é que eles podem
se carregar e descarregar pela troca de portadores com o si-
lício, podendo ser aceitadores ou doadores conforme sua posi-
ção em relação ao nível de Fermi. A captura de cargas pelos
estados de interface varia com a tensão aplicada à porta,
classificando-se estes estados em lentos e rápidos conforme
seja a rapidez de resposta com a frequência do sinal. A res-
posta do capacitor de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ à voltagem variando lenta-
mente no tempo apresenta-se simétrica em relação a ambas as
polaridades de tensão, o que indica que a distribuição de
cargas nos estados de interface está continuamente em equilí-
brio com a tensão aplicada. Desde que mantida a condição de
equilíbrio é de se esperar que a medida não dependa da fre-
quência da tensão aplicada. Por sua vez a observação de que
não ocorre distorção ou alargamento da curva de corrente
quando a varredura é efetuada nos dois sentidos de polarida-
de, indica que a emissão de portadores pelos estados não é
um fator limitante no mecanismo de transporte da estrutura.
Como as nossas medidas só foram efetuadas em temperatura am-
biente, sem aplicação de tensão (ensaio BxT) a determinação
da concentração de íons móveis não pode ser efetuada por es-
ta técnica.

Conforme mencionamos anteriormente na secção 2.
2.3 os estados de interface são estados de energia permiti-
dos criados na banda proibida na superfície do silício em

decorrência da interrupção na periodicidade da rede cristalina na interface com o SiO_2 . Os diferentes modelos associam estes estados a ligações covalentes não saturadas ou incompletas na superfície do silício, ainda que esta superfície esteja coberta pela camada de óxido $|100|$.

Atribuídas ao rearranjo cristalino dos átomos superficiais do silício, a densidade de estados na interface deve depender da orientação cristalográfica do silício, bem como das condições de processamento, tais como temperatura e condições de oxidação bem como da temperatura e condições ambientais no recozimento (se em atmosfera de N_2 , H_2 , H_2 , etc). Em outras palavras, a densidade de estados de superfície depende dos mesmos parâmetros que afetam a densidade de cargas fixas, sendo que esta influência pode se dar na mesma direção ou em direção oposta àquela $|29,25|$. Por exemplo o recozimento rápido a 1000°C em atmosfera de N_2 reduz ambas as densidades N_f e N_i , assim como influem no mesmo sentido a orientação do substrato e a temperatura de oxidação $|101|$. Há muitos resultados experimentais mostrando esta estreita correlação entre N_i e N_f (Werner $|102|$, por exemplo), mas a exata natureza dessa correlação não está ainda entendida conforme já mencionamos na seção 2.2.3).

Em vista do exposto, os resultados para a densidade de cargas na interface N_i obtidos para as estruturas de SnO_2 e Al mencionadas a partir de medidas em baixa frequência, indicam que a substituição do Al por SnO_2 não altera substancialmente as propriedades da interface. Este resultado está de acordo com a nossa suposição quanto a densidade de cargas fixas N_f , seção 5.2.2, dado que as condições de obtenção eram idênticas para ambas as amostras.

Por outro lado nossos resultados para N_i para ambas as estruturas de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ e $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ são comparáveis aos obtidos por outros autores para as estruturas de

ITO/SiO₂/Si [84,85,86], Si-poli/SiO₂/Si [86] e Al/SiO₂/Si [96,98].

Como os estados de interface não acompanham variações rápidas da tensão aplicada à porta, eles não contribuem para a capacitância em alta frequência. Todavia como estes estados acompanham variações lentas na tensão de polarização de porta, estes estados alteram a curva CxV, em alta frequência esperada para um capacitor ideal, à medida em que o capacitor é trazido da acumulação para a inversão [98], quando muda a ocupação destes estados à medida em que muda a carga na camada de depleção. No entanto, a curva do capacitor com estados de interface não se desloca paralelamente à curva CxV de um capacitor ideal (sem estados de interface), calculada para a mesma dopagem do substrato e mesma espessura do óxido, como efetuado para a determinação de N_S. Assim a simples comparação da curva ideal com a curva experimental de CxV em alta frequência deve permitir a determinação de N_i. Apesar da simplicidade do método esta determinação não foi ainda efetuada por nós, devendo sê-lo em futuro próximo.

5.2.5. Cargas Provocadas por Radiação Ionizante (N_R)

Conforme relatado no item 4.3, a partir das medidas de CxV em alta frequência, obtivemos o valor de $(3 \pm 1) \times 10 \text{ cm}^{-2}$ para a densidade de cargas na interface do SiO₂/Si para a estrutura de SnO₂/SiO₂/Si (amostra L4-066 da pastilha (1,1), lâmina LS-E), antes de submetê-la ao processo de metalização (Tabela IX). Logo após essa medida a lâmina LS-E foi submetida à etapa de metalização e subsequente remoção do alumínio, etapa essa necessária para a construção dos dispositivos de Al/SiO₂/Si na mesma lâmina, conforme sequência mostrada na figura 3.4. Medimos novamente a densidade de cargas na mesma amostra L4-066 da mesma pastilha (1,1) e obtivemos

o valor de $N_S = (3 \pm 1) \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, a partir da curva CxV na figura 4.8 (ver também a Tabela IX). Nesta etapa medimos também a amostra L4-092 de Al/SiO₂/Si da pastilha (1,1) da lâmina LS-E, obtendo o valor de $(9 \pm 1) \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ (Tabela IX). Como se pode observar, a estrutura de SnO₂/SiO₂/Si sofreu um acréscimo de uma ordem de grandeza na densidade de cargas na interface. Este aumento pode, em princípio, ser associado a efeitos da radiação X criada pelo feixe eletrônico de alta energia utilizado para evaporação do alumínio. Neste caso o deslocamento da curva CxV estaria sendo provocado pela geração de cargas positivas na região próxima a interface SiO₂/Si. Conforme já discutimos na seção 2.2.4 o acúmulo de cargas positivas a poucas centenas de angstroms da interface é decorrente da geração de pares de elétrons e lacunas na quebra de ligações no SiO₂, uma vez que as lacunas tem baixa mobilidade e o silício não consegue suprir elétrons para sua neutralização. A energia mínima para a criação de um par é igual a energia da banda proibida (8.8 eV no SiO₂) sendo que a energia excedente é comunicada como energia cinética aos pares criados. Por sua vez o número de pares criados é proporcional a energia perdida dentro do material. Outro efeito importante da radiação ionizante é a geração de estados na interface, dentro da banda proibida do Si, os quais podem prender cargas positivas. Os danos de radiação correspondentes ao deslocamento de átomos na rede não precisa ser considerado aqui pois ele só é importante quando a radiação incidente é constituída de partículas energéticas.

Antes que possamos tirar qualquer conclusão quanto aos resultados vamos inicialmente analisar a natureza da radiação X incidente e verificar se ela por si só justifica o comportamento observado.

Como se sabe, há dois tipos de radiação que podem ser criados por um feixe eletrônico: a radiação contínua ou de freiamento (Bremstrahlung) e a radiação caracterís

tica do alumínio, claramente definida em energia. As intensidades das radiações contínua e característica dependem ambas da corrente do feixe eletrônico, no caso 0,3 A, sendo que a intensidade da linha $K\alpha$ é proporcional à diferença entre a energia dos elétrons incidentes e a energia necessária para a excitação da linha, enquanto que a intensidade da radiação contínua é proporcional ao quadrado da tensão aceleradora.

A energia dos raios X absorvida nas diferentes camadas da nossa amostra depende das espessuras dessas camadas, de seus coeficientes de absorção de massa α , e da distribuição espectral da radiação incidente.

Na figura 5.1 são mostrados os coeficientes de absorção do Si, do Al e do SiO_2 em função da energia da radiação X incidente, obtidos de dados compilados na literatura [103], onde o coeficiente de absorção do SiO_2 foi calculado a partir da média ponderada dos coeficientes de absorção do Si e do O_2 [104] como:

$$\alpha_{\text{SiO}_2} = 0.4 \alpha_{\text{Si}} + 0.53 \alpha_{\text{O}_2} \quad (5.1)$$

Do mesmo modo, calculamos o coeficiente de absorção do SnO_2 , a partir da média ponderada dos valores compilados na literatura para o Sn e o O_2 [103], obtendo-se:

$$\alpha_{\text{SnO}_2} = 0.78 \alpha_{\text{Sn}} + 0.22 \alpha_{\text{O}_2} \quad (5.2)$$

A energia total absorvida numa camada resulta da soma da energia absorvida na linha $K\alpha$ e da integral para todo o espectro contínuo. Galloway et al [104] calcularam a dose total absorvida numa camada de SiO_2 para diferentes ener-

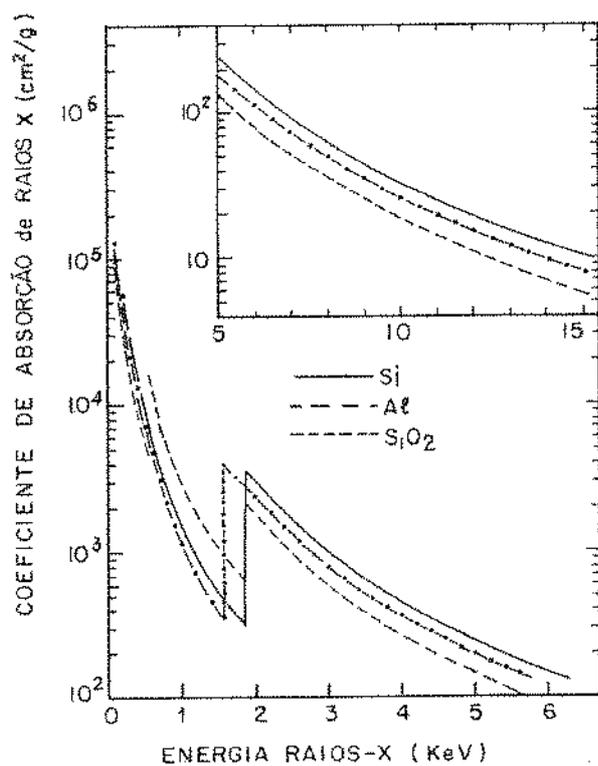


Figura 5.1 - Coeficiente de absorção de raios-X para o silício, alumínio e SiO₂ em função da energia dos raios-X [104].

gias do feixe na faixa de 5 a 15 KeV, supondo que para depositar 1µm de Al o processo de metalização durou aproximadamente 333 s e supondo uma potência constante de 5W no feixe eletrônico. Eles calcularam uma dose de 6×10^6 rad no SiO₂, com um fator de atenuação de 1.7 causado pela blindagem da camada de alumínio depositada.

Considerando que a intensidade da radiação X característica (linha K_α do Al) é pelo menos 2 ordens de grandeza mais intensa que a radiação X contínua para um feixe eletrônico de 7 KeV [104], calculamos o fator de atenuação introduzido pelas camadas de SnO₂, SiO₂ e Al apenas para a energia de 1.487 KeV. Supondo que o feixe incidente tenha uma intensidade I₀ e energia de 1.5 KeV (linha K_α) pode-se calcular a absorção numa camada aplicando-se a lei de Beer:

$$I = I_0 e^{-\alpha \times (t)} \quad (5.3)$$

onde a espessura da camada x (t) é considerada como uma função do tempo.

Durante a metalização a intensidade da linha K_α, que atinge a camada de SiO₂ depois de atravessar as camadas de Al e SnO₂, pode ser calculada como:

$$I_1(\text{SiO}_2) = I_0 e^{-\alpha_{\text{Al}} \times x_{\text{Al}}(t)} e^{-\alpha_{\text{SiO}_2} \times x_{\text{SiO}_2}} e^{-\alpha_{\text{SnO}_2} \times x_{\text{SnO}_2}} \quad (5.4)$$

nas estruturas de SnO₂/SiO₂/Si. Em contrapartida, a intensidade dessa linha que atinge a região da interface SiO₂/Si, nas estruturas de Al/SiO₂/Si, é dada por:

$$I_2(\text{SiO}_2) = I_0 e^{-\alpha_{\text{Al}} x_{\text{Al}}(t)} e^{-\alpha_{\text{SiO}_2} x_{\text{SiO}_2}} \quad (5.5)$$

Ainda que não calculemos a dose integral absorvida na camada de SiO_2 de ambas as estruturas de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ e de $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, a comparação das relações (5.4) e (5.5) permite-nos avaliar a diferença de dose recebida em ambos os casos estudados.

A relação entre os fatores de atenuação:

$$\frac{e^{-\alpha_{\text{Al}} x_{\text{Al}}(t)} e^{-\alpha_{\text{SiO}_2} x_{\text{SiO}_2}} e^{-\alpha_{\text{SnO}_2} x_{\text{SnO}_2}}}{e^{-\alpha_{\text{Al}} x_{\text{Al}}(t)} e^{-\alpha_{\text{SiO}_2} x_{\text{SiO}_2}}} = 0,97 \quad (5.6)$$

sugere que a dose absorvida próxima a interface de SiO_2/Si , correspondente à linha K_{α} do Al, poderia ser responsável por uma carga 30% maior no caso das estruturas de $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ em relação às de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$. Todavia os resultados apresentados no início desta seção indicam que a carga nas primeiras é 3,0% maior que nas segundas. Este resultado só poderá ser entendido se efetuarmos uma análise mais cuidadosa da dose total recebida, considerando-se a contribuição da radiação contínua e o comportamento do coeficiente de absorção em energias mais altas.

Voltando aos resultados de CxV em alta frequência mostrados nas figuras 4.9 e 4.10 suspeitamos de que tenha aumentado a densidade de estados na interface de ambas as estruturas de SnO_2 e de Al uma vez que as curvas antes e depois da irradiação não são nitidamente paralelas. Todavia não efetuamos o cálculo da densidade de estados a partir destas curvas [98] nem tampouco determinamos diretamente seu valor a partir de medidas em baixa frequência.

Finalmente nossa análise quanto à natureza das cargas fica ainda prejudicada por não termos efetuado uma medida da densidade de cargas móveis, conforme já discutimos na seção anterior. Conforme analisado naquela seção, há fortes suspeitas de que a etapa de metalização seja responsável pela introdução de íons alcalinos ou de prótons no SiO_2 principalmente nas estruturas de $\text{Al/SiO}_2/\text{Si}$. Faltou aqui também uma medida de N_m na estrutura de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ após a etapa de metalização, para uma comparação quanto à contaminação pelos produtos químicos, fontes de evaporação e manuseio, para comparação com as estruturas de $\text{Al/SiO}_2/\text{Si}$.

Como uma característica importante das cargas criadas por irradiação é sua neutralização por tratamento a temperaturas inferiores a 500°C , é importante analisarmos os resultados para as cargas no óxido N_s após o tratamento a 450°C , durante 30 minutos, para recozimento do Al, conforme mostrado na Tabela IX.

Logo após o recozimento do Al, a medida de CxV em alta frequência nas mesmas amostras de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ (L4-066) e de $\text{Al/SiO}_2/\text{Si}$ (L4-092) da pastilha (1.1) da lâmina LS-E, permitiu determinar a densidade de cargas N_s como sendo $(8 \pm 1) \text{ E } 10 \text{ cm}^{-2}$ na primeira amostra e $(9 \pm 1) \text{ E } 10 \text{ cm}^{-2}$ na segunda. Como observamos os valores de N_s obtidos após o tratamento térmico, são menores para a estrutura de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ do que para a estrutura de $\text{Al/SiO}_2/\text{Si}$, sendo ambos bem superiores ao valor inicial obtido para a estrutura de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ (antes da metalização).

Enquanto que na literatura existe uma convergência de idéias quanto à formação de cargas na interface por efeito de radiação durante a metalização [35,36,37], há uma discrepância entre os diferentes autores quanto a sua remoção pelo processo de recozimento. Alguns afirmam que há uma

redução dessas cargas [38] enquanto que outros afirmam que elas são eliminadas totalmente [105]. O fato mais importante observado por nós é que estes autores não têm condições de determinar um valor inicial para N_S (antes da metalização por canhão de elétrons). A alternativa da metalização por evaporação térmica simples, por sua vez, não nos parece razoável para este confronto, dado que este processo permite um menor controle quanto à contaminação por íons móveis. À luz destas considerações o confronto de nossos resultados para N_S , antes e depois da metalização, e depois do recozimento, parecem indicar que o recozimento a 450°C , durante 30 minutos, parece insuficiente para a neutralização das cargas, tendo em vista a comparação com o valor de N_S para a estrutura de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ antes da metalização. O que nos dá segurança para esta afirmação é o fato de observarmos que os valores de N_m são bastante reduzidos nas estruturas de SnO_2 em comparação às de alumínio e que portanto, as cargas introduzidas por contaminação de íons móveis não estariam mascarando este resultado.

Os resultados aqui obtidos para N_S antes e depois da metalização, e depois do recozimento são mais uma confirmação dos resultados anteriormente apresentados (seção 5) de que N_S é muito inferior nas estruturas de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ do que nas estruturas de $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, já que estas últimas sofrem abrigatoriamente irradiação. Quanto à neutralização incompleta das cargas por recozimento térmico resta ainda a hipótese de que o aumento da densidade de cargas móveis N_m possa ser responsável pelo resíduo de cargas após esta etapa.

5.2.6. Oxidação de Porta com e sem TCE

O estudo dos óxidos clorados teve um desenvolvimento muito intenso nos últimos anos uma vez que sua utilização implica numa diminuição da densidade de cargas móveis nelas presente [106,107]. No nosso caso estudamos a influência do cloro na oxidação de porta das estruturas de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ a partir da medida de N_S e de N_m para amostras cloradas e não cloradas, sempre em atmosfera de O_2 seco. O mesmo estudo foi efetuado, para comparação, em amostras cloradas e não cloradas de $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$.

Os resultados de N_S e N_m obtidos para amostras de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ e de $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, e mostrados na Tabela X, indicam que são comparáveis os resultados obtidos na presença de cloro e sem ele, em ambos os casos, não se podendo avaliar o papel do cloro na fixação dos íons móveis.

Por sua vez os baixos valores das densidades de cargas na interface N_S e de íons móveis N_m , em comparação aos relatados na literatura [86] indicam que os processos de fabricação dos dispositivos estão praticamente isentos de contaminação. Em particular o processo de obtenção dos filmes de SnO_2 , apesar de efetuado com produtos de grau P.A. e sem cuidados especiais, o mesmo ocorrendo com a fotografação do SnO_2 , produziu dispositivos com menores valores de N_S e N_m . Como foi detetada qualitativamente a presença de traços de cloro nos filmes de SnO_2 resta ainda a pergunta se este elemento estaria sendo responsável pelos baixos valores de N_S e N_m encontrados, pela fixação das cargas (gettering) na superfície do SiO_2 . Se bem que se atribua a capacidade de fixação dos íons alcalinos do SiO_2 ao cloro incorporado

durante o processo de seu crescimento, há referências na literatura [108] de que o cloro, implantado nas camadas superficiais do SiO_2 consiga prender os íons alcalinos, reduzindo sua densidade na região da interface SiO_2/Si . Apesar

de suspeitarmos de que o cloro presente nos filmes de SnO_2 possa desempenhar o papel de fixador dos íons móveis, neutralizando sua instabilidade no SiO_2 , uma investigação nesse sentido só poderá ser efetuada pela introdução proposital de íons alcalinos no isolante em concentrações conhecidas, com posterior determinação de N_m . Outra possibilidade seria a obtenção de filmes de SnO_2 , sem o emprego de cloretos, de modo a se evitar os resíduos de cloro nos filmes. A possibilidade de obtenção de filmes por técnicas físicas (pulverização catódica, ou evaporação térmica com canhão de elétrons ou térmica) têm o inconveniente de causar efeitos de radiação e maior contaminação conforme analisamos anteriormente.

5.2.6. Efeito da Luz na Capacitância da Estrutura de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$

O principal efeito da iluminação na curva CxV de alta frequência foi observado qualitativamente conforme discutido na seção 4.3. Na figura 4.3 pode-se observar que o valor da capacitância na região de inversão forte aproxima-se do valor da capacitância obtida pela medida CxV em baixa frequência, quando aumentamos a intensidade da luz. Isto deve-se ao fato dos fótons incidentes gerarem pares de elétrons-lacunas os quais provocam a diminuição do potencial de superfície ϕ_s para uma dada tensão aplicada. A diminuição de ϕ_s provoca uma redução na largura da camada das cargas de inversão respondendo a um aumento da capacitância [22].

5.3. Campo Elétrico de Ruptura do Óxido Isolante

Conforme apresentado na seção 4.4 foi determinado o campo elétrico de ruptura $E_r = 5,9 \times 10^6$ V/cm para uma média de 15 amostras de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$. Este valor é comparável

ao obtido para a média de 15 amostras de Al/SiO₂/Si ($E_r = 5,5 \times 10^6$) V/cm, sendo ambos comparáveis aos resultados obtidos por outros autores [109].

A partir da tensão de ruptura podemos presumir a densidade de defeitos existentes no óxido [109] como estando na faixa de 10^3 a 10^5 cm⁻² para ambas as estruturas de SnO₂ e Al.

5.4. Transistores

Conforme apresentado na secção 4.5 foram em cada lâmina construídos e caracterizados transistores de três tipos: com os três eletrodos de SnO₂, identificados por SnO₂/SiO₂/Si, conforme mostrado na figura 4.12; com o eletrodo de porta de SnO₂ e os eletrodos de dreno e fonte de Al, identificados por Al/SnO₂/SiO₂/Si conforme mostrado na figura 4.22; e finalmente os transistores de porta de SnO₂, dreno e fonte de Al, sem oxidação de porta, conforme figura 4.26. Em cada lâmina foram ainda construídos os transistores com os três eletrodos de Al (Al/SiO₂/Si) para comparação.

Iniciaremos nossa análise pelos transistores de Al/SnO₂/SiO₂/Si, dada sua maior semelhança com os de Al.

5.4.1. Transistores de Al/SnO₂/SiO₂/Si

Os transistores de Al/SnO₂/SiO₂/Si apresentaram um comportamento semelhante ao dos transistores de Al convencionais, conforme análise das características de $[I_D \times V_D]_{V_P=\text{cte}}$ mostradas nas figuras 4.23 e 4.24 (para o SnO₂) em comparação com as figuras 4.14 e 4.16 (para o Al). Como se pode observar são nítidas as regiões li

near e de saturação para as quais valem as relações:

$$I_D = \beta V_D (V_P - V_T) \quad (2.29)$$

e

$$I_{Dsat} = \frac{\beta}{2} (V_P - V_T)^2 \quad (2.38)$$

A figura 4.25 confirma a validade da expressão (2.38) uma vez que a curva de $\sqrt{I_D} \times V_P$ para V_D constante é uma reta. A intersecção desta reta com o eixo de V_P nós dá o valor de V_T . Na tabela estão mostrados os valores de V_T obtidos para ambas as estruturas, sendo o do SnO_2 superior ao do Al, respectivamente 1V e 0.1V.

Como a tensão de limiar depende da densidade de cargas na interface e da diferença de funções de trabalho (ϕ_{SS} ou ϕ_{MS}), conforme expresso na equação (2.29), a diferença dos valores de V_T da Tabela XII só se justifica se for diferente a densidade de cargas na interface nas duas estruturas. Lembrando-se os valores de $\phi_{SS} = -0,06$ eV e $\phi_{MS} = -0,81$ eV pode-se calcular a densidade de cargas na interface das duas estruturas com substratos de $N_A = 3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, empregando-se a equação 2.4.3:

$$N_S(\text{SnO}_2) = \frac{C_{ox}}{q} (V_T - \phi_{SS} - 2\phi_F) = 8 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \quad (5.7)$$

e

$$N_S(\text{Al}) = \frac{C_{ox}}{q} (V_T - \phi_{MS} - 2\phi_F) = 1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \quad (5.8)$$

Estes resultados estão de acordo com os valores obtidos por medida direta nos capacitores conforme foi mostrado na Tabela IX . Deve-se lembrar que os transistores de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ sofreram o processo de metalização de fonte e dreno, o qual é responsável pelo aumento de N_S , conforme foi analisado na secção 5.2.5.

Para os transistores de $\text{Al}/\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ operando na região de saturação, com $V_D = 20 \text{ V}$, determinamos o fator de ganho β a partir da inclinação da reta $\sqrt{I_D} \times V_P$, mostrada na figura 4.25 obtendo-se o valor de $\beta = 30 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2$. Recorrendo-se à expressão 2.23 e utilizando-se os valores de C_{ox} determinados pelas medidas CxV em alta frequência e a relação W/L dos transistores (Tabela I) determinamos o valor da mobilidade efetiva do canal como sendo $\mu_n = 375 \text{ cm}^2/\text{V.s.}$ Recorrendo-se a expressão (2.41) e utilizando-se o valor de β obtido anteriormente, determinamos o valor da transcondutância.

$$g_m = \frac{\partial I_{Dsat}}{\partial V_P} = \beta (V_P - V_T) \quad (5.9)$$

$$g_m = 120 \times 10^{-6} \text{ A/V} \quad (5.10)$$

Analogamente para as estruturas de $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, obtivemos os valores:

$$\beta = 27,5 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2, \quad (5.11)$$

$$\mu_n = 344 \text{ V/cm}^2 \cdot \text{s} \text{ e} \quad (5.12)$$

$$g_m = 134 \times 10^{-6} \text{ V/A} \quad (5.13)$$

A comparação dos resultados obtidos para o fator de ganho β , a mobilidade no canal μ_n e a transcondutância g_m para as estruturas de Al/SnO₂/SiO₂/Si e Al/SiO₂/Si permite-nos concluir que é viável o emprego do SnO₂ como eletrodo de porta na construção dos transistores de efeito de campo. O maior valor de mobilidade obtido nos transistores de SnO₂ pode ser atribuído à menor densidade de estados na superfície do silício (N_i) [42] da qual todavia não temos uma medida direta após submissão à radiação, conforme discutido na secção 5.2.5.

Além disso tendo em vista a menor densidade de cargas móveis determinada nos transistores com porta de SnO₂, é de se esperar que estes transistores sejam menos suscetíveis a instabilidade em seu comportamento devido ao deslocamento de íons no isolante de SiO₂.

5.4.2. Transistores de SnO₂/SiO₂/Si

Os transistores de SnO₂/SiO₂/Si, construídos com fonte e dreno de SnO₂, conforme mostrado na figura 4.12 e cujas características de $I_D \times V_D$ para V_P constante estão mostradas nas figuras 4.13 e 4.15 apresentaram a região da saturação em que vale a relação quadrática (2.38). Observa-se no entanto que a saturação ocorre para tensões mais elevadas de dreno do que no caso do transistore de Al/SnO₂/SiO₂/Si. A curva de $\sqrt{I_D} \times V_P$ para V_D constante mostrada na figura 4.17 é uma reta e permite determinar os valores do fator de ganho ($\beta = 17 \times 10^{-6} \text{ A/V}^2$), da mobilidade ($\mu_n = 220 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ S}^{-1}$), e da transcondutância ($g_m = 64,6 \times 10^{-6} \text{ V/A}$), mostrados na Tabela XII.

Os valores de V_T determinados para 30 amostras ($\bar{V}_T = (1.4 \pm 0,5) \text{ V}$ da Tabela XII), são superiores aos valores obtidos para os transistores de Al ($\bar{V}_T = (0.1 \pm 0.2) \text{ V}$).

Estes valores implicam numa densidade de cargas N_S na interface dos transistores de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ da ordem de $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ enquanto que no caso dos transistores convencionais, já foi calculada como $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, calculadas ambas a partir das expressões 5.7 e 5.8. Estes resultados estão concordando com os valores obtidos diretamente para N_S , a partir das medidas de CxV em alta frequência, conforme analisado na secção 5.2. A baixa densidade de cargas na estrutura de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ está de acordo com o fato desses transistores terem sido medidos antes da etapa de metalização.

Se submetidos à etapa de metalização para a construção das portas das estruturas de $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, os transistores de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ passam a apresentar uma tensão de limiar menor. Na Tabela XI são mostrados os valores da tensão limiar medidos antes e depois da etapa de metalização, conforme resultados apresentados nas figuras 4.19, 4.20 e 4.21, para a amostra L4-070. Nas estruturas $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ a tensão limiar inicialmente positiva ((1.1) V) passa a um valor negativo ((-0.7) V) após a etapa de metalização, voltando ao valor de (+0.8) V após o tratamento térmico a 450°C para recozimento do alumínio. Este comportamento está de acordo com o que foi exposto na secção 5.2.5. uma vez que deve estar aumentando a densidade de cargas N_S , por efeito da radiação, como também pode estar aumentando a densidade de íons móveis N_m por contaminação nesta etapa. Estes valores de tensão de limiar subentendem densidades de carga N_S de $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ (antes da metalização), $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ (depois da metalização) e $8 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ (depois do recozimento), as quais estão de acordo com os valores medidos diretamente por CxV nos capacitores desta mesma pastilha (3×10^{10} , 3×10^{11} e $8 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$). Conforme discutido na 5.2.5, este comportamento indica o recozimento parcial das cargas criadas.

Na tabela XI é mostrado o mesmo comportamento para uma média de 30 amostras de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$, com $\bar{V}_T = (0.7 \pm 0.3) \text{V}$ depois da metalização e do recozimento.

Ao analisarmos as características $I_D \times V_D$ mostradas na figura 4.15, nota-se claramente que o transistor de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ não apresenta a região linear de operação, conforme havíamos previsto na secção 2.7, tendo em vista a introdução dos diodos de heterojunção de SnO_2/Si em série com o dreno e a fonte.

A fim de verificarmos o mecanismo de condução de corrente entre dreno e fonte para uma dada polarização de porta, traçamos a curva $\log I_D \times \log V_D$ para $V_P = 9\text{V}$, a qual é mostrada na figura 5.2. Este gráfico indica uma dependência de $I_D \approx V_D^m$ com $m = 3$, o que indica que é a corrente reversa de tunelamento na heterojunção de SnO_2/Si da fonte quem está limitando a corrente de dreno, uma vez que a heterojunção de Si/SnO_2 de dreno está polarizada diretamente.

O comportamento de $I_D \times V_D^m$ indica que o mecanismo limitante de condução na heterojunção de SnO_2/Si polarizada reversamente é o tunelamento em múltiplas etapas através de estados permitidos na banda proibida do silício, na interface com o SiO_2 . Neste processo os elétrons obtêm energia térmica da rede para atravessar os degraus conforme descrito na secção 2.6, valendo a relação para a densidade de corrente reversa:

$$J_r = J_{ro} \exp \left[-\frac{4}{3h} \left(\frac{m^* \epsilon_{\text{Si}}}{N_{D\text{Si}}} \right)^{1/2} \frac{E_r}{q^{1/2}} \Delta E_C (V_D - V)^{1/2} \right] \quad (2.78)$$

em acordo com o modelo proposto por Riben et al [56].

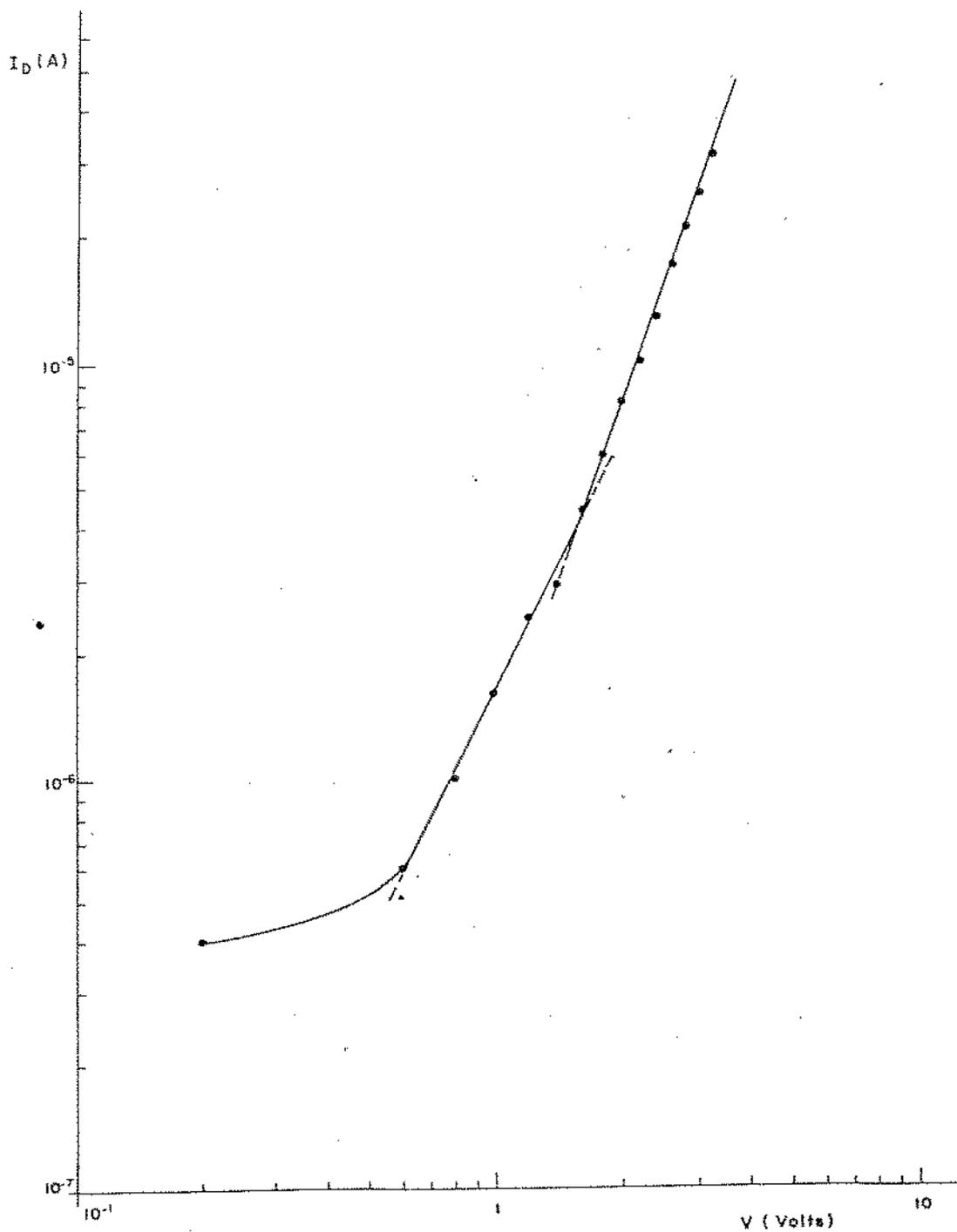


Figura 5.2 - Curva do $\log I_D \propto \log V_D$ para $V_P = 9V$ para o transistor de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$. (Amostra L4-071, (2.4), LS-G).

A fim de determinarmos o valor de E_r atravessado em cada etapa de tunelamento, extrapolamos a reta $\log I_D \times \log V_D$ para $V_p = \text{cte}$ e obtivemos o valor de $J_{ro} = 3.5 \times 10^{-7}$ A/cm². Assumindo o valor da massa efetiva do elétron $m^* = 0.16 m_0$, determinamos o valor $E_r = 0.02$ eV, calculado a partir da expressão 2.78, o que implica no número de etapas de tunelamento igual a:

$$S = \frac{\Delta E_C}{E_r} = 40 \quad (2.75)$$

Por sua vez o valor de E_r calculado a partir da inclinação da reta $\log I_D \times \log V_D$ ($m = 3$) foi da ordem de 0.03 V, próximo do valor 0.02 eV acima. Nossos resultados confirmam, portanto, que o mecanismo de condução que limita a corrente de dreno na região linear é o de tunelamento reverso na heterojunção de SnO₂/Si da fonte, o qual ocorre através de ~ 40 etapas, conforme acabamos de calcular.

A fim de avaliarmos o valor da resistência série introduzida pelos diodos de heterojunção de dreno e fonte, medimos a característica direta $I \times V$ de um diodo de SnO₂, amostra L4-067, da pastilha (1.2), lâmina LS-G. Na figura 5.2 é mostrada esta característica juntamente com as características de $I_D \times V_D$ dos transistores de SnO₂/SiO₂/Si para $V_p = 6V$ e de Al/SiO₂/Si para $V_p = 6V$ e $5V$.

A resistência série correspondente ao transistor de Al é de $R_S(\text{Al}) \cong 14k\Omega$, enquanto que a do diodo $R_S(\text{diodo}) \cong 19k\Omega$. Por sua vez a resistência série do transistor de SnO₂ é da ordem de $R_S(\text{SnO}_2) \cong 30k\Omega$, aproximadamente igual à soma das duas anteriores.

A resistência série entre o dreno e a fonte de um transistor MOS convencional decorre da contribuição das

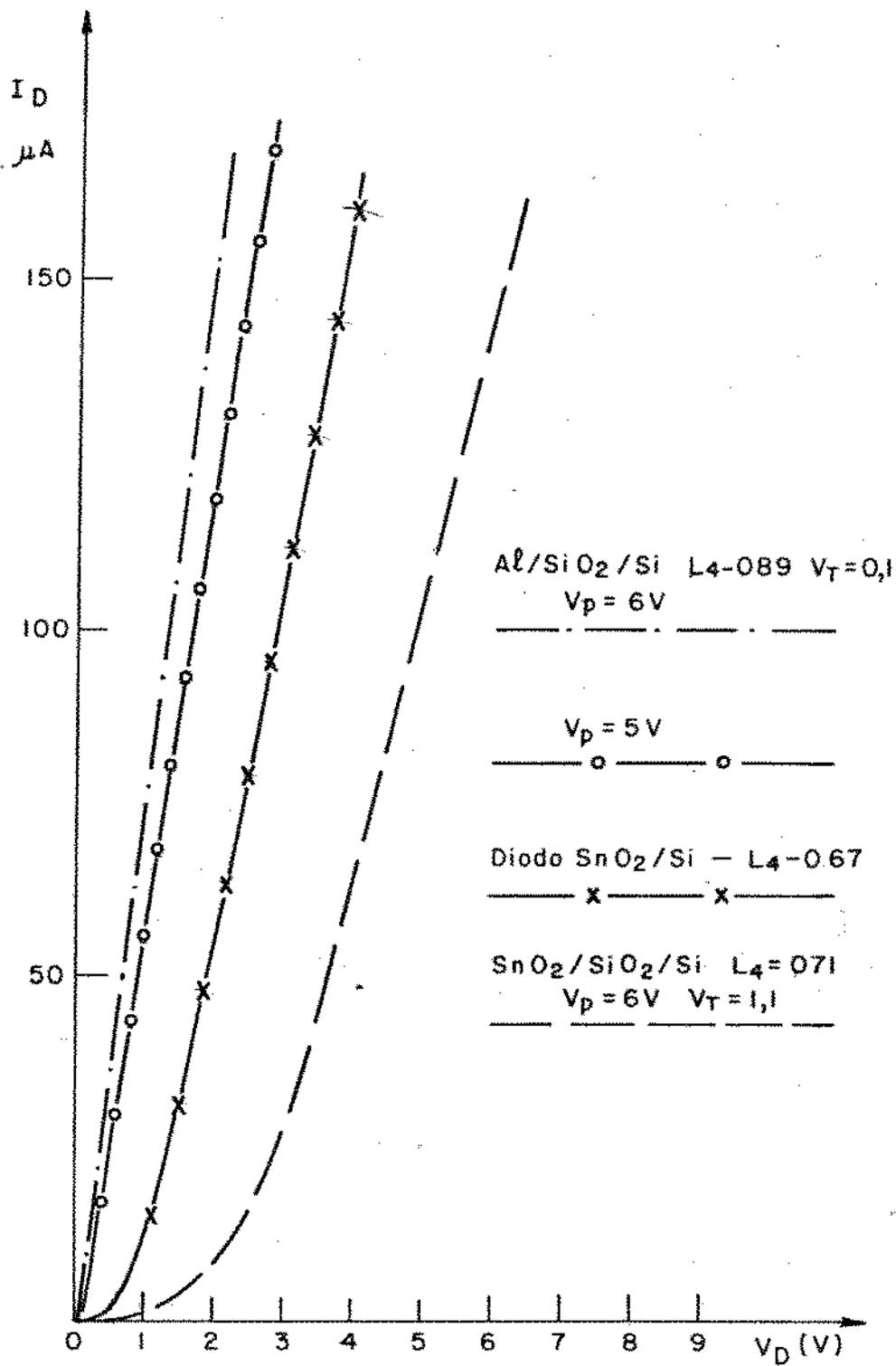


Figura 5.2 - Características I_D - V , dos transistores de Al/SiO₂/Si e de SnO₂/SiO₂/Si e do diodo SnO₂/Si.

resistências parasitas das regiões de dreno e fonte, dos contatos metálicos com estas regiões e das interconexões externas. No caso dos transistores de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ deve-se acrescentar ainda a resistência série das heterojunções. Estudos anteriores efetuados para estas estruturas [69] mostraram que são fatores limitantes da corrente a resistência dos contatos, a resistência da camada de SnO_2 e a resistência série interposta por uma camada isolante de SiO_2 criada na interface entre o SnO_2 e o Si.

A presença dos diodos de heterojunção em série com dreno e fonte é, por sua vez, responsável pelo deslocamento da região de saturação para maiores valores da tensão de dreno em comparação com o que era observado para os transistores de Al.

A análise acima permite-nos concluir quanto a viabilidade de se construir transistores de efeito de campo com porta, fonte e dreno de SnO_2 , restando para serem superados alguns problemas tecnológicos como a eliminação do caráter retificador das heterojunções de SnO_2/Si em série com a fonte e dreno e a redução da resistência série interposta por elas. O primeiro problema é contornável pelo aumento da dopagem da região de fonte e dreno, de modo a aumentar consideravelmente a corrente de tunelamento. Neste caso as heterojunções podem ser consideradas ôhmicas. Por seu lado a diminuição da resistência série pode ser conseguida dopando-se a camada de SnO_2 , com antimônio (Sb) por exemplo. Dispomos de resultados [68,107] que indicam uma redução de 5 para 1 na condutividade destes filmes quando se introduz tricloreto de antimônio na concentração de 0,1% na solução de partida.

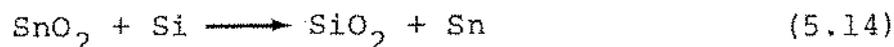
O menor valor da mobilidade no canal e consequentemente o menor valor do β nos transistores de SnO_2 , não puderam ser explicados por nós, tendo em vista que a densidade de estados na superfície do Si deve ser, senão menor,

pelo menos comparável à obtida nos transistores de Al, cabendo uma investigação mais minuciosa para o conhecimento destes pontos.

5.4.3. Transistores de Al/SnO₂/Si

Os transistores de Al/SnO₂/Si, construídos com porta de SnO₂, dreno e fonte de Al, sem oxidação de porta (figura 4.26), apresentaram as características mostradas nas figuras 4.27 e 4.28. Seu comportamento é semelhante ao que foi observado para os transistores de Al/SnO₂/SiO₂/Si, observando-se nitidamente a existência de uma região linear e de saturação. A tensão limiar foi determinada como sendo $V_T(0V) = 0.2$ V conforme mostrado na Tabela XII.

O comportamento observado indica que deve-se formar uma camada de SiO₂ na interface entre o filme de SnO₂ e o substrato de Si, a qual se comporta como o isolante de porta. A formação deste óxido isolante, pela reação do SnO₂ com o silício, é termodinamicamente favorecida uma vez que a variação da energia livre de Gibbs na reação:



é negativa, como se pode calcular por:

$$\begin{aligned} \Delta G_{298}^{\circ} &= \Delta G_{298}^{\circ}(\text{SiO}_2) - \Delta G_{298}^{\circ}(\text{SnO}_2) = \\ &= (-198 \text{ kcal/mole}) - (-124 \text{ kcal/mole}) = -73 \text{ kcal/mole} \end{aligned} \quad (5.15)$$

A formação do óxido é então permitida à tempera

tura ambiente e à pressão atmosférica, não se conhecendo no entendo, a velocidade em que se processa |111| .

Como os transistores de $\text{Al}/\text{SnO}_2/\text{Si}$ foram submetidos ao processo de metalização e recozimento para a formação dos contatos de fonte e dreno, é de se esperar que a velocidade de crescimento do óxido na interface aumente em relação à temperatura ambiente. Um estudo cuidadoso deverá ser efetuado quanto ao crescimento desta camada de óxido bem como quanto às suas propriedades isolantes tendo em vista sua aplicação em dispositivos de dimensões muito pequenas.

5.5. Conclusões

Este trabalho teve por objetivo o estudo da viabilidade de construção de transistores de efeito de campo com eletrodos constituídos de filmes finos de SnO_2 em lugar da metalização convencional de Al. A técnica de obtenção destes filmes foi o método de decomposição de vapores, proposto em nosso Laboratório |67,90|, o qual apresenta a vantagem de ser processado a baixas temperaturas, além de exigir equipamento simples e de baixo custo. Os resultados previamente obtidos na aplicação destes filmes em diversos dispositivos |3,4,68,69| e em particular em transistores de efeito de campo |112,113,114,115| levaram-nos a realização deste trabalho onde é feito um estudo comparativo entre os transistores de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ e os de $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{Si}$, os primeiros obtidos pela técnica mencionada e os segundos por tecnologia MOS convencional.

Em linhas gerais as seguintes conclusões podem ser tiradas quanto aos três tipos de transistores de $\text{SnO}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$ estudados:

- a) O método de obtenção dos filmes é simples e

de baixo custo.

b) O processo pode ser executado e temperaturas relativamente baixas.

c) O processo é repetitivo e os dispositivos são estáveis ao menos pelo período de tempo de 1 ano em que acompanhamos seu comportamento.

d) Os dispositivos não sofrem os efeitos da radiação ionizante gerada no processo de metalização.

e) A transmitância dos filmes à luz visível é potencialmente promissora no que se refere ao emprego desses transistores e capacitores em sistemas de conversão de imagem ou em dispositivos acoplados a carga.

f) Estes dispositivos são uma alternativa para melhor compreender os fenômenos que ocorrem nas estruturas convencionais.

g) A formação do óxido na interface da ordem de algumas dezenas de angstroms, parece possibilitar a confecção de dispositivos sem oxidação de porta.

Como problema básico a ser resolvido fica ainda pendente a questão de se conseguir regiões de dreno e fonte de mais alta condutividade de modo a se garantir o comportamento ôhmico das heterojunções de SnO_2/Si . Um caminho viável é o emprego de implantação iônica, por exemplo. Outro problema a ser resolvido é o dos contatos externos com o SnO_2 , sendo que já obtivemos sucesso no emprego de Al com uma camada de cromo intermediária, para evitar a migração do oxigênio do SnO_2 para o Al e em consequência sua oxidação.

É importante situarmos agora a contribuição deste trabalho em face ao que existe publicado na literatura, uma vez que os resultados obtidos parecem auspiciosos quanto as perspectivas futuras.

Os filmes de óxidos metálicos semicondutores e transparentes vem sendo amplamente empregados em contatos transparentes ou mesmo em resistores de alta estabilidade térmica bem como em células solares. O desenvolvimento e aperfeiçoamento de técnicas de obtenção, permitindo um maior controle de suas propriedades físicas e elétricas, motivaram as primeiras tentativas de seu emprego em dispositivos mais sofisticados e exigentes do que as células solares. Em 1964, Klasens et al [116] sugeriram pela primeira vez o emprego de óxido de estanho em transistores de efeito de campo. Todavia o emprego de substratos de vidro com múltiplas camadas de SnO_2 e Al_2O_3 obtidas respectivamente por evaporação a vácuo e por anodização permitiram a construção de dispositivos de grandes dimensões e cujo desempenho não chegou a ser estudado em detalhes. Provavelmente a incompatibilização dos processos empregados com a tecnologia de circuitos integrados não levou a continuação do trabalho.

Em 1970, numa comunicação curta, Fillard et al [117] propuseram uma particular estrutura MOS com filmes de SnO_2 , obtidos por pulverização (spray) a 550°C sobre substratos de germânio e de antimoneto de gálio, com eletrodos de prata. Aparentemente o trabalho não foi continuado pelas mesmas razões anteriores.

Outra comunicação curta de A. Aoki et al [118] em 1970 propõe um transistor de filme fino de SnO_2 produzido por deposição química a partir de vapor sobre substrato de alumina e eletrodos de alumínio. O isolante de porta era composto de SiO e nitroclulose.

Os trabalhos mais relacionados ao aqui proposto se referem a dispositivos acoplados a carga com eletrodos de SnO_2 [87] e de óxido de Índio e estanho [86], bem como a capacitores com eletrodo de In_2O_3 [84], todos eles empregando

substratos de Si e camada isolante de SiO_2 . Como em todos eles o método de obtenção empregado foi o de pulverização catódica (sputtering) os filmes têm que ser submetidos a um tratamento térmico para aumentar sua transparência e condutividade bem como para reduzir a densidade de carga na interface criadas por irradiação. As temperaturas empregadas nesta etapa podem atingir valores tão elevados quanto 800 a 1000°C [84,86]. Apesar da complexidade e custo dos equipamentos e a exigência de mais etapas de processamento, os resultados obtidos são comparáveis aos obtidos por nós no que se refere a qualidade do óxido isolante.

A perspectiva de utilização dos óxidos transparentes semicondutores em lugar do alumínio conforme proposto neste trabalho parece-nos extremamente atraente, tendo em vista os resultados apresentados neste trabalho. Todavia alguns aspectos permanecem em aberto para uma investigação mais minuciosa. São eles:

1. Estudo da formação do óxido de silício na interface de SnO_2/Si em função de fluxo de gases e temperatura de deposição e recozimento.
2. Estudo da influência da luz nos dispositivos fabricados.
3. Estudo da implantação iônica, através do SnO_2 para ajuste da tensão de limiar.
4. Estudo da aplicação de SnO_2 em circuitos integrados mais complexos.

APÊNDICE ARECONSTRUÇÃO E REMODELAMENTO DO SISTEMA DE
PLASMA IÔNICO

O sistema de plasma iônico por nós utilizado é uma segunda versão de um equipamento construído no LED para fins de limpeza e ataque de camadas ou filmes de diferentes materiais, orgânicos e inorgânicos [72].

O sistema de plasma por nós reconstruído contém quatro unidades básicas as quais estão montadas em dois módulos (figura 1): 1) sistema de R.F. constituído de um gerador de R.F. (figura 2), de um amplificador linear (figura 3) de um acoplador de R.F. e de um medidor de potência de R.F.; 2) sistema de vácuo e gases constituído de uma bomba mecânica, fluxímetros, armadilha para resíduos (figura 4), borbulhador para reagentes líquidos (figura 5), elementos de controle e exaustão; 3) câmara de reação, constituída de um eletrodo superior, de um eletrodo inferior e de uma parede cilíndrica de quartzo (figura 6); 4) sistema de análise por espectroscopia ótica constituída de um espectrômetro ótico, de uma fotomultiplicadora, de um eletrômetro, fonte de alimentação e registrador X-Y.

Na figura 8 mostramos o equipamento em funcionamento. Apesar de termos obtido êxito na remoção de resiste, Al, SnO₂, Cr, o sistema necessita ainda de equipamentos necessários ao bom funcionamento tais como misturador de gases, válvulas especiais. A falta desses equipamentos impossibilitou-nos de caracterizar melhor os ataques por nós efetuados.

Na figura 7 mostramos a carga resistiva cons
truída para a calibração do amplificador linear, constituída
de 1250 resistores de $56 \text{ K}\Omega/\text{1W}$, soldados em paralelo.

O nosso equipamento funciona hoje com as seguintes
características:

Frequência: 13,56 MHz,

Potência de saída - 400 W ou 1.5 W/cm^2 ,

Resistência de saída = 50Ω ,

Vácuo = 5 a 2000 mTorr,

Número de lâminas de silício: 6 lâminas de 2" ou
10 lâminas de 1.5".

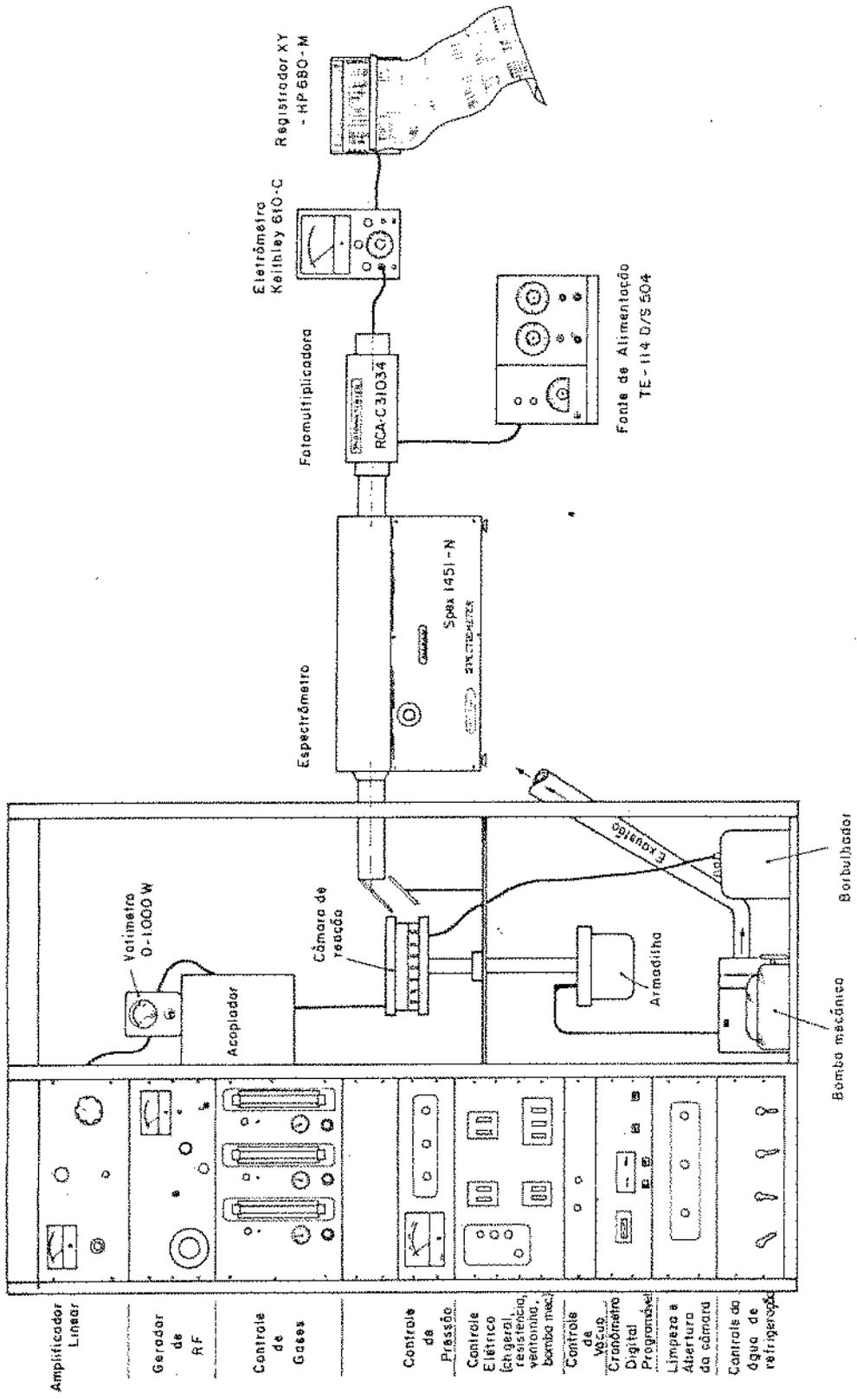
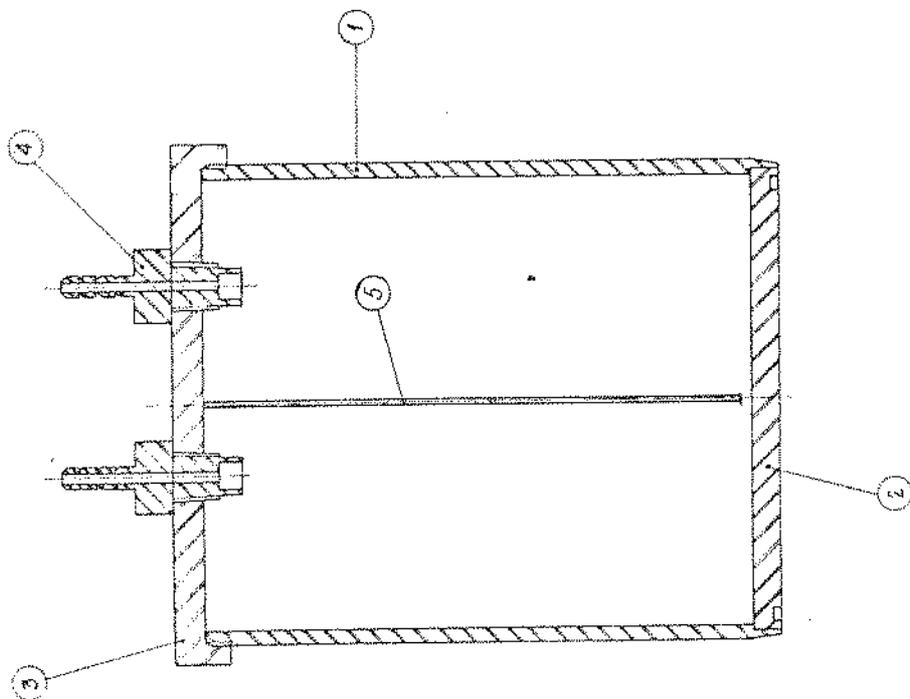
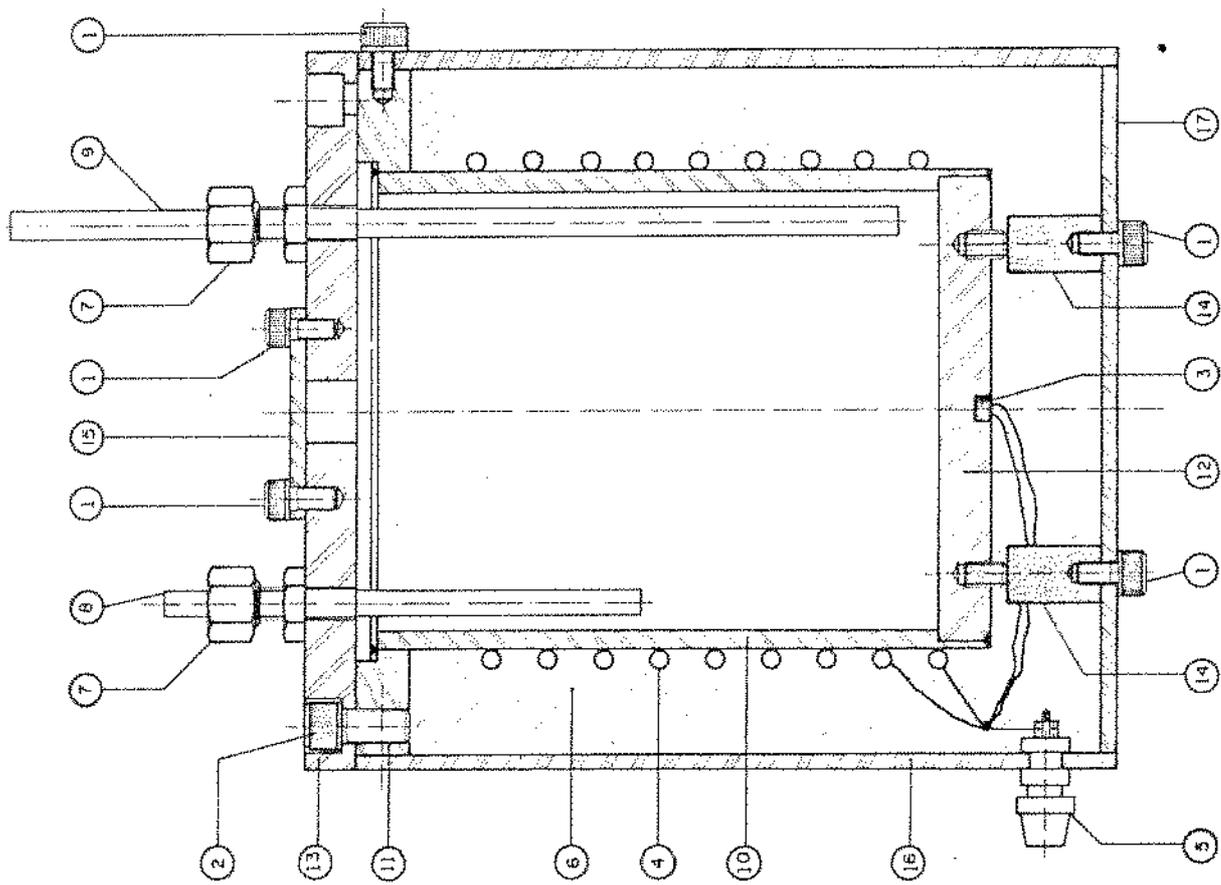


Figura 1 - Vista geral do sistema de Plasma Iônico.



Nº	Nome	Qtd	Materiai	Med Grão	Defalhe
5	DIVISÓRIA				
4	CONECTOR				
3	TAMPA DO TRAP		Aço 316		FA-2324
2	FUNDO DO TRAP		Aço 316		FA-2325
1	TUBO DO TRAP		Aço 316		FA-2323

Figura 4 - "Trap" para resíduos da câmara de plasma.



#	NUMERO	QUANT	MATERIAL	MED BRUTA	DETALHE
17	Base	1		Ø 150 X 6	F4 1022
16	Receptáculo externo	1		Ø 8" X 165	F4 1021
15	Tempão	1		Ø 45 X 1/8"	F4 1020
14	Espacador	3		Ø 1/2" X 28	F4 1019
13	Flange superior	1		Ø 170 X 1/2"	F4 1018
12	Flange inferior	1		Ø 100 X 1/2"	F4 1017
11	Flange do receptáculo interno	1		Ø 170 X 1/2"	F4 1016
10	Receptáculo interno	1		Ø 4" X 135	F4 1015
9	Tubo de inox 1/4" X 250	1			Comprado
8	Tubo de inox 1/4" X 100	1			Comprado
7	Conector 768-FSS- 1/4" X 1/4"	2			Comprado
6	Fibra de vidro				Comprado
5	Conector para pino Bondag	4			Comprado
4	Aquecedor Ni Cr	1			Comprado
3	Transformador BC107	1			Comprado
2	Parafusos Allen M6 X 1	8	Aço		Comprado
1	Parafusos Allen M3 X 0,8	13	Aço		Comprado

Figura 5 - Borbulhador para reagentes líquidos.

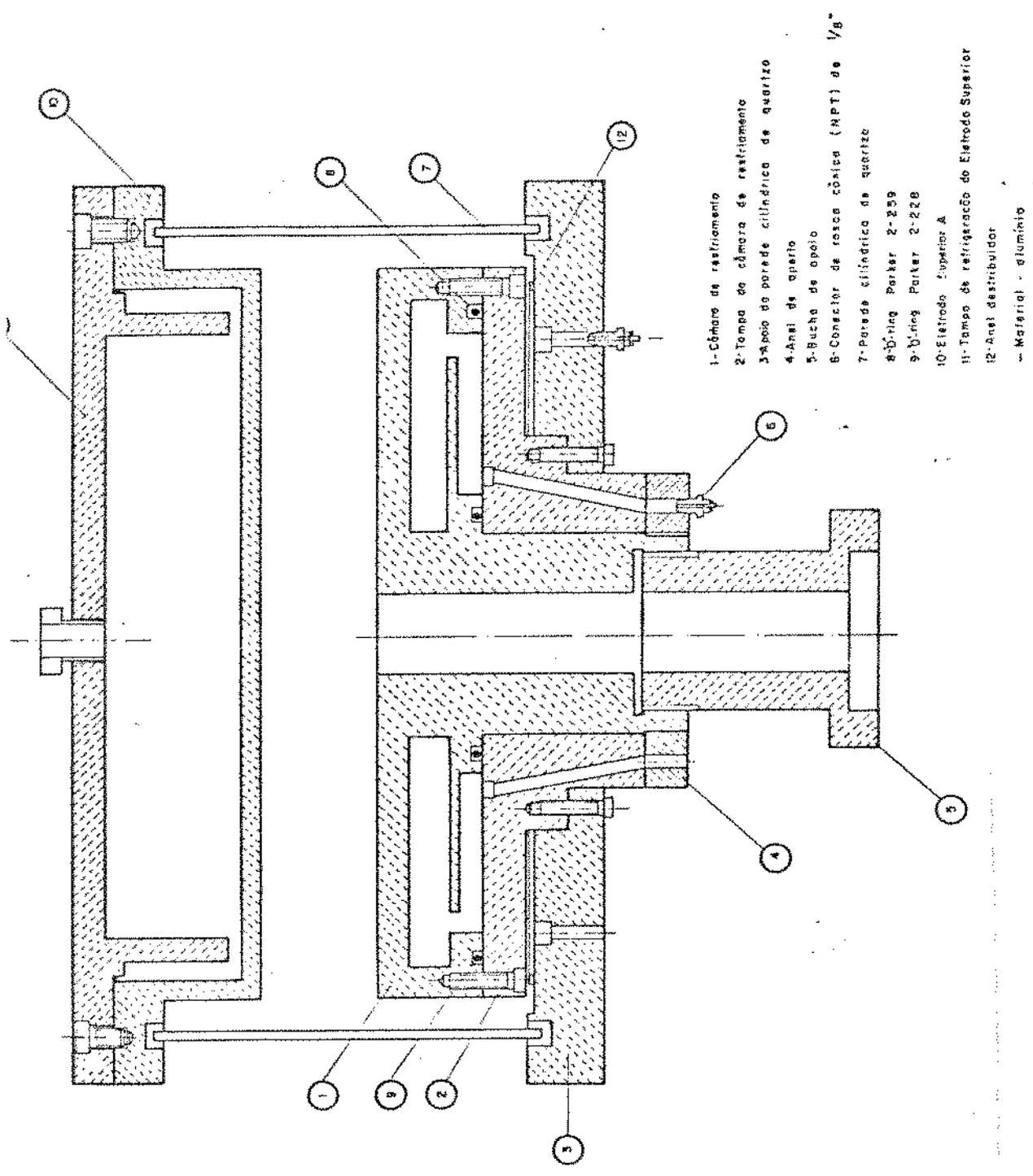


Figura 8 - Câmara de reações do sistema de L.P.I.

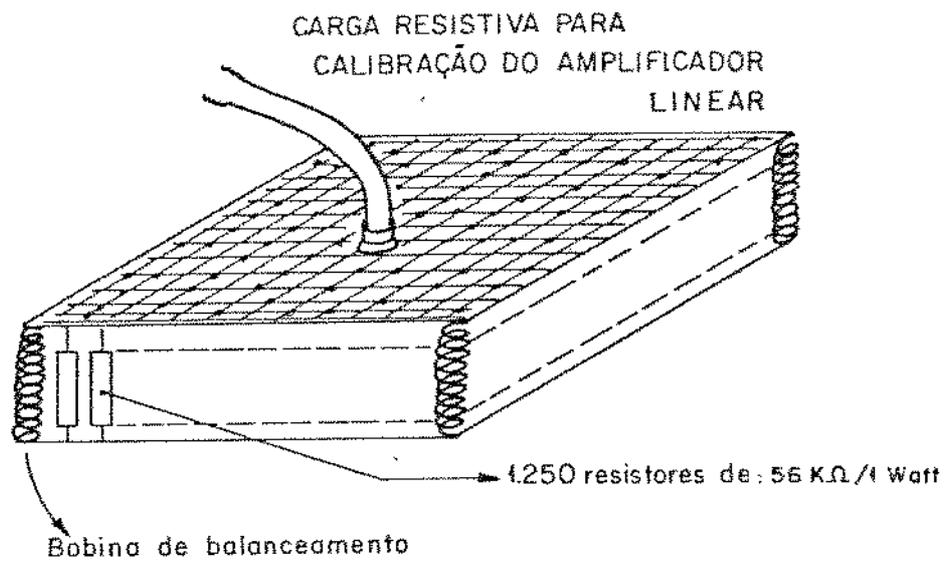


Figura 7 - Carga resistiva construída para calibração do amplificador linear.

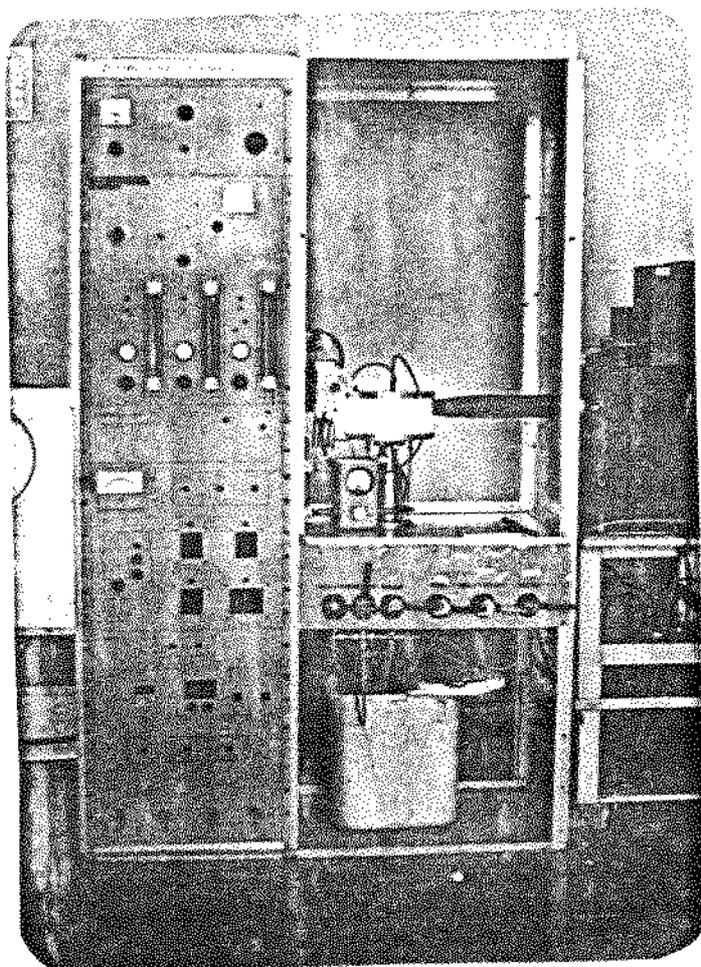


Figura 8. - Vista do sistema de L.P.I. em funcionamento.

BIBLIOGRAFIA

- [1] W. Shockley and G.L.Pearson, Phys. Rev. 74, 232 (1948).
- [2] D.Khang and M.M.Atalla, IEEE Trans. Electron Devices, 23, 655 (1976).
- [3] A.P.Mammana e A.C.V.Fagundes, "XXIX Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciências, São Paulo, 1977.
- [4] A.C.Gottberg e A.P.Mammana, "II Congresso Latino-Americano de Energia Solar, Asociación Latino-Americana de Energia Solar, Paraíba, Brasil, 1978.
- [5] Z.M. Jarzebski and J.P.Marton, J. Electrochem, Soc. 123, 199 (1976).
- [6] Y.S.Hsu and S.K.Ghandhi, J. Electrochem. Soc., 127, 1595 (1980).
- [7] T. Feng, A.K. Ghosh and C.Fishman , Appl. Phys.*Letters, 34, 198 (1979).
- [8] J.L.Vossen and E.S. Poliniak, Thin Solid Films, 9, 341 (1972).
- [9] R.N.Ghoshtagore, J. Electrochem. Soc., 125, 110 (1978).
- [10] T.Nagamoto, M.Endo and K.Omoto, Japan, J. Appl. Phys. 18, 1103 (1979).
- [11] E.Giani and R. Kelly, J. Electrochem. Soc. 121, 394 (1974).
- [12] Z.M.Jarzebski, "Oxide Semiconductors", Pergamon Press, Oxford, N.Y. 1973.
- [13] C.A.Vincent, J. Electrochem. Soc. 119, 515 (1972).
- [14] A.Y.Kuznetsov, Sov. Phys. Solid State, 2,30 (1960).
- [15] F.Hayashi, H.Teshima, M.Yamanaka and V.Tami, Bulletin of the Electrotechnical Laboratory 40, 387 (1976).

- [16] R.F.Bartholomew and H.W.Gardunkel, J. Electrochem. Soc. 116, 1205 (1969).
- [17] T.Nishino and Y. Hamakawa, Japan, J. Appl. Phys., 9, 1085 (1970).
- [18] J.A.Aboaf, V.C.Marcotte and N.J.Chou, J. Electrochem. Soc. 120, 701 (1973).
- [19] K.Ishiguro, T.Sasaki, T.Arai and I.Imai, J. Phys. Soc. Japan, Vol. 13, 296 (1958).
- [20] H.Kim and H.A.Latinem, J. Electrochem. Soc. 122, 53 (1975).
- [21] T.Arai, J. Phys. Soc. Japan, 15, 516 (1960).
- [22] S.M.Sze, Physics of Semiconductor Devices, John Wiley and Sons. Inc., N.Y. 1969.
- [23] R.J.Powel, IEEE Trans. Nucl. Sci., 17, 41 (1970).
- [24] R.J.Powel and C.N.Berglund. J. Appl. Phys. 42, 4390 (1971).
- [25] F.Montillo and P.Balk, J. Electrochem. Soc. 118, 1463 (1971).
C.T.Sah, IEEE Trans. Nucl. Sci. 23, 1563 (1976).
- [27] B.E.Deal, A.S.Grove and E.H.Snow, J. Electrochem. Soc. 114, 266 (1967).
- [28] E.H.Nicollian, J. Vac. Sci. Techn. 14, 1112 (1977).
- [29] C.L.M. Claeys, Anais da I Oficina Brasileira de Microeletrônica, LED-FEC-UNICAMP, Campinas, julho de 1979.
- [30] E.H.Snow, A.S.Grove, B.E.Deal and C.T.Sah, J. Appl. Phys. 36, 1664 (1966).
- [31] B.E.Deal, J. Electrochem. Soc. 121, 1980 (1974).
- [32] A.J.Learn, J. Electrochem. Soc. 122, 1127 (1975).
- [33] P.L.Castro and B.E. Deal, J. Electrochem. Soc. 144, 266 (1967).

- |34| W.M.Werner, J. Electrochem. Soc. 123, 540 (1976).
- |35| J.P.Mitchell, IEEE Trans. on Elect. Devices, 11, 765 (1967).
- |36| C.W.Gwyn, J. Appl. Phys. 40, 4886 (1969).
- |37| D.R.Collins and C.T.Sah, Appl. Phys. Letters, 8, 124 (1966).
- |38| B.E.Deal, IEEE, 10, 606 (1980).
- |39| A.S.Grove, E.H. Snow, B.E.Deal and C.T.Sah, J. Appl. Phys., 33, 2458 (1964).
- |40| S.R.Hofstein and G.Warfield, Solid State Electronics, 8, 321 (1965).
- |41| W.N. Carr and J.P. Mize, McGraw Hill Book Co., pp. 29, (1972).
- |42| P.Richman, "MOS Field - Effect Transistors and Integrated Circuits", John Wiley & Sons., New York, 1973.
- |43| A.S.Grove and D.J.Fitzgerald, Solid State Electronics, 9, 783 (1966).
- |44| K.G.McKay, Physical Review, 94, 884 (1954).
- |45| D.Coleman, R.T.Bate and J.P.Mize, J.Appl. Phys.39, 1923 (1968).
- |46| N.St.J.Murphy, F.Berz and I.Flinn, Solid State Electronics, 12, 36 (1969).
- |47| D.Frohman-Bentchkowsky, IEEE, 56, 217 (1968).
- |48| P.Richman, "Characteristics and Operation of MOS Field Effect Devices", McGraw Hill Book Co., New York, 1967.
- |49| P.D.Lunsmann, Electronics Letters, 4, 100 (1968).
- |50| R.L.Anderson, Appl. Phys. Letters, 27, 691 (1975).
- |51| K.Ishiguro, T.Sasaki, T.Arai and I.Imai, J. of the Phys. Soc. of Japan, 13, 3 (1958).

- |52| A.K.Ghosh, C.Fishman and T.Feng, J. Appl. Phys. 49, 3490 (1978).
- |53| S.Franz, G.Kent and R.L.Anderson, J. Elect. Mat. 6, 108 (1967).
- |54| A.P.Mammana, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Elétrica, EPUSP, Dezembro de 1972.
- |55| C.I.Z.Mammana, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Elétrica, EPUSP, 1969.
- |56| A.R.Riben and D.L.Feucht, Solid State Electron. 9, 1055 (1966).
- |57| W.Franz, Handbuch der Physik, Berlin, Springer, Verlag, 17, 155 (1956).
- |58| E.S.Braga e C.I.Z.Mammana, "Limpeza Inicial", IEP LP-004, LED/FEC/UNICAMP, 1979.
- |59| E.S.Braga e C.I.Z.Mammana, "Limpeza Inicial Especial", IEP LP-023, LED/FEC/UNICAMP, 1979. *
- |60| P.J.Tatsch, E.S.Braga e C.I.Z.Mammana, "Oxidação Inicial Úmica", IEP OX-001, LED/FEC/UNICAMP, 1979.
- |61| P.J.Tatsch e C.I.Z.Mammana, "Oxidação Seca com TCE, IEP OX-005, LED/FEC/UNICAMP, 1980.
- |62| E.S.Braga e C.I.Z.Mammana, "Passivação com $POCl_3$ ", IEP DF-020, LED/FEC/UNICAMP, 1980.
- |63| E.S.Braga e C.I.Z.Mammana, "Deposição de Fósforo", IEP DF-011, LED/FEC/UNICAMP, 1980.
- |64| E.S.Braga e C.I.Z.Mammana, "Fotogravação de Óxido de Silício", IEP LF-005, LED/FEC/UNICAMP, 1980.
- |65| E.S.Braga, C.I.Z.Mammana, "Fotogravação Al", IEP - LF-009, LED/FEC/UNICAMP.
- |66| E.S.Braga e C.I.Z.Mammana, "Recozimento Úmido após metalização", IEP DF-008, LED/FEC/UNICAMP.

- [67] A.P.Mammana, E.S.Braga, P.V.Santos e R.L.Anderson, Anais do VII Seminário Integrado de Software e Hardware, Campinas, julho de 1980.
- [68] P.V.Santos, E.S.Braga, A.P.Mammana e C.I.Z.Mammana, "Anais do VIII Seminário Integrado de Software e Hardware, Florianópolis, S.C., julho de 1981.
- [69] P.V.Santos, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Campinas, UNICAMP. abril de 1982.
- [70] G.Bradshaw and A.J.Hughes, Thin Solid Films, 33-L5 (1976).
- [71] B.J.Baliga and S.K.Ghandhi, J. Electrochem. Soc., 124 1059 (1977).
- [72] H.J.Yen, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Campinas, UNICAMP, setembro de 1982.
- [73] E.S.Braga, A.P.Mammana, C.I.Z.Mammana, Ataque de filmes finos de SnO_2 , IEP LP-021, LEDF/FEC/UNICAMP.
- [74] J.Paladini, Tese de Mestrado, Publ. FEC.006/83, LED/FEC/UNICAMP, outubro de 1979.
- [75] E.S.Braga e A.P.Mammana, "Fotografação de materiais condutores transparentes por plasma iônico", patente registrada no INPI sob nº 8.005.488.
- [76] E.S.Braga, A.P.Mammana, C.I.Z.Mammana and R.L.Anderson, Thin Solid Films, 73, L5-L6 (1980).
- [77] E.S.Braga, A.P.Mammana, C.I.Z.Mammana, "Técnicas de fotografação por plasma", a ser submetido ao Codex.
- [78] E.S.Braga, A.P.Mammana, G.F.Mendes and J.Frejlich, Thin Solid Films, 109, 41 (1983).
- [79] G.F.Mendes, L. Cescato, E.S.Braga, A.P.Mammana, J. Frejlich, submetido à publicação.
- [80] A.P.Mammana, E.S.Braga e I.Torriani, Anais do Seminário Integrado de Software e Hardware, SBC, Campinas,

- [81] A.P.Mammana, E.S.Braga, I.Torriani and R.L.Anderson.
Thin Solid Films, 85, 355 (1981).
- [82] R.Van Overstraeten, G.Declerck and G.Broux, J.
Electrochem. Soc. 120, 1785 (1973).
- [83] C.E.Wickersham and J.E.Greene, Phys. State Solid (a) 47,
329 (1978).
- [84] T.Ando and C.K. Fong, IEEE Transactions on ED, vol. ED-
29, 8, August 1982.
- [85] D.K. Schroder, IEEE Transaction on ED-25, 2,91 (1978).
- [86] A. Theuwissen, G.Declerck, presented at 5th SSSDT, held
at York, Sept. 15-18, 1980.
- [87] L.L.Thomson, D.H. McCann, R.A.Tracy, F.J.Kub and M.H.
White, IEEE Transactions on Electron Devices, vol. ED-
25, nº 2, Feb. 1978.
- [88] F.Faggin and T.Klein, Pergamon Press 1970, vol.*13,
pp. 1125-1144.
- [89] G.L.Schnable and R.S.Keen, Proc. of the IEEE, vol. 57,
nº 9, Sept. 1969.
- [90] A.P.Mammana, "Obtenção de Filmes Transparentes Semicon-
dutores", Patente depositada no INPI sob número
8.002.761 em 30.4.80.
- [91] J.C.Manífacier, M. de Murcia et J.P. Fillard, Mat. Res.
Bull. 10, 1215 (1975).
- [92] R.N.Ghoshtagore, J.Electrochem. Soc. 125, 110 (1978).
- [93] O.Tabata, Proc. Col. Int. sur l'Electricité Solarie",
Toulouse, França - 1977.
- [94] A.J.Stecke and G.Mohammed, J.Appl. Phys. 51, 7, 1980.
- [95] E.Arnold, J.Ladell and G.Abowitz, Appl. Phys. Lett.
13, 413 (1968).

- [96] A.K.Sinha and T.E.Smith, J. Electrochem. Soc. 425, 743 (1978).
- [97] S.R.Hofstein, IEEE, Trans. Electron Devices, 14, 749 (1967).
- [98] E.H.Nicollian, J.R.Brews, J. Wiley & Sons, N.Y.- 1982.
- [99] N.Shiono, O.Nakajima and C.Hashimoto J. Electrochem. Soc. 130, 138 (1983)..
- [100] S.I.Raider and A.Baman, J. Electrochem. Soc. 125, 629 (1978).
- [101] A.Goetzberger, V. Heine and E.H.Nicollian, Appl. Phys. Lett., 12, 95 (1968).
- [102] W.M.Werner, J. Electrochem. Soc. 123, 540 (1976).
- [103] B.L.Henke and E.S.Ebisu. Advances in X-Ray Analysis, 17, 150 (1974)
- [104] K.F.Galloway and S.Mayo, Solid State Technology, 97, 5 (1979).
- [105] T.H.Ning, J.Appl. Phys. 49, 4077 (1978).
- [106] R.J.Krigler, Y.C.Cheng and D.R.Colton, J. Electrochem. 119, 388, 1972.
- [107] P.H.Robnson and F.P.Heiman, J. Electrochem. Soc. 118, 141 (1971).
- [108] F.Damiani. Tese de Doutorado - FEC-UNICAMP -- Dezembro, 1982.
- [109] P.S.D.Lin, R.B.Marcus and T.T.Sheng, J. Electrochem. Soc. 130, 1878 (1983).
- [110] S.Kobayashi, F.Matsui, A.P.Mammana, "Anais do X Seminário Integrado de Software e Hardware - SEMISH - Campinas, julho de 1983.
- [111] R.L.Anderson, Report NSF/RANN/SE/AER - 76 04168/PR/76/4.

- [112] E.S.Braga, A.P.Mammaña e C.I.Z.Mammaña, "Anais do IX Seminário Integrado de Software e Hardware - SEMISH - Ouro Preto, 1982.
- [113] E.S.Braga, A.P.Mammaña e C.I.Z.Mammaña, "Anais da IV Oficina Brasileira de Microeletrônica , Campinas, 1983.
- [114] A.P.Mammaña, E.S.Braga, C.I.Z.Mammaña. Aceito para apresentação na CISS. Madrid - 1983.
- [115] E.S.Braga, A.P.Mammaña e C.I.Z.Mammaña, 2nd ISSPTFF pp. 32 - Hungria - 1983.
- [116] K.A.Klasens and H.Koelmans, Solid State Electronics 7 (1964) 701.
- [117] J.P.Fillard and J.C.Manifacier, Japan J.Appl. Phys. 9 (1970) 1012 - 1013.
- [118] A.Aokí and H.Sasakura, Japan J. Appl. Phys. 9(1970) 582.