FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO - FATEC-SP CURSO DE MICROELETRÔNICA

WILLIAM TSUYOSHI SHIGA

ESTUDO DAS PROPRIEDADES E COMPORTAMENTOS DE FILMES FINOS DE SIO COMO CAMADAS PARA GERAÇÃO DE CARGAS EFETIVAS EM CAPACITORES MOS

São Paulo

2021

WILLIAM TSUYOSHI SHIGA

ESTUDO DAS PROPRIEDADES E COMPORTAMENTOS DE FILMES FINOS DE SIO COMO CAMADAS PARA GERAÇÃO DE CARGAS EFETIVAS EM CAPACITORES MOS

Trabalho de conclusão do Curso, apresentado para obtenção do grau de TECNÓLOGO no Curso de Tecnologia em Microeletrônica da Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC-SP).

Orientador: Prof. Ricardo Cardoso Rangel

São Paulo

Esse trabalho é dedicado à minha família. Para minha avó Olga Tanaka Shiga e minha mãe Eliza Yoko Ueoka.

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo apoio e suporte.

Aos meus amigos, que me acompanharam durante todo o tempo do trabalho sempre me incentivaram a continuar.

Ao professor Ricardo Cardoso Rangel, pela oportunidade, orientação, atenção e paciência nos ensinamentos de manipulação dos equipamentos no Laboratório de Sistemas Integrados (LSI).

Ao professor Sebastião Gomes dos Santos Filho, pelo acolhimento no Grupo de Superfícies, Interfaces e Deposição Eletroquímica (GSIDE) e apoio durante todo o andamento do projeto, além da paciência e suporte para sanar todas as minhas dúvidas.

Aos companheiros do grupo (GSIDE), pelas discussões e ideias de grande importância que surgiram durante o decorrer da elaboração do trabalho.

Ao Me. Marcos Norio Watanabe, por todo o suporte e ajuda não importando o dia ou a hora.

Ao LSI, pela disponibilidade de toda a infraestrutura para o desenvolvimento do projeto.

"Existem muitas hipóteses em ciência que estão erradas. Isso é perfeitamente aceitável, eles são a abertura para achar as que estão certas".

(Carl Sagan)

RESUMO

Neste trabalho são apresentados resultados de capacitores MOS fabricados com as estruturas Al/SiO/Si-p, Al/SiO₂/Si-p e Al/SiO/SiO₂/Si-p, utilizando o processo de obtenção dos filmes finos de monóxido de silício (SiO) por PVD, depositados sobre um substrato de silício tipo P <100> com dopagem em torno de 1×10^{15} cm⁻³. Dado que a camada de SiO tem como uma de suas propriedades o acúmulo de cargas, além de servir como dielétrico de porta, o objetivo desse trabalho visa desenvolver um processo estável da evaporação de uma fonte de SiO para o controle da espessura do filme fino, que é importante para que o capacitor atinja um patamar de inversão em relação a tensão aplicada e acumule a maior quantidade de cargas positivas. Também foi realizado um estudo do comportamento e das características do SiO nesse tipo de estrutura para que futuramente possa ser utilizado como camada de passivação com propriedades antirrefletoras em células solares MOS. Os capacitores MOS foram caracterizados e, a partir da extração de sua curva C-V, foram calculados e explicados parâmetros importantes para o entendimento do comportamento dessa camada nesse tipo de estrutura, bem como foram comparados seus resultados com as outras estruturas desenvolvidas. Como o acúmulo de cargas é um parâmetro importante para seu uso em células solares MOS, os dados de densidade de carga efetiva no óxido foram de suma importância nos cálculos. Também foram estudados e aplicados modelos matemáticos para simulação de curvas C-V teóricas e para a correção dos dados obtidos experimentalmente, levando em consideração parâmetros como potencial de superfície, resistência série e admitância de fuga e os seus efeitos no funcionamento do capacitor MOS.

Palavras-chave: Capacitor MOS; Célula Solar MOS; Evaporação Térmica; Modelagem; SiO.

ABSTRACT

In this work, results of MOS capacitors manufactured with Al/SiO/Si-p, Al/SiO2/Si-p and Al/SiO/SiO2/Si-p structures are presented, using the process of obtaining thin films of silicon monoxide (SiO) by PVD, deposited on a silicon substrate type P <100> with doping around 1×10^{15} cm⁻³. Since the SiO layer has charge accumulation as one of its properties, in addition to serving as a gate dielectric, the objective of this work is to develop a stable process of evaporation from an SiO source to control thin film thickness, which is important for the capacitor to reach an inversion level in relation to the applied voltage and accumulate the greatest amount of positive charges. A study of the behavior and characteristics of SiO in this type of structure was also carried out so that in the future it can be used as a passivation layer with anti-reflective properties in MOS solar cells. The MOS capacitors were characterized and, from the extraction of their C-V curve, important parameters were calculated and explained for understanding the behavior of this layer in this type of structure, as well as comparing their results with the other structures developed. As charge accumulation is an important parameter for its use in MOS solar cells, the effective charge density data on the oxide was of paramount importance in the calculations. Mathematical models were also studied and applied to simulate theoretical C-V curves and to correct experimentally obtained data, taking into account parameters such as surface potential, series resistance and leakage admittance and their effects on the MOS capacitor operation.

Keywords: MOS Capacitor; MOS Solar Cell; Thermal Evaporation; Modeling; SiO.

Índice de Ilustrações

Figura 1.1	 Evolução do acúmulo total de energia produzida em GW das instalações fotovoltaicas mundiais
Figura 1.2 –	Ranking dos anos de 2015 até 2017 de países que mais contribuíram na instalação de tecnologia fotovoltaica
Figura 2.1 –	Estrutura do capacitor MOS
Figura 2.2 –	Modelo de bandas de energia de cada material componente de um capacitor MOS antes do contato
Figura 2.3 –	Modelo de bandas de energia de um capacitor MOS após o contato e em equilíbrio térmico
Figura 2.4	 Representação do diagrama de bandas de energia e cargas espaciais de um capacitor MOS trabalhando em diferentes regimes de operação, onde: (a) é a acumulação, (b) é a depleção e (c) é a inversão
Figura 2.5 -	- Estrutura de um capacitor MOS e sua representação de associação em série de capacitâncias do óxido (C_{ox}) e do silício (C_{Si})
Figura 2.6 –	Representação da evaporadora térmica
Figura 2.7 –	Esquematização de um forno convencional de oxidação térmica seca
Figura 2.8	 Representação simplificada dos estágios de um processo de sinterização: (a) Partículas soltas de pó, (b) Estágio Inicial, (c) Estágio Intermediário e (d) Estágio Final
Figura 2.9 –	Curva capacitância-tensão (C-V) em baixa frequência (C-V BF) e alta frequência (C-V AF) passando pelos devidos regimes de acumulação, depleção e inversão
Figura 2.10	 Efeitos da variação na espessura do óxido de porta x_{ox} na curva C-V44
Figura 2.11	- Efeitos da variação de dopagem do substrato de silício NA na curva C-V45
Figura 2.12	 Efeitos da variação de densidade de cargas efetivas Q_{ss} no óxido de porta na curva C-V
Figura 2.13	 Efeitos da variação de densidade de armadilhas de interface N_{it} na curva C-V 47

Figura 2.14	- Efeitos da capacitância parasitária lateral provocada pelo efeito de injeção lateral
	no perili da curva C-v
Figura 3.1 -	- Esquematização do formato do material fonte de SiO utilizado para evaporação
Figura 3.2 –	Disposição dos substratos na evaporadora térmica
Figura 3.3 -	- Substratos formados após a primeira deposição de SiO. a) Lâmina de SiO/Si-p
	que foi disposto a direita no carregador, b) Lâmina de SiO/Si-p que foi disposto a
	área central do carregador, c) Lâmina de vidro com SiO depositado que foi
	disposto a esquerda no carregador e d) Lâmina de vidro com SiO depositado
	deixada embaixo do suporte
Figura 3.4 –	(a) Formato do filamento em espiral cônico e (b) o suporte em funcionamento na evaporadora
Figura 3.5 –	Foto da segunda evaporação dos substratos com o SiO depositados. a) Lâmina de
	SiO/Si-p disposto no centro do carregador, b) Lâmina de SiO/Si-p disposto à
	direita do carregador. c) Lâmina de vidro com SiO depositado disposto embaixo
	do suporte e d) Lâmina de vidro com SiO depositado disposto à esquerda do
	carregador
Figure 3.6	Másoara macânica sobra a lâmina da Silício para a formação do degrau de medição
1 igui a 5.0 –	de espessure
	de espessura
Figura 3.7 –	Máscara utilizada para criação do padrão geométrico dos capacitores57
Figura 3.8 –	Estrutura Al/SiO/Si-p dos primeiros capacitores
Figura 3.9 -	- Lâmina de vidro disposta embaixo do suporte e máscara utilizada na terceira
	deposição
Figura 3.10	-Primeiros canacitores com estrutura Al/SiO/Si-n formados na terceira deposição
Figura 3.11	– Escolha dos capacitores para caracterização60
Figura 3 17	– Imagem dos componentes da câmara do equinamento de caracterização elétrica
1 igui a 3.12	HP4280
Figura 3.13	- Estruturas dos capacitores com filme fino de SiO depositado + SiO ₂ crescido
	termicamente

Figura 3.14	- Máscara física que sobrepôs a lâmina para a formação do degrau de medição do
	filme e lâmina de vidro abaixo do suporte64
Figura 3.15	 Capacitores com estruturas Al/SiO/SiO₂/Si-p e Al/SiO₂/Si-p fabricados na quarta deposição
Figura 3.16	- Modelo de associação equivalente considerando a ação da resistência série72
Figura 3.17	 Modelo representando a equivalência de associação com a adição do efeito de corrente de fuga Y_c
Figura 4.1 –	- Esquematização das estruturas dos capacitores MOS criados: (a) Al/SiO ₂ /Si-p, (b) Al/SiO/Si-p e (c) Al/SiO/SiO ₂ /Si-p
Figura 4.2 –	- Curva C-V do capacitor com estrutura Al/SiO ₂ /Si-p medida da região de inversão para acumulação
Figura 4.3 -	 Curvas C-V do capacitor com estrutura Al/SiO₂/Si-p medidas: (a) da região de inversão para acumulação e (b) da região de acumulação para inversão, após o processo de recozimento térmico com Ar+ N₂+10%H₂
Figura 4.4 –	- Comparação das curvas C-V da estrutura Al/SiO ₂ /Si-p antes e após o recozimento térmico com Ar+N ₂ +10%H ₂ medidas da região de inversão para acumulação
Figura 4.5 -	- Curva C-V do capacitor com estrutura Al/SiO/Si-p
Figura 4.6	 Curva C-V do capacitor com estrutura Al/SiO/SiO₂/Si-p medida da região de inversão para acumulação
Figura 4.7 -	 Curvas C-V do capacitor com estrutura Al/SiO/SiO₂/Si-p medidas: (a) da região de inversão para acumulação e (b) da região de acumulação para inversão, após recozimento térmico em argônio ultra seco
Figura 4.8 -	 Curvas C-V do capacitor com estrutura Al/SiO/SiO₂/Si-p medidas: (a) da região de inversão para acumulação e (b) da região de acumulação para inversão, após recozimento térmico em argônio ultra seco e em N₂+10%H₂
Figura 4.9	 Comparação entre as curvas C-V do capacitor com estrutura Al/SiO/SiO₂/Si-p medidas: (a) da região de inversão para acumulação e (b) da região de acumulação para inversão, após recozimento térmico em argônio ultra seco e em N₂+10%H₂

- Figura 4.11 Comparação entre as curvas C-V do capacitor com estrutura Al/SiO/SiO₂/Si-p, recozidas em argônio ultra seco e depois em N₂+10%H₂, durante um determinado período de tempo onde o sentido de aplicação de V_G foi: (a) da região de inversão para acumulação e (b) da região de acumulação para inversão91

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Valores medidos pelo perfilômetro das espessuras da camada de SiO formado na primeira deposição
Tabela 2 – Valores medidos pelo perfilômetro das espessuras da camada de SiO formado na segunda deposição 56
Tabela 3 – Valores medidos pelo perfilômetro das espessuras da camada de SiO formado na terceira deposição
Tabela 4 – Valores medidos pelo perfilômetro das espessuras da camada de SiO formado na quarta deposição
Tabela 5 – Parâmetros calculados para capacitor MOS de estrutura Al/SiO ₂ /Si-p pós recozimento térmico. 82
Tabela 6 – Parâmetros calculados para capacitor MOS de estrutura Al/SiO/SiO ₂ /Si-p pós recozimento térmico
Tabela 7 – Parâmetros calculados para capacitor MOS de estrutura Al/SiO/SiO2/Si-p pósrecozimento térmico em Ar+N2+10%H288
Tabela 8 – Comparação de C _{FB} , V _{FB} e Q _{ss} /q calculados para capacitor MOS de estrutura Al/SiO/SiO ₂ /Si-p pós recozimento térmico em Ar+ N ₂ +10%H ₂ em função do tempo entre as medições
Tabela 9 – Parâmetros calculados a partir dos modelos em função de ψ _S para capacitor MOS de estrutura Al/SiO ₂ /Si-p pós recozimento térmico em Ar+ N ₂ +10%H ₂ 94
Tabela 10 – Parâmetros calculados para a correção da curva C-V do capacitor MOS de estrutura Al/SiO2/Si-p pós recozimento térmico em Ar+ N2+10%H2 levando em conta a ação da resistência série
Tabela 11 – Parâmetros utilizados na modelagem da capacitância medida da curva C-V do capacitor MOS de estrutura Al/SiO ₂ /Si-p pós recozimento térmico em Ar+ N ₂ +10%H ₂ 102
Tabela 12 – Tensão de porta (V _G), admitância (Y _c) e capacitância obtida da modelagem (C(V _G)) relevantes para o estudo da modelagem criada e aplicada no capacitor MOS de estrutura Al/SiO ₂ /Si-p pós recozimento térmico em Ar+N ₂ +10%H ₂ 104

Lista de Siglas e Abreviaturas

AF	Alta frequência
Al	Alumínio
Al/SiO/SiO ₂ /Si-p	Alumínio/monóxido de silício/dióxido de silício/substrato de silício P
Al/SiO/Si-p	Alumínio/monóxido de silício/substrato de silício P
Al/SiO ₂ /Si-p	Alumínio/dióxido de silício/substrato de silício P
Ar	Gás de Argônio
BF	Baixa frequência
C-V AF	Capacitância x Tensão em alta frequência
C-V BF	Capacitância x Tensão em baixa frequência
C-V	Capacitância x Tensão
DI	Deionizado
e-beam	Evaporação por feixe de elétrons
GaAs	Arseneto de Gálio
GSIDE	Grupo de Superfícies, Interfaces e Deposição Eletroquímica
G-V	Condutância x Tensão
H ₂	Gás de Hidrogênio
H ₂ O	Água
H ₃ PO ₄	Ácido Fosfórico
HCl	Ácido Clorídrico
HF	Ácido Fluorídrico
HNO ₃	Ácido Nítrico
IEA	Agência Internacional de Energia
I-V	Corrente x Tensão

LSI	Laboratório de Sistemas Integrados
MME	Ministério de Minas e Energia
MOS	Metal – Óxido – Semicondutor
$N_2 + 10\% H_2$	Formiergas 90/10 (ou gás verde)
NH4OH	Hidróxido de amônio
O ₂	Gás de Oxigênio
PN	Portadores positivos e negativos (Elétrons e Lacunas)
PVD	Physical Vapor Deposition (Deposição Física a Vapor)
RCA	Radio Corporation of America
H_2O_2	Peróxido de hidrogênio
RTO	Oxidação Térmica Rápida
SC1	Standard Cleaning 1
SC2	Standard Cleaning 2
Si	Silício
SiO	Monóxido de silício
SiO ₂	Dióxido de silício
Si-p	Silício tipo P
tipo N	Substrato com dopagem doadora (Elétrons)
tipo P	Substrato com dopagem aceitadora (Lacunas)

Lista de Símbolos

W	Unidade de potência (Watt)
Evácuo	Energia de nível do vácuo
Ec	Energia de condução
Ei	Energia intrínseca
Ev	Energia de valência
E _{FM}	Nível de Fermi do metal
E _{FS}	Nível de Fermi do semicondutor
χox	Afinidade eletrônica do óxido de silício
χsi	Afinidade eletrônica do silício
$\Phi_{ m F}$	Potencial de Fermi
NA	Concentração de dopantes (lacunas) presentes no substrato
ni	Concentração intrínseca de portadores do silício $(1,45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3})$
k	Constante de <i>Boltzmann</i> (1,38x10 ⁻²³ J/K)
Т	Temperatura absoluta (300K)
q	Carga elementar do elétron (1,6x10 ⁻¹⁹ C)
Φ_{M}	Função trabalho ou de extração do metal
Φ_{Si}	Função trabalho ou de extração do silício
V_{G}	Tensão aplicada a porta do dispositivo
Vox	Queda de potencial no óxido
Ψs	Potencial de superfície do silício
V _{FB}	Tensão de faixa plana
V _T	Tensão de limiar
d	Tamanho da região de depleção
d _{máx}	Tamanho máximo atingido pela região de depleção

Q _{ss}	Densidade de cargas efetivas no óxido próximo à região de interface entre o óxido e a superfície do silício	
Q _{os}	Cargas na interface óxido-silício	
Qof	Cargas fixas no óxido	
Qom	Cargas móveis no óxido	
Qit	Cargas de armadilhas de interface	
Qsi	Densidade de carga no silício por unidade de área referente a região de depleção	
Co	Capacitância do óxido multiplicado pela área	
80	Permissividade do vácuo (8,85x10 ⁻¹⁴ F/cm)	
ε _{Si}	Permissividade relativa do silício (11,7)	
X _{ox}	Espessura do óxido	
A_{g}	Área do capacitor	
ΨS(inv)	Potencial do silício na inversão	
QSifmáx	Quantidade máxima de cargas fixas que foram induzidas no silício	
Q_{Sif}	Quantidade de cargas fixas minoritárias (elétrons) que foram induzidas	
Q _{Sim}	Concentração de as cargas móveis majoritárias (lacunas) presentes no silício	
C _{Si}	Capacitância no substrato de silício	
Ст	Capacitância total	
dV_{G}	Variação de tensão de porta	
C _{máx}	Capacitância máxima na região de acumulação	
ε _{ox}	Permissividade relativa do óxido $(SiO_2 = 3,9)$	
$d\psi_{ m S}$	Variação do potencial de superfície do silício	
dQ _{Si}	Variação das cargas presentes no silício	
C _D	Capacitância na região de depleção	
Cmín	Capacitância mínima atingida pelo capacitor	
C _{Si mín}	Capacitância mínima do silício na inversão	

т	Massa do material fonte utilizado
h	Altura entre o suporte (filamento ou navícula) e o substrato
e	Espessura do filme depositado
d	Densidade do material fonte
π	Número PI (≈3,14)
°C	Graus Celcius
dQI	Variação de carga de inversão
CI	Capacitância da camada de inversão
C _{FB}	Capacitância de banda plana
C _{FBSi}	Capacitância de faixa plana no interior do silício
Q_{ss}/q	Densidade de cargas efetivas por carga elementar
N _{it}	Densidade de armadilhas de interface
mg	Unidade de massa (Miligramas)
Torr	Unidade de pressão (Torr)
А	Unidade de corrente (Ampere)
nm	Unidade de medida (Nanômetros)
cm ²	Unidade de área (Centímetros quadrado)
Hz	Unidade de frequência (Hertz)
С	Capacitância
F	Unidade de capacitância (Farad)
G	Condutância
V	Unidade de tensão (Volt)
L/min	Unidade de vazão do gás (Litros por minuto)
Ctot	Capacitância total modelada
$C_{Si}(\psi_S)$	Capacitância do silício em função do potencial de superfície
$C_{tot}(\psi_S)$	Capacitância total em função do potencial de superfície
λ_p	Comprimento de Debye extrínseco para portadores P

$F(\psi_S)$	"Função F" em função do potencial de superfície
β	q/k.T
Ψsl	Potencial de superfície a partir do qual começa a inversão
Cmín M	Capacitância mínima modelada
L _{Di}	Comprimento de Debye intrínseco
Qsi(ψs)	Carga no silício em função do potencial de superfície
C _{ma}	Capacitância medida na acumulação
G _{ma}	Condutância medida na acumulação
Rs	Resistência série
ω	Frequência angular
f	Frequência de medição do equipamento (para altas frequências 1MHz)
C(VG)	Capacitância corrigida pelo modelo
C _m	Capacitância medida para cada valor de V_G
Yc	Admitância
X _k	Variável analisada na expressão de Newton-Raphson
$f(x_k)$	Função utilizada para iterações no método numérico de Newton-Raphson
f '(x _k)	Derivada da função utilizada no método numérico de Newton-Raphson
Xk+1	Valor convergido retornado após a iteração de Newton-Raphson
J/K	Unidade da constante de Boltzmann (Joule por Kelvin)
Κ	Unidade de temperatura (Kelvin)
С	Unidade de carga (Coulomb)
S	Unidade da condutância (Siemens)
Ω	Unidade da resistência (Ohms)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1. Objetivos	23
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1. Capacitor MOS	24
2.1.1. Modelo de bandas de energia	25
2.1.2. Regimes de operação e equacionamento de parâmetros do capacitor MOS	
2.2. Processo de deposição PVD	
2.2.1. Evaporação térmica	
2.3. Oxidação Térmica	35
2.5.2. Caracterização Elétrica: Curva C-V	
2.5.2.1. Extração de parâmetros do capacitor MOS a partir da curva C-V	41
2.5.2.2. Principais parâmetros e seus efeitos no perfil da curva C-V	43
3. MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1. Processo adotado de evaporação térmica de SiO	49
3.1.1. Primeira deposição	51
3.1.2. Segunda Deposição	54
3.1.3. Terceira Deposição e Construção dos Capacitores MOS	
3.1.3.1. Caracterização Elétrica dos Capacitores MOS com Estrutura Al/SiO/Si-	p 60
3.1.4. Quarta Deposição e criação de novos dispositivos de capacitores MOS	62
3.1.4.1. Limpeza da Lâmina	
3.1.4.2. Crescimento do Óxido de SiO ₂	
3.1.4.3. Evaporação do SiO sobre as Lâminas com SiO ₂ Crescido Termicamente dos capacitores MOS	e Fabricação 63
3.1.4.4. Caracterização Elétrica dos Capacitores MOS com Estruturas Al/SiO Al/SiO ₂ /Si-p)/SiO ₂ /Si-p e

3.1.4.5. Recozimento Térmico dos Capacitores de Estrutura Al/SiO/SiO ₂ /Si- ₁	p e Al/SiO ₂ /Si-
p	
3.2. Modelagem e correção da curva C-V	
3.2.1. Modelagem da capacitância total em função do potencial de superfície	
3.2.2. Obtenção de VG modelado em função do potencial de superfície do silício	70
3.2.3. Influência da resistência série na correção da curva C-V	71
3.2.4. Modelagem da curva C-V com base nos efeitos causados pela admitância	Yc74
3.2.4.1. Encontrando o valor da capacitância através do método numéric Raphson	o de Newton76
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	79
4.1. (a) - Curva experimental do capacitor de estrutura Al/SiO ₂ /Si-p	80
4.2. (b) Curva experimental do capacitor de estrutura Al/SiO/Si-p	
4.3. (c) Curva experimental do capacitor de estrutura Al/SiO/SiO2/Si-p	
4.4. Resultados da modelagem e correção da curva C-V em função do superfície e resistência em série	potencial de
4.5. Resultados da modelagem da curva C-V em função da admitância Yo	c no capacitor . 101
5. CONCLUSÕES	
6. OBJETIVOS E PERSPECTIVAS FUTURAS	
7. REFERÊNCIAS	
8. LISTA DE PUBLICAÇÕES	
APÊNDICE A - Dados das iterações dos valores de dopagem do substrates estruturas	to N _A para as 114
APÊNDICE B - Tabela com os dados calculados de $C_{Si}(\psi_S)$, $C_{tot}(\psi_S)$, $F(\psi_S)$, Q_S a geração da curva $C_{tot} \times V_G$ modelada a partir da variação de	_{si} (ψ _S) e V _G para ψ _S 116
APÊNDICE C - Tabela com os dados medidos e corrigidos de capacitância p tensão aplicada a porta V _G para a geração da curva C-V corrig inversão para acumulação para a estrutura Al/SiO ₂ /Si-p po térmico em Ar+N ₂ +10%H ₂	por variação de gida, medida da ós recozimento 121

APÊNDICE D - Iterações numéricas de Newton-Raphson para a convergência da capacitância				
medida para V _G : a) -3,5V, b) -1,07V, c) 0V, d) 0,5V, e) 1V, f) 1,5V, g) $2V_{2}$				
h) 2,5V, i) 3V, j) 3,5V e k) 4V em função de Y_c calculado equivalente a				
3,21µS				
APÊNDICE E - Tabela de variação de Y _c com os valores que convergem na iteração numérica				
de Newton-Raphson utilizada no modelo para o cálculo de $C(V_G)$ em função				
da admitância no dispositivo127				

1. INTRODUÇÃO

O interesse no desenvolvimento de células solares teve um enorme crescimento nos últimos anos devido à grande necessidade de encontrar uma forma sustentável de produção de energia. O demasiado crescimento da demanda energética mundial, a preocupação com a falta de recursos naturais e o temor com o aumento de poluentes no ambiente tornam o estudo e aplicação da energia solar uma grande solução para o avanço da sociedade de forma conjunta com o planeta.

A evolução do mercado de energia fotovoltaica tem sofrido muitas mudanças drásticas nos últimos anos. De acordo com o artigo sobre as tendências das aplicações de tecnologia fotovoltaica publicado pela Agência Internacional de Energia (IEA) no ano de 2018, houve um aumento significativo nas instalações de fontes produtoras de energia através da tecnologia fotovoltaica, principalmente entre os anos de 2014 e 2017, dados esses representados pela figura 1.1 a seguir (IEA PVPS, 2018).



Figura 1.1 – Evolução do acúmulo total de energia produzida em GW das instalações fotovoltaicas mundiais

Fonte: Adaptado (IEA PVPS, 2018).

Esse crescimento notável, além de questões ambientais, deu-se pela grande evolução recente nas pesquisas sobre tecnologia solar, criando assim uma grande competitividade nesse mercado devido ao custo de produção e manutenção terem reduzido cada vez mais conforme avanços e novos projetos de células fotovoltaicas com maior eficiência fossem produzidos. A partir do ano de 2014, países como China, Estados Unidos, Índia e Japão começaram a investir no desenvolvimento dessa tecnologia, alcançando resultados significantes e permanecendo no

topo do ranking mundial de mercado fotovoltaico. Já no ano de 2017, o Brasil alcançou a marca de 1GW totais instalados tornando-se o líder do mercado da América Latina e entrando para os dez países principais no mercado de energia solar (IEA PVPS, 2018). A figura 1.2 mostra a colocação dos 10 países que possuíam mais instalações de sistemas baseados em energia fotovoltaica entre os anos de 2015 e 2017.

Figura 1.2 – Ranking dos anos de 2015 até 2017 de países que mais contribuíram na instalação de tecnologia fotovoltaica

RANKING	2015	2016	2017	
1	CHINA	CHINA	CHINA	
2	JAPÃO	EUA	EUA	
3	EUA	JAPÃO	ÍNDIA	
4	REINO UNIDO	ÍNDIA	JAPÃO	
5	ÍNDIA	REINO UNIDO	TURQUIA	
6	ALEMANHA	ALEMANHA	ALEMANHA	
7	CORÉIA	TAILÂNDIA	CORÉIA	
8	AUSTRÁLIA	CORÉIA	AUSTRÁLIA	
9	FRANÇA	AUSTRÁLIA	BRASIL	
10	CANADÁ	FILIPINAS	REINO UNIDO	
	NÍVEL DE MERCADO PARA ACESSAR O TOF			
	675 MW	683 MW	954 MW	

Fonte: Adaptado (IEA PVPS, 2018).

Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME), a geração de energia elétrica fotovoltaica terá o alcance de 7.000 MW até o ano de 2024 no Brasil (sem contar com a geração distribuída) e a potência instalada de eletricidade com base na energia solar representará cerca de 4% da potência total de energia produzida brasileira no mesmo ano, onde na atualidade a fonte é responsável por apenas 0,02% de toda a potência elétrica do país. Considerando que a capacidade de instalação total de energia fotovoltaica do país finalizou em 1,1GW no ano de 2017, não há dúvidas que o Brasil continuará crescendo no mercado ao longo dos anos (IEA PVPS, 2018; TN BENICIO BIZ EDITORES, 2015).

Esses dados só reforçam o fato do grande aumento de investimento nessa tecnologia, até mesmo para o Brasil onde essa forma de energia era relativamente pouco explorada em tempos antigos e no presente pode se tornar uma grande potência nesse ramo.

Para entender sobre a competitividade no mercado mundial de energia solar é preciso ter em mente também o processo para a geração desta energia. Os principais componentes do sistema de energia solar são os painéis solares, que por sua vez são constituídos por células fotovoltaicas.

As células fotovoltaicas são dispositivos que basicamente tem como princípio de funcionamento a conversão de luz solar incidente na célula em energia elétrica. A luz pode ser entendida como onda eletromagnética ou como uma coletividade de corpúsculos conhecidos como fótons que, quando atingem os átomos de certas substâncias na célula, transferem sua energia para eles, liberando elétrons e provocando uma corrente elétrica. Um dos pontos principais de relevância quando se trata da capacidade de conversão de energia de uma célula é o seu rendimento, que é um valor em porcentagem referente a razão entre a quantidade de energia da luz do sol que a célula recebe e a quantidade convertida em energia elétrica onde pode-se considerar que quanto maior o valor do rendimento mais *Watts* por metro quadrado pode ser gerado pela célula (GUIMARÃES, 2015).

No mercado atual de energia fotovoltaica com base na geração por células solares, o tipo de célula com maior presença, cerca de 97% da produção mundial, é baseada na tecnologia de construção com silício cristalino e policristalino e estrutura de junção PN (FRASS, 2010; GREEN, 2002; IEA PVPS, 2018; MATEU, 2005; WATANABE, 2020). Atualmente a célula solar com maior rendimento fabricada possui uma estrutura com um filme fino de GaAs e seu rendimento pode atingir até 28,8% (GREEN, 2018; WATANABE, 2020). Uma das motivações que sustentam esse trabalho e estudo é o aprimoramento e melhora desse rendimento para desenvolver no futuro uma estrutura com melhor eficiência possível, uma vez visto que o limite teórico máximo para este tipo de material ainda não foi atingido (33,5%) (MCCARTHY, 2012; SHOCKLEY, 1961; WATANABE, 2020).

Com o avanço nos estudos sobre as células solares, foram desenvolvidas alternativas de estruturas além da junção PN conhecida e uma delas muito utilizada em pesquisas devido a sua facilidade e simplicidade de construção comparada às células PN, bem como ter um baixo custo associado e mesma capacidade de extração de parâmetros desejados para estudo através da caracterização é a célula solar com estrutura MOS (Metal-óxido-semicondutor). Devido sua estrutura simples, esse tipo de célula pode ser empregado para alimentação de "chips" em um mesmo substrato de silício para *Energy Harvesting*. Esse termo se refere à um jargão utilizado na literatura para aplicações de baixa potência, geralmente utilizadas em ambientes internos (FERRI, 2010; WATANABE, 2020).

Neste trabalho, foi realizado um estudo sobre um material bem conhecido na literatura, porém sem muitos estudos realizados para esse tipo de aplicação: o monóxido de silício (SiO). No ramo da eletrônica, o dióxido de silício (SiO₂) é altamente utilizado em vários propósitos, principalmente como dielétrico de porta em diversos dispositivos inclusive células solares, devido suas propriedades elétricas e suas características muito estudadas. Por outro lado, o SiO não tem muitos registros de estudos das suas propriedades e características com uso em células solares. Sabe-se através de trabalhos realizados pelo Grupo de Superfícies, Interfaces e Deposição Eletroquímica (GSIDE) do LSI/PSI/EPUSP que o SiO apresenta características interessantes ao ser obtido através da evaporação térmica, principalmente no acúmulo de cargas positivas no filme fino depositado, que o leva a ser um filme promissor para utilização como camada de passivação em células solares. O aumento no acúmulo de cargas positivas, se for aplicado corretamente, pode levar ao aumento da eficiência da célula solar MOS e será um dos objetivos do grupo no futuro. O principal objetivo no presente trabalho é obter camadas de SiO com espessura e concentração de cargas positivas de forma repetitiva e controlável.

Para obter essas propriedades, é de suma importância que o filme fino tenha uma boa qualidade e uniformidade, portanto o controle na obtenção desse material é importante. O desenvolvimento de um processo de evaporação foi descrito juntamente com um estudo aprofundado sobre o comportamento dessas camadas, primeiramente em capacitores MOS para então no futuro poder ser implementado em células solares MOS. Os capacitores MOS são os dispositivos escolhidos para o estudo desse óxido primeiramente devido sua simplicidade de fabricação, possuindo menos passos de fabricação comparado com uma célula fotovoltaica, e a serem dispositivos muito utilizados na caracterização de tecnologias MOS, podendo ser extraídos todos os parâmetros necessários através da curva C-V, que são melhores explicados nos capítulos seguintes.

Também foi efetuado um estudo sobre a modelagem dessa curva C-V, afim de corrigila a partir dos efeitos de parâmetros relevantes que agem no dispositivo.

1.1. Objetivos

O objetivo desse trabalho é a fabricação e caracterização de capacitores MOS utilizando como óxido de porta o SiO, obtidos por evaporação térmica visando sua caracterização elétrica quanto à espessura e concentração volumétrica de cargas positivas além de estabelecer processo de recozimento que possa estabilizar esses parâmetros. O desenvolvimento de um processo de deposição com a finalidade de controlar a espessura e a concentração de cargas positivas dos filmes finos de SiO depositados foi importante para o estudo das características e comportamentos dessa camada no dispositivo. Também será mostrada uma modelagem para a simulação de curvas C-V teóricas ajustadas sobre as curvas experimentais obtidas pela caracterização dos capacitores MOS. Esse estudo é importante para uma futura aplicação como camada antirrefletora e indutora de inversão (pelas cargas positivas incorporadas) em células solares MOS, estimando a melhora na eficiência para a geração de energia.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a fabricação e caracterização dos capacitores, foi preciso pesquisar e estudar conceitos importantes como técnicas e funcionamentos dos equipamentos utilizados para um entendimento do melhor caminho a ser adotado na busca de um resultado satisfatório.

2.1. Capacitor MOS

O capacitor MOS é uma estrutura formada por um material condutor que geralmente é um metal (silício policristalino altamente dopado, alumínio ou metal refratário), óxido (óxido de silício nesse caso) e um semicondutor (silício). Esse dispositivo é muito utilizado no processo de caracterização de tecnologias MOS devido à sua facilidade de análise e fabricação. Comparando esse tipo de capacitor com o conhecido capacitor metálico de placas paralelas (metal-isolante-metal) a diferença se dá pela substituição de uma das placas de metal por um material semicondutor, o que possibilita a análise de uma capacitância adicional denominada capacitância do silício ou capacitância do semicondutor. Essa capacitância por sua vez encontra-se associada em série com a capacitância do material isolante (capacitância do óxido), alterando o valor da capacitância total do dispositivo onde essa alteração acontece em função da tensão aplicada nos terminais. A observação desse efeito ocorre através da curva da capacitância em função da tensão aplicada (curva C-V). Uma vez obtida as medições dos valores da capacitância em função da tensão em baixa e alta frequência (C-V BF e C-V AF respectivamente) e da corrente em função da tensão (I-V), pode-se calcular uma série de parâmetros tecnológicos fundamentais para o estudo desejado (MARTINO, 2004; ALBERTIN, 2003). A figura 2.1 representa a estrutura de um capacitor MOS polarizado diretamente.





Fonte: Adaptado (ELETRONICS ON WEB, 2012).

2.1.1. Modelo de bandas de energia

O entendimento do funcionamento do capacitor MOS bem como os efeitos que ocorrem podem ser estudados através da sua representação pelo modelo de faixas de energia, onde para cada material que constitui em sua estrutura é determinada um sistema de bandas de energia e ao serem dispostas em conjunto representam a estrutura de bandas de energia de um capacitor MOS (ALBERTIN, 2003). Na figura 2.2, é demonstrado esse modelo de faixas de energia dos componentes do dispositivo antes do contato entre eles.





Fonte: Adaptado (MARTINO, 2003).

Onde os símbolos destacados na figura 2.1.2 equivalem a:

- a) Evácuo: Energia de nível do vácuo;
- b) E_C: Energia de condução, ou o nível mínimo de energia para um elétron entrar na camada de condução e se tornar um elétron livre;
- c) E_i: Energia intrínseca, ou um nível médio energético dos elétrons em um semicondutor intrínseco;
- d) E_v: Energia de valência, ou o nível máximo de energia para um elétron permanecer na camada de valência e pertencer a uma ligação covalente;
- e) E_{FM}: Nível de Fermi do metal, que é o nível de energia potencial que corresponde a um nível médio energético dos elétrons no metal;
- f) E_{FS}: Nível de Fermi do semicondutor, que é o nível de energia potencial correspondente a um nível médio energético dos elétrons no material semicondutor;
- g) χ_{ox}: Afinidade eletrônica do óxido de silício, que equivale à energia de um elétron que está no nível de condução precisa para ser emitido pelo óxido;
- h) χ_{si}: Afinidade eletrônica do silício, que corresponde à energia de um elétron que está no nível de condução precisa para ser emitido pelo semicondutor;
- i) Φ_F: Potencial de Fermi, que depende do tipo de dopante do substrato. Para o silício do tipo p, é representada pela seguinte equação:

$$\Phi_{\rm F} = \frac{\rm k.T}{\rm q} \,.\, \ln\left[\frac{\rm N_A}{\rm n_i}\right] \tag{2.1}$$

Onde N_A equivale a concentração de dopantes (lacunas) presentes no substrato, n_i é a concentração intrínseca de portadores do Si, "k" é a constante de *Boltzmann*, "T" corresponde a temperatura absoluta e "q" representa a carga elementar do elétron;

- j) Φ_M: Função trabalho ou de extração do metal, correspondente à menor energia que se fornecida a um elétron com energia no nível de Fermi, é capaz de extraí-lo do material. Esse parâmetro é diferente para cada tipo de metal;
- k) Φ_{Si} : Função trabalho ou de extração do silício, que segundo a literatura pode ser calculado a partir da seguinte equação (MARTINO, 2003):

$$\Phi_{\rm Si} = 4,7 + \Phi_{\rm F} \tag{2.2}$$

Já na figura 2.3, é representada a situação de contato entre os 3 materiais e o que acontece com suas bandas de energia ao atingirem a situação de equilíbrio térmico, ou seja, quando os níveis energéticos de Fermi do metal e do semicondutor se igualam ($E_{FM} = E_{FS}$).



Figura 2.3 – Modelo de bandas de energia de um capacitor MOS após o contato e em equilíbrio térmico

Fonte: Adaptado (MARTINO, 2003).

Se adotado a situação acima onde não há aplicação de tensão a porta ($V_G = 0$), ocorre uma migração de elétrons do metal para o silício podendo ser através de um curto-circuito externo ou até mesmo através do próprio óxido (que não é um isolante perfeito), tornando o metal positivo se comparado ao silício. Esse efeito acontece devido a diferença entre os níveis energéticos de Fermi do metal (E_{FM}) e do silício (E_{FS}), no qual $E_{FM} > E_{FS}$. Ao atingir o equilíbrio térmico ($E_{FM} = E_{FS}$), a migração de elétrons termina e o potencial total obtido devido a essa migração de um material para outro é distribuído parte para o óxido (V_{ox}) e parte para o semicondutor (ψ_S) (MARTINO, 2003; ALBERTIN, 2003).

Como as funções trabalho do metal (Φ_M) e do silício (Φ_{Si}) são diferentes, ao conectar os materiais pode-se calcular essa diferença de função trabalho entre metal e semicondutor (Φ_{MS}) através da seguinte equação:

$$\Phi_{\rm MS} = \Phi_{\rm M} - \Phi_{\rm Si} \tag{2.3}$$

Utilizando o alumínio como metal de porta devido a ser um dos materiais mais comumente utilizados para essa finalidade, onde tem-se que Φ_M (Al) = 4,1 V e substituindo o Φ_{Si} :

$$\Phi_{\rm MS} = 4, 1 - (4, 7 + \Phi_F) \tag{2.4}$$

$$\Phi_{\rm MS} = -0.6 - \Phi_{\rm F} \tag{2.5}$$

2.1.2. Regimes de operação e equacionamento de parâmetros do capacitor MOS

Para um capacitor MOS com substrato do tipo P, que é o mais comumente estudado na literatura, ao aplicar uma variação na tensão de porta (V_G) no dispositivo, este passa por 3 diferentes regimes de operação que são: Acumulação, depleção e inversão. Os parâmetros que determinam a mudança de um regime para o outro são denominados tensão de faixa plana (V_{FB}) e tensão de limiar (V_T), onde V_{FB} delimita a transição da acumulação para depleção e V_T define a transição da depleção para inversão. A figura 2.4 é representado o diagrama de bandas de energia de um capacitor MOS em seus diferentes regimes de operação.





Fonte: Adaptado (MAGALHÃES, 2012).

Na figura 2.4, estão descritas as condições em relação a tensão de porta V_G para os regimes de operação, em que para a condição (a), onde V_G < V_{FB}, há uma acumulação de cargas majoritárias (cargas positivas ou lacunas para o capacitor MOS tipo P) na região de interface entre o óxido e o substrato correspondendo assim ao regime de acumulação. Na situação (b)

correspondendo a $V_{FB} < V_G < V_T$, as lacunas são repelidas por um campo elétrico formado na região entre o óxido e a superfície do silício, gerando uma região com maior concentração de portadores fixos (elétrons para substrato tipo P) que é conhecida como região de depleção e sua largura é representada por "d". Por fim, analisando a parte (c), para $V_G > V_T$, há um aumento na largura da região de depleção conforme o aumento da tensão de porta V_G até que a quantidade de portadores minoritários na superfície do silício (elétrons) ultrapassa a própria dopagem do substrato (lacunas), atingindo sua largura máxima de depleção d_{máx} e alterando a forma com que a tensão V_G é respondida pelo capacitor, onde as cargas de efeito passarão a ser os elétrons. Trata-se da região de inversão.

Para a região de depleção ($V_{FB} < V_G < V_T$), os termos Vox e ψ_S representam respectivamente a queda de potencial no óxido e o potencial de superfície do silício. São parâmetros proporcionais e resultantes da aplicação de V_G no capacitor e é possível obter esses parâmetros a partir das equações (MARTINO, 2003; ALBERTIN, 2003; MAGALHÃES, 2012):

Levando em consideração os efeitos das cargas no óxido, para a queda de potencial no óxido V_{ox} :

$$V_{ox} = -\frac{Q_{Si}}{C_o} - \frac{Q_{SS}}{C_o}$$
(2.6)

onde Q_{SS} equivale à densidade de cargas efetivas no óxido próximo à região de interface entre o óxido e a superfície do silício, representando basicamente o centroide de cargas equivalente devido ao efeito dos 4 tipos de cargas distribuídas no óxido: cargas na interface óxido-silício (Q_{os}) , cargas fixas no óxido (Q_{of}) , cargas móveis no óxido (Q_{om}) e cargas de armadilhas de interface (Q_{it}) ; Q_{Si} representa a densidade de carga no silício por unidade de área referente a região de depleção dada pela expressão:

$$Q_{\rm Si} = -q. N_{\rm A}. d \tag{2.7}$$

e C_o refere-se a capacitância do óxido já multiplicado pela área e é calculada pela equação:

$$C_{o} = \frac{\varepsilon_{0} \cdot \varepsilon_{Si}}{x_{ox}} \cdot A_{g}$$
(2.8)

onde ε_0 é a permissividade do vácuo, ε_{Si} é a permissividade relativa do silício, x_{ox} equivale a espessura do óxido e A_g é a área do capacitor. Já para o potencial de superfície ψ_S :

$$\psi_{\rm S} = \frac{q.N_{\rm A}.d^2}{2.\varepsilon_0.\varepsilon_{\rm Si}} \tag{2.9}$$

A largura da região de depleção pode ser calculada através da manipulação algébrica da equação do potencial de superfície ψ_S , uma vez que seu valor seja conhecido, resultando na seguinte equação:

$$d = \sqrt{\frac{2.\varepsilon_{Si}.\psi_S}{q.N_A}}$$
(2.10)

Portanto, quanto maior for o potencial de superfície ψ_S , maior será a largura da região de depleção.

Partindo da situação onde o valor da tensão de porta é maior do que a tensão de limiar $(V_G > V_T)$, tem-se o caso que pode ser considerado como d = d_{máx}, que significa quando a largura da região de depleção atinge seu valor máximo. Como não há mais variação na região de depleção, a distribuição de potencial na superfície do silício praticamente se mantém constante, sendo calculado para a regime de inversão como:

$$\psi_{\mathrm{S(inv)}} = 2.\,\Phi_{\mathrm{F}} \tag{2.11}$$

substituindo o Φ_F :

$$\psi_{S(inv)} = 2.\frac{kT}{q} . \ln\left[\frac{N_A}{n_i}\right]$$
(2.12)

E para o d_{máx}, sua obtenção passará a ser calculada a partir de $\psi_{S(inv)} = 2\Phi_F$, assim:

$$d_{m\acute{a}x} = \sqrt{\frac{2.\varepsilon_0.\varepsilon_{Si}.2.\Phi_F}{q.N_A}}$$
(2.13)

As tensões de porta V_G , de faixa plana V_{FB} e de limiar V_T , que são importantes para o funcionamento e estabelecimento das propriedades de um capacitor MOS, podem ser calculadas a partir do estabelecimento dos parâmetros anteriores apresentados como nas seguintes expressões:

a) Tensão de porta (V_G):

$$V_{\rm G} = -\frac{Q_{\rm Si}}{C_{\rm o}} - \frac{Q_{\rm SS}}{C_{\rm o}} + \psi_{\rm S} + \Phi_{\rm MS}$$
(2.14)

b) Tensão de faixa plana (V_{FB}):

$$V_{\rm FB} = -\frac{Q_{\rm SS}}{C_{\rm o}} + \Phi_{\rm MS} \tag{2.15}$$

c) Tensão de limiar (V_T):

$$V_{\rm T} = -\frac{Q_{\rm Si_{fmáx}}}{C_{\rm o}} - \frac{Q_{\rm SS}}{C_{\rm o}} + 2.\,\Phi_{\rm F} + \Phi_{\rm MS}$$
(2.16)

em que $Q_{Sifmáx}$ é a representação da quantidade máxima de cargas fixas que foram induzidas no silício. Levando em consideração o potencial de superfície máximo atingido no regime de inversão ($\psi_{S(inv)} = 2.\Phi_F$) e a máxima largura de depleção ($d_{máx}$), pode-se considerar que a superfície do substrato possui uma quantidade de cargas fixas minoritárias (elétrons) que foram induzidas (Q_{Sif}) de mesma concentração que as cargas móveis majoritárias (lacunas) presentes no silício (Q_{Sim}). Portanto, o valor de $Q_{Sifmáx}$ pode ser representado como aproximadamente o valor máximo de Q_{Si} (MARTINO, 2003):

$$Q_{Si} = Q_{Si_m} + Q_{Si_f} \approx Q_{Si_{fmáx}}$$
(2.17)

substituindo Qsi e considerando o valor máximo da região de depleção dmáx:

$$Q_{Si_{fmáx}} = -q. N_A. d_{máx}$$
(2.18)

Há uma variação de cargas no silício causada pela aplicação de tensão à porta V_G e esse efeito gera uma variação na capacitância do dispositivo conforme passa pelos diferentes regimes de operação. Devido a estrutura de construção do dispositivo MOS, pode-se modelálo em relação a sua capacitância como sendo dois capacitores em série, como demonstrado na figura 2.5. Tem-se o conhecimento de que existe uma capacitância que atua na camada de óxido (C_{ox}) e com a distribuição de potencial parte para o óxido (V_{ox}) e parte para o silício (ψ s), surge também uma capacitância no substrato de silício (C_{Si}) no qual pode ser relacionada em função do potencial de superfície (ALBERTIN, 2003). **Figura 2.5** – Estrutura de um capacitor MOS e sua representação de associação em série de capacitâncias do óxido (C_{ox}) e do silício (C_{Si})



Fonte: Autor.

A capacitância total (C_T) pode ser calculada a partir dessa associação, obtendo a equação:

$$C_{\rm T} = \frac{1}{\frac{1}{c_0} + \frac{1}{c_{\rm Si}}}$$
(2.19)

onde Csi é dependente da largura da região de depleção, como mostra a expressão:

$$C_{Si} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{Si}}{d}$$
(2.20)

Explicando os regimes de operação, agora com relação ao comportamento da capacitância e da variação das cargas, tem-se primeiramente a situação onde $V_G < V_{FB}$ ou referente a região de acumulação. Para esses valores de V_G , toda variação de tensão de porta (dV_G) gera uma variação de lacunas ou cargas majoritárias em acumulação na região de interface óxido-silício. Como a largura da região de depleção ainda é muito pequena, não há a influência da capacitância do silício C_{Si}, logo pode-se considerar:

$$C_{máx} = C_o = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{ox}}{x_{ox}} \cdot A_g$$
 (2.21)

onde $C_{máx}$ é o valor da capacitância total ou capacitância máxima na região de acumulação e ε_{ox} equivale a permissividade relativa do óxido (SiO₂).

Uma vez que a situação passa a ser $V_G > V_{FB}$, ocorre uma variação do potencial de superfície do silício ($d\psi_S$) bem como o aumento da largura de depleção "d" e consequentemente

uma variação das cargas presentes no silício (dQ_{Si}). A capacitância na região de depleção (C_D) então pode ser associada a capacitância do silício (C_{Si}):

$$C_{\rm D} = C_{\rm Si} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{\rm Si}}{d} \cdot A_{\rm g}$$
(2.22)

A partir do momento em que $V_G > V_T$, o capacitor MOS entra em regime de inversão tendo a superfície do semicondutor tomada por cargas minoritárias (elétrons) e atingindo o potencial de superfície constante na inversão do silício (onde $\psi_S = \psi_{S(inv)}$). Considera-se então que a capacitância do silício total na região de inversão ou a capacitância mínima atingida pelo capacitor (C_{min}) é dada pela expressão:

$$C_{\min} = \frac{1}{\frac{1}{C_0} + \frac{1}{C_{Si_{\min}}}}$$
(2.23)

onde $C_{Si min}$ representa a capacitância mínima do silício na inversão e pode ser obtida através da associação com o $d_{máx}$:

$$C_{Si_{min}} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{Si}}{d_{max}} \cdot A_g$$
(2.24)

No entanto para o regime de inversão, podem ocorrer dois fenômenos associados a esta capacitância C_{min} dependendo da frequência de variação da tensão de porta (dV_G) aplicada (ALBERTIN, 2003; MARTINO, 2003). Os efeitos da frequência geram alterações significativas em C_{min} e no perfil da curva do capacitor MOS em sua caracterização, que será explicada com mais detalhes nos próximos capítulos.

2.2. Processo de deposição PVD

O processo de PVD (*Physical Vapor Deposition*) ou Deposição Física a Vapor consiste em vaporizar um material sólido através do seu aquecimento em uma câmara com pressões baixas e controladas, onde o vapor condensa-se na superfície do substrato formando o filme fino. Esse processo é muito utilizado para a deposição de metais na formação de contatos de porta e linhas de interconexão entre dispositivos que compõem um circuito integrado da microeletrônica, por exemplo. Há basicamente três tipos de métodos de deposição que podem ser realizados através do processo de PVD (YAMAMOTO, 2019a), que são:
- a) Evaporação térmica ou por filamento aquecido;
- b) Evaporação por feixe de elétrons (*e-beam*);
- c) Pulverização catódica (Sputtering).

Após estudos aprofundados optou-se por fazer uso da evaporação térmica devido a ser o método relativamente mais simples de PVD e ser bastante eficiente com o tipo de material fonte escolhido.

2.2.1. Evaporação térmica

A evaporação térmica é um dos meios de deposição por PVD onde utiliza-se um suporte de filamento de Tungstênio ou uma "navícula" de metal para conter o material fonte da formação do filme fino. O processo resume-se em aplicar uma alta corrente nesse suporte que, por efeito Joule, aquece até altas temperaturas fundindo o material em contato até que ocorra a evaporação do mesmo. Este processo é realizado em uma câmara isolada feita de um vidro especial e com ambiente interno de ar controlado situada no equipamento conhecido como evaporadora térmica. Os átomos da fonte de evaporação quando este evapora são direcionados por todo o volume da câmara, aderindo na superfície de todos os componentes internos presentes na câmara que pode ser uma campânula de vidro, depositando na superfície do substrato e formando o filme fino (YAMAMOTO, 2019a; WASA, 2004; DUKE UNIVERSITY, 2016). A figura 2.6 mostra de forma esquemática disposição dos componentes dentro da câmara durante uma evaporação térmica.

Figura 2.6 – Representação da evaporadora térmica



Fonte: Adaptado (WASA, 2004).

O substrato é colocado acima da fonte de evaporação para que boa parte dos átomos ou moléculas evaporadas sejam direcionadas para sua superfície, visando uma uniformidade no filme formado. O ambiente de alto vácuo é necessário para diminuir ao máximo possíveis contaminantes e impurezas presentes no ar que podem aderir no substrato durante o processo de evaporação.

O controle preciso sobre a espessura do filme formado através desse processo pode ser bastante complicado, uma vez que o material fonte evapora por todo o volume da câmara como abordado anteriormente. Pode-se estimar a espessura final aproximada através da fórmula de evaporação, que relaciona a massa da fonte com a área de evaporação dependendo do tipo de suporte utilizado (YAMAMOTO, 2019a), segundo as equações a seguir.

$$m = 4\pi h^2$$
. e. d (Para filamento) (2.25)

$$m = \pi h^2$$
. e. d (Para navícula) (2.26)

Onde m é a massa do material fonte utilizado, "h" representa a distância entre o suporte (filamento ou navícula), e o substrato, "e" é a espessura do filme depositado, "d" é a densidade do material fonte e o ângulo sólido de evaporação é dado em sterradianos representado pelo número π para a navícula e 4π para o filamento (YAMAMOTO, 2019a).

2.3. Oxidação Térmica

Em se tratando de capacitores MOS, uma etapa importante para a fabricação desse tipo de estrutura é a obtenção do óxido de porta responsável para atuar como isolante do dispositivo. Um dos materiais mais utilizados para tal finalidade é o dióxido de silício (SiO₂).

O SiO₂ é amplamente estudado e implementado em diversas aplicações no ramo da microeletrônica tais como: camada de passivação de superfícies, máscara para difusão, implantação iônica de dopantes, isolação de dispositivos e óxido de porta em dispositivos MOS. Essa grande utilização do SiO₂ se dá devido o mesmo ser de fácil obtenção, uma vez que pode ser crescido a partir do próprio substrato de silício do dispositivo através do processo de oxidação térmica (YAMAMOTO, 2019b).

O processo de oxidação térmica consiste no aquecimento em altas temperaturas (normalmente entre 700°C e 1200°C) do substrato de silício em um forno onde há a utilização

do oxigênio, proveniente de um gás ou vapor d'água adicionados ao ambiente do forno, para reagir com o silício e crescer a partir dele o dióxido de silício. O controle dos parâmetros de tempo e temperatura de processo determina a espessura da camada de SiO₂ formada e a escolha do meio de adição do oxigênio à câmara do forno está relacionado ao tipo do processo de oxidação, sendo eles (YAMAMOTO, 2019b; CHRISTIANO, 2017):

- a) Oxidação térmica seca: utiliza o gás de oxigênio (O₂);
- b) Oxidação térmica úmida: utiliza o vapor d'água (H₂O);
- c) Oxidação pirogênica: utiliza oxigênio (O₂) e hidrogênio (H₂), que reagem em altas temperaturas formando vapor d'água (H₂O);
- d) Oxidação térmica rápida (RTO): utiliza oxigênio (O₂) com aquecimento rápido através de lâmpadas halógenas.

Como será abordado no ítem 3.1.4, para a construção de capacitores MOS, foi utilizado o processo de oxidação térmica seca para o crescimento de uma camada fina inicial de SiO₂.

2.3.1. Oxidação Térmica Seca

A oxidação térmica seca é um dos tipos de oxidação térmica em que se utiliza um fluxo de gás oxigênio (O₂) durante o aquecimento do substrato para que reaja com o silício e forme o SiO₂ conforme a seguinte equação química a seguir (YAMAMOTO, 2019b; CHRISTIANO, 2017):

Si (Sólido) +
$$O_2 \rightarrow SiO_2$$
(Sólido) (Oxidação Térmica Seca)

A vantagem da escolha desse processo, além de sua simplicidade de execução, se deve a melhor qualidade do óxido resultante, o que o torna adequado para aplicações em dispositivos como óxido de porta para a tecnologia MOS ou sendo óxido sacrificial durante outros processos de fabricação, porém a taxa de oxidação (equivalente a relação entre o crescimento do óxido em espessura durante um determinado tempo) é baixa, ou seja, é um processo viável somente para óxidos finos. Outras características do processo são que ele pode ser efetuado em um forno convencional de oxidação e que pode ser processado várias lâminas de uma vez sendo alocadas em barquinhas de quartzo como mostrado na figura 2.7 a seguir: (YAMAMOTO, 2019b).



Figura 2.7 - Esquematização de um forno convencional de oxidação térmica seca

Fonte: (YAMAMOTO, 2019b).

2.4. Recozimento Térmico

O recozimento térmico é um processo de tratamento que visa a alteração das propriedades físicas de um material a partir da exposição a uma determinada temperatura constante por um certo período de tempo e em seguida um resfriamento lento em temperatura ambiente na entrada do forno ou dentro do próprio forno quando o mesmo é desligado. Esta técnica permite alcançar diversos benefícios, tais como: remover tensões do material, diminuir a dureza, alterar propriedades mecânicas (como resistência, ductilidade, entre outros), modificar características elétricas e magnéticas ou o ajuste do tamanho do grão através do efeito de sinterização dos grãos desse material, formando ligações entre eles mais fortes, ajustando seus tamanhos e reduzindo os espaços entre cada grão que é chamado de poro (MATERIAIS JÚNIOR, 2019; UNITRAT, 201-). A figura 2.8 é uma representação simplificada dos estágios de uma sinterização no estado sólido, onde (a) são aglomerados não coalescidos, (b) corresponde ao estágio inicial do processo de coalescência durante a sinterização, seguido por (c) que é o estágio intermediário e (d) descreve o estágio final.





Fonte: Adaptado (ARANTES, 2016).

Em (a), os grãos de um determinado material antes da sinterização encontram-se com uma fraca ligação entre os pontos de contato do contorno dos seus contornos e com a presença de uma grande quantidade de poros. Durante o processo de recozimento térmico, a estrutura entra no estágio inicial da sinterização (b), onde há o rearranjo dos grãos e formação de uma ligação mais forte entre eles ou o chamado "pescoço" nos pontos de contato entre os grãos durante a coalescência. Ao entrar em (c), passa-se para o estágio intermediário em que o tamanho dos contatos aumenta lentamente, à medida que a porosidade existente diminui consideravelmente. Finalmente em (d) ocorre o estágio final, no qual há o fechamento dos poros a partir do aumento do tamanho dos grãos, fortificando ainda mais as ligações entre os átomos ou moléculas do material (ARANTES, 2016).

Como a obtenção dos filmes finos de SiO se deu a partir da evaporação térmica, o processo de recozimento térmico se viu necessário para melhorar a qualidade e estabilidade desses filmes através da sinterização do material evaporado.

2.5. Caracterização dos Capacitores MOS

Nos próximos tópicos, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os processos de caracterização física e elétrica utilizados durante a elaboração deste trabalho. Métodos de caracterização são técnicas de extração de parâmetros específicos das amostras que são necessários para o entendimento dos efeitos e funcionamento dos dispositivos.

2.5.1. Caracterização Física: Perfilometria

A técnica de perfilometria consiste na medição mecânica da topografia de um material com uma agulha de alta precisão (normalmente na faixa de Angstrons) e sensibilidade. Essa agulha do perfilômetro é mais conhecida como ponteira. Após a calibração do equipamento e estabelecimento dos parâmetros de medição, como tempo do processo e força de pressão da ponteira, a mesma percorre a superfície da amostra e registra seu trajeto em formato gráfico no programa a distribuição de alturas no caminho percorrido. A alta precisão do equipamento é capaz de determinar irregularidades, tais como rugosidade, desuniformidade e degraus na superfície medida (HORA, 2008). A partir do entendimento de seu funcionamento, é possível fazer uso desta técnica para determinar espessuras de filmes finos depositados em relação à superfície de um substrato (no caso deste trabalho em questão, filmes finos de SiO depositados sobre substratos de Si-p), em particular, medida de espessura através de um degrau para análise.

2.5.2. Caracterização Elétrica: Curva C-V

As características do capacitor MOS podem ser analisadas a partir do estudo dos dados obtidos através da curva C-V, gerada ao aplicar-se uma tensão V_G em baixas ou altas frequências nas portas do dispositivo. A análise e entendimento da curva C-V é importante para o controle da qualidade dos processos de fabricação do capacitor bem como entender os efeitos que podem ocorrer no dispositivo. A figura 2.9 mostra os perfís de uma curva C-V para baixa (BF) e alta (AF) frequências de capacitores MOS, bem como seus regimes de operação.

Figura 2.9 – Curva capacitância-tensão (C-V) em baixa frequência (C-V BF) e alta frequência (C-V AF) passando pelos devidos regimes de acumulação, depleção e inversão



Fonte: Adaptado (MARTINO, 2003).

Para valores de $V_G < V_{FB}$, a superfície do dispositivo está em acumulação de portadores majoritários (lacunas), resultando em um $Q_{Si} > 0$ ou acúmulo de cargas positivas na região de interface do silício com o dielétrico. Se o valor de V_G aplicado for igual ao valor de V_{FB} ($V_G = V_{FB}$), obtém-se a situação de faixa-plana, onde $Q_{Si} = 0$. Com valores de tensão na porta entre o intervalo de $V_{FB} < V_G < V_T$ a superfície do dispositivo passa pelas regiões de depleção e inversão fraca, onde $Q_{Si} < 0$ e as cargas induzidas no semicondutor começam a se tornar cada vez mais negativas conforme a largura da região de depleção aumenta. Por fim, para valores de $V_G \ge V_T$, a superfície entra em região de inversão forte, sendo $Q_{Si} << 0$, atingindo o valor máximo de largura da região de depleção ($d_{máx}$) e estabilizando o potencial na superfície do silício $\psi_{S(inv)}$ para um valor constante (MARTINO, 2003).

Porém, como abordado brevemente no item 2.1, existem duas situações para o valor da capacitância da região de inversão com relação à frequência de variação do sinal dV_G sobreposto a V_G durante a medida C-V para baixa frequência (BF) e para alta frequência (AF).

Para baixa frequência, a variação de tensão de porta (dV_G) é acompanhada (respondida) pelos portadores minoritários induzidos no substrato (elétrons) gerando a presença de uma variação de carga de inversão ($dQ_I \neq 0$) em que no início da inversão há a associação em paralelo da capacitância da camada de inversão com a capacitância da camada de depleção ($C_{Si} = C_D + C_I$) formando esse ponto de menor capacitância como mostra a figura 2.3, até que seja atingido Agora, para alta frequência, os portadores minoritários (elétrons) não respondem a variação de tensão de porta (dV_G) e, portanto, pode-se considerar que a capacitância da camada de inversão é próxima de zero devido a não existir variação de cargas de inversão ($C_I \approx 0$ e $dQ_I \approx 0$). Nesse caso, a capacitância do óxido está associada em série com a capacitância mínima do silício na inversão mantendo o valor de C_{min} como visto no capítulo 2.1.2.

2.5.2.1. Extração de parâmetros do capacitor MOS a partir da curva C-V

A partir da medição e extração da curva C-V em alta frequência de um capacitor MOS com substrato de silício tipo P, que é o foco no caso deste trabalho, pode-se descobrir os valores primeiramente das capacitâncias máxima ($C_{máx}$) e mínima ($C_{mín}$) do dispositivo nos pontos mostrados na figura 2.9.

Com a obtenção dos valores de $C_{máx}$ e $C_{mín}$, é possível efetuar os cálculos utilizando as equações apresentadas e manipulando-as para determinar diversas características do dispositivo, bem como a densidade de carga efetiva no óxido (Q_{ss}), que é um dos objetivos principais desse trabalho.

Para o C_{máx} medido, tem-se que:

$$C_{máx} = C_o = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{ox}}{x_{ox}} \cdot A_g$$
(2.27)

Isolando o x_{ox} na equação é possível calcular o valor da espessura do óxido:

$$\mathbf{x}_{\mathrm{ox}} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{\mathrm{ox}}}{C_{\mathrm{máx}}} \cdot \mathbf{A}_{\mathrm{g}}$$
(2.28)

Com o valor medido de C_{mín}, tem-se a equação:

$$C_{\min} = \frac{1}{\frac{1}{C_0} + \frac{1}{C_{Si_{\min}}}}$$
(2.29)

como $C_0 = C_{máx}$, pode-se isolar o $C_{Si mín}$ e manipular a equação algebricamente para se obter:

$$C_{Si_{min}} = \frac{(C_{máx} \cdot C_{min})}{(C_{máx} - C_{min})}$$
(2.30)

para o termo de C_{Si mín}, como visto no item 2.1.2, pode ser calculado através da expressão:

$$C_{Si_{min}} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{Si}}{d_{max}} \cdot A_g$$
(2.24)

Isolando-se o d_{máx}, é obtida a seguinte equação para a máxima largura de depleção:

$$\mathbf{d}_{m\acute{a}x} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{\mathrm{Si}}}{C_{\mathrm{Si}_{m\acute{n}}}} \cdot \mathbf{A}_{\mathrm{g}} \tag{2.32}$$

fazendo a substituição do $C_{Simín}$ com a expressão determinada na equação (2.30) acima e efetuando as manipulações matemáticas para inverter a fração, pode-se calcular a largura máxima de depleção ($d_{máx}$) como sendo:

$$d_{m\acute{a}x} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_{Si} \cdot A_g \cdot \frac{(C_{m\acute{a}x} - C_{m\acute{n}})}{(C_{m\acute{a}x} \cdot C_{m\acute{n}})}$$
(2.33)

Uma vez descoberto o valor de d_{max} , é possível voltar na equação (2.13) para o regime de inversão onde:

$$d_{m\acute{a}x} = \sqrt{\frac{2.\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{Si} \cdot 2.\Phi_F}{q.N_A}}$$
(2.13)

e isolar o valor de N_A para obter a concentração de lacunas do substrato. Efetuando as devidas operações matemáticas de N_A para fora da raiz e substituindo o termo Φ_F pela equivalente vista na equação (2.1.1), tem-se:

$$N_{A} = \frac{4 \varepsilon_{0} \varepsilon_{Si}}{q \cdot d_{máx}^{2}} \cdot \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln\left[\frac{N_{A}}{n_{i}}\right]$$
(2.34)

A ideia na equação 2.34 é a de resolvê-la iterativamente substituindo um valor inicial para N_A (como por exemplo $N_A=1x10^{15}$ cm⁻³) no termo dentro do logaritmo natural e efetuar diversas iterações retornando com o valor do N_A resultante na mesma equação até haja a convergência, ou seja, quando o N_A resultante no primeiro membro da equação for igual ao N_A utilizado na segunda parte da equação. Pode-se considerar então como sendo o valor da concentração de dopantes o último N_A resultante com um certo número de casas decimais após a vírgula após a convergência.

Levando em conta o N_A obtido de forma iterativa, pode-se obter então a tensão de banda plana (V_{FB}). Para isso, uma possibilidade é a de calcular a capacitância de banda plana (C_{FB}) e correlacionar seu valor com o eixo da tensão de porta V_G , como é demonstrado na figura 2.9. O cálculo de C_{FB} pode ser realizado por:

$$C_{FB} = \frac{\varepsilon_{ox} \cdot \varepsilon_0}{x_{ox} + \frac{\varepsilon_{ox} \cdot \varepsilon_0}{\varepsilon_{Si} \cdot \varepsilon_0} \sqrt{\frac{k.T \cdot \varepsilon_{Si} \cdot \varepsilon_0}{q^2 \cdot N_A}}}$$
(2.35)

Vale ressaltar que essa equação corresponde a uma associação em série da capacitância de faixa plana no interior do silício (C_{FBSi}) com a capacitância do óxido (C_{ox}), sendo necessário sua multiplicação com a área do capacitor (A_g) para obter o valor total.

Encontrando esse valor de capacitância na curva C-V e analisando graficamente o valor de V_G correspondente, tem-se o termo experimental para V_{FB} que a partir de sua expressão:

$$V_{\rm FB} = -\frac{Q_{\rm SS}}{C_{\rm o}} + \Phi_{\rm MS} \tag{2.36}$$

pode-se isolar o Q_{SS} , substituir os termos $C_o e \Phi_{MS}$ por suas respectivas equações e dividir toda equação por "q" para se obter o número de cargas efetivas por carga elementar (Q_{ss}/q):

$$\frac{Q_{SS}}{q} = \frac{(-0.6 - \Phi_F - V_{FB})}{q} \cdot \frac{\varepsilon_{ox} \cdot \varepsilon_0}{x_{ox}} \cdot A_g$$
(2.37)

Obter a densidade de cargas efetivas é importante para entender como as cargas estão se comportando na região de interface óxido-silício, onde quanto maior for seu valor calculado maior será a quantidade de cargas presente nessa região e o sinal do valor indica o tipo de carga mais abundante (para capacitores MOS com substrato tipo P, cargas positivas costumam ser as mais abundantes).

2.5.2.2. Principais parâmetros e seus efeitos no perfil da curva C-V

Segundo a literatura (MARTINO, 2003), os principais parâmetros de um capacitor MOS acabam determinando o formato da curva C-V, podendo alterar consideravelmente o seu perfil. Esses parâmetros já mencionados são:

- a) A espessura do óxido de porta (x_{ox}) ;
- b) A concentração do substrato (NA);

- c) A densidade de carga efetiva (Q_{SS});
- d) E a densidade de armadilhas de interface (N_{it}).

Para o caso de a), ao diminuir o valor de x_{ox} tem-se o seguinte efeito mostrado na figura 2.10 a seguir:

Figura 2.10 - Efeitos da variação na espessura do óxido de porta xox na curva C-V



Fonte: (MARTINO, 2003).

Com a diminuição de x_{ox} , o valor da capacitância do óxido aumenta, sendo que este efeito afeta mais a capacitância máxima na região de acumulação (MARTINO, 2003). Isso também pode ser provado matematicamente na equação de C_o onde:

$$\uparrow C_{o} = \frac{\varepsilon_{0} \cdot \varepsilon_{Si}}{\downarrow x_{ox}} \cdot A_{g}$$
(2.38)

Sobre os efeitos de b), o aumento da concentração de dopantes no substrato N_A age na forma da curva como mostrado na figura 2.11:



Figura 2.11 – Efeitos da variação de dopagem do substrato de silício N_A na curva C-V

Fonte: (MARTINO, 2003).

O perfil da curva é afetado de tal forma que quanto maior for o valor de N_A maior será a capacitância mínima do dispositivo, deslocando a região de inversão para cima. Como podese observar no equacionamento de $d_{máx}$, o aumento do valor da concentração N_A causará uma diminuição da largura da região de depleção seguindo a demonstração:

$$\downarrow d_{máx} = \sqrt{\frac{2.\varepsilon_0.\varepsilon_{Si}.2.\Phi_F}{q.\uparrow N_A}}$$
(2.39)

e afetando assim também a capacitância do silício, aumentando-a:

$$\uparrow C_{\mathrm{Si}_{min}} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{\mathrm{Si}}}{\downarrow d_{max}} \cdot \mathrm{A_g}$$
(2.40)

Como ocorre uma associação em série da capacitância do silício com a capacitância do óxido que é representada como C_{min} , seu valor também sofrerá um aumento. A tensão de limiar também aumenta, o que altera o início da região de inversão em tensões de porta mais positivas (MARTINO, 2003).

Para situação encontrada em c), é representado na figura 2.12 os efeitos causados pelo aumento da densidade de cargas efetivas no óxido Qss:



Figura 2.12 - Efeitos da variação de densidade de cargas efetivas Qss no óxido de porta na curva C-V

Fonte: (MARTINO, 2003).

É possível notar que o aumento de Q_{ss} na região do óxido causa uma variação na tensão de faixa plana, V_{FB} , para valores negativos e, consequentemente, diminui também a tensão de limiar V_T . Em outras palavras, aumentar a densidade de cargas efetivas positivas pode deslocar a curva C-V para a esquerda ou valores negativos de V_G .

No caso de d), é mostrado o efeito da densidade de armadilhas de interface (N_{it}) agindo sobre a curva na figura 2.13. O termo N_{it} refere-se à densidade de armadilhas de interface, isto é, ligações incompletas na interface óxido-silício que podem aprisionar ou liberar elétrons, dependendo do potencial de superfície aplicado. Com o avanço da tecnologia, a qualidade das interfaces fabricadas tem se tornado cada vez melhor a ponto de ser considerado praticamente desprezível a ação do N_{it} para cálculos da tensão de faixa plana e de limiar. Entretanto, novas tecnologias desenvolvidas, equipamentos, utilização de novos materiais ou alguma diferenciação das etapas durante a fabricação do dispositivo podem tornar relevante a consideração dos efeitos do N_{it} (MARTINO, 2003).



Figura 2.13 – Efeitos da variação de densidade de armadilhas de interface N_{it} na curva C-V

Fonte: (MARTINO, 2003).

A figura acima representa que o aumento de N_{it} afeta o estiramento da curva C-V, ao mesmo tempo que há uma diminuição no valor de V_{FB} e aumento de V_T . O cálculo do Nit pode ser estimado através da equação:

$$N_{it} = \left[\frac{\frac{C_{min}}{C_{máx}}}{1 - \frac{C_{min}}{C_{máx}}} - \frac{C_{Si}}{C_o}\right] \cdot \frac{\varepsilon_o \cdot \varepsilon_{ox}}{q \cdot x_{ox}}$$
(2.41)

onde a expressão de C_{Si}/C_o é calculada por:

$$\frac{C_{Si}}{C_0} = \frac{\frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{OX}}{x_{OX}} \sqrt{\left(\frac{N_A}{n_i} + \frac{n_i}{N_A}\right) \cdot \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{Si} \cdot n_i \cdot q^2}{k \cdot T}}}{1 + 0.542 \cdot \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) - 0.0115 \cdot \left[\ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)\right]^2}$$
(2.42)

Existe também um outro efeito que merece ser destacado denominado efeito de injeção lateral. Em um capacitor MOS convencional existe uma capacitância indesejada que causa um efeito de capacitância parasitária lateral provocado pela injeção lateral de portadores que provém da região lateral ao lado do capacitor. Para se evitar esse efeito, normalmente utilizam-se capacitores quadrados de área maior ou pode-se criar um anel de guarda ao redor do capacitor durante sua fabricação com o intuito de, ao ser polarizado, provoque a acumulação da região

superficial do dispositivo evitando assim a injeção lateral. A injeção lateral provoca um aumento anormal da capacitância mínima para valores positivos de V_G devido à contribuição dos portadores minoritários, resultando no aumento no patamar de inversão do perfil da curva, que pode ser observado na figura 2.14:

Figura 2.14 – Efeitos da capacitância parasitária lateral provocada pelo efeito de injeção lateral no perfil da curva C-V



Fonte: (MARTINO, 2003).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta etapa do trabalho contém a descrição detalhada de como foram fabricadas as amostras, bem como os materiais utilizados, processos, experimentos iniciais e descrição de equipamentos utilizados. Também foram descritos os meios escolhidos para fabricar os dispositivos (capacitores MOS) e como foi efetuada a caracterização elétrica para obtenção dos dados necessários.

3.1. Processo adotado de evaporação térmica de SiO

Como o objetivo de estudar o filme fino de SiO como camada de passivação em células solares MOS, duas das características para garantir um bom funcionamento da célula são a qualidade do óxido, que deve ser uniforme e estável, e sua espessura, que precisa ser reprodutível como camada anti-refletora e ter uma densidade de cargas positivas bem determinada para induzir inversão na superfície das células solares MOS (WATANABE, 2020; CHRISTIANO, 2017). Portanto, o controle da produção desse filme é de suma importância para esse tipo de aplicação. Antes de tentar uma evaporação direta no dispositivo fotovoltaico, foi preciso desenvolver um método de controle sobre a deposição, primeiramente feita em pedaços substratos de Silício somente para observar o comportamento do método de PVD escolhido ao evaporar uma fonte um tanto quanto peculiar, o SiO em pó. Após o sucesso na estabilização do processo o método será reproduzido na fabricação de capacitores MOS para análise do comportamento do filme fino formado, para só assim ser testado em células solares MOS.

Os testes para o desenvolvimento desse método se iniciaram a partir do material fonte de evaporação de SiO em pó, que foi compactado em formato de "pastilha" com a intenção de facilitar sua manipulação e uso. Após a compactação, retirou-se cuidadosamente um aglomerado pequeno dessa "pastilha" de SiO com a massa necessária para a evaporação. Para ilustrar melhor essa sequência, a figura 3.1 mostra um diagrama simples de como foi processado o material compactado.



Figura 3.1 – Esquematização do formato do material fonte de SiO utilizado para evaporação

Monóxido de Silício em pó

Fonte: Autor.

O substrato utilizado em todas as amostras foram lâminas de Silício tipo P com orientação cristalográfica <100> e dopagem em torno de 1x10¹⁶ cm⁻³. Lâminas de vidro quadradas também foram utilizadas com o objetivo de observar como o filme de SiO se comporta sobre outros tipos de material, com relação a cor, aderência e transparência do filme.

O equipamento utilizado em todas as evaporações do SiO discutidos e relatados nesse trabalho foi a evaporadora térmica Edwards Vacuum Auto EL. Este equipamento é composto por um sistema de vácuo, um sistema de aquecimento do material fonte e um painel de controle.

Como abordado na parte 2.2.1, o substrato fica disposto em cima do suporte com a fonte de evaporação, sendo apoiado por um carregador de metal com a face onde o operador deseja que seja depositado o filme. A disposição dos substratos nesse carregador foi importante para entender o quão uniforme pode ser a deposição por esse equipamento através da variação de espessura do filme entre as amostras.

A figura 3.2 mostra a maneira com que os substratos foram organizados no carregador dentro da câmara de evaporação.



Figura 3.2 – Disposição dos substratos na evaporadora térmica

Fonte: Autor.

Foram efetuadas quatro deposições com o auxílio desse equipamento, sendo as duas primeiras utilizadas como parâmetros para ajustes do procedimento de evaporação e as duas últimas foram empregadas na fabricação das estruturas de capacitores MOS para caracterização. As amostras nas etapas de ajuste de processo foram dispostas seguindo a figura, onde esperase que a amostra central teria a espessura com menos variação, o papel alumínio serviu como uma barreira física para não se depositar o filme sobre grande parte do carregador e a lâmina de vidro logo embaixo do suporte tem o papel de análise da deposição nessa direção também além de ter uma noção visual se parte da massa caiu do suporte. Para as amostras com estruturas de capacitores MOS, somente a amostra central e a lâmina de vidros foram utilizadas e dispostas no carregador. Todos os detalhes dessas quatro deposições serão descritos a seguir.

3.1.1. Primeira deposição

Com o objetivo em mente de se obter uma espessura de SiO uniforme na faixa de centena de nanômetros e sabendo que pode-se estimar esse parâmetro através da fórmula da equação parabólica apresentada no capítulo 2.2.1, nessa primeira deposição foi desenvolvido um procedimento de evaporação que consistiu nos seguintes passos efetuados no painel de controle do equipamento:

a) Elevação da corrente aplicada de forma lenta;

- b) 30 segundos de exposição subindo lentamente a corrente através do controlador a cada 10% mostrados no potenciômetro;
- c) 30 segundos de exposição à corrente estável a cada 10% medidos no controlador sem elevação de corrente;
- d) Alternar entre os 30 segundos elevando lentamente a corrente e 30 segundos com a corrente estável até o valor no potenciômetro do controlador de corrente atingir 70%;
- e) Atingindo 70% no controlador, manter a corrente estável por 1 minuto;
- f) Desligar a passagem de corrente voltando o controlador para 0% de corrente aplicada.

A descrição da elevação da corrente através da porcentagem mostrada no potenciômetro do controlador de corrente se deve ao fato de que no painel de controle de equipamento utilizado o medidor de corrente é analógico e varia bastante onde nem sempre todas as correntes tiveram um valor absoluto quando o procedimento foi adotado.

A massa inicial para essa primeira deposição foi de aproximadamente 51 mg de SiO e o suporte utilizado foi a navícula de metal (tungstênio). O vácuo da câmara no ato da evaporação foi de aproximadamente 1×10^{-5} Torr.

A deposição foi efetuada, porém precisou de uma corrente muito alta (>190 A) devido ao suporte escolhido para a evaporação. Como a navícula aquece a fonte somente na parte de baixo que entra em contato com a mesma, a massa de SiO começou a mexer-se e saltar, não se estabilizando e dificultando seu aquecimento uniforme até o ponto de fusão. Boa parte da massa foi perdida devido a esse efeito, o que foi notado a partir da lâmina de vidro abaixo do suporte. Foi possível comprovar que a variação de espessura alta do filme depositado nas amostras laterais direta e esquerda em relação com a amostra central.

A figura 3.3 é uma foto dos substratos com o filme fino depositado nessa primeira evaporação.

Figura 3.3 - Substratos formados após a primeira deposição de SiO. a) Lâmina de SiO/Si-p que foi disposto a direita no carregador, b) Lâmina de SiO/Si-p que foi disposto a área central do carregador, c) Lâmina de vidro com SiO depositado que foi disposto a esquerda no carregador e d) Lâmina de vidro com SiO depositado deixada embaixo do suporte



Fonte: Autor.

É possível observar a variação da espessura da amostra a), onde a variação da cor do filme indica espessuras diferentes segundo a literatura (ECE ILLINOIS, 2017) e, após medidas físicas da espessura do filme depositado utilizando a perfilometria, chegam-se nos valores médios para cada lâmina descritos na tabela 1. Três medidas foram obtidas para cada amostra sendo elas duas dos cantos e uma do centro de uma das laterais de cada lâmina.

	Lâmina a) (nm)	Lâmina b) (nm)	Lâmina c) (nm)
	Direita	Meio	Esquerda
	246	383	236
	181	372	219
	148	369	216
Média (nm)	192 ± 41	375 ± 6	224 ± 9

Tabela 1 - Valores medidos pelo perfilômetro das espessuras da camada de SiO formado na primeira deposição.

Fonte: Autor

Nota-se que a variação da espessura é bem maior na amostra da direita e que a amostra do meio possui menos dispersão entre os três valores medidos e o filme fino de SiO teve uma média aproximada de 375 nm de espessura. A grande necessidade de uma alta corrente e o difícil controle para a estabilização e aquecimento uniforme da fonte de evaporação tornaram essa primeira deposição inviável na reprodução para a criação dos dispositivos.

3.1.2. Segunda Deposição

A partir dos dados coletados anteriormente, foi decidido efetuar a segunda deposição trocando o suporte que contém a fonte de evaporação. A instabilidade da navícula em aquecer o material fonte escolhido fez com que houvesse a pesquisa por outros tipos de suporte que pudessem aquece-lo de maneira mais uniforme e ao mesmo tempo segurá-lo para que este não possa saltar ou se mexer durante o processo de evaporação.

A solução encontrada foi a utilização de um suporte de filamento de tungstênio em espiral com formato cônico, o que é diferente dos filamentos comumente utilizados para metalização por exemplo.

A figura 3.4 mostra o como é o formato do suporte escolhido para a segunda deposição em (a) bem como a distribuição de calor mais uniforme quando é aquecido na evaporadora térmica em (b).



Figura 3.4 – (a) Formato do filamento em espiral cônico e (b) o suporte em funcionamento na evaporadora

Fonte: Autor.

Com a utilização desse suporte, o processo foi bem mais fácil de ser controlado. A corrente utilizada foi de aproximadamente 140 A, bem mais baixa comparada à primeira

deposição. O aquecimento foi uniforme, onde o material ficou cercado pelas espiras do filamento aquecendo-o de maneira mais igual em todas as direções facilitando sua fusão e evaporação em seguida. Como a espira de baixo é menor e cresce para a formação desse formato de cone, o material ficou impedido de se mexer e possivelmente cair do suporte o que resolveu esse problema também.

A massa da fonte de SiO utilizada foi de aproximadamente 57,6 mg e o procedimento de evaporação foi mantido o mesmo da primeira evaporação. A figura 3.5 é uma foto dos resultados obtidos.

Figura 3.5 - Foto da segunda evaporação dos substratos com o SiO depositados. a) Lâmina de SiO/Si-p disposto no centro do carregador, b) Lâmina de SiO/Si-p disposto à direita do carregador, c) Lâmina de vidro com SiO depositado disposto embaixo do suporte e d) Lâmina de vidro com SiO depositado disposto à esquerda do carregador



Fonte: Autor.

Ainda foi possível observar a mudança de coloração na amostra b) da direita, relacionada a variação de espessura, e boa uniformidade da amostra a) localizada no centro do carregador. A perfilometria também foi utilizada como método de obtenção de espessura e os dados estão descritos na tabela 2.

	Lâmina a) (nm) Direita	Lâmina b) (nm) Meio	Lâmina c) (nm) Esquerda
	312	344	301
	248	322	289
	196	319	270
Média (nm)	252 ± 47	328 ± 11	287 ± 13

Tabela 2 - Valores medidos pelo perfilômetro das espessuras da camada de SiO formado na segunda deposição

Fonte: Autor.

A espessura média obtida na amostra central foi bem semelhante à da primeira deposição (com menos dispersão nos três valores medidos) o que indica que para sua diminuição será preciso reduzir a massa da fonte. O procedimento se mostrou eficaz no controle da deposição. A variação continuou maior na lâmina da direita. O suporte com formato espiralado em cone corrigiu vários problemas da primeira deposição e foi adotado como componente fixo para as próximas deposições.

3.1.3. Terceira Deposição e Construção dos Capacitores MOS

A alteração da navícula para o filamento em espiral cônico como suporte trouxe várias vantagens para o processo de evaporação do SiO, portanto resolveu-se criar os primeiros dispositivos com esse filme fino depositado. A partir do mesmo substrato de Si-p, uma massa aproximada de SiO de 52 mg, o suporte de filamento utilizado no processo anterior e mantendo o procedimento adotado em 3.1.1, os primeiros capacitores com estrutura MOS foram fabricados.

Primeiramente, precisou-se adotar uma maneira de se medir a espessura do filme depositado em uma área aproximada dos capacitores e para tal medida, como nas etapas anteriores, utilizou-se da técnica de perfilometria. A criação de um degrau para a utilização dessa técnica foi importante, então adotou-se a solução de se sobrepor o substrato onde seriam fabricados os capacitores MOS com uma máscara mecânica menor que a lâmina para que a parte exposta pudesse ser depositada o filme fino, sendo que a parte coberta se manteria apenas com o substrato de Silício. A figura 3.6 é um desenho de como se estabeleceu essa disposição da máscara (que era um pedaço de lâmina de Si-p) sobre a lâmina de Silício.



Figura 3.6 – Máscara mecânica sobre a lâmina de Silício para a formação do degrau de medição de espessura

Fonte: Autor.

O SiO foi depositado também por evaporação térmica e como visto anteriormente, a disposição das amostras na região central do carregador de substrato foi mais uniforme. Portanto, na fabricação dos dispositivos, somente a lâmina de Si-p como amostra central e a lâmina de vidro embaixo do suporte foram utilizados. A evaporação do filme novamente conseguiu ser completada com sucesso.

Após a formação da camada sobre o substrato, a litografia foi utilizada para formar os padrões geométricos dos capacitores. A máscara utilizada possuía diversas geometrias devido a ser uma máscara com objetivo de experiência em laboratório com fins educativos, porém só os capacitores foram importantes para estudo e análise. A figura 3.7 representa como foi o padrão geométrico da máscara utilizada bem como contém as geometrias dos capacitores.

Geometria da Máscara dos Capacitores Área = 9,4x10⁻³ cm²

Figura 3.7 – Máscara utilizada para criação do padrão geométrico dos capacitores

Fonte: Autor.

Em seguida, a evaporadora térmica foi novamente usada para metalização das portas de contato do dispositivo. Utilizando-se um filamento de tungstênio mais comum como suporte para esse tipo de finalidade, uma massa de alumínio de 203 mg como fonte de evaporação, com pressão de $3x10^{-5}$ Torr e corrente de 140 A, a espessura dos contatos nessas condições foi de 752,6 nm.

Com o alumínio depositado, ocorreu a corrosão do material para a exposição dos padrões geométricos obtidos pelo processo litográfico, onde a sequência utilizada foi:

- a) Imersão na solução de 175H₃PO₄ + 70H₂O + 15HNO₃ na temperatura de 40° C por 3 minutos, agitando até ver visualmente o padrão dos dispositivos;
- b) Imersão em água deionizada (DI) para parar o processo de corrosão.

A partir da formação dos contatos de alumínio na superfície da amostra, foi evaporado os contatos atrás com aproximadamente as mesmas condições de evaporação da parte superior. Com a metalização das costas da lâmina concluída, os primeiros capacitores com o filme de SiO depositado foram concluídos e sua estrutura está representada na figura 3.8.





Fonte: Autor.

As figuras 3.9 e 3.10 mostram, respectivamente, as lâminas de vidro juntamente com a máscara mecânica utilizada para a obtenção do degrau de medição do perfilômetro e a lâmina de Si-p com os capacitores formados.



Figura 3.9 - Lâmina de vidro disposta embaixo do suporte e máscara utilizada na terceira deposição

Fonte: Autor.



Figura 3.10 - Primeiros capacitores com estrutura Al/SiO/Si-p formados na terceira deposição

Fonte: Autor.

A obtenção das espessuras foi pensada para ser através da perfilometria como descrito anteriormente e foram escolhidos os capacitores para caracterização elétrica que estão próximos a esse degrau com o objetivo de aproximar os valores de espessura para facilitar no processo de caracterização. A figura 3.11 mostra quais capacitores foram escolhidos e onde estão localizados na amostra.



Figura 3.11 – Escolha dos capacitores para caracterização

Fonte: Autor.

Para os valores da espessura do filme depositado, no caso dos capacitores foram obtidos cinco valores para cada um dos três capacitores escolhidos para medição. A tabela 3 contém os dados obtidos e valores de média com seus respectivos desvios padrões.

	Capacitor 1 (nm)	Capacitor 2 (nm)	Capacitor 3 (nm)
	381	346	354
	346	340	338
	379	346	360
	349	335	333
	337	355	351
Média (nm)	358 ± 18	344 ± 7	347 ± 10

Tabela 3 - Valores medidos pelo perfilômetro das espessuras da camada de SiO formado na terceira deposição.

Fonte: Autor.

3.1.3.1. Caracterização Elétrica dos Capacitores MOS com Estrutura Al/SiO/Si-p

A extração dos parâmetros necessários para o estudo do comportamento do filme fino de SiO se deu através da caracterização elétrica dos capacitores MOS com o auxílio do equipamento HP4280, onde foram extraídas as curvas de capacitância x tensão (C-V). As medições foram realizadas com alta frequência (em torno de 1 MHz) partindo inicialmente da

acumulação para a inversão. O equipamento é composto por uma caixa preta aterrada com um sistema de iluminação, porém as medidas foram efetuadas sem a presença de luz. A figura 3.12 é uma foto da câmara do equipamento utilizado com indicações de seus componentes.



Figura 3.12 - Imagem dos componentes da câmara do equipamento de caracterização elétrica HP4280

Fonte: Autor.

Para a caracterização, a amostra é posicionada sobre o *chuck* aterrado e estabilizada por um sistema de vácuo para que não saia do lugar durante a medição. A seguir, a ponta de prova de alta frequência é posicionada em contato com a porta do dispositivo com a assistência do microscópio posicionado acima da lâmina. Estipula-se um intervalo de aplicação de tensão no computador e fecha-se a câmara para que não haja interferência da luz externa no decorrer do processo. A tensão é aplicada à porta em um determinado intervalo estipulado pelo operador de forma alternada (entre 5 mV e 15 mV de amplitude). Extrai-se então a curva C-V juntamente com os dados de medição de tensão (V_G) em Volts, capacitância (C) em Farads e condutância (G) em Siemens. Apesar dos valores de interesse de estudo serem a variação da tensão aplicada gerando valores de capacitância no dispositivo, a condutância é um parâmetro importante que será explicado de forma detalhada no capítulo sobre a modelagem das curvas e resultados.

Para plotar as curvas C-V e G-V, foi utilizado o *software* OriginPro, que é um programa próprio para gerar e configurar gráficos a partir de pontos de X, Y e Z determinados pelo usuário.

Após alguns testes de ajustes de tensão na porta V_G, foi escolhido o intervalo de 30 V até -5 V, ou medindo da região de inversão para a região de acumulação da curva.

3.1.4. Quarta Deposição e criação de novos dispositivos de capacitores MOS

Para solucionar os problemas encontrados nos primeiros capacitores com estrutura Al/SiO/Si-p (descritos de forma mais detalhada no capítulo de resultados), foi determinado através de estudos da literatura que, para a correção dos erros de interface entre as camadas de SiO e substrato, seria necessário um crescimento de um óxido fino de SiO₂ antes de evaporar o monóxido de Silício. O erro de interface acontece devido a menor qualidade do óxido, onde a alta porosidade dessa camada gera uma maior densidade de armadilhas de interface (N_{it}) ocasionando o estiramento longo observado no perfil da curva C-V e descrito bibliograficamente no capítulo 2.5.2.2.

Portanto para a criação dos novos capacitores, foi realizado o crescimento da camada de SiO₂ termicamente a partir do substrato através do processo de oxidação térmica seca com o intuito de melhorar a densidade de estados de interface com o substrato.

3.1.4.1. Limpeza da Lâmina

O procedimento para crescer o filme fino primeiramente se iniciou com uma limpeza química na lâmina através do processo de RCA (*Radio Corporation of America*) modificado (REINHARDT, 2008; SANTOS, 1995; TOQUETI 2005; WATANABE, 2020), onde foram realizados os seguintes passos:

- a) Enxágue da lâmina em água DI corrente por 5 minutos;
- b) Imersão na solução química de hidróxido de amônia composto por 16H₂O + 7H₂O₂ + 1NH₄OH por aproximadamente 15 minutos na temperatura de 90°C (SC1);
- c) Enxágue em água DI corrente por 5 minutos;
- d) Imersão na solução química de ácido clorídrico com composição de 4H₂O + 1HCl por 15 minutos com temperatura de 90°C (SC2);
- e) Enxágue em água DI corrente por 5 minutos;

- f) Imersão em solução química de ácido fluorídrico de composição 80H₂O + 1HF em temperatura ambiente por 100 segundos;
- g) Enxágue final em água DI corrente por 3 min.

O processo de limpeza SC1 (*Standard Cleaning* 1) inicia-se com imersão do substrato dentro de uma solução alcalina de hidróxido de amônia para eliminar contaminantes superficiais como particulados orgânicos. Passa-se para o banho SC2 (*Standard Cleaning* 2) que consiste na imersão em uma solução de ácido clorídrico e permite remover os possíveis contaminantes metálicos na superfície da lâmina. Por fim temos a imersão na solução de ácido fluorídrico diluído que remove o óxido nativo na superfície do substrato proveniente das etapas de SC1 e SC2.

3.1.4.2. Crescimento do Óxido de SiO₂

Imediatamente após a limpeza química do substrato, foi efetuado o crescimento do SiO₂ pelo processo de oxidação térmica seca através do forno convencional de oxidação térmica e difusão de modelo *Minibrute* 80 fabricado pela *Thermco*. A oxidação térmica seca foi escolhida devido o óxido resultante possuir melhores propriedades e qualidade como dielétrico e óxido de porta. Foi utilizado um fluxo de oxigênio ultrapuro no processo, com temperatura de aproximadamente 850° C por 10 minutos. Com esses parâmetros, a espessura do óxido crescido foi de aproximadamente 4nm.

3.1.4.3. Evaporação do SiO sobre as Lâminas com SiO₂ Crescido Termicamente e Fabricação dos capacitores MOS

A evaporação do SiO ocorreu da mesma maneira apresentada no item 3.1.1, somente com a variação da massa da fonte de evaporação utilizada que foi reduzida para 19 mg para tentar formar um filme com espessura mais fina perto de 200 nm. A fabricação dos capacitores também se manteve segundo os assuntos abordados de máscara mecânica sobre a lâmina, litografia e geometria dos capacitores e metalização das portas vistos em 3.1.3.

Quanto a estrutura dos capacitores, agora foram fabricados dois tipos de estruturas. A estrutura Al/SiO/SiO₂/Si-p se manteve na região com o óxido depositado que foi exposta pela

máscara mecânica e a estrutura Al/SiO₂/Si-p proveniente das regiões onde a máscara cobriu na lâmina, porém como foi crescido o óxido termicamente por toda a superfície antes da deposição, também foi uma estrutura utilizada mais como parâmetro de comparação. Pode-se observar melhor essas duas estruturas na figura 3.13 a seguir:

Figura 3.13 – Estruturas dos capacitores com filme fino de SiO depositado + SiO₂ crescido termicamente



Fonte: Autor.

As figuras 3.14 e 3.15 são imagens da máscara mecânica de silício e lâmina de vidro que ficaram na parte de baixo do suporte bem como o dispositivo final de capacitores MOS, respectivamente.

Figura 3.14 – Máscara física que sobrepôs a lâmina para a formação do degrau de medição do filme e lâmina de vidro abaixo do suporte



Fonte: Autor.



Figura 3.15 - Capacitores com estruturas Al/SiO/SiO2/Si-p e Al/SiO2/Si-p fabricados na quarta deposição

Fonte: Autor.

Para a medição das espessuras dos novos capacitores, a mesma lógica utilizada de medição do degrau visto em 3.1.3 foi utilizada, visto que os capacitores caracterizados foram deslocados em uma fileira para cima devido a máscara mecânica ser ligeiramente maior, cobrindo uma área maior. As espessuras medidas pelo perfilômetro estão com seus valores exibidos na tabela 4 a seguir.

	Capacitor 4 (nm)	Capacitor 5 (nm)	Capacitor 6 (nm)
	183	186	196
	182	184	196
	180	185	194
	181	190	196
	181	192	196
Média (nm)	181 ± 1	187 ± 3	196 ± 1

Tabela 4 - Valores medidos pelo perfilômetro das espessuras da camada de SiO formado na quarta deposição

Fonte: Autor.

Foi possível notar a redução da espessura do filme fino devido a diminuição da massa da fonte de evaporação, o que ajudou também no controle formando uma camada bem mais uniforme e sem grande variação entre as medidas. A utilização desse método de reduzir a massa juntamente com o processo que se mostrou estável e eficiente durante todas as deposições mostrando que esta é uma técnica promissora para se lidar com a evaporação desse tipo de material.

3.1.4.4. Caracterização Elétrica dos Capacitores MOS com Estruturas Al/SiO/SiO₂/Si-p e Al/SiO₂/Si-p

A extração das curvas C-V nessa nova amostra foi efetuada da mesma forma e no mesmo equipamento que os capacitores somente com estrutura Al/SiO/Si-p vistos no item 3.1.3.1, a única alteração que feita foi nos valores de V_G onde, após testes e ajustes, notou-se que para os capacitores com estrutura Al/SiO/SiO₂/Si-p, o intervalo de V_G passou a ser medido de 40 V a 0 V, ou seja, da região de inversão para a acumulação.

Os capacitores com estrutura Al/SiO₂/Si-p foram caracterizados da mesma forma, porém como o óxido dessa estrutura é mais fino que o outro tipo de capacitor, foi preciso ajustar a tensão aplicada a porta V_G para um intervalo menor entre 4 V e -4 V (inversão para acumulação) e efetuar a medição em um capacitor de área menor (em torno de 9,4x10⁻⁴ cm²) para acomodar aos fundos de escala do equipamento de medidas para a curva C-V com outras configurações de espessura. A escolha da caracterização dessa estrutura de dispositivo deve-se às suas características e efeitos já serem muito bem estudadas e conhecidas na literatura (MARTINO, 2003), assim pode-se haver a comparação entre as estruturas desenvolvidas.

3.1.4.5. Recozimento Térmico dos Capacitores de Estrutura Al/SiO/SiO₂/Si-p e Al/SiO₂/Si-p

Para tentar comprovar as hipóteses citadas no capítulo de resultados sobre as curvas C-V que possuem deslocamento para valores positivos nas estruturas Al/SiO/SiO₂/Si-p, foi feito um processo de recozimento térmico para reduzir a umidade presente no dispositivo. Teoricamente, há a presença de muitos poros na camada de SiO depositado, o que deu espaço para o acúmulo indesejado de umidade na amostra dificultando a condutividade elétrica do dispositivo ao criar ligações químicas incompletas e causando um deslocamento não previsto da curva C-V como foi apresentado no capítulo de resultados.

O processo foi efetuado com o auxílio do forno de recozimento térmico de ambiente controlado da marca Marconi, que é um equipamento de simples operação, contando com uma câmara onde são realizados os recozimentos das amostras, um painel de controle para a manutenção e estabilidade da temperatura ao longo do procedimento e um sistema de controle de fluxo e dos tipos de gases.

A amostra foi recozida então a uma temperatura de 300° C por 30 minutos inicialmente com um fluxo de gás argônio ultrapuro de 1 L/min aproximadamente. O gás Argônio foi utilizado devido a ser um gás inerte, não reagindo com a amostra. Após esse primeiro recozimento, a amostra foi clivada em duas partes, onde uma das partes foi analisada e caracterizada com somente esse primeiro recozimento em argônio e a outra parte da lâmina foi efetuada outro recozimento com os mesmos parâmetros de temperatura e tempo, porém com o fluxo de gás N₂+10%H₂ (também conhecido como gás verde) com a finalidade de estudar os efeitos na interface e na concentração de cargas positivas, já que na literatura (MAGALHÃES,2012; NICOLLIAN, 1982) pode-se observar que o resultado da utilização do gás verde causa o efeito desejado de remoção da umidade e de deslocamento de curva para capacitores MOS compatível com a concentração de cargas positivas prevista.

Houve a caracterização das duas partes da amostra pós recozimento térmico, da mesma forma vista anteriormente no item 3.1.3.1, através da extração da curva C-V. Com a finalidade de obter mais informações sobre os comportamentos do dispositivo, a medição foi realizada em ambos os sentidos de aplicação do V_G, ou seja, os intervalos de V_G utilizados foram tanto da acumulação para a inversão (de -30 V a 30 V), quanto da inversão para a acumulação (de 30 V a -30 V). Esses valores para V_G foram adotados após diversas tentativas de caracterização visto que antes do processo de recozimento ocorreu o deslocamento muito para o lado direito (positivo da curva). Os capacitores de estrutura Al/SiO₂/Si-p também foram medidos em ambos os sentidos para análise e comparação de seus perfis de curva C-V, sendo acumulação para inversão (-5 V a 5 V) e inversão para acumulação (5 V a -5 V).

3.2. Modelagem e correção da curva C-V

Após analisar as curvas obtidas experimentalmente (mostrado em detalhe no próximo capítulo 4), notou-se necessário a aplicação de modelos matemáticos para a correção da curva C-V em função dos vários efeitos que afetam o perfil da mesma. Neste item, será descrito todo o processo de modelagem feito para aproximar a curva experimental de uma curva simulada.

3.2.1. Modelagem da capacitância total em função do potencial de superfície

Como visto anteriormente no item 2.1.2, o potencial de superficie no silício (ψ_S) possui grande influência no comportamento do capacitor, principalmente nos regimes de depleção e inversão (que são os patamares que mais apresentam discordância dos dados estudados pela literatura). Segundo Nicollian e Brews (NICOLLIAN, 1982), a curva C-V pode ser modelada a partir da capacitância total em função da variação de ψ_S . A expressão que corresponde a esse modelo é:

$$C_{\text{tot}} = \frac{1}{\frac{1}{C_0} + \frac{1}{C_{\text{Si}}(\psi_{\text{S}})}}$$
(3.1)

onde para a capacitância do óxido Co em toda área do capacitor corresponde a:

$$C_{o} = \frac{\varepsilon_{0} \cdot \varepsilon_{ox}}{x_{ox}} \cdot A_{g}$$
(3.2)

e para a capacitância do silício em função do potencial de superfície $C_{Si}(\psi_S)$ a equação utilizada foi:

$$C_{\rm Si}(\psi_{\rm S}) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{\rm Si}}{\lambda_{\rm p}} \cdot A_{\rm g} \cdot \left[\frac{(1 - e^{-\beta \cdot \psi_{\rm S}})}{F(\psi_{\rm S})} \right]$$
(3.3)

em que λ_p é calculado como:

$$\lambda_{\rm p} = \left[\frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{\rm Si}}{q \cdot N_A} \cdot \left(\frac{1}{\beta}\right)\right]^{\frac{1}{2}} \tag{3.4}$$

e $F(\psi_S)$ é dado como "Função F", segundo a literatura (NICOLLIAN, 1982) para a dedução na carga do silício para os regimes de acumulação, depleção e inversão em função do potencial de superfície, e corresponde a equação:

$$F(\psi_{S}) = \left[(e^{-\beta \cdot \psi_{S}} + \beta \cdot \psi_{S} - 1) \right]^{\frac{1}{2}}$$
(3.5)

onde o termo β é dado por:

$$\beta = \frac{q}{k.T} \tag{3.6}$$

O processo de modelagem começa variando-se o potencial de superfície do silício ψ_S com passo 0,01 V no intervalo entre 1 V e -1 V e na substituição de cada valor nas equações acima da capacitância do silício para obter a capacitância total em função de cada variação para ψ_S ($C_{tot}(\psi_S)$). Diversos pontos de $C_{tot}(\psi_S)$ foram gerados, que são a base para a plotagem da curva C-V modelada.

Este modelo de cálculo para $C_{tot}(\psi_S)$ é válido nas regiões de acumulação, depleção e inversão fraca, porém para o regime de inversão forte do capacitor quando o mesmo atinge a máxima largura de depleção ($d_{máx}$) e o potencial de superfície do silício torna-se constante como explicado no capítulo 2.1.2, é preciso então considerar a ação do potencial de superfície na inversão ($\psi_{S(inv)}$). Nicollian e Brews citam uma forma de maior precisão para se obter $\psi_{S(inv)}$ do que a apresentada anteriormente, que foi adotada na modelagem a partir da equação (NICOLLIAN, 1982):

$$\psi_{\rm SL} = \psi_{\rm S_{(inv)}} = \frac{k.T}{q} \cdot \left[1,33 + 2,1 \cdot \ln\left(\frac{N_{\rm A}}{ni}\right) \right]$$
(3.7)

em que ψ_{SL} representa o valor do potencial de superfície a partir do qual começa a inversão, onde no modelo considera-se seu valor equivalente a $\psi_{S(inv)}$, que é o ponto onde o potencial de superfície atinge seu valor máximo e permanece constante na região de inversão.

A depleção máxima é calculada também em função do potencial do silício na inversão:

$$d_{máx} = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{Si}}{q \cdot N_A}} \cdot \psi_{S_{(inv)}}$$
(3.8)

Adota-se então a o cálculo da capacitância mínima do silício na inversão (C_{Si mín}) como:

$$C_{Si_{min}} = C_{Si} \left(\psi_{S_{(inv)}} \right)$$
(3.9)

Portanto, a capacitância mínima do silício em função do potencial de superfície do silício na inversão é dada por:
$$C_{Si_{min}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{Si}}{\lambda_p} \cdot A_g \cdot \left\{ \frac{(1 - e^{-\beta \cdot \Psi_{S(inv)}})}{\left[\left(e^{-\beta \cdot \Psi_{S(inv)}} \right) + \left(\beta \cdot \Psi_{S(inv)} \right) - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$$
(3.10)

e efetuando a associação em série da capacitância do óxido com essa capacitância mínima do silício, como explicado no capítulo 2.5.2, tem-se a capacitância mínima modelada:

$$C_{\min M} = \frac{1}{\frac{1}{C_0} + \frac{1}{C_{Si_{\min}}}}$$
(3.11)

Para a estabilização do patamar de inversão, foi adotado que o ponto de cruzamento onde o valor de C_{min} ocorre na variação de $C_{Si}(\psi_S)$, os pontos de C_{tot} irão se manter constante $(C_{tot} = C_{min M})$ com descrito no livro do Nicollian&Brews.

A capacitância de faixa plana (C_{FB}) é equacionada a partir de uma associação em série da capacitância do óxido (C_{ox}) com a capacitância de faixa plana do silício (C_{FBSi}) e é possível efetuar os devidos cálculos em função do potencial de superfície também a relacionando com a capacitância do silício no ponto em que $\psi_S = 0$, como mostra a equação:

$$C_{FB} = \frac{1}{\frac{1}{c_0} + \frac{1}{c_{FB_{Si}}}}$$
(3.12)

onde CFBSi é calculado a partir de:

$$C_{FB_{Si}} = C_{Si}(\psi_S = 0) = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{Si} \cdot \sqrt{e^{\beta \cdot \Phi_F}}}{L_{Di}} \cdot A_g$$
(3.13)

e L_{Di} é calculado como:

$$L_{Di} = \left[\frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{Si} \cdot k.T}{q^2 \cdot n_i}\right]^{\frac{1}{2}}$$
(3.14)

3.2.2. Obtenção de V_G modelado em função do potencial de superfície do silício

Uma vez tendo calculado valores de C_{tot} para todos os intervalos de ψ_S , o próximo passo foi a obtenção de valores de tensão de porta V_G correspondentes para cada capacitância. Para isso, foi utilizado o mesmo intervalo de 0,01 V de potencial de superfície do silício. Sobre o modelo utilizado, tem-se o cálculo como:

$$V_{\rm G} = \psi_{\rm S} + \frac{Q_{\rm Si}(\psi_{\rm S})}{c_{\rm ox}} + V_{\rm FB}$$
 (3.15)

onde Cox é a capacitância do óxido por unidade de área dada por:

$$C_{ox} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{ox}}{x_{ox}} = \frac{C_{máx}}{A_g}$$
(3.16)

Com relação aos parâmetros da equação, a tensão de faixa plana V_{FB} é obtida através da comparação da curva C-V experimental com o valor de C_{FB}, podendo ser calculada pela equação (2.1.6). A carga no silício (Q_{Si}) é variada em função do potencial de superfície e, como as expressões de V_G, podem variar de acordo com a polarização de ψ_S . Suas expressões são:

$$Q_{Si}(\psi_S) = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{Si}}{\lambda_p} \cdot F(\psi_S) \quad \rightarrow \quad \text{para } \psi_S > 0 \tag{3.17}$$

$$Q_{Si}(\psi_S) = -\frac{1}{\beta} \cdot \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{Si}}{\lambda_p} \cdot F(\psi_S) \quad \rightarrow \quad \text{para} \, \psi_S < 0 \tag{3.18}$$

onde o termo $F(\psi_S)$ para a carga é obtido como:

$$F(\psi_{S}) = \sqrt{2} \cdot \left[e^{-\beta \cdot \psi_{S}} + \beta \cdot \psi_{S} - 1 + e^{-2 \cdot \beta \cdot \phi_{F}} (e^{\beta \cdot \psi_{S}} - 1) \right]^{\frac{1}{2}}$$
(3.19)

3.2.3. Influência da resistência série na correção da curva C-V

Normalmente os equipamentos responsáveis pela caracterização de capacitores MOS efetuam a medida extraindo-se valores de capacitância e condutância utilizando o modelo paralelo de um capacitor MOS. Devido a isto, se durante o processo existir uma resistência não desprezível associada em série com o dispositivo (conhecida como resistência série), pode-se gerar um erro significativo nos parâmetros extraídos da curva C-V medidos em alta frequência, principalmente na região de acumulação (MARTINO, 2003).

Essa resistência série pode ser agregada por diversos motivos, entre eles: contato entre a ponta de prova do equipamento e a porta do capacitor, presença de filme contaminante entre as costas do dispositivo com o suporte, resistência do substrato de silício, distribuição desuniforme de dopantes no silício sob a porta do capacitor ou até mesmo limitações do próprio equipamento (ALBERTIN, 2003; HORA, 2008).

Caso seu valor seja demasiado expressivo, causará uma medida não condizente com a realidade, sendo necessário a correção da curva levando em consideração seu valor. Pode-se considerar então o seguinte modelo de associação referente a figura 3.16 para considerar as ações da resistência série no dispositivo:

Figura 3.16 – Modelo de associação equivalente considerando a ação da resistência série



Fonte: Adaptado (NICOLLIAN, 1982).

Na figura 3.16, C_{ma} e G_{ma} representam respectivamente a capacitância e condutância medidas na acumulação durante a caracterização elétrica e que a associação entre elas em paralelo tem uma equivalência com a associação em série entre a capacitância do óxido C_o e a resistência série R_s . A obtenção do valor para R_s é dada pela expressão:

$$R_s = \frac{G_{ma}}{G_{ma}^2 + (\omega C_{ma})^2}$$
(3.20)

em que a frequência angular ω é dada por:

$$\omega = 2\pi f \tag{3.21}$$

e f é a frequência de medição do equipamento (para altas frequências f = 1 MHz).

A expressão de Co pode ser escrita em relação aos parâmetros Cma e Gma como:

$$C_{o} = C_{ma} \cdot \left[1 + \left(\frac{G_{ma}}{\omega C_{ma}} \right)^{2} \right]$$
(3.22)

Dessa maneira, a curva C-V então pode ser corrigida com relação a influência da resistência série através do modelo:

$$C(V_{\rm G}) = \frac{1 - \sqrt{1 - 4C_{\rm m}^2 R_{\rm S}^2 \omega^2}}{2R_{\rm S}^2 \omega^2 C_{\rm m}}$$
(3.23)

onde C_m é a capacitância medida para cada valor de V_G.

Outro parâmetro que pode estimado a partir da relação com a condutância máxima medida é a densidade de armadilhas de interface (N_{it}), segundo Hill e Coleman (HILL, 1980), dada pela expressão:

$$N_{it} = \frac{2}{q.A} \cdot \frac{\frac{G_{ma}}{\omega}}{\left(\frac{G_{ma}}{\omega C_0}\right)^2 + \left(1 - \frac{C_{ma}}{C_0}\right)^2}$$
(3.24)

Com os variados pontos de C(V_G) corrigidos pelo modelo, plota-se então a curva C-V modelada corrigida.

Entretanto, em um modelo real de capacitor MOS é preciso levar em consideração a ação de outro parâmetro associado paralelamente ao óxido denominado admitância (Y_c). A admitância representa a passagem de corrente de fuga e está associada ao óxido por não ser um isolante perfeito (HORA, 2008; CHIAPPIM, 2020; RAJAB, 2006). O modelo de Rajab exemplifica bem como ficaria o circuito elétrico equivalente com a adição do efeito de Y_c , representado na figura 3.17:

Figura 3.17 - Modelo representando a equivalência de associação com a adição do efeito de corrente de fuga Yc



Fonte: Adaptado (RAJAB, 2006).

Baseado na equivalência entre os circuitos, a admitância Y_c e a capacitância do óxido C_o são equacionados como:

$$Y_{\rm C} = \sqrt{\left\{\omega C_{\rm o} \left[-\omega C_{\rm o} + \omega C_{\rm ma} \left(1 + \frac{G_{\rm ma}^2}{(\omega C_{\rm ma})^2}\right)\right]\right\}}$$
(3.25)

e Co nesse caso é:

$$C_{o} = \frac{C_{ma}[(\omega C_{ma})^{2} + G_{ma}^{2}]}{(\omega C_{ma})^{2} + G_{ma} - R_{s}[(\omega C_{ma})^{2} + G_{ma}^{2}]}$$
(3.26)

3.2.4. Modelagem da curva C-V com base nos efeitos causados pela admitância Y_c

Com o intuito de estudar como a admitância age no capacitor MOS, foi criado um modelo que tem como base as expressões apresentadas em 3.3.4 para calcular novos valores de capacitância agora adicionados os efeitos de Y_c. Como os modelos de Rajab para admitir os efeitos de resistência série e da admitância consideram os valores da curva medidos para o regime de acumulação ($C_{ma} e G_{ma}$), foi preciso adotar nas expressões como sendo $C_{ma} = C_m e G_{ma} = G_m$, onde $C_m e G_m$ são valores de capacitância e condutância medidos para cada variação de V_G em um ponto específico que se deseja calcular para um determinado valor de Y_c. O mesmo se deu para a capacitância do óxido no modelo, como se desejar obter a capacitância em um ponto específico da curva C-V considerou-se que C_o = C(V_G), que pode ser calculado a partir da equação de correção (3.23).

O modelo se inicia com manipulações algébricas das expressões da admitância Y_c (3.25) e da capacitância em função da tensão aplicada C(V_G) (3.26) para isolar o termo de G_m.

Para a equação (3.25):

$$Y_{\rm C} = \sqrt{\left\{\omega C(V_{\rm G}) \left[-\omega C(V_{\rm G}) + \omega C_{\rm m} \left(1 + \frac{G_{\rm m}^2}{(\omega C_{\rm m})^2}\right)\right]\right\}}$$
(3.27)

onde isolando G_m tem-se:

$$G_{m}^{2} = \frac{Y_{C}^{2}C_{m} + \omega^{2}C_{m}C(V_{G})^{2} - \omega^{2}C_{m}^{2}C(V_{G})}{C(V_{G})}$$
(3.28)

Para a equação (3.26):

$$C(V_G) = \frac{C_m[(\omega C_m)^2 + G_m^2]}{(\omega C_m)^2 + G_m - R_s[(\omega C_m)^2 + G_m^2]}$$
(3.28)

que resulta em:

$$G_{m}^{2} = \frac{\left[\omega^{2}C_{m}^{3} + C_{m}G_{m}^{2} + R_{s}\omega^{2}C_{m}^{2}C(V_{G}) + R_{s}G_{m}^{2}C(V_{G}) - \omega^{2}C_{m}^{2}C(V_{G})\right]^{2}}{C(V_{G})^{2}}$$
(3.29)

Substituindo o termo isolado da equação (3.28) em (3.29), obtém-se:

$$\frac{Y_{C}^{2}C_{m} + \omega^{2}C_{m}C(V_{G})^{2} - \omega^{2}C_{m}^{2}C(V_{G})}{C(V_{G})} = \cdots$$

$$\frac{\left[\frac{\omega^{2}C_{m}^{3} + C_{m}\frac{Y_{C}^{2}C_{m} + \omega^{2}C_{m}C(V_{G})^{2} - \omega^{2}C_{m}^{2}C(V_{G})}{C(V_{G})} + R_{s}\omega^{2}C_{m}^{2}C(V_{G}) + \cdots \right]^{2}}{\cdots R_{s}\frac{Y_{C}^{2}C_{m} + \omega^{2}C_{m}C(V_{G})^{2} - \omega^{2}C_{m}^{2}C(V_{G})}{C(V_{G})} - \omega^{2}C_{m}^{2}C(V_{G})} \right]}{C(V_{G})^{2}}$$
(3.30)

efetuando algumas simplificações e distribuições, chega-se na expressão:

$$Y_{C}^{2}C_{m}C(V_{G})^{3} + \omega^{2}C_{m}^{3}C(V_{G})^{5} - \omega^{2}C_{m}^{3}C(V_{G})^{4} = \cdots$$

$$\cdots \left[\omega^{2}C_{m}^{3}C(V_{G}) + Y_{C}^{2}C_{m}^{2} + \omega^{2}C_{m}^{2}C(V_{G})^{2} - \omega^{2}C_{m}^{3}C(V_{G}) + R_{s}\omega^{2}C_{m}^{2}C(V_{G})^{2} + Y_{C}^{2}R_{s}C_{m}C(V_{G}) + \cdots \right]^{2} \cdots R_{s}\omega^{2}C_{m}C^{3} - R_{s}\omega^{2}C_{m}^{2}C(V_{G})^{2} - \omega^{2}C_{m}^{2}C(V_{G})^{2}$$
(3.31)

e eliminando termos que são iguais com sinais opostos na segunda parte da equação, tem-se:

$$Y_{C}^{2}C_{m}C(V_{G})^{3} + \omega^{2}C_{m}^{3}C(V_{G})^{5} - \omega^{2}C_{m}^{3}C(V_{G})^{4} = \left[Y_{C}^{2}C_{m}^{2} + Y_{C}^{2}R_{s}C_{m}C(V_{G}) + R_{s}\omega^{2}C_{m}C(V_{G})^{3}\right]^{2}$$
(3.32)

Percebe-se que a segunda parte da equação resultante pode ser resolvida através da fórmula para a situação $(a+b+c)^2$, onde:

$$a = Y_C^2 C_m^2 \quad \cdots \quad b = Y_C^2 R_s C_m C(V_G) \quad \cdots \quad c = R_s \omega^2 C_m C(V_G)^3$$

aplicando-se a fórmula para a resolução da equação:

$$(a + b + c)2 = a2 + 2ab + 2ac + b2 + 2bc + c2$$
(3.33)

tem-se então:

$$Y_{C}^{2}C_{m}C(V_{G})^{3} + \omega^{2}C_{m}^{3}C(V_{G})^{5} - \omega^{2}C_{m}^{3}C(V_{G})^{4} = Y_{C}^{4}C_{m}^{4} + 2Y_{C}^{4}R_{s}C_{m}^{3}C(V_{G}) + \cdots$$

$$\cdots 2Y_{C}^{2}R_{s}\omega^{2}C_{m}^{3}C(V_{G})^{3} + Y_{C}^{4}R_{s}^{2}C_{m}^{2}C(V_{G})^{2} + 2Y_{C}^{2}R_{s}^{2}\omega^{2}C_{m}^{2}C(V_{G})^{4} + R_{s}^{2}\omega^{4}C_{m}^{2}C(V_{G})^{6}$$

(3.34)

Organizando todos os termos para um lado da equação, igualando a zero e separando pelo grau do polinômio:

$$R_{s}^{2}\omega^{4}C_{m}^{2}C(V_{G})^{6} + -\omega^{2}C_{m}C(V_{G})^{5} + (\omega^{2}C_{m}^{2} + 2Y_{C}^{2}R_{s}^{2}\omega^{2}C_{m}^{2})C(V_{G})^{4} + \cdots$$

$$\cdots (2Y_{C}^{2}R_{s}\omega^{2}C_{m}^{3} - Y_{C}^{2}C_{m})C(V_{G})^{3} + Y_{C}^{4}R_{s}^{2}C_{m}^{2}C(V_{G})^{2} + 2Y_{C}^{4}R_{s}C_{m}^{3}C(V_{G}) + Y_{C}^{4}C_{m}^{4} = 0$$
(3.35)

Simplificando toda a equação por C_m, chega-se na função final:

$$R_{s}^{2}\omega^{4}C_{m}^{1}C(V_{G})^{6} + -\omega^{2}C(V_{G})^{5} + (\omega^{2}C_{m}^{1} + 2Y_{C}^{2}R_{s}^{2}\omega^{2}C_{m}^{1})C(V_{G})^{4} + \cdots$$

$$\cdots (2Y_{C}^{2}R_{s}\omega^{2}C_{m}^{2} - Y_{C}^{2})C(V_{G})^{3} + Y_{C}^{4}R_{s}^{2}C_{m}^{1}C(V_{G})^{2} + 2Y_{C}^{4}R_{s}C_{m}^{2}C(V_{G}) + Y_{C}^{4}C_{m}^{3} = 0$$
(3.36)

3.2.4.1. Encontrando o valor da capacitância através do método numérico de Newton-Raphson

Após todo o processo de manipulação das equações em função da admitância, para encontrar a nova capacitância gerada, utilizou-se o método de iterações numéricas de Newton-Raphson. Este método consiste em estimar inicialmente um valor de aproximação para uma determinada variável x_k e subtrair a divisão da função analisada ($f(x_k)$) com a sua primeira derivada ($f'(x_k)$) para encontrar um novo valor da raiz dessa função (x_{k+1}). Repete-se esse procedimento até que haja a convergência dos valores. A expressão para o método é dada por:

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)}$$
(3.37)

Aplicando a modelagem equacionada na estrutura do método de Newton-Raphson, é correspondido para a função $f(x_k)$:

$$f(x_{k}) = R_{s}^{2} \omega^{4} C_{m}^{1} C(V_{G})^{6} - (\omega^{2} C(V_{G})^{5}) + (\omega^{2} C_{m}^{1} + 2Y_{C}^{2} R_{s}^{2} \omega^{2} C_{m}^{1}) C(V_{G})^{4} + \cdots$$

$$\cdots (2Y_{C}^{2} R_{s} \omega^{2} C_{m}^{2} - Y_{C}^{2}) C(V_{G})^{3} + Y_{C}^{4} R_{s}^{2} C_{m}^{1} C(V_{G})^{2} + 2Y_{C}^{4} R_{s} C_{m}^{2} C(V_{G}) + Y_{C}^{4} C_{m}^{3} = 0$$
(3.38)

e então deriva-se essa função em relação a $C(V_G)$ para obter f'(x_k):

$$f'(x_k) = 6(R_s^2 \omega^4 C_m^{-1} C(V_G)^5) - 5(\omega^2 C(V_G)^4) + 4(\omega^2 C_m^{-1} + 2Y_C^2 R_s^2 \omega^2 C_m^{-1})C(V_G)^3 + \cdots$$

$$\cdots 3(2Y_C^2 R_s \omega^2 C_m^{-2} - Y_C^2)C(V_G)^2 + 2(Y_C^4 R_s^2 C_m^{-1} C(V_G)^1) + 2Y_C^4 R_s C_m^{-2} = 0$$
(3.39)

O processo para a utilização do modelo criado consistiu na extração da capacitância na curva C-V para um determinado valor de V_G sendo considerados como C_m das equações. Após isso, calculou-se o parâmetro C(V_G) a partir da equação de correção da curva (3.23) para o C_m em questão e fazendo uso dos resultados de R_s e ω obtidos pelo modelo do item 3.3.3. O valor calculado de C(V_G) será a capacitância inicial no processo de iteração de Newton-Raphson (C(V_G) = x_k). Começa-se considerando a situação Y_c=0 incialmente, que após aplicar no modelo é retornado um valor de x_{k=1}. Adota-se esse valor retornado no lugar de C(V_G) na equação novamente e efetua-se novamente o cálculo das equações para obter um novo valor de x_{k=1}. Esse processo é repetido então até o valor retornado como resultado seja igual ao valor utilizado para o equacionamento (x_{k+1} = x_k). O valor final é considerado a capacitância modelada a partir dos efeitos da admitância e resistência série no dispositivo para o determinado ponto de V_G.

Mede-se então outro valor de C_m referente a outro valor de V_G e repete-se o processo para determinar a capacitância em outro ponto do gráfico. É possível efetuar essa modelagem em todos os pontos de capacitância extraídos da curva C-V.

Eleva-se o valor de Y_c para então considerar a admitância nas equações e repete-se os cálculos. Esse processo é feito até que o valor de Y_c seja tão elevado a ponto de não convergir a capacitância em algum ponto da curva, sendo considerado a maior corrente de fuga que o sistema criado é capaz de modelar.

Como o valor de admitância inicial foi zero, não haverá alterações significativas entre os valores extraídos da curva com o resultado modelado nesta situação, somente a correção da capacitância levando em conta os efeitos da resistência série. A partir da elevação no valor de Y_c o resultado retornado pela iteração teoricamente será a capacitância simulada considerando

uma quantidade de passagem de corrente de fuga pelo dispositivo. O objetivo dessa modelagem é o estudo de como a influência da admitância age na capacitância medida das estruturas criadas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem como finalidade a apresentação de todos os resultados obtidos, sejam medidas elétricas, resultados de cálculos de parâmetros do capacitor MOS e a modelagem para a correção da curva C-V. É possível notar alguns efeitos nos perfis da curva C-V que foram descritos no decorrer do texto de forma experimental, além de explicar de forma mais detalhada o comportamento dos dispositivos fabricados.

De maneira resumida sobre a fabricação dos dispositivos como já mencionado em capítulo anterior, nesse trabalho fabricados criados 3 tipos de estruturas de capacitores: Al/SiO₂/Si-p [figura 4.1 – (a)] onde possui somente o óxido crescido termicamente com espessura aproximada de 4nm; Al/SiO/Si-p [figura 4.1 – (b)] que possui somente o óxido depositado por PVD e espessura aproximada de 344 nm; e Al/SiO/SiO₂/Si-p [figura 4.1 – (c)] onde foi crescido o óxido termicamente e depois depositado SiO por PVD com espessura do filme de 181 nm.

Figura 4.1 – Esquematização das estruturas dos capacitores MOS criados: (a) Al/SiO₂/Si-p, (b) Al/SiO/Si-p e (c) Al/SiO/SiO₂/Si-p



Fonte: Autor.

As estruturas (a) e (c) então foram recozidas e sinterizadas para melhoria da qualidade dos filmes depositados em ambientes com o gás de argônio ultra seco e depois com o gás $N_2+10\%H_2$, onde foram caracterizados antes e após esse processo. Para uma forma mais clara do entendimento dos resultados, as curvas experimentais dos capacitores serão organizadas conforme suas estruturas, como pode ser observado na figura 4.1, juntamente com os resultados dos parâmetros calculados a partir dos dados gerados dessas curvas. Sobre a modelagem e correção feitas, serão abordadas após essa apresentação inicial das curvas experimentais.

4.1. (a) - Curva experimental do capacitor de estrutura Al/SiO₂/Si-p

Após a caracterização elétrica dos capacitores MOS com estrutura convencional, ou seja, com o óxido de porta sendo somente o SiO₂ crescido termicamente, a curva C-V extraída pode ser observada na figura 4.2 a seguir:



Figura 4.2 - Curva C-V do capacitor com estrutura Al/SiO₂/Si-p medida da região de inversão para acumulação

Fonte: Autor.

O perfil da curva é consistente com os dados da literatura, porém nota-se que há um aumento da capacitância mínima na região de inversão devido ao efeito de injeção lateral, onde há uma contribuição dos portadores minoritários adicionais que provém da região lateral do dispositivo, causando um efeito de capacitância parasitária lateral (comentado previamente no capítulo 2.5.2.2). Com isso, parâmetros como a capacitância mínima não podem ser diretamente extraídos da curva, portanto foi necessário a análise da curva C-V após recozimento térmico para melhores resultados. Como mencionado no capítulo 3.1.4.5, foram geradas duas curvas em ambos os sentidos de aplicação de V_G que é representado na figura 4.3, tanto em (a) do regime de inversão para acumulação (4 V a -4 V) quanto em (b) da acumulação para a inversão (-4 V a 4 V).

Figura 4.3 – Curvas C-V do capacitor com estrutura Al/SiO₂/Si-p medidas: (a) da região de inversão para acumulação e (b) da região de acumulação para inversão, após o processo de recozimento térmico com Ar+ N_2 +10% H_2



Percebe-se neste caso que ambas as curvas C-V possuem perfis equivalentes, o que condiz com a literatura, tendo somente um leve aumento da capacitância máxima da curva da figura 4.3 - (a) ($C_{máx} = 712,2 \text{ pF}$) em relação à da figura 4.3 - (b) ($C_{máx} = 707,4 \text{ pF}$). Outro ponto a ressaltar é o deslocamento visível de V_{FB} para valores negativos, possivelmente devido a reação com os gases durante o recozimento, além da estabilização da capacitância mínima que, apesar de ainda sofrer uma pequena variação no ponto onde começa a inversão, pode ser considerada para o cálculo dos parâmetros.

Para uma análise de como o recozimento afetou no comportamento do dispositivo, podese comparar as duas curvas antes e após o recozimento, como é demonstrado na figura 4.4.

Como as curvas apresentam características de perfil semelhantes, os cálculos foram efetuados com base na curva da figura 4.3 (inversão para acumulação) e no processo de extração de parâmetros do capacitor MOS visto no capítulo 2.5.2.1.

Figura 4.4 – Comparação das curvas C-V da estrutura Al/SiO₂/Si-p antes e após o recozimento térmico com Ar+ N₂+10%H₂ medidas da região de inversão para acumulação



O processo de recozimento teve um efeito positivo no dispositivo, auxiliando na estabilização do patamar de inversão forte, corrigindo a injeção lateral, porém houve a diminuição de todos os parâmetros de medição como $C_{máx}$, C_{FB} , V_{FB} e $C_{mín}$. A partir dessa curva após o recozimento é possível extrair todos os parâmetros necessários para os cálculos e utilizando as equações e métodos apresentados, obtém-se os resultados dos parâmetros do capacitor MOS de estrutura Al/SiO₂/Si-p descritos na tabela 5. Quanto ao processo de iteração para o cálculo da dopagem do substrato (N_A), os dados podem ser observados no Apêndice A localizado no final deste trabalho.

Cons	tantes		Parâmeti	ros Calculados		
ε ₀ (F/cm)	8,85x10 ⁻¹⁴	C _{máx} (pF)	712,20	C _{FB} (pF)	73,63	
Esi	11,70	Cmín (pF)	12,00	Vfb (V)	-0,82	
Eox	3,90	A _g (cm ²)	9,40x10 ⁻⁴	Φ F (V)	0,29	
k (J/K)	1,38x10 ⁻²³	C _o (pF)	712,20	Ф _{МS} (V)	-0,89	
T (K)	300	x _{ox} (nm)	4,56	Qss/q (cargas/cm ²)	$-3,45 \times 10^{11}$	
q (C)	1,60x10 ⁻¹⁹	d _{máx} (nm)	797,74	N _{it} (cm ² .eV ⁻¹)	$8,42 \times 10^{10}$	
n _i (cm ⁻³)	$1,45 \times 10^{10}$	NA (cm ⁻³)	1,19x10 ¹⁵			

Tabela 5 – Parâmetros calculados para capacitor MOS de estrutura Al/SiO₂/Si-p pós recozimento térmico.

Fonte: Autor.

Os parâmetros calculados inicialmente mostram inconsistência nos valores da capacitância de faixa plana (C_{FB}), onde ao associar seu valor calculado com a curva C-V experimental para obter o valor da tensão de faixa plana pelo gráfico, gera um valor de V_{FB} muito pouco negativo para o esperado pela estrutura, o que leva ao resultado negativo de densidade de cargas efetivas (Qss/q = $-3,45x10^{11}$ cargas/cm²) ao efetuar os cálculos com a equação (2.37). Como trata-se de um capacitor MOS construído sobre substrato de silício tipo P, o esperado era um valor positivo devido aos portadores majoritários serem lacunas, porém é necessário efetuar futuramente processos de caracterizações física e química para entender melhor sobre o material e essa estrutura.

4.2. (b) Curva experimental do capacitor de estrutura Al/SiO/Si-p

Os capacitores MOS de estrutura Al/SiO/Si-p foram os primeiros dispositivos fabricados utilizando somente o SiO depositado como óxido de porta com espessura média aproximada de xox \approx 344 nm. A curva C-V gerada após a caracterização elétrica para esse tipo de estrutura é representada na figura 4.5 a seguir:





Fonte: Autor.

Ao relacionar a curva extraída com os efeitos do capítulo 2.5.2.2, pode-se notar um estiramento muito severo da curva, onde o capacitor não consegue atingir o patamar de inversão causando um erro de depleção profunda. Esse efeito pode estar relacionado com a densidade de

armadilhas de interface (N_{it}) dessa estrutura ser muito elevada, porém como a estrutura não gera um C_{min} definido, não é possível calcular o valor de N_{it} e outros parâmetros necessários para o estudo do comportamento do SiO nessa estrutura como por exemplo a densidade de cargas efetivas Q_{ss} . A maior espessura do óxido (aproximadamente 345 nm) também pode ter sido um fator considerável para com a geração desse erro. Uma outra provável causa para esses defeitos foi que como a camada de SiO foi obtida por evaporação térmica, a interface Si/SiO foi de baixa qualidade gerando também uma alta porosidade desse material o que pode ter contribuído para o grande estiramento da curva (MARTINO, 2003).

4.3. (c) Curva experimental do capacitor de estrutura Al/SiO/SiO2/Si-p

Como o dispositivo anterior com somente o SiO depositado apresentou problemas quanto ao seu funcionamento gerando uma curva C-V altamente estirada, foi necessário a criação da nova estrutura de capacitores de Al/SiO/SiO₂/Si-p com o dióxido de silício crescido termicamente para melhorar a região de interface entre óxido e substrato, aperfeiçoando e solucionando os defeitos dos primeiros dispositivos. Houve também a redução da massa utilizada de SiO para a evaporação, o que gerou um óxido depositado mais fino ($x_{ox} \approx 181$ nm).

O perfil da curva C-V para essa estrutura após a caracterização elétrica está representado na figura 4.6.





Fonte: Autor.

Foi possível notar através da curva que o defeito de estiramento severo foi corrigido e essa estrutura atinge o patamar de inversão, gerando um valor para C_{min} , porém houve um deslocamento da curva para valores positivos de V_G, alterando a tensão de faixa plana V_{FB} para valores positivos, o que não corresponde à distribuição de cargas positivas no dielétrico. Uma hipótese para a explicação desse efeito seria devido à presença de umidade na amostra, provavelmente como consequência do processo de PVD para a obtenção do SiO, que de alguma forma reage com a estrutura e faz com que o capacitor entre no regime em valores muito positivos de V_G. As moléculas de SiO depositadas sobre a superfície do SiO₂ pode ter deixado muitos poros preenchidos com a umidade do ambiente da câmara de evaporação durante o processo e criando esse efeito. Os valores dos parâmetros calculados através dessa curva C-V são encontrados na tabela 6 e podem demonstrar melhor o efeito observado. As iterações para o cálculo da dopagem dessa estrutura estão no Apêndice A.

Cons	tantes		Parâmet	tros Calculados			
ε ₀ (F/cm)	8,85x10 ⁻¹⁴	Cmáx (pF)	130,62	Сғв (рF)	123,88		
Esi	11,70	Cmín (pF)	93,37	Vfb (V)	10,83		
Eox	3,90	A _g (cm ²)	9,40x10 ⁻³	Φ F (V)	0,35		
k (J/K)	1,38x10 ⁻²³	C _o (pF)	130,62	Фмs (V)	-0,95		
T (K)	300	x _{ox} (nm)	248,38	Qss/q (cargas/cm ²)	$-1,02 \times 10^{12}$		
q (C)	1,60x10 ⁻¹⁹	d _{máx} (nm)	297,28	N _{it} (cm ² .eV ⁻¹)	$2,17x10^{11}$		
n i (cm ⁻³)	$1,45 \times 10^{10}$	NA (cm ⁻³)	$1,02 \times 10^{16}$				

Tabela 6 – Parâmetros calculados para capacitor MOS de estrutura Al/SiO/SiO₂/Si-p pós recozimento térmico

Fonte: Autor.

Houve uma variação dos valores de x_{ox} calculado (248,38 nm) com o valor da espessura média obtido através do perfilômetro (\approx 181 nm). Como x_{ox} calculado é dependente da capacitância máxima, há a possibilidade da ação de uma resistência série na estrutura, alterando significativamente os parâmetros medidos da curva C-V particularmente na região de acumulação, sendo necessário levar em consideração a resistência série para a correção da curva, como visto no item 3.3.4. Como o parâmetro V_{FB} resultou em um valor muito positivo (10,83 V), a densidade de cargas efetivas no óxido (Q_{ss}/q) resultou em um valor com sinal negativo (-1,07x10¹² cargas/cm²), incoerente com valores positivos esperados. Em comparação da densidade de armadilhas de interface (N_{it}) dessa estrutura com o capacitor Al/SiO₂/Si-p, o

valor maior de N_{it} indica que não houve estiramento da curva na região de depleção, mas ainda ocorre o aparecimento de armadilhas de interface em níveis não desprezíveis.

Com as prováveis causas do deslocamento da curva C-V para a direita devido à umidade, adotou-se como solução fazer uso do processo de sinterização do filme fino poroso através da técnica de recozimento térmico, inicialmente com argônio ultra seco, então uma divisão da lâmina em duas partes e por fim outro recozimento de uma das partes em N_2 +10%H₂ com a finalidade de observar seus efeitos e compará-las. Após o recozimento, os capacitores foram caracterizados em ambos os sentidos de aplicação de V_G, em que a curva C-V medida da inversão para acumulação corresponde a figura 4.7 (a) e a curva C-V da acumulação para inversão corresponde a figura 4.7 (b), ambas após o recozimento em argônio somente.





Fonte: Autor.

Os efeitos do processo de recozimento térmico em argônio mostraram-se bem eficazes na diminuição do V_{FB} , antes com valores muito positivos, o que ao ser aplicado o modelo matemático, gera um valor de Q_{ss} positivo e correspondente ao substrato. Em contrapartida, é possível notar o defeito de injeção lateral na região de inversão do capacitor para ambos os sentidos de aplicação de V_G após o recozimento, geralmente atribuído a uma alta quantidade de cargas no óxido, o que modifica a capacitância mínima não podendo ser considerada para o cálculo dos parâmetros. A diferença entre as medições das curvas obtidas da acumulação para inversão e inversão para acumulação indica que, segundo a literatura (MARTINO, 2003), existe uma quantidade muito elevada de cargas móveis o que inviabiliza a extração de V_{FB} e Q_{ss} nesse caso. O perfil da curva menos estirado na região de depleção para ambas as medições indica que houve redução na densidade de armadilhas de interface N_{it} , o que demonstra melhora na interface óxido-silício possivelmente devido a sinterização do SiO pós recozimento.

Sobre a caracterização após o segundo recozimento térmico em ambiente com o gás de $N_2+10\%H_2$, as curvas extraídas estão representadas na figura 4.8: (a) para a medição da inversão para acumulação e (b) para medidas da acumulação para a inversão.

Figura 4.8 – Curvas C-V do capacitor com estrutura Al/SiO/SiO₂/Si-p medidas: (a) da região de inversão para acumulação e (b) da região de acumulação para inversão, após recozimento térmico em argônio ultra seco e em $N_2 + 10\% H_2$



Fonte: Autor.

Analisando as medidas incialmente, pode-se notar que com o recozimento em $N_2+10\%H_2$, o efeito de injeção lateral nas duas curvas foi corrigido, porém para as medidas extraídas da acumulação para a inversão ocorreu novamente a depleção profunda com um estiramento longo da região de depleção. Com a estabilização da curva da "inversão para acumulação", é possível extrair o C_{min} , podendo ser determinados os cálculos dos parâmetros dessa estrutura. Há um pequeno efeito que acontece no ponto de passagem da região de depleção para a inversão fraca em que C_{min} se mantém constante de forma abrupta, sendo necessário o estudo das causas que levam a tal medição.

Comparando as duas curvas antes e depois do recozimento em N₂+10%H₂ para ambos os sentidos de medição, torna-se mais visível essas alterações onde pode ser encontrado na figura 4.9 para: (a) inversão-acumulação e (b) acumulação-inversão. Essas imagens de comparação entre as curvas são importantes para o estudo de como os processos de recozimento afetaram o comportamento do capacitor.

Figura 4.9 – Comparação entre as curvas C-V do capacitor com estrutura Al/SiO/SiO₂/Si-p medidas: (a) da região de inversão para acumulação e (b) da região de acumulação para inversão, após recozimento térmico em argônio ultra seco e em N₂+10%H₂



Fonte: Autor.

É possível notar que o segundo recozimento desloca ainda mais a curva C-V para valores mais negativos, alterando os parâmetros de V_{FB} e consequentemente aumentando Q_{ss}. Então, a partir da curva de inversão para acumulação após o recozimento em Ar+N₂+10%H₂, são extraídos os parâmetros para a estrutura Al/SiO/SiO₂/Si-p exibidos na tabela 7 a seguir. Os dados das iterações para a extração matemática de N_A podem ser encontrados no Apêndice A.

Cons	stantes	Parâmetros Calculados					
ε ₀ (F/cm)	8,85x10 ⁻¹⁴	C _{máx} (pF)	202,87	C _{FB} (pF)	187,64		
Esi	11,70	Cmín (pF)	127,03	Vfb (V)	-9,16		
Eox	3,90	A _g (cm ²)	9,40x10 ⁻³	Φ F (V)	0,35		
k (J/K)	1,38x10 ⁻²³	C _o (pF)	202,87	Ф _{МS} (V)	-0,95		
T (K)	300	x _{ox} (nm)	159,92	Qss/q (cargas/cm ²)	$+1,11x10^{12}$		
q (C)	1,60x10 ⁻¹⁹	d _{máx} (nm)	286,44	Nit (cm ² .eV ⁻¹)	2,26x10 ¹¹		
n _i (cm ⁻³)	$1,45 \times 10^{10}$	NA (cm ⁻³)	$1,10 \times 10^{16}$				

Tabela 7 – Parâmetros calculados para capacitor MOS de estrutura Al/SiO/SiO₂/Si-p pós recozimento térmico em Ar+N₂+10%H₂

Fonte: Autor.

Percebe-se que a espessura do óxido calculada nesse caso resultou em um valor menor $(x_{ox}=159,92 \text{ nm})$ em comparação com o valor da espessura obtida através da perfilometria $(x_{ox}\approx181,40 \text{ nm})$, porém não é uma diferença tão significante sendo de aproximadamente 21 nm. Como o valor de V_{FB} para essa estrutura foi bem negativo, o parâmetro Q_{ss}/q resultou em um valor positivo e agora o acúmulo de cargas no óxido está coerente com o tipo de substrato do dispositivo. O que ocorreu com o deslocamento da curva para valores negativos de V_G pode ser teorizado por meio da redução da umidade contida nos poros do filme fino pelo processo de recozimento térmico, alterando seus comportamentos elétricos e passando a gerar cargas positivas

Após uma semana se passado da caracterização elétrica dos capacitores depois do recozimento, resolveu-se efetuar novas medidas para confirmação dos dados extraídos. Foi quando se notou uma mudança na curva C-V ao comparar com os parâmetros medidos após o recozimento, onde houve um deslocamento do perfil para a esquerda, ou valores negativos de V_G em ambos os sentidos de medição. Decidiu-se então efetuar também novas medições para os dispositivos recozidos somente em argônio, que resultou no mesmo efeito, deslocando a curva para tensões negativas. Este comportamento peculiar do dispositivo foi estudado e novas medições foram realizadas após um determinado período de tempo (aproximadamente sete dias) até que houvesse um perfil de estabilização e as duas últimas curvas possuíssem um perfil aproximado. As comparações das curvas medidas após dias se passado entre elas pode ser observada de forma mais clara nas próximas figuras, tanto para somente o recozimento em argônio, quanto para a amostra com os dois recozimentos em argônio e $N_2+10\%H_2$.

Os resultados das medições com o passar do tempo do dispositivo recozido somente em ambiente de gás argônio ultra seco são encontrados na figura 4.10: (a) medidos da inversão para acumulação e (b) extraídos da acumulação para a inversão.

Figura 4.10 – Comparação entre as curvas C-V do capacitor com estrutura Al/SiO/SiO₂/Si-p, recozidas em argônio ultra seco, durante um determinado período de tempo onde o sentido de aplicação de V_G foi: (a) da região de inversão para acumulação e (b) da região de acumulação para inversão



Fonte: Autor.

Conforme o tempo foi avançando, os gráficos mostram que a curva C-V se desloca cada vez mais para valores negativos de V_G para ambos os sentidos de medição, juntamente com a diminuição de V_{FB}, que gera um aumento de Q_{ss}, até que a partir do 28° dia esse deslocamento torna-se menor e a curva se estabiliza conforme pode-se observar na curva de inversão para acumulação (a). O perfil da curva se mantém praticamente inalterado para as regiões de acumulação e depleção, porém na região de inversão ocorre algum efeito que prejudica na extração do C_{min} , possivelmente devido a ação de corrente de fuga no dispositivo precisando ser melhor estudado para confirmação da teoria.

Quanto aos capacitores recozidas em argônio e N₂+10%H₂, o tempo até que as curvas apresentassem uma estabilidade na variação do deslocamento foi maior, sendo necessário extrair mais medidas para análise. A figura 4.11 representa a comparação das curvas medidas para esses capacitores, em (a) extraídas da inversão para acumulação e (b) da acumulação para inversão.

Figura 4.11 - Comparação entre as curvas C-V do capacitor com estrutura Al/SiO/SiO₂/Si-p, recozidas em argônio ultra seco e depois em N_2 +10% H_2 , durante um determinado período de tempo onde o sentido de aplicação de V_G foi: (a) da região de inversão para acumulação e (b) da região de acumulação para inversão



Inversão - Acumulação



Analisando-se as novas medidas tem-se que o perfil na região de inversão passou a ficar estável, não apresentando mais uma grande divergência como no caso dos parâmetros do dispositivo com somente o recozimento de argônio. Como o deslocamento para valores negativos de V_G foi ainda maior, pode-se relacionar que as cargas acumuladas nesse capacitor tiveram um aumento ainda mais significativo com o tempo. Utilizando os dados obtidos das curvas de inversão para acumulação, é possível extrair os parâmetros C_{FB}, V_{FB} e Q_{ss}/q para cada curva com o avanço do tempo e os valores obtidos são apresentados na tabela 8.

Tempo de medição	CEP (nF)	Ved (V)	Oss/a (cargas/cm ²)
Após o recozimento	187.64	-9.16	$+1.11 \times 10^{12}$
7 dias	188,26	-9,47	$+1,15 \times 10^{12}$
15 dias	188,25	-10,11	$+1,24x10^{12}$
21 dias	188,18	-10,56	$+1,30 \times 10^{12}$
33 dias	187,94	-11,10	$+1,36x10^{12}$
40 dias	188,81	-11,98	$+1,49 \times 10^{12}$

Continua

47 dias	190,10	-13,03	$+1,65 \times 10^{12}$
54 dias	188,06	-12,27	$+1,53 \times 10^{12}$

Os cálculos demonstram matematicamente a variação para valores negativos de V_{FB} e o aumento da densidade de cargas efetivas no óxido (Q_{ss}/q) à medida que dias se passam entre uma caracterização e outra. Para a medição do 47° dia, houve um leve aumento de C_{FB} comparado às outras medições, que gera uma variação maior de V_{FB} e Q_{ss}/q. No 54° dia medido, a curva volta ao padrão de aproximadamente C_{FB} \approx 188pF, reduzindo os outros parâmetros em relação à medida anterior. Pode-se interpretar esse efeito como sendo que para o 47° dia possa ter atingido um limite para esse efeito de deslocamento, que se estabiliza na medida do 54° dia provocando essa leve diminuição de Q_{ss}/q.

Uma explicação para esse efeito de aumento no acúmulo de cargas no capacitor com o decorrer do tempo pode estar associada com a absorção de umidade presente no ambiente onde foi armazenada a amostra, uma vez que, teoricamente, o recozimento térmico retirou boa parte da umidade que estava presente no SiO. Ainda assim, esse comportamento de aumento de cargas geradas do SiO depositado e recozido com ambos os gases pode ser aproveitado na construção de células solares MOS em trabalhos futuros, já que a quantidade de cargas efetivas positivas é significativamente alta.

4.4. Resultados da modelagem e correção da curva C-V em função do potencial de superfície e resistência em série

A abordagem de se modelar uma curva C-V a partir do cálculo de novas capacitâncias utilizando como base nos parâmetros extraídos ocorreu para entender a influência de parâmetros como potencial de superfície, resistência em série e admitância agem sobre o dispositivo. Os modelos matemáticos explicados anteriormente foram aplicados neste trabalho inicialmente somente sobre o dispositivo de estrutura Al/SiO₂/Si-p após recozimento em Ar+N₂+10%H₂ devido a seu comportamento já ser bem estabelecido pela literatura, tornando o processo de comparação dos dados obtidos com os dados da literatura de mais fácil compreensão, sendo que esse mesmo estudo poderá ser aplicado na estrutura Al/SiO/SiO₂/Si-p em trabalhos futuros.

Partindo dos dados obtidos na extração da curva C-V, vistos na tabela 5 do item 4.1, e fazendo os cálculos com os modelos apresentados no capítulo 3.3, tem-se como calcular novos parâmetros agora com a influência dos efeitos em função do potencial de superfície ψ_S . Os dados calculados são apresentados na tabela 9 a seguir:

Tabela 9 – Parâmetros calculados a partir dos modelos em função de ψ_S para capacitor MOS de estrutura Al/SiO₂/Si-p pós recozimento térmico em Ar+ N₂+10%H₂

Parâmetros calculados – Modelagem da curva C-V							
NA (cm ⁻³)	1,19x10 ¹⁵	C _o (pF)	712,20	Cfbs (pF)	82,12		
Cmáx (pF)	712,20	Cox (µF)	0,76	Cfb (pF)	73,63		
C _{mín} (pF)	12,00	L _{Di}	$3,40 \times 10^{-3}$	VFB (V)	-0,82		
A_{g} (cm ²)	9,40x10 ⁻⁴	λ_p	1,18x10 ⁻⁵	Φ F (V)	0,29		
x _{ox} (nm)	4,56	Ψsl (V)	0,65	Фмs (V)	-0,89		
d _{máx} (nm)	839,68	Csi mín (pF)	11,83	Q _{ss} /q (cargas/cm ²)	$-3,45 \times 10^{11}$		
β	38,65	Сmín м (pF)	11,64				

Fonte: Autor.

Mesmo utilizando outro modelo (MARTINO, 2003) para calcular a capacitância de faixa plana (C_{FB}) com base no equacionamento de $C_{Si}(\psi_S)$, os resultados foram equivalentes, o que gerou nos mesmos valores para V_{FB} e Q_{ss}/q, não condizentes com a literatura.

Para a obtenção de $C_{Si}(\psi_S)$ adotou-se o passo de variação de ψ_S em 0,01 V no intervalo entre 1 V e -1 V, gerando uma coluna de dados com os valores de $C_{Si}(\psi_S)$ para o cálculo dos pontos de C_{tot} correspondente. Outro termo dependente da variação de ψ_S é o cálculo dos termos $F(\psi_S)$ e $Q_{Si}(\psi_S)$ para a obtenção através do modelo de cada ponto da tensão (V_G) associada a cada valor de C_{tot} para a obtenção de uma curva modelada de C_{tot} x V_G. Para uma melhor organização dos resultados, a tabela com os parâmetros calculados em função do potencial de superfície pode ser encontrada no Apêndice B deste trabalho com melhor detalhamento. Já o gráfico representando a curva modelada calculada se encontra na figura 4.12 a seguir:

 $\label{eq:Figura 4.12-Curva} Figura \ 4.12-Curva \ modelada \ C_{tot} \ x \ V_G \ do \ capacitor \ com \ estrutura \ Al/SiO_2/Si-p, \ recozidas \ em \ argônio \ ultra \ seco \ e \ depois \ em \ N_2 + 10\%H_2$



A curva utilizando os valores calculados de C_{tot} em função do potencial de superfície mostra um perfil mais parecido com o ideal para uma curva C-V de um capacitor MOS, com uma melhor definição no patamar de inversão. A plotagem da curva e a consistência com os padrões da literatura permitem a conclusão de que a utilização e implementação do modelo foi bem-sucedida.

Pode-se comparar as curvas experimentais e modelada para melhor visualização das diferenças entre o modelo e a real amostra, representada na figura 4.13.

Figura 4.13 – Comparação entre as curvas modelada de $C_{tot} \times V_G$ e a curva experimental medida do capacitor com estrutura Al/SiO₂/Si-p, recozidas em argônio ultra seco e depois em N₂+10%H₂



O perfil da curva obtida através do modelo está bem similar à da curva experimental que fica perceptível um leve descasamento na região de inversão já antes identificada. A capacitância máxima levemente elevada se explica devido os pontos calculados da curva modelada para esse intervalo de 4 V a -4 V não atingirem o real patamar máximo dos cálculos, mas os valores de C_{máx} para ambas as curvas são os mesmos como pode ser visto no Apêndice B.

Com a modelagem da curva efetuada, houve então a correção da curva experimental dessa estrutura levando em conta os efeitos da resistência série no capacitor.

Para calcular o valor da resistência série associada ao dispositivo, foi necessário a extração da curva de condutância por tensão (G-V) do capacitor, que normalmente é obtida juntamente com os dados da curva de capacitância tensão (C-V) durante a caracterização elétrica. O perfil da curva G-V obtida da inversão para acumulação é observado na figura 4.14.

Figura 4.14 – Curva G-V (condutância-tensão) medida da inversão para acumulação para o capacitor com estrutura $Al/SiO_2/Si-p$, recozidas em argônio ultra seco e depois em $N_2+10\%H_2$



Fonte: Autor.

A curva de condutância na região de acumulação mostra-se inconsistente, uma vez que a extração de um valor para condutância máxima na região de acumulação (G_{ma}) é necessária para o cálculo das equações de correção da curva. Como não há uma estabilização visível para adotar como valor de G_{ma} , foi preciso efetuar ajustes calculando a primeira derivada para cada ponto da condutância medida em função de V_G e plotar o gráfico dos resultados para encontrar pontos específicos de queda associados ao comportamento dos valores da condutância na primeira curva. Foi adotado que a primeira queda significante do gráfico da derivada estaria relacionada ao valor da condutância máxima, visto que na curva G-V os valores de condutância deveriam se estabilizar para tensão aplicada entre -4 V e -6 V caso não houvesse fuga de corrente. Encontrando o ponto de V_G que ocorre essa queda no gráfico da primeira derivada, é associado esse V_G no gráfico G-V e é considerado o valor correspondente de G como sendo o G_{ma} utilizado. A figura 4.15 (a) mostra a primeira derivada dos pontos de condutância medida e o valor de V_G utilizado para relacionar na curva G-V. A figura 4.15 (b) demonstra essa relação e o ponto considerado como G_{ma} para efetuar os cálculos de correção.

Figura 4.15 – (a): Gráfico resultante da primeira derivada das medidas de condutância do capacitor com estrutura Al/SiO₂/Si-p, recozidas em argônio ultra seco e depois em $N_2 + 10\%H_2$. (b): Curva G-V (condutância-tensão) medida da inversão para acumulação para a mesma estrutura com foco no ponto considerado como G_{ma}



O ponto de V_G retirado da curva (a) foi de aproximadamente -4,89 V, que foi utilizado no gráfico (b) para a determinação do parâmetro G_{ma} (3,07 mS). Com isso, pode-se efetuar o cálculo dos outros parâmetros para a correção da curva C-V citados no capítulo 3.3.3. Os resultados podem ser observados na tabela 10 a seguir:

Tabela 10 – Parâmetros calculados para a correção da curva C-V do capacitor MOS de estrutura Al/SiO₂/Si-p pósrecozimento térmico em Ar+ N_2 +10%H₂ levando em conta a ação da resistência série

C _{ma} (pF)	Gma (mS)	ω (rad/s)	$R_{s}\left(\Omega ight)$	C ₀ (pF)	Nit (cm ² .eV ⁻¹)
712,20	3,07	6,28x10 ⁶	104,23	712,20	1,37x10 ¹²

Fonte: Autor.

Com os cálculos, ficou evidente que há uma resistência série de aproximadamente 104,23 Ω agindo no dispositivo e que deve ser considerada conforme a associação vista no capítulo 3.3.3. Devido a este fator, o N_{it} calculado com base na condutância máxima é maior se comparado ao resultado obtido no capítulo 4.1.

A correção da curva se deu através do modelo equacionado em (3.23), onde cada valor medido de capacitância, da inversão para acumulação entre 4 V e -4 V de tensão de porta aplicada, foi corrigido em função da resistência série. Os dados de cada ponto corrigido para este intervalo de V_G podem ser encontrados no Apêndice C. A curva corrigida então é representada na figura 4.16 e mostra como deveria ser o perfil da curva C-V do capacitor na realidade. Figura 4.16 – Curva C-V corrigida da inversão para acumulação para o capacitor com estrutura Al/SiO₂/Si-p, recozidas em argônio ultra seco e depois em N_2 +10% H_2 a partir da consideração dos efeitos da resistência série



Fonte: Autor.

Como visto na literatura (MARTINO, 2003), a não consideração da influência da resistência série causou um erro na região de acumulação, onde os valores para a capacitância extraídos na caracterização eram menores do que deveriam ser na realidade. A correção não afetou significativamente a região de depleção e inversão, mantendo-se bem similares os valores. Essa análise pode ser melhor vista tanto no Apêndice C quanto no gráfico de comparação entre as medidas extraídas e corrigidas através do modelo representado na figura 4.17 a seguir:



 $\label{eq:Figura 4.17-Comparação entre as curvas medida experimentalmente e corrigida pelo modelo da resistência série para o capacitor com estrutura Al/SiO_2/Si-p, recozidas em argônio ultra seco e depois em N_2+10%H_2$

Fonte: Autor.

Após a correção das medidas experimentais, a capacitância máxima aumentou de 712,2 pF para 1047,1 pF, sendo esse o valor considerado como correto para essa estrutura. A partir da observação dos efeitos da resistência série, é possível determinar o valor da admitância paralela ao óxido bem como a capacitância do óxido para esse novo patamar de acumulação corrigido com o modelo apresentado no capítulo 3.3.3, que resultaram respectivamente em: $Y_c=3,21 \ \mu\text{S} \ e \ C_o=1047,1 \ p\text{F}.$

4.5. Resultados da modelagem da curva C-V em função da admitância Y_c no capacitor

Os resultados calculados até o momento mostraram que há uma corrente de fuga que passa pelo dispositivo através do valor da admitância Yc calculada (3,21 μ S). Com base nos dados obtidos, criou-se um modelo para analisar e simular como essa admitância influencia na capacitância do dispositivo, levando em consideração juntamente os efeitos da resistência série.

Fundamentado no capítulo 3.3.4.1, a modelagem fez-se uso do processo de iteração numérica de Newton-Raphson, onde foram escolhidos pontos relevantes da curva C-V para o

cálculo da nova capacitância em função de Y_c . Uma vez que o processo de cálculo é deveras trabalhoso, não foi possível analisar todos os pontos de capacitância da curva C-V caracterizada, sendo que este tipo de análise poderá ser efetuado em trabalhos futuros. A estrutura que foi utilizada para essa modelagem foi a Al/SiO₂/SiO-p pós recozimento térmico em Ar+N₂+10%H₂ devido aos seus padrões de funcionamento mais claros e de conformidade com a literatura. No caso de consolidação dos métodos da modelagem adotados para essa estrutura, o mesmo procedimento poderá ser aplicado na estrutura Al/SiO/SiO₂/Si-p em outros trabalhos.

Os pontos de capacitância medidos na curva C-V que foram escolhidos para a aplicação do modelo inicialmente eram os condizentes às tensões de porta de -3,5 V, -1,07 V, 0 V e 1 V, onde a intenção era utilizar pontos referentes as regiões de acumulação, depleção, inversão fraca e inversão forte respectivamente e compará-los com seus valores experimentais. Porém, ao observar os primeiros resultados, viu-se necessário o maior foco em pontos na região de inversão do capacitor e foram adicionados à análise as capacitâncias medidas correspondentes às tensões 0,5 V, 1,5 V, 2,5 V, 3 V, 3,5 V e 4 V. Esse foco na região de inversão se deu devido aos resultados utilizando capacitâncias medidas para tensões positivas apresentarem a maior variação conforme o aumento de Y_c. Foram então corrigidos e calculados os termos de C(V_G) para cada C_m com a finalidade de serem as capacitâncias iniciais consideradas no processo de iteração. Os dados mostrados na tabela 11 tratam-se dos parâmetros de capacitância medida extraídos da curva C-V, suas correspondências de V_G e os valores de C(V_G) corrigidos pela equação quadrática que foram utilizados no modelo criado.

Tabela 11 – Parâmetros utilizados na modelagem da capacitância medida da curva C-V do capacitor MOS deestrutura Al/SiO2/Si-p pós recozimento térmico em Ar+ N_2 +10%H2

V _G (V)	-3,5	-1,07	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
C _m (pF)	712,2	375,8	29,9	22,4	19,7	17,4	15,9	15,0	13,4	12,5	12,5
C(V _G) (pF)	1045,2	401,8	29,9	22,4	19,7	17,5	15,9	15,0	13,4	12,5	12,5

Fonte: Autor.

É possível identificar que para valores negativos de tensão de porta, correspondentes às regiões de acumulação e depleção, a equação de correção da resistência série tem grande influência na capacitância resultante e que, em contrapartida, não há uma alteração considerável para valores positivos de V_G relacionados a região de inversão.

Por outro lado, foi observado que o parâmetro Y_c , apesar de ter pouca influência na acumulação e depleção após a correção pela resistência série, tem grande influência na região de inversão pela diminuição da corrente de fuga (a ser mostrado a seguir) e diminuição da capacitância para valores positivos de V_G. Foram obtidas iterações utilizando esses parâmetros para os 11 pontos escolhidos e efetuando variações de Y_c de 0 S até 6,9 mS, que se trata do maior valor simulado de admitância para que haja convergência do modelo. Como o processo de iteração é o mesmo para as diversas medidas e diversas variações de Y_c, os dados do processo foram especificados com detalhes para cada uma das 10 medidas utilizando como admitância o valor calculado de 3,21 μ S no capítulo anterior para demonstrar a convergência e explicar melhor como foi efetuado a simulação para os outros valores de Y_c na região de inversão onde o patamar de inversão na curva experimental não estabiliza. Esses dados podem ser encontrados no Apêndice D, demonstrando que para valores maiores de Y_c, o patamar de inversão estabiliza em torno de 10 pF.

A variação da admitância inicialmente deu-se a partir de 10 µS como primeiro termo adotado após $Y_c = 0$, aumentando seu valor em uma ordem de grandeza. A partir do valor de 10 mS, notou-se que não houve mais convergência do modelo, indicando que não há significado físico para valores maiores que 10 mS, então as variações passaram a ser menores até que se atingisse o valor limite de 6,9 mS. Foram testados muitos valores para Y_c neste intervalo e no Apêndice E é possível encontrar uma tabela completa para todos os valores de Y_c adotados que geram convergência para C(V_G) no modelo. O que acontece nos dados ao simular o aumento de Y_c no dispositivo através do modelo matemático é que, nas regiões de acumulação e depleção correspondentes as tensões de -3,5 V e -1,07 V, não há mudança apreciável no valor da capacitância retornada pela iteração para valores abaixo de 0,1 mS, indicando que a corrente de fuga maior representada por maior Y_c não influência as capacitâncias nas regiões de acumulação e depleção. A partir de valores maiores de admitância adotados, a capacitância, apesar da convergência, torna-se inconsistente, ou seja, é retornado um valor muito divergente sendo em alguns casos de até diferenças em duas ordens de grandeza, até o valor máximo de 6,9 mS que é quando não ocorre mais convergência, que é um caminho adequado para modelar a região de inversão.

Essa incoerência de $C(V_G)$ é mais evidente para as medidas correspondentes a V_G mais positivos, em que o valor de Y_c torna-se cada vez menor até que ocorra essa inconsistência da capacitância, indicando que Y_c grande poderia afetar a acumulação e a depleção caso o efeito fosse real sob o ponto de vista físico. Foi adotado então que o valor limite considerado para a capacitância modelada seria de aproximadamente 10 pF para $V_G >0$, devido a análise dos resultados para a região inversão (de 0 V à 4 V), onde um pequeno aumento de Y_c no modelo gerava uma diminuição drástica na capacitância obtida (de 1×10^{-11} para 1×10^{-14}). Houve a variação de Y_c de acordo com o C(V_G) convergido para esse valor aproximado em todos os pontos de V_G da região de inversão, sendo que ajustes também foram necessários para atingir a maior aproximação possível e são a causa da adoção de valores intermediários de Y_c nos dados do Apêndice E. Observe no Apêndice E que a aproximação do patamar de inversão em aproximadamente 10 pF está relacionado à precisão numérica na determinação da diminuição de Y_c com o aumento de V_G .

A tabela 12 é um resumo dos dados modelados que foram relevantes para o estudo dos efeitos da admitância na estrutura.

Tabela 12 – Tensão de porta (V_G), admitância (Y_c) e capacitância obtida da modelagem (C(V_G)) relevantes para o estudo da modelagem criada e aplicada no capacitor MOS de estrutura Al/SiO₂/Si-p pós recozimento térmico em Ar+N₂+10%H₂

$V_{G}(V)$	$Y_{c}(S)$	$C(V_G)(F)$
-3,50	9,40x10 ⁻⁵	1,04x10 ⁻⁹
-1,07	9,40x10 ⁻⁵	4,01x10 ⁻¹⁰
0	9,40x10 ⁻⁵	1,50x10 ⁻¹¹
0,50	7,00x10 ⁻⁵	1,26x10 ⁻¹¹
1	6,15x10 ⁻⁵	1,11x10 ⁻¹¹
1,50	5,40x10 ⁻⁵	1,03x10 ⁻¹¹
2	4,81x10 ⁻⁵	1,00x10 ⁻¹¹
2,50	4,42x10 ⁻⁵	1,00x10 ⁻¹¹
3	3,65x10 ⁻⁵	1,00x10 ⁻¹¹
3,50	3,10x10 ⁻⁵	1,00x10 ⁻¹¹
4	3,10x10 ⁻⁵	1,00x10 ⁻¹¹

Fonte: Autor.

Obtido os valores de capacitância através do ajuste de Y_c para um valor aproximado de 10 pF, foi possível estabilizar a região de inversão e entender como a admitância age no dispositivo. Utilizando os dados da tabela para os resultados relacionados à inversão (de 0 V a 4 V) pode-se plotar as curvas representadas pela figura 4.18 em: a) $Y_c \times V_G e$ b) $C(V_G) \times V_G$.

 $\label{eq:Figura 4.18-(a): Gráfico de variação de Yc em função do aumento de V_G. (b): Região de inversão modelada a partir dos efeitos de variação de Y_c para o capacitor Al/SiO_2/Si-p pós recozimento em Ar+N_2+10%H_2$



Com a construção dessas curvas é possível visualizar como foi a variação de Y_c adotada com o aumento de V_G , bem como o perfil da curva modelada na região de inversão fraca e inversão forte. A partir do momento em que se inicia o aparecimento da região de depleção (para a situação acima de $V_G = V_{FB} \approx -1$ V), há uma diminuição progressiva de Y_c a medida que a fuga de corrente através do dispositivo começa a ser blindada pela região de depleção. Essa diminuição do valor de Y_c significa a diminuição de corrente de fuga através do capacitor, que por sua vez, fica limitada pela corrente que alimenta a região de depleção onde sua estabilização tende a acontecer para valores de V_G entre 2 V e 2,5 V como é possível observar na figura 4.16 (b). Contudo, para $V_G > 2,5$ V, ocorre uma diminuição ainda maior de Y_c [observado na figura (a)] para que a largura da camada de depleção seja mantida fixa com corrente aproximadamente constante. Pode-se explicar esse efeito devido ao aumento da queda de tensão na resistência em série com o aumento de V_G através da corrente fixa que alimenta a região de depleção, que é aproximadamente constante. Para esse caso, o valor de Y_c diminui para manter a corrente aproximadamente constante como resposta também ao aumento de tensão no dielétrico de porta.

A tendência notada a partir dessa modelagem é que o valor de Y_c aumente para valores negativos de V_G , que serão abordados em trabalhos futuros.
5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram fabricados capacitores com base na tecnologia MOS em três tipos de estruturas: Al/SiO₂/Si-p, Al/SiO/Si-p e Al/SiO/SiO₂/Si-p. A deposição do SiO foi obtida através da técnica de PVD realizada por evaporação térmica onde o desenvolvimento de um procedimento para tal foi um dos objetivos na criação dos dispositivos. Através do aumento e diminuição da massa da fonte de evaporação (no caso desse trabalho foi o SiO), da disposição da amostra no centro do carregador de substratos para reduzir variação de espessura do filme e da utilização de um processo criado para aplicação de corrente no filamento espiral por um determinado tempo estabelecido, foi possível obter espessuras condizentes e relativamente uniformes.

Notou-se também que o filme fino formado possui uma porosidade elevada, dada suas medidas de curva C-V, onde nos capacitores de estrutura Al/SiO/Si-p apresentaram defeitos de interface, o que não permitiu a extração de todos os parâmetros necessários para os cálculos; os capacitores com estrutura Al/SiO₂/Si-p foram utilizados como comparação por ter um perfil bem conhecido pela literatura; e os capacitores com estrutura Al/SiO/SiO₂/Si-p resolveram os problemas encontrados na estrutura com somente o SiO depositado devido ao crescimento do SiO₂ por oxidação térmica seca, melhorando os estados de interface entre o óxido e o substrato, porém através de suas medidas de curva C-V foram extraídos parâmetros não condizentes com o esperado, onde o V_{FB} resultou em um valor positivo que levou em um aparente acúmulo de cargas negativas no óxido. Esse resultado se deu provavelmente porque a porosidade do óxido depositado estaria retendo umidade presente no ambiente, gerando uma série de ligações químicas incompletas o que levou o deslocamento da curva C-V para o lado positivo em relação a V_G. Como tentativa para solucionar esse problema foi efetuado um tratamento térmico da amostra com a finalidade de sinterizar e uniformizar essa camada para diminuir sua porosidade e reduzir a umidade presente. Foram efetuados dois recozimentos térmicos, primeiro em argônio ultra seco por ser um gás não reativo e, para estudos dos seus efeitos, a amostra foi clivada onde uma das partes foi recozida novamente com a presença do gás de N₂+10%H₂. As medidas extraídas pós recozimento mostraram-se satisfatórias na correção dos resultados obtidos antes do processo, deslocando a curva para valores negativos de V_G, gerando cargas agora positivas no óxido adequado ao tipo do substrato e melhorando o perfil da curva quanto aos efeitos de depleção profunda e injeção lateral principalmente depois do segundo recozimento.

Após a caracterização dos capacitores depois dos recozimentos térmicos, notou-se que a curva C-V gerada se deslocava cada vez mais para valores negativos de V_G conforme novas medidas eram extraídas com o passar do tempo, aumentando consequentemente o valor de Q_{ss}/q gerado pelo dispositivo de estrutura Al/SiO/SiO₂/Si-p até houve a estabilização no 54° dia de medição. Esse efeito de acúmulo de cargas com o tempo pode ser explicado como reação da estrutura com a umidade presente no ambiente onde foi armazenado a amostra. Pode-se tomar como conclusão que os recozimentos não eliminaram a porosidade do filme fino de SiO totalmente o que gera espaço para absorção e retenção da umidade do ambiente nessa região, mesmo que em pouca quantidade. Mesmo assim, com o estudo mais aprofundado desse efeito é possível que apresente resultados promissores em aplicações desse filme fino em células solares MOS futuramente.

Foi feito então um estudo sobre como os parâmetros de resistência série, potencial de superfície e admitância podem influenciar na curva C-V real através da utilização de modelos matemáticos, tanto para criar uma curva onde os parâmetros foram calculados, quanto para corrigir a curva obtida experimentalmente levando em conta os efeitos dos parâmetros em questão. Essas modelagens foram aplicadas sobre os dados da estrutura Al/SiO₂/Si-p pós recozimento térmico em ambos os gases Ar e N₂+10%H₂ devido ao seu comportamento amplamente estudado pela literatura.

A curva C-V modelada em função do potencial de superfície possui um perfil similar à curva medida após a caracterização elétrica, somente com um valor de capacitância máxima menor e uma região de inversão melhor estruturada e estável, sugerindo possíveis defeitos nessa região da curva experimental. Com a correção da curva experimental considerando uma resistência série agindo no dispositivo, foi possível entender que os efeitos resultantes agem diretamente nas regiões de acumulação e começo da depleção, alterando a capacitância máxima de 712,2 pF para 1047,1 pF. Como estudado na literatura, a não consideração da resistência série pode alterar significativamente a capacitância, na região de acumulação principalmente, onde os parâmetros extraídos pelo equipamento não são os reais atingidos pelo dispositivo. Por fim, na modelagem realizada a partir das equações de correção e equação da admitância, houve a percepção de como a variação de Y_c influência nas medidas de capacitância experimental, especialmente as medidas referentes a valores positivos de V_G ou na região de inversão do capacitor. Há a diminuição de Y_c conforme o aumento de V_G que é explicado devido a necessidade de se manter a corrente constante em resposta ao aumento da tensão no dielétrico de porta.

6. OBJETIVOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Alguns dos objetivos para esse trabalho que podem ser realizados como continuação em trabalhos futuros são:

- a) Fabricação de uma nova amostra com uma espessura de óxido mais fina, efetuar o processo de recozimento e comparar os novos dados com os apresentados neste trabalho para estudar seu comportamento;
- b) Fabricação, deposição e caracterização do SiO em células solar MOS para agir como camada de passivação e estudar os efeitos desse filme como camada antirrefletora e de geração de cargas;
- c) Aplicação e aperfeiçoamento da modelagem utilizada em dispositivos com o SiO depositado além de estudar os efeitos da variação da admitância para valores negativos de V_G;
- d) Estudo de métodos de controle do acabamento da superfície dos filmes de SiO para evitar absorção de umidade e perda de cargas positivas no óxido;
- e) Efetuar técnicas de caracterização física como FTIR, RBS, RAMAN, difração de raios-X, MEV e outras para definir melhor a composição dos materiais dos dispositivos fabricados e auxiliar no entendimento do seu comportamento.

7. REFERÊNCIAS

ALBERTIN, K. F. Estudo e Fabricação de Capacitores MOS com Camada Isolante de SiO_xN_y Depositada por PECVD. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003.

ARANTES, V. L. Engenharia e Ciências dos Materiais II – Sinterização. Aula descrevendo características e definições sobre o efeito de sinterização dos grãos dos materiais. Universidade de São Paulo – USP, 2016.

CHIAPPIM, W.; WATANABE, M.; DIAS, V.; TESTONI, G.; RANGEL, R.; FRAGA, M.; MACIEL, H.; DOS SANTOS FILHO, S. G; PESSOA, R. **MOS Capacitance Measurements for PEALD TiO₂ Dielectric Films Grown under Different Conditions and the Impact of Al₂O₃ Partial-Monolayer Insertion.** Nanomaterials, 10, 338, 2020.

CHRISTIANO, V. Fabricação de Células Solares MOS Utilizando Oxinitretos de Silício Obtidos por Processamento Térmico Rápido (RTP). Tese de Douturado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – POLI-USP, 2017.

DUKE UNIVERSITY. **Thermal Evaporation: Basic Function**. Disponível em: https://www.coursera.org/lecture/nanotechnology/thermal-evaporation-basic-function-6mjsf>. Acessado em 8 de março de 2019.

E. H. NICOLLIAN; J. R. BREWS. MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology. New York, Wiley &Sons, 1982.

ECEILLINOIS.GT7-SiO2 ColorChart.Disponívelem:<https://fabweb.ece.illinois.edu/gt/gt/gt7.aspx>.Acessado em 13 de julho de 2020.

ELETRONICS ON WEB. **Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET)**. Disponível em: < http://electronicsonweb.blogspot.com/2012/10/22-mos-capacitor.html>. Acessado em 13 de julho de 2020.

FERRI, M. et al. **Photovoltaic Energy Harvester with Power Management System**. Journal of Sensors, v. 2010, 2010.

FRAAS, L.; PARTAIN, L. Solar Cells and Their Applications. Solar cells and their applications, 2. ed. New Jersey: Willey, 2010.

GREEN, M. et al. **Solar cell efficiency tables (version 52)**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 26, 2018.

GREEN, M. Third generation photovoltaics: Solar cells for 2020 and beyond. Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, v. 14, 2002.

GUIMARÃES, G. Células Fotovoltaicas: O que são, como escolher e como medir suas eficiências – Disponível em: https://www.solarvoltenergia.com.br/blog/quais-os-recordes-de-eficiencia-para-celulas-fotovoltaicas/. Acessado em 15 de julho de 2020.

HILL, W. A; COLEMAN, C. C. A Single-Frequency Aproximation for Interface-State Density Determination. Solid-State Eletronics, 23, 987-993, 1980.

HORA, W, G. **Produção E Caracterização De Filmes Finos De GeO₂ - PbO**. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

IEA PVPS. **Trends 2018 in Photovoltaic Applications**. International Energy Agency – Photovoltaics Applications, 23. Ed, 2018, p. 88.

MAGALHÃES, F, B. Capacitor MOS Aplicado Em Sensor De Imagem Química. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012

MARTINO, J. A.; PAVANELLO, M. A.; VERDONCK, P. B. Caracterização Elétrica de Tecnologia e Dispositivos MOS. São Paulo, Pioneira Thomson Learning, 2003.

MATERIAIS JÚNIOR. **Tratamentos Térmicos: Quais os Princiapais e para que Servem?** Disponível em: < https://materiaisjr.com.br/tratamentos-termicos/>. Acessado em 15 de agosto de 2021.

MATEU, L.; MOLL, F. Review of Energy Harvesting Techniques and Applications for Microelectronics. Proc, SPIE, VLSI Circuits and Systems II, v. 5837, 2005.

MCCARTHY, R.; HILLHOUSE, H. The schockley-queisser limit and practical limits of nanostructured photovoltaics. Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2012.

RAJAB, S. M.; OLIVEIRA, I. C.; MASSI, M.; MACIEL, H. S.; DOS SANTOS FILHO, S. G.; MANSANO, R. D. Effect of the Thermal Annealing on the Electrical and Physical Properties of SiC Thin Films Produced by RF Magnetron Sputtering. Thin Solid Films, 515, 170-175, 2006.

REINHARD, K.; KERN, W. Handbook of Silicon Wafer Cleaning Tecnology. 2. Ed. Norvich, NY, William Andrew, 2008.

SANTOS, S. et al. A Less Critical Cleaning Procedure for Silicon Wafers Using Diluted HF dip and Boiling in Isopropyl Alcohol as Final Steps. Journal Electrochemical Society, v. 142, 1995.

SHOCKLEY, W.; QUEISSER, H. Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. Journal of Applied Physics, v. 32, 1961.

TN BENICIO BIZ EDITORES. Fonte solar será responsável por 7 mil MW na matriz elétrica até 2024 - Disponível em: ">https://www.tnpetroleo.com.br/noticia/fonte-solar-sera-responsavel-por-7-mil-mw-na-matriz-eletrica-ate-2024/>. Acessado em 26 de fevereiro de 2019.

TOQUETI, L. Estudo Experimental da Obtenção de Oxinitretos de Silício Ultrafinos para Porta MOS. Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

UNITRAT. **Recozimento Tratamento Térmico**. Disponível em: https://www.unitrat.com.br/recozimento-tratamento-termico>. Acessado em 15 de agosto de 2021.

WASA. K.; KITABATAKE, M.; ADACHI, H. Thin Film Materials Tecnology – Sputtering of Compound Materials. William Andrew, p. 532, 2004.

WATANABE, M. N. Fabricação, Caracterização e Modelagem Elétrica de Células Solares MOS para Aplicação em Energy Harvesting. Dissertação de mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2020.

YAMAMOTO, R. K. **Deposição Física a Vapor (PVD)**. Artigo descrevendo os processos de PVD utilizado para ministrar as aulas da matéria de Etapas de Processo - Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC-SP, 2019a.

YAMAMOTO, R. K. **Oxidação de Silício**. Artigo conceitualizando e descrevendo os diferentes tipos de obtenção do SiO₂ utilizado para ministrar as aulas da matéria de Etapas de Processo - Faculdade de Tecnologia de São Paulo – FATEC-SP, 2019b.

8. LISTA DE PUBLICAÇÕES

SHIGA, W. T.; REGIS, S. P.; LOUZADA, G. O.; WATANABE, M. N.; IZUMI, F.; CHRISTIANO, V.; RANGEL, R. C.; DOS SANTOS FILHO, S. G. Electrical Characterization of Positively Charged SiO Coatings for MOS Solar Cells. JICS. JOURNAL OF INTEGRATED CIRCUITS AND SYSTEMS (ED. PORTUGUÊS), v. 15, p. 1-5, 2020.

SHIGA, W. T.; WATANABE, M. N.; RANGEL, R. C.; DOS SANTOS FILHO, S. G. Modeling Positively Charged SiO Coatings for MOS Solar Cells. XV Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology (SEMINATEC) 2021, São Paulo. Proceedings of the XV SEMINATEC, 2021.

REGIS, S. P.; SHIGA, W. T.; LOUZADA, G. O.; WATANABE, M. N.; IZUMI, F.; RANGEL,
R.; DOS SANTOS FILHO, S. G. Filmes Finos de SiO como Camada De Passivação Em
Células Solares MOS. 21º Simpósio de Iniciação Científica e Tecnológica 2019 (SICT-2019),
São Paulo. Boletim Técnico da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, v. 48, p. 71-71, 2019.

LOUZADA, G. O.; REGIS, S. P.; **SHIGA, W. T.**; IZUMI, F.; WATANABE, M. N.; RANGEL, R.; DOS SANTOS FILHO, S. G. **Estudo de Lamínulas de Vidro como Camada Antirreflexiva para Células Solares MOS**. 21° Simpósio de Iniciação Científica e Tecnológica 2019 (SICT-2019), São Paulo. Boletim Técnico da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, v. 48, p. 67-67, 2019. $\mathbf{AP \hat{E} NDICE}\ \mathbf{A}$ - Dados das iterações dos valores de dopagem do substrato N_A para as estruturas

Parâmetros				
C _{máx} (pF)	712,2			
C _{mín} (pF)	12,0			
$A_{g}(cm^{2})$	9,4x10 ⁻⁴			
d _{máx} (nm)	797,74			
Iteraçõ	es de N _A			
N _A inicial (cm ⁻³)	1,0x10 ¹⁵			
$N_{\rm A} \ 1 \ ({\rm cm}^{-3})$	1,1735349 x10 ¹⁵			
$N_{\rm A} 2 ({\rm cm}^{-3})$	1,1903901 x10 ¹⁵			
$N_{\rm A} 3 ({\rm cm}^{-3})$	1,1918922 x10 ¹⁵			
$N_{\rm A} 4 ({\rm cm}^{-3})$	1,1920250 x10 ¹⁵			
$N_{\rm A} 5 ({\rm cm}^{-3})$	1,1920368 x10 ¹⁵			
$\boxed{\qquad \qquad N_{\rm A} \ 6 \ (\rm cm^{-3})}$	1,1920378 x10 ¹⁵			
$N_{\rm A} 7 ({\rm cm}^{-3})$	1,1902379 x10 ¹⁵			
N _A 8 (cm ⁻³)	1,1902379 x10 ¹⁵			

a) Al/SiO₂/Si-p após o recozimento térmico com Ar+N₂H₂

b) Al/SiO/SiO₂/Si-p antes do recozimento térmico

Parâmetros				
C _{máx} (pF)	130,62			
C _{mín} (pF)	93,37			
$A_g (cm^2)$	9,4x10 ⁻³			
d _{máx} (nm)	297,28			
Iteraçõe	es de N _A			
N _A inicial (cm ⁻³)	$1,0x10^{15}$			
N _A 1 (cm ⁻³)	8,4441382x10 ¹⁵			
$N_{\rm A} \ 2 \ ({\rm cm}^{-3})$	1,0061116x10 ¹⁶			
N _A 3 (cm ⁻³)	1,0193906x10 ¹⁶			
$N_{\rm A} 4 ({\rm cm}^{-3})$	1,0203844x10 ¹⁶			
$N_{\rm A} 5 ({\rm cm}^{-3})$	1,0204582x10 ¹⁶			
N _A 6 (cm ⁻³)	1,0204637x10 ¹⁶			
$N_{\rm A} 7 ({\rm cm}^{-3})$	1,0204641x10 ¹⁶			
$N_{\rm A} 8 ({\rm cm}^{-3})$	1,0204641x10 ¹⁶			

Parâmetros				
C _{máx} (pF)	202,87			
C _{mín} (pF)	127,03			
$A_{g}(cm^{2})$	9,4x10 ⁻³			
d _{máx} (nm)	286,44			
Iteraçõe	es de N _A			
N _A inicial (cm ⁻³)	$1,0x10^{15}$			
$N_{A} 1 (cm^{-3})$	9,0951494x10 ¹⁵			
$N_A 2 (cm^{-3})$	1,0897419x10 ¹⁶			
$N_{\rm A} 3 ({\rm cm}^{-3})$	1,1045001x10 ¹⁶			
$N_{A} 4 (cm^{-3})$	1,1055982x10 ¹⁶			
$N_{\rm A} 5 ({\rm cm}^{-3})$	1,1056793x10 ¹⁶			
$N_{\rm A} 6 ({\rm cm}^{-3})$	1,1056853x10 ¹⁶			
$N_{\rm A} 7 ({\rm cm}^{-3})$	1,1056858x10 ¹⁶			
$N_{\rm A} 8 ({\rm cm}^{-3})$	1,1056858x10 ¹⁶			

c) Al/SiO/SiO₂/Si-p antes do recozimento térmico com Ar+ N_2H_2

Legenda:

Valores convergidos de N_A.

115

	C _{tot} (pF)	V _G (V)		
$\psi_{\rm S}(\rm V)$	$C_{Si}(\psi_S)$ (F)	$C_{tot}(\psi_S)$ (F)	$F(\psi_S)$	$Q_{Si}(\psi_S)$	$V_{G}(V)$
1	9,4640081E-12	1,1630435E-11	4,2438277E+03	9,5932886E-06	12,842
0,99	9,5129623E-12	1,1630435E-11	3,4981346E+03	7,9076290E-06	10,607
0,98	9,5626841E-12	1,1630435E-11	2,8834703E+03	6,5181635E-06	8,763
0,97	9,6131938E-12	1,1630435E-11	2,3768114E+03	5,3728472E-06	7,241
0,96	9,6645125E-12	1,1630435E-11	1,9591801E+03	4,4287803E-06	5,985
0,95	9,7166618E-12	1,1630435E-11	1,6149333E+03	3,6506009E-06	4,948
0,94	9,7696646E-12	1,1630435E-11	1,3311765E+03	3,0091610E-06	4,092
0,93	9,8235443E-12	1,1630435E-11	1,0972813E+03	2,4804343E-06	3,384
0,92	9,8783254E-12	1,1630435E-11	9,0448645E+02	2,0446164E-06	2,799
0,91	9,9340333E-12	1,1630435E-11	7,4557061E+02	1,6853828E-06	2,314
0,9	9,9906945E-12	1,1630435E-11	6,1458122E+02	1,3892777E-06	1,914
0,89	1,0048336E-11	1,1630435E-11	5,0661182E+02	1,1452099E-06	1,582
0,88	1,0106988E-11	1,1630435E-11	4,1761816E+02	9,4403729E-07	1,306
0,87	1,0166678E-11	1,1630435E-11	3,4426677E+02	7,7822445E-07	1,077
0,86	1,0227439E-11	1,1630435E-11	2,8381005E+02	6,4156038E-07	0,887
0,85	1,0289302E-11	1,1630435E-11	2,3398340E+02	5,2892588E-07	0,728
0,84	1,0352301E-11	1,1630435E-11	1,9292036E+02	4,3610176E-07	0,596
0,83	1,0416472E-11	1,1630435E-11	1,5908269E+02	3,5961079E-07	0,485
0,82	1,0481852E-11	1,1630435E-11	1,3120277E+02	2,9658746E-07	0,391
0,81	1,0548478E-11	1,1630435E-11	1,0823607E+02	2,4467061E-07	0,313
0,8	1,0616391E-11	1,1630435E-11	8,9322059E+01	2,0191496E-07	0,246
0,79	1,0685633E-11	1,1630435E-11	7,3751896E+01	1,6671818E-07	0,190
0,78	1,0756247E-11	1,1630435E-11	6,0941891E+01	1,3776081E-07	0,142
0,77	1,0828281E-11	1,1630435E-11	5,0411569E+01	1,1395673E-07	0,100
0,76	1,0901781E-11	1,1630435E-11	4,1765599E+01	9,4412279E-08	0,065
0,75	1,0976798E-11	1,1630435E-11	3,4678858E+01	7,8392509E-08	0,033
0,74	1,1053386E-11	1,1630435E-11	2,8884070E+01	6,5293232E-08	0,006
0,73	1,1131599E-11	1,1630435E-11	2,4161495E+01	5,4617721E-08	-0,018
0,72	1,1211497E-11	1,1630435E-11	2,0330279E+01	4,5957152E-08	-0,039
0,71	1,1293140E-11	1,1630435E-11	1,7241092E+01	3,8973961E-08	-0,059
0,7	1,1376593E-11	1,1630435E-11	1,4769810E+01	3,3387559E-08	-0,076
0,69	1,1461924E-11	1,1630435E-11	1,2812091E+01	2,8962083E-08	-0,092
0,68	1,1549205E-11	1,1630435E-11	1,1278888E+01	2,5496235E-08	-0,106
0,67	1,1638510E-11	1,1630435E-11	1,0093026E+01	2,2815562E-08	-0,120
0,66	1,1729919E-11	1,1630435E-11	9,1870217E+00	2,0767514E-08	-0,133
0,65	1,1823516E-11	1,1630435E-11	8,5020653E+00	1,9219151E-08	-0,145
0,64	1,1919391E-11	1,1723191E-11	7,9878015E+00	1,8056644E-08	-0,156
0,63	1,2017636E-11	1,1818216E-11	7,6023274E+00	1,7185269E-08	-0,167
0,62	1,2118351E-11	1,1915603E-11	7,3119356E+00	1,6528831E-08	-0,178
0,61	1,2221642E-11	1,2015452E-11	7,0904129E+00	1,6028073E-08	-0,189
0.6	1.2327619E-11	1 2117869E-11	6 9179795E+00	1 5638282E-08	-0 199

 $\label{eq:approx} \begin{array}{l} \textbf{APÊNDICE B} \text{-} Tabela \ com \ os \ dados \ calculados \ de \ C_{Si}(\psi_S), \ C_{tot}(\psi_S), \ F(\psi_S), \ Q_{si}(\psi_S) \ e \ V_G \ para \\ a \ geração \ da \ curva \ C_{tot} \ x \ V_G \ modelada \ a \ partir \ da \ variação \ de \ \psi_S \end{array}$

0,59	1,2436403E-11	1,2222966E-11	6,7800777E+00	1,5326551E-08	-0,210
0,58	1,2548117E-11	1,2330862E-11	6,6661994E+00	1,5069126E-08	-0,220
0,57	1,2662898E-11	1,2441685E-11	6,5688695E+00	1,4849109E-08	-0,230
0,56	1,2780887E-11	1,2555569E-11	6,4828260E+00	1,4654606E-08	-0,241
0,55	1,2902237E-11	1,2672659E-11	6,4043918E+00	1,4477303E-08	-0,251
0,54	1,3027110E-11	1,2793107E-11	6,3310094E+00	1,4311420E-08	-0,261
0,53	1,3155681E-11	1,2917078E-11	6,2609047E+00	1,4152947E-08	-0,271
0,52	1,3288135E-11	1,3044748E-11	6,1928487E+00	1,3999104E-08	-0,282
0,51	1,3424672E-11	1,3176304E-11	6,1259886E+00	1,3847965E-08	-0,292
0,5	1,3565507E-11	1,3311950E-11	6,0597316E+00	1,3698189E-08	-0,302
0,49	1,3710868E-11	1,3451900E-11	5,9936632E+00	1,3548840E-08	-0,312
0,48	1,3861006E-11	1,3596389E-11	5,9274912E+00	1,3399256E-08	-0,322
0,47	1,4016185E-11	1,3745669E-11	5,8610069E+00	1,3248967E-08	-0,333
0,46	1,4176696E-11	1,3900010E-11	5,7940585E+00	1,3097628E-08	-0,343
0,45	1,4342851E-11	1,4059706E-11	5,7265330E+00	1,2944985E-08	-0,353
0,44	1,4514989E-11	1,4225075E-11	5,6583429E+00	1,2790839E-08	-0,363
0,43	1,4693476E-11	1,4396462E-11	5,5894182E+00	1,2635033E-08	-0,373
0,42	1,4878715E-11	1,4574241E-11	5,5196996E+00	1,2477432E-08	-0,384
0,41	1,5071140E-11	1,4758823E-11	5,4491352E+00	1,2317919E-08	-0,394
0,4	1,5271229E-11	1,4950652E-11	5,3776766E+00	1,2156385E-08	-0,404
0,39	1,5479505E-11	1,5150219E-11	5,3052774E+00	1,1992725E-08	-0,414
0,38	1,5696541E-11	1,5358057E-11	5,2318915E+00	1,1826834E-08	-0,424
0,37	1,5922969E-11	1,5574758E-11	5,1574718E+00	1,1658606E-08	-0,435
0,36	1,6159486E-11	1,5800970E-11	5,0819696E+00	1,1487931E-08	-0,445
0,35	1,6406864E-11	1,6037412E-11	5,0053336E+00	1,1314694E-08	-0,455
0,34	1,6665959E-11	1,6284882E-11	4,9275093E+00	1,1138770E-08	-0,465
0,33	1,6937725E-11	1,6544265E-11	4,8484384E+00	1,0960028E-08	-0,476
0,32	1,7223228E-11	1,6816551E-11	4,7680580E+00	1,0778326E-08	-0,486
0,31	1,7523662E-11	1,7102847E-11	4,6863005E+00	1,0593511E-08	-0,496
0,3	1,7840373E-11	1,7404399E-11	4,6030920E+00	1,0405416E-08	-0,506
0,29	1,8174878E-11	1,7722609E-11	4,5183523E+00	1,0213859E-08	-0,517
0,28	1,8528900E-11	1,8059068E-11	4,4319936E+00	1,0018643E-08	-0,527
0,27	1,8904399E-11	1,8415582E-11	4,3439192E+00	9,8195483E-09	-0,537
0,26	1,9303619E-11	1,8794216E-11	4,2540230E+00	9,6163355E-09	-0,547
0,25	1,9729135E-11	1,9197337E-11	4,1621873E+00	9,4087385E-09	-0,558
0,24	2,0183924E-11	1,9627671E-11	4,0682816E+00	9,1964620E-09	-0,568
0,23	2,0671436E-11	2,0088376E-11	3,9721601E+00	8,9791766E-09	-0,578
0,22	2,1195696E-11	2,0583124E-11	3,8736596E+00	8,7565135E-09	-0,588
0,21	2,1761418E-11	2,1116208E-11	3,7725963E+00	8,5280571E-09	-0,599
0,2	2,2374158E-11	2,1692671E-11	3,6687624E+00	8,2933378E-09	-0,609
0,19	2,3040495E-11	2,2318466E-11	3,5619215E+00	8,0518212E-09	-0,619
0,18	2,3768259E-11	2,3000657E-11	3,4518037E+00	7,8028967E-09	-0,630
0,17	2,4566821E-11	2,3747662E-11	3,3380983E+00	7,5458626E-09	-0,640
0,16	2,5447451E-11	2,4569562E-11	3,2204465E+00	7,2799076E-09	-0,650
0,15	2,6423768E-11	2,5478475E-11	3,0984312E+00	7,0040885E-09	-0,661
0,14	2,7512307E-11	2,6489035E-11	2,9715642E+00	6,7173022E-09	-0,671
0,13	2,8733231E-11	2,7618963E-11	2,8392717E+00	6,4182513E-09	-0,682
0,12	3,0111222E-11	2,8889786E-11	2,7008744E+00	6,1054006E-09	-0,692

0,11	3,1676598E-11	3,0327709E-11	2,5555644E+00	5,7769233E-09	-0,702
0,1	3,3466719E-11	3,1964679E-11	2,4023750E+00	5,4306344E-09	-0,713
0,09	3,5527729E-11	3,3839655E-11	2,2401437E+00	5,0639062E-09	-0,723
0,08	3,7916730E-11	3,6000124E-11	2,0674661E+00	4,6735638E-09	-0,734
0,07	4,0704476E-11	3,8503859E-11	1,8826382E+00	4,2557553E-09	-0,744
0,06	4,3978687E-11	4,1420925E-11	1,6835844E+00	3,8057886E-09	-0,755
0,05	4,7848117E-11	4,4835884E-11	1,4677685E+00	3,3179309E-09	-0,766
0,04	5,2447508E-11	4,8850111E-11	1,2320836E+00	2,7851588E-09	-0,776
0,03	5,7943598E-11	5,3584072E-11	9,7271605E-01	2,1988513E-09	-0,787
0,02	6,4542350E-11	5,9179291E-11	6,8497811E-01	1,5484118E-09	-0,798
0,01	7,2497634E-11	6,5799631E-11	3,6310386E-01	8,2080623E-10	-0,809
0	8,2121574E-11	7,3631369E-11	0,0000000E+00	0,000000E+00	-0,820
-0,01	9,3796894E-11	8,2881396E-11	4,1305656E-01	-9,3372567E-10	-0,831
-0,02	1,0799160E-10	9,3772743E-11	8,8678443E-01	-2,0046005E-09	-0,843
-0,03	1,2527648E-10	1,0653661E-10	1,4343391E+00	-3,2423627E-09	-0,854
-0,04	1,4634606E-10	1,2140020E-10	2,0718444E+00	-4,6834609E-09	-0,866
-0,05	1,7204370E-10	1,3856986E-10	2,8190321E+00	-6,3724992E-09	-0,878
-0,06	2,0339194E-10	1,5820993E-10	3,7000115E+00	-8,3639774E-09	-0,891
-0,07	2,4162916E-10	1,8041835E-10	4,7441963E+00	-1,0724386E-08	-0,904
-0,08	2,8825422E-10	2,0520145E-10	5,9874215E+00	-1,3534730E-08	-0,918
-0,09	3,4508079E-10	2,3245153E-10	7,4732936E+00	-1,6893585E-08	-0,932
-0,1	4,1430354E-10	2,6193170E-10	9,2548220E+00	-2,0920779E-08	-0,948
-0,11	4,9857889E-10	2,9327228E-10	1,1396396E+01	-2,5761866E-08	-0,964
-0,12	6,0112326E-10	3,2598218E-10	1,3976183E+01	-3,1593544E-08	-0,982
-0,13	7,2583275E-10	3,5947588E-10	1,7089032E+01	-3,8630225E-08	-1,001
-0,14	8,7742855E-10	3,9311361E-10	2,0850010E+01	-4,7132017E-08	-1,022
-0,15	1,0616335E-09	4,2624936E-10	2,5398679E+01	-5,7414410E-08	-1,046
-0,16	1,2853867E-09	4,5827919E-10	3,0904307E+01	-6,9860033E-08	-1,072
-0,17	1,5571033E-09	4,8868258E-10	3,7572177E+01	-8,4932936E-08	-1,102
-0,18	1,8869905E-09	5,1705123E-10	4,5651256E+01	-1,0319591E-07	-1,136
-0,19	2,2874299E-09	5,4310286E-10	5,5443498E+01	-1,2533155E-07	-1,175
-0,2	2,7734421E-09	5,6668052E-10	6,7315136E+01	-1,5216771E-07	-1,221
-0,21	3,3632495E-09	5,8774039E-10	8,1710385E+01	-1,8470856E-07	-1,274
-0,22	4,0789596E-09	6,0633234E-10	9,9168061E+01	-2,2417212E-07	-1,336
-0,23	4,9473931E-09	6,2257715E-10	1,2034176E+02	-2,7203584E-07	-1,409
-0,24	6,0010893E-09	6,3664407E-10	1,4602431E+02	-3,3009194E-07	-1,496
-0,25	7,2795251E-09	6,4873074E-10	1,7717748E+02	-4,0051455E-07	-1,599
-0,26	8,8305937E-09	6,5904692E-10	2,1496799E+02	-4,8594104E-07	-1,721
-0,27	1,0712399E-08	6,6780205E-10	2,6081121E+02	-5,8957089E-07	-1,868
-0,28	1,2995433E-08	6,7519661E-10	3,1642415E+02	-7,1528545E-07	-2,044
-0,29	1,5765214E-08	6,8141672E-10	3,8388979E+02	-8,6779337E-07	-2,255
-0,3	1,9125494E-08	6,8663106E-10	4,6573508E+02	-1,0528069E-06	-2,510
-0,31	2,3202139E-08	6,9098976E-10	5,6502563E+02	-1,2772559E-06	-2,816
-0,32	2,8147850E-08	6,9462453E-10	6,8548048E+02	-1,5495474E-06	-3,185
-0,33	3,4147879E-08	6,9764958E-10	8,3161143E+02	-1,8798804E-06	-3,631
-0,34	4,1426971E-08	7,0016301E-10	1,0088920E+03	-2,2806281E-06	-4,170
-0,35	5,0257776E-08	7,0224848E-10	1,2239626E+03	-2,7668010E-06	-4,822
-0,36	6,0971070E-08	7,0397688E-10	1,4848790E+03	-3,3566096E-06	-5,610

-0,37	7,3968139E-08	7,0540800E-10	1,8014142E+03	-4,0721462E-06	-6,565
-0,38	8,9735812E-08	7,0659204E-10	2,1854247E+03	-4,9402125E-06	-7,720
-0,39	1,0886469E-07	7,0757102E-10	2,6512942E+03	-5,9933232E-06	-9,120
-0,4	1,3207130E-07	7,0838003E-10	3,2164727E+03	-7,2709246E-06	-10,817
-0,41	1,6022486E-07	7,0904828E-10	3,9021298E+03	-8,8208714E-06	-12,872
-0,42	1,9437992E-07	7,0960005E-10	4,7339482E+03	-1,0701220E-05	-15,364
-0,43	2,3581583E-07	7,1005552E-10	5,7430850E+03	-1,2982401E-05	-18,385
-0,44	2,8608463E-07	7,1043140E-10	6,9673392E+03	-1,5749861E-05	-22,048
-0,45	3,4706924E-07	7,1074153E-10	8,4525674E+03	-1,9107260E-05	-26,489
-0,46	4,2105394E-07	7,1099737E-10	1,0254401E+04	-2,3180355E-05	-31,875
-0,47	5,1080995E-07	7,1120839E-10	1,2440332E+04	-2,8121712E-05	-38,407
-0,48	6,1969926E-07	7,1138243E-10	1,5092238E+04	-3,4116416E-05	-46,329
-0,49	7,5180049E-07	7,1152595E-10	1,8309449E+04	-4,1389012E-05	-55,937
-0,5	9,1206174E-07	7,1164430E-10	2,2212474E+04	-5,0211905E-05	-67,592
-0,51	1,1064859E-06	7,1174188E-10	2,6947506E+04	-6,0915575E-05	-81,730
-0,52	1,3423554E-06	7,1182234E-10	3,2691904E+04	-7,3900945E-05	-98,878
-0,53	1,6285052E-06	7,1188867E-10	3,9660836E+04	-8,9654405E-05	-119,681
-0,54	1,9756535E-06	7,1194335E-10	4,8115334E+04	-1,0876603E-04	-144,915
-0,55	2,3968034E-06	7,1198844E-10	5,8372076E+04	-1,3195168E-04	-175,527
-0,56	2,9077299E-06	7,1202560E-10	7,0815248E+04	-1,6007981E-04	-212,662
-0,57	3,5275704E-06	7,1205624E-10	8,5910930E+04	-1,9420401E-04	-257,711
-0,58	4,2795424E-06	7,1208150E-10	1,0422456E+05	-2,3560247E-04	-312,361
-0,59	5,1918122E-06	7,1210232E-10	1,2644210E+05	-2,8582583E-04	-378,658
-0,6	6,2985504E-06	7,1211948E-10	1,5339575E+05	-3,4675530E-04	-459,086
-0,61	7,6412120E-06	7,1213363E-10	1,8609512E+05	-4,2067311E-04	-556,657
-0,62	9,2700887E-06	7,1214529E-10	2,2576500E+05	-5,1034797E-04	-675,025
-0,63	1,1246193E-05	7,1215490E-10	2,7389131E+05	-6,1913881E-04	-818,623
-0,64	1,3643543E-05	7,1216282E-10	3,3227670E+05	-7,5112059E-04	-992,829
-0,65	1,6551936E-05	7,1216936E-10	4,0310811E+05	-9,1123692E-04	-1204,170
-0,66	2,0080311E-05	7,1217474E-10	4,8903864E+05	-1,1054852E-03	-1460,559
-0,67	2,4360830E-05	7,1217918E-10	5,9328697E+05	-1,3411414E-03	-1771,601
-0,68	2,9553827E-05	7,1218284E-10	7,1975792E+05	-1,6270325E-03	-2148,945
-0,69	3,5853814E-05	7,1218585E-10	8,7318867E+05	-1,9738669E-03	-2606,726
-0,7	4,3496769E-05	7,1218834E-10	1,0593262E+06	-2,3946360E-03	-3162,090
-0,71	5,2768973E-05	7,1219039E-10	1,2851427E+06	-2,9051004E-03	-3835,838
-0,72	6,4017731E-05	7,1219208E-10	1,5590965E+06	-3,5243804E-03	-4653,207
-0,73	7,7664387E-05	7,1219347E-10	1,8914490E+06	-4,2756724E-03	-5644,813
-0,74	9,4220099E-05	7,1219462E-10	2,2946491E+06	-5,1871172E-03	-6847,797
-0,75	1,1430499E-04	7,1219556E-10	2,7837993E+06	-6,2928546E-03	-8307,219
-0,76	1,3867138E-04	7,1219634E-10	3,3772216E+06	-7,6343020E-03	-10077,744
-0,77	1,6823195E-04	7,1219698E-10	4,0971438E+06	-9,2617056E-03	-12225,689
-0,78	2,0409394E-04	7,1219751E-10	4,9705316E+06	-1,1236023E-02	-14831,509
-0,79	2,4760063E-04	7,1219795E-10	6,0300995E+06	-1,3631205E-02	-17992,810
-0,8	3,0038164E-04	7,1219831E-10	7,3155354E+06	-1,6536968E-02	-21828,003
-0,81	3,6441398E-04	7,1219861E-10	8,8749877E+06	-2,0062153E-02	-26480,742
-0,82	4,4209608E-04	7,1219885E-10	1,0766868E+07	-2,4338800E-02	-32125,302
-0,83	5,3633768E-04	7,1219905E-10	1,3062041E+07	-2,9527101E-02	-38973,111
-0,84	6,5066875E-04	7,1219922E-10	1,5846475E+07	-3,5821391E-02	-47280,665

-0,85	7,8937176E-04	7,1219936E-10	1,9224467E+07	-4,3457435E-02	-57359,138
-0,86	9,5764209E-04	7,1219947E-10	2,3322546E+07	-5,2721253E-02	-69586,036
-0,87	1,1617826E-03	7,1219956E-10	2,8294211E+07	-6,3959839E-02	-84419,338
-0,88	1,4094397E-03	7,1219964E-10	3,4325686E+07	-7,7594154E-02	-102414,653
-0,89	1,7098899E-03	7,1219970E-10	4,1642891E+07	-9,4134895E-02	-124246,025
-0,9	2,0743870E-03	7,1219976E-10	5,0519903E+07	-1,1420162E-01	-150731,188
-0,91	2,5165839E-03	7,1219980E-10	6,1289228E+07	-1,3854598E-01	-182862,188
-0,92	3,0530440E-03	7,1219983E-10	7,4354248E+07	-1,6807981E-01	-221842,551
-0,93	3,7038611E-03	7,1219986E-10	9,0204339E+07	-2,0390938E-01	-269132,352
-0,94	4,4934130E-03	7,1219989E-10	1,0943319E+08	-2,4737673E-01	-326502,915
-0,95	5,4512735E-03	7,1219991E-10	1,3276106E+08	-3,0011001E-01	-396103,154
-0,96	6,6133212E-03	7,1219992E-10	1,6106172E+08	-3,6408444E-01	-480540,071
-0,97	8,0230824E-03	7,1219994E-10	1,9539524E+08	-4,4169629E-01	-582976,397
-0,98	9,7333624E-03	7,1219995E-10	2,3704763E+08	-5,3585266E-01	-707249,066
-0,99	1,1808223E-02	7,1219996E-10	2,8757906E+08	-6,5008034E-01	-858012,930
-1	1,4325381E-02	7,1219996E-10	3,4888227E+08	-7,8865792E-01	-1040915,115

Conclusão

Legenda:

Pontos utilizados para plotar o gráfico $C_{tot} \times V_G$ da curva modelada, onde foi considerado valores de C_{tot} entre o intervalo de aproximadamente 10V e -10V de V_G .

Ponto de cruzamento entre $C_{Si min}$ e $C_{min M}$ para o qual $\psi_S = \psi_{S(inv)}$, onde a partir do valor máximo considerado para o potencial de superfície do silício que ocorre na inversão, considera-se Ctot= $C_{min M}$ para a estabilização do valor de C_{min} .

$V_{G}(V)$	$C_{m}(F)$	$C(V_G)(F)$
4	1,200000E-11	1,2000741E-11
3,9	1,220000E-11	1,2200779E-11
3,8	1,230000E-11	1,2300798E-11
3,7	1,240000E-11	1,2400818E-11
3,6	1,260000E-11	1,2600858E-11
3,5	1,2800000E-11	1,2800900E-11
3,4	1,290000E-11	1,2900921E-11
3,3	1,300000E-11	1,3000942E-11
3,2	1,3200000E-11	1,3200987E-11
3,1	1,3400000E-11	1,3401032E-11
3	1,3600000E-11	1,3601079E-11
2,9	1,3700000E-11	1,3701103E-11
2,8	1,3900000E-11	1,3901152E-11
2,7	1,400000E-11	1,4001177E-11
2,6	1,4300000E-11	1,4301254E-11
2,5	1,4500000E-11	1,4501308E-11
2,4	1,4700000E-11	1,4701363E-11
2,3	1,500000E-11	1,5001448E-11
2,2	1,5100000E-11	1,5101477E-11
2,1	1,5400000E-11	1,5401567E-11
2	1,5700000E-11	1,5701660E-11
1,9	1,600000E-11	1,6001757E-11
1,8	1,620000E-11	1,6201824E-11
1,7	1,660000E-11	1,6601962E-11
1,6	1,6800000E-11	1,6802034E-11
1,5	1,720000E-11	1,7202183E-11
1,4	1,7600000E-11	1,7602339E-11
1,3	1,800000E-11	1,8002502E-11
1,2	1,8400000E-11	1,8402673E-11
1,1	1,890000E-11	1,8902896E-11
1	1,940000E-11	1,9403132E-11
0,9	1,990000E-11	1,9903381E-11
0,8	2,060000E-11	2,0603751E-11
0,7	2,1200000E-11	2,1204088E-11
0,6	2,1900000E-11	2,1904507E-11
0,5	2,2800000E-11	2,2805086E-11
0,4	2,3600000E-11	2,3605640E-11
0,3	2,4600000E-11	2,4606388E-11
0,2	2,590000E-11	2,5907456E-11
0,1	2,7300000E-11	2,7308732E-11

Conclusão

0	2,900000E-11	2,9010468E-11
-0,1	3,100000E-11	3,1012787E-11
-0,2	3,3300000E-11	3,3315852E-11
-0,3	3,520000E-11	3,5218725E-11
-0,4	3,790000E-11	3,7923377E-11
-0,5	4,1800000E-11	4,1831370E-11
-0,6	4,7700000E-11	4,7746638E-11
-0,7	5,690000E-11	5,6979229E-11
-0,8	7,6100000E-11	7,6289959E-11
-0,9	1,2850000E-10	1,2942314E-10
-1	2,5580000E-10	2,6341224E-10
-1,1	4,1610000E-10	4,5266762E-10
-1,2	5,2740000E-10	6,1216519E-10
-1,3	5,9270000E-10	7,2708237E-10
-1,4	6,3070000E-10	8,0675352E-10
-1,5	6,5470000E-10	8,6460048E-10
-1,6	6,7010000E-10	9,0600932E-10
-1,7	6,8020000E-10	9,3551753E-10
-1,8	6,8710000E-10	9,5697304E-10
-1,9	6,9210000E-10	9,7328026E-10
-2	6,9560000E-10	9,8511907E-10
-2,1	6,9790000E-10	9,9310495E-10
-2,2	7,000000E-10	1,0005483E-09
-2,3	7,0160000E-10	1,0063217E-09
-2,4	7,0280000E-10	1,0107122E-09
-2,5	7,0370000E-10	1,0140402E-09
-2,6	7,0490000E-10	1,0185257E-09
-2,7	7,0590000E-10	1,0223068E-09
-2,8	7,0650000E-10	1,0245949E-09
-2,9	7,0730000E-10	1,0276687E-09
-3	7,0830000E-10	1,0315488E-09
-3,1	7,0890000E-10	1,0338976E-09
-3,2	7,0940000E-10	1,0358671E-09
-3,3	7,1000000E-10	1,0382451E-09
-3,4	7,1060000E-10	1,0406396E-09
-3,5	7,1110000E-10	1,0426477E-09
-3,6	7,1160000E-10	1,0446675E-09
-3,7	7,1180000E-10	1,0454787E-09
-3,8	7,1230000E-10	1,0475153E-09
-3,9	7,1230000E-10	1,0475153E-09
-4	7,1220000E-10	1,0471070E-09

a) $V_G = -3.5 \text{ V}; Y_c = 3.21 \ \mu\text{S}$

Parâmetros					
C _m	(pF)	712,2			
ω (r	ad/s)	6,28x10 ⁶			
Rs	(Ω)	104,23			
	Iterações de Newtor	-Raphson para C(V _G)			
$\mathbf{x}_{k} = \mathbf{C}(\mathbf{V}_{G})(\mathbf{F})$	x_{k+1}	$f(x_k)$	$f'(x_k)$		
1,0452476E-09	1,0452474E-09	-4,2090265E-39	-1,7052308E-23		
1,0452474E-09	1,0452474E-09	-3,0947864E-45 -1,7052283F			
1,0452474E-09	1,0452474E-09	-1,3018444E-47	-1,7052283E-23		
1,0452474E-09	1,0452474E-09	3,4030501E-48 -1,7052283E			
1,0452474E-09	1,0452474E-09	8,8768657E-48	-1,7052283E-23		
1,0452474E-09	1,0452474E-09	-1,3018444E-47	-1,7052283E-23		

b) $V_G = -1,07 V$; $Y_c = 3,21 \mu S$

Parâmetros				
Cm	(pF)	37.	5,8	
ω (r	ad/s)	6,28	x10 ⁶	
Rs	(Ω)	104	4,23	
	Iterações de Newtor	n-Raphson para C(V _G)		
$\mathbf{x}_{k} = \mathbf{C}(\mathbf{V}_{G})(\mathbf{F})$	x_{k+1}	$f(x_k)$	$f'(x_k)$	
4,0183155E-10	4,0183091E-10	-5,8118509E-40	-8,9596387E-25	
4,0183091E-10	4,0183091E-10	-3,6830140E-45 -8,9595252E		
4,0183091E-10	4,0183091E-10 4,0183091E-10		-8,9595252E-25	
4,0183091E-10	4,0183091E-10 3,3520092E-50 -8,95952		-8,9595252E-25	
4,0183091E-10	4,0183091E-10	-5,2008542E-50 -8,9595252E		
4,0183091E-10	4,0183091E-10	3,3520092E-50 -8,9595252E-25		

c) $V_G = 0 V$; $Y_c = 3,21 \mu S$

Parâmetros			
C _m (pF)		29,9	
ω (rad/s)		6,28x10 ⁶	
$R_{s}(\Omega)$		104,23	
Iterações de Newton-Raphson para C(V _G)			
$x_k = C(V_G)(F)$	x_{k+1}	$f(x_k)$	$f'(x_k)$
2,9920935E-11	2,9912220E-11	-2,7580288E-43	-3,1645099E-29

Conclusão

2,9912220E-11	2,9912209E-11	-3,2096662E-46	-3,1571461E-29
2,9912209E-11	2,9912209E-11	-4,3653717E-52	-3,1571375E-29
2,9912209E-11	2,9912209E-11	3,8820150E-55	-3,1571375E-29
2,9912209E-11	2,9912209E-11	-2,6464756E-55	-3,1571375E-29
2,9912209E-11	2,9912209E-11	6,1776968E-56	-3,1571375E-29
2,9912209E-11	2,9912209E-11	6,1776968E-56	-3,1571375E-29

d) $V_G = 0.5 V$; $Y_c = 3.21 \mu S$

Parâmetros				
C _m (pF)		22,4		
ω (r	ad/s)	6,28x10 ⁶		
Rs	(Ω)	104	4,23	
Iterações de Newton-Raphson para C(V _G)				
$x_k = C(V_G)(F)$	X _{k+1}	$f(x_k)$	$f'(x_k)$	
2,2444010E-11	2,2432399E-11	-1,1644529E-43	-1,0028786E-29	
2,2432399E-11	2,2432375E-11	-2,4048550E-46 -9,9873789E-30		
2,2432375E-11 2,2432375E-11		-1,0326201E-51	-9,9872931E-30	
2,2432375E-11	2,2432375E-11	-1,3691622E-56	-9,9872931E-30	
2,2432375E-11	2,2432375E-11	-1,3691622E-56	-9,9872931E-30	

e) $V_G = 1 V$; $Y_c = 3,21 \mu S$

Parâmetros				
C _m (pF)		19	9,7	
ω (r	ad/s)	6,28	x10 ⁶	
R _s	(Ω)	104	4,23	
	Iterações de Newtor	n-Raphson para C(V _G)		
$\mathbf{x}_{k} = \mathbf{C}(\mathbf{V}_{G})(\mathbf{F})$	X _{k+1}	$f(x_k)$	$f'(x_k)$	
1,9725985E-11	1,9712780E-11	-7,9064182E-44	-5,9874590E-30	
1,9712780E-11	1,9712745E-11	-2,1116876E-46	-5,9554918E-30	
1,9712745E-11	1,9712745E-11	-1,5194968E-51	-5,9554061E-30	
1,9712745E-11 1,9712745E-11		-1,2337965E-56	-5,9554061E-30	
1,9712745E-11	1,9712745E-11	-1,2298138E-56	-5,9554061E-30	
1,9712745E-11	1,9712745E-11	2,8514885E-56	-5,9554061E-30	
1,9712745E-11	1,9712745E-11	-1,2298138E-56	-5,9554061E-30	

f) $V_G = 1,5 V; Y_c = 3,21 \mu S$

Parâmetros			
Cm	(pF)	17,4	
ω (rad/s)			x10 ⁶
$R_{s}(\Omega)$		104,23	
Iterações de Newton-Raphson para C(V _G)			
$x_k = C(V_G)(F)$ x_{k+1} $f(x_k)$ $f'(x_k)$			$f'(x_k)$

Conclusão

1, 7461253E-11	1,7446344E-11	-5,4843045E-44	-3,6784223E-30
1,7446344E-11	1,7446293E-11	-1,8670710E-46	-3,6533927E-30
1,7446293E-11	1,7446293E-11	-2,1880375E-51	-3,6533071E-30
1,7446293E-11	1,7446293E-11	-1,4272411E-56	-3,6533071E-30
1,7446293E-11	1,7446293E-11	-4,0467525E-57	-3,6533071E-30
1,7446293E-11	1,7446293E-11	-4,0467525E-57	-3,6533071E-30

g) $V_G = 2 V$; $Y_c = 3,21 \mu S$

Parâmetros				
C _m (pF)		15,9		
ω (r	ω (rad/s)		x10 ⁶	
Rs	$R_{s}(\Omega)$		104,23	
Iterações de Newton-Raphson para C(V _G)				
$\mathbf{x}_{k} = \mathbf{C}(\mathbf{V}_{G})(\mathbf{F})$	\mathbf{x}_{k+1}	$f(x_k)$	$f'(x_k)$	
1,5876079E-11	1,5859690E-11	-4,1223513E-44	-2,5152773E-30	
1,5859690E-11	1,5859622E-11	-1,6956145E-46	-2,4946015E-30	
1,5859622E-11	1,5859622E-11	-2,9074507E-51 -2,4945160E-30		
1,5859622E-11	1,5859622E-11	4,0353177E-57	-2,4945160E-30	
1,5859622E-11	1,5859622E-11	-1,1293214E-56	-2,4945160E-30	
1,5859622E-11	1,5859622E-11	4,0353177E-57	-2,4945160E-30	

h) $V_G = 2,5 V; Y_c = 3,21 \mu S$

Parâmetros				
$C_{m}(pF)$		15	5,0	
ω (r	rad/s)	6,28	x10 ⁶	
R _s	(Ω)	104	4,23	
Iterações de Newton-Raphson para C(V _G)				
$\mathbf{x}_{k} = \mathbf{C}(\mathbf{V}_{G})(\mathbf{F})$	X _{k+1}	$f(x_k)$	$f'(x_k)$	
1,4970313E-11	1,4952938E-11	-3,4563549E-44	-1,9893645E-30	
1,4952938E-11	1,4952857E-11	-1,5975332E-46 -1,9709907E-3		
1,4952857E-11 1,4952857E-11		-3,4646172E-51	-1,9709052E-30	
1,4952857E-11	1,4952857E-11	-1,9641251E-58	-1,9709052E-30	
1,4952857E-11	1,4952857E-11	-1,9641251E-58	-1,9709052E-30	

i) $V_G = 3 V; Y_c = 3,21 \mu S$

Parâmetros				
C _m (pF)		13,4		
ω (rad/s)		6,28x10 ⁶		
$R_{s}(\Omega)$		104,23		
Iterações de Newton-Raphson para C(V _G)				
$\mathbf{x}_{k} = \mathbf{C}(\mathbf{V}_{G}) (\mathbf{F}) \qquad \qquad \mathbf{x}_{k+1}$		$f(x_k)$	$f'(x_k)$	
1,3385296E-11	1,3365881E-11	-2,4707370E-44	-1,2726197E-30	

Conclusão

1,3365881E-11	1,3365768E-11	-1,4256547E-46	-1,2579492E-30
1,3365768E-11	1,3365768E-11	-4,8368639E-51	-1,2578639E-30
1,3365768E-11	1,3365768E-11	-2,8619055E-57	-1,2578639E-30
1,3365768E-11	1,3365768E-11	-3,0300164E-58	-1,2578639E-30
1,3365768E-11	1,3365768E-11	-3,0300164E-58	-1,2578639E-30

j) $V_G = 3,5 V; Y_c = 3,21 \mu S$

Parâmetros				
C _m (pF)		12,5		
ω (r	ad/s)	6,28	x10 ⁶	
$R_{s}\left(\Omega ight)$		104,23		
	Iterações de Newtor	-Raphson para C(V _G)		
$\mathbf{x}_{k} = \mathbf{C}(\mathbf{V}_{G})(\mathbf{F})$	\mathbf{x}_{k+1}	$f(x_k)$	$f'(x_k)$	
1,2479611E-11	1,2458801E-11	-2,0024173E-44	-9,6224101E-31	
1,2458801E-11	1,2458661E-11	-1,3272698E-46	-9,4950083E-31	
1,2458661E-11 1,2458661E-11		-5,9588535E-51	-9,4941558E-31	
1,2458661E-11	1,2458661E-11	-2,5340320E-57	-9,4941557E-31	
1,2458661E-11	1,2458661E-11	3,2339507E-59	-9,4941557E-31	
1,2458661E-11	1,2458661E-11	3,2339507E-59	-9,4941557E-31	

k) $V_G = 4 V$; $Y_c = 3,21 \mu S$

Parâmetros				
C _m (pF)		12	2,5	
ω (r	ad/s)	6,28x10 ⁶		
Rs	$R_{s}\left(\Omega ight)$		104,23	
Iterações de Newton-Raphson para C(V _G)				
$\mathbf{x}_{k} = \mathbf{C}(\mathbf{V}_{G})(\mathbf{F})$	x _{k+1}	$f(x_k)$	$f'(x_k)$	
1,2479611E-11	1,2458801E-11	-2,0024173E-44	-9,6224101E-31	
1,2458801E-11	1,2458661E-11	-1,3272698E-46	-9,4950083E-31	
1,2458661E-11 1,2458661E-11		-5,9588535E-51	-9,4941558E-31	
1,2458661E-11	1,2458661E-11	-2,5340320E-57	-9,4941557E-31	
1,2458661E-11	1,2458661E-11	3,2339507E-59	-9,4941557E-31	
1,2458661E-11	1,2458661E-11	3,2339507E-59	-9,4941557E-31	

Legenda:



Valores convergidos de C(V_G).

$\begin{array}{l} \textbf{APÊNDICE E - Tabela de variação de Y_c com os valores que convergem na iteração numérica \\ de Newton-Raphson utilizada no modelo para o cálculo de C(V_G) em função \\ da admitância no dispositivo \end{array}$

$Y_{c}(S)$	$C(V_G = -3,5V)$ (F)	$C(V_G = -1.07V)$ (F)	$C(V_G = 0V)(F)$	$C(V_G = 0.5V)$ (F)	$C(V_G = 1V)(F)$
0	1,0452476E-09	4,0183155E-10	2,9920935E-11	2,2444010E-11	1,9725985E-11
1,00E-07	1,0452476E-09	4,0183155E-10	2,9920927E-11	2,2443999E-11	1,9725972E-11
1,00E-06	1,0452476E-09	4,0183149E-10	2,9920089E-11	2,2442882E-11	1,9724701E-11
3,21E-06	1,0452474E-09	4,0183091E-10	2,9912209E-11	2,2432375E-11	1,9712745E-11
1,00E-05	1,0452452E-09	4,0182526E-10	2,9836037E-11	2,2330577E-11	1,9596728E-11
1,50E-05	1,0452422E-09	4,0181739E-10	2,9729229E-11	2,2187136E-11	1,9432701E-11
2,00E-05	1,0452380E-09	4,0180637E-10	2,9578386E-11	2,1983107E-11	1,9198224E-11
2,50E-05	1,0452326E-09	4,0179221E-10	2,9382127E-11	2,1714957E-11	1,8887805E-11
3,00E-05	1,0452261E-09	4,0177489E-10	2,9138567E-11	2,1377606E-11	1,8493255E-11
3,10E-05	1,0452246E-09	4,0177105E-10	2,9083971E-11	2,1301246E-11	1,8403267E-11
3,50E-05	1,0452183E-09	4,0175442E-10	2,8845215E-11	2,0963870E-11	1,8002349E-11
3,65E-05	1,0452157E-09	4,0174767E-10	2,8747039E-11	2,0823425E-11	1,7891110E-11
4,00E-05	1,0452093E-09	4,0173080E-10	2,8498836E-11	2,0463494E-11	1,7396272E-11
4,42E-05	1,0452008E-09	4,0170853E-10	2,8163865E-11	1,9965423E-11	1,6776207E-11
4,50E-05	1,0451991E-09	4,0170403E-10	2,8095236E-11	1,9861437E-11	1,6644214E-11
4,81E-05	1,0451922E-09	4,0168585E-10	2,7813935E-11	1,9427446E-11	1,6081869E-11
5,00E-05	1,0451877E-09	4,0167411E-10	2,7628946E-11	1,9134525E-11	1,5689925E-11
5,40E-05	1,0451778E-09	4,0164790E-10	2,7205999E-11	1,8438003E-11	1,4701980E-11
5,50E-05	1,0451752E-09	4,0164103E-10	2,7092741E-11	1,8244088E-11	1,4407749E-11
6,00E-05	1,0451614E-09	4,0160480E-10	2,6476860E-11	1,7116480E-11	1,2330791E-11
6,15E-05	1,0451570E-09	4,0159331E-10	2,6274657E-11	1,6710941E-11	1,1076937E-11
6,50E-05	1,0451464E-09	4,0156540E-10	2,5767688E-11	1,5570975E-11	3,5875669E-14
7,00E-05	1,0451302E-09	4,0152285E-10	2,4945368E-11	1,2569548E-11	3,7912168E-14
7,10E-04	1,0451268E-09	4,0151396E-10	2,4764890E-11	4,3622633E-14	3,8316417E-14
7,50E-05	1,0451129E-09	4,0147713E-10	2,3979003E-11	4,5451053E-14	3,9924083E-14
8,00E-05	1,0450943E-09	4,0142825E-10	2,2815610E-11	4,7714666E-14	4,1914326E-14
8,50E-05	1,0450745E-09	4,0137620E-10	2,1348432E-11	4,9956534E-14	4,3885382E-14
9,00E-05	1,0450536E-09	4,0132099E-10	1,9278169E-11	5,2179077E-14	4,5839390E-14
9,40E-05	1,0450359E-09	4,0127453E-10	1,4980587E-11	5,3944621E-14	4,7391579E-14
9,50E-05	1,0450314E-09	4,0126260E-10	7,2606642E-14	5,4384400E-14	4,7778209E-14
1,00E-04	1,0450080E-09	4,0120104E-10	7,5523400E-14	5,6574345E-14	4,9703464E-14
2,00E-04	1,0442886E-09	3,9929748E-10	1,3176396E-13	9,8783099E-14	8,6806250E-14
3,00E-04	1,0430873E-09	3,9608368E-10	1,8759611E-13	1,4067286E-13	1,2362547E-13
4,00E-04	1,0414009E-09	3,9149347E-10	2,4525835E-13	1,8393165E-13	1,6164699E-13
5,00E-04	1,0392247E-09	3,8542430E-10	3,0572808E-13	2,2929469E-13	2,0151750E-13
6,00E-04	1,0365525E-09	3,7772415E-10	3,6958600E-13	2,7719830E-13	2,4362066E-13
7,00E-04	1,0333767E-09	3,6816829E-10	4,3723947E-13	3,2794839E-13	2,8822543E-13
8,00E-04	1,0296878E-09	3,5641556E-10	5,0900386E-13	3,8178169E-13	3,3553991E-13
9,00E-04	1,0254748E-09	3,4191875E-10	5,8513846E-13	4,3889278E-13	3,8573515E-13
1,00E-03	1,0207246E-09	3,2371194E-10	6,6586433E-13	4,9944756E-13	4,3895697E-13

a) $V_G = -3.5 V a 1 V$

Conclusão

2,00E-03	9,3869831E-10	2,3830293E-11	1,7592526E-12	1,3196115E-12	1,1597975E-12
3,00E-03	7,4374047E-10	4,6541942E-11	3,4350605E-12	2,5766250E-12	2,2645764E-12
4,00E-03	2,2802367E-10	7,8041585E-11	5,7349966E-12	4,3017507E-12	3,7807644E-12
5,00E-03	3,6488329E-10	1,1882502E-10	8,6741073E-12	6,5062390E-12	5,7182400E-12
6,00E-03	1,0442439E-09	1,7181039E-10	1,1848307E-11	9,4007447E-12	8,3242632E-12
6,90E-03	1,0288238E-09	2,2373472E-10	1,6038095E-11	1,2029297E-11	1,0572250E-11

b) $V_G = 1,5 V a 2,5 V$

$Y_{c}(S)$	$C(V_G = 1,5V)$ (F)	$C(V_G = 2V) (F)$	$C(V_G = 2,5V)$ (F)
0	1,7461253E-11	1,5876079E-11	1,4970313E-11
1,00E-07	1,7461239E-11	1,5876063E-11	1,4970296E-11
1,00E-06	1,7459802E-11	1,5874484E-11	1,4968620E-11
3,21E-06	1,7446293E-11	1,5859622E-11	1,4952857E-11
1,00E-05	1,7314962E-11	1,5714893E-11	1,4799152E-11
1,50E-05	1,7128515E-11	1,5508586E-11	1,4579398E-11
2,00E-05	1,6860310E-11	1,5209929E-11	1,4259776E-11
2,50E-05	1,6501884E-11	1,4806888E-11	1,3825201E-11
3,00E-05	1,6039979E-11	1,4279590E-11	1,3249733E-11
3,10E-05	1,5933507E-11	1,4156570E-11	1,3114117E-11
3,50E-05	1,5453298E-11	1,3593385E-11	1,2484958E-11
3,65E-05	1,5248114E-11	1,3347871E-11	1,2205469E-11
4,00E-05	1,4705197E-11	1,2679780E-11	1,1422057E-11
4,42E-05	1,3901479E-11	1,1615856E-11	1,0042777E-11
4,50E-05	1,3723637E-11	1,1361309E-11	9,6609004E-12
4,81E-05	1,2928199E-11	1,0037621E-11	2,1793767E-14
5,00E-05	1,2322050E-11	2,3780116E-14	2,2418213E-14
5,40E-05	1,0267185E-11	2,5157777E-14	2,3717490E-14
5,50E-05	2,8055874E-14	2,5498991E-14	2,4039286E-14
6,00E-05	2,9912683E-14	2,7187691E-14	2,5631868E-14
6,15E-05	3,0463967E-14	2,7689053E-14	2,6104688E-14
6,50E-05	3,1740893E-14	2,8850329E-14	2,7199846E-14
7,00E-05	3,3544199E-14	3,0490275E-14	2,8746402E-14
7,10E-04	3,3902151E-14	3,0815797E-14	2,9053384E-14
7,50E-05	3,5325673E-14	3,2110333E-14	3,0274186E-14
8,00E-05	3,7087907E-14	3,3712864E-14	3,1785426E-14
8,50E-05	3,8833108E-14	3,5299881E-14	3,3282025E-14
9,00E-05	4,0563177E-14	3,6873117E-14	3,4765617E-14
9,40E-05	4,1937454E-14	3,8122802E-14	3,5944087E-14
9,50E-05	4,2279765E-14	3,8434077E-14	3,6237623E-14
1,00E-04	4,3984318E-14	3,9984076E-14	3,7699286E-14
2,00E-04	7,6830982E-14	6,9850909E-14	6,5863175E-14
3,00E-04	1,0942457E-13	9,9486472E-14	9,3808407E-14
4,00E-04	1,4308182E-13	1,3008877E-13	1,2266505E-13
5,00E-04	1,7837548E-13	1,6217878E-13	1,5292444E-13
6,00E-04	2,1564532E-13	1,9606547E-13	1,8487796E-13
7,00E-04	2,5512944E-13	2, 3196537E-13	2,1872981E-13

2,9701212E-13 2,7004604E-13 2,5463798E-13 8,00E-04 9,00E-04 3,4144475E-13 3,1044514E-13 2,9273230E-13 3,5328005E-13 1,00E-03 3,8855644E-13 3,3312345E-13 2,00E-03 1,0266379E-12 9,3343516E-13 8,8017947E-13 2,0045730E-12 1,8225883E-12 1,7186031E-12 3,00E-03 3,3466745E-12 3,0428430E-12 2,8692356E-12 4,00E-03 4,3395639E-12 5,00E-03 5,0616810E-12 4,6021409E-12 7,3458441E-12 6,2697758E-12 6,0741465E-12 6,00E-03 8,5086122E-12 9,3582788E-12 8,0231265E-12 6,90E-03

Conclusão

c) $V_G = 3 V a 4 V$

$Y_{c}(S)$	$C(V_G = 3V) (F)$	$C(V_G = 3,5V) (F)$	$C(V_G = 4V) (F)$	
0	1,3385296E-11	1,2479611E-11	1,2479611E-11	
1,00E-07	1,3385277E-11	1,2479591E-11	1,2479591E-11	
1,00E-06	1,3383403E-11	1,2477581E-11	1,2477581E-11	
3,21E-06	1,3365768E-11	1,2458661E-11	1,2458661E-11	
1,00E-05	1,3193302E-11	1,2273225E-11	1,2273225E-11	
1,50E-05	1,2945025E-11	1,2004861E-11	1,2004861E-11	
2,00E-05	1,2579874E-11	1,1606655E-11	1,1606655E-11	
2,50E-05	1,2074109E-11	1,1046443E-11	1,1046443E-11	
3,00E-05	1,1382457E-11	1,0257011E-11	1,0257011E-11	
3,10E-05	1,1214723E-11	1,0059858E-11	1,0059858E-11	
3,50E-05	1,0402362E-11	9,0514983E-12	9,0514983E-12	
3,65E-05	1,0016097E-11	8,5177323E-12	8,5177323E-12	
4,00E-05	8,7573881E-12	1,5885214E-14	1,5885214E-14	
4,42E-05	1,8317629E-14	1,7074339E-14	1,7074339E-14	
4,50E-05	1,8557497E-14	1,7298016E-14	1,7298016E-14	
4,81E-05	1,9478685E-14	1,8157012E-14	1,8157012E-14	
5,00E-05	2,0037177E-14	1,8677792E-14	1,8677792E-14	
5,40E-05	2,1199197E-14	1,9761335E-14	1,9761335E-14	
5,50E-05	2,1486993E-14	2,0029692E-14	2,0029692E-14	
6,00E-05	2,2911280E-14	2,1357765E-14	2,1357765E-14	
6,15E-05	2,3334128E-14	2,1752045E-14	2,1752045E-14	
6,50E-05	2,4313526E-14	2,2665268E-14	2,2665268E-14	
7,00E-05	2,5696586E-14	2,3954866E-14	2,3954866E-14	
7,10E-04	2,5971111E-14	2,4210838E-14	2,4210838E-14	
7,50E-05	2,7062832E-14	2,5228774E-14	2,5228774E-14	
8,00E-05	2,8414263E-14	2,6488860E-14	2,6488860E-14	
8,50E-05	2,9752584E-14	2,7736713E-14	2,7736713E-14	
9,00E-05	3,1079259E-14	2,8973700E-14	2,8973700E-14	
9,40E-05	3,2133075E-14	2,9956269E-14	2,9956269E-14	
9,50E-05	3,2395561E-14	3,0201009E-14	3,0201009E-14	
1,00E-04	3,3702602E-14	3,1419677E-14	3,1419677E-14	
2,00E-04	5,8886048E-14	5,4899861E-14	5,4899861E-14	
3,00E-04	8,3873153E-14	7,8196583E-14	7,8196583E-14	
4.00E-04	1,0967492E-13	1,0225272E-13	1,0225272E-13	
Continua				

129

6,00E-041,6530138E-131,5411559E-131,5411559E-7,00E-041,9556926E-131,8233554E-131,8233554E-8,00E-042,2767571E-132,1226966E-132,1226966E-9,00E-042,6173682E-132,4402616E-132,4402616E-1,00E-032,9785156E-132,7769733E-132,7769733E-2,00E-037,8698687E-137,3373651E-137,3373651E-3,00E-031,5366385E-121,4326638E-121,4326638E-4,00E-032,5654396E-122,3918508E-122,3918508E-5,00E-033,8800818E-123,6175352E-123,6175352E-6,00E-035,5850972E-125,2916830E-124,9982797E-	6,90E-03	7,1735874E-12	6,6881687E-12	6,6881687E-12
6,00E-041,6530138E-131,5411559E-131,5411559E-7,00E-041,9556926E-131,8233554E-131,8233554E-8,00E-042,2767571E-132,1226966E-132,1226966E-9,00E-042,6173682E-132,4402616E-132,4402616E-1,00E-032,9785156E-132,7769733E-132,7769733E-2,00E-037,8698687E-137,3373651E-137,3373651E-3,00E-031,5366385E-121,4326638E-121,4326638E-4,00E-032,5654396E-122,3918508E-122,3918508E-5,00E-033,8800818E-123,6175352E-123,6175352E-	6,00E-03	5,5850972E-12	5,2916830E-12	4,9982797E-12
6,00E-041,6530138E-131,5411559E-131,5411559E-7,00E-041,9556926E-131,8233554E-131,8233554E-8,00E-042,2767571E-132,1226966E-132,1226966E-9,00E-042,6173682E-132,4402616E-132,4402616E-1,00E-032,9785156E-132,7769733E-132,7769733E-2,00E-037,8698687E-137,3373651E-137,3373651E-3,00E-031,5366385E-121,4326638E-121,4326638E-4,00E-032,5654396E-122,3918508E-122,3918508E-	5,00E-03	3,8800818E-12	3,6175352E-12	3,6175352E-12
6,00E-041,6530138E-131,5411559E-131,5411559E-7,00E-041,9556926E-131,8233554E-131,8233554E-8,00E-042,2767571E-132,1226966E-132,1226966E-9,00E-042,6173682E-132,4402616E-132,4402616E-1,00E-032,9785156E-132,7769733E-132,7769733E-2,00E-037,8698687E-137,3373651E-137,3373651E-3,00E-031,5366385E-121,4326638E-121,4326638E-	4,00E-03	2,5654396E-12	2,3918508E-12	2,3918508E-12
6,00E-041,6530138E-131,5411559E-131,5411559E-7,00E-041,9556926E-131,8233554E-131,8233554E-8,00E-042,2767571E-132,1226966E-132,1226966E-9,00E-042,6173682E-132,4402616E-132,4402616E-1,00E-032,9785156E-132,7769733E-132,7769733E-2,00E-037,8698687E-137,3373651E-137,3373651E-	3,00E-03	1,5366385E-12	1,4326638E-12	1,4326638E-12
6,00E-041,6530138E-131,5411559E-131,5411559E-7,00E-041,9556926E-131,8233554E-131,8233554E-8,00E-042,2767571E-132,1226966E-132,1226966E-9,00E-042,6173682E-132,4402616E-132,4402616E-1,00E-032,9785156E-132,7769733E-132,7769733E-	2,00E-03	7,8698687E-13	7,3373651E-13	7,3373651E-13
6,00E-041,6530138E-131,5411559E-131,5411559E-7,00E-041,9556926E-131,8233554E-131,8233554E-8,00E-042,2767571E-132,1226966E-132,1226966E-9,00E-042,6173682E-132,4402616E-132,4402616E-	1,00E-03	2,9785156E-13	2,7769733E-13	2,7769733E-13
6,00E-041,6530138E-131,5411559E-131,5411559E-7,00E-041,9556926E-131,8233554E-131,8233554E-8,00E-042,2767571E-132,1226966E-132,1226966E-	9,00E-04	2,6173682E-13	2,4402616E-13	2,4402616E-13
6,00E-041,6530138E-131,5411559E-131,5411559E-7,00E-041,9556926E-131,8233554E-131,8233554E-	8,00E-04	2,2767571E-13	2,1226966E-13	2,1226966E-13
6,00E-04 1,6530138E-13 1,5411559E-13 1,5411559E-	7,00E-04	1,9556926E-13	1,8233554E-13	1,8233554E-13
	6,00E-04	1,6530138E-13	1,5411559E-13	1,5411559E-13
5,00E-04 1,3673080E-13 1,2747807E-13 1,2747807E-	5,00E-04	1,3673080E-13	1,2747807E-13	1,2747807E-13

Conclusão

Legenda:

Valores convergidos de $C(V_G)$ considerados para a modelagem e ajuste da curva C-V com maior foco na região de inversão.

Admitância Yc ajustada correspondente a cada capacitância convergida em todos os pontos determinados de V_{G} .