UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

MARCOS NORIO WATANABE

FABRICAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM
ELÉTRICA DE CÉLULAS SOLARES MOS PARA APLICAÇÃO
EM *ENERGY HARVESTING*

SÃO PAULO

2020

MARCOS NORIO WATANABE

**FABRICAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM
ELÉTRICA DE CÉLULAS SOLARES MOS PARA APLICAÇÃO
EM *ENERGY HARVESTING***

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo (EPUSP) para obtenção do
título de Mestre em Ciências

SÃO PAULO

2020

MARCOS NORIO WATANABE

FABRICAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM
ELÉTRICA DE CÉLULAS SOLARES MOS PARA APLICAÇÃO
EM *ENERGY HARVESTING*

Versão Corrigida

(Versão original encontra-se na unidade que aloja o Programa
de Pós-graduação)

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo (EPUSP) para obtenção do
título de Mestre em Ciências

Área de concentração:
Microeletrônica

Orientador: Prof. Dr. Sebastião
Gomes dos Santos Filho

SÃO PAULO

2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Watanabe, Marcos Norio

Fabricação, caracterização e modelagem elétrica de células solares MOS para aplicação em energy harvesting / M. N. Watanabe -- versão corr. -- São Paulo, 2020.

127 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1.célula solar 2.modelagem elétrica 3.energy harvesting I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

Aos meus pais,

Jorge Watanabe

Ritsuko Rosa Kitagawa Watanabe

Agradecimentos

À minha família.

Ao professor Sebastião Gomes dos Santos Filho, pela orientação e apoio durante o andamento do projeto.

Aos companheiros de grupo (GSIDE) Verônica Christiano e William Chiappim Junior, pelas valiosas discussões e incentivo.

Aos companheiros de laboratório (LSI).

Ao Laboratório de Sistemas Integráveis da USP pela infraestrutura para o andamento do projeto.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo suporte financeiro) (código financeiro - 1747720).

Resumo

Neste trabalho foram fabricadas células solares MOS com estruturas Al/SiOxNy/Si-p e Al/Mg/SiOxNy/Si-p sobre substratos com resistividade entre (0,01 e 10) $\Omega\cdot\text{cm}$, espessura do dielétrico de porta entre (1,65 e 2,23) nm e área total de 3,24 cm^2 . O dielétrico de porta foi obtido através do processo RTP (*Rapid Thermal Processing*) em um forno convencional na temperatura de 850 °C para gases de processo fluindo na proporção 5 N₂ : 1 O₂ (2 L/min de N₂ e 0,4 L/min de O₂). As células solares apresentaram densidade de correntes de escuro (J_0) na faixa de ($\sim 2,25 \times 10^{-10}$ – $6,25 \times 10^{-6}$) A/cm² e obteve-se menores valores de J_0 para as células com porta de magnésio. As células solares MOS foram iluminadas com lâmpadas LED e halógena com finalidade de simular o efeito produzido em iluminação nos ambientes internos com potência incidente em mW/cm² para aplicações de “*solar energy harvesting*”. Para exposições por LED em potência incidida de 5,1 mW/cm² foi possível observar melhores parâmetros de densidade de corrente de curto-circuito (J_{SC}) de $\sim 0,4$ mA/cm² e potência máxima gerada (P_{max}) de ~ 53 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (rendimento - $\eta = 1,05\%$). Por meio de exposições por lâmpada halógena e com potência incidida de 11,7 mW/cm² foi possível adquirir melhores valores de J_{SC} de $\sim 8,7$ mA/cm² e P_{max} de $\sim 2,13$ mW ($\eta = \sim 18\%$). Foi mostrado para iluminação por LED que o parâmetro J_{SC} aumenta com a espessura do dielétrico de porta e para iluminação por lâmpada halógena, o comportamento mostrou-se o oposto daquele apresentado no caso de iluminação por LED (J_{SC} diminui com a espessura do dielétrico de porta) sendo que a tensão de circuito aberto (V_{OC}) não varia de forma significativa. Observou-se também que a mudança do metal de porta do alumínio para o magnésio propiciou melhoria em praticamente todos os parâmetros fotovoltaicos. Finalmente, foi desenvolvido um modelo elétrico compacto com parâmetros físicos e matemáticos para ajustar a característica J-V de células solares MOS composto de resistências parasitárias em série e paralelo, e pelas componentes de corrente de tunelamento direto e de Fowler-Nordheim.

Palavras-Chave: célula solar MOS, modelagem elétrica, Energy Harvesting.

Abstract

In this work MOS solar cells with Al/SiO_xN_y/Si-p and Al/Mg/SiO_xN_y/Si-p structures were made on substrates with resistivity between (0.01 and 10) Ω.cm, gate dielectric thickness between (1.65 and 2.23) nm and total area of 3.24 cm². The gate dielectric was obtained by the Rapid Thermal Processing (RTP) process in a conventional furnace at a temperature of 850°C for process gases flowing at a ratio of 5 N₂: 1 O₂ (2 L/min N₂ and 0.4 L/min O₂). Solar cells showed dark current density (J_0) in the range of $\sim 2.25 \times 10^{-10}$ to 6.25×10^{-6} A/cm² and lower J_0 values were obtained for cells with magnesium gate. MOS solar cells have been illuminated with LED and halogen lamps to simulate the effect produced in indoor lighting with incident power in mW/cm² for solar energy harvesting applications. For LED exposures at incident power of 5.1 mW/cm², it was possible to observe better parameters of short circuit current density (J_{SC}) of ~ 0.4 mA/cm² and maximum generated power (P_{max}) of ~ 53 μW/cm² (efficiency - $\eta = 1.05\%$). For halogen lamp exposures with an incident power of 11.7 mW/cm², it was possible to obtain better J_{SC} values of ~ 8.7 mA/cm² and P_{max} of ~ 2.13 mW ($\eta = \sim 18\%$). It has been shown for LED illumination that the J_{SC} parameter increases with the thickness of the gate dielectrics. For halogen lamp illumination, the behavior was the opposite of that presented in the case of LED illumination (J_{SC} decreases with gate dielectric thickness) and the open circuit voltage (V_{OC}) does not vary significantly. It was also observed that the change from aluminum to magnesium as metal gate provided improvement in all photovoltaic parameters. Finally, a compact electrical model with physical and mathematical parameters was developed to adjust the J-V characteristic of MOS solar cells, composed of series and parallel parasitic resistances, and the Fowler-Nordheim direct tunneling current components.

Keywords: MOS solar cell, electrical modeling, Energy Harvesting.

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Geração de energia elétrica por tipo de fonte de energia: carvão, gás natural e energias renováveis.	26
Figura 1.2 – Participação de células fotovoltaicas na demanda global de eletricidade de 2012 e 2017.	26
Figura 1.3 – Preços médio de leilão por data de comissionamento do projeto.	27
Figura 2.1 – Curva J-V típica de uma Célula Solar MOS. (a) curva J-V completa e (b) na região de geração.	32
Figura 2.2 – Célula fotovoltaica de junção PN.....	33
Figura 2.3 – Célula Solar MOS da NASA.....	34
Figura 2.4 – Células Solar MOS da primeira geração.	35
Figura 2.5 – Células Solar MOS da segunda geração.	36
Figura 2.6 – Célula fotovoltaica MOS GSIDE.....	37
Figura 2.7 – (a) Curvas C-V e G-V para células solares MOS de área $9 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ com oxinitreto de silício crescidos à 850°C , (b) gráficos de $\psi_s \times V_G$ e $Q_i / q \times V_G$ para os dielétricos de porta MOS.....	37
Figura 2.8 – Diagramas de faixas de energia do Tunelamento de Fowler- Nordheim (FN) – (a) e do tunelamento direto (DT) – (b).....	39
Figura 2.9 - Efeitos da luz em célula solar MOS sobre substrato P.	42
Figura 3.1 - Esquema do forno convencional adaptado para o forno RTP.....	46
Figura 3.2 - Perfil de temperatura obtido no forno RTP adaptado para a temperatura de 850°C e tempo de processo de 80 s.	47
Figura 3.3 - Espessuras obtidas por elipsometria no processo RTP para diferentes tempos de processo.	47
Figura 3.4 - Espectro XPS obtido de amostra crescida na temperatura de 850°C com os picos N-O e Si-O.....	48
Figura 3.5 - Sequência de processo <i>Lift-off</i> utilizada na fabricação CSMOS com porta de magnésio.....	51
Figura 3.6 - Estruturas obtidas durante a fabricação de Al/CSMOS.	52
Na Tabela 3.1 pode ser vista a relação da geometria das células MOS fabricadas com o número de linhas, perímetro, área de porta (A_G) e área exposta (A_{ex}).Figura	

3.7 - Célula solar MOS de forma ilustrativa vista em topo (a), em perfil (b) e real vista em topo.....	53
Figura 3.8 - Perfis obtidos durante a fabricação de Al/Mg/CSMOS.....	54
Figura 3.9 - Estrutura para medidas de células solares MOS.	55
Figura 3.10 - Medidas I-V obtida curto-circuitando-se a ponta de medida com a base condutora que faz o contato traseiro da célula CSMOS	56
Figura 3.11 - Espectro típico das lâmpadas LED (a) e halógena (b).....	57
Figura 4.1 – Sentido da corrente e tensão adotada para CSMOS.	59
Figura 4.2 – Modelo para as células solares MOS para situação sem luz (a) e com luz (b).	61
Figura 4.3 – Ajuste das curvas sem luz para amostra com espessura de 1,65 nm; 1,73 nm; 2,10 nm e 2,23 nm.....	62
Figura 4.4 – Gráfico para comparação das características J-V experimental e teórica para a célula solar MOS com espessura de 1,73 nm e geometria 100x150 μm utilizando porta de alumínio.....	66
Figura 4.5 – Curva J-V para as amostras para dimensões 50 μm x 50 μm , 50 μm x 100 μm , 100 μm x 100 μm e 100 μm x 150 μm iluminadas por LED com porta de alumínio, resistividade do substrato de (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ e espessura do dielétrico de porta de 1,65 nm AP – (a) e BP – (b); 1,73 nm AP – (c) e BP – (d); 2,10 nm AP – (e) e BP – (f) e; 2,23 nm AP – (g) e BP – (h). AP - 20,2 mW/cm^2 e BP – 5,1 mW/cm^2 ...	68
Figura 4.6 - Gráfico com valores médios do efeito da espessura em células solares com porta de alumínio sob LED (AP e BP), (a) corrente de curto-circuito (J_{SC}) e (b) rendimento (η).....	69
Figura 4.7 – Gráfico J_{SC} x $P_e\cdot L/D$	70
Figura 4.8 – Curva J-V para as amostras para dimensões 50 μm x 50 μm , 50 μm x 100 μm , 100 μm x 100 μm e 100 μm x 150 μm iluminados por LED com porta de alumínio, resistividade do substrato entre (0,1 - 1) $\Omega\cdot\text{cm}$ e espessura do dielétrico de porta de 1,73 nm AP – (a) e BP – (b) e; 2,10 nm AP – (c) e BP – (d). AP - 20,2 mW/cm^2 e BP – 5,1 mW/cm^2	72
Figura 4.9 - Gráfico com valores médios do efeito da resistividade e espessura de 2,10 nm em células solares com porta de alumínio sob LED (AP e BP), (a) corrente de curto-circuito (J_{SC}) e (b) rendimento (η).....	73

Figura 4.10 – Diagrama de faixas de energia da estrutura CSMOS submetida à luz para substrato (a) P+ e (b) P.....	73
Figura 4.11 – Curva J-V para as amostras para dimensões 50 μm x 50 μm , 50 μm x 100 μm , 100 μm x 100 μm e 100 μm x 150 μm com porta de magnésio, espessura do dielétrico de porta de 1,73 nm e resistividade do substrato entre (0,01 - 0,05) $\Omega\cdot\text{cm}$ AP – (a) e BP – (b); (0,1 - 0,5) $\Omega\cdot\text{cm}$ AP – (c) e BP – (d) e (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ AP – (e) e BP – (f). AP - 20,2 mW/cm^2 e BP – 5,1 mW/cm^2	75
Figura 4.12 - Gráfico com valores médios do efeito do material de porta em células solares com porta de alumínio e magnésio/alumínio sob LED (AP e BP), (a) corrente de curto-circuito (J_{sc}) e (b) rendimento (η).....	76
Figura 4.13 - Gráfico com valores médios do efeito da resistividade em células solares com porta de magnésio/alumínio sob LED (AP e BP), (a) corrente de curto-circuito (J_{sc}) e (b) rendimento (η).....	76
Figura 4.14 – Curva J-V para as amostras com porta de alumínio e espessura do dielétrico de porta de 1,65 nm; 1,73 nm; 2,10 nm e 2,23 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 47,0 mW/cm^2 (alta potência) para dimensões (a) 50 μm x 50 μm , (b) 50 μm x 100 μm , (c) 100 μm x 100 μm e (d) 100 μm x 150 μm	79
Figura 4.15 – Curva J-V para as amostras com porta de alumínio e espessura do dielétrico de porta de 1,65 nm; 1,73 nm; 2,10 nm e 2,23 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 11,7 mW/cm^2 (baixa potência) para a) 50 μm x 50 μm , (b) 50 μm x 100 μm , (c) 100 μm x 100 μm e (d) 100 μm x 150 μm	79
Figura 4.16 – Gráfico com valores médios do efeito da espessura em células solares com porta de alumínio iluminadas com lâmpada halógena (BP e AP), (a) densidade de corrente de curto-circuito (J_{sc}) e (b) rendimento de conversão luminosa (η).	80
Figura 4.17 – Curva J-V para as amostras com porta de alumínio e espessura do dielétrico de porta de 1,73 nm e 2,10 nm e resistividade do substrato de (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ e (0,1 - 1) $\Omega\cdot\text{cm}$ iluminados por lâmpada halógena na densidade de 47,0 mW/cm^2 (alta potência) para dimensões (a) 50 μm x 50 μm , (b) 50 μm x 100 μm , (c) 100 μm x 100 μm e (d) 100 μm x 150 μm	82
Figura 4.18 – Curva J-V para as amostras com porta de alumínio e espessura do dielétrico de porta de 1,73 nm e 2,10 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10)	

$\Omega\cdot\text{cm}$ e $(0,1 - 1) \Omega\cdot\text{cm}$ iluminados por lâmpada halógena na densidade de $11,7 \text{ mW/cm}^2$ (baixa potência) para dimensões (a) $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$, (b) $50 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$, (c) $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ e (d) $100 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$	82
Figura 4.19 – Gráfico com valores médios do efeito da resistividade em células solares com porta de alumínio e espessura de $2,10 \text{ nm}$ sob lâmpada halógena, (a) corrente de curto-circuito (J_{SC}) e (b) rendimento (η).....	83
Figura 4.20 – Curva J-V para amostras com espessura do dielétrico de porta de $1,73 \text{ nm}$ e porta de alumínio ($\rho = (1 - 10) \Omega\cdot\text{cm}$) e porta de magnésio com $(0,01 - 0,05) \Omega\cdot\text{cm}$; $(0,1 - 0,5) \Omega\cdot\text{cm}$ e $(1 - 10) \Omega\cdot\text{cm}$ iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de $47,0 \text{ mW/cm}^2$ (alta potência) para dimensões (a) $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$, (b) $50 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$, (c) $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ e (d) $100 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$	84
Figura 4.21 – Curva J-V para amostras com espessura do dielétrico de porta de $1,73 \text{ nm}$ e porta de alumínio ($\rho = (1 - 10) \Omega\cdot\text{cm}$) e porta de magnésio com $(0,01 - 0,05) \Omega\cdot\text{cm}$; $(0,1 - 0,5) \Omega\cdot\text{cm}$ e $(1 - 10) \Omega\cdot\text{cm}$ iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de $11,7 \text{ mW/cm}^2$ (baixa potência) para dimensões (a) $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$, (b) $50 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$, (c) $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ e (d) $100 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$	85
Figura 4.22 - Gráfico com valores médios do efeito do material de porta em células solares com porta de alumínio e magnésio/alumínio sob lâmpada halógena (AP e BP), (a) J_{SC} e (b) η	87
Figura 4.23 – Gráfico com valores médios de J_{SC} e η em função da resistividade do substrato em células solares com porta de magnésio com iluminação com lâmpada halógena (AP e BP), (a) $J_{SC} \times \rho$ e (b) $\eta \times \rho$	87
Figura 4.24 – Ajuste linear nas curvas J-V sem luz para $(-V_G < 0)$ para dimensões (a) $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$, (b) $50 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$, (c) $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ e (d) $100 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$	89
Figura 4.25 – Ajuste das curvas com luz para amostra com espessura de $1,65 \text{ nm}$; $1,73 \text{ nm}$; $2,10 \text{ nm}$ e $2,23 \text{ nm}$ com geometria $100 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$ (largura x espaçamento da grade).	90
Figura 4.26 – Ajuste das curvas com luz com parâmetro J_{G2} para amostra com espessura de $1,65 \text{ nm}$; $1,73 \text{ nm}$; $2,10 \text{ nm}$ e $2,23 \text{ nm}$ com geometria $100 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$ (largura x espaçamento da grade).	92
Figura 4.27 – Fluxograma do procedimento de ajuste das curvas das células solares MOS.	92

Figura 4.28 – Simulação da corrente de geração (J_L) para amostra com espessura de 1,65 nm; 1,73 nm; 2,10 nm e 2,23 nm com geometria 100 μm x 150 μm (largura x espaçamento da grade).	94
Figura D.1 – Curva J-V para as amostras com porta de alumínio e espessura do dielétrico de porta de 1,65 nm; 1,73 nm; 2,10 nm e 2,23 nm e resistividade do substrato entre (1 – 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ iluminados por LED na densidade de potência de 20,2 mW/cm^2 (AP) para dimensões (a) 50 μm x 50 μm , (b) 50 μm x 100 μm , (c) 100 μm x 100 μm e (d) 100 μm x 150 μm	115
Figura D.2 – Curva J-V para as amostras com porta de alumínio e espessura do dielétrico de porta de 1,65 nm; 1,73 nm; 2,10 nm e 2,23 nm e resistividade do substrato entre (1 – 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ iluminados por LED na densidade de potência de 5,1 mW/cm^2 (BP) para dimensões (a) 50 μm x 50 μm , (b) 50 μm x 100 μm , (c) 100 μm x 100 μm e (d) 100 μm x 150 μm	116
Figura D.3 – Curva J-V para as amostras com porta de alumínio e espessura do dielétrico de porta de 1,73 nm e 2,10 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ e (0,1 - 1) $\Omega\cdot\text{cm}$ iluminados por LED na densidade de potência de 20,2 mW/cm^2 (AP) para dimensões (a) 50 μm x 50 μm , (b) 50 μm x 100 μm , (c) 100 μm x 100 μm e (d) 100 μm x 150 μm	116
Figura D.4 – Curva J-V para as amostras com porta de alumínio e espessura do dielétrico de porta de 1,73 nm e 2,10 nm e resistividade do substrato entre (1 – 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ e (0,1 – 1) $\Omega\cdot\text{cm}$ iluminados por LED na densidade de potência de 5,1 mW/cm^2 (BP) para dimensões (a) 50 μm x 50 μm , (b) 50 μm x 100 μm , (c) 100 μm x 100 μm e (d) 100 μm x 150 μm	117
Figura D.5 – Curva J-V para amostras com espessura do dielétrico de porta de 1,73 nm e porta de alumínio ($\rho = (1 - 10) \Omega\cdot\text{cm}$) e porta de magnésio com (0,01 - 0,05) $\Omega\cdot\text{cm}$; (0,1 - 0,5) $\Omega\cdot\text{cm}$ e (1 – 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ iluminados por LED na densidade de potência de 20,2 mW/cm^2 (AP) para dimensões (a) 50 μm x 50 μm , (b) 50 μm x 100 μm , (c) 100 μm x 100 μm e (d) 100 μm x 150 μm	117
Figura D.6 – Curva J-V para amostras com espessura do dielétrico de porta de 1,73 nm e porta de alumínio ($\rho = (1 - 10) \Omega\cdot\text{cm}$) e porta de magnésio com (0,01 - 0,05) $\Omega\cdot\text{cm}$; (0,1 - 0,5) $\Omega\cdot\text{cm}$ e (1 – 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ iluminados por LED na densidade de potência de 5,1 mW/cm^2 (BP) para dimensões (a) 50 μm x 50 μm , (b) 50 μm x 100 μm , (c) 100 μm x 100 μm e (d) 100 μm x 150 μm	118

Figura E.1 – Curva J-V para as amostras com porta de alumínio e espessura do dielétrico de porta de 1,65 nm; 1,73 nm; 2,10 nm e 2,23 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) Ω .cm iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 47,0 mW/cm ² (AP) para dimensões (a) 50 μ m x 50 μ m, (b) 50 μ m x 100 μ m, (c) 100 μ m x 100 μ m e (d) 100 μ m x 150 μ m.	119
Figura E.2 – Curva J-V para as amostras com porta de alumínio e espessura do dielétrico de porta de 1,65 nm; 1,73 nm; 2,10 nm e 2,23 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) Ω .cm iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 11,7 mW/cm ² (BP) para dimensões (a) 50 μ m x 50 μ m, (b) 50 μ m x 100 μ m, (c) 100 μ m x 100 μ m e (d) 100 μ m x 150 μ m.	120
Figura E.3 – Curva J-V para as amostras com porta de alumínio e espessura do dielétrico de porta de 1,73 nm e 2,10 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) Ω .cm e (0,1 - 1) Ω .cm iluminados por lâmpada halógena na densidade de 47,0 mW/cm ² (AP) para dimensões (a) 50 μ m x 50 μ m, (b) 50 μ m x 100 μ m, (c) 100 μ m x 100 μ m e (d) 100 μ m x 150 μ m.	120
Figura E.4 – Curva J-V para as amostras com porta de alumínio e espessura do dielétrico de porta de 1,73 nm e 2,10 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) Ω .cm e (0,1 - 1) Ω .cm iluminados por lâmpada halógena na densidade de 11,7 mW/cm ² (BP) para dimensões (a) 50 μ m x 50 μ m, (b) 50 μ m x 100 μ m, (c) 100 μ m x 100 μ m e (d) 100 μ m x 150 μ m.	121
Figura E.5 – Curva J-V para amostras com espessura do dielétrico de porta de 1,73 nm e porta de alumínio (ρ = (1 - 10) Ω .cm) e porta de magnésio com (0,01 - 0,05) Ω .cm; (0,1 - 0,5) Ω .cm e (1 - 10) Ω .cm iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 47,0 mW/cm ² (AP) para dimensões (a) 50 μ m x 50 μ m, (b) 50 μ m x 100 μ m, (c) 100 μ m x 100 μ m e (d) 100 μ m x 150 μ m.	121
Figura E.6 – Curva J-V para amostras com espessura do dielétrico de porta de 1,73 nm e porta de alumínio (ρ = (1 - 10) Ω .cm) e porta de magnésio com (0,01 - 0,05) Ω .cm; (0,1 - 0,5) Ω .cm e (1 - 10) Ω .cm iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 11,7mW/cm ² (BP) para dimensões (a) 50 μ m x 50 μ m, (b) 50 μ m x 100 μ m, (c) 100 μ m x 100 μ m e (d) 100 μ m x 150 μ m.	122
Figura F.1– Função de Lambert ou ômega. – $W_0(x)$ (ramo principal); --- $W_{-1}(x)$	123
Figura G.1 – Ajuste de Curva I-V para as amostras com porta de alumínio e geometria de 50 μ m x 50 μ m, 50 μ m x 100 μ m, 100 μ m x 100 μ m, 100 μ m x 150 μ m	

e resistividade do substrato entre (1 – 10) Ω .cm iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 11,7 mW/cm² (**BP**) para espessura do dielétrico de porta (a) 1,65 nm, (b) 1,73 nm, (c) 2,10 nm e (d) 2,23 nm. 125

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Tabela de eficiência de células solares.	28
Tabela 4.1 – Parâmetros do modelo sem luz obtidos para as células solares MOS para amostras com resistividade entre (1 - 10) Ω .cm, porta de alumínio e espessura de dielétrico de porta de 1,65 nm, 1,73 nm, 2,10 nm e 2,23 nm.	63
Tabela 4.2 – Parâmetros do modelo sem luz obtidos para as células solares MOS para amostras com resistividade entre (0,1 - 1) Ω .cm, porta de alumínio e espessura de dielétrico de porta de 1,73 nm e 2,10 nm.	64
Tabela 4.3 – Parâmetros do modelo sem luz obtidos para as células solares MOS para amostras com porta de magnésio, espessura de dielétrico de porta de 1,73 nm e resistividades entre (0,01 - 0,05) Ω .cm; (0,1 - 0,5) Ω .cm e (1 - 10) Ω .cm.....	65
Tabela 4.4 – Parâmetros médios das células solares MOS com resistividade de (1 - 10) Ω .cm, porta de alumínio e espessuras de 1,65 nm; 1,73 nm; 2,10 nm e 2,23 nm iluminados por LED.	69
Tabela 4.5 – Média dos parâmetros das células solares MOS com resistividade entre 0,1-1 Ω .cm, porta de alumínio e espessuras de dielétrico de 1,73 nm e 2,10 nm iluminados por LED.	72
Tabela 4.6 – Média dos parâmetros das células solares MOS com porta de magnésio e espessuras de 1,73 nm e resistividade entre (0,01 - 0,05) Ω .cm; (0,1 - 0,5) Ω .cm e (1 - 10) Ω .cm iluminados por LED.	76
Tabela 4.7 – Média dos parâmetros das células solares MOS com porta de magnésio e espessuras de 1,73 nm e resistividade entre (0,01 - 0,05) Ω .cm; (0,1 - 0,5) Ω .cm e (1 - 10) Ω .cm iluminados por lâmpada halógena. Para comparação, a porta de alumínio, espessura de 1,73 nm e resistividade de (1 - 10) Ω .cm foi incluída.	86
Tabela 4.8 – Parâmetros médios obtidos para as células solares MOS através do modelo com luz.	93
Tabela B.1 – Parâmetros da amostra com porta de alumínio e espessura de 1,65 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) Ω .cm iluminados por LED na densidade de potência de 20,2 mW/cm ² (AP) e 5,1 mW/cm ² (BP).....	107

Tabela B.2 – Parâmetros da amostra com porta de alumínio e espessura de 1,73 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) Ω .cm iluminados por LED na densidade de potência de 20,2 mW/cm ² (AP) e 5,1 mW/cm ² (BP).....	107
Tabela B.3 – Parâmetros da amostra com porta de alumínio e espessura de 2,10 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) Ω .cm iluminados por LED na densidade de potência de 20,2 mW/cm ² (AP) e 5,1 mW/cm ² (BP).....	108
Tabela B.4 – Parâmetros da amostra com porta de alumínio e espessura de 2,23 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) Ω .cm iluminados por LED na densidade de potência de 20,2 mW/cm ² (AP) e 5,1 mW/cm ² (BP).....	108
Tabela B.5 – Parâmetros da amostra com porta de alumínio e espessura de 1,73 nm e resistividade do substrato entre (0,1 - 1) Ω .cm iluminados por LED na densidade de potência de 20,2 mW/cm ² (AP) e 5,1 mW/cm ² (BP).....	109
Tabela B.6 – Parâmetros da amostra com porta de alumínio e espessura de 2,10 nm e resistividade do substrato entre (0,1 - 1) Ω .cm iluminados por LED na densidade de potência de 20,2 mW/cm ² (AP) e 5,1 mW/cm ² (BP).....	109
Tabela B.7 – Parâmetros da amostra com porta de magnésio e espessura de 1,73 nm e resistividade do substrato entre (0,01 - 0,05) Ω .cm iluminados por LED na densidade de potência de 20,2 mW/cm ² (AP) e 5,1 mW/cm ² (BP).	110
Tabela B.8 – Parâmetros da amostra com porta de magnésio e espessura de 1,73 nm e resistividade do substrato entre (0,1 - 0,5) Ω .cm iluminados por LED na densidade de potência de 20,2 mW/cm ² (AP) e 5,1 mW/cm ² (BP).	110
Tabela B.9 – Parâmetros da amostra com porta de magnésio e espessura de 1,73 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) Ω .cm iluminados por LED na densidade de potência de 20,2 mW/cm ² (AP) e 5,1 mW/cm ² (BP).	110
Tabela C.1 – Parâmetros da amostra com porta de alumínio e espessura de 1,65 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) Ω .cm iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 47,0 mW/cm ² (AP) e 11,7 mW/cm ² (BP).	111
Tabela C.2 – Parâmetros da amostra com porta de alumínio e espessura de 1,73 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) Ω .cm iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 47,0 mW/cm ² (AP) e 11,7 mW/cm ² (BP).	111
Tabela C.3 – Parâmetros da amostra com porta de alumínio e espessura de 2,10 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) Ω .cm iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 47,0 mW/cm ² (AP) e 11,7 mW/cm ² (BP).	112

Tabela C.4 – Parâmetros da amostra com porta de alumínio e espessura de 2,23 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) Ω .cm iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 47,0 mW/cm ² (AP) e 11,7 mW/cm ² (BP).	112
Tabela C.5 – Parâmetros da amostra com porta de alumínio e espessura de 1,73 nm e resistividade do substrato entre (0,1 - 1) Ω .cm iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 47,0 mW/cm ² (AP) e 11,7 mW/cm ² (BP).	113
Tabela C.6 – Parâmetros da amostra com porta de alumínio e espessura de 2,10 nm e resistividade do substrato entre (0,1 - 1) Ω .cm iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 47,0 mW/cm ² (AP) e 11,7 mW/cm ² (BP).	113
Tabela C.7 – Parâmetros da amostra com porta de magnésio e espessura de 1,73 nm e resistividade do substrato entre (0,01 - 0,05) Ω .cm iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 47,0 mW/cm ² (AP) e 11,7 mW/cm ² (BP)...	114
Tabela C.8 – Parâmetros da amostra com porta de magnésio e espessura de 1,73 nm e resistividade do substrato entre (0,1 - 0,5) Ω .cm iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 47,0 mW/cm ² (AP) e 11,7 mW/cm ² (BP)...	114
Tabela C.9 – Parâmetros da amostra com porta de magnésio e espessura de 1,73 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) Ω .cm iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 47,0 mW/cm ² (AP) e 11,7 mW/cm ² (BP)...	114
Figura G.1 – Ajuste de Curva I-V para as amostras com porta de alumínio e geometria de 50 μ m x 50 μ m, 50 μ m x 100 μ m, 100 μ m x 100 μ m, 100 μ m x 150 μ m e resistividade do substrato entre (1 - 10) Ω .cm iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 11,7 mW/cm ² (BP) para espessura do dielétrico de porta (a) 1,65 nm, (b) 1,73 nm, (c) 2,10 nm e (d) 2,23 nm.	125

Lista de Siglas e Abreviaturas

Al/SiOxNy/p-Si	alumínio/oxinitreto de silício/substrato de silício P
Al/Mg/SiOxNy/p-Si	alumínio/magnésio/oxinitreto de silício/substrato de silício P
AP	alta potência
BP	baixa potência
Calcogeneto	vidro não óxido
CIGS	seleneto de cobre, índio e gálio ($\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$)
CSMOS	célula solar MOS
C-V	capacitância-tensão
CZTS	sulfeto de cobre, zinco e estanho ($\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$)
DT	tunelamento direto
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
FN	tunelamento Fowler-Nordheim
GSIDE	grupo de Engenharia de Superfícies, Interfaces e Deposição
G-V	condutividade-tensão
I-V	corrente-tensão
J-V	densidade de corrente-tensão
LED	diodo emissor de luz (<i>Light – Emitting Diode</i>)
LSI	Laboratório de Sistemas Integráveis
Perovskita	óxido de cálcio e titânio (CaTiO_3)
RCA	<i>Radio Corporation of America</i>
RTP	<i>Rapid Thermal Processing</i>
SC1	<i>standard cleaning 1</i>

SC1

standard cleaning 2

Lista de Símbolos

α	parâmetro de ajuste que contabiliza variação da queda de tensão no dielétrico de porta devido à presença de armadilhas no dielétrico de porta
β	parâmetro para o modelo de tunelamento
Γ	fator de correção dependente da geração
η	rendimento de conversão de energia luminosa em energia elétrica (%)
Θ	constante de tunelamento que depende da espessura do dielétrico
λ	comprimentos de onda (nm)
ν_f	frequência da luz (Hz).
ρ	resistividade do substrato semiconductor ($\Omega \cdot \text{cm}$)
ϕ_B	altura da barreira entre semiconductor e dielétrico (eV)
ψ_s	potencial de superfície do silício (V)
A	parâmetros para o modelo de tunelamento
A^*	constante de Richardson
A_T	área da célula solar (cm^2)
A_{ex}	área da célula solar exposta (cm^2)
A_G	área da porta da célula solar (cm^2)
d	distância entre a fonte de luz e a amostra (cm)
D (μm)	distância entre linhas no reticulado de porta das células solares MOS
E	energia total do elétron (eV)
$E_{c,ox}$	nível de energia de condução (eV)
E_e	Energia do fóton (eV)

E_f	nível de energia de Fermi no substrato (eV)
E_{ox}	campo elétrico no dielétrico de porta (V/m)
E_t	componente transversal da energia do elétron (eV)
FF	fator de preenchimento (%)
$f(\Delta\lambda)$	função luminosa integrada que contabiliza diferentes penetrações para diferentes comprimentos de onda λ no intervalo $\Delta\lambda$ dentro do material semiconductor
G_P	condutância em paralelo ($\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^2$)
h	constante de Planck (4,13566743E-15 eV)
$\hbar$	constante reduzida de Planck (6,58211928E-16 eV)
IL	intensidade luminosa em candela (cd)
I_{BG}	corrente do corpo para a porta (A)
I_{SC}	corrente de curto-circuito (A)
J	densidade de corrente (A/cm ²)
J_{BG}	densidade de corrente do corpo para a porta (A/cm ²)
J_{DT}	densidade de corrente direto (A/cm ²)
J_{FN}	densidade de corrente Fowler-Nordheim (A/cm ²)
J_{GB}	densidade de corrente da porta para o corpo (A/cm ²)
J_G	densidade de corrente gerada (A/cm ²)
J_{G1}	densidade de corrente gerada 1 (A/cm ²)
J_{G2}	densidade de corrente gerada 2 (A/cm ²)
J_{SC}	densidade de corrente de curto-circuito (A/cm ²)
J_L	densidade de corrente de geração (A/cm ²)
J_M	densidade de corrente para máxima potência gerada pela célula solar (A/cm ²)

J_0	densidade de corrente de escuro do diodo (A/cm^2)
k	constante de boltzmann
K	parâmetro de ajuste que depende da tensão de faixa plana
L	largura das linhas do reticulado de porta das células solares MOS (μm)
m_t	massa efetiva do elétron transversal (valor normalizado em m_0)
m_0	massa efetiva do elétron (valor normalizado em m_0)
m_{ox}	massa efetiva do elétron no dielétrico de porta (valor normalizado em m_0)
n	fator de idealidade (adimensional)
P_{in}	densidade de potência incidente na célula solar (W/cm^2)
P_{max}	máxima potência gerada pela célula solar (W/cm^2)
R_s	resistência em série ($\Omega.cm^2$)
$R_{s,eq}$	resistência em série do equipamento (Ω)
T	temperatura (K)
t_{ox}	espessura do dielétrico de porta (nm)
T_t	probabilidade de transmissão de tunelamento (adimensional)
V_{FB}	tensão de faixa plana
V_{fb1}	tensão de faixa plana 1
V_{fb2}	tensão de faixa plana 2
V_G	tensão na porta (V)
V_M	tensão para máxima potência gerada pela célula solar (V)
V_{OC}	tensão de circuito aberto (V)
V_{ox}	tensão reversa no dielétrico de porta (V)
V_T	tensão térmica (0,02552 V)

x_1

espessura da barreira de potencial (m)

Sumário

1.Introdução	25
1.1.Objetivos.....	30
2.Revisão Bibliográfica.....	31
2.1.Células fotovoltaicas	31
2.1.1.Célula fotovoltaica de junção PN	33
2.1.2.Célula solar MOS	34
2.2. Mecanismos de tunelamento no dielétrico de porta.....	39
2.3. Equação de corrente das células MOS.....	41
3. Procedimento experimentais	44
3.1. Descrição dos processos empregados.....	44
3.1.1.Limpeza química	44
3.1.2.Oxinitreção pela técnica RTP	45
3.1.3.Deposição do metal de porta (alumínio e magnésio)	49
3.1.4.Litografia com <i>Lift-Off</i>	50
3.2.Fabricação de células solares MOS com porta de alumínio (Al/SiOxNy/p-Si CSMOS).	51
3.3.Fabricação de células solares MOS com porta de magnésio (Al/Mg/SiOxNy/p-Si CSMOS).	53
3.4.Caracterização elétrica das células solares MOS (CSMOS)	55
3.4.1 Potências incidentes nas amostras iluminadas com lâmpada LED.....	57
3.4.2 Potências incidentes nas amostras iluminadas com lâmpada Halógena ..	58
4. Resultados e discussões.....	59
4.1. Resultados experimentais.....	59
4.1.1. Característica corrente-tensão célula solar MOS sem iluminação	60
4.1.2. Estudos de células solares MOS com iluminação por lâmpada LED	66

4.1.2.1. Célula solar com porta de alumínio (Al/SiOxNy/p-Si CSMOS) - LED.....	66
4.1.2.2. Célula solar com porta de magnésio (Al/Mg/SiOxNy/p-Si CSMOS) - LED.....	74
4.1.3. Estudos de células solares MOS com iluminação por lâmpada halógena	77
4.1.3.1. Célula solar com porta de alumínio (Al/SiOxNy/p-Si CSMOS) halógena.....	77
4.1.3.2. Célula solar com porta de magnésio (Al/Mg/SiOxNy/p-Si CSMOS) halógena.....	83
4.2. Modelagem das células solares MOS.....	88
5. Conclusões e Perspectivas Futuras	95
6. Bibliografia.....	97
Lista de Publicações	102
Apêndice A – Resolução da integral da corrente de tunelamento Fowler-Nordheim (FN) e direto (DT)	103
Apêndice B – Tabela de parâmetros para exposição por LED.....	107
Apêndice C – Tabela de parâmetros para exposição por lâmpada halógena	111
Apêndice D – Curvas J-V das células solares MOS LED.....	115
Apêndice E – Curvas J-V das células solares MOS Halógena.....	119
Apêndice F – Modelo analítico para célula solar MOS.....	123
Apêndice G – Ajuste de curvas e tabela de parâmetros obtidos pelo ajuste de curvas J-V _G	125

1.Introdução

A Redução de gases do efeito estufa tornou-se uma das maiores metas na atualidade. Acordos internacionais como o tratado de Kyoto em 1997 demonstram o interesse dos países desenvolvidos em diminuir emissões de poluentes como o carbono (CO₂) (UNITED NATIONS, 2018). Entretanto, essa tarefa é desafiadora, pois a maior fonte primária de energia provém de energia fóssil e a demanda por energia vem crescendo a cada ano (IEA PVPS, 2013, 2018; JAGER, 2014). Em 2012, o consumo de energia elétrica do mundo era de 19000 TWh e em 2017 esse valor aumentou para 21000 TWh. Em 2017, 68,47% da energia elétrica gerada era proveniente de queima de combustíveis fósseis (carvão e gás natural) e nuclear (IEA PVPS, 2013, 2018).

Por outro lado, nota-se o crescimento do uso de energias renováveis a cada ano. A Figura 1.1 mostra a tendência das fontes de energia provenientes de “carvão”, “gás natural” e “renováveis” na geração de eletricidade até 2022. Em 2016, a geração de energia através de fontes renováveis foi de 24% e espera-se que essa participação alcance o valor de 30% em 2022. Apesar do baixo crescimento, a geração de energia hidrelétrica continuará sendo a maior fonte em 2022, seguidos da eólica, solar e bioenergia (IEA, 2017).

A Figura 1.2 mostra uma comparação dos dados obtidos do IEA (*International Energy Agency* – Agência Internacional de Energia) de 2012 e 2017. Nela podemos verificar o percentual de participação das diversas fontes de energia na produção de energia elétrica. Em 2012, a produção de energia através de fontes fósseis e nuclear era de 78,2%, reduzindo para 68,47% em 2017. Na geração por fonte hidroelétrica ocorreu um aumento de 16,5% (2012) para 19,52% (2017). Por outro lado, a geração de energia solar saltou de 0,6% (2012) para 2,5% (2017) tornando-se mais significativa. Atualmente, a energia solar possui cerca de 403,3 GW de módulos fotovoltaicos instalados em todo o mundo, gerando cerca de 531,6 TWh de energia elétrica ao longo de um ano e sua representatividade no mercado é de 110 bilhões de dólares por ano.

Figura 1.1 – Geração de energia elétrica por tipo de fonte de energia: carvão, gás natural e energias renováveis.

Fonte: Adaptado (IEA, 2017).

Figura 1.2 – Participação de células fotovoltaicas na demanda global de eletricidade de 2012 e 2017.

Fonte: Adaptado (IEA PVPS, 2013, 2018).

A Figura 1.3 mostra a tendência dos preços médios comissionados para bioenergia, energia eólica marítima, energia eólica terrestre e energia solar. É notório que tem ocorrido a diminuição dos preços da energia solar e eólica no decorrer dos anos. No entanto, é possível verificar que a energia solar possui uma forte tendência em tornar-se a fonte de energia renovável mais barata e já a projeção no período de 2019 e 2022 permite concluir que o seu preço será praticamente o mesmo que a energia eólica terrestre (IEA, 2017; IEA PVPS, 2018).

Figura 1.3 – Preços médio de leilão por data de comissionamento do projeto.

Fonte: Adaptado (IEA, 2018).

No passado, a instalação de um sistema fotovoltaico possuía a grande vantagem de ter baixo custo de manutenção sem a necessidade de utilização de combustíveis poluentes, entretanto, o seu custo inicial para a instalação era muito elevado. No entanto, nas últimas décadas, foram realizados investimentos e incentivos governamentais que permitiram tornar a sua instalação mais acessível. Atualmente, os principais fatores que incentivam a instalação de um módulo fotovoltaico são (IEA PVPS, 2018):

- Tarifas de alimentação – subsídios para energia que retorna para a rede produzida por uma fonte renovável de energia;
- Subsídios e corte de impostos;
- Consumo próprio – economia nos gastos de energia elétrica;
- Certificados “verde”.

Além disso, os sistemas fotovoltaicos, por apresentarem características modulares, têm sido muito empregados em conjunto com microbaterias o que permite carregá-las enquanto operam, por exemplo, como fonte de alimentação para “chip” implantáveis, sistemas “wireless” de baixa potência e microdispositivos para a Internet das coisas (IoT) (CHEN, 2017; MATEU, 2005; MATIKO, 2014).

A Tabela 1.1 mostra os principais tipos de células solares reportadas com seus melhores parâmetros. No momento, a célula solar com maior rendimento é a célula III-V fabricada com filme fino de GaAs cujo rendimento pode atingir 28,8%. Apesar disso, as células que dominam o mercado com mais de 97% da produção mundial são as baseadas em silício cristalino e policristalino e estrutura PN (FRAAS, 2010; GREEN, 2002; IEA PVPS, 2018; MATEU, 2005). Baseado nesse contexto as células com substrato cristalino ainda tem uma importância substancial e foram escolhidas como foco deste trabalho com o objetivo de aprimorar a conversão energética visto que o limite teórico máximo para esse tipo de material não foi atingido (33,5%) (MCCARTHY, 2012; SHOCKLEY, 1961).

Tabela 1.1 – Tabela de eficiência de células solares.

Célula solar		η (%)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)
Silício	Cristalino	26,7	0,738	42,65	84,9
	Policristalino	22,3	0,6742	41,08	80,5
III-V	GaAs	28,8	1,122	29,68	86,5
	InP	24,2	0,939	31,15	82,6
Filme fino calcogeneto	CIGS	22,9	0,744	38,77	79,5
	CdTe	21	0,8759	30,25	79,4
	CZTS	10	0,7083	21,77	65,1
Amorfo/microcristalino		11,9	0,55	29,72	75
Perovskita		20,9	1,125	24,92	74,5
Tintas sensibilizadas		11,9	0,744	22,47	71,2
Orgânicas		11,2	0,78	19,3	74,2

Fonte: adaptado (GREEN, 2018).

Com o objetivo de buscar alternativas em relação às células PN, o presente trabalho buscou trabalhar com células de estrutura MOS (Metal-Óxido-Semicondutor). A célula solar MOS foi empregada pela NASA em 1970 tendo o objetivo de buscar possibilidades produção de energia solar para aplicações espaciais e contornar a maior complexidade na fabricação das células PN, incluindo a obtenção de junções rasas de difusão (HO, 1986; PULFREY, 1978).

Muitos estudos têm sido realizados visando obtenção de alta qualidade de passivação com baixa densidade de corrente de escuro em células solares MOS (PULFREY, 1978). A corrente de escuro é considerada o mais importante parâmetro

de degradação e, atualmente, ele tem sido um ponto crucial de análise nos trabalhos de pesquisa (CHEN, 2002; HEZEL, 1997; PULFREY, 1978; SHEWCHUN, 1977; WATANABE, 2018).

O processo de fabricação de células solares MOS é substancialmente mais simples comparado ao processo de fabricação de células PN e ao mesmo tempo também apresenta baixo custo associado. Na fabricação de células solares MOS, o processo mais importante é o crescimento do dielétrico de porta com espessura que deve ser rigorosamente abaixo de 2 nm (CHEN, 2002; HEZEL, 1997; PULFREY, 1978; SHEWCHUN, 1977). Esses dielétricos podem ser crescidos pelas mais variadas técnicas, tais como (BEYER, 1995; CHRISTIANO, 2017; HAN, 2013; HEZEL, 1997; PULFREY, 1978):

- Oxidação térmica (seca ou úmida);
- Anodização;
- Deposição química em fase de vapor enriquecido por plasma (PECVD);
- Deposição por camada atômica enriquecido por plasma (PEALD);
- Oxidação por processamento térmico rápido (RTP).

Devido à sua estrutura simples, a célula solar MOS pode ser empregada para na alimentação de “chips” em mesmo substrato de silício para *Energy Harvesting* (FERRI, 2010). O termo “*Solar Energy Harvesting*” é o jargão empregado na literatura para aplicações de baixa potência. Geralmente, as células solares para ambientes internos são usadas em conjunto com microbaterias para permitir recarregá-las enquanto operam como fonte de alimentação, por exemplo, para pastilhas (chip) implantáveis, sistemas “wireless” de baixa potência e microdispositivos para Internet das coisas (IoT) (CHEN, 2017; MATEU, 2005; MATIKO, 2014).

Neste trabalho, foram fabricadas células solares MOS em substrato de silício cristalino utilizando dielétrico de porta MOS crescido pela técnica RTP. A técnica RTP demonstrou uma boa passivação e características de tunelamento promissoras em trabalhos realizado no nosso grupo (CHRISTIANO, 2017; WATANABE, 2018). Além disso, para simular ambientes internos para as células fotovoltaicas, foram empregadas iluminações por meio de lâmpadas LED e halógenas com algumas densidades de potência luminosa típicas encontradas em ambientes internos.

1.1.Objetivos

O objetivo do presente trabalho é a fabricação e caracterização de células solares MOS, com características de tunelamento reprodutíveis e com bom rendimento de conversão luminosa em ambientes internos para aplicações em *Energy Harvesting*. Para alcançar esse objetivo geral, tivemos os seguintes objetivos específicos:

- Fabricar e caracterizar células solares com área de $3,24 \text{ cm}^2$ em lâminas de silício de 3 polegadas de diâmetro com alumínio e/ou magnésio como metal de porta;
- Levantar as curvas I-V (corrente-tensão) em situações sem luz e exposições por lâmpadas LED e halógena;
- Extrair os parâmetros fotovoltaicos como: densidade de corrente de escuro (J_0), densidade de corrente de curto circuito (J_{sc}), tensão de circuito aberto (V_{oc}), fator de preenchimento (FF) e eficiência (η) para condições de geometria e estrutura diferentes;
- Modelagem da característica I-V das células solares MOS.

Neste primeiro capítulo apresentamos a introdução, o estado da arte e as principais justificativas para utilização da célula solar MOS. Os capítulos seguintes estão organizados como segue: No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre célula fotovoltaica de junção PN, célula solar MOS e mecanismos de tunelamento em dielétricos de porta MOS. No capítulo 3 são apresentados os procedimentos experimentais empregados na fabricação e caracterização elétrica das células solares MOS (CSMOS). No capítulo 4 são apresentados os resultados e discussão sobre a fabricação e caracterização das células solares MOS e, finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões e as perspectivas futuras visando a continuação do presente trabalho.

2.Revisão Bibliográfica

2.1.Células fotovoltaicas

O princípio de funcionamento das células solares baseia-se no efeito fotovoltaico (CHRISTIANO, 2017; IZUMI, 2017; JAGER, 2014) o qual consiste em na presença de um potencial resultante na junção entre dois materiais diferentes em resposta à uma radiação luminosa. Esse efeito também pode ser correlacionado com o efeito fotoelétrico descoberto por Einstein em 1905, no qual o elétron pode emitido devido à excitação proveniente da absorção da luz por um material. Essa relação é dada por:

$$E_e = h \cdot \nu_f \quad (2.1)$$

onde h é a constante de Planck e ν_f é a frequência da luz. Os mecanismos mais importantes em decorrência do efeito fotovoltaico reportado na literatura são (JAGER, 2014):

- Geração de portadores devido à absorção de fótons nos materiais que formam a junção;
- Separação dos portadores gerados na junção;
- Coleta de portadores gerados nos terminais da junção.

Os parâmetros mais importantes das células solares são extraídos por meio de suas curvas I-V (corrente-tensão) e nelas pode-se obter dados como a corrente de curto-circuito (I_{SC} – *short circuit current*), tensão de circuito aberto (V_{OC} – *open circuit voltage*), fator de preenchimento (FF – *fill factor*), máxima potência gerado (P_{max}) e o rendimento de conversão de energia luminosa em energia elétrica (η).

Os parâmetros I_{SC} e V_{OC} podem ser obtidos graficamente como mostrado na Figura 2.1. Note que a curva típica das células solares é semelhante à de um diodo. A corrente de curto circuito é obtida para tensão aplicada nula e a tensão de circuito aberto é obtida para corrente circulante nula.

O fator de preenchimento pode ser obtido por meio da expressão 2.2:

$$FF = \frac{P_{max}}{J_{SC} \cdot V_{OC}} \quad (2.2)$$

onde J_{SC} é a densidade de corrente de curto-circuito em A/cm^2 que é obtida dividindo-se a corrente de curto-circuito (I_{SC}) pela área total da célula solar (A_T). O fator de preenchimento é obtido da relação entre a área $A1$ na Figura 2.1b que corresponde à potência máxima e o produto de J_{SC} e V_{OC} (area $A2$ na Figura 2.1b) ($A1/A2$).

Figura 2.1 – Curva J-V típica de uma Célula Solar MOS. (a) curva J-V completa e (b) na região de geração.

Fonte: Autor.

A potência (P) é obtida por meio do produto da densidade de corrente e tensão dentro do intervalo de tensão de $0V$ à V_{OC} e comumente é apresentada em W/cm^2 . Esse produto apresenta um valor de potência máxima fornecida pela célula solar (P_{max}).

O rendimento de conversão de energia luminosa em energia elétrica (η) é dado pela Equação 2.3:

$$\eta = \frac{I_{SC} \cdot V_{OC} \cdot FF}{P_{in} \cdot A_T} = \frac{P_{max}}{P_{in}} \quad (2.3)$$

onde P_{in} é a densidade de potência incidente em W/cm^2 .

2.1.1. Célula fotovoltaica de junção PN

Como mencionado no Capítulo 1, as células solares que predominam no mercado de painéis fotovoltaicos são os módulos fabricados em silício e sua estrutura típica é composta basicamente de uma junção PN (Figura 2.2), contatos metálicos e uma camada antirreflexiva para propiciar o aumento na absorção de luz (CHRISTIANO, 2017; JAGER, 2014). Os substratos de silício cristalino ou multicristalino são tipicamente de tipo P com espessura tipicamente na faixa de (100 - 300) μm e uma camada difundida de silício N^+ de cerca de 1 μm .

Figura 2.2 – Célula fotovoltaica de junção PN

Fonte: Adaptado (JAGER, 2014).

Entretanto, apesar dessas células serem amplamente utilizadas em painéis fotovoltaicos, a sua fabricação possui processos complexos (CHRISTIANO, 2017; HO, 1986; JAGER, 2014). A difusão da camada N^+ costuma ser realizada em temperaturas próximas de 1000 $^{\circ}\text{C}$ através de fonte líquida ou gasosa contendo o elemento fósforo. O processo de passivação da região difundida deve ser rigorosamente controlada a fim de evitar o aumento da velocidade de recombinação de portadores, a qual pode degradar os parâmetros V_{OC} e J_{SC} da célula fotovoltaica (JAGER, 2014).

2.1.2.Célula solar MOS

A Célula Solar do tipo MOS foi pesquisada pela NASA na década de 70 com intuito de ser empregada em aplicações espaciais. A estrutura típica de células solares pesquisada nesse período pode ser vista na Figura 2.3. Esse tipo de célula é basicamente composta por um substrato de silício, uma camada de óxido de porta que deve ter espessura entre (1 e 1,5) nm; metal para contato e uma camada antirrefletora carregada positivamente (HO, 1986; R. B. GODFREY, 1979).

Figura 2.3 – Célula Solar MOS da NASA.

Fonte: Adaptado (R. B. GODFREY, 1979).

Os substratos de silício utilizados para esse tipo de células são do tipo P por apresentar melhores resultados nos parâmetros V_{OC} e J_{SC} comparado aos substratos do tipo N (IZUMI, 2017; PULFREY, 1978). Em 1978, Pulfrey estudou a estrutura MOS como células fotovoltaicas com diferentes tipos de substrato de silício (tipos P e N, resistividade e cristalinidade) e diferentes tipos de materiais de porta. Ele também constatou que outros aspectos deveriam ser considerados como a geometria das células fotovoltaicas e o material de cobertura (camada antirrefletora) (IZUMI, 2017).

2.1.2.1. Primeira Geração Célula Solar MOS

A estrutura típica da célula solar MOS da primeira geração pode ser visto na Figura 2.4. Essa célula é composta por um substrato P, onde é crescido um óxido fino e em seguida é depositado um metal para contato e uma camada antirreflexiva, por exemplo, de nitreto de silício carregada positivamente a fim de induzir a inversão do substrato e, permitir a passivação da superfície além de evitar o processo de envelhecimento.

Essa geração foi marcada pela texturização da superfície Si/SiOx e passivação da superfície através da deposição do nitreto de silício por meio do processo PECVD (250 °C) em toda a superfície permitindo assim um ganho de potência de até 50% e atingindo assim um rendimento de 18,1% (HEZEL, 1997).

Figura 2.4 – Células Solar MOS da primeira geração.

Fonte: Adaptado (HEZEL, 1997; IZUMI, 2017).

2.1.2.2. Segunda Geração Célula Solar MOS

A segunda geração de células solares MOS (Figura 2.5) foi marcada pela atenção na passivação da superfície. O grande marco dessa geração foi incorporação de íons de Cs^+ na interface entre a camada anti-refletora (Si_3N_4) e o óxido de porta. Esses íons juntamente com uma camada de nitreto de silício

depositado por PECVD (400 °C - 450 °C) permitem maior estabilidade térmica e fixação de cargas fixas em seu interior (HAR-LAVAN e CAHEN, 2013; HEZEL, 1997; IZUMI, 2017).

Figura 2.5 – Células Solar MOS da segunda geração.

Fonte: Adaptado (HAR-LAVAN, CAHEN, 2013; HEZEL, 1997; IZUMI, 2017).

2.1.2.3. Célula Solar MOS GSIDE

A célula solar MOS tem sido estudado pelo grupo GSIDE e foi o foco de uma dissertação (ALANDIA, 2016) e duas teses de doutorado (CHRISTIANO, 2017; IZUMI, 2017). A sua estrutura consiste em um substrato P de orientação (100), no qual é submetido por um rigoroso processo de limpeza química. Logo em seguida, o oxinitreto de silício é crescido pelo processo RTP (processamento térmico rápido), alumínio é depositado e; no final é feita a definição da estrutura de grade da célula solar por litografia. O óxido formado nas costas é removido por uma solução de HF e o alumínio é depositado também nas costas do substrato. O perfil da estrutura MOS desenvolvida pelo grupo pode ser visto na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Célula fotovoltaica MOS GSIDE.

Fonte: Autor.

A célula solar MOS desenvolvido pelo grupo GSIDE tem como principal diferencial o processo de crescimento do dielétrico na forma de oxinitreto de silício Si/SiOxNy (CHRISTIANO, 2017). A descrição completa dessa técnica foi detalhada no capítulo 3.1.2. Outra peculiaridade contida nessa estrutura é sua curva C-V (capacitância-tensão) e G-V (condutividade-tensão), conforme a Figura 2.7.

Figura 2.7 – (a) Curvas C-V e G-V para células solares MOS de área $9 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ com oxinitreto de silício crescidos à 850°C , (b) gráficos de $\psi_s \times V_G$ e $Q_i/q \times V_G$ para os dielétricos de porta MOS.

Fonte: (a) Adaptado de Alândia (2016) e (b) (IZUMI, 2017).

A Figura 2.7 mostra as curvas típicas C-V e G-V de células solares MOS de área $9 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ com oxinitretos de silício crescidos à 850°C . No gráfico é possível perceber 3 picos característicos. Para explicar esse fenômeno considera-se que o

potencial aplicado na porta vai do valor positivo para o valor negativo, ou seja, da direita para a esquerda segundo o gráfico. A célula, inicialmente, está em depleção para $V_G > V_{fb2}$ e no momento que $V_G = V_{fb2}$ (Pico 1) ocorre o desaparecimento do efeito de blindagem na região de depleção e conseqüentemente a transição para a região de acumulação. Entretanto, no pico 2, a acumulação induz cargas positivas no oxinitreto de silício na interface semiconductor/óxido, assim, causando a formação de uma nova blindagem na estrutura MOS e conseqüentemente novamente a depleção. O efeito de blindagem é paralisado novamente no Pico 3 e, por esse motivo, foi nomeado de V_{fb1} (tensão de faixa plana 1). Após V_{fb1} ocorre a diminuição da capacitância devido ao aumento da condutividade quando são aplicadas tensões negativas na porta (IZUMI, 2017).

É importante destacar na Figura 2.7 que Izumi et al. (2017) estabeleceram que existe uma densidade de cargas positivas na interface SiO_xN_y/Si , normalizável em relação a “q” (Q_i/q) com comportamento praticamente linear com o potencial de superfície ψ_s ou a tensão de porta V_G como mostrado na Figura 2.7b conforme demonstrado por Izumi et. al. (2017). Tal comportamento da densidade de cargas positivas (Q_i) na interface consiste no acomodamento dessas cargas na interface de forma que a largura da região de depleção profunda W_d se forme sem a camada de inversão conforme destacado na Figura 2.7.

Baseado no comportamento linear da carga de interface (Q_i/q) e do potencial de superfície (ψ_s), Izumi et al. (2017) estabeleceram uma relação de proporcionalidade entre a tensão no dielétrico (V_{ox}) e a tensão de porta (V_G) conforme segue:

$$V_{ox} \approx V_G - V_{FB} \quad (2.3b)$$

onde V_{FB} é a tensão de faixa plana associada ao pico 1 na Figura 2.7a ($V_{FB} \approx -0,75$ V).

Outra vantagem apresentada pela célula solar MOS GSIDE é sua característica estável, reproduzível e de baixo custo relativo e; que pode ser empregada para aplicações em “*Energy Harvesting*”.

2.2. Mecanismos de tunelamento no dielétrico de porta

Na estrutura MOS com espessuras de óxido de silício inferiores a 2 nm ocorre um aumento significativo no valor da densidade de corrente de tunelamento na porta (CHRISTIANO, 2017). Por esse motivo, na tecnologia atual de fabricação de circuitos integrados MOS, dielétricos de alta constante dielétrica k têm sido empregados (high- k) como o óxido de háfnio (HfO_2) e o óxido de zinco (ZnO_2) (IZUMI, 2017). Os principais mecanismos de tunelamento que ocorrem em estruturas MOS utilizando dielétricos ultrafinos de porta são:

- Tunelamento direto;
- Tunelamento de Fowler-Nordheim;

A diferença entre esses dois tipos de tunelamento é que no Fowler-Nordheim (FN) ocorre tunelamento de portadores através de uma barreira de energia triangular, conforme mostra a Figura 2.8a e no caso direto (DT: Direct Tunneling), o tunelamento ocorre através de uma barreira de energia com perfil trapezoidal (Figura 2.8b) (DEPAS, 1995; IZUMI, 2017; RANUÁREZ, 2006).

Figura 2.8 – Diagramas de faixas de energia do Tunelamento de Fowler- Nordheim (FN) – (a) e do tunelamento direto (DT) – (b).

Fonte: (RANUÁREZ, 2006).

A densidade de corrente de tunelamento pode ser descrita pela Equação 2.4 (DEPAS, 1995; TARR, 1983):

$$J = \frac{4\pi m_t}{h^3} \int_0^{E_f} dE \int_0^E dE_t T_t(E, E_t) \quad (2.4)$$

onde, E_t é o componente transversal da energia do elétron, m_t a massa efetiva transversal do elétron, h é a constante de Planck, E_f é o nível de energia de Fermi no substrato, E é a energia total do elétron e T_t é a probabilidade de transmissão por tunelamento que pode ser descrito por (DEPAS, 1995):

$$T_t(E, E_t) = \exp \left[-\frac{2}{\hbar} \int_0^{x_1} \sqrt{2m_t E_t - 2m_{ox} [E - E_{C,ox}(x)]} dx \right] \quad (2.5)$$

onde x_1 é a espessura da barreira, m_{ox} é a massa efetiva do elétron no dielétrico e $E_{C,ox}$ é o nível de energia de condução que pode ser descrito por:

$$E_{C,ox}(x) = \phi_B - E_f - E - qE_{ox}x \quad (2.6)$$

onde o E_{ox} é o campo elétrico no dielétrico e ϕ_B é altura da barreira. O termo x_1 para o tunelamento FN é descrito como a distância percorrida através da barreira triangular (Equação 2.7) e para o caso DT, coincide com a própria espessura do dielétrico de porta t_{ox} (Equação 2.8).

$$x_1 = \frac{\phi_B + E_f - E}{qE_{ox}} \quad (2.7)$$

$$x_1 = t_{ox} \quad (2.8)$$

Substituindo as Equações 2.7, 2.8 em 2.9 (DEPAS, 1995), obtém-se as equações de tunelamento FN (2.9) e DT (2.10) conforme segue:

$$T_{FN}(E, E_t) = \exp \left(-\frac{\beta}{E_{ox}} \frac{(\phi_B + E_f - E + \frac{m_t}{m_{ox}} E_t)^{\frac{3}{2}}}{\phi_B^{3/2}} \right) \quad (2.9)$$

$$T_{DT}(E, E_t) = \exp \left(-\frac{\beta}{E_{ox}} \left[\frac{(\phi_B + E_f - E + \frac{m_t}{m_{ox}} E_t)^{\frac{3}{2}} - (\phi_B + E_f - E + \frac{m_t}{m_{ox}} E_t - qV_{ox})^{\frac{3}{2}}}{\phi_B^{3/2}} \right] \right) \quad (2.10)$$

Realizando algumas aproximações e considerando que a transmissão por tunelamento ocorra em torno de $E = E_f$ e $E_t = 0$, obtém-se por meio da resolução da integral da Equação 2.4 as equações de tunelamento FN (Equação 2.11) e DT

(Equação 2.12) (DEPAS, 1995; LENZLINGER, 1969; SCHUEGRAF, 2003; RANUÁREZ, 2006) como detalhado no apêndice A:

$$J_{FN} = AE_{ox}^2 \exp\left(-\frac{\beta}{E_{ox}}\right) \quad (2.11)$$

$$J_{DT} = \frac{AE_{ox}^2}{\left[1 - \left(1 - \frac{qV_{ox}}{\phi_B}\right)^{\frac{1}{2}}\right]^2} \exp\left\{-\frac{\beta}{E_{ox}}\right\} \quad (2.12)$$

onde os parâmetros A e β são descritos por:

$$A = \frac{q^3}{16\pi^2 \hbar \phi_B} \quad (2.13)$$

$$\beta = \frac{4}{3} \frac{(2m_{ox})^{\frac{1}{2}}}{q\hbar} \phi_B^{\frac{3}{2}} \quad (2.14)$$

A resolução detalhada da integral representada pela Equação 2.4 com as aproximações mencionadas encontra-se no Apêndice A.

2.3. Equação de corrente das células MOS

Segundo Carr (CARR, 1971) e Rhoderick (RHODERICK, 1982; PULFREY, 1978), a densidade de corrente através de células MOS, na ausência de luz, é escrita como:

$$J = \Theta A^* T^2 \exp(-q\phi_B / KT) [\exp(qV / nkT)] \quad (2.15)$$

onde Θ é uma constante de tunelamento que depende da espessura do dielétrico, A^* é a constante de Richardson, T é a temperatura em Kelvin, ϕ_B é a altura da barreira (eV), V é a tensão aplicada na porta, k é a constante de Boltzman e n é o fator de idealidade.

De acordo com a Equação 2.15, existem vários fatores que acabam favorecendo ou inibindo a densidade de corrente através das células MOS do tipo inversão em Si. A modelagem dessa densidade da corrente deve levar em consideração diversos parâmetros tais como espessura, função trabalho do metal de porta, temperatura, nível de iluminação e tipo de substrato.

A densidade de corrente de tunelamento depende diretamente da concentração de fótons incidentes (Figura 2.9), que por sua vez geram os pares elétrons-lacunas. Particularmente no silício, a corrente é expressa como (PULFREY, 1978):

$$J = J_0 \exp\left(\frac{q \Gamma V}{kT}\right) - J_G \quad (2.16)$$

onde J_0 é a densidade de corrente no escuro, J_G é a densidade de corrente gerada, V é a tensão em circuito aberto e Γ é um fator de correção dependente da geração e recombinação, que, por sua vez, afeta o potencial de superfície ψ_s , diminuindo-o ou aumentando-o.

Figura 2.9 - Efeitos da luz em célula solar MOS sobre substrato P.

Fonte: adaptado de (PULFREY, 1978)

A diminuição no potencial de superfície (embutido no fator $n = 1/\Gamma$) favorece a corrente de tunelamento.

Fazendo $V = V_{OC}$ na Equação 2.16 para $J = 0$ e isolando-o, obtém-se uma relação de primeira ordem entre a tensão de circuito aberto V_{OC} e as densidades de corrente de curto circuito J_{SC} e de escuro J_0 conforme segue (Pulfrey 1978):

$$V_{OC} = n \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{J_{SC}}{J_0} + 1\right) \quad (2.17)$$

onde $n = 1/\Gamma$, k é a constante de Boltzmann ($k = 8,617 \times 10^{-5}$ eV/K), sendo T a temperatura em Kelvin e q é a carga elementar ($q = 1,609 \times 10^{-19}$ C). A Equação 2.17 pode ser aplicada para células solares com $n = 1/\Gamma$ aproximadamente iguais o que pode ocorrer para células com mesma espessura de dielétrico, mesma função trabalho do metal de porta, operando na mesma temperatura e com o mesmo nível de iluminação e mesmo tipo de substrato.

3. Procedimento experimentais

Neste capítulo são descritos os processos empregados na fabricação de Células Solares MOS (CSMOS) e as justificativas no emprego dos materiais e estruturas. No tópico “**Descrição dos processos**” será abordado a importância do processo de limpeza química, oxinitreção pela técnica RTP, deposição do metal de porta (alumínio e magnésio). Em **Caracterização das Células Solares MOS (CSMOS)** será descrito como foi realizado a obtenção das curvas I-V (corrente-tensão).

3.1. Descrição dos processos empregados

3.1.1. Limpeza química

O processo de limpeza química consiste na utilização de três banhos químicos (REINHARDT, 2008). Esse processo é de grande importância, pois influi diretamente no desempenho final das células solares MOS (CSMOS) e, portanto, também em seu rendimento (SHEWCHUN, 1977). Além disso, é observado na literatura que o tipo de condicionamento superficial atua nas propriedades finais do dielétrico de porta, incluindo a cinética de crescimento do dielétrico de porta, o mecanismo de ruptura dielétrica e as correntes de fuga e tunelamento (SANTOS, 1995; SANTOS, 1996).

Por outro lado, a contaminação da superfície necessita de um rigoroso controle durante o processamento das amostras. A concentração e contaminantes metálico e materiais particulados deve ser inferior a 10^{10} cm^{-2} , sendo ainda necessário uma baixa rugosidade superficial (SANTOS, 1995, 1996). A fim de atingir esses objetivos, adotou-se a limpeza RCA (*Radio Corporation of America*) com algumas modificações (sequência de processo sem peróxido de hidrogênio na imersão SC2 com foco de minimizar a rugosidade superficial) (REINHARDT, 2008; SANTOS, 1995; TOQUETI, 2005). A sequência de limpeza química foi:

- Enxágue na água deionizada (DI) corrente durante 5 min;

- Imersão em solução química de $16 \text{ H}_2\text{O} + 7 \text{ H}_2\text{O}_2 + 1\text{NH}_4\text{OH}$ na temperatura de 90°C durante 15 min (SC1);
- Enxágue em água DI corrente por 5 min;
- Imersão em solução química de $4 \text{ H}_2\text{O} + 1 \text{ HCl}$ em 90°C por 15 min (SC2);
- Enxágue em água DI corrente por 5 min.
- Imersão em solução química de $80 \text{ H}_2\text{O} + 1 \text{ HF}$ na temperatura ambiente por 100 s;
- Enxágue em água corrente por 3 min;

O processo de limpeza SC1 (*Standard Cleaning 1*) inicia-se com imersão do substrato dentro de uma solução alcalina (veja acima) a qual permite eliminar contaminantes superficiais particulados e orgânicos. O banho SC2 (*Standard Cleaning*) consiste na imersão em uma solução ácida que permite remover contaminantes metálicos na superfície. A imersão em solução contendo HF remove o óxido nativo na superfície do substrato crescido durante as etapas SC1 e SC2.

3.1.2.Oxinitreção pela técnica RTP

A obtenção do dielétrico de porta para fabricação da estrutura CSMOS do grupo GSIDE/LSI/EPUSP foi desenvolvida por (CHRISTIANO, 2017). Em seu trabalho, foi realizado uma adaptação de um forno convencional na sala limpa para funcionar como um forno RTP como mostrado na Figura 3.1 e, mais tarde, foi comprovada a característica reproduzível no fenômeno de tunelamento através dos dielétricos crescidos durante a fabricação de 196 estruturas CSMOS. Pode-se citar como principal vantagem da técnica RTP adaptada o seu baixo custo em relação aos fornos RTP comerciais.

Figura 3.1 - Esquema do forno convencional adaptado para o forno RTP.

Fonte: Adaptado (CHRISTIANO, 2017).

O processo RTP consistiu em realizar uma rápida inserção da amostra em um forno térmico convencional adaptado. O mecanismo usado para inserção da lâmina de silício foi através de uma vareta de quartzo contendo em seu extremo uma porta amostra com 3 pequenos apoios a fim de sustentar a lâmina de silício de 3 polegadas de diâmetro durante a rápida inserção dentro do forno. Esses 3 pequenos apoios foram dimensionadas para minimizar a massa térmica em contato com a lâmina de silício a fim de permitir um rápido aumento de temperatura durante a inserção da amostra (SANTOS; HASENACK, 1996). Os passos empregados nesse processo foram (CHRISTIANO, 2017):

- Manter a amostra na entrada do forno durante 5 min em ambiente de nitrogênio na temperatura de 600 °C;
- Realizar uma rápida inserção no centro do forno e processar a amostra durante o tempo desejado (tempo de processo) em ambiente de 5 N₂ : 1 O₂ na temperatura de 850 °C;
- Passivação da amostra durante 80 s em ambiente de nitrogênio na mesma temperatura;
- Deslocar a amostra para a entrada de forno e a deixar durante 5 min em ambiente de nitrogênio para resfria-la.

O perfil de temperatura obtido para processamento na temperatura de 850 °C durante 80 s (sem a etapa de passivação) pode ser visto na Figura 3.2. Os tempos de processo usados para o crescimento do dielétrico de porta foram de 10 s, 20 s, 80 s e 100 s e foram obtidas espessuras efetivas de 1,65 nm; 1,73 nm; 2,10 nm e 2,23 nm por elipsometria (Autoel IV, com comprimento de onda de 632 nm) e

comprovadas pelo Microscópio Eletrônico de Transmissão (MET) com erros inferiores a 5% (CHRISTIANO, 2017). A Figura 3.3 mostra a relação do tempo de processo e a espessura obtida durante o crescimento do dielétrico de porta.

Figura 3.2 - Perfil de temperatura obtido no forno RTP adaptado para a temperatura de 850°C e tempo de processo de 80 s.

Fonte: (CHRISTIANO, 2017).

Figura 3.3 - Espessuras obtidas por elipsometria no processo RTP para diferentes tempos de processo.

Fonte: Adaptado (CHRISTIANO, 2017).

A rugosidade média quadrática (RMS) apresentada pelos dielétricos crescidos por meio da técnica RTP apresentaram valores entre 0,65 nm e 0,95 nm para tempos de processo na faixa entre 0 s e 220 s. Nesse intervalo ocorre o aumento da rugosidade média quadrática RMS em função do tempo de processo. Como parâmetro de comparação pode-se citar que a rugosidade média quadrática do substrato de partida foi de 0,033 nm, portanto, ocorre um aumento de uma ordem de grandeza quando o dielétrico é crescido por RTP (CHRISTIANO, 2017; SANTOS, 1996; TOQUETI, 2005).

A Figura 3.4 mostra o espectro XPS (espectrometria por emissão de fotoelétrons) obtido por meio do dielétrico crescido pela técnica RTP. O pico localizado em 532,6 eV (O 1s) representa as ligações do oxigênio com o silício (Si-O) e o pico em 402,4 eV (N 1s) corresponde ligações entre nitrogênio e oxigênio (N-O) (CHRISTIANO, 2017). Os sinais no espectro XPS indica a formação de SiO_xN_y (CHRISTIANO, 2017).

Figura 3.4 - Espectro XPS obtido de amostra crescida na temperatura de 850°C com os picos N-O e Si-O.

Fonte: (CHRISTIANO, 2017).

As porcentagens atômicas (%atm) presentes no dielétrico foram obtidas a partir dos picos de XPS mencionados anteriormente resultando nas seguintes concentrações: silício (2p 1s) 65,5% atm, oxigênio (O 1s) 33,7% atm, nitrogênio (N 1s) 0,8% atm. O percentual presente nitrogênio dentro do óxido de silício (SiO_x) foi

de 2,1% (CHRISTIANO, 2017). Assim, foi constatada por meio dessa técnica a formação de oxinitreto empregando o equipamento do RTP adaptado.

A calibração do forno foi realizada por meio de um termopar comercial colado em uma lâmina de silício utilizando os passos já mencionados para obtenção do perfil temporal de temperatura. Assim, para obtenção do dielétrico de porta das células solares MOS, variou-se o tempo de processo quando necessário. Esse procedimento mostrou ser adequado devido as características reprodutíveis na extração de suas curvas I-V, baseado na excelente reprodutibilidade da relação tempo de processo x espessura do oxinitreto de silício.

3.1.3. Deposição do metal de porta (alumínio e magnésio)

Adotou-se, inicialmente, o alumínio como material de porta nas células solares MOS por propiciar boas características elétricas, estabilidade térmica e baixa resistividade (ALANDIA, 2016).

A deposição foi realizada por meio da deposição física em fase de vapor (PVD) por via térmica por meio do uso do equipamento Auto 306 Edwards. Nesse equipamento, o alumínio é colocado em um filamento de tungstênio no qual faz-se circular uma corrente de 80 A na pressão de 9×10^{-6} Torr a fim de promover a evaporação térmica do alumínio. Com resultado da evaporação, depositou-se 200 nm de alumínio na frente e nas costas das amostras.

O magnésio foi escolhido como material de porta alternativo para as estruturas CSMOS. Conforme será mostrado no capítulo de resultados, o magnésio foi escolhido devido a sua função trabalho ($\sim 3,7$ eV) ser inferior à do alumínio (MICHAELSON, 1977) o que permitirá melhoria no rendimento de conversão luminosa.

Um dos desafios encontrados durante o processo de evaporação térmica de magnésio foi o controle da oxidação que ocorria nesse material e obter soluções químicas capazes de corroer o magnésio sem degradar o dielétrico de porta das CSMOS. A solução encontrada para os dois problemas mencionados foi a utilização da técnica *LIFT-OFF* (RANGEL, 2014) para definição da geometria de porta seguido

da deposição de alumínio sobre o magnésio para prover proteção contra a sua oxidação.

A técnica PVD por evaporação térmica foi empregado para depositar o magnésio. O magnésio foi carregado em uma navícula de tungstênio e a temperatura foi elevada lentamente até atingir 80 A na pressão de 9×10^{-6} Torr, possibilitando uma deposição de aproximadamente 40 nm. Após a deposição do magnésio, o vácuo é interrompido e depois é realizado a deposição de 200 nm de alumínio sobre o magnésio.

A exposição momentânea do magnésio ao ar, não provoca a oxidação imediata do mesmo e isso é comprovado indiretamente através da reprodutibilidade das características J-V extraídas. No entanto, quando ocorre um contato prolongado com o ar ambiente, o magnésio oxida e suas características J-V mudam e passam a ser praticamente as mesmas das células com porta de alumínio o que pode ser explicado pelo fato das suas funções trabalho do óxido de magnésio e do alumínio serem muito próximas.

3.1.4.Litografia com *Lift-Off*

No processo *lift-off*, utilizado na metalização com Mg, foi empregado a inversão da imagem da máscara na definição do fotorresiste com perfis de parede negativo. O procedimento para realização do processo *Lift-Off* utilizando o fotorresiste AZ5214E foi estudado por (RANGEL, 2014) e está descrito conforme segue:

- A amostra é presa por vácuo em porta amostras em um equipamento *spinner* onde é colocado o fotorresiste AZ5214E na região central da amostra.
- No equipamento *spinner*, a amostra é rotacionada em 3500 rpm por 40 s;
- Pré-cura na temperatura de 110 °C por 50 s;
- Exposição UV do fotorresiste durante 3 s através da máscara com o reticulado da célula solar;
- Cura em 110 °C durante 2 min;
- Exposição UV sem a máscara por 15 s;

- Revelação do fotorresiste com a solução comercial MIF300 puro durante 50 s;
- Pós-cura em 110 °C por 1,5 min;

O processo *lift-off* empregado na fabricação de células MOS com porta de magnésio consistiu em utilizar o fotorresiste negativo como descrito anteriormente (processo 1) e foi depositado o magnésio e alumínio (processo 2). O fotorresiste foi removido por meio do uso de acetona aquecida na temperatura de 80 °C e, nesse processo, o magnésio e alumínio que foram depositadas sobre o fotorresiste foram removidas simultaneamente (processo 3). O processo *lift-off* pode ser visto na Figura 3.5.

Figura 3.5 - Sequência de processo *Lift-off* utilizada na fabricação CSMOS com porta de magnésio.

Fonte: Autor.

3.2.Fabricação de células solares MOS com porta de alumínio (Al/SiOxNy/p-Si CSMOS).

No processo de fabricação das CSMOS com porta de alumínio utilizou-se substratos do tipo P (100) de 3 polegadas com espessura de aproximadamente 380 μm e resistividades de (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ e (0,1 - 1) $\Omega\cdot\text{cm}$. A Figura 3.6 mostra o detalhamento do processo de fabricação da estrutura CSMOS iniciando pela limpeza química.

O próximo passo após a limpeza química foi o crescimento do dielétrico de porta pelo processo RTP em 850 °C crescidos com espessuras de 1,65 nm; 1,73 nm; 2,10 nm e 2,23 nm. A Figura 3.6b mostra o perfil da amostra após essa etapa.

Na sequência, depositou-se cerca de 200 nm de alumínio pelo processo PVD (Figura 3.6c) e depois utilizou-se a litografia óptica (exposição de fotorresiste positivo por luz UV) para definir as dimensões das células solares MOS (Figura 3.6d). Posteriormente foi realizado corrosão do alumínio em solução com 175 H₃PO₄ + 70 H₂O + 15 HNO₃ na temperatura de 40 °C (Figura 3.6e) e a remoção do fotorresiste. O dielétrico de porta formado nas costas foi removido por meio da solução de HF (20 H₂O : 1 HF) por meio de aplicação mecânica e, por fim, alumínio (200 nm) foi depositado nas costas (Figura 3.6f). É importante destacar que no processo com magnésio, o fotorresiste AZ5214E foi depositado após o crescimento do dielétrico de porta e foi definido com o negativo da máscara conforme ilustra será mostrado no item 3.3. O processo de sinterização para melhoria do contato Al/Si não foi realizado para esse tipo de célula, pois durante os testes foi verificada a degradação dos parâmetros fotovoltaicos J_{sc} e V_{oc} após a sinterização em ambiente de N₂ + 10%H₂ na temperatura de 450 °C.

Figura 3.6 - Estruturas obtidas durante a fabricação de Al/CSMOS.

Fonte: Autor.

Para cada amostra nas células solares CSMOS foi fabricado quatro diferentes amostras com reticulada na porta com larguras (L) e distâncias (D) entre linhas (LxD) de: 50 μm x 50 μm , 50 μm x 100 μm , 100 μm x 100 μm e 100 μm x 150 μm com área total (A_T) de 3,24 cm^2 . Na Figura 3.7a pode ser visualizada a CSMOS de forma representativa vista em topo, Figura 3.7b em perfil e real vista em topo Figura 3.7c.

Na Tabela 3.1 pode ser vista a relação da geometria das células MOS fabricadas com o número de linhas, perímetro, área de porta (A_G) e área exposta (A_{ex}). Figura 3.7 - Célula solar MOS de forma ilustrativa vista em topo (a), em perfil (b) e real vista em topo (c).

Fonte: Autor.

Tabela 3.1 – Geometria das células MOS: largura de linha (L), distância entre linhas (D), número de linhas (Nº L), perímetro, área da porta (A_G) e área exposta (A_{ex}).

L (μm) x D (μm)	Nº L	Perímetro (cm)	A_G (cm^2)	A_{ex} (cm^2)
50 x 50	180	651,6	1,63	1,61
50 x 100	120	434,4	1,09	2,15
100 x 100	90	325,8	1,63	1,61
100 x 150	71	257,0	1,34	1,9

Fonte: Adaptado (CHRISTIANO, 2017).

3.3.Fabricação de células solares MOS com porta de magnésio (Al/Mg/SiOxNy/p-Si CSMOS).

Na fabricação das estruturas CSMOS com porta de magnésio, substratos do tipo P (100) com 3 polegadas de diâmetro, espessura de aproximadamente 380 μm e resistividades de 1 - 10 $\Omega\cdot\text{cm}$ e (0,1 - 0,5) $\Omega\cdot\text{cm}$ foram empregadas. Também

foram empregadas lâminas de menor resistividade de $(0,01 - 0,05) \Omega \cdot \text{cm}$ com espessura de $525 \mu\text{m}$.

Inicialmente, a limpeza química foi realizada e depois o dielétrico de porta foi crescido pelo processo RTP na temperatura de 850°C para obter dielétrico de porta de espessura de $1,73 \text{ nm}$ (Figura 3.8b). Na sequência, utilizou-se o fotorresiste negativo para realizar o processo *lift-off* (Figura 3.8c) como descrito no Capítulo 3.1.4.

Em continuação ao processo de fabricação, depositou-se cerca de 40 nm de magnésio por PVD e em seguida, 200 nm de alumínio pelo mesmo processo (Figura 3.8d). A remoção do fotorresiste a fim de deixar apenas o reticulado de magnésio recoberto com alumínio foi realizada por meio da imersão da amostra em acetona em 80°C (Figura 3.8e). O dielétrico de porta formado nas costas foi removido por meio da solução diluída de HF ($20 \text{ H}_2\text{O} : 1 \text{ HF}$) aplicado mecanicamente e, como etapa final, alumínio (200 nm) foi depositado nas costas (Figura 3.8f).

Figura 3.8 - Perfis obtidos durante a fabricação de Al/Mg/CSMOS.

Fonte: Autor.

As amostras com porta de magnésio foram fabricadas com a mesma espessura de dielétrico de porta de 1,73 nm como no caso das amostras com porta de alumínio. Essa espessura foi empregada como referência na comparação das características J-V das amostras com porta de alumínio e magnésio.

3.4. Caracterização elétrica das células solares MOS (CSMOS)

A estrutura para a extração das curvas I-V (corrente-tensão) pode ser vista na Figura 3.9. O equipamento utilizado foi o 4156C Agilent programado para aplicar tensão de 0,1V/s e trabalhar na faixa de -1 a 1 V. Como fonte de luz, adotou-se lâmpadas LED (1,5 W e 280 cd) e halógena (50 W e 650 cd) fixadas a uma distância d das estruturas CSMOS. Todas as medidas foram realizadas dentro de uma caixa de alumínio anodizado (caixa preta) aterrada para evitar problemas de interferência externa e trabalhando na temperatura ambiente ($\sim 23^{\circ}\text{C}$).

Figura 3.9 - Estrutura para medidas de células solares MOS.

Fonte: Autor.

Nas medições I-V das células fotovoltaicas, foi inicialmente extraída a resistência total de cabos e pontas para contato elétrico do sistema de medição. Essa resistência impacta na resistência em série total com a célula CSMOS a qual degrada a característica I-V. Para descontar a resistência de cabos+contato de

agulha, foi realizada uma medida I-V curto-circuitando-se a ponta de medida com a base condutora empregada para o contato traseiro da célula CSMOS. A resistência foi extraída da inclinação da característica I-V conforme mostrado na Figura 3.10 na situação curto-circuitada, resultando $R_{s,eq} = 9,0 \, \Omega$. O efeito de resistência de cabos+ponta de contato foi removido das características I-V extraídas a partir da correção dos valores da tensão de porta associados aos respectivos valores de corrente circulante I_{GB} ($V_G' = V_G - R_{s,eq} \cdot I_{GB}$).

Figura 3.10 - Medidas I-V obtida curto-circuitando-se a ponta de medida com a base condutora que faz o contato traseiro da célula CSMOS .

Fonte: Autor.

A densidade de potência incidente (em W/cm^2) das lâmpadas LED e halógena nas amostras foi obtida por meio da seguinte expressão (CHRISTIANO, 2017):

$$P_{in} = \frac{IL \cdot f(\Delta\lambda)}{683 \cdot d^2} \quad (3.1)$$

onde IL é a intensidade luminosa em candela (cd), d é a distância entre a fonte de luz e a amostra e $f(\Delta\lambda)$ é a função luminosa integrada que contabiliza diferentes

penetrações para diferentes comprimentos de onda λ no intervalo $\Delta\lambda$ (CHRISTIANO, 2017).

O espectro típico das lâmpadas LED e halógena podem ser vistas na Figura 3.11. O motivo de usar as lâmpadas LED e halógenas foi o de simular o efeito nas células solares produzido em iluminação nos ambientes internos com energia elétrica com potência incidente (mW/cm^2) inferior do sol. Foi adotado essas diferentes lâmpadas devido as suas diferenças espectrais, a lâmpada LED (Figura 3.11a) com comprimento de onda na faixa de (300 – 750) nm (representado pela faixa colorida) e a lâmpada halógena (Figura 3.11b) comprimento de onda direcionado ao infravermelho com espectro que engloba uma faixa de comprimentos de onda semelhante ao do espectro solar motivaram a utilização de ambas a fim de avaliar diferenças de conversão da energia luminosa em energia elétrica.

Figura 3.11 - Espectro típico das lâmpadas LED (a) e halógena (b).

Fonte: (CHRISTIANO, 2017).

3.4.1 Potências incidentes nas amostras iluminadas com lâmpada LED

Para a extração das características J-V das amostras iluminadas com lâmpadas LED, foi adotada 2 distâncias LED-célula CSMOS: 4,5 cm e 9 cm. Para esse experimento, utilizou-se lâmpada LED com potência de 1,5 W e intensidade luminosa (I_L) de 280 cd. Assim, utilizando-se a Equação 3.1 com $I_L = 280$ cd e

considerando a função luminosa integrada como sendo unitária; foi obtido para $d = 4,5$ cm uma potência incidente (P_{in}) de $20,2 \text{ mW/cm}^2$ e para $d = 9$ cm, $P_{in} = 5,1 \text{ mW/cm}^2$. Para simplificar, a potência maior ($d = 4,5$ cm) será denominada de alta potência (**AP**) e a potência menor ($d = 9$ cm), de baixa potência (**BP**)

3.4.2 Potências incidentes nas amostras iluminadas com lâmpada Halógena

As medidas J-V para lâmpada Halógena foram realizadas utilizando-se a mesma abordagem já empregada para a lâmpada LED com duas distâncias de 4,5 cm e 9 cm. A lâmpada Halógena utilizada nesse experimento foi de 50 W e intensidade luminosa de 650 cd. Por meio da Equação 3.1, considerando-se a função luminosa como sendo unitária e $IL=650$ cd, obtemos para $d = 4,5$ cm, $P_{in} = 47,0 \text{ mW/cm}^2$ e, para $d = 9$ cm, $P_{in} = 11,7 \text{ mW/cm}^2$. Assim como no caso de iluminação por LED, chamaremos a maior potência ($d = 4,5$ cm) de alta potência (**AP**) e menor potência ($d = 9$ cm) de baixa potência (**BP**).

4. Resultados e discussões

Neste capítulo são descritos os resultados obtidos na caracterização das células solares MOS (CSMOS) e a modelagem das curvas J-V utilizando modelos de tunelamento. As representações dos sentidos de corrente e de tensão ao longo desse capítulo foram convencionadas conforme representado na Figura 4.1. Assim, J_{GB} é densidade de corrente da porta para o corpo, J_{BG} é a densidade de corrente do corpo para a porta e V_G é a tensão na porta em relação à referência terra.

Figura 4.1 – Sentido da corrente e tensão adotada para CSMOS.

Fonte: Autor.

4.1. Resultados experimentais

As lâmpadas LED e halógenas foram utilizadas para simular o efeito da iluminação em ambientes internos. As densidades de potência foram configuradas para simular situações com luz artificial em diferentes intensidades e duas diferentes respostas espectrais com lâmpadas LED e halógena (Figura 3.10). As densidades de potência incidentes (P_{in}) empregadas no trabalho foram obtidas através da Equação 3.1 com distâncias d de 9 cm (**Baixa Potência – BP**) e 4,5 cm (**Alta Potência – AP**).

Em cada lâmina processada com estrutura de célula solar MOS foram construídos 4 dispositivos diferentes com largura da linha (L) e distância (D) entre as

linhas, respectivamente, como segue: 50 μm x 50 μm , 50 μm x 100 μm , 100 μm x 100 μm e 100 μm x 150 μm . Para cada uma dessas estruturas, foram extraídas as curvas J-V em 5 situações diferentes de medida (sem luz e com luz incidente empregando duas potências diferentes para dois tipos diferentes de lâmpadas: LED e halógena) conforme descrito no capítulo 3 sobre os procedimentos experimentais empregados.

Foram analisadas amostras com porta de alumínio (Al/SiOxNy/p-si), resistividade de substrato de (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ e 4 diferentes espessuras de dielétrico de porta de 1,65 nm; 1,73 nm; 2,10 nm e 2,23 nm. Especificamente para amostras com espessura de 1,73 nm e 2,10 nm, foram utilizados substratos com resistividade de (0,1 - 1) $\Omega\cdot\text{cm}$. Para fins comparativos e visando melhorar o desempenho das células CSMOS, foram também fabricados dispositivos com porta de magnésio (Al/Mg/SiOxNy/p-si) com espessura de dielétrico de porta fixa em 1,73 nm e substratos com resistividade de (0,01 - 0,05) $\Omega\cdot\text{cm}$, (0,1 - 0,5) $\Omega\cdot\text{cm}$ e (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$, respectivamente. Portanto, neste presente trabalho foi possível construir 36 células fotovoltaicas distintas o que permitiu estudar o efeito da espessura do dielétrico, o efeito da resistividade do substrato o efeito da função trabalho do metal de porta no desempenho das células CSMOS em situações sem luz e iluminadas por lâmpadas LED ou lâmpadas halógenas.

4.1.1. Característica corrente-tensão célula solar MOS sem iluminação

Inicialmente, as células CSMOS sem iluminação foram caracterizadas eletricamente quanto à sua curva J-V, principalmente no que se refere aos parâmetros J_0 (densidade de corrente de escuro), n (fator de idealidade), R_s (resistência série) e G_P (condutância em paralelo). O modelo característico das células solares pode ser visto na Figura 4.2 onde estão indicadas as duas resistências parasitárias R_s (resistência em série) e G_P (condutância em paralelo), um diodo MOS e uma fonte de corrente (J_L). A Figura 4.2-a representa o modelo sem luz e a Figura 4.2-b o modelo com luz. Assim, o equacionamento das características J-V das células solares pode ser escrito conforme segue (ORTIZ-CONDE, 2006):

$$J_{BG} = J_0 \left(e^{\frac{-V_G - R_S J_{BG}}{n V_T}} - 1 \right) + (-V_G - R_S J_{BG}) G_p - J_L \quad (4.1)$$

onde, J_0 é a densidade de corrente de escuro do diodo, V_G é a tensão aplicada no diodo MOS, V_T é a tensão térmica (para 23°C $V_T = k.T/q = 0,02552$ V), J_L é a densidade de corrente gerada pela exposição à luz e n é o fator de idealidade que pode apresentar valores a partir 1 e até mesmo superiores a 2 para diodos MOS (HUMADA, 2016).

Figura 4.2 – Modelo para as células solares MOS para situação sem luz (a) e com luz (b).

Fonte: Autor.

Para a utilização da Equação 4.1 seria necessário algumas simplificações ou métodos numéricos devido a sua solução transcendental. Portanto, adotou-se uma equação analítica para a extração dos parâmetros. O modelo analítico dessa equação pode ser visto na Equação 4.2, no qual foi modificada por meio da introdução da função “ W_0 ” de Lambert (ramo principal da função). Esse tipo de função permite-nos trabalhar com solução não triviais como $ye^y = x$. O Apêndice F descreve detalhadamente a obtenção das soluções da Equação 4.2 utilizando a função de Lambert.

$$J_{BG} = \frac{n V_T}{R_S} W_0 \left[\frac{J_0 R_S}{n V_T (1 + R_S G_p)} e^{\frac{-V_G + R_S (J_0 + J_L)}{n V_T (1 + R_S G_p)}} \right] + \frac{-V_G G_p - (J_0 + J_L)}{1 + R_S G_p} \quad (4.2)$$

A Equação 4.2 descreve o comportamento da J-V das células solares MOS. Para utilizar esse mesmo modelo sem luz basta considerar o termo J_L como sendo

nulo e assim realizar o ajuste de parâmetros das curvas experimentais sem luz e obter n , R_s , G_P e J_0 . Na Figura 4.3 pode ser visto o ajuste de curvas para as células com porta de alumínio e espessura entre 1,65 nm e 2,23 nm.

Figura 4.3 – Ajuste das curvas sem luz para amostra com espessura de 1,65 nm; 1,73 nm; 2,10 nm e 2,23 nm.

Fonte: Autor.

No Apêndice G, as Tabelas G1 e G2 mostram os parâmetros extraídos para um conjunto significativo de amostras para a situação sem luz utilizando as diferentes geometrias e espessuras de dielétrico de porta mostradas na Figura 4.3 e, também, para diferentes resistividades de substrato. A Tabela 4.1 resume valores médios para amostras com porta de alumínio, resistividade de (1 - 10) Ω.cm e espessuras dos dielétricos de porta entre 1,65 nm e 2,23 nm. De forma geral, é possível observar na Tabela 4.1 que a densidade de corrente de escuro diminui com a diminuição da espessura enquanto que os parâmetros R_s e n aumentam com o aumento da espessura e a condutividade paralela G_P tende a diminuir (R_P tende a

aumentar com o aumento da espessura). Esses comportamentos observados podem ser explicados considerando que para espessuras menores de dielétrico a corrente de tunelamento tende a ser maior o que acaba diminuindo a largura da região de depleção ($-V_G < -V_{FB}$) e como consequência a corrente gerada nesta região o que implica em menor corrente de escuro. Por outro lado, nesta situação, a resistência série tende a ser dominada pela resistência do substrato saturando no menor valor para as menores espessuras (veja Tabela 4.1). Já o fator de idealidade é uma função complexa que depende da espessura do dielétrico de porta e da largura da região de depleção conforme CARD e RHODERICK, 1971. No entanto, o fator de idealidade n é altamente dependente do parâmetro de primeira ordem, a espessura. Essa dependência, para menores espessura de dielétrico de porta faz o fator passar a ficar próximo de 2 e; com o aumento da espessura ocorre o aumento desse parâmetro (CARD; Rhoderick, 1971). Já a diminuição da condutividade paralela G_P (aumento de R_P) está diretamente ligada à diminuição da passagem de corrente através da estrutura CSMOS com o aumento da espessura, ou seja, a resistência parasita em paralelo passa a atuar em menor grau (ou melhor, aumenta de valor ou G_P tende a zero).

Tabela 4.1 – Parâmetros do modelo sem luz obtidos para as células solares MOS para amostras com resistividade entre (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$, porta de alumínio e espessura de dielétrico de porta de 1,65 nm, 1,73 nm, 2,10 nm e 2,23 nm.

t_{ox} (nm)	J_0 (A/cm ²)	G_P (S/cm ²)	R_s ($\Omega\cdot\text{cm}^2$)	n
1,65	3,68E-07	1,16E-05	20,03	2,19
1,73	1,41E-06	1,21E-05	20,45	2,46
2,10	2,21E-06	3,55E-07	37,55	3,05
2,23	4,43E-06	1,77E-06	78,39	3,70

Fonte: Autor.

A Tabela 4.2, por sua vez, mostra os valores médios dos parâmetros J_0 , G_P e R_s para amostras com porta de alumínio, resistividade entre (0,1 - 1) $\Omega\cdot\text{cm}$ e espessuras de 1,73 nm e 2,10 nm. É possível observar que o valor de J_0 é menor em relação a amostra com resistividade maior (compare Tabela 4.1 com Tabela 4.2 para a mesma espessura) e, como esperado, a resistência série acaba sendo maior para menores resistividades de substrato porque a corrente de tunelamento ficou

menor no substrato com menor resistividade comparado ao caso anterior de maior resistividade (compare as correntes de escuro nas Tabelas 4.1 e 4.2 para a espessura de 1,73 nm). Porém, o parâmetro R_s ao contrário do esperado, acabou diminuindo para a espessura de 2,1 nm, possivelmente devido à presença de defeitos no dielétrico mais espesso o que acabou intensificando a corrente de tunelamento e deixando a resistência R_s limitada pelo substrato de menor resistividade.

Tabela 4.2 – Parâmetros do modelo sem luz obtidos para as células solares MOS para amostras com resistividade entre (0,1 - 1) $\Omega\cdot\text{cm}$, porta de alumínio e espessura de dielétrico de porta de 1,73 nm e 2,10 nm.

Amostra	J_0 (A/cm ²)	G_P (S/cm ²)	R_s ($\Omega\cdot\text{cm}^2$)	n
1,73 (0,1-1) $\Omega\cdot\text{cm}$	2,64E-08	4,62E-08	87,84	2,36
2,10 (0,1-1) $\Omega\cdot\text{cm}$	1,14E-06	4,34E-06	34,15	3,15

Fonte: Autor.

Na Tabela 4.3 pode ser visto os parâmetros médios dos parâmetros J_0 , G_P e R_s para células com porta de magnésio e resistividade de (0,01 - 0,05) $\Omega\cdot\text{cm}$; (0,1 - 0,5) $\Omega\cdot\text{cm}$ e (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$, respectivamente. Através dos comportamentos apresentados na Tabela 4.3, podemos prever que a substituição do alumínio por magnésio como material de porta provoca melhoria das características J-V, pois a densidade de corrente de escuro (J_0) tende a diminuir. Analisando as células com porta de magnésio é possível aferir que a amostra com melhor rendimento é a célula com resistividade entre (0,1 - 0,5) $\Omega\cdot\text{cm}$, para a qual foi obtido o menor J_0 (4,77E-9 A/cm²). No caso da porta de magnésio, a diferença de função trabalho em relação ao silício aumenta o que tende a intensificar a corrente de tunelamento através do dielétrico de porta diminuindo a largura da região de depleção e, por consequência, a corrente de geração. A melhor relação custo-benefício é obtida para a resistividade (0,1 - 0,5) $\Omega\cdot\text{cm}$ dado que para a resistividade (0,01 - 0,05) $\Omega\cdot\text{cm}$ nem forma região de depleção com largura apreciável o que deve estar associado ao aumento da fuga através da estrutura representado pelo aumento do parâmetro G_P . Para o caso da resistividade de (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$, o efeito oposto deve estar ocorrendo, isto é, o efeito de blindagem da maior largura da região de depleção deve estar diminuindo a

corrente através da estrutura CSMOS a ponto de inclusive aumentar a resistência em série R_s .

Tabela 4.3 – Parâmetros do modelo sem luz obtidos para as células solares MOS para amostras com porta de magnésio, espessura de dielétrico de porta de 1,73 nm e resistividades entre (0,01 - 0,05) $\Omega\cdot\text{cm}$; (0,1 - 0,5) $\Omega\cdot\text{cm}$ e (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$.

Amostra	J_0 (A/cm ²)	G_P (S/cm ²)	R_s ($\Omega\cdot\text{cm}^2$)	n
Mg (0,01-0,05) $\Omega\cdot\text{cm}$	1,88E-07	2,95E-04	24,36	2,10
Mg (0,1-0,5) $\Omega\cdot\text{cm}$	4,77E-09	7,22E-07	16,28	1,53
Mg (1-10) $\Omega\cdot\text{cm}$	3,82E-08	4,99E-08	50,31	1,50

Fonte: Autor.

Nos itens a seguir, vamos apresentar os resultados as caracterizações elétricas e o ajuste de parâmetros para as amostras iluminadas. Nesse caso, de acordo com o modelo para as células solares mostrado na Figura 4.2b, é necessário utilizar uma fonte de corrente J_L constante. Entretanto, foi observado para as células MOS que o modelo com J_L constante não satisfaz o fenômeno de geração nesse tipo de célula. Na Figura 4.4 podemos apreciar a curva teórica (fonte de corrente J_L constante) e curva experimental de uma célula solar MOS. Essa divergência observada entre a curva J- V_G medida real e a curva teórica (com corrente J_L constante) é devido as cargas incorporados no dielétrico de porta que alteram as características C-V e G-V (Figura 2.7). Assim, utilizar a densidade de corrente de escuro como referência para aferir o comportamento J-V apresenta divergências que serão analisadas nos próximos itens deste capítulo.

Figura 4.4 – Gráfico para comparação das características J-V experimental e teórica para a célula solar MOS com espessura de 1,73 nm e geometria 100x150 μm utilizando porta de alumínio.

Fonte: Autor.

4.1.2. Estudos de células solares MOS com iluminação por lâmpada LED

Para o estudo das células solares MOS sob o efeito da lâmpada LED extraímos as características J-V com potências incidentes de $20,2 \text{ mW/cm}^2$ (**AP**) e $5,1 \text{ mW/cm}^2$ (**BP**) sendo que os seus parâmetros estão listados em detalhe nas tabelas apresentadas no Apêndice B. Também, curvas J-V complementares são mostradas no Apêndice D.

4.1.2.1. Célula solar com porta de alumínio (Al/SiOxNy/p-Si CSMOS) - LED

Inicialmente foi investigada a influência da espessura nas características J-V em amostras iluminadas com lâmpadas LED para a resistividade de substrato ($1 - 10$) $\Omega \cdot \text{cm}$ e espessuras de 1,65 nm, 1,73 nm, 2,10 nm e 2,23 nm. A Figura 4.5 mostra as características J-V das células iluminada por LED nas condições de $20,2 \text{ mW/cm}^2$ (AP) e $5,1 \text{ mW/cm}^2$ (BP) para as geometrias de $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ e $100 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$. A Tabela 4.1 é uma compilação dos

parâmetros médios J_{SC} ($\mu A/cm^2$), V_{OC} (mV), FF (%), P_{max} ($\mu W/cm^2$) e η (%) das células solares MOS com resistividade de (1 - 10) $\Omega.cm$, porta de alumínio e espessuras de 1,65 nm; 1,73 nm; 2,10 nm e 2,23 nm iluminadas por LED. A média foi extraída a partir de quatro valores obtidos para 50 μm x 50 μm , 50 μm x 100 μm , 100 μm x 100 μm e 100 μm x 150 μm .

Na Tabela 4.4, pode-se verificar que os valores médios de V_{OC} apresentam pequena dispersão (~16% para AP e ~11% para BP) para espessura do dielétrico de porta entre 1,65 nm e 2,23 nm, enquanto o J_{SC} aumenta de forma significativa (~83% para ambas as potências) na mesma faixa de espessura, onde também foi observado grande variação na potência máxima gerada (P_{max}) e na eficiência de conversão (η) (~73% para AP e ~80% para BP). A Figura 4.6 descreve o comportamento dos parâmetros J_{SC} e η extraídos através da Equação 2.3 e dos parâmetros médios da Tabela 4.4 das células solares MOS em função da espessura do dielétrico.

É importante destacar na Tabela 4.4 que a corrente de escuro J_0 aumenta com a espessura com já mostrado no item anterior. Com também já mencionado, este comportamento pode ser explicado considerando que a largura da camada de depleção no silício se modifica quando a espessura dielétrica da porta diminui. Nesse caso, quanto menor a espessura, maior a corrente de tunelamento através dos dielétricos da porta, o que causa a diminuição do comprimento da região de depleção e essa diminuição, por sua vez, torna a densidade de corrente de geração menor na região de depleção (NICOLLIAN, 1982).

Baseado em dados adicionais apresentados na Tabela B.4 (Apêndice B), verifica-se para estruturas com a espessura fixa de porta e diferentes geometrias que o parâmetro V_{OC} varia pouco em relação ao J_{SC} . Para a amostra com espessura de 2,23 nm é possível verificar que V_{OC} varia em torno de ~4% e que J_{SC} é dependente da geometria da estrutura da célula solar MOS.

Figura 4.5 – Curva J-V para as amostras para dimensões 50 μm x 50 μm , 50 μm x 100 μm , 100 μm x 100 μm e 100 μm x 150 μm iluminadas por LED com porta de alumínio, resistividade do substrato de (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ e espessura do dielétrico de porta de 1,65 nm AP – (a) e BP – (b); 1,73 nm AP – (c) e BP – (d); 2,10 nm AP – (e) e BP – (f) e; 2,23 nm AP – (g) e BP – (h). AP – 20,2 mW/cm² e BP – 5,1 mW/cm².

Fonte: Autor.

Tabela 4.4 – Parâmetros médios das células solares MOS com resistividade de (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$, porta de alumínio e espessuras de 1,65 nm; 1,73 nm; 2,10 nm e 2,23 nm iluminados por LED.

	t_{ox} (nm)	J_0 (A/cm ²)	J_{SC} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	V_{oc} (mV)	FF (%)	P_{max} ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	η (%)
AP	1,65	3,68E-07	76,03	354,33	59,29	15,50	0,08
	1,73	1,41E-06	177,82	308,92	41,81	22,83	0,11
	2,10	2,21E-06	297,97	369,47	38,62	36,90	0,18
	2,23	4,43E-06	460,52	356,80	36,39	58,65	0,29
BP	1,65	3,68E-07	39,95	309,15	48,60	5,96	0,12
	1,73	1,41E-06	167,25	294,06	35,41	17,19	0,34
	2,10	2,21E-06	122,41	331,60	40,71	13,67	0,27
	2,23	4,43E-06	241,07	320,60	40,94	30,92	0,61

Fonte: Autor.

Figura 4.6 - Gráfico com valores médios do efeito da espessura em células solares com porta de alumínio sob LED (AP e BP), (a) corrente de curto-circuito (J_{SC}) e (b) rendimento (η).

Fonte: Autor.

Analisando a Figura 4.5 e as tabelas apresentadas no apêndice B, também é possível verificar que quando a distância entre as trilhas aumenta, o J_{SC} diminui cerca de 55% (compare 50 μm x 50 μm com 50 μm x 100 μm para 2,23 nm) e, dobrando a largura das linhas, J_{SC} aumenta de 40%. Entretanto, o espaçamento é apenas um parâmetro de primeira ordem para controlar o decaimento de J_{SC} , pois quando é aumentado novamente (compare 100 μm x 100 μm e 100 μm x 150 μm), J_{SC} decresce muito mais (~46%). Além disso, o P_{max} e a eficiência variam na mesma proporção que J_{SC} .

A diminuição de J_{SC} devido ao aumento da largura e espaçamento na estrutura “espinha de peixe” pode ser explicado considerando a redução do

perímetro (Pe) e a diminuição da razão de aspecto (L/D) entre a largura (L) e o espaçamento entre linhas (D).

Neste caso, a corrente de geração pode ser considerada proporcional à razão de aspecto L/D porque deve estar havendo uma perda de portadores por recombinação associada ao caminho percorrido pelos portadores gerados da região sob iluminação (D) até atingirem a área sob a porta de alumínio na qual a maior largura das linhas (L) implica em menor captação efetiva de portadores. Ou seja, quanto menor L/D, menor a corrente J_{SC} . Além disso, a corrente de geração também depende do perímetro (Pe) uma vez que os portadores gerados na área sob iluminação devem cruzar o perímetro lateral em direção à área sob o alumínio. Suposições semelhantes já foram relatadas por Godfrey et al. para células solares MOS com camadas de inversão fracas (GODFREY, 1978).

A Figura 4.7 mostra a curva $J_{SC} \times Pe.L/D$ onde verificamos um elevado fator de correlação (corr = 0,993). Portanto, o aumento da razão de aspecto L/D e do perímetro resulta no aumento de J_{SC} para célula solares de mesma área ($A_T = 3,24 \text{ cm}^2$, área do alumínio mais a área sob iluminação).

Figura 4.7 – Gráfico $J_{SC} \times Pe.L/D$.

Fonte: Autor.

Para o estudo do efeito da resistividade do substrato foram fabricadas amostras com espessuras de 1,73 nm e 2,10 nm e com resistividade menor de (0,1 - 1) $\Omega\cdot\text{cm}$. Foram extraídas as curvas J-V iluminadas com lâmpada LED nas condições de 20,2 mW/cm² (AP) e 5,1 mW/cm² (BP), conforme mostrado na Figura 4.8. A Tabela 4.5 é uma compilação dos parâmetros médios J_{SC} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), V_{OC} (mV), FF (%), P_{max} ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$) e η (%) das células solares MOS com resistividade de (0,1 - 1) $\Omega\cdot\text{cm}$, porta de alumínio e espessuras de 1,73 nm e 2,23 nm iluminadas por LED. A média foi extraída a partir de quatro valores extraídos para 50 μm x 50 μm , 50 μm x 100 μm , 100 μm x 100 μm e 100 μm x 150 μm .

Analisando a amostra com espessura de 1,73 nm na Tabela 4.5, é possível verificar que as características fotovoltaicas são piores, pois com diminuição da resistividade do substrato o P_{max} decresceu em torno de ~99%. Já para a amostra com espessura de 2,10 nm, a diminuição da resistividade do substrato resulta no aumento de P_{max} (~10%). No caso de 1,73 nm, é possível atribuir o pior desempenho à diminuição da largura da região de depleção com o aumento da dopagem no substrato. De forma geral, a geração de portadores deve ter diminuído na região exposta à luz o que acabou resultando na diminuição da corrente de curto circuito (compare a Tabela 4.5 com a Tabela 4.4). Já no caso de 2,1 nm, a corrente de curto-circuito diminuiu com o aumento da resistividade possivelmente porque o aumento da diferença de função trabalho entre metal e semiconductor com o aumento da dopagem (menor resistividade) teve efeito mais proeminente com o aumento da largura da região de depleção apesar do aumento da corrente de tunelamento ter ocorrido. A Figura 4.9 descreve o comportamento do J_{SC} e do η conforme apresentado na Tabela 4.5 com a variação da resistividade do substrato pela amostra com espessura do dielétrico de 2,10 nm.

A Figura 4.10a ilustra o efeito do aumento da diferença de função trabalho com o aumento da dopagem (Al P+ MOS) o que acaba intensificando a corrente de tunelamento J_{DT} e ao mesmo tempo acaba diminuindo a largura da região de depleção. Esse efeito pode possivelmente suplantear a maior largura de região de depleção na estrutura menos dopada (Al P MOS – Figura 4.10b) que deveria produzir maior corrente de geração, porém, neste caso, a corrente através da estrutura CSMOS acabou ficando limitada pela menor corrente de tunelamento determinada pela menor diferença de função trabalho.

Figura 4.8 – Curva J-V para as amostras para dimensões 50 μm x 50 μm , 50 μm x 100 μm , 100 μm x 100 μm e 100 μm x 150 μm iluminados por LED com porta de alumínio, resistividade do substrato entre (0,1 - 1) $\Omega\cdot\text{cm}$ e espessura do dielétrico de porta de 1,73 nm AP – (a) e BP – (b) e; 2,10 nm AP – (c) e BP – (d). AP - 20,2 mW/cm^2 e BP – 5,1 mW/cm^2 .

Fonte: Autor.

Tabela 4.5 – Média dos parâmetros das células solares MOS com resistividade entre 0,1-1 $\Omega\cdot\text{cm}$, porta de alumínio e espessuras de dielétrico de 1,73 nm e 2,10 nm iluminados por LED.

	t_{ox} (nm)	J_0 (A/cm²)	J_{sc} (μA/cm²)	V_{oc} (mV)	FF (%)	P_{max} (μW/cm²)	η (%)
AP	1,73 (0,1-1 $\Omega\cdot\text{cm}$)	2,64E-08	3,47	463,50	13,02	0,19	0,001
	1,73 (1-10 $\Omega\cdot\text{cm}$)	1,41E-06	177,82	308,92	41,81	22,83	0,11
	2,10 (0,1-1 $\Omega\cdot\text{cm}$)	1,14E-06	302,72	427,09	33,73	41,62	0,21
	2,10 (1-10 $\Omega\cdot\text{cm}$)	2,21E-06	297,97	369,47	38,62	36,90	0,18
BP	1,73 (0,1-1 $\Omega\cdot\text{cm}$)	2,64E-08	6,01	456,91	8,09	0,22	0,004
	1,73 (1-10 $\Omega\cdot\text{cm}$)	1,41E-06	167,25	294,06	35,41	17,19	0,34
	2,10 (0,1-1 $\Omega\cdot\text{cm}$)	1,14E-06	236,29	410,01	36,98	33,90	0,67
	2,10 (1-10 $\Omega\cdot\text{cm}$)	2,21E-06	122,41	331,60	40,71	13,67	0,27

Fonte: Autor.

Figura 4.9 - Gráfico com valores médios do efeito da resistividade e espessura de 2,10 nm em células solares com porta de alumínio sob LED (AP e BP), (a) corrente de curto-circuito (J_{SC}) e (b) rendimento (η).

Fonte: Autor.

Figura 4.10 – Diagrama de faixas de energia da estrutura CSMOS submetida à luz para substrato (a) P+ e (b) P.

Fonte: Autor.

Por outro lado, foi observado para maiores dopagens (menor resistividade) o mesmo tipo de tendência da corrente com a razão de aspecto L/D e com o perímetro. Na Figura 4.8 anterior, também é possível verificar que quando a distância entre as trilhas aumenta, o J_{SC} diminui cerca de 45% no caso AP (compare $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ com $50 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ na Figura 4.8b) e dobrando a largura das linhas J_{SC} aumenta cerca 30%. A diminuição de J_{SC} devido ao aumento da largura e espaçamento na estrutura “espinha de peixe” também pode ser explicado no caso de menor resistividade considerando a redução do perímetro (P_e) e o aumento da razão de aspecto (L/D) entre a largura (L) e o espaçamento entre linhas (D).

4.1.2.2. Célula solar com porta de magnésio (Al/Mg/SiOxNy/p-Si CSMOS) – LED

Para avaliar o efeito do material de porta, amostras com porta de magnésio iluminadas com lâmpada LED foram caracterizadas em uma espessura de dielétrico de porta fixa e diferentes resistividades. As curvas J-V típicas de células solares com porta de magnésio, espessura de dielétrico de 1,73 nm e resistividades de (0,01 - 0,05) $\Omega\cdot\text{cm}$; (0,1 - 0,5) $\Omega\cdot\text{cm}$ e (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ nas condições de iluminação de 20,2 mW/cm^2 (AP) e 5,1 mW/cm^2 (BP) podem ser vistas na Figura 4.11 e os seus parâmetros médios na Tabela 4.6. Para efeito de comparação, o caso com porta de alumínio, espessura de 1,73 nm e resistividade de (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ também é apresentado na Tabela. A Figura 4.12 mostra o comportamento de J_{SC} e η conforme apresentado na Tabela 4.6 para diferentes materiais de porta (Al e Mg).

Na Tabela 4.6, analisando o efeito do material de porta, é possível notar que ocorreu uma melhora significativa nas características médias de praticamente de todos os parâmetros comparado ao alumínio em substrato (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$. Nessa comparação com o alumínio, os parâmetros J_{SC} aumentou ~73% para AP e ~8,6% para BP; V_{OC} aumentou ~25% para AP e ~19% para BP e; P_{max} aumentou ~84% para AP e 56,3% para BP.

Examinando as amostras com diferentes resistividades de substrato e com porta de magnésio na Tabela 4.6, é possível constatar que J_{SC} apresentou o aumento mais significativo para a maior resistividade de (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ e uma tendência de crescimento é perceptível para V_{OC} , porém com menor intensidade. Nesse caso, assim como ocorreu no caso com porta de alumínio, é possível atribuir o pior desempenho dos substratos com menor resistividade (aumento da dopagem) à diminuição da largura da região de depleção. De forma geral, a menor geração de portadores nas regiões de menor largura de depleção expostas à luz acabou resultando também na diminuição da corrente de curto circuito. A Figura 4.13 mostra o comportamento de J_{SC} e η conforme apresentado na Tabela 4.6 para células solares MOS com porta de magnésio em função da variação da resistividade do substrato.

Figura 4.11 – Curva J-V para as amostras para dimensões $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$, $50\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$, $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ e $100\ \mu\text{m} \times 150\ \mu\text{m}$ com porta de magnésio, espessura do dielétrico de porta de $1,73\ \text{nm}$ e resistividade do substrato entre $(0,01 - 0,05)\ \Omega\cdot\text{cm}$ AP – (a) e BP – (b); $(0,1 - 0,5)\ \Omega\cdot\text{cm}$ AP – (c) e BP – (d) e $(1 - 10)\ \Omega\cdot\text{cm}$ AP – (e) e BP – (f). AP – $20,2\ \text{mW}/\text{cm}^2$ e BP – $5,1\ \text{mW}/\text{cm}^2$.

Fonte: Autor.

Tabela 4.6 – Média dos parâmetros das células solares MOS com porta de magnésio e espessuras de 1,73 nm e resistividade entre (0,01 - 0,05) $\Omega\cdot\text{cm}$; (0,1 - 0,5) $\Omega\cdot\text{cm}$ e (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ iluminados por LED.

	t_{ox} (nm)	J_0 (A/cm ²)	J_{sc} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	V_{oc} (mV)	FF (%)	P_{max} ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	η (%)
AP	Al (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$	1,41E-06	177,82	308,92	41,81	22,83	0,11
	Mg (0,01 - 0,05) $\Omega\cdot\text{cm}$	1,88E-07	11,02	187,91	41,37	0,84	0,00
	Mg (0,1 - 0,5) $\Omega\cdot\text{cm}$	4,77E-09	84,71	404,07	66,23	22,98	0,11
	Mg (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$	3,82E-08	666,45	414,44	53,73	147,64	0,73
BP	Al (1-10) $\Omega\cdot\text{cm}$	1,41E-06	167,25	294,06	35,41	17,19	0,34
	Mg (0,01-0,05) $\Omega\cdot\text{cm}$	1,88E-07	13,87	255,98	47,02	1,69	0,03
	Mg (0,1-0,5) $\Omega\cdot\text{cm}$	4,77E-09	50,93	379,51	64,41	12,72	0,25
	Mg (1-10) $\Omega\cdot\text{cm}$	3,82E-08	183,08	364,71	59,49	39,36	0,78

Fonte: Autor.

Figura 4.12 - Gráfico com valores médios do efeito do material de porta em células solares com porta de alumínio e magnésio/alumínio sob LED (AP e BP), (a) corrente de curto-circuito (J_{sc}) e (b) rendimento (η).

Fonte: Autor.

Figura 4.13 - Gráfico com valores médios do efeito da resistividade em células solares com porta de magnésio/alumínio sob LED (AP e BP), (a) corrente de curto-circuito (J_{sc}) e (b) rendimento (η).

Fonte: Autor.

4.1.3. Estudos de células solares MOS com iluminação por lâmpada halógena

Foram extraídas curvas J-V das células fotovoltaicas MOS sob exposição por lâmpada halógena e a nomenclatura definida para representar potência incidida de $47,0 \text{ mW/cm}^2$ de mais Alta Potência foi **AP** e $11,7 \text{ mW/cm}^2$ de mais Baixa Potência foi **BP** para facilitar a representação nos gráficos. Todas as características extraídas na forma de gráficos foram anexados no Apêndice E e os parâmetros extraídos para cada amostra foram listados no Apêndice C. Lembramos que no item anterior apresentamos os resultados de iluminação por LED nas condições de $20,2 \text{ mW/cm}^2$ (AP) e $5,1 \text{ mW/cm}^2$ (BP), porém com menor nível de corrente mesmo quando comparamos o caso LED AP ($20,2 \text{ mW/cm}^2$) com o caso Halógena BP ($11,7 \text{ mW/cm}^2$) onde a corrente de curto circuito e o rendimento de conversão foram nitidamente maiores o que foi atribuído à grande capacidade de absorção e detecção da faixa espectral de infravermelho das lâmpadas halógenas como mostrado na Figura 3.10.

4.1.3.1. Célula solar com porta de alumínio (Al/SiOxNy/p-Si CSMOS) halógena

De início, é importante destacar que a corrente de curto-circuito passa da faixa de dezenas a centenas de $\mu\text{A/cm}^2$ para faixa de até dezenas de mA/cm^2 . Tal fato foi associado ao maior conteúdo no espectro infravermelho da lâmpada halógenas que é absorvido no silício e apresenta alto rendimento de conversão luminosa. Também é importante destacar que o efeito da resistência em série (apresentada no item 4.1.1) tem efeito marcante dado que as características J-V não chegam a formar patamar de corrente partindo da corrente de curto-circuito J_{SC} , assim, como ocorre em diversos casos apresentados para iluminação por LED (a queda de tensão na resistência série é substancialmente menor no caso de LED). A modelagem sobre a influência da resistência série será apresentada em detalhe no tópico 4.2.

O efeito da espessura (1,65 nm, 1,73 nm, 2,10 nm e 2,23 nm) nas características J-V de amostras iluminadas com lâmpadas halógenas foi realizado

para substratos com a mesma resistividade de substrato ($1 - 10$) $\Omega\cdot\text{cm}$. As Figuras 4.14 e 4.15 ilustram as características J-V das células iluminadas por lâmpada halógena nas situações de mais alta potência (AP) e mais baixa potência (BP) para diferentes larguras e espaçamentos entre linhas da estrutura de porta do tipo “espinha de peixe”.

Os comportamentos de J_{SC} e V_{OC} observados nas Figuras 4.14 e 4.15 quando variamos a espessura do dielétrico de porta para as diversas geometrias são essencialmente os mesmos tanto para a situação BP (Figura 4.14) como para a situação AP (Figura 4.15), isto é, para espessuras menores, a densidade de corrente de curto-circuito aumenta enquanto que a tensão de circuito-aberto permanece aproximadamente constante em $\sim 0,5$ V. Além disso, dois comportamentos característicos são observados nas curvas características mostradas nas Figuras 4.14 e 4.15: a) para as duas menores espessuras de 1,65 nm e 1,73 nm; a concavidade da curva fica para “baixo” e b) para as duas maiores espessuras de 2,10 nm e 2,23 nm; a concavidade da curva fica para cima. Além da influência da resistência série, os fenômenos que atuam no tipo de concavidade estão diretamente associados aos mecanismos de tunelamento através dos dielétricos os quais serão abordados em detalhe através de modelagem específica apresentada no item 4.2.

Figura 4.14 – Curva J-V para as amostras com porta de alumínio e espessura do dielétrico de porta de 1,65 nm; 1,73 nm; 2,10 nm e 2,23 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) Ω .cm iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 47,0 mW/cm² (**alta potência**) para dimensões (a) 50 μ m x 50 μ m, (b) 50 μ m x 100 μ m, (c) 100 μ m x 100 μ m e (d) 100 μ m x 150 μ m.

Fonte: Autor.

Figura 4.15 – Curva J-V para as amostras com porta de alumínio e espessura do dielétrico de porta de 1,65 nm; 1,73 nm; 2,10 nm e 2,23 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) Ω .cm iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 11,7 mW/cm² (**baixa potência**) para a) 50 μ m x 50 μ m, (b) 50 μ m x 100 μ m, (c) 100 μ m x 100 μ m e (d) 100 μ m x 150 μ m.

Fonte: Autor.

A Figura 4.16 ilustra a evolução do comportamento de J_{SC} extraído das Figuras 4.14 e 4.15 e de η extraído através da Equação 2.3 para as células MOS que foram iluminadas por lâmpadas halógena onde é possível observar que as maiores densidades de corrente de curto circuito e os maiores rendimentos de conversão luminosa ocorrem para amostras fabricadas com espessura menor. Esses comportamentos já eram esperados dado que a corrente de tunelamento tende a ser maior para espessuras menores de forma que a corrente total através das estruturas CSMOS passa a ficar limitada pelas correntes geradas no substrato, sobretudo aquela devido ao aparecimento da região de depleção de portadores. A modelagem a ser apresentada no item 4.2 deixará mais claro essa interpretação sob o aspecto quantitativo.

Figura 4.16 – Gráfico com valores médios do efeito da espessura em células solares com porta de alumínio iluminadas com lâmpada halógena (BP e AP), (a) densidade de corrente de curto-circuito (J_{SC}) e (b) rendimento de conversão luminosa (η).

Fonte: Autor.

A Figura 4.17 mostra a influência da resistividade do substrato para amostras com espessura de 1,73 nm e 2,10 nm na situação AP (mais alta potência) enquanto que a Figura 4.18 mostra os mesmos parâmetros para a situação BP (mais baixa potência). É importante observar na Figura 4.17 que a diminuição da resistividade de (1-10) $\Omega \cdot \text{cm}$ para (0,1-0,5) $\Omega \cdot \text{cm}$ resultou em diminuição substancial da densidade de corrente de curto-circuito. Para a espessura de 1,73 nm a densidade de corrente de curto circuito foi de valor alto (7 mA/cm² – 10 mA/cm²) para zero enquanto que para a espessura de 2,1 nm, a densidade de corrente saiu de valor mais alto (5

$\text{mA/cm}^2 - 7 \text{ mA/cm}^2$) para valor mais baixo ($1,5 \text{ mA/cm}^2 - 3,5 \text{ mA/cm}^2$). A diminuição substancialmente grande de densidade de corrente no caso da espessura de 1,73 nm pode ser explicado considerando a maior corrente de fuga de tunelamento que possivelmente impossibilita a formação de região de depleção no silício mais dopado onde deveria ocorrer a geração óptica de portadores. Por outro lado, para a espessura de 2,1 nm, a corrente de tunelamento é substancialmente menor e até permite a formação da região de depleção nos dois casos, porém menor quando a dopagem é maior o que pode implicar em menor geração óptica de portadores e menor densidade de corrente através da estrutura CSMOS.

Para o caso da iluminação por LED, o mesmo tipo de comportamento foi observado para a espessura de 1,73 nm com o aumento da dopagem (diminuição de resistividade), isto é, também nesse caso, a densidade de corrente diminui de forma substancial (veja Tabela 4.5 para as situações AP e BP). Um comportamento quase idêntico foi também observado na situação BP utilizando lâmpadas hálógenas. Portanto, a suposição de que a região de depleção diminui de valor quase igualando a zero para menor resistividade (maior dopagem) também se aplica para as geometrias (L x D) $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ e $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$. No caso da geometria $100 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$, a corrente de curto circuito associado à espessura de 2,1 nm foi maior tanto para a situação AP como também para a situação BP apesar das concavidades diferentes das curvas J-V nas Figuras 4.17 e 4.18 nas amostras com resistividade (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$. Esse comportamento ocorreu possivelmente devido ao efeito de maior espaçamento entre linhas ($150 \mu\text{m}$) que acabou aumentando a geração de portadores para o tunelamento dominado pela concavidade orientada para cima a qual será detalhada no item 4.2.

Figura 4.17 – Curva J-V para as amostras com porta de alumínio e espessura do dielétrico de porta de 1,73 nm e 2,10 nm e resistividade do substrato de (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ e (0,1 - 1) $\Omega\cdot\text{cm}$ iluminados por lâmpada halógena na densidade de 47,0 mW/cm^2 (**alta potência**) para dimensões (a) 50 μm x 50 μm , (b) 50 μm x 100 μm , (c) 100 μm x 100 μm e (d) 100 μm x 150 μm .

Fonte: Autor.

Figura 4.18 – Curva J-V para as amostras com porta de alumínio e espessura do dielétrico de porta de 1,73 nm e 2,10 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ e (0,1 - 1) $\Omega\cdot\text{cm}$ iluminados por lâmpada halógena na densidade de 11,7 mW/cm^2 (**baixa potência**) para dimensões (a) 50 μm x 50 μm , (b) 50 μm x 100 μm , (c) 100 μm x 100 μm e (d) 100 μm x 150 μm .

Fonte: Autor.

A Figura 4.19, por sua vez, ilustra o comportamento J_{SC} mostrado nas Figuras 4.17 e 4.18, e η extraído através da Equação 2.3 com o valor resistividade do substrato para porta de alumínio. Nesse caso, o rendimento e a corrente de curto é maior para amostras com resistividade maior como já mencionado.

Figura 4.19 – Gráfico com valores médios do efeito da resistividade em células solares com porta de alumínio e espessura de 2,10 nm sob lâmpada halógena, (a) corrente de curto-circuito (J_{SC}) e (b) rendimento (η).

Fonte: Autor.

4.1.2.2. Célula solar com porta de magnésio (Al/Mg/SiOxNy/p-Si CSMOS) halógena

Para avaliar a influência do material de porta, amostras com porta de magnésio iluminadas com lâmpadas halógenas foram caracterizadas para uma espessura e diferentes resistividades. As curvas J-V típicas de células solares com porta de magnésio, espessura de dielétrico de 1,73 nm e resistividades de (0,01 - 0,05) $\Omega\cdot\text{cm}$; (0,1 - 0,5) $\Omega\cdot\text{cm}$ e (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ nas condições de iluminação de 47,0 mW/cm^2 (AP) e 11,7 mW/cm^2 (BP) podem ser vistas nas Figuras 4.20 e 4.21 e os seus parâmetros médios na Tabela 4.7. Para efeito de comparação, o caso com porta de alumínio, espessura de 1,73 nm e resistividade de (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ também é apresentado nas figuras e na tabela.

A Equação 2.15 mostrada na revisão bibliográfica destaca a dependência da corrente de escuro (J_0) com a altura da barreira ϕ_B e com um fator de tunelamento o qual também depende da espessura do dielétrico de porta. Por isso, a corrente de

escuro, apesar de ser um parâmetro primário no sentido de que quanto menor o seu valor, maior o valor da tensão de circuito aberto V_{OC} (Pulfrey, 1978), a corrente de curto circuito, por outro lado, depende primariamente de outros fatores de primeira ordem incluindo a dopagem do substrato e a diferença de função trabalho entre os materiais de porta e semiconductor (Pulfrey, 1978). Assim, a comparação entre alumínio e magnésio na Tabela 4.7 (para a resistividade na faixa $(1 - 10) \Omega.cm$) permite afirmar que a corrente de curto circuito é maior para a porta de magnésio, porém, as características diferentes de tunelamento na célula de porta magnésio acabam determinando menor valor de V_{OC} , mesmo que a corrente de escuro acabe sendo menor neste caso. A explicação para esse fenômeno já foi introduzida no capítulo 2 e ficará mais clara a seguir.

Figura 4.20 – Curva J-V para amostras com espessura do dielétrico de porta de 1,73 nm e porta de alumínio ($\rho = (1 - 10) \Omega.cm$) e porta de magnésio com $(0,01 - 0,05) \Omega.cm$; $(0,1 - 0,5) \Omega.cm$ e $(1 - 10) \Omega.cm$ iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de $47,0 \text{ mW/cm}^2$ (**alta potência**) para dimensões (a) $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$, (b) $50 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$, (c) $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ e (d) $100 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$.

Fonte: Autor.

Figura 4.21 – Curva J-V para amostras com espessura do dielétrico de porta de 1,73 nm e porta de alumínio ($\rho = (1 - 10) \Omega \cdot \text{cm}$) e porta de magnésio com $(0,01 - 0,05) \Omega \cdot \text{cm}$; $(0,1 - 0,5) \Omega \cdot \text{cm}$ e $(1 - 10) \Omega \cdot \text{cm}$ iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de $11,7 \text{ mW/cm}^2$ (**baixa potência**) para dimensões (a) $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$, (b) $50 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$, (c) $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ e (d) $100 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$.

Fonte: Autor.

Para a porta de magnésio, podemos assumir que os parâmetros de tunelamento e a altura da barreira são os mesmos assim como o fator de idealidade ($n = 1/I$) na Equação 2.17. Sendo assim, existe correlação direta entre V_{OC} e a razão J_{SD}/J_0 na Tabela 4.7, ou seja, menor razão J_{SD}/J_0 implica em menor valor de V_{OC} e vice-versa. Por outro lado, esse tipo de comparação não pode ser feito entre portas de material diferentes (magnésio x alumínio) porque os fatores de idealidade associados a cada tipo de porta são provavelmente muito diferentes entre si devido aos parâmetros de tunelamento que também são muito distintos (diferença de função trabalho, altura de barreira, etc.) conforme destacado no capítulo 2.

Tabela 4.7 – Média dos parâmetros das células solares MOS com porta de magnésio e espessuras de 1,73 nm e resistividade entre (0,01 - 0,05) $\Omega\cdot\text{cm}$; (0,1 - 0,5) $\Omega\cdot\text{cm}$ e (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ iluminados por lâmpada halógena. Para comparação, a porta de alumínio, espessura de 1,73 nm e resistividade de (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ foi incluída.

	Amostra	J_0 (A/cm^2)	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (mV)	FF (%)	P_{max} ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	η (%)
AP	Al (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$	1,41E-06	7,88	504,64	31,89	1280,53	2,72
	Mg(0,01 - 0,05) $\Omega\cdot\text{cm}$	1,88E-07	0,29	363,79	53,28	59,27	0,13
	Mg (0,1 - 0,5) $\Omega\cdot\text{cm}$	4,77E-09	8,94	564,66	56,95	2805,20	5,97
	Mg (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$	3,82E-08	13,42	392,61	38,31	2061,65	4,39
BP	Al (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$	1,41E-06	4,70	476,07	33,89	760,09	6,47
	Mg(0,01 - 0,05) $\Omega\cdot\text{cm}$	1,88E-07	0,21	342,22	52,39	39,13	0,33
	Mg (0,1 - 0,5) $\Omega\cdot\text{cm}$	4,77E-09	4,49	552,46	65,51	1607,94	13,69
	Mg (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$	3,82E-08	8,29	424,05	41,28	1427,56	12,15

Fonte: Autor.

É importante também apontar na Tabela 4.7 que o maior rendimento de conversão em energia elétrica é obtido para resistividade na faixa de (0,1 - 0,5) $\Omega\cdot\text{cm}$ quando a corrente de escuro assume o seu menor valor. Isso decorre possivelmente do fato de termos uma menor corrente de geração em uma menor largura de região de depleção. Nesse caso, a corrente devido à geração óptica, apesar de menor, ainda permanece da mesma ordem de grandeza comparado com o caso da resistividade na faixa de (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ significando maior V_{oc} na Equação 2.17 devido ao J_0 bem menor. Por outro lado, um aumento ainda maior da dopagem para a resistividade na faixa de (0,01 - 0,05) $\Omega\cdot\text{cm}$ acaba degradando a corrente de escuro porque provavelmente a menor largura de região de depleção não provê blindagem suficiente para impedir a corrente de fuga direta do substrato em direção à porta e nem tem geração óptica suficiente quando exposta ao mesmo nível de luminosidade empregado para as outras resistividades empregadas.

As Figuras 4.22 e 4.23 mostram os valores médios da Tabela 4.7 para J_{sc} e η respectivamente, em função do material de porta e das três resistividades empregadas, onde fica claramente destacado o efeito da porta de magnésio que melhora os parâmetros J_{sc} e η em relação ao alumínio e o maior rendimento de conversão η para resistividade na faixa de (0,1 - 0,5) $\Omega\cdot\text{cm}$ apesar da corrente de curto-circuito não ser o maior valor.

Figura 4.22 - Gráfico com valores médios do efeito do material de porta em células solares com porta de alumínio e magnésio/alumínio sob lâmpada halógena (AP e BP), (a) J_{SC} e (b) η .

Fonte: Autor.

Figura 4.23 – Gráfico com valores médios de J_{SC} e η em função da resistividade do substrato em células solares com porta de magnésio com iluminação com lâmpada halógena (AP e BP), (a) $J_{SC} \times \rho$ e (b) $\eta \times \rho$.

Fonte: Autor.

4.2. Modelagem das células solares MOS

Figura 4.2 – Modelo para as células solares MOS para situação sem luz (a) e com luz (b).

Fonte: Autor.

A Figura 4.2-b mostra o modelo que deve ser empregado quando a célula fotovoltaica é submetida a uma fonte de luz. O modelo com luz consiste em uma fonte de corrente de geração (J_L) composta pelas componentes J_{G1} e J_{DT} . O componente J_{G1} é a densidade de corrente gerada quando a célula é iluminada e J_{DT} é a densidade de corrente de tunelamento direto para o dielétrico com queda de tensão V_{ox} . Nessa situação, quando a estrutura MOS opera em regime de depleção (como descrito na Figura 2.7), utilizando a expressão de J_{DT} através da Equação 2.12, temos que a densidade de corrente de geração é dada por:

$$J_L = - \frac{AV_{ox}^2}{\left[1 - \left(1 - \frac{qV_{ox}}{\phi_B}\right)^{\frac{1}{2}}\right]^2} \exp\left\{-\frac{\beta}{V_{ox}}\right\} + J_{G1} \quad (4.3)$$

onde, $V_{ox} = -(V_G - K)$ é positivo para na Equação 4.3 para $V_G > -K$ para $-K \approx V_{FB} < 0$. O K é um parâmetro de ajuste que depende da tensão de faixa plana (V_{FB}) conforme introduzido no item 2.1 através da Equação 2.3b.

Figura 4.24 – Ajuste linear nas curvas J-V sem luz para $(-V_G < 0)$ para dimensões (a) $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$, (b) $50 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$, (c) $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ e (d) $100 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$.

Fonte: Autor.

Para a obtenção dos parâmetros é utilizado o termo J_0 , adquirido na extração da curva J-V sem luz. Além disso, para valores de tensão na porta suficientemente negativos ($-V_G \ll 0$) é verificado que a inclinação dessa curva permite obter a condutividade (G_P) como parâmetro inicial para situação sem luz. Essa relação pode ser vista a seguir:

$$\frac{\partial J_{BG}}{\partial (-V_G)_{-V_G < 0}} = G_P \quad (4.4)$$

assim, o ajuste linear $((-V_G - R_S J_{BG})G_P - J_{G1})$ apresentado na Figura 4.24 corresponde ao ajuste que fornece o dado de G_P e o termo constante J_{G1} . Com esses parâmetros iniciais, é possível realizar a modelagem para casar com as curvas.

A Figura 4.25 ilustra as curvas J- V_G típicas com os ajustes de curvas com o modelo após a obtenção dos parâmetros iniciais onde podem ser observados os patamares horizontais de densidade de corrente gerada J_{G1} para as espessuras de 1,65 nm; 1,73 nm; 2,10 nm e 2,23 nm com geometria $100 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$ (largura x

espaçamento da grade). Foi realizado o ajuste dos parâmetros da Equação 4.3 nas curvas da Figura 4.25 e; para esse ajuste consideramos $V_{ox} = -\alpha(V_G - K)$ a fim de considerar o comportamento linear da queda da tensão no dielétrico de porta (V_{ox}) com a tensão de porta (V_G) e o parâmetro α para levar em conta a variação da queda de tensão no dielétrico de porta devido à presença de armadilhas no dielétrico de porta (IZUMI, 2017). Dessa forma, a equação de ajuste empregada assumiu o seguinte formato (Apêndice F):

$$J_{BG} = \frac{n.V_T}{R_S} W_0 \left[\frac{J_0 R_S}{n.V_T(1+R_S G_P)} e^{\frac{-V_G + R_S \left(J_0 + \frac{A[-\alpha(V_G - K)]^2}{\left[1 - \left(1 - \frac{-q\alpha(V_G - K)}{\phi_B} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2} \exp\left\{ -\frac{\beta}{-\alpha(V_G - K)} \right\} - J_{G1} \right)}}{n.V_T(1+R_S G_P)} + \frac{-V_G G_P - \left(J_0 + \frac{A[-\alpha(V_G - K)]^2}{\left[1 - \left(1 - \frac{-q\alpha(V_G - K)}{\phi_B} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2} \exp\left\{ -\frac{\beta}{-\alpha(V_G - K)} \right\} - J_{G1} \right)}{1+R_S G_P} \right] \quad (4.5)$$

cuja estrutura pode ser representada de forma simplificada como:

$$J_{BG} = J_0 \left(e^{\frac{-V_G - R_S J_{BG}}{n.V_T}} - 1 \right) + (-V_G - R_S * J_{BG}) G_P + \frac{A[-\alpha(V_G - K)]^2}{\left[1 - \left(1 - \frac{-q\alpha(V_G - K)}{\phi_B} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2} \exp\left\{ -\frac{\beta}{-\alpha(V_G - K)} \right\} - J_{G1} \quad (4.6)$$

Figura 4.25 – Ajuste das curvas com luz para amostra com espessura de 1,65 nm; 1,73 nm; 2,10 nm e 2,23 nm com geometria 100 μ m x 150 μ m (largura x espaçamento da grade).

Fonte: Autor.

Na Figura 4.25, podemos verificar que o ajuste é realizado perfeitamente para as amostras com espessura de dielétrico de porta entre 1,65 nm e 1,73 nm. Porém, para amostras de espessura maior (2,10 nm e 2,23 nm) o ajuste é limitado para tensões quando o $-V_G \approx V_{OC}$. Isso ocorre devido a um componente de raiz quadrada introduzido dentro de J_{DT} , $\left(1 - \frac{-q\alpha(V_G - K)}{\phi_B}\right)^{\frac{1}{2}}$, portanto, para tensão maiores que V_{OC} , não é possível realizar o ajuste devido ao componente imaginário. Para solucionar esse problema, foi introduzido após a aparição da parte imaginária ($-V_G > V_{OC}$) uma corrente constante (J_{G2}) com a finalidade de prever o fenômeno para essa faixa de tensão. Dessa forma, o componente da corrente de geração torna-se:

$$J_L = J_{G2} \quad (4.7)$$

Após a introdução desse novo termo para a corrente de geração foi possível realizar o ajuste conforme mostrado na Figura 4.26a. Na Figura 4.26b, podemos verificar a mudança da corrente de geração nas células MOS. Para tensões $-V_G$ menores que K , o J_L tende a ser constante e, portanto, $J_L \approx J_{G1}$, pois nessa região o componente J_{DT} não descreve o fenômeno devido ao aparecimento da inversão. Em tensões $-V_G > K$, o componente J_L possui duas componentes distintas J_{G1} e J_{DT} (veja Figura 4.26b). No entanto, para amostras com espessuras maiores (2,10 nm e 2,23 nm) o J_{DT} torna-se imaginário após $-V_G > V_{OC}$ e, portanto, $J_L = J_{G2}$. Veremos mais tarde que o J_{G2} encontrado é um resquício da função $J_{G1} - J_{DT}$, no qual, consideramos um valor constante. O procedimento de ajustes de forma simplificada pode ser visto no fluxograma da Figura 4.27.

A Tabela 4.8 a seguir mostra os parâmetros médios A , β , α , K , n , R_s , J_{G2} ajustados através da Equação 4.2 com J_L para diferentes faixas de trabalho, conforme detalhado no parágrafo anterior e demonstrado na Figura 4.26, os parâmetros G_P e J_{G1} previamente extraídos com a ajuda da Figura 4.24. A altura da barreira ϕ_B foi adotada 3 eV (IZUMI, 2017). O Apêndice G mostra detalhadamente todos os parâmetros envolvidos no processo de ajuste.

Figura 4.26 – Ajuste das curvas com luz com parâmetro J_{G2} para amostra com espessura de 1,65 nm; 1,73 nm; 2,10 nm e 2,23 nm com geometria 100 μm x 150 μm (largura x espaçamento da grade).

Fonte: Autor.

É importante destacar na Tabela 4.8 que o ajuste através dos parâmetros A , α e K foi muito bom na faixa de operação inversa sendo que a modelagem prevê o efeito de concavidade da característica J - V_G para cima apenas para as amostras com dielétricos de porta com espessuras de 2,1 nm e 2,3 nm. Tal efeito para dielétricos mais espessos foi atribuído ao maior efeito do mecanismo de Fowler-Nordheim representado pelo termo “ β ” na Equação 4.3 junto com o mecanismo de tunelamento direto.

Figura 4.27 – Fluxograma do procedimento de ajuste das curvas das células solares MOS.

Fonte: Autor.

Tabela 4.8 – Parâmetros médios obtidos para as células solares MOS através do modelo com luz.

t_{ox} (nm)	A	β	ϕ_B (eV)	J_{G2} (A)	G_p (S/cm ²)	R_s (Ω .cm ²)	n	K (V)	α	J_{G2} (A)
1,65	1,45E-03	3,21	3,00	5,73E-03	2,73E-04	43,98	2,20	0,62	1,39	0,00
1,73	1,98E-03	3,69	3,00	5,98E-03	4,49E-04	29,33	2,44	0,76	1,30	0,00
2,10	5,18E-03	8,30	3,00	6,39E-03	4,49E-03	46,74	3,16	0,86	2,41	3,03E-03
2,23	4,92E-03	5,85	3,00	8,44E-03	2,99E-04	83,13	3,97	1,52	1,43	6,98E-04

Fonte: Autor.

Após o ajuste das curvas, foi possível comprovar que a densidade de corrente de geração 1 (J_{G1}) cresce com a espessura do dielétrico de porta, conforme visto em capítulos anteriores em razão ao aumento da região de depleção. Podemos verificar que os componentes A e “ β ” possuem uma tendência de crescimento com o aumento da espessura e essa variação é atribuída devido a massa efetiva do elétron no dielétrico de porta inseridos nesses parâmetros. Apesar de A e “ β ” apresentarem maiores valores para amostra de 2,23 nm, não podemos afirmar que o tunelamento direto é maior para essa espessura, pois o termo da exponencial ($\exp(-\beta/V_{ox})$) acaba diminuindo esse valor.

A Equação 4.3 é um modelo compacto e simples para a corrente de geração (J_L) que prevê fenômenos de primeira ordem com o tunelamento direto em ajustes para espessuras baixas (1,65 nm e 1,73 nm). No entanto, para espessuras maiores (2,10 nm e 2,23 nm) é possível observar o aumento do termo “ A ” (4×10^{-3} para $2,3 \times 10^{-2}$). Esse incremento ocorre, pois, esse parâmetro é capaz de prever outros fenômenos de segunda ordem como a transição do tunelamento direto para o tunelamento de Fowler-Nordheim e contabilizar a variação de espessura (espessura efetiva) devido à presença das armadilhas contidas no dielétrico de porta.

Por meio dos parâmetros obtidos foi possível prever o comportamento da corrente de geração J_L , conforme mostrado na Figura 4.28. Nessa figura, podemos comprovar que o componente introduzido anteriormente, J_{G2} é atribuído a uma corrente constante residual na região de acumulação das duas componentes J_{G1} - J_{DT} .

Figura 4.28 – Simulação da corrente de geração (J_L) para amostra com espessura de 1,65 nm; 1,73 nm; 2,10 nm e 2,23 nm com geometria 100 μm x 150 μm (largura x espaçamento da grade).

Fonte: Autor.

5. Conclusões e Perspectivas Futuras

Neste trabalho foram fabricadas células solares MOS com estruturas Al/SiOxNy/Si-p e Al/Mg/SiOxNy/Si-p com áreas totais de 3,24 cm². Foram crescidos dielétricos de porta com espessuras entre 1,65 nm e 2,23 nm através do processo RTP (*Rapid Thermal Processing*) em um forno convencional adaptado na temperatura de 850 °C para gases de processo na proporção de 5 N₂ : 1 O₂ (2 L/min de N₂ e 0,4 L/min de O₂) sobre substratos com resistividade entre (0,01 e 10) Ω.cm e espessuras de ~ (350 a 525) μm.

As células solares apresentaram densidade de correntes de escuro (J_0) na faixa de ~ (2,25x10⁻¹⁰ – 6,25x10⁻⁶) A/cm² e observou-se menores valores de J_0 para as células com porta de magnésio.

Foram realizadas iluminações com lâmpadas LED e halógena com finalidade de simular o efeito produzido em ambientes internos com potência incidente em mW/cm² para aplicações de “*solar energy harvesting*”. Para exposições por LED em potência incidida de 5,1 mW/cm², foi possível observar melhores parâmetros de densidade de corrente de curto-circuito (J_{SC}) de ~ 0,4 mA/cm² e potência máxima gerada (P_{max}) de ~ 53 μW/cm² (rendimento - η = 1,05%). Por meio de iluminação por lâmpada halógena e com potência incidida de 11,7 mW/cm², foi possível obter melhores valores de J_{SC} de ~ 8,7 mA/cm² e P_{max} de ~ 2,13 mW (η = ~18%). Na Tabela 5.1 são apresentados os melhores resultados para os parâmetros J_{SC} , P_{max} e η por fonte de luz (lâmpada LED ou halógena) e suas respectivas amostras. Os valores de potência obtidos resultaram compatíveis para aplicações em “*solar energy harvesting*” para ambientes internos.

Tabela 5.1 – Melhores resultados de J_{SC} , P_{max} e η por tipo de fonte de luz.

Fonte de luz	Parâmetro		Descrição das amostras
LED	J_{SC}	0,4 mA/cm ²	Al t _{ox} = 2,23 nm (1 - 10) Ω.cm 50 μm x 50 μm
	P_{max}	53 uW/cm ²	Mg (1 - 10) Ω.cm 100 μm x 150 μm
	η	1,05%	
Halógena	J_{SC}	8,72 mA/cm ²	Mg (1 - 10) Ω.cm 100 μm x 150 μm
	P_{max}	2,13 mW/cm ²	Mg (0,1 - 0,5) Ω.cm 50 μm x 50 μm
	η	18%	

Fonte: Autor.

Foi constatado para exposições por LED que o parâmetro J_{SC} aumenta com a espessura do dielétrico de porta e para exposições com lâmpada halógena, o comportamento demonstrou ser o oposto (J_{SC} diminui com a espessura do dielétrico de porta) sendo que V_{OC} não variou de forma significativa. Observou-se também que a mudança do metal de porta do alumínio para o magnésio propiciou melhoria em praticamente todos os parâmetros fotovoltaicos.

Em relação à modelagem elétrica, foi desenvolvido um modelo elétrico compacto com parâmetros físicos e matemáticos para ajustar a característica J-V de células solares MOS composto de resistências parasitárias em série e paralelo, e pelas componentes de corrente de tunelamento direto e de Fowler-Nordheim. Por meio desse modelo, foi possível analisar o comportamento da corrente gerada (J_L) para diferentes espessuras do dielétrico de porta.

Como próxima etapa, propomos incluir como melhoria na obtenção de dados as curvas C-V para o estudo comportamental das cargas, depleção e condutividade com a variação da tensão de porta (V_G). Além disso, incorporar o equipamento que simule o espectro solar com padrão AM1,5 para aplicações dessa célula para ambientes externos.

Em relação a melhoria da célula MOS, propomos diminuir a espessura do substrato para diminuir o efeito da resistência série (R_s), texturização da superfície e introdução da camada anti-reflexiva para o aumento da corrente de geração (J_L).

6. Bibliografia

ALANDIA, B. **FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE DIODOS TUNEL MOS Al/SiOxNy/Si(p) E TiN/SiOxNySi(p)**. Dissertação de mestrado - Escola politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

BEYER, A.; EBEST, G.; REICH, R. **Metal-insulator-semiconductor solar cells with silicon oxynitride tunnel insulator by using rapid thermal processing**. Applied Physics Letters, v. 508, p. 508, 1995.

CARD, H.; RHODERICK, E. **Studies of tunnel MOS diodes I . Interface effects in silicon Schottky diodes**. J. Phys. D: Appl. Phys, v. 1589, 1971.

CHEN, C.; HONG, C.; HWU, J. **Silicon Metal-Oxide-Semiconductor Solar Cells with Oxide Prepared by Room Temperature Anodization in Hydrofluosilicic Acid Solution**. Journal of The Electrochemical Society, v. 149, n. 6, p. G362, 2002.

CHEN, Z. et al. **A Single-Chip Solar Energy Harvesting IC Using Integrated Photodiodes for Biomedical Implant Applications**. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, v. 11, n. 1, p. 44–53, 2017.

CHRISTIANO, V. **OXINITRETOS DE SILÍCIO OBTIDOS POR PROCESSAMENTO TÉRMICO RÁPIDO (RTP) OXINITRETOS DE SILÍCIO OBTIDOS POR PROCESSAMENTO TÉRMICO RÁPIDO (RTP)**. Tese de doutorado - Escola politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

CORLESS, R. et al. **On the LambertW function**. Advances in Computational Mathematics, v. 5, n. 1, p. 329–359, 1996.

DEPAS, M. et al. **Determination of tunnelling parameters in ultra-thin oxide layer poly-Si/SiO₂/Si structures**. Solid State Electronics, v. 38, n. 8, p. 1465–1471, 1995.

NICOLLIAN, E.; BREWS, J. **MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology**. John Wiley & sons, Nova York, 1982.

FERRI, M. et al. **Photovoltaic Energy Harvester with Power Management System**. Journal of Sensors, v. 2010, p. 1–6, 2010.

FRAAS, L.; PARTAIN, L. **Solar Cells and Their Applications**. Solar cells and their

applications. 2. ed. New Jersey: Wiley, 2010.

GODFREY, R.; GREEN, M. **A 15% efficient silicon MIS solar cell**. Applied Physics Letters, v. 33, n. 7, p. 637–639, 1978.

GREEN, M. et al. **Solar cell efficiency tables (version 52)**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 26, n. 7, p. 427–436, 2018.

GREEN, M. **Third generation photovoltaics: Solar cells for 2020 and beyond**. Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, v. 14, n. 1–2, p. 65–70, 2002.

HAN, L.; CHEN, Z. **High-Quality Thin SiO₂ Films Grown by Atomic Layer Deposition Using Tris(dimethylamino)silane (TDMAS) and Ozone**. ECS Journal of Solid State Science and Technology, v. 2, n. 11, p. N228–N236, 2013.

HAR-LAVAN, R.; CAHEN, D. **40 years of inversion layer solar cells: From MOS to conducting polymer/inorganic hybrids**. IEEE Journal of Photovoltaics, v. 3, n. 4, p. 1443–1459, 2013.

HEZEL, R. **Recent progress in MIS solar cells**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 5, n. 2, p. 109–120, 1997.

HO, F. **INVERSION LAYER MOS SOLAR CELLS**. University of Alabama, NASA, p. 2, 1986.

HUMADA, A. et al. **Solar cell parameters extraction based on single and double-diode models: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 56, p. 494–509, 2016.

IEA. **Have the prices from competitive auctions become the “new normal” prices for renewables?**. International Energy Agency-Photovoltaic Power Systems, 2018.

IEA. **Renewables 2017**. International Energy Agency-Photovoltaic Power Systems, 2017.

IEA PVPS. **Trends 2013 in Photovoltaic Applications**. International Energy Agency-Photovoltaic Power Systems, 2013.

IEA PVPS. **Trends 2018 in Photovoltaics Applications**. International Energy

Agency-Photovoltaic Power Systems, 2018.

IEA PVPS. **Trends in Photovoltaic Applications 2017**. International Energy Agency-Photovoltaic Power Systems, 2017.

IZUMI, F. **MODELAGEM DE CÉLULAS SOLARES nMOS OPERANDO EM REGIME DE INVERSÃO INDUZIDO POR CARGAS POSITIVAS NA INTERFACE SiOxNy/Si**. Tese de doutorado - Escola politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

JAGER, K. et al. **Solar Energy**. Energy Environ. Sci., v. 8, n. 7, p. 1–420, 2014.

LENZLINGER, M.; SNOW, E. **Fowler-nordheim tunneling into thermally grown SiO₂**. Journal of Applied Physics, v. 40, n. 1, p. 278–283, 1969.

LUN, S. et al. **A new explicit double-diode modeling method based on Lambert W-function for photovoltaic arrays**. Solar Energy, v. 116, p. 69–82, 2015.

MATEU, L.; MOLL, F. **Review of Energy Harvesting Techniques and Applications for Microelectronics**. Proc. SPIE, VLSI Circuits and Systems II, v. 5837, p. 359–373, 2005.

MATIKO, J. et al. **Review of the application of energy harvesting in buildings**. Measurement Science and Technology, v. 25, n. 1, 2014.

MCCARTHY, R.; HILLHOUSE, H. **The shockley-queisser limit and practical limits of nanostructured photovoltaics**. Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, p. 1663–1668, 2012.

MICHAELSON, H. **The work function of the elements and its periodicity**. Journal of Applied Physics, v. 48, n. 11, p. 4729–4733, 1977.

ORTIZ-CONDE, A.; GARCÍA SÁNCHEZ, F.; MUCI, J. **New method to extract the model parameters of solar cells from the explicit analytic solutions of their illuminated I-V characteristics**. Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 90, n. 3, p. 352–361, 2006.

PULFREY, D. **MIS Solar Cells: A Review**. IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, n. 11, p. 1308–1317, 1978.

GODFREY, R.; GREEN, M. **655 mV opencircuit voltage, 17.6% efficient silicon**

MIS solar cells. Applied Physics Letters, v. 34, n. 790, 1979.

RANGEL, R. **TRANSISTORES SOI NMOSFET.** Dissertação de mestrado - Escola politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

RANUÁREZ, J.; DEEN, M.; CHEN, C. **A review of gate tunneling current in MOS devices.** Microelectronics Reliability, v. 46, n. 12, p. 1939–1956, 2006.

REINHARDT, K.; KERN, W. **Handbook of Silicon Wafer Cleaning Technology.** Ed. 2. Norvich, NY: William Adrew, 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, n. 3, p. 902–907, 1995.

SANTOS, S.; HASENACK, C. **Achievement of high quality thin gate oxides grown by rapid thermal oxidation.** Journal of Solid-State Devices and Circuits, v. 3, n. 1, p. 1–9, 1995.

SANTOS, S. **Oxidação térmica rápida do silício: influência dos procedimentos de limpeza e dos perfis temporais de temperatura na qualidade dos óxido de porta MOS.** Tese de doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1996.

SCHUEGRAF, K.; KING, C.; HU, C. **Ultra-thin silicon dioxide leakage current and scaling limit.** p. 18–19, 2003.

SHEWCHUN, J.; SINGH, R.; GREEN, M. **Theory of metal-insulator-semiconductor solar cells.** Journal of Applied Physics, v. 48, n. 2, p. 765–770, 1977.

SHOCKLEY, W.; QUEISSER, H. **Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells.** Journal of Applied Physics, v. 32, n. 3, p. 510–519, 1961.

TARR, N.; PULFREY, D.; CAMPORESE, D. **An Analytic Model for the MIS Tunnel Junction.** IEEE Transactions on Electron Devices, v. 30, n. 12, p. 1760–1770, 1983.

TOQUETI, L. **Estudo Experimental da Obtenção de Oxinitretos de Silício Ultrafinos para Porta MOS.** Tese de doutorado - Escola Politécnica da USP, 2005.

UNITED NATIONS. **Kyoto Protocol.** Disponível em:

<http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php>. Acesso em: 15 mar 2018.

VALLURI, S.; JEFFREY, D.; CORLESS, R. **Some applications of the Lambert W function to physics** . Canadian Journal of Physics, v. 78, n. 9, p. 823–831, 2011.

WATANABE, M. et al. **Fabrication and electrical characterization of MOS solar cells for energy harvesting**. 33rd Symposium on Microelectronics Technology and Devices, SBMicro 2018, p. 18–21, 2018.

Lista de Publicações

WATANABE, M.; CHIAPPIM, W.; CHRISTIANO, V.; IZUMI, F.; SANTOS, S. Fabrication and electrical characterization of MOS solar cells for energy harvesting. 33rd Symposium on Microelectronics Technology and Devices, SBMicro 2018, 2018.

WATANABE, M.; CHIAPPIM, W.; CHRISTIANO, V.; SANTOS, S. MOS solar cells for indoor LED energy harvesting: influence of the grating geometry and the thickness of the gate dielectrics. 34th Symposium on Microelectronics Technology and Devices, SBMicro 2019, 2019.

SANTOS, F.; WATANABE, M.; CHIAPPIM, W.; SANTOS, S. Bifacial Tandem Solar Panels with MOS Cells on the backside for Applications in Deserts. 34th Symposium on Microelectronics Technology and Devices, SBMicro 2019, 2019.

LOUZADA, G.; REGIS, S.; SHIGA, W.; IZUMI, F.; WATANABE, M.; RANGEL, R.; SANTOS, S. Estudo de lamínulas de vidro como camada antirreflexiva para células solares MOS. 21º Simpósio de Iniciação Científica e Tecnológica (SICT – 2019), p. 67, v. 48, 2019.

REGIS, S.; SHIGA, W.; LOUZADA, G.; WATANABE, M.; IZUMI, F.; RANGEL, R.; SANTOS, S. Filmes finos de SiO como camada de passivação em células solares MOS. 21º Simpósio de Iniciação Científica e Tecnológica (SICT – 2019). p. 71, v. 48, 2019.

Apêndice A – Resolução da integral da corrente de tunelamento Fowler-Nordheim (FN) e direto (DT)

Como mencionado no capítulo 2, a equação da densidade de corrente de tunelamento é descrita pela Equação 2.4 (DEPAS, 1995):

$$J = \frac{4\pi m_t}{h^3} \int_0^{E_f} dE \int_0^E dE_t T_t(E, E_t) \quad (2.4)$$

A.1. Tunelamento Fowler-Nordheim (FN)

Para o Tunelamento Fowler-Nordheim (FN), a probabilidade de tunelamento do elétron é dada pela equação (DEPAS, 1995):

$$T_{FN}(E, E_t) = \exp \left[-\frac{\beta}{E_{ox}} \frac{\left(\phi_B + E_f - E + \frac{m_t}{m_{ox}} E_t \right)^{3/2}}{\phi_B^{3/2}} \right] \quad (2.9)$$

Com a finalidade de simplificar a solução da integral da Equação 2.4, é necessário considerar na Equação 2.9 que $E \approx E_f$ e $E_t \approx 0$. Por meio dessa simplificação, podemos utilizar os dois primeiros termos da expansão em série de Taylor:

$$(1 + x)^{\frac{3}{2}} = 1 + \frac{3}{2}x \quad \text{para } x \ll 1 \quad (A.1)$$

Substituindo A.1 na Equação 2.9 obtemos:

$$T_{FN}(E, E_t) = \exp \left\{ -\frac{\beta}{E_{ox}} \frac{\left[\phi_B + \frac{3}{2}(E_f - E) + \frac{3}{2} \frac{m_t}{m_{ox}} E_t \right]}{\phi_B} \right\} \quad (A.2)$$

Substituindo A.2 na Equação 2.4 e utilizando a relação $h = 2\pi\hbar$:

$$J_{FN} = \frac{qm_t}{\hbar^3 2\pi^2} \int_0^{E_f} \int_0^E dE \cdot dE_t \exp \left\{ -\frac{\beta}{E_{ox}} \frac{\left[\phi_B + \frac{3}{2}(E_f - E) + \frac{3}{2} \frac{m_t}{m_{ox}} E_t \right]}{\phi_B} \right\} \quad (A.3)$$

Resolvendo a integral e considerando que $E_t \approx 0$ como foi suposto anteriormente, temos:

$$J_{FN} = \frac{qm_t}{\hbar^3 2\pi^2} \frac{2}{3} \frac{E_{ox}\phi_B m_{ox}}{\beta m_t} \int_0^{E_f} dE \exp \left\{ -\frac{\beta}{E_{ox}} \left[\phi_B + \frac{3}{2}(E_f - E) \right] \right\} \quad (A.4)$$

resolvendo a integral da Equação A.4 e mantendo a relação $E \approx E_f$, temos:

$$J_{FN} = \frac{qm_t}{\hbar^3 2\pi^2} \frac{2}{3} \frac{E_{ox}\phi_B m_{ox}}{\beta m_t} \frac{2}{3} \frac{E_{ox}\phi_B}{\beta} \exp \left(-\frac{\beta}{E_{ox}} \frac{\phi_B}{\phi_B} \right) \quad (A.5)$$

indicando na Equação A.5 com os termos A e β e realizando algumas simplificações obtemos a equação do tunelamento Fowler-Nordheim no qual foi prevista por Lenzlinger e Snow (DEPAS, 1995; LENZLINGER, 1969).

$$J_{FN} = A E_{ox}^2 \exp \left(-\frac{\beta}{E_{ox}} \right) \quad (2.11)$$

A.2. Tunelamento Direto (DT)

No Tunelamento Direto (DT), a probabilidade de tunelamento do elétron é dada pela Equação 2.10 (DEPAS, 1995):

$$T_{DT}(E, E_t) = \exp \left\{ -\frac{\beta}{E_{ox}} \left[\frac{\left(\phi_B + E_f - E + \frac{m_t}{m_{ox}} E_t \right)^{3/2} - \left(\phi_B + E_f - E + \frac{m_t}{m_{ox}} E_t - qV_{ox} \right)^{3/2}}{\phi_B^{3/2}} \right] \right\} \quad (2.10)$$

Para simplificar a solução da integral da Equação 2.4, é necessário considerar na Equação 2.10 como $E \approx E_f$ e $E_t \approx 0$. Na primeira parte da expressão utilizamos a Equação A.1 e na segunda usamos os dois primeiros termos da série de Taylor:

$$(a + x)^{3/2} = a^{3/2} + \frac{3}{2} a^{1/2} x \quad \text{para } x \approx 0 \quad (A.6)$$

substituindo os termos A.1 e A.6 na Equação 2.10, temos:

$$T_{DT}(E, E_t) = \exp \left\{ -\frac{\beta}{E_{ox}} \left\{ \frac{\left[\phi_B + \frac{3}{2}(E_f - E) + \frac{3}{2} \frac{m_t}{m_{ox}} E_t \right]}{\phi_B} - \left[\left(\frac{\phi_B - qV_{ox}}{\phi_B} \right)^{3/2} + \frac{3}{2} \left(\frac{\phi_B - qV_{ox}}{\phi_B} \right)^{1/2} \left(\frac{E_f - E + \frac{m_t}{m_{ox}} E_t}{\phi_B} \right) \right] \right\} \right\} \quad (A.7)$$

substituindo A.7 na equação integral 2.4:

$$J_{DT} = \frac{qm_t}{\hbar^3 2\pi^2} \int_0^{E_f} dE \int_0^E dE_t \exp \left\langle -\frac{\beta}{E_{ox}} \left\{ \frac{[\phi_B + \frac{3}{2}(E_f - E) + \frac{3}{2} \frac{m_t}{m_{ox}} E_t]}{\phi_B} - \left[\left(\frac{\phi_B - qV_{ox}}{\phi_B} \right)^{3/2} + \frac{3}{2} \left(\frac{\phi_B - qV_{ox}}{\phi_B} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{E_f - E + \frac{m_t}{m_{ox}} E_t}{\phi_B} \right) \right] \right\} \right\rangle \quad (A.8)$$

resolvendo a integral e considerando $E_t \approx 0$ temos:

$$J_{DT} = \frac{qm_t}{\hbar^3 2\pi^2} \frac{2}{3} \frac{E_{ox} \phi_B m_{ox}}{\beta m_t \left[1 - \left(\frac{\phi_B - qV_{ox}}{\phi_B} \right)^{\frac{1}{2}} \right]} \int_0^{E_f} dE \exp \left\langle -\frac{\beta}{E_{ox}} \left\{ \frac{[\phi_B + \frac{3}{2}(E_f - E)]}{\phi_B} - \left[\left(\frac{\phi_B - qV_{ox}}{\phi_B} \right)^{3/2} + \frac{3}{2} \left(\frac{\phi_B - qV_{ox}}{\phi_B} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{E_f - E}{\phi_B} \right) \right] \right\} \right\rangle \quad (A.10)$$

Integrando a Equação A.10 entre E_f e 0:

$$J_{DT} = \frac{qm_t}{\hbar^3 2\pi^2} \frac{2}{3} \frac{E_{ox} \phi_B m_{ox}}{\beta m_t \left[1 - \left(\frac{\phi_B - qV_{ox}}{\phi_B} \right)^{\frac{1}{2}} \right]} \frac{E_{ox} \phi_B}{\beta \left[1 - \left(\frac{\phi_B - qV_{ox}}{\phi_B} \right)^{\frac{1}{2}} \right]} \left[\exp \left\langle -\frac{\beta}{E_{ox}} \left\{ \frac{\phi_B}{\phi_B} - \left(\frac{\phi_B - qV_{ox}}{\phi_B} \right)^{\frac{3}{2}} \right\} \right\rangle - \exp \left\langle -\frac{\beta}{E_{ox}} \left\{ \frac{(\phi_B + \frac{3}{2} E_f)}{\phi_B} - \left[\left(\frac{\phi_B - qV_{ox}}{\phi_B} \right)^{\frac{3}{2}} + \frac{3}{2} \left(\frac{\phi_B - qV_{ox}}{\phi_B} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{E_f}{\phi_B} \right) \right] \right\} \right\rangle \right] \quad (A.11)$$

Aplicando as simplificações necessárias e substituindo os termos na Equação A.12 com os termos A e β , conforme previsto por Schuegraf (SCHUEGRAF, 1992):

$$J_{DT} = \frac{AE_{ox}^2}{\left[1 - \left(1 - \frac{qV_{ox}}{\phi_B} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2} \exp \left\{ -\frac{\beta}{E_{ox}} \left[1 - \left(1 - \frac{qV_{ox}}{\phi_B} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \right\} \left\langle 1 - \exp \left\{ -\frac{3}{2} \frac{\beta}{E_{ox}} \frac{\phi_B^{\frac{1}{2}} - (\phi_B - qV_{ox})^{\frac{1}{2}}}{\phi_B^{\frac{3}{2}}} \phi_f \right\} \right\rangle \quad (A.12)$$

a expressão 2.12 pode ser simplificada para camadas muito finas de dielétrico de porta e quedas moderadas no óxido para (DEPAS, 1995):

$$\phi_f > \frac{4}{3} \frac{\phi_B^2}{q\beta t_{ox}} \quad (A.13)$$

e

$$q \cdot V_{ox} < \phi_B \quad (A.14)$$

Para as condições representadas por A.13 e A.14, temos:

$$\exp \left\{ -\frac{3}{2} \frac{\beta}{E_{ox}} \frac{\phi_B^{\frac{1}{2}} - (\phi_B - qV_{ox})^{\frac{1}{2}}}{\phi_B^{\frac{3}{2}}} \phi_f \right\} \approx \exp \left\{ -\frac{3}{4} \cdot \frac{\beta \cdot t_{ox}}{V_{ox}} \cdot \frac{qV_{ox}/\phi_B}{\phi_B} \phi_f \right\} \approx 0$$

e

$$\left(1 - \frac{qV_{ox}}{\phi_B} \right)^{\frac{3}{2}} \approx 0 \text{ em comparação ao termo } \left(1 - \frac{qV_{ox}}{\phi_B} \right)^{\frac{1}{2}}$$

assim, a corrente de tunelamento direto pode ser descrita conforme a Equação 2.12 a seguir (DEPAS, 1995; RANUÁREZ, 2006):

$$J_{DT} = \frac{AE_{ox}^2}{\left[1 - \left(1 - \frac{qV_{ox}}{\phi_B} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2} \exp \left\{ -\frac{\beta}{E_{ox}} \right\} \quad (2.12)$$

Apêndice B – Tabela de parâmetros para exposição por LED

Tabela B.1 – Parâmetros da amostra com porta de alumínio e espessura de 1,65 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) Ω .cm iluminados por LED na densidade de potência de 20,2 mW/cm² (AP) e 5,1 mW/cm² (BP).

	Geometria	J_{sc} (μ A/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF (%)	P_{max} (μ W/cm ²)	η (%)
AP	50 μ m x 50 μ m	106,45	347,9	54,30	20,11	0,10
	50 μ m x 100 μ m	78,54	318,39	39,73	9,93	0,05
	100 μ m x 100 μ m	69,4	376,63	70,48	18,42	0,09
	100 μ m x 150 μ m	49,71	374,38	72,66	13,52	0,07
BP	50 μ m x 50 μ m	57,86	314,06	44,62	8,11	0,16
	50 μ m x 100 μ m	41,55	237,13	33,70	3,32	0,07
	100 μ m x 100 μ m	34,81	350,32	68,03	8,30	0,16
	100 μ m x 150 μ m	25,59	335,09	48,03	4,12	0,08

Fonte: Autor.

Tabela B.2 – Parâmetros da amostra com porta de alumínio e espessura de 1,73 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) Ω .cm iluminados por LED na densidade de potência de 20,2 mW/cm² (AP) e 5,1 mW/cm² (BP).

	Geometria	J_{sc} (μ A/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF (%)	P_{max} (μ W/cm ²)	η (%)
AP	50 μ m x 50 μ m	306,12	301,84	41,27	38,13	0,19
	50 μ m x 100 μ m	160,37	310,7	41,14	20,50	0,10
	100 μ m x 100 μ m	147,15	314,64	44,09	20,42	0,10
	100 μ m x 150 μ m	97,63	308,5	40,75	12,27	0,06
BP	50 μ m x 50 μ m	295,87	286,92	34,77	29,52	0,58
	50 μ m x 100 μ m	142,41	296,77	32,62	13,79	0,27
	100 μ m x 100 μ m	125,11	299,72	38,01	14,25	0,28
	100 μ m x 150 μ m	105,62	292,83	36,25	11,21	0,22

Fonte: Autor.

Tabela B.3 – Parâmetros da amostra com porta de alumínio e espessura de 2,10 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) Ω .cm iluminados por LED na densidade de potência de 20,2 mW/cm² (AP) e 5,1 mW/cm² (BP).

	Geometria	J_{sc} (μ A/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF (%)	P_{max} (μ W/cm ²)	η (%)
AP	50 μ m x 50 μ m	641,62	364,95	33,40	78,21	0,39
	50 μ m x 100 μ m	333,92	362,35	27,02	32,69	0,16
	100 μ m x 100 μ m	126,19	375,85	35,94	17,05	0,08
	100 μ m x 150 μ m	90,14	374,73	58,13	19,63	0,10
BP	50 μ m x 50 μ m	288,32	327,66	33,56	31,71	0,63
	50 μ m x 100 μ m	133,01	322,74	26,28	11,28	0,22
	100 μ m x 100 μ m	36,44	337,51	39,14	4,81	0,10
	100 μ m x 150 μ m	31,87	338,49	63,87	6,89	0,14

Fonte: Autor.

Tabela B.4 – Parâmetros da amostra com porta de alumínio e espessura de 2,23 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) Ω .cm iluminados por LED na densidade de potência de 20,2 mW/cm² (AP) e 5,1 mW/cm² (BP).

	Geometria	J_{sc} (μ A/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF (%)	P_{max} (μ W/cm ²)	η (%)
AP	50 μ m x 50 μ m	686,27	356,04	31,31	76,50	0,38
	50 μ m x 100 μ m	396,2	357,16	31,65	44,79	0,22
	100 μ m x 100 μ m	518,91	368,67	41,25	78,92	0,39
	100 μ m x 150 μ m	240,71	345,31	41,36	34,38	0,17
BP	50 μ m x 50 μ m	400,61	323,27	36,08	46,73	0,92
	50 μ m x 100 μ m	177,92	315,24	38,82	21,77	0,43
	100 μ m x 100 μ m	249,82	328,65	43,58	35,78	0,71
	100 μ m x 150 μ m	135,91	315,24	45,28	19,40	0,38

Fonte: Autor.

Tabela B.5 – Parâmetros da amostra com porta de alumínio e espessura de 1,73 nm e resistividade do substrato entre (0,1 - 1) Ω .cm iluminados por LED na densidade de potência de 20,2 mW/cm² (AP) e 5,1 mW/cm² (BP).

	Geometria	J_{sc} (μ A/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF (%)	P_{max} (μ W/cm ²)	η (%)
AP	50 μ m x 50 μ m	4,91	542,1	10,11	0,27	0,001
	50 μ m x 100 μ m	3,25	548,85	9,90	0,18	0,001
	100 μ m x 100 μ m	3,38	547,17	9,96	0,18	0,001
	100 μ m x 150 μ m	2,35	215,88	22,10	0,11	0,001
BP	50 μ m x 50 μ m	7,43	508,87	7,81	0,30	0,006
	50 μ m x 100 μ m	5,51	486,93	7,12	0,19	0,004
	100 μ m x 100 μ m	6,9	515,1	6,45	0,23	0,005
	100 μ m x 150 μ m	4,19	316,75	11,00	0,15	0,003

Fonte: Autor.

Tabela B.6 – Parâmetros da amostra com porta de alumínio e espessura de 2,10 nm e resistividade do substrato entre (0,1 - 1) Ω .cm iluminados por LED na densidade de potência de 20,2 mW/cm² (AP) e 5,1 mW/cm² (BP).

	Geometria	J_{sc} (μ A/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF (%)	P_{max} (μ W/cm ²)	η (%)
AP	50 μ m x 50 μ m	463,13	432,6	25,61	51,31	0,25
	50 μ m x 100 μ m	255,05	417,14	26,17	27,84	0,14
	100 μ m x 100 μ m	330,26	453,92	38,85	58,24	0,29
	100 μ m x 150 μ m	162,42	404,7	44,28	29,11	0,14
BP	50 μ m x 50 μ m	361,02	415,63	28,37	42,57	0,84
	50 μ m x 100 μ m	222,53	405,6	27,95	25,23	0,50
	100 μ m x 100 μ m	249,58	436,56	43,22	47,09	0,93
	100 μ m x 150 μ m	112,03	382,24	48,39	20,72	0,41

Fonte: Autor.

Tabela B.7 – Parâmetros da amostra com porta de magnésio e espessura de 1,73 nm e resistividade do substrato entre (0,01 - 0,05) Ω .cm iluminados por LED na densidade de potência de 20,2 mW/cm² (AP) e 5,1 mW/cm² (BP).

	Geometria	J_{sc} (μ A/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF (%)	P_{max} (μ W/cm ²)	η (%)
AP	50 μ m x 50 μ m	13,84	244,96	48,44	1,64	0,008
	50 μ m x 100 μ m	16,22	17,2	22,98	0,06	0,000
	100 μ m x 100 μ m	8,58	259,24	49,44	1,10	0,005
	100 μ m x 150 μ m	5,43	230,23	44,63	0,56	0,003
BP	50 μ m x 50 μ m	21,05	263,72	50,65	2,81	0,056
	50 μ m x 100 μ m	15,9	244,96	40,98	1,60	0,032
	100 μ m x 100 μ m	11,27	268,59	51,48	1,56	0,031
	100 μ m x 150 μ m	7,24	246,64	45,00	0,80	0,016

Fonte: Autor.

Tabela B.8 – Parâmetros da amostra com porta de magnésio e espessura de 1,73 nm e resistividade do substrato entre (0,1 - 0,5) Ω .cm iluminados por LED na densidade de potência de 20,2 mW/cm² (AP) e 5,1 mW/cm² (BP).

	Geometria	J_{sc} (μ A/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF (%)	P_{max} (μ W/cm ²)	η (%)
AP	50 μ m x 50 μ m	130,64	410,08	68,48	36,69	0,18
	50 μ m x 100 μ m	83,45	412,61	68,89	23,72	0,12
	100 μ m x 100 μ m	66,68	394,89	62,36	16,42	0,08
	100 μ m x 150 μ m	58,08	398,69	65,19	15,09	0,07
BP	50 μ m x 50 μ m	77,23	388,23	67,05	20,10	0,40
	50 μ m x 100 μ m	53,7	392,73	67,92	14,32	0,28
	100 μ m x 100 μ m	36,2	362,35	59,23	7,77	0,15
	100 μ m x 150 μ m	36,58	374,73	63,42	8,69	0,17

Fonte: Autor.

Tabela B.9 – Parâmetros da amostra com porta de magnésio e espessura de 1,73 nm e resistividade do substrato entre (1 – 10) Ω .cm iluminados por LED na densidade de potência de 20,2 mW/cm² (AP) e 5,1 mW/cm² (BP).

	Geometria	J_{sc} (μ A/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF (%)	P_{max} (μ W/cm ²)	η (%)
AP	50 μ m x 50 μ m	486,68	414,76	56,15	113,33	0,56
	50 μ m x 100 μ m	501,9	407,16	54,53	111,43	0,55
	100 μ m x 100 μ m	901,38	423,62	52,29	199,65	0,99
	100 μ m x 150 μ m	775,83	412,22	51,95	166,13	0,82
BP	50 μ m x 50 μ m	128,01	371,18	62,92	29,90	0,59
	50 μ m x 100 μ m	169,1	368,93	59,47	37,10	0,73
	100 μ m x 100 μ m	180,51	355,43	58,25	37,37	0,74
	100 μ m x 150 μ m	254,7	363,31	57,34	53,06	1,05

Fonte: Autor.

Apêndice C – Tabela de parâmetros para exposição por lâmpada halógena

Tabela C.1 – Parâmetros da amostra com porta de alumínio e espessura de 1,65 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) Ω .cm iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 47,0 mW/cm² (AP) e 11,7 mW/cm² (BP).

	Geometria	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF (%)	P_{max} (μ W/cm ²)	η (%)
AP	50 μ m x 50 μ m	7,63	511,92	30,93	1207,96	2,57
	50 μ m x 100 μ m	6,73	507,28	32,91	1123,48	2,39
	100 μ m x 100 μ m	8,94	521,68	37,23	1736,26	3,69
	100 μ m x 150 μ m	10,08	527,87	35,29	1877,99	4,00
BP	50 μ m x 50 μ m	4,58	483,67	30,99	686,49	5,84
	50 μ m x 100 μ m	4,1	485,07	31,93	634,92	5,40
	100 μ m x 100 μ m	5,28	487,88	34,08	877,94	7,47
	100 μ m x 150 μ m	4,99	499,43	31,97	796,68	6,78

Fonte: Autor.

Tabela C.2 – Parâmetros da amostra com porta de alumínio e espessura de 1,73 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) Ω .cm iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 47,0 mW/cm² (AP) e 11,7 mW/cm² (BP).

	Geometria	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF (%)	P_{max} (μ W/cm ²)	η (%)
AP	50 μ m x 50 μ m	7,45	494,19	31,05	1143,22	2,43
	50 μ m x 100 μ m	6,78	501,93	31,10	1058,38	2,25
	100 μ m x 100 μ m	10,28	511,21	34,51	1813,50	3,86
	100 μ m x 150 μ m	7,01	511,21	30,89	1107,01	2,36
BP	50 μ m x 50 μ m	4,86	469,39	30,45	694,62	5,91
	50 μ m x 100 μ m	4,26	473,61	31,73	640,23	5,45
	100 μ m x 100 μ m	5,24	480,64	36,19	911,49	7,76
	100 μ m x 150 μ m	4,44	480,64	37,21	794,00	6,76

Fonte: Autor.

Tabela C.3 – Parâmetros da amostra com porta de alumínio e espessura de 2,10 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) Ω .cm iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 47,0 mW/cm² (AP) e 11,7 mW/cm² (BP).

	Geometria	J_{sc} (mA/cm²)	V_{oc} (mV)	FF (%)	P_{max} (μW/cm²)	η (%)
AP	50 μ m x 50 μ m	4,51	520,73	21,56	506,22	1,08
	50 μ m x 100 μ m	6,03	509,9	20,24	622,30	1,32
	100 μ m x 100 μ m	7,73	526,91	19,06	776,40	1,65
	100 μ m x 150 μ m	10,5	528,46	20,63	1144,86	2,44
BP	50 μ m x 50 μ m	3,81	491,02	22,64	423,61	3,61
	50 μ m x 100 μ m	3,99	485,4	23,08	446,94	3,80
	100 μ m x 100 μ m	3,97	495,24	24,64	484,44	4,12
	100 μ m x 150 μ m	5,68	493,83	24,47	686,33	5,84

Fonte: Autor.

Tabela C.4 – Parâmetros da amostra com porta de alumínio e espessura de 2,23 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) Ω .cm iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 47,0 mW/cm² (AP) e 11,7 mW/cm² (BP).

	Geometria	J_{sc} (mA/cm²)	V_{oc} (mV)	FF (%)	P_{max} (μW/cm²)	η (%)
AP	50 μ m x 50 μ m	3,24	520,73	18,86	318,23	0,68
	50 μ m x 100 μ m	2,5	517,63	16,79	217,25	0,46
	100 μ m x 100 μ m	5,76	533,1	17,53	538,25	1,15
	100 μ m x 150 μ m	3,96	509,9	15,80	318,95	0,68
BP	50 μ m x 50 μ m	2,42	489,4	20,05	237,51	2,02
	50 μ m x 100 μ m	1,85	482,37	17,92	159,90	1,36
	100 μ m x 100 μ m	3,35	492,21	19,75	325,66	2,77
	100 μ m x 150 μ m	2,85	482,37	17,30	237,89	2,02

Fonte: Autor.

Tabela C.5 – Parâmetros da amostra com porta de alumínio e espessura de 1,73 nm e resistividade do substrato entre (0,1 - 1) Ω .cm iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 47,0 mW/cm² (AP) e 11,7 mW/cm² (BP).

	Geometria	J_{sc} (μA/cm²)	V_{oc} (mV)	FF (%)	P_{max} (μW/cm²)	η (%)
AP	50 μ m x 50 μ m	21,57	464,95	9,23	0,93	0,002
	50 μ m x 100 μ m	18,74	443,75	6,91	0,57	0,001
	100 μ m x 100 μ m	19,32	447,97	7,02	0,61	0,001
	100 μ m x 150 μ m	13,7	304,74	9,79	0,41	0,001
BP	50 μ m x 50 μ m	25,66	476,63	7,71	0,94	0,008
	50 μ m x 100 μ m	18,22	433,47	6,67	0,53	0,004
	100 μ m x 100 μ m	21,5	458,78	6,68	0,66	0,006
	100 μ m x 150 μ m	13,71	312,74	9,12	0,39	0,003

Fonte: Autor.

Tabela C.6 – Parâmetros da amostra com porta de alumínio e espessura de 2,10 nm e resistividade do substrato entre (0,1 - 1) Ω .cm iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 47,0 mW/cm² (AP) e 11,7 mW/cm² (BP).

	Geometria	J_{sc} (mA/cm²)	V_{oc} (mV)	FF (%)	P_{max} (μW/cm²)	η (%)
AP	50 μ m x 50 μ m	2,03	593,04	14,75	177,58	0,38
	50 μ m x 100 μ m	1,39	598,53	14,77	122,89	0,26
	100 μ m x 100 μ m	3,54	604,01	14,81	316,64	0,67
	100 μ m x 150 μ m	2,73	572,79	15,69	245,40	0,52
BP	50 μ m x 50 μ m	1,92	563,39	14,56	157,46	1,34
	50 μ m x 100 μ m	1,2	561,7	14,91	100,52	0,86
	100 μ m x 100 μ m	3,02	575,21	15,14	262,97	2,24
	100 μ m x 150 μ m	2,28	539,77	16,31	200,70	1,71

Fonte: Autor.

Tabela C.7 – Parâmetros da amostra com porta de magnésio e espessura de 1,73 nm e resistividade do substrato entre (0,01 - 0,05) $\Omega\cdot\text{cm}$ iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 47,0 mW/cm² (AP) e 11,7 mW/cm² (BP).

	Geometria	J_{sc} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	V_{oc} (mV)	FF (%)	P_{max} ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	η (%)
AP	50 μm x 50 μm	460	422,84	63,27	123,07	0,262
	50 μm x 100 μm	312,99	227,92	26,54	18,93	0,040
	100 μm x 100 μm	219,34	410,57	64,36	57,96	0,123
	100 μm x 150 μm	159,94	393,82	58,94	37,12	0,079
BP	50 μm x 50 μm	314,87	386,62	57,64	70,17	0,597
	50 μm x 100 μm	224,93	175,64	25,76	10,18	0,087
	100 μm x 100 μm	170,34	400,83	63,39	43,28	0,368
	100 μm x 150 μm	129,16	405,8	62,79	32,91	0,280

Fonte: Autor.

Tabela C.8 – Parâmetros da amostra com porta de magnésio e espessura de 1,73 nm e resistividade do substrato entre (0,1 - 0,5) $\Omega\cdot\text{cm}$ iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 47,0 mW/cm² (AP) e 11,7 mW/cm² (BP).

	Geometria	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF (%)	P_{max} ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	η (%)
AP	50 μm x 50 μm	11,53	560,02	50,99	3292,62	7,01
	50 μm x 100 μm	9,25	570,14	39,43	2079,32	4,42
	100 μm x 100 μm	8,15	565,08	74,20	3417,29	7,27
	100 μm x 150 μm	6,83	563,39	63,19	2431,55	5,17
BP	50 μm x 50 μm	5,96	547,81	65,25	2130,41	18,13
	50 μm x 100 μm	4,64	554,57	53,10	1366,42	11,63
	100 μm x 100 μm	3,98	552,88	74,01	1628,59	13,86
	100 μm x 150 μm	3,38	554,57	69,69	1306,34	11,12

Fonte: Autor.

Tabela C.9 – Parâmetros da amostra com porta de magnésio e espessura de 1,73 nm e resistividade do substrato entre (1 – 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 47,0 mW/cm² (AP) e 11,7 mW/cm² (BP).

	Geometria	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF (%)	P_{max} ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	η (%)
AP	50 μm x 50 μm	19,29	403,36	41,95	3263,69	6,94
	50 μm x 100 μm	11,23	374,25	44,68	1877,72	4,00
	100 μm x 100 μm	12,52	413,49	36,65	1897,12	4,04
	100 μm x 150 μm	10,62	379,32	29,99	1208,04	2,57
BP	50 μm x 50 μm	7,32	428,48	57,63	1807,66	15,39
	50 μm x 100 μm	8,61	410,76	43,56	1540,56	13,11
	100 μm x 100 μm	8,72	439,87	32,74	1255,72	10,69
	100 μm x 150 μm	8,5	417,09	31,21	1106,31	9,42

Fonte: Autor.

Apêndice D – Curvas J-V das células solares MOS LED

Figura D.1 – Curva J-V para as amostras com porta de alumínio e espessura do dielétrico de porta de 1,65 nm; 1,73 nm; 2,10 nm e 2,23 nm e resistividade do substrato entre (1 – 10) $\Omega \cdot \text{cm}$ iluminados por LED na densidade de potência de 20,2 mW/cm² (**AP**) para dimensões (a) 50 μm x 50 μm , (b) 50 μm x 100 μm , (c) 100 μm x 100 μm e (d) 100 μm x 150 μm .

Fonte: Autor.

Figura D.2 – Curva J-V para as amostras com porta de alumínio e espessura do dielétrico de porta de 1,65 nm; 1,73 nm; 2,10 nm e 2,23 nm e resistividade do substrato entre (1 – 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ iluminados por LED na densidade de potência de 5,1 mW/cm² (**BP**) para dimensões (a) 50 μm x 50 μm , (b) 50 μm x 100 μm , (c) 100 μm x 100 μm e (d) 100 μm x 150 μm .

Fonte: Autor.

Figura D.3 – Curva J-V para as amostras com porta de alumínio e espessura do dielétrico de porta de 1,73 nm e 2,10 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ e (0,1 - 1) $\Omega\cdot\text{cm}$ iluminados por LED na densidade de potência de 20,2 mW/cm² (**AP**) para dimensões (a) 50 μm x 50 μm , (b) 50 μm x 100 μm , (c) 100 μm x 100 μm e (d) 100 μm x 150 μm .

Fonte: Autor.

Figura D.4 – Curva J-V para as amostras com porta de alumínio e espessura do dielétrico de porta de 1,73 nm e 2,10 nm e resistividade do substrato entre (1 – 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ e (0,1 – 1) $\Omega\cdot\text{cm}$ iluminados por LED na densidade de potência de 5,1 mW/cm^2 (**BP**) para dimensões (a) 50 μm x 50 μm , (b) 50 μm x 100 μm , (c) 100 μm x 100 μm e (d) 100 μm x 150 μm .

Fonte: Autor.

Figura D.5 – Curva J-V para amostras com espessura do dielétrico de porta de 1,73 nm e porta de alumínio ($\rho = (1 - 10) \Omega\cdot\text{cm}$) e porta de magnésio com (0,01 - 0,05) $\Omega\cdot\text{cm}$; (0,1 - 0,5) $\Omega\cdot\text{cm}$ e (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ iluminados por LED na densidade de potência de 20,2 mW/cm^2 (**AP**) para dimensões (a) 50 μm x 50 μm , (b) 50 μm x 100 μm , (c) 100 μm x 100 μm e (d) 100 μm x 150 μm .

Fonte: Autor.

Figura D.6 – Curva J-V para amostras com espessura do dielétrico de porta de 1,73 nm e porta de alumínio ($\rho = (1 - 10) \Omega \cdot \text{cm}$) e porta de magnésio com $(0,01 - 0,05) \Omega \cdot \text{cm}$; $(0,1 - 0,5) \Omega \cdot \text{cm}$ e $(1 - 10) \Omega \cdot \text{cm}$ iluminados por LED na densidade de potência de $5,1 \text{ mW/cm}^2$ (**BP**) para dimensões (a) $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$, (b) $50 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$, (c) $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ e (d) $100 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$.

Fonte: Autor.

Apêndice E – Curvas J-V das células solares MOS Halógena

Figura E.1 – Curva J-V para as amostras com porta de alumínio e espessura do dielétrico de porta de 1,65 nm; 1,73 nm; 2,10 nm e 2,23 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) $\Omega \cdot \text{cm}$ iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 47,0 mW/cm² (**AP**) para dimensões (a) 50 μm x 50 μm , (b) 50 μm x 100 μm , (c) 100 μm x 100 μm e (d) 100 μm x 150 μm .

Fonte: Autor.

Figura E.2 – Curva J-V para as amostras com porta de alumínio e espessura do dielétrico de porta de 1,65 nm; 1,73 nm; 2,10 nm e 2,23 nm e resistividade do substrato entre (1 – 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 11,7 mW/cm² (**BP**) para dimensões (a) 50 μm x 50 μm , (b) 50 μm x 100 μm , (c) 100 μm x 100 μm e (d) 100 μm x 150 μm .

Fonte: Autor.

Figura E.3 – Curva J-V para as amostras com porta de alumínio e espessura do dielétrico de porta de 1,73 nm e 2,10 nm e resistividade do substrato entre (1 – 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ e (0,1 – 1) $\Omega\cdot\text{cm}$ iluminados por lâmpada halógena na densidade de 47,0 mW/cm² (**AP**) para dimensões (a) 50 μm x 50 μm , (b) 50 μm x 100 μm , (c) 100 μm x 100 μm e (d) 100 μm x 150 μm .

Fonte: Autor.

Figura E.4 – Curva J-V para as amostras com porta de alumínio e espessura do dielétrico de porta de 1,73 nm e 2,10 nm e resistividade do substrato entre (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ e (0,1 - 1) $\Omega\cdot\text{cm}$ iluminados por lâmpada halógena na densidade de 11,7 mW/cm^2 (BP) para dimensões (a) 50 μm x 50 μm , (b) 50 μm x 100 μm , (c) 100 μm x 100 μm e (d) 100 μm x 150 μm .

Fonte: Autor.

Figura E.5 – Curva J-V para amostras com espessura do dielétrico de porta de 1,73 nm e porta de alumínio ($\rho = (1 - 10) \Omega\cdot\text{cm}$) e porta de magnésio com (0,01 - 0,05) $\Omega\cdot\text{cm}$; (0,1 - 0,5) $\Omega\cdot\text{cm}$ e (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 47,0 mW/cm^2 (AP) para dimensões (a) 50 μm x 50 μm , (b) 50 μm x 100 μm , (c) 100 μm x 100 μm e (d) 100 μm x 150 μm .

Fonte: Autor.

Figura E.6 – Curva J-V para amostras com espessura do dielétrico de porta de 1,73 nm e porta de alumínio ($\rho = (1 - 10) \Omega.\text{cm}$) e porta de magnésio com $(0,01 - 0,05) \Omega.\text{cm}$; $(0,1 - 0,5) \Omega.\text{cm}$ e $(1 - 10) \Omega.\text{cm}$ iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de $11,7\text{mW}/\text{cm}^2$ (**BP**) para dimensões (a) $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$, (b) $50 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$, (c) $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ e (d) $100 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$.

Fonte: Autor.

Apêndice F – Modelo analítico para célula solar MOS

A função de Lambert no século XVIII e é definida como:

$$W_0(x)e^{W_0(x)} = x \quad (\text{F.1})$$

essa função não possui uma solução trivial e permite resolver problemas físicos complexos como um diodo e um resistor (VALLURI, 2011). A Figura F.1 mostra o comportamento da função de Lambert, nela podemos verificar uma certa semelhança com a função logarítmica.

Figura F.1– Função de Lambert ou ômega. – $W_0(x)$ (ramo principal); --- $W_{-1}(x)$.

Fonte:(VALLURI, 2011).

O ramo principal da função de Lambert pode ser obtida por meio da expansão em série, conforme abaixo (CORLESS, 1996):

$$W_0(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-n)^{n-1}}{n!} x^n \quad (\text{F.2})$$

A obtenção do modelo analítico das CSMOS consiste em transformar uma equação transcendental para outra equação conforme demonstrado na Equação F1. Uma maneira simples é configurar a equação, conforme abaixo:

$$AX + B = e^{(CX+D)} \quad (\text{F.3})$$

Assim, multiplicando cada lado da expressão por $-\frac{C}{A}e^{(-CX-\frac{CB}{A})}$ permite obter uma equação semelhante indicado em F.1 (LUN, 2015).

$$\left(-CX - \frac{CB}{A}\right)e^{(-CX-\frac{CB}{A})} = -\frac{C}{A}e^{(\frac{AD-CB}{A})} \quad (F.4)$$

Portanto, podemos dizer que F.5 é $W_0(x)$ e F.6 é x .

$$W_0(x) = \left(-CX - \frac{CB}{A}\right) \quad (F.5)$$

$$x = -\frac{C}{A}e^{(\frac{AD-CB}{A})} \quad (F.6)$$

Então, partindo da Equação 4.1:

$$J_{BG} = J_0 \left(e^{\frac{-V_G - R_S J_{BG}}{nV_T}} - 1 \right) + (-V_G - R_S J_{BG})G_p - J_L \quad (4.1)$$

Isolamos os termos como em F.3:

$$J_{BG} \frac{1+R_S G_p}{J_0} + \frac{J_L - (-V_G)G_p + J_0}{J_0} = e^{\left(\frac{-V_G - R_S J_{BG}}{nV_T}\right)} \quad (F.7)$$

E determinados os termos como:

$$A = \frac{1+R_S G_p}{J_0} \quad (F.8)$$

$$B = \frac{J_L - (-V_G)G_p + J_0}{J_0} \quad (F.9)$$

$$C = -\frac{R_S}{nV_T} \quad (F.10)$$

$$D = \frac{-V_G}{nV_T} \quad (F.11)$$

$$X = J_{BG} \quad (F.12)$$

Através das expressões F.5 e F.6 e substituindo os valores de F.8, F.9, F.10, F.11 e F.12, obtém-se:

$$W_0(x) = \frac{R_S}{nV_T} \left(J_{BG} + \frac{J_L - (-V_G)G_p + J_0}{1+R_S G_p} \right) \quad (F.13)$$

$$x = \frac{R_S J_0}{nV_T(1+R_S G_p)} e^{\frac{-V_G + R_S(J_0 + J_L)}{nV_T(1+R_S G_p)}} \quad (F.14)$$

por meio da equações F.13 e F.14, colocamos o valor de x dentro do função de Lambert e igualamos essa função, obtemos:

$$J_{BG} = \frac{nV_T}{R_S} W_0 \left[\frac{J_0 R_S}{nV_T(1+R_S G_p)} e^{\frac{-V_G + R_S(J_0 + J_L)}{nV_T(1+R_S G_p)}} \right] + \frac{-V_G G_p - (J_0 + J_L)}{1+R_S G_p} \quad (4.2)$$

Apêndice G – Ajuste de curvas e tabela de parâmetros obtidos pelo ajuste de curvas J-V_G.

Figura G.1 – Ajuste de Curva I-V para as amostras com porta de alumínio e geometria de 50 μm x 50 μm , 50 μm x 100 μm , 100 μm x 100 μm , 100 μm x 150 μm e resistividade do substrato entre (1 – 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ iluminados por lâmpada halógena na densidade de potência de 11,7 mW/cm^2 (BP) para espessura do dielétrico de porta (a) 1,65 nm, (b) 1,73 nm, (c) 2,10 nm e (d) 2,23 nm.

Fonte: Autor.

Tabela G.1 – Tabela de parâmetros do modelo sem luz para CSMOS com porta de alumínio, resistividade entre (1 – 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ e espessuras de 1,65 nm; 1,73 nm; 2,10 nm e 2,23 nm.

t_{ox} (nm)	Geometria	J_0 (A/cm ²)	G_P (S/cm ²)	R_s ($\Omega\cdot\text{cm}^2$)	n
1,65	50 μm x 50 μm	5,22E-07	2,01E-05	27,12	2,40
	50 μm x 100 μm	7,54E-07	2,40E-05	23,09	2,58
	100 μm x 100 μm	7,24E-09	4,09E-07	16,58	1,58
	100 μm x 150 μm	1,90E-07	1,97E-06	13,32	2,19
1,73	50 μm x 50 μm	4,38E-06	1,38E-05	16,19	3,09
	50 μm x 100 μm	7,89E-07	2,11E-05	30,37	2,56
	100 μm x 100 μm	6,81E-08	3,72E-06	19,46	1,86
	100 μm x 150 μm	3,89E-07	9,89E-06	15,79	2,33
2,10	50 μm x 50 μm	2,83E-06	9,09E-08	64,17	3,18
	50 μm x 100 μm	1,03E-06	2,56E-07	43,39	2,82
	100 μm x 100 μm	4,41E-07	6,23E-07	29,42	2,64
	100 μm x 150 μm	4,54E-06	4,49E-07	13,22	3,54
2,23	50 μm x 50 μm	5,27E-06	7,86E-08	105,85	3,67
	50 μm x 100 μm	1,93E-06	6,71E-06	106,99	3,37
	100 μm x 100 μm	6,25E-06	9,72E-08	44,12	3,86
	100 μm x 150 μm	4,29E-06	2,11E-07	56,61	3,90

Fonte: Autor.

Tabela G.2 – Tabela de parâmetros do modelo sem luz para CSMOS com porta de alumínio, resistividade entre (0,1 – 1) $\Omega\cdot\text{cm}$ e espessuras de 1,73 nm e 2,10 nm.

Amostra	Geometria	J_0 (A/cm ²)	G_P (S/cm ²)	R_s ($\Omega\cdot\text{cm}^2$)	n
T20 (0,1-1)	50 μm x 50 μm	2,64E-08	9,41E-08	86,41	3,80
	50 μm x 100 μm	5,32E-12	1,85E-08	117,32	1,95
	100 μm x 100 μm	8,68E-12	3,24E-08	88,50	1,84
	100 μm x 150 μm	9,37E-12	3,99E-08	59,14	1,86
T80 (0,1-1)	50 μm x 50 μm	1,17E-06	1,16E-06	47,73	3,36
	50 μm x 100 μm	1,17E-06	3,63E-06	43,82	3,39
	100 μm x 100 μm	1,50E-07	1,24E-05	25,86	2,44
	100 μm x 150 μm	2,05E-06	1,47E-07	19,17	3,40

Fonte: Autor.

Tabela G.3 – Tabela parâmetros do modelo sem luz para CSMOS com porta de magnésio, espessura de 1,73 nm e resistividades de entre (0,01 - 0,05) $\Omega\cdot\text{cm}$; (0,1 - 0,5) $\Omega\cdot\text{cm}$; (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$.

Amostra	Geometria	J_0 (A/cm ²)	G_P (S/cm ²)	R_s ($\Omega\cdot\text{cm}^2$)	n
Mg (0,01-0,05)	50 μm x 50 μm	1,88E-07	2,17E-05	30,78	2,18
	50 μm x 100 μm	5,17E-07	1,13E-03	29,14	2,63
	100 μm x 100 μm	1,12E-08	1,49E-05	19,30	1,69
	100 μm x 150 μm	2,55E-08	1,39E-05	18,23	1,90
Mg (0,1-0,5)	50 μm x 50 μm	3,17E-09	1,73E-07	16,11	1,50
	50 μm x 100 μm	1,34E-08	5,85E-09	16,96	1,77
	100 μm x 100 μm	5,00E-10	2,35E-06	20,17	1,35
	100 μm x 150 μm	1,98E-09	3,63E-07	11,87	1,51
Mg (1-10)	50 μm x 50 μm	2,25E-10	2,13E-09	54,21	1,14
	50 μm x 100 μm	7,89E-10	7,07E-08	61,02	1,23
	100 μm x 100 μm	7,53E-09	4,04E-08	40,24	1,52
	100 μm x 150 μm	1,44E-07	8,62E-08	45,75	2,10

Fonte: Autor.

Tabela G.4 – Tabela de parâmetros do modelo com luz para CSMOS com porta de alumínio, resistividade entre (1 - 10) $\Omega\cdot\text{cm}$ e espessuras de 1,65 nm; 1,73 nm; 2,10 nm e 2,23 nm.

t_{ox} (nm)	Geometria	A	β	φ_B (eV)	J_{G1} (A)	G_P (S/cm ²)	R_s ($\Omega\cdot\text{cm}^2$)	n	K (V)	α	J_{G2} (A)
1,65	50x50	2,45E-03	4,11	3	6,50E-03	3,51E-04	48,20	2,46	1,05	1,06	0,0
	50x100	9,29E-04	3,41	3	5,25E-03	3,21E-04	48,12	2,49	0,64	1,64	0,0
	100x100	1,59E-03	3,48	3	5,85E-03	2,31E-04	30,25	1,66	0,44	1,71	0,0
	100x150	8,48E-04	1,86	3	5,30E-03	1,88E-04	49,33	2,20	0,37	1,14	0,0
1,73	50x50	1,65E-03	3,64	3	7,70E-03	7,39E-04	37,05	3,02	1,07	1,19	0,0
	50x100	2,13E-03	3,62	3	5,80E-03	1,88E-04	29,78	2,61	0,94	1,03	0,0
	100x100	1,58E-03	3,78	3	5,60E-03	7,00E-04	20,85	1,93	0,35	1,98	0,0
	100x150	2,55E-03	3,73	3	4,80E-03	1,68E-04	29,64	2,22	0,69	1,00	0,0
2,10	50x50	5,30E-03	8,62	3	7,31E-03	6,67E-03	60,05	3,55	1,30	1,64	3,98E-03
	50x100	9,34E-03	10,88	3	6,85E-03	7,50E-03	53,94	3,03	1,29	1,68	4,20E-03
	100x100	2,59E-03	7,01	3	4,52E-03	1,79E-03	40,33	2,68	0,37	3,34	1,54E-03
	100x150	3,47E-03	6,70	3	6,89E-03	1,99E-03	32,62	3,38	0,47	2,98	2,40E-03
2,23	50x50	5,79E-03	6,60	3	8,46E-03	1,00E-04	96,49	4,08	1,85	1,19	6,41E-04
	50x100	3,27E-03	5,12	3	8,15E-03	4,19E-04	101,31	3,76	1,66	1,27	5,00E-04
	100x100	8,33E-03	7,22	3	9,64E-03	1,62E-04	75,14	3,93	1,64	1,33	9,50E-04
	100x150	2,28E-03	4,47	3	7,49E-03	5,15E-04	59,60	4,10	0,94	1,91	7,00E-04

Fonte: Autor.