



PUCRS

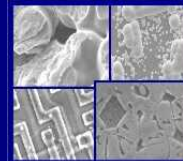
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia

Faculdade de Física

Faculdade de Química



PGETEMA

OTIMIZAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE CÉLULAS SOLARES INDUSTRIAIS EM SUBSTRATOS DE SILÍCIO MULTICRISTALINO

GABRIELA WEHR

BACHAREL EM MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL

**DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM
ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Porto Alegre

Mai, 2008



PUCRS

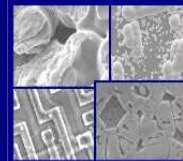
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia

Faculdade de Física

Faculdade de Química



PGETEMA

OTIMIZAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE CÉLULAS SOLARES INDUSTRIAIS EM SUBSTRATOS DE SILÍCIO MULTICRISTALINO

GABRIELA WEHR

Bacharel em Matemática Aplicada e Computacional

ORIENTADORA: Profa. Dra. IZETE ZANESCO

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. ADRIANO MOEHLECKE

Dissertação realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

Trabalho vinculado ao Projeto Desenvolvimento de Células Solares Industriais em Substratos de Silício Multicristalino, financiado pela Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica – CEEE-D.

**Porto Alegre
Maio, 2008**

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Izete Zanesco

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais
Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul**

Prof. Dr. Adriano Moehlecke

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais
Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul**

Prof. Dr. Carlos Alexandre dos Santos

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais
Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul**

Prof. Dr. Bachir Hallouche

**Departamento de Química e Física
Universidade de Santa Cruz do Sul**

No que se refere à ciência, a autoridade de mil pessoas não vale o simples raciocínio de um indivíduo apenas.

(Galileu)

DEDICATÓRIA

Dedico à memória de meu pai, com quem convivi apenas 17 anos, mas que valeram para que me transmitisse conceitos admiráveis: honestidade, perseverança, autoconfiança e respeito ao próximo. A minha irmã que é uma parte importante da minha vida. E finalmente a minha mãe que não poupa esforços para minha felicidade.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe Krishna que foi a grande incentivadora do meu aprendizado.

A minha irmã Ana Lúcia pela amizade e companheirismo e também pelas revisões.

Ao meu namorado Fabrício que sempre com muito amor, compreensão e paciência, esteve ao meu lado em todos os momentos desta trajetória.

Aos colegas de mestrado e ao NT-Solar, agradeço pelas valiosas contribuições, pelos livros emprestados, pelas explicações e pela amizade. Um agradecimento especial à Ana Paula, amiga que sempre esteve disposta a me ajudar. Ao Dario, companheiro de almoço, pelas metalizações. Ao Moussa pelos filmes anti-reflexo. E a equipe de simulações: Rodrigo, Gabriel, Adriano, Thalisson e Elias, valeu!

Agradeço a todos os professores que foram além de simplesmente expor a matéria em suas aulas e foram exemplos de bons professores a serem seguidos. Meus sinceros agradecimentos ao Prof. Adriano, meu co-orientador.

Agradeço aos membros da banca pela presença e por disporem de seu tempo na leitura deste trabalho.

À Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica – CEEE-D pelo incentivo financeiro de meus estudos durante todo o mestrado.

Ao CEMM (Centro de Microscopia e Microanálises) da PUCRS, pelas análises das amostras.

Por último, um agradecimento muito especial à minha orientadora Prof^a. Izete. Muito obrigada pelo voto de confiança, pelas palavras de incentivo e pela maravilhosa orientação.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	5
AGRADECIMENTOS	6
SUMÁRIO	7
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE SÍMBOLOS	14
RESUMO	15
ABSTRACT	17
1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	19
1.1. Justificativas.....	19
1.2. Objetivos	22
2. A CÉLULA SOLAR	23
2.1. Estrutura da Célula Solar.....	23
2.2. Silício Multicristalino	25
2.2.1. Mecanismos de <i>Gettering</i>	28
2.2.2. Texturação	30
2.2.3. Passivação.....	32
2.2.4. Filme Anti-Reflexo.....	33
2.3. Metalização	34
3. OTIMIZAÇÃO POR SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE CÉLULAS SOLARES	38
3.1. Metodologia	38
3.2. Resultados e Análise para a Metalização por Serigrafia.....	45
3.2.1. Largura da Trilha Metálica de 100 μm	45
3.2.1.1. Tempo de Vida dos Portadores Minoritários de 100 μs	45
3.2.1.2. Tempo de Vida dos Portadores Minoritários de 50 μs	54
3.2.1.3. Tempo de Vida dos Portadores Minoritários de 10 μs	57
3.2.1.4. Tempo de Vida dos Portadores Minoritários de 1 μs	60
3.2.2. Largura da Trilha Metálica de 200 μm	63

3.2.3. Comparação de Células Solares com Diferentes Larguras das Trilhas e Valores de Tempo de Vida	70
3.2.3.1. Regiões Dopadas.....	70
3.2.3.2. Malha de Metalização	72
4. DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES	75
4.1. Difusão de Fósforo em Forno Convencional	75
4.1.1. Descrição do Processo e Metodologia	75
4.1.2. Resultados Experimentais e Análise	77
4.2. Fabricação e Caracterização de Células Solares em Substratos Multicristalinos.....	79
4.2.1. Processo para a Estrutura n^+pn^+	79
4.2.2. Otimização do Processo de Metalização por Serigrafia.....	82
4.2.3. Caracterização das Células Solares	85
4.2.3.1. Influência da Temperatura no Processo de Queima da Pasta.....	85
4.2.3.2. Influência da Resistência Série e Paralelo na Eficiência da Célula Solar.....	88
4.2.3.3. Influência da Velocidade da Esteira no Processo de Queima da Pasta.....	90
4.2.3.4. Influência do Filme AR na Eficiência das Células Solares	90
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	93
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Casa solar em Montague Island, parque nacional na costa leste da Austrália [4].	20
Figura 2.1. Estrutura convencional de uma célula solar de silício.	24
Figura 2.2. Representação das diferentes orientações cristalográficas e das fronteiras de grãos no Si-mc. A fronteira entre os grãos causa degradação das propriedades eletrônicas.....	25
Figura 2.3. (a) Si-mc de grãos finos. (b) Si-mc com grãos estendidos ao longo da espessura da lâmina. (c) Difusão de dopantes na fronteira de grão durante o processamento das células.....	27
Figura 2.4. Difusão de fósforo ao longo dos contornos de grão.....	30
Figura 2.5. (a) Superfície do Si-mc após ataque ácido isotrópico e (b) o ataque RIE (<i>Reactive Ion Etching</i>) em uma lâmina de Si-mc.....	32
Figura 2.6. Lâminas de Si-mc cobertas com filmes de Si_3N_4 de diferentes espessuras.....	34
Figura 2.7. Esquema do processo de serigrafia [37].	35
Figura 3.1. Estrutura da célula solar de Si multicristalino otimizada por simulação. .	39
Figura 3.2. Refletância do filme AR de ZnS na superfície frontal da célula simulada.	39
Figura 3.3. (a) Célula solar com dimensões 60 mm x 60 mm, e (b) a quarta parte do mesmo dispositivo.....	40
Figura 3.4. Resistências série de uma célula solar, onde R_1 : resistência correspondente ao contato metal-semicondutor na região de BSF; R_2 : resistência do material semicondutor; R_3 : resistência do emissor; R_4 : resistência do contato metal-semicondutor no emissor; R_5 : resistência das trilhas metálicas e R_6 : resistência da barra coletora.....	42
Figura 3.5. Esquema da metodologia de otimização desenvolvida.....	43
Figura 3.6. Resultado da otimização da área metalizada posterior para $\tau = 100 \mu\text{s}$ e largura das trilhas da malha de metalização de $100 \mu\text{m}$	46
Figura 3.7. Distribuição das resistências série (a) frontal e (b) posterior.....	46

Figura 3.8. Resultado da otimização da largura da barra coletora posterior para $\tau = 100 \mu\text{s}$ e largura das trilhas de $100 \mu\text{m}$	47
Figura 3.9. Distribuição das resistências série na região posterior para largura da barra coletora de $0,5 \text{ cm}$	47
Figura 3.10. (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF e (d) η em função da profundidade da junção e concentração em superfície para a região n^+ e $\tau = 100 \mu\text{s}$	49
Figura 3.11. (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF e (d) η em função da profundidade da junção e concentração em superfície para a região p^+ e $\tau = 100 \mu\text{s}$	51
Figura 3.12. (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF e (d) η em função da profundidade da junção e concentração em superfície para a região n^+ e $\tau = 100 \mu\text{s}$	53
Figura 3.13. (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF e (d) η em função da profundidade da junção e concentração em superfície para a região n^+ e $\tau = 50 \mu\text{s}$	55
Figura 3.14. (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF e (d) η em função da profundidade da junção e concentração em superfície para a região p^+ e $\tau = 50 \mu\text{s}$	56
Figura 3.15. (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF e (d) η em função da profundidade da junção e concentração em superfície para a região n^+ e $\tau = 10 \mu\text{s}$	58
Figura 3.16. (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF e (d) η em função da profundidade da junção e concentração em superfície para a região p^+ e $\tau = 10 \mu\text{s}$	59
Figura 3.17. (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF e (d) η em função da profundidade da junção e concentração em superfície para a região n^+ e $\tau = 1 \mu\text{s}$	61
Figura 3.18. (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF e (d) η em função da profundidade da junção e concentração em superfície para a região p^+ e $\tau = 1 \mu\text{s}$	62
Figura 3.19. (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF e (d) η em função da profundidade da junção e concentração em superfície para a região n^+ e $\tau = 100 \mu\text{s}$	65
Figura 3.20. (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF e (d) η em função da profundidade da junção e concentração em superfície para a região p^+ e $\tau = 100 \mu\text{s}$	66
Figura 3.21. (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF e (d) η em função da profundidade da junção e do tempo de vida para o emissor n^+ , concentração em superfície de $5 \times 10^{19} \text{ átomos/cm}^3$ e $L = 200 \mu\text{m}$	68
Figura 3.22. (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF e (d) η em função da profundidade da junção e do tempo de vida para a região posterior p^+ , concentração em superfície de $1 \times 10^{20} \text{ átomos/cm}^3$ e $L = 200 \mu\text{m}$	69

Figura 3.23. Eficiência em função do tempo de vida dos portadores minoritários para $L = 100 \mu\text{m}$ e $L = 200 \mu\text{m}$.	70
Figura 3.24. Comparação da eficiência das células solares para diferentes larguras das trilhas, $\tau = 100 \mu\text{s}$ e $C_S = 5 \times 10^{19} \text{ átomos/cm}^3$ no emissor. O ponto destacado corresponde à máxima eficiência.	72
Figura 4.1. Lâmina de silício multicristalino com área de 60 mm x 60 mm.	75
Figura 4.2. Distribuição de pontos utilizada para medida da resistência de folha nas faces frontal e posterior das lâminas.	77
Figura 4.3. Resistência de folha em função da temperatura para as rampas de 10 °C/min e tempo de difusão de 30 minutos.	78
Figura 4.4. Etapas do processo de fabricação das células solares.	80
Figura 4.5. (a) Forno de difusão da marca Bruce e (b) detalhe das lâminas saindo do forno.	81
Figura 4.6. Estrutura n^+pn^+ da célula solar desenvolvida neste trabalho.	82
Figura 4.7. (a) Evaporadora Temescal e (b) lâmina de Si-mc com duplo filme AR.	83
Figura 4.8. Máscara posterior, otimizada para a metalização por serigrafia.	83
Figura 4.9. (a) <i>Screen-printer</i> e (b) detalhe de uma lâmina metalizada sobre o porta-amostra.	84
Figura 4.10. (a) Forno RTC de secagem e queima de pastas de serigrafia e (b) detalhe da lâmina saindo do forno.	85
Figura 4.11. (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF e (d) η em função da temperatura de queima das pastas para a velocidade da esteira de 190 cm/min. As barras apresentam o desvio para cada temperatura.	87
Figura 4.12. Imagem obtida em MEV mostrando a largura da trilha metálica.	88
Figura 4.13. Imagem obtida em MEV mostrando a altura da trilha metálica.	88
Figura 4.14. Comparação das características elétricas corrente-tensão (I-V) de três células solares fabricadas.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Parâmetros adotados para a região p^+ para a simulação das células solares com o objetivo de otimizar a região n^+	48
Tabela 3.2. Parâmetros adotados para a região n^+ para a simulação das células solares com o objetivo de otimizar a região p^+	50
Tabela 3.3. Parâmetros adotados para a região p^+ para a simulação das células solares, com o objetivo de re-otimizar o emissor.	52
Tabela 3.4. Resultados da simulação e características elétricas de células solares com trilhas metálicas de 100 μm e tempo de vida dos portadores minoritários de 100 μs	52
Tabela 3.5. Resultados da simulação e características elétricas de células solares com trilhas metálicas de 100 μm e tempo de vida dos portadores minoritários de 50 μs	57
Tabela 3.6. Resultados da simulação e características elétricas de células solares com trilhas metálicas de 100 μm e tempo de vida dos portadores minoritários de 10 μs	60
Tabela 3.7. Parâmetros adotados da malha de metalização da região p^+ para a simulação das células solares com o objetivo de otimizar o emissor n^+ , quando $L = 100 \mu\text{m}$ e $\tau = 1 \mu\text{s}$	60
Tabela 3.8. Resultados da simulação e características elétricas de células solares com trilhas metálicas de 100 μm e tempo de vida dos portadores minoritários de 1 μs	63
Tabela 3.9. Resultados da simulação e características elétricas de células solares com trilhas metálicas de 200 μm e tempo de vida dos portadores minoritários de 100 μs	67
Tabela 3.10. Resultados da simulação e características elétricas de células solares com trilhas metálicas de 200 μm e tempos de vida dos portadores minoritários de 50 μs , 10 μs e 1 μs	67
Tabela 3.11. Resultado da otimização por simulação das regiões dopadas para $\tau = 1 \mu\text{s}$	71
Tabela 3.12. Resultado da otimização por simulação das regiões dopadas para $\tau = 10 \mu\text{s}$	71

Tabela 3.13. Resultado da otimização por simulação das regiões dopadas para $\tau = 50 \mu\text{s}$.	71
Tabela 3.14. Resultado da otimização por simulação das regiões dopadas para $\tau = 100 \mu\text{s}$.	71
Tabela 3.15. Resultados da otimização por simulação da malha metálica das células solares para $\tau = 1 \mu\text{s}$.	72
Tabela 3.16. Resultado da otimização por simulação da malha metálica das células solares para $\tau = 10 \mu\text{s}$.	73
Tabela 3.17. Resultado da otimização por simulação da malha metálica das células solares para $\tau = 50 \mu\text{s}$.	73
Tabela 3.18. Resultado da otimização por simulação da malha metálica das células solares para $\tau = 100 \mu\text{s}$.	73
Tabela 4.1. Resultados das medidas de resistência de folha nas faces frontal e posterior das lâminas de silício multicristalino.	78
Tabela 4.2. Resultado das medidas de tempo de vida dos minoritários antes e após as difusões.	79
Tabela 4.3. Densidade de corrente elétrica de curto-circuito (J_{SC}), tensão de circuito aberto (V_{OC}), fator de forma (FF) e eficiência (η) em função da temperatura de queima das pastas para a velocidade de esteira de 190 cm/min.	86
Tabela 4.4. Densidade de corrente elétrica de curto-circuito (J_{SC}), tensão de circuito aberto (V_{OC}), fator de forma (FF) e eficiência (η) de três células solares fabricadas.	89
Tabela 4.5. Densidade de corrente elétrica de curto-circuito (J_{SC}), tensão de circuito aberto (V_{OC}), fator de forma (FF) e eficiência (η) em função da velocidade de esteira no processo de queima das pastas.	90
Tabela 4.6. Parâmetros elétricos de caracterização das células solares, espessura da camada anti-reflexo (óxido de silício + nitreto de silício + óxido de titânio), refletância média no intervalo de 400 nm a 1050 nm ($\rho_{m\acute{e}dia}$) e comprimento de onda que corresponde ao mínimo da refletância de quatro células solares.	91

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{met}	área metalizada	cm^2
$A_{\text{n-met}}$	área não-metalizada	cm^2
l_B	comprimento da barra coletora	cm
l	comprimento da trilha	cm
λ_{min}	comprimento de onda mínimo	nm
C_S	concentração em superfície	átomos/ cm^3
I_{SC}	corrente de curto-circuito	mA
J_{SC}	densidade de corrente de curto-circuito	mA/m^2
d	distância entre trilhas	cm
η	eficiência	%
FF	fator de forma	
L_B	largura da barra coletora	cm
L	largura das trilhas metálicas	cm
n	número de trilhas	trilhas
x_j	profundidade da junção ou da região de BSF	μm
$\rho_{\text{média}}$	refletância média	%
R_1	resistência de contato metal-semicondutor no BSF	Ω
R_2	resistência do material semicondutor	Ω
R_3	resistência do emissor	Ω
R_4	resistência do contato metal-semicondutor sob as trilhas	Ω
R_5	resistência das trilhas metálicas	Ω
R_6	resistência da barra coletora	Ω
R_{\square}	resistência de folha	Ω/\square
R_P	resistência posterior	Ω
R_t	resistência série total	Ω
τ	tempo de vida dos portadores minoritários	μs
τ_i	tempo de vida inicial dos portadores minoritários	μs
τ_f	tempo de vida final dos portadores minoritários	μs
T	temperatura	$^{\circ}\text{C}$
V_{OC}	tensão de circuito aberto	mV
V_E	velocidade da esteira	cm/min

RESUMO

WEHR, Gabriela. **Otimização e Desenvolvimento de Células Solares Industriais em Substratos de Silício Multicristalino**. Porto Alegre. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais). Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

O crescimento exponencial do mercado de dispositivos fotovoltaicos e a necessidade de substratos de menor custo tornam o silício multicristalino uma importante opção para a fabricação de células solares. Esta dissertação tem como objetivo otimizar e desenvolver as principais etapas de um processo para fabricação de células solares em substrato de silício multicristalino, com a estrutura n^+pn^+ e 36 cm^2 de área. Foram otimizadas, por meio de simulações, as regiões dopadas e as malhas de metalização e, experimentalmente, o emissor e as condições de queima das pastas metálicas no processo de metalização por serigrafia. De acordo com os resultados obtidos da otimização por simulações, é possível obter células solares com 16,2 % de eficiência para altos valores de tempo de vida dos portadores minoritários de $100\ \mu\text{s}$ e com região de campo retrodifusor. As eficiências de 15,8 %, 14,6 % e 12,1 % podem ser obtidas para o tempo de vida dos minoritários de $50\ \mu\text{s}$, $10\ \mu\text{s}$ e $1\ \mu\text{s}$, respectivamente, quando a metalização for por serigrafia com malha metálica com trilhas de $100\ \mu\text{m}$ de largura. Constatou-se que a eficiência é menor, da ordem de 0,3 % a 0,5 %, quando a largura das trilhas da malha de metalização é aumentada de $100\ \mu\text{m}$ para $200\ \mu\text{m}$. Também se verificou que quanto maior a largura das trilhas, maior a profundidade da junção e da região do campo retrodifusor para a mesma concentração em superfície. No processo para a otimização experimental do emissor, obtiveram-se os valores de resistência de folha em função da temperatura da difusão. A temperatura e o tempo com os quais se obtém a resistência de folha de $50\ \Omega/\square$, selecionada para a fabricação de células solares com metalização por serigrafia, é de $820\ ^\circ\text{C}$ e 30 minutos. Da análise das células solares fabricadas constatou-se que a temperatura de queima das pastas afeta o desempenho das células solares, enquanto que a velocidade da esteira praticamente não influencia nos parâmetros elétricos das mesmas. As maiores eficiências foram encontradas para a temperatura de queima entre $860\ ^\circ\text{C}$ e $880\ ^\circ\text{C}$.

Também se verificou que a espessura do filme anti-reflexo influencia o fator de forma e a corrente elétrica das células solares. A maior eficiência alcançada foi de 11,5 %, com fator de forma de 0,74, para a temperatura de queima da pasta de 860 °C, velocidade da esteira de 190 cm/min e dupla camada anti-reflexo de Si_3N_4 e TiO_2 .

Palavras-Chave: células solares, silício multicristalino, serigrafia, simulação matemática.

ABSTRACT

WEHR, Gabriela. **Optimization and Development of Industrial Solar Cells in Multicrystalline Silicon**. Porto Alegre. 2008. Thesis (Master's degree in Engineering and Technology of Materials). Post-Graduation Program in Engineering and Technology of Materials, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

The exponential growth of the photovoltaic devices market and the necessity of material with low cost make the multicrystalline silicon an important option for solar cell industry. The goal of this thesis is to optimize and develop the main processes for manufacturing multicrystalline silicon solar cells, with the structure n^+pn^+ and 36 cm^2 of area. The highly doped regions and the metal grids were optimized by simulations and the emitter and the firing conditions of the metal pastes for screen printing metallization were optimized experimentally. According to the obtained results from the optimization by simulations, it is possible to obtain solar cells with 16,2 % of efficiency for high values of the minority carriers lifetime of $100\ \mu\text{s}$ and with back surface field. The efficiency of 15,8 %, 14,6 % and 12,1 % can be obtained for lower lifetimes of $50\ \mu\text{s}$, $10\ \mu\text{s}$ e $1\ \mu\text{s}$, respectively, with screen printing metallization and metal grid with fingers of $100\ \mu\text{m}$ width. The efficiency was reduced of around 0,3 % to 0,5 %, when the width of the grid fingers are increased from $100\ \mu\text{m}$ to $200\ \mu\text{m}$. It was also verified that as larger are the fingers width, larger is the depth of the junction and the back surface field for the same surface concentration. In the process for the experimental optimization of the emitter, the sheet resistance was obtained according to the diffusion temperature. The temperature and the time to obtain the sheet resistance of $50\ \Omega/\square$, selected for the manufacturing of solar cells with metallization through screen printing, is $820\ ^\circ\text{C}$ and 30 minutes. From the analysis of manufactured solar cells, we verified that the temperature of the pastes firing affects the solar cells performance, while the belt speed almost does not influence on the cell electrical parameters. Higher efficiencies were found for the temperature of the firing between $860\ ^\circ\text{C}$ and $880\ ^\circ\text{C}$. We also observed that the thickness of the antireflecting coating influences the fill factor and the current of the solar cells. The highest efficiency achieved was 11,5 %, with fill factor of 0,74, for the firing temperature of $860\ ^\circ\text{C}$, belt speed of $190\ \text{cm}/\text{min}$ and

double antireflecting layer of Si_3N_4 e TiO_2 .

Key words: solar cells, multicrystalline silicon, screen printing, mathematical simulation.

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1. Justificativas

A energia é a essência de toda atividade humana, no sentido mais amplo da palavra: move nossos corpos, cozinha nossos alimentos, aquece e ilumina nossas casas, move nossos veículos, etc [1]. É um elemento fundamental para garantir nosso desenvolvimento. Porém, para assegurar a sustentabilidade das fontes de energia, deve-se buscar opções de energias renováveis, que sejam também economicamente viáveis e socialmente justas.

Aproximadamente 80 % da energia consumida pelo homem provém dos combustíveis fósseis, sendo que tais recursos são limitados e, ao mesmo tempo, a contaminação ambiental produzida por estes combustíveis convencionais põe em perigo o equilíbrio do ecossistema.

Além disso, a distribuição do consumo de energia é desigual. A quarta parte da população mundial consome três quartos da energia primária mundial, enquanto que alguns países africanos possuem consumo abaixo dos limites de sobrevivência. Desigualdades também são notáveis nas reservas de combustíveis fósseis. Por exemplo, a metade de todas as reservas de petróleo conhecidas localizam-se no Oriente Médio. Estas desigualdades são as causas de uma crescente instabilidade no sistema geopolítico [1].

Uma alternativa para resolver estes problemas é a diversificação das fontes de energia. Os dispositivos fotovoltaicos são os únicos que convertem a radiação solar incidente em energia elétrica, sem ruído, poluição e com baixo impacto ambiental, sendo ao mesmo tempo robustos, confiáveis e de longa duração. A Figura 1.1 ilustra uma instalação fotovoltaica, na casa solar em Montague Island,

Austrália. O principal componente do sistema fotovoltaico é o módulo fotovoltaico, o qual está constituído de células solares, geralmente associadas em série.

Em nível mundial, esta tecnologia de conversão de energia está avançada e em pleno crescimento, principalmente nos países desenvolvidos. Para exemplificar, o mercado de módulos fotovoltaicos está crescendo a taxas de 40 % a 70 % ao ano, com uma produção da ordem de 4279 MW em 2007 [2]. Estima-se que, para 2025, o número de empregos criados por esta indústria seja similar ao da indústria automobilística atual [3].



Figura 1.1. Casa solar em Montague Island, parque nacional na costa leste da Austrália [4].

Porém, o problema que limita a expansão da energia solar fotovoltaica é econômico, pois necessita de todo um investimento inicial. No entanto, dispensa o pagamento de qualquer taxa após sua instalação. Conseqüentemente, uma das linhas de pesquisa seguida é o desenvolvimento de células solares de alta eficiência e/ou baixo custo. Até hoje, nenhum material ou tecnologia foi capaz de atingir completamente este objetivo, pois as células de alta eficiência são demasiado caras e as de baixo custo não alcançam eficiência satisfatória [5].

A maior eficiência alcançada em células de silício monocristalino, crescido pela técnica da fusão zonal flutuante (*float-zone*, Si-FZ), de 4 cm² de área, é de 24,7 %. Este dispositivo foi desenvolvido na Universidade de New South Wales, Austrália. Em substratos de silício Czochralski (Si-CZ) e células de mesma área, a máxima eficiência é de 22 %. A eficiência alcançada em células processadas em substratos de silício multicristalino (Si-mc) é de 20,3 %, para uma área de 1 cm². O processo para a obtenção desses dispositivos é elaborado e caro. Em conseqüência, foram fabricados em laboratórios de centros de pesquisa com destaque internacional. No entanto, a eficiência alcançada em células de grande área é inferior. Em substratos de Si-FZ a máxima eficiência de 21,5 % para uma área de 149 cm² foi obtida pela empresa Sunpower. Em lâminas de Si-CZ, de área similar, a máxima eficiência alcançada pela empresa BP Solar é de 18,3 %. O trabalho em conjunto da Universidade de Konstanz, BP Solar e Photowatt, resultou em uma célula solar processada em substrato de silício multicristalino com eficiência de 17,6 %, para uma área de 144 cm². Em janeiro de 2007, foi confirmada pelo Instituto Fraunhofer da Alemanha a eficiência de 18,1 % para uma célula fabricada em silício multicristalino de 137,7 cm² de área, com contatos enterrados, fabricada pela Universidade de Konstanz [6], [7]. O mais novo recorde foi obtido pela Kyocera, alcançando 18,5 % de eficiência para uma célula solar de Si-mc de 225 cm². O aumento na eficiência foi atingido através da otimização da malha metálica e texturação da superfície da célula, utilizando o processo *d.Blue*, patente da companhia, o qual aumenta a coleta dos fótons, reduzindo a refletância [8].

O crescimento exponencial do mercado fotovoltaico e a necessidade de um material de custo inferior ao monocristalino tornam o silício multicristalino uma importante alternativa. Seu processo de fabricação de menor custo produz um material de qualidade cristalográfica inferior, quando comparado ao processo Czochralski. Como resultado, a eficiência da conversão de energia das células solares fabricadas em tais substratos é mais baixa que aquela obtida com substratos de Si-Cz.

Durante os últimos anos, a procura por Si-mc no mercado de células solares aumentou devido ao crescimento contínuo da eficiência dessas células. Este aumento é conseqüência de uma progressiva melhora na qualidade do material,

mediante o emprego de técnicas de formação do lingote e evolução dos processos de fabricação. Esse material oferece, no momento, o melhor compromisso entre custo e eficiência [9], [10].

1.2. Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo otimizar e desenvolver as principais etapas de um processo para fabricação de células solares em substrato de silício multicristalino, com a estrutura n^+pn^+ e 36 cm^2 de área. Foram otimizadas, por meio de simulações, as regiões dopadas e as malhas de metalização e, experimentalmente, o emissor e as condições de queima das pastas metálicas no processo de metalização.

Os objetivos específicos deste trabalho resumem-se em:

- otimizar, por simulação, o emissor frontal n^+ e a região p^+ de campo retrodifusor (BSF, *back surface field*), considerando o tipo de substrato, a metalização por serigrafia e o tempo de vida dos portadores minoritários;
- otimizar, por simulação, as malhas metálicas produzidas por serigrafia;
- analisar a influência da largura das trilhas e dos valores de tempo de vida dos portadores minoritários nas características elétricas das células solares otimizadas;
- otimizar experimentalmente o emissor;
- otimizar experimentalmente as condições de queima das pastas do processo de metalização por serigrafia;
- avaliar a influência da temperatura no processo de queima das pastas de metalização e do filme anti-reflexo na eficiência das células solares.

2. A CÉLULA SOLAR

2.1. Estrutura da Célula Solar

A conversão da radiação solar em energia elétrica é um fenômeno físico conhecido como efeito fotovoltaico. Quando a radiação solar incide sobre certos materiais semicondutores, os fótons que a constituem são capazes de transmitir sua energia aos elétrons de valência do semicondutor para que rompam a ligação que os mantém unidos aos respectivos átomos. Cada ligação rompida fornece um elétron livre para circular dentro do sólido. A falta de um elétron, conhecida como lacuna, também pode deslocar-se livremente pelo interior do sólido, transferindo-se de um átomo a outro devido ao deslocamento do restante dos elétrons. Em muitos aspectos, as lacunas se comportam como partículas de carga positiva igual a do elétron.

O movimento dos elétrons e lacunas em direções opostas gera uma corrente elétrica no semicondutor capaz de circular pelo circuito externo. Para separar os elétrons das lacunas e impedir que se recombinem, é formado um campo elétrico interno no semicondutor que faz com que ambos circulem em direções opostas, dando lugar a uma diferença de potencial e corrente elétrica [1].

Nas células solares convencionais, obtém-se esse campo elétrico com a formação de duas regiões em um cristal semicondutor com condutividades diferentes. Sendo o silício o material semicondutor, uma das regiões chamada tipo-n, é dopada com fósforo, que tem cinco elétrons de valência, um a mais que o silício. É uma região com uma concentração de elétrons muito maior que a de lacunas. A outra região, denominada tipo-p, é dopada com boro, que tem três elétrons de valência, um a menos que o silício. Essa é uma região com uma concentração de lacunas maior que a de elétrons. A grande diferença de

concentração de elétrons e lacunas entre ambas as regiões cria um campo elétrico dirigido da região n para a região p, que também é responsável por separar os pares de elétrons e lacunas que se produzem quando a célula é iluminada [1].

Praticamente todas as células solares disponíveis atualmente são constituídas por uma junção p-n, como ilustra a Figura 2.1. Nas células de silício cristalino, a junção é formada difundindo uma camada de fósforo na lâmina que originalmente está dopada com boro. Esta camada de fósforo é denominada de emissor [1].

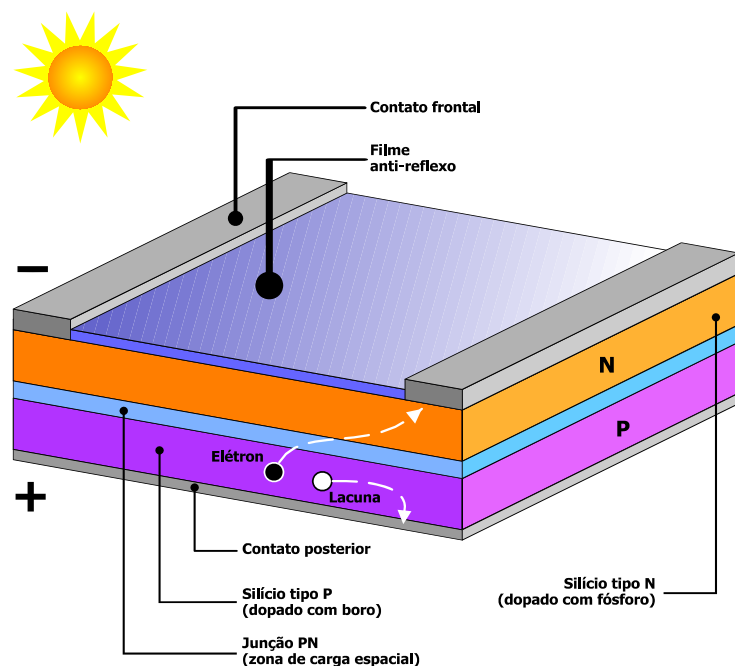


Figura 2.1. Estrutura convencional de uma célula solar de silício.

Outro parâmetro importante na estrutura da célula solar é a malha metálica frontal. Sabe-se que os contatos metálicos são formados para extrair a corrente elétrica de uma célula, porém não podem cobrir completamente a superfície da mesma. A porcentagem de superfície coberta denomina-se de fator de recobrimento ou de sombra. Este deve ser suficientemente baixo para permitir a passagem da radiação solar e suficientemente alto, para que a resistência série da célula se mantenha num nível tolerável [5].

Normalmente, a face iluminada é revestida com um material anti-reflexo (AR) para aumentar a porcentagem de energia absorvida.

2.2. Silício Multicristalino

O termo “multicristalino” é usado para distinguir tal material de grão largo (ordem de 1 cm) do material “policristalino”, de grão fino (ordem de 1 mm) [10].

A principal característica do material multicristalino é a não-homogeneidade. Sua qualidade sofre com a presença de contornos de grãos e defeitos pontuais – vacâncias, auto-intersticiais, impurezas metálicas, oxigênio, carbono, e seus complexos. A natureza, a densidade e a recombinação dos portadores minoritários em uma lâmina variam em curtas distâncias, por causa dos grãos de diferentes tamanhos e orientações cristalográficas, como ilustra a Figura 2.2. Estes se originam durante o processo de fabricação, tornando-as, conseqüentemente, mais sensíveis no que se refere a processamentos térmicos [11], [12].

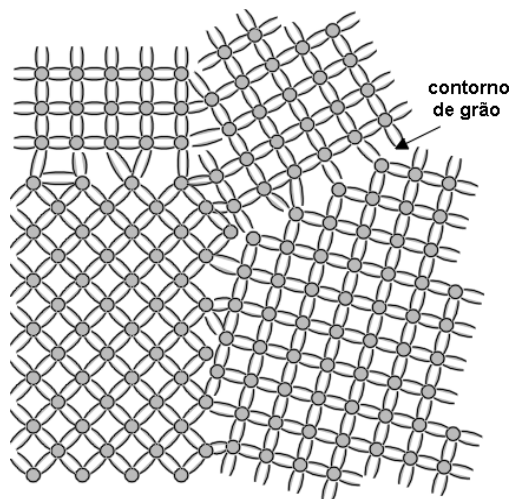


Figura 2.2. Representação das diferentes orientações cristalográficas e das fronteiras de grãos no Si-mc. A fronteira entre os grãos causa degradação das propriedades eletrônicas.

Em geral, as lâminas de Si-mc possuem resistividade de base em torno de 0,5 Ω .cm a 2 Ω .cm e são, na maioria dos casos, dopadas com boro. O gálio também pode ser usado no crescimento do silício tipo-p [6].

O tempo de vida dos portadores minoritários (τ) do material é o tempo médio que os portadores podem levar para se recombinarem após o processo de geração do par elétron-lacuna. O comprimento de difusão dos portadores minoritários é a distância média que um portador pode se mover desde sua geração até sua

recombinação. Quanto maior este caminho, maior a probabilidade dos portadores minoritários serem coletados, aumentando a corrente de curto-circuito (I_{SC}) e a tensão de circuito aberto (V_{OC}) das células solares [13]. A distribuição não homogênea do tempo de vida dos portadores minoritários ou do comprimento de difusão do material, conduz a perdas na V_{OC} .

Processamentos em altas temperaturas, como oxidações térmicas a 1000 °C, são geralmente aplicados na produção de células solares de silício monocristalino de alta eficiência. A aplicação de tais processos em Si-mc leva a uma degradação no tempo de vida dos portadores minoritários [14]. Portanto, para melhorar os resultados das células multicristalinas dependemos da redução de processos térmicos e implementação de passos de *gettering* [9].

Além disso, passos térmicos induzem a precipitação de oxigênio no volume, produzindo *gettering* intrínseco, que é prejudicial para o desempenho da célula solar [15], [11]. Entretanto, uma pequena quantidade de oxigênio pode ser benéfica para alguns materiais multicristalinos devido à passivação dos defeitos [16].

Outra classe de defeitos presentes no Si-mc são as discordâncias. Estas são geradas durante o processo de cristalização. Elas são responsáveis pelo crescimento da recombinação dos portadores minoritários no volume do dispositivo. Além disso, a presença de discordâncias na região da junção p-n pode influenciar nas propriedades elétricas do dispositivo, geralmente conduzindo a um decréscimo da V_{OC} e do fator de forma (FF). O impacto da densidade de discordâncias no tempo de vida dos portadores minoritários, parâmetro crucial na eficiência das células solares, é estudado com medidas locais do tempo de vida e densidade de discordâncias. Estas medidas são feitas antes e depois da difusão de fósforo, que remove parcialmente impurezas do material, tornando possível o conhecimento do impacto das mesmas na eficiência da célula solar [6], [9], [17], [18].

Os contornos de grão, também conhecidos como fronteiras de grão, são regiões inevitáveis nas células multicristalinas e estão ilustrados na Figura 2.3. Uma barreira eletrostática tende a desenvolver-se em ambos os lados dos contornos de grão, similar àquela desenvolvida na heterojunção metal-semicondutor. Esta barreira

bloqueia o fluxo dos portadores majoritários, atuando como uma grande resistência série [19].

Na Figura 2.3 (b) os grãos se estendem da face frontal até a posterior da célula, o que é mais desejável que o caso da Figura 2.3 (a), pois há menos resistência para o fluxo dos portadores [19].

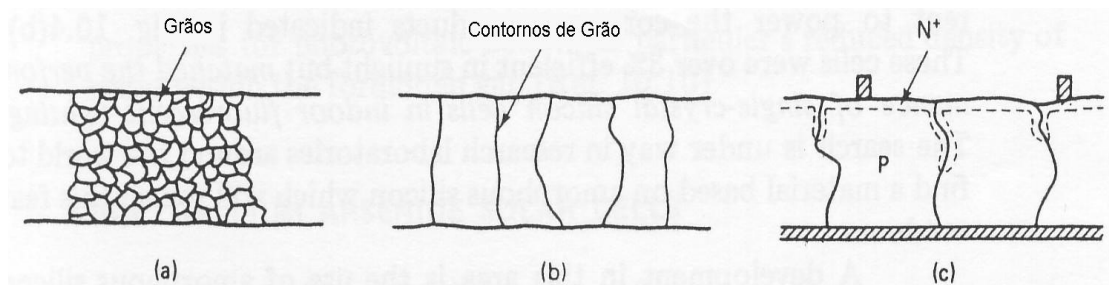


Figura 2.3. (a) Si-mc de grãos finos. (b) Si-mc com grãos estendidos ao longo da espessura da lâmina. (c) Difusão de dopantes na fronteira de grão durante o processamento das células.

Os contornos de grão, considerados defeitos na estrutura cristalina, introduzem níveis permitidos na banda proibida do material semiconductor e atuam como centros efetivos de recombinação. Eles podem ser considerados “sumidouros” para os portadores minoritários. Os portadores que se recombinam não contribuem com a corrente elétrica e tensão da célula. Para evitar perdas significativas, as dimensões laterais dos grãos do material multicristalino precisam ser grandes, comparadas ao comprimento de difusão dos portadores minoritários. Outro inconveniente atribuído aos contornos de grão, refere-se às perdas de corrente através da junção p-n na fronteira do grão. Estes desvios podem desenvolver-se a partir da difusão de dopantes nos contornos de grão durante a etapa de formação da junção, como indicado na Figura 2.3 (c) [19].

Além disso, o comprimento total de contorno de grão por unidade de área da célula decresce com o aumento do tamanho do grão, diminuindo os efeitos de resistência em paralelo oriundos das fronteiras de grão [19].

Para haver desempenho efetivo dos conversores fotovoltaicos fabricados em substratos de Si-mc, o tempo de vida dos portadores minoritários deve ser elevado em toda a espessura da lâmina. O comprimento de difusão no volume precisa ter a

mesma ordem de magnitude da espessura da lâmina de Si para garantir a coleção efetiva dos portadores minoritários. Existem, principalmente, dois caminhos para que isso seja alcançado: (i) *gettering* para remover as impurezas indesejadas (Fe, Cu, etc.) e (ii) passivação de defeitos, por exemplo, por hidrogênio atômico, a fim de neutralizar seu efeito de recombinação e captura de impurezas.

2.2.1. Mecanismos de *Gettering*

As impurezas metálicas dominantes encontradas no silício são: ferro, níquel cobalto, molibdênio, cromo e cobre [20]. Contornos de grão e regiões com defeitos possuem maior concentração dessas impurezas metálicas do que o volume do grão. A densidade de fronteiras de grão e de impurezas metálicas afetam o tempo de vida dos portadores minoritários e as características elétricas das células solares [21], [22], [23]. Durante os tratamentos térmicos é necessário evitar a precipitação de oxigênio no Si-mc. Além disso, os defeitos devem ser parcialmente neutralizados já que sua presença é intrínseca nesse material. As impurezas como oxigênio e metais devem estar presentes em baixas concentrações, ou devem ser extraídas e neutralizadas por meio de mecanismos de *gettering*, ou serem passivadas, por exemplo, com hidrogênio [11].

Os processos de *gettering* são etapas essenciais na fabricação de células solares de silício multicristalino para remover impurezas contaminantes da zona ativa do dispositivo, transportando-as para regiões pré-determinadas onde ficam inativas ou não afetam o funcionamento do mesmo. A eficiência deste processo depende da origem do material e da posição da lâmina no lingote. No caso do Si-mc, a eficiência da célula solar decresce com a concentração de impurezas e defeitos no substrato. O tempo de vida dos portadores minoritários é um parâmetro usado para avaliar os mecanismos de *gettering* [13].

Os processos de *gettering* podem ser classificados em três grandes grupos:

- *gettering* intrínseco: neste, as impurezas são fixadas em defeitos já existentes na lâmina. Estes defeitos são gerados a partir de impurezas existentes nos materiais. Este processo ocorre, por exemplo, em lâminas ricas em oxigênio.

Com esse tipo de *gettering* obtêm-se lâminas com superfície de alta qualidade, porém, o mesmo não se pode dizer do volume. Conseqüentemente, esse é pouco utilizado em aplicações fotovoltaicas [24];

- *gettering* extrínseco: utiliza-se um meio externo para facilitar a captura e neutralização das impurezas. Por exemplo, ao difundir átomos de fósforo ou alumínio nas faces de uma lâmina, obtêm-se camadas muito eficientes na captura e neutralização de impurezas indesejadas. Cria-se uma camada superficial que concentra parte das impurezas, as quais podem ser eliminadas posteriormente através de ataque químico, tendo como resultado uma lâmina com volume de alta qualidade [24];

- *gettering* químico: engloba os mecanismos preventivos que se baseiam na eliminação das impurezas superficiais mediante reações químicas antes que as mesmas se difundam para o interior da lâmina [24].

Vários fatores influenciam nos processos de *gettering*: as condições de temperatura, tempo, resfriamento e limpeza dos fornos, o nível de contaminação prévio dos materiais, a interação com outras impurezas como oxigênio e carbono, ou defeitos da rede como discordâncias ou contornos de grãos, entre outros [13].

Entre os processos de *gettering* mais usados na indústria para a fabricação de dispositivos fotovoltaicos destacam-se os mecanismos de *gettering* por fósforo [13].

Sabe-se que a difusão de fósforo em condições de supersaturação produz *gettering*. Quando se difunde fósforo acima do valor de solubilidade sólida no silício, forma-se uma camada muito dopada, melhorando o tempo de vida dos portadores minoritários nessa lâmina. A solubilidade sólida é definida como sendo a quantidade máxima de impureza solúvel no silício para formação de uma fase cristalina homogênea.

Experimentos demonstram que durante a difusão de fósforo, uma larga fração de metais recombinantemente ativos é extraída do volume da lâmina e fica na região altamente dopada n^+ da superfície. O *gettering* por fósforo aumenta o tempo de vida

dos portadores em locais com baixa densidade de defeitos ($<10^5 \text{ cm}^{-2}$), mas ainda permanecem regiões com baixo tempo de vida onde o efeito do *gettering* não pode ser observado. Tais regiões, que incluem a maioria dos contornos de grão, têm alta densidade cristalográfica de defeitos ($>10^6 \text{ cm}^{-2}$) e alta concentração de impurezas metálicas na forma de precipitados [20].

O contorno de grão é uma região de alta recombinação de portadores minoritários, como ilustra a Figura 2.4. O *gettering* por difusão de fósforo, converte essas áreas, que seriam de certa forma sumidouros de portadores minoritários, em regiões ativas [25].

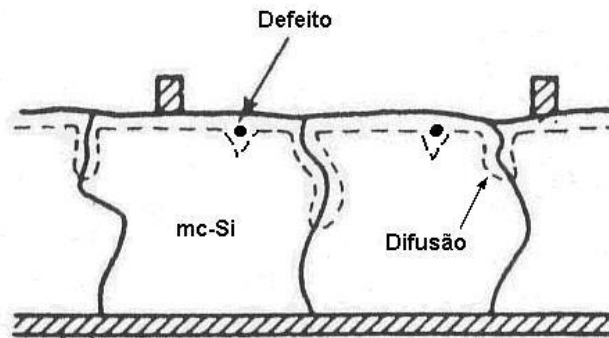


Figura 2.4. Difusão de fósforo ao longo dos contornos de grão.

Em um trabalho publicado por Schultz et al. [17] e [26], cinco tipos de materiais de silício multicristalino de diferentes fornecedores (Eurosolare *boron-doped*, Kawasaki Steel *boron-doped*, Dai-ichi Kiden *boron-doped*, Scan Wafer *boron-doped*, Dai-ichi Kiden *gallium-doped*) foram submetidos ao *gettering* por fósforo. Para células de 1 cm^2 foram alcançadas eficiências em torno de 20 % e para células de 4 cm^2 , eficiências de aproximadamente 19 %. Isso prova que células solares em Si-mc de diferentes especificações podem alcançar altas eficiências se for aplicado um processo apropriado.

2.2.2. Texturação

No substrato multicristalino, cada grão pode ser comparado com uma pequena junção p-n, com sua própria densidade de corrente de curto-circuito (J_{SC}), V_{OC} e FF. O texturizado depende da orientação do grão, tornando o passo químico

padrão de texturação para o silício cristalino (ataque anisotrópico) inadequado para o Si-mc [9].

Texturar a superfície frontal de uma célula solar resulta, geralmente, em uma melhora no desempenho devido ao aumento da I_{SC} . Este aumento está relacionado à redução da refletância dos fótons incidentes [27].

As células solares de silício monocristalino são geralmente texturadas com pirâmides randômicas produzidas por um ataque em uma solução alcalina de KOH ou NaOH. Isso se torna possível pela natureza anisotrópica da solução de ataque, em conjunto com a escolha apropriada da orientação do plano cristalino da superfície da lâmina. A natureza randômica da orientação cristalina das lâminas de Si-mc faz dessa técnica menos efetiva, porque somente uma porção dos grãos está apropriadamente orientada. Além do mais, soluções alcalinas podem causar fissuras entre os grãos [27].

As duas principais técnicas para texturar a superfície do silício multicristalino são: o ataque isotrópico por solução ácida e o RIE (*Reactive Ion Etching*). Na Figura 2.5 (a) e na Figura 2.5 (b) mostra-se uma superfície de Si-mc após ataque isotrópico e ataque RIE, respectivamente. O texturado por ataque isotrópico com solução de $HF+HNO_3+H_2O$ é um processo fácil e confiável para se texturar células de Si-mc. Esse ataque inclui a formação de meso e macroporos no Si-mc que ajudam a minimizar o delineamento dos contornos de grão e também diminuem a refletância da superfície atacada [28], [29].

O RIE é um método “seco” de atacar o silício sem o uso de grandes quantidades de soluções líquidas. Nesse, coloca-se a lâmina em um plasma de íons reativos. Sob determinadas condições, o ataque produz cavidades na superfície que possuem excelentes propriedades anti-reflexo [27].

Foi divulgado pela *Kyocera Corporation* [30] o desenvolvimento de células solares utilizando o texturado por RIE que pode texturar várias lâminas por vez, tornando esta técnica atrativa para a produção em massa. Aplicando esse texturado em células de silício multicristalino, foi alcançada a eficiência de 17,1 % para células

de 150 mm x 150 mm.

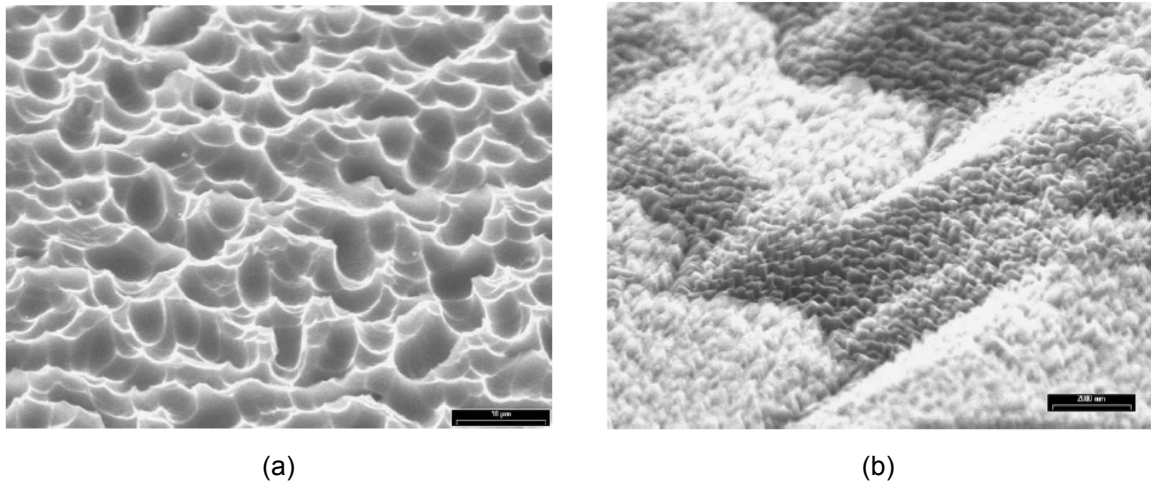


Figura 2.5. (a) Superfície do Si-mc após ataque ácido isotrópico e (b) o ataque RIE (*Reactive Ion Etching*) em uma lâmina de Si-mc.

Conforme Gangopadhyay et al. [28], é possível alcançar 14,12 % de eficiência em células solares de Si-mc de 125 mm x 125 mm utilizando o texturizado isotrópico em solução ácida. Essa eficiência é resultado de um aumento na I_{SC} .

A Universidade de New South Wales alcançou 19,8 % de eficiência em células solares de Si-mc de 1 cm² de área através do texturizado *honeycomb*. Este texturizado resulta em uma superfície com cavidades hexagonais simétricas, reduzindo a refletância e aumentando o aprisionamento de luz no interior da célula, atingindo uma J_{SC} de 38,1 mA/cm². Ele pode ser utilizado tanto para células monocristalinas quanto para multicristalinas [31], [32].

2.2.3. Passivação

O aumento na eficiência de conversão das células solares depende, entre outros fatores, da V_{OC} . Para maximizar este valor, é importante reduzir a velocidade de recombinação na superfície da célula, abaixo dos contatos e no volume. A passivação da superfície reduz efetivamente a velocidade de recombinação [33]. Pode ser realizada em fornos com tubos de quartzo como nos processos de difusão. As camadas superficiais de SiO₂ passivam a superfície reduzindo os estados superficiais que atuam como centros de recombinação. Também podem servir como

barreiras de difusão em locais definidos, fornecendo proteção química e mecânica à superfície para os processos posteriores. A oxidação também produz camadas com propriedades anti-reflexo, porém para células encapsuladas, materiais com alto índice de refração são utilizados para formar o filme AR [34].

O hidrogênio atômico também passiva defeitos na superfície e no volume, podendo reduzir a concentração de impurezas metálicas, tais como o Fe intersticial. Foi provado que a hidrogenação do Si-mc a partir de uma camada de $\text{SiN}_x\text{:H}$ tem impacto significativo na passivação de defeitos no interior dos grãos, enquanto que nos contornos de grão e discordâncias, a recombinação é somente atenuada [20].

Panek et al. [33] demonstrou o efeito da passivação de defeitos em células de Si-mc de 100 mm x 100 mm por meio do desenvolvimento de dois processos: no primeiro não se realizou passivação, atingindo 9,91 % de eficiência, e no segundo processo as células solares foram passivadas com SiO_2 , alcançando a eficiência de 12,47 %.

2.2.4. Filme Anti-Reflexo

A superfície do silício reflete de 35 % a 50 % da luz incidente. Reduzir a refletância da superfície de uma célula solar de Si-mc é difícil devido à orientação cristalográfica randômica. Uma melhora pode ser conseguida com a formação de um revestimento anti-reflexo a fim de reduzir a refletância da célula abaixo de 10 %. Na indústria, dois tipos de filmes AR são extensamente aplicados: óxido de titânio (TiO_x) e nitreto de silício (Si_xN_y) [33].

A deposição de filmes de $\text{SiN}_x\text{:H}$ por PECVD (*Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*) tem se tornado um passo padrão na fabricação de células solares industriais, principalmente para substratos de Si multicristalino [35]. Esse filme apresenta três benefícios para células solares de Si: serve como revestimento AR, passiva a superfície, reduzindo a velocidade de recombinação, e, possivelmente, passiva os defeitos no volume através do hidrogênio. A Figura 2.6 mostra quatro lâminas de Si multicristalino revestidas com filme de nitreto de silício. A diferença na coloração é devido à espessura do filme [36].



Figura 2.6. Lâminas de Si-mc cobertas com filmes de Si₃N₄ de diferentes espessuras.

Panek et al. [33] mostrou que células solares de Si-mc com área de 100 mm x 100 mm atingem eficiência média de 12 % quando são revestidas com filme AR de TiO_x e 13 % com o filme AR de Si_xN_y.

2.3. Metalização

Um passo importante na fabricação de células solares é a metalização, que pode limitar a eficiência e determinar o custo do processamento das mesmas.

A tecnologia de deposição da malha metálica nas células solares deve ser compatível com a concentração de portadores de carga no emissor e com a profundidade da junção p-n. Para formar a malha metálica podem ser utilizadas as técnicas de fotolitografia combinada com a evaporação de metais em vácuo, a deposição química sem eletrodos (*electroless*) e também a serigrafia. As técnicas de fotolitografia e *electroless* necessitam muito tempo e são caras quando comparadas à serigrafia, que é uma técnica relativamente simples. No entanto, esta última produz células de menor eficiência. A largura das trilhas varia de 3 μm a 25 μm, quando se utiliza fotolitografia e de 50 μm a 200 μm no caso da serigrafia. Para se obter alta qualidade em células solares utiliza-se a evaporação de Ti/Pd/Ag na face n⁺ e Al/Ti/Pd/Ag na face p⁺ [13], [37], [38], [39], [40].

A metalização por serigrafia caracteriza-se pela deposição de uma pasta que contém um material condutor (normalmente Ag e Al) sobre o substrato e, então, é secada e queimada sob ambiente controlado para produzir os contatos elétricos.

O equipamento de serigrafia é robusto e simples, sendo que a técnica pode ser facilmente automatizada. Produz pouco desperdício de material e pouco impacto ambiental e, por ser modular, facilita a produção [37].

Neste processo de metalização, um rodo distribui a pasta metálica sobre a tela, com a malha de metalização previamente definida. Os passos do processo estão esquematizados na Figura 2.7. Os fatores que afetam a qualidade da malha de metalização por serigrafia são: a viscosidade da pasta, a área de serigrafia, a tensão na tela, a velocidade do rodo e a distância entre a lâmina e a tela [37].

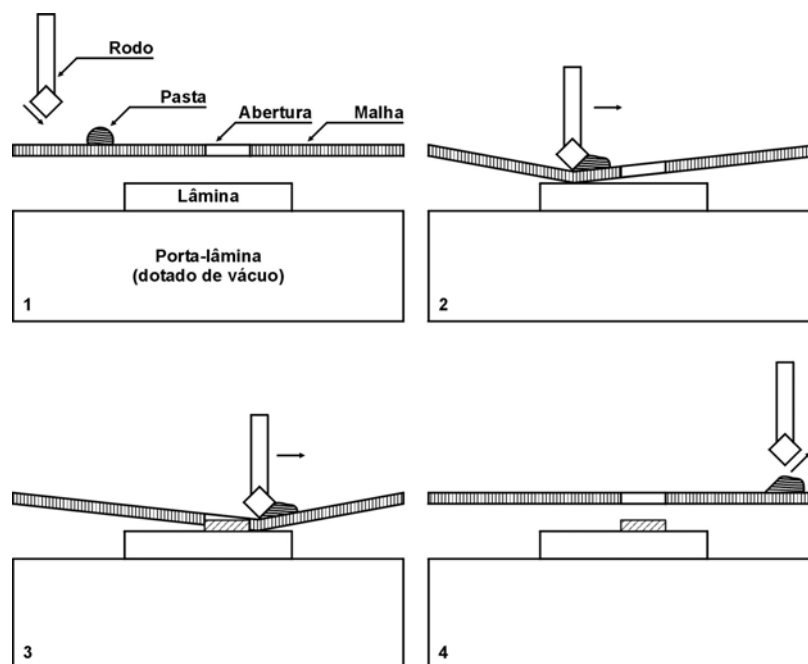


Figura 2.7. Esquema do processo de serigrafia [37].

O contato metálico em uma célula solar deve obedecer a certas exigências, tais como: ter baixa resistência de contato com o silício, boa resolução da trilha, boa soldabilidade e baixo custo. Uma das desvantagens da serigrafia é o custo da pasta metálica [37].

Seguindo o processo de serigrafia, a pasta metálica é secada e queimada quando, então, interage com o silício. Para realizar esse processo pode-se utilizar um forno de esteira, que oferece como vantagem temperaturas elevadas e tempo curto. Não é conveniente submeter nem a pasta nem a lâmina duas vezes ao processo de queima. Por isto, aplicam-se as pastas sobre as superfícies frontal e posterior, passando por dois passos de secagem, mas somente por uma queima final [37].

A serigrafia é considerada a técnica mais econômica para a produção em grande escala de células solares. Os contatos de prata serigrafados penetram em torno de 0,3 μm na lâmina de silício. Conseqüentemente, uma junção de aproximadamente 0,6 μm de profundidade é realizada para impedir que a prata alcance esta região. Ao mesmo tempo, é necessária uma concentração superficial de fósforo de 10^{20} átomos/ cm^3 a 10^{21} átomos/ cm^3 a fim de obter uma baixa resistência de contato e um elevado fator de forma [41].

Em todo o processo serigráfico existem dois aspectos básicos a serem considerados: a composição da pasta e as condições de queima. A composição da pasta é fundamental porque determina a viscosidade (que influi na definição), a resistividade do composto metálico final e, juntamente com outros fatores característicos da dopagem, a resistência de contato. Esta resistência é bastante variável em função da pasta e do processo de queima. Durante a queima a altas temperaturas, os componentes da pasta, na fase líquida, atacam a superfície da lâmina. O óxido, a camada anti-reflexo ou outras películas presentes na superfície podem dissolver-se em alguns componentes da pasta, o que permite realizar contato através dos mesmos. Se a queima for mais agressiva, a pasta pode perfurar a junção, originando correntes de fuga [42]. Sob resfriamento, o excesso de Si contido na pasta cristaliza epitaxialmente, e parte das partículas de Ag dissolvidas na pasta, que estão incrustadas na superfície do Si, formam o contato direto com o emissor [40].

A resistência de folha típica de células solares produzidas industrialmente está entre 30 Ω/\square a 45 Ω/\square . Altas resistências de folha resultam em FF abaixo de 70 %, principalmente devido à alta resistência de contato [41].

Conforme Upadhyaya et al. [43] pode-se alcançar a eficiência de 16,8 % para células solares em Si multicristalino de 4 cm² e 280 μm de espessura, utilizando uma simples camada de filme anti-reflexo de nitreto de silício e contatos formados por serigrafia.

Duerinckx et al. [44] mostrou que é possível atingir eficiência média de 16 % em células solares de Si-mc muito finas (200 μm) com área de 100 cm² utilizando o processo de serigrafia [38].

Kränzl et al. [45] atingiu eficiência média de 15 % em células solares de Si multicristalino com 225 cm², produzidas com contatos serigrafados e BSF de alumínio.

3. OTIMIZAÇÃO POR SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE CÉLULAS SOLARES

3.1. Metodologia

O objetivo desta etapa foi otimizar as regiões dopadas e as malhas de metalização das células solares por meio de simulações com o *software* PC-1D e um programa computacional desenvolvido em *Visual Basic* para otimizar a malha metálica, denominado Monocel [37]. O PC-1D é um programa computacional que simula células solares, resolvendo por métodos numéricos as equações unidimensionais do dispositivo. É um programa bastante flexível, permitindo a modificação de características do material semiconductor. Assim, podem-se introduzir parâmetros característicos de determinada célula solar, tais como recombinação (em superfície ou volume), perfis de dopantes, valores de tempo de vida dos portadores minoritários, refletância (medida ou calculada internamente), etc. Um aspecto importante desse programa computacional é a possibilidade da divisão do dispositivo em três regiões distintas. Com isto, podem-se ajustar os parâmetros das diferentes regiões de uma célula de silício: emissor, base e região de BSF, separadamente. Perdas por recombinação ou por defeitos intrinsecamente não unidimensionais contabilizam-se por diodos ou resistências em paralelo ao dispositivo. Por exemplo, podem ser introduzidos os efeitos de recombinação na região sob a malha metálica, calculando-se a corrente de saturação correspondente a este diodo [23].

O programa Monocel, que calcula a perda de potência da malha metálica [46], também tem a função de organizar de forma seqüencial e prática todo o processo de otimização por simulação da malha metálica de uma célula solar, desde o início até a obtenção dos parâmetros finais.

A estrutura da célula solar que foi otimizada é mostrada na Figura 3.1.

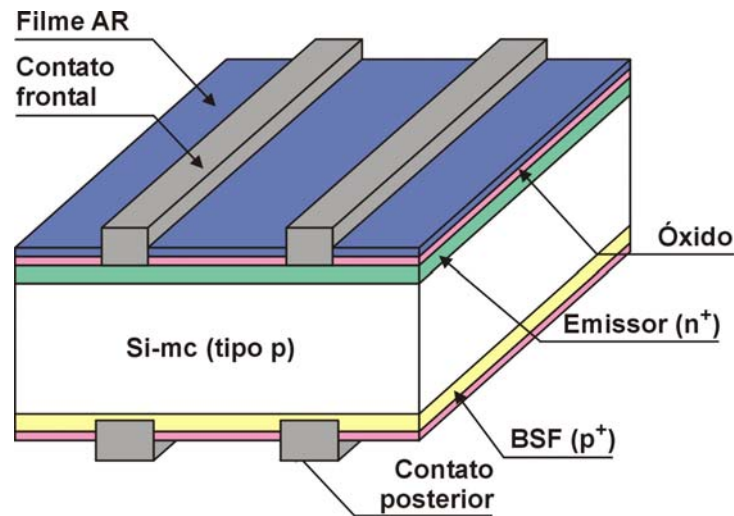


Figura 3.1. Estrutura da célula solar de Si multicristalino otimizada por simulação.

Considerou-se que o substrato é Si-mc com resistividade de base de $1 \Omega \cdot \text{cm}$ e espessura da lâmina de $240 \mu\text{m}$. O emissor n^+ é formado por fósforo e a região do campo retrodifusor por boro. Adotou-se a altura das trilhas metálicas da malha de metalização de $10 \mu\text{m}$, passivação por óxido de silício e filme anti-reflexo de ZnS de 59 nm . A refletância da superfície da célula solar com o filme AR é mostrada na Figura 3.2. A velocidade de recombinação na superfície n^+ e p^+ , sem metalização, foi considerada em função da concentração de dopantes na superfície, segundo modelo proposto por Cuevas e Russel [47], [48]. Na região p^+ , sob a malha metálica, a velocidade de recombinação em superfície é de $1 \times 10^7 \text{ cm/s}$ e para a região n^+ é calculada por meio da corrente de saturação do diodo no escuro.

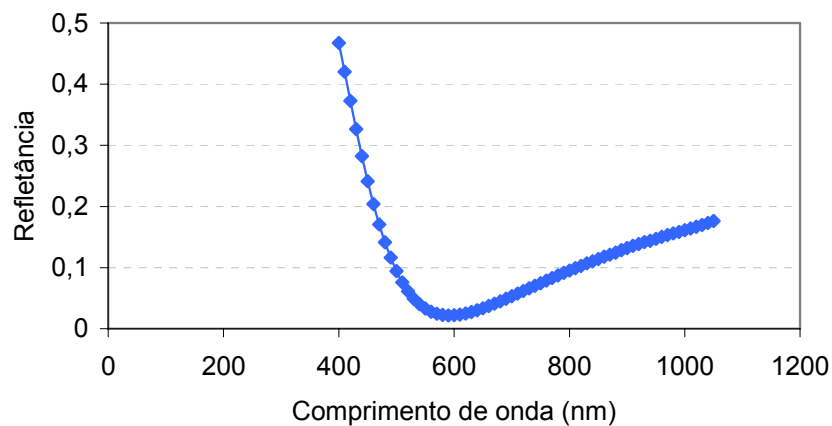


Figura 3.2. Refletância do filme AR de ZnS na superfície frontal da célula simulada.

A malha de metalização da célula solar utilizada foi em forma de pente, isto é, constituiu-se de uma barra coletora e de trilhas perpendiculares a esta e paralelas entre si. Para otimizar uma célula solar de 60 mm x 60 mm, simulou-se um dispositivo de 15 mm x 60 mm, ou seja, dividiu-se a célula solar em quatro partes de 15 mm x 60 mm. Neste caso, a largura da barra coletora (L_B) foi a metade da largura final. A otimização da malha metálica resumiu-se em determinar a distância entre as trilhas metálicas (d) e a largura da barra coletora que resultam na célula de maior eficiência.

O método foi aplicado para a metalização por serigrafia. As equações que determinaram as perdas de potência dependem do modelo da malha metálica. A Figura 3.3 (a) mostra o desenho de uma célula com dimensões 60 mm x 60 mm e a Figura 3.3 (b) apresenta a quarta parte deste mesmo dispositivo, ou seja, a área considerada nas simulações (15 mm x 60 mm).

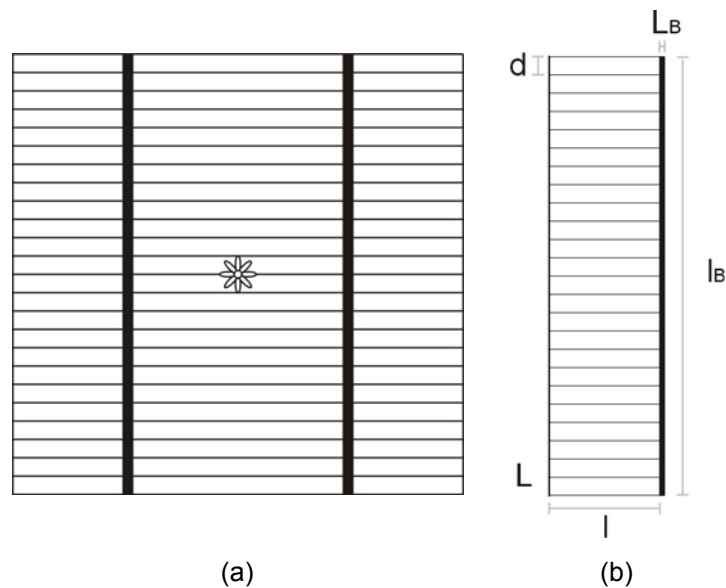


Figura 3.3. (a) Célula solar com dimensões 60 mm x 60 mm, e (b) a quarta parte do mesmo dispositivo.

Foi considerada a resistividade de contato de $7,3 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ e a resistividade de trilha de $3 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ na face frontal para a pasta de Ag, Pv156, da DuPont. Na face posterior, considerou-se a pasta de Ag/Al, PV202, da mesma empresa, com resistividade de contato de $3 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ e resistividade de trilha de $3 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ [49], [37].

Em resumo, a metodologia utilizada para a otimização, por simulação, de uma região da célula solar foi:

- simular a célula solar sem metalização;
- otimizar a malha de metalização para o emissor da célula solar;
- calcular a corrente elétrica de saturação no escuro;
- simular novamente a célula solar com metalização otimizada.

Nestes procedimentos considerou-se que a iluminação do dispositivo é sempre no emissor n^+ . Primeiro calcularam-se, por meio do programa PC-1D, os valores da tensão elétrica, da corrente elétrica e da densidade de corrente no ponto de máxima potência, considerando um dispositivo sem malha metálica [46] de 9 cm^2 (15 mm x 60 mm).

Foram dados de entrada do programa Monocel os seguintes parâmetros do dispositivo a receber a malha metálica: a largura (l) e o comprimento da célula solar (l_B), a resistência de folha (R_{\square}) da região altamente dopada, as resistividades de trilha e de contato, a densidade de corrente e a tensão no ponto de máxima potência, a altura e a largura das trilhas (L) e a altura da barra coletora. Então, o programa determinou a distância entre trilhas, a largura da barra coletora e o número de trilhas (n) ideal que resultaram na menor perda de potência da célula solar [46].

A resistência de folha, que corresponde à passagem da corrente no material semicondutor entre as trilhas metálicas, foi calculada com o programa PC-1D. Este valor foi usado como parâmetro de entrada para o cálculo da resistência série total [50].

As perdas de potência decorrentes das dimensões da malha metálica ocorrem devido à perda de potência nas trilhas metálicas, à sombra causada pelas trilhas e à perda de potência no fluxo de corrente lateral na região difundida, ou seja, na região

entre trilhas [46].

A partir dos parâmetros da malha de metalização foram calculadas as áreas referentes às porções metalizada (A_{met}) e não-metalizada (A_{n-met}) do dispositivo [46].

Conhecendo-se o valor da área metalizada do dispositivo, obteve-se, então, o valor da corrente elétrica de saturação. Para tal, simulou-se, com a ferramenta PC-1D, uma célula solar de área igual à metalizada e sem iluminação, o que correspondeu a um diodo no escuro. O valor da corrente de saturação do diodo no escuro foi usado para considerar a recombinação sob as trilhas metálicas, o que reduziu a tensão de circuito aberto e a tensão máxima das células.

Para determinar a resistência série total frontal, foi necessário calcular a resistência lateral do emissor (R_3), as resistências de contato frontal (R_4) e posterior (R_1), a resistência das trilhas (R_5) e a resistência da barra coletora (R_6). A resistência série total para a face frontal foi a soma de R_1 , R_3 , R_4 , R_5 e R_6 . Cabe comentar que a resistência do material semiconductor (R_2) foi determinada pelo programa PC-1D [44]. A Figura 3.4 apresenta o esquema de uma célula solar ilustrando as resistências série.

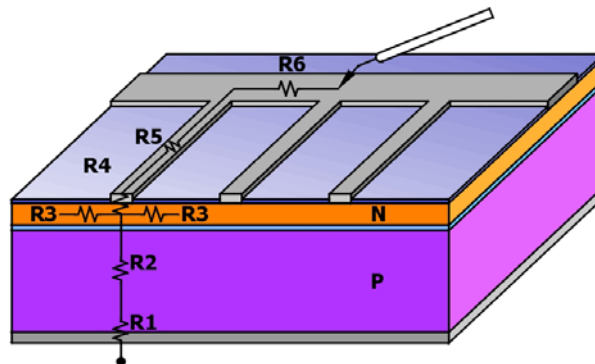


Figura 3.4. Resistências série de uma célula solar, onde R_1 : resistência correspondente ao contato metal-semicondutor na região de BSF; R_2 : resistência do material semiconductor; R_3 : resistência do emissor; R_4 : resistência do contato metal-semicondutor no emissor; R_5 : resistência das trilhas metálicas e R_6 : resistência da barra coletora.

O cálculo da resistência série total posterior (R_1) foi realizado da mesma forma, porém considerando a malha metálica e os contatos da região posterior

$$(R_1 = R_{3p} + R_{4p} + R_{5p} + R_{6p}).$$

A partir dos parâmetros definidos acima simularam-se células solares, determinando a tensão de circuito aberto, a corrente de curto-circuito, a densidade de corrente de curto-circuito, o fator de forma e a eficiência (η) de conversão de energia solar em elétrica [50].

Este método foi aplicado para cada dispositivo otimizado. Para analisar a influência do tempo de vida dos portadores minoritários na eficiência e na otimização da célula solar, simularam-se células solares considerando este parâmetro igual a 1 μ s, 10 μ s, 50 μ s e 100 μ s. A metodologia completa está resumida na Figura 3.5.

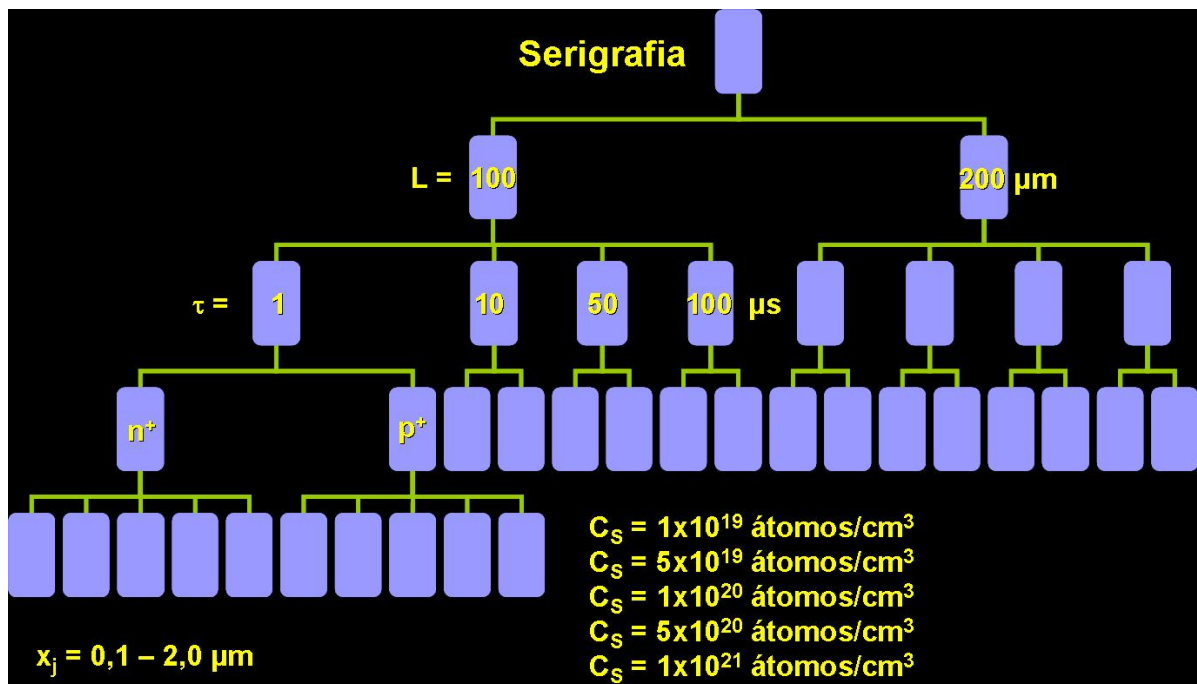


Figura 3.5. Esquema da metodologia de otimização desenvolvida.

Para cada valor de tempo de vida dos portadores minoritários, foram otimizadas células solares com malhas metálicas por serigrafia, tanto para a face frontal quanto para a face posterior, para as larguras de trilhas de 100 μ m e 200 μ m.

Em resumo, para cada perfil de dopagem, tempo de vida dos portadores minoritários na base e largura das trilhas metálicas, foi otimizada a malha de metalização em cada face do dispositivo. Como resultado da otimização por

simulação, para cada valor de τ e largura das trilhas, consideraram-se as células solares com maior eficiência, como descrito a seguir.

Com base na referência bibliográfica [51] selecionaram-se os valores de concentração em superfície (C_S) de 1×10^{19} átomos/cm³, 5×10^{19} átomos/cm³, 1×10^{20} átomos/cm³, 5×10^{20} átomos/cm³ e 1×10^{21} átomos/cm³ e profundidade da junção ou da região de BSF (x_j) variando de 0,1 μm a 2,0 μm , com intervalo de 0,1 μm em ambas as regiões dopadas. Para a concentração em superfície de 1×10^{19} átomos/cm³, a resistência de contato usada nas simulações provavelmente é maior que o valor experimental, porém não foram encontrados dados na literatura científica.

Para determinar as melhores regiões dopadas n^+ e p^+ e as correspondentes malhas metálicas em cada face da célula solar, a metodologia inicialmente foi aplicada para a largura das trilhas de 100 μm e o tempo de vida dos portadores minoritários de 100 μs . O procedimento adotado foi:

- com base em referência bibliográfica [51], selecionaram-se valores de concentração em superfície e profundidade da junção ou da região de BSF para cada região dopada e otimizou-se a malha de metalização posterior. Primeiramente, otimizou-se a distância entre trilhas e depois a largura da barra coletora;

- fixaram-se os valores de C_S e x_j posterior bem como a malha metálica otimizada nesta face e variou-se C_S e x_j do emissor frontal de fósforo;

- selecionou-se um par C_S e x_j otimizado do emissor n^+ ; se este par estava distante do par inicial para esta região, otimizou-se novamente a malha de metalização na face posterior;

- variou-se a concentração em superfície e profundidade da região de BSF na face posterior da mesma forma que para o emissor n^+ , com a malha e o par C_S - x_j selecionado para o emissor;

- otimizou-se a distância entre trilhas e a largura da barra coletora na face

posterior p^+ considerando os pares C_S-x_j para as duas regiões dopadas;

- re-otimizou-se o emissor n^+ ;

- selecionou-se para cada região e para cada C_S o intervalo de x_j que resultou na maior eficiência (otimização das regiões dopadas) e a correspondente distância entre trilhas metálicas e largura da barra coletora (otimização da malha de metalização).

Para a menor largura das trilhas, os valores iniciais de C_S e x_j foram os mesmos para todos os valores de tempo de vida dos portadores minoritários. No entanto, para a aplicação da metodologia para a largura das trilhas de 200 μm , o valor inicial de C_S e x_j utilizado para todos os tempos de vida dos portadores minoritários foi o melhor valor para $L = 100 \mu\text{m}$. Ao todo foram simuladas aproximadamente 1.700 células solares.

3.2. Resultados e Análise para a Metalização por Serigrafia

3.2.1. Largura da Trilha Metálica de 100 μm

3.2.1.1. Tempo de Vida dos Portadores Minoritários de 100 μs

A metodologia utilizada para determinar a melhor região dopada e a malha de metalização em cada face da célula solar foi aplicada, inicialmente, para a menor largura das trilhas (100 μm) e para o tempo de vida dos portadores minoritários de 100 μs .

Primeiramente, otimizou-se a malha de metalização posterior a partir de $C_S = 5 \times 10^{19}$ átomos/ cm^3 e $x_j = 1,0 \mu\text{m}$ [49] frontal. Estabeleceu-se a área metalizada frontal de aproximadamente 8,4 % para encontrar a melhor área metalizada posterior. Esta área foi aumentada de 10 % em 10 % e comparou-se a eficiência das células solares. Optou-se por 30 % de área metalizada posterior para a largura da barra coletora nesta face de 0,1 cm, com base nos resultados apresentados na Figura 3.6.

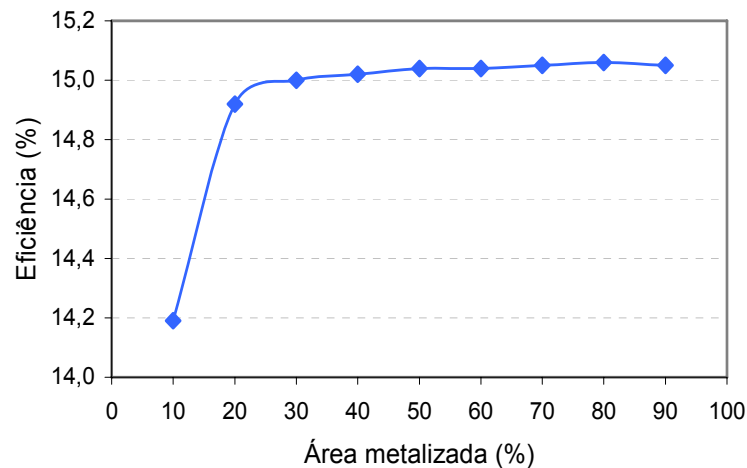


Figura 3.6. Resultado da otimização da área metalizada posterior para $\tau = 100 \mu\text{s}$ e largura das trilhas da malha de metalização de $100 \mu\text{m}$.

Calculando as resistências série para a malha metálica posterior, concluiu-se que R_{6p} , que corresponde à resistência da barra coletora posterior, é elevada quando comparada com R_6 frontal. A Figura 3.7 mostra a distribuição das resistências série para as malhas metálicas frontal e posterior. Sendo assim, constatou-se que a barra coletora posterior deveria ser re-otimizada.

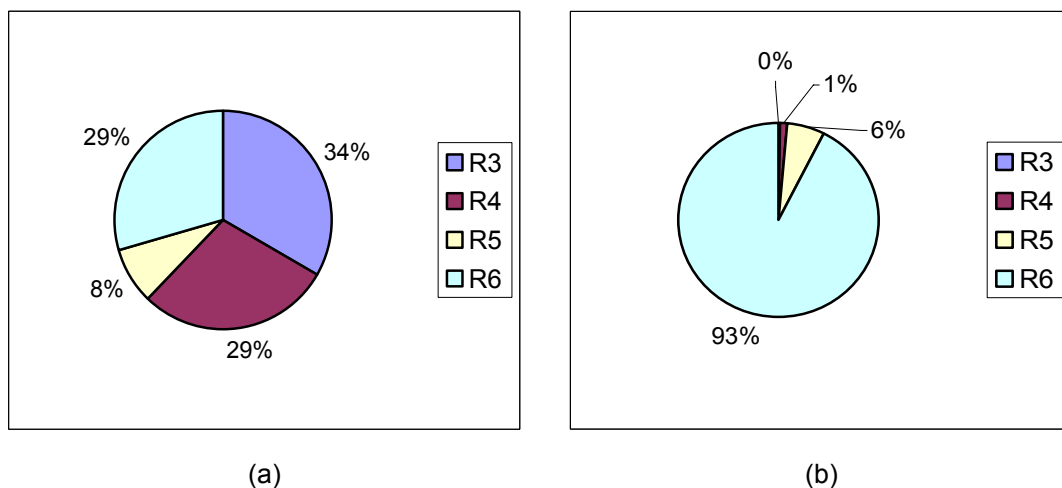


Figura 3.7. Distribuição das resistências série (a) frontal e (b) posterior.

A largura da barra coletora na região de BSF foi aumentada a cada 0,1 cm e verificou-se que com o aumento deste parâmetro a resistência R_{6p} diminui e, conseqüentemente, a eficiência da célula solar aumenta. A nova largura da barra coletora posterior selecionada foi de 0,5 cm, como ilustra a Figura 3.8. Selecionou-se

este valor considerando a eficiência e o custo da pasta serigráfica. Este valor resulta em uma área metalizada posterior de 50 %, fazendo com que a R_{6p} posterior diminua, como pode ser visto na Figura 3.9.

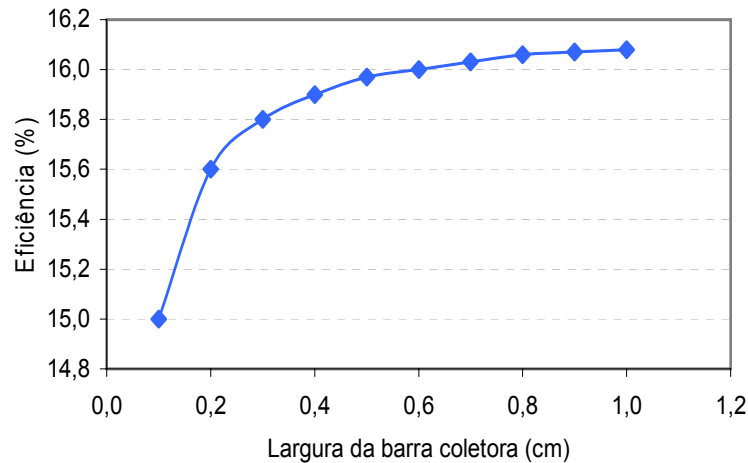


Figura 3.8. Resultado da otimização da largura da barra coletora posterior para $\tau = 100 \mu\text{s}$ e largura das trilhas de $100 \mu\text{m}$.

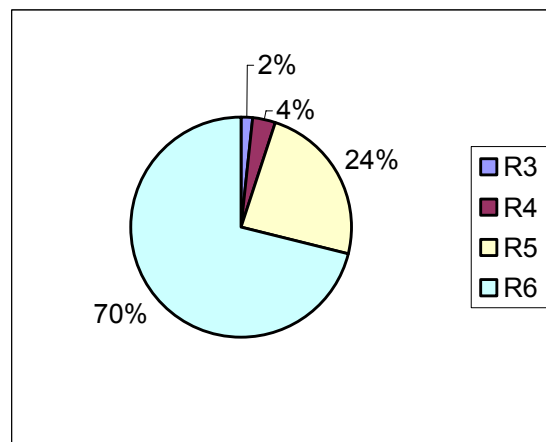


Figura 3.9. Distribuição das resistências série na região posterior para largura da barra coletora de 0,5 cm.

Após definida a malha metálica posterior, fixou-se o par C_S-x_j posterior de 5×10^{19} átomos/cm³ e $1,5 \mu\text{m}$, respectivamente. A Tabela 3.1 apresenta a largura da barra coletora, a distância entre trilhas, a largura das trilhas, a área metalizada e o número de trilhas posteriores utilizados na otimização da região do emissor. Variou-se C_S e x_j do emissor frontal de fósforo.

Tabela 3.1. Parâmetros adotados para a região p^+ para a simulação das células solares com o objetivo de otimizar a região n^+ .

Parâmetro	Valor
L_B (cm)	0,5
d (cm)	0,04
L (μm)	100
A_{met} (cm^2)	4,5
n (trilhas)	150

A Figura 3.10 apresenta a densidade de corrente de curto-circuito, a tensão de circuito aberto, o fator de forma e a eficiência em função da profundidade da junção da região frontal n^+ para $\tau = 100 \mu\text{s}$. Pode-se observar que a espessura do emissor afeta os parâmetros característicos: V_{OC} , J_{SC} e FF. Emissores muito dopados devem ser finos para alcançar altas eficiências e, por outro lado, quando são pouco dopados, devem ser profundos. Nota-se que a J_{SC} e a V_{OC} diminuem com o aumento da concentração em superfície. A J_{SC} também diminui com a profundidade da junção para altas concentrações em superfície. Estes resultados devem-se ao aumento da recombinação dos portadores minoritários e são mais pronunciados para a J_{SC} , pois diminui a probabilidade de coleta dos mesmos. No entanto, para os menores valores de x_j , isto é, dopagens superficiais, a J_{SC} é pouco afetada pela concentração em superfície. Para os menores valores de C_S , a densidade de corrente de curto-circuito é levemente afetada pela profundidade da junção. Ao contrário, o fator de forma aumenta com a concentração em superfície devido à redução da resistência de contato. A eficiência é o resultado dos três parâmetros: J_{SC} , V_{OC} e FF, e apresenta o mesmo comportamento da J_{SC} em relação a concentração em superfície e a profundidade da junção. O intervalo de maior eficiência, de 16 %, ocorre com $C_S = 5 \times 10^{19}$ átomos/ cm^3 e x_j de 0,3 μm a 1,0 μm .

Dando continuidade à otimização, para a simulação da região p^+ , fixou-se o par $C_S = 5 \times 10^{19}$ átomos/ cm^3 e $x_j = 0,7 \mu\text{m}$ para o emissor n^+ , pertencente ao intervalo otimizado. Este valor corresponde a máxima eficiência da célula solar. Como esse par encontra-se muito próximo do par inicial para esta região, não foi necessário re-otimizar a malha metálica na região posterior. Assim, a área

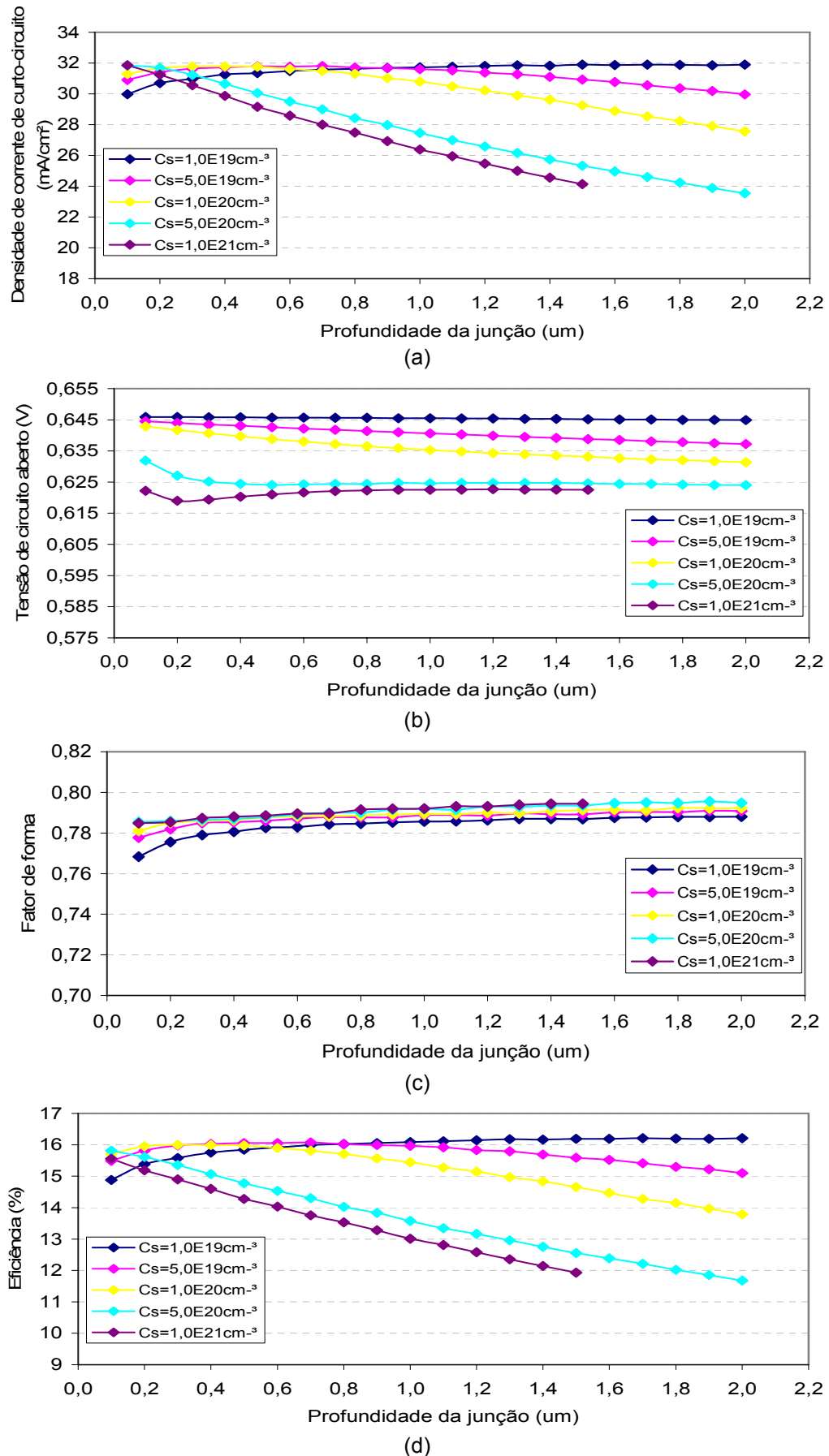


Figura 3.10. (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF e (d) η em função da profundidade da junção e concentração em superfície para a região n^+ e $\tau = 100 \mu s$.

metalizada e a largura da barra coletora posteriores permaneceram as mesmas. Em seguida, variou-se C_S e x_j na região posterior, da mesma forma que para o emissor n^+ , com a malha metálica e o par C_S - x_j fixados para o emissor, estes valores estão resumidos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Parâmetros adotados para a região n^+ para a simulação das células solares com o objetivo de otimizar a região p^+ .

Parâmetro	Valor
C_S (átomos/cm ³)	5×10^{19}
x_j (μm)	0,7
R_t (Ω)	0,075
A_{met} (cm ²)	0,788
n (trilhas)	26
F_S (%)	8,759

Os resultados para a região posterior p^+ são mostrados na Figura 3.11. Nota-se que a densidade de corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto apresentam um comportamento similar. Esses parâmetros aumentam levemente em função da profundidade da região de BSF e da concentração em superfície. Conforme esperado, na região posterior o perfil de dopagem deve ser profundo e com alta concentração em superfície. O fator de forma aumenta em maiores profundidades da região de BSF, para concentrações em superfície baixas. Para altos valores de C_S , esse parâmetro praticamente não é afetado pela profundidade da região de BSF. A máxima eficiência da célula solar, após a otimização da região posterior p^+ foi de 16,2 %, 0,2 % maior. Este valor ocorre quando $C_S = 1 \times 10^{20}$ átomos/cm³ e x_j está entre 1,3 μm e 2,0 μm. O FF ficou com média de 0,78, a V_{OC} de 0,640 V e a J_{SC} de 31,5 mA/cm².

Para verificar se a região n^+ foi otimizada de forma adequada, repetiu-se a simulação para esta região. Selecionou-se o par $C_S = 1 \times 10^{20}$ átomos/cm³ e $x_j = 1,4$ μm, otimizado para região p^+ e re-otimizou-se a malha metálica posterior, considerando os pares C_S - x_j para as duas regiões dopadas. Concluiu-se que 40 % de área metalizada posterior resulta em maior eficiência que quando esta área é de

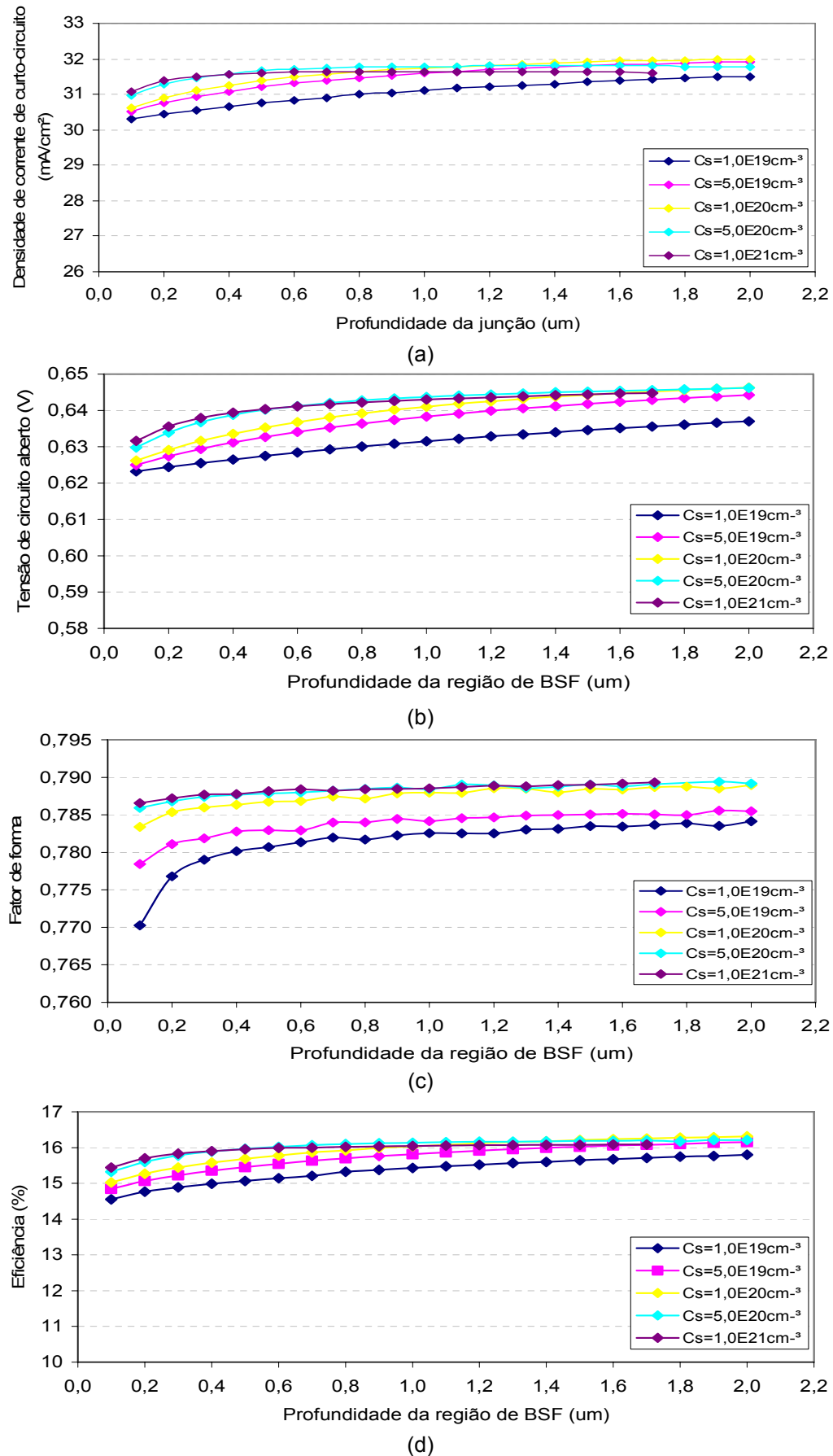


Figura 3.11. (a) J_{sc} , (b) V_{oc} , (c) FF e (d) η em função da profundidade da junção e concentração em superfície para a região p^+ e $\tau = 100 \mu\text{s}$.

30 %, conforme encontrado na primeira otimização da malha metálica. A melhor L_B foi de 0,5 cm, totalizando uma área metalizada posterior de 57,1 %.

A seguir, variou-se a concentração em superfície e a profundidade de junção na face frontal com a malha e o par C_S - x_j selecionados para a região posterior, como mostra a Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Parâmetros adotados para a região p^+ para a simulação das células solares, com o objetivo de re-otimizar o emissor.

Parâmetros	Posterior
L_B (cm)	0,5
d (cm)	0,028
L (μm)	100
A_{met} (cm^2)	5,14
n (trilhas)	214

Os resultados para a J_{SC} , V_{OC} , FF e η são apresentados na Figura 3.12. Constata-se que o comportamento de todos os quatro parâmetros é muito similar ao resultado mostrado na Figura 3.10. A eficiência máxima é de 16,2 %, que corresponde a $C_S = 5 \times 10^{19}$ átomos/ cm^3 . Este valor é igual ao encontrado após a otimização da região p^+ . Portanto, não foi necessário re-otimizar a região do emissor para os demais valores de tempo de vida dos portadores minoritários e largura das trilhas. Na Tabela 3.4 resumem-se os resultados da simulação para o tempo de vida dos portadores minoritários de 100 μs e largura das trilhas metálicas de 100 μm .

Tabela 3.4. Resultados da simulação e características elétricas de células solares com trilhas metálicas de 100 μm e tempo de vida dos portadores minoritários de 100 μs .

Parâmetros	Frontal	Posterior
C_S (átomos/ cm^3)	5×10^{19}	1×10^{20}
x_j (μm)	0,3 – 0,9	1,3 – 2,0
R_{\square} (Ω/\square)	143 – 48	31 – 20
J_{SC} (mA/cm^2)	31,63 – 31,68	31,86 – 31,99
V_{OC} (V)	0,646 – 0,643	0,643 – 0,646
FF	0,786 – 0,789	0,788 – 0,789
η (%)	16,2	16,2

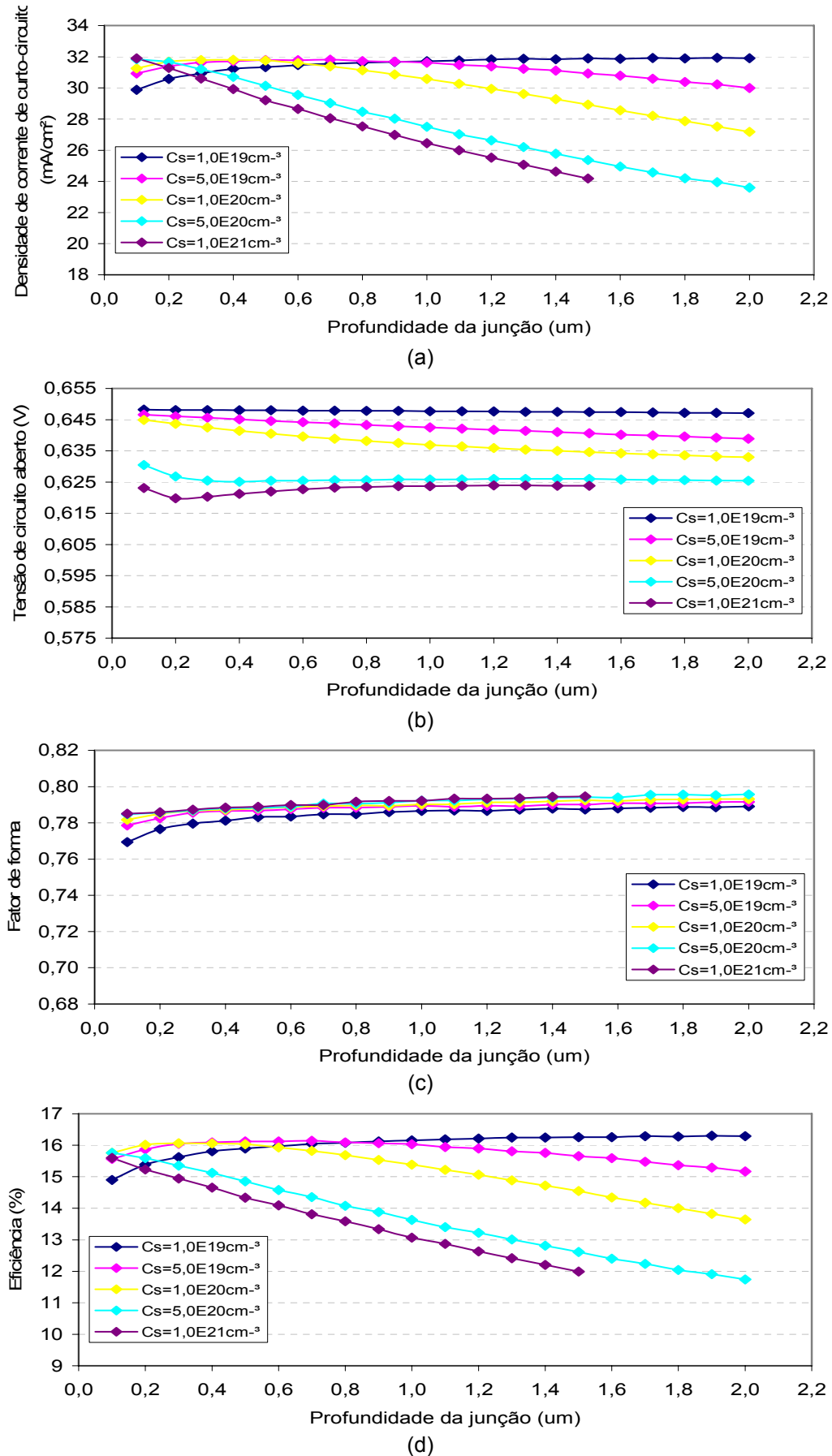


Figura 3.12. (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF e (d) η em função da profundidade da junção e concentração em superfície para a região n^+ e $\tau = 100 \mu s$.

3.2.1.2. Tempo de Vida dos Portadores Minoritários de 50 μs

Após a conclusão da simulação para $\tau = 100 \mu\text{s}$, repetiu-se a mesma metodologia para o tempo de vida dos portadores minoritários de 50 μs . Para a região n^+ , a área metalizada posterior encontrada foi 57,1 % para a largura da barra coletora de 0,5 cm.

Em seguida variou-se a concentração em superfície e a profundidade da junção na face frontal com a malha e o par C_S-x_j fixados para a região posterior. Na Figura 3.13 mostram-se os resultados. Observa-se que os parâmetros J_{SC} , V_{OC} , FF e η apresentam um comportamento similar aos resultados para $\tau = 100 \mu\text{s}$. No entanto, os parâmetros característicos, com exceção do FF, sofrem um pequeno decréscimo em função do tempo de vida dos portadores minoritários. Novamente, a J_{SC} decresce quando a profundidade da junção aumenta. As concentrações em superfície que resultam nas maiores eficiências são: 1×10^{19} átomos/cm³, 5×10^{19} átomos/cm³ e 1×10^{20} átomos/cm³, enquanto que, para $C_S = 5 \times 10^{20}$ átomos/cm³ e $C_S = 1 \times 10^{21}$ átomos/cm³, a eficiência cai com o aumento da profundidade da junção. A maior eficiência, de 15,8 %, encontra-se em $C_S = 5 \times 10^{19}$ átomos/cm³ e x_j entre 0,4 μm e 0,8 μm . O FF é da ordem de 0,79, a V_{OC} de 0,635 V e a J_{SC} de 31,5 mA/cm².

Para a simulação da região p^+ , fixou-se o par $C_S = 5 \times 10^{19}$ átomos/cm³ e $x_j = 0,7 \mu\text{m}$, logo, não foi necessário re-otimizar a malha metálica posterior. Variou-se a concentração em superfície e a profundidade da região de BSF na face posterior e a melhor célula solar alcançou 16 % de eficiência, com $C_S = 1 \times 10^{20}$ átomos/cm³ e x_j entre 1,7 μm e 2,0 μm , como ilustra a Figura 3.14.

Novamente verifica-se que o comportamento da densidade de corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, fator de forma e eficiência é similar aos resultados para $\tau = 100 \mu\text{s}$. Na Tabela 3.5 apresentam-se os parâmetros da estrutura e da corrente elétrica em função da diferença de potencial aplicada (curva I-V) da célula solar.

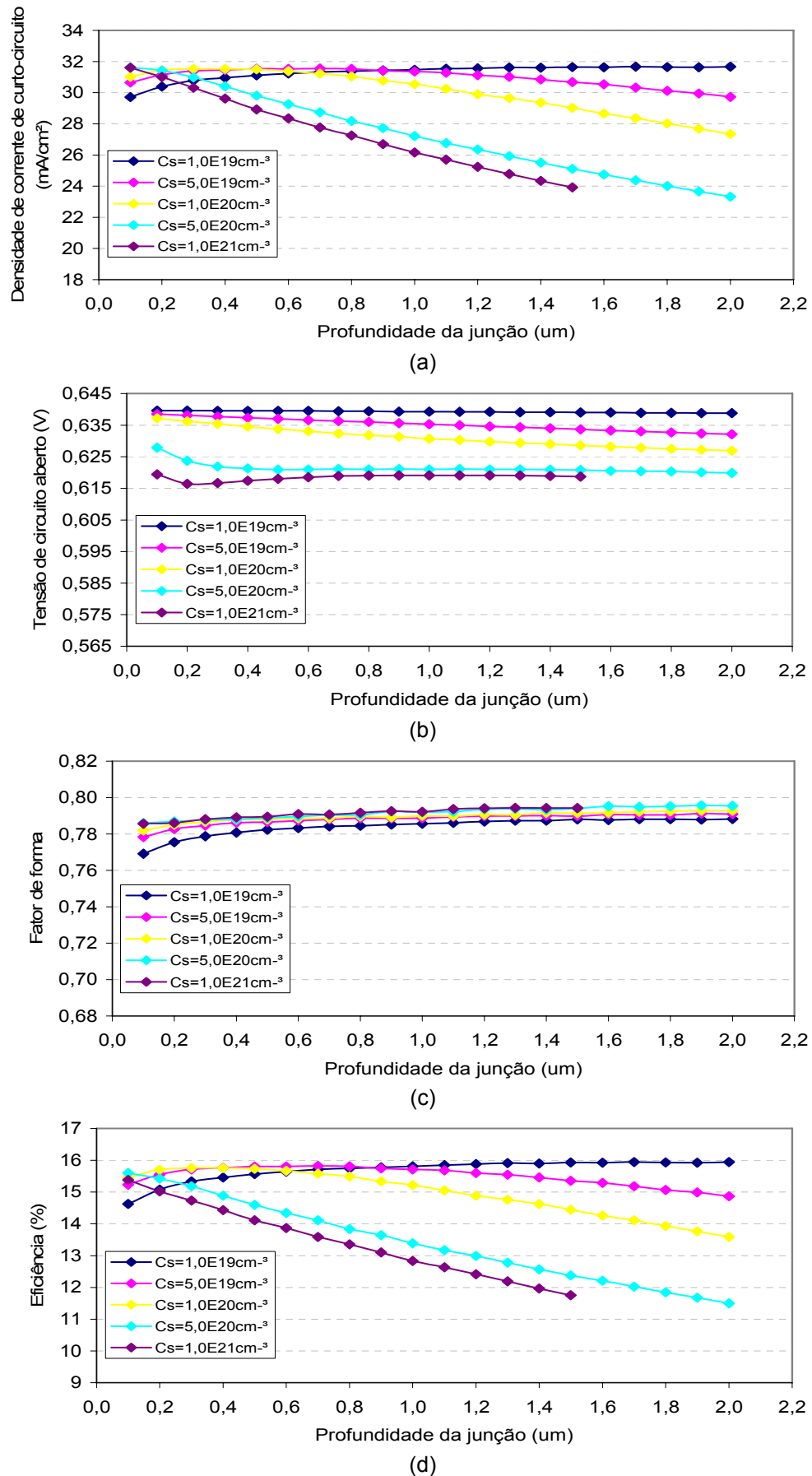
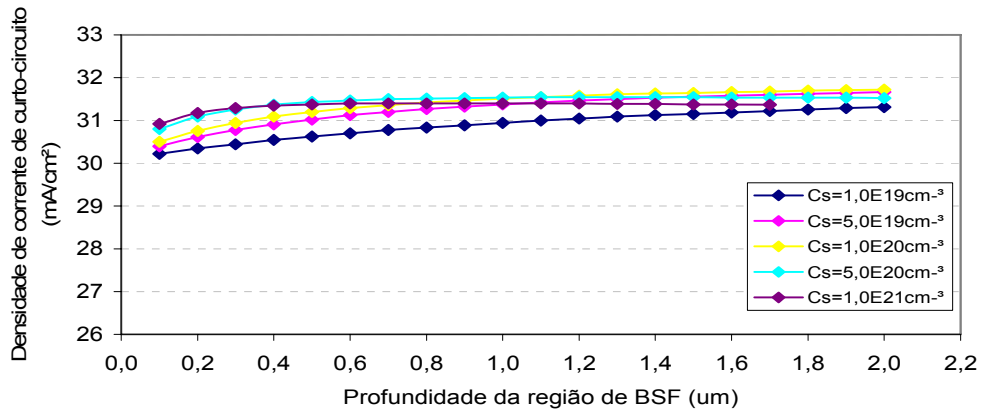
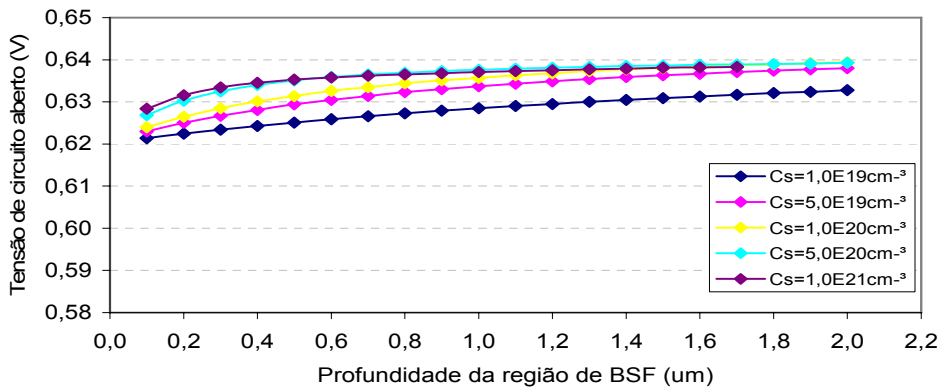


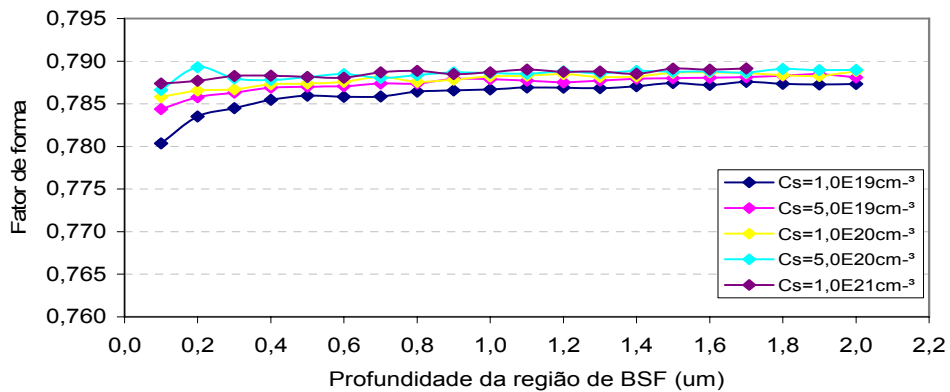
Figura 3.13. (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF e (d) η em função da profundidade da junção e concentração em superfície para a região n^+ e $\tau = 50 \mu s$.



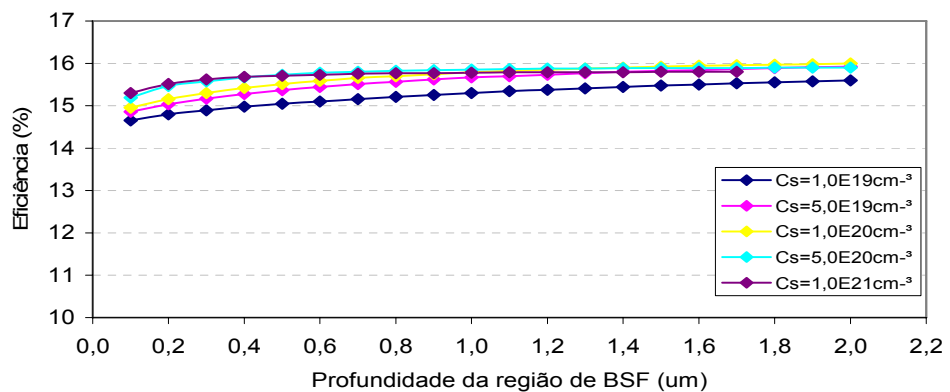
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.14. (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF e (d) η em função da profundidade da junção e concentração em superfície para a região p^+ e $\tau = 50 \mu s$.

Tabela 3.5. Resultados da simulação e características elétricas de células solares com trilhas metálicas de 100 μm e tempo de vida dos portadores minoritários de 50 μs .

Parâmetros	Frontal	Posterior
C_S (átomos/ cm^3)	5×10^{19}	1×10^{20}
x_j (μm)	0,4 – 0,8	1,7 – 2,0
R_{\square} (Ω/\square)	107 – 53	23 – 20
J_{SC} (mA/cm^2)	31,47 – 31,52	31,68 – 31,72
V_{OC} (V)	0,637 – 0,636	0,639
FF	0,786 – 0,789	0,789
η (%)	15,8	16,0

3.2.1.3. Tempo de Vida dos Portadores Minoritários de 10 μs

Para a região n^+ e tempo de vida dos portadores minoritários de 10 μs , a área metalizada posterior encontrada foi a mesma que anteriormente, 57,1 % com a largura da barra coletora posterior de 0,5 cm.

Da Figura 3.15 nota-se que os parâmetros característicos caem ainda mais com o decréscimo do tempo de vida dos portadores minoritários, principalmente a tensão de circuito aberto e a densidade de corrente de curto-circuito. A V_{OC} é da ordem de 0,615 V e a J_{SC} é de 30,2 mA/cm^2 . A concentração em superfície que resulta na eficiência de 14,6 % é de 5×10^{19} átomos/ cm^3 com profundidade da junção entre 0,5 μm e 1,1 μm .

Novamente fixou-se o par $C_S = 5 \times 10^{19}$ átomos/ cm^3 e $x_j = 0,7 \mu\text{m}$, resultante da otimização do emissor n^+ e aplicou-se a metodologia para a região posterior. A célula solar com maior eficiência de conversão para o tempo de vida dos portadores minoritários igual a 10 μs é de 14,6 % para $C_S = 1 \times 10^{20}$ átomos/ cm^3 e x_j entre 0,8 μm e 2,0 μm , conforme ilustra a Figura 3.16.

Na Tabela 3.6 apresentam-se os resultados da simulação. O fator de forma é de 0,784, a tensão de circuito aberto é da ordem de 0,615 V e a densidade de corrente de curto-circuito da ordem de 30 mA/cm^2 .

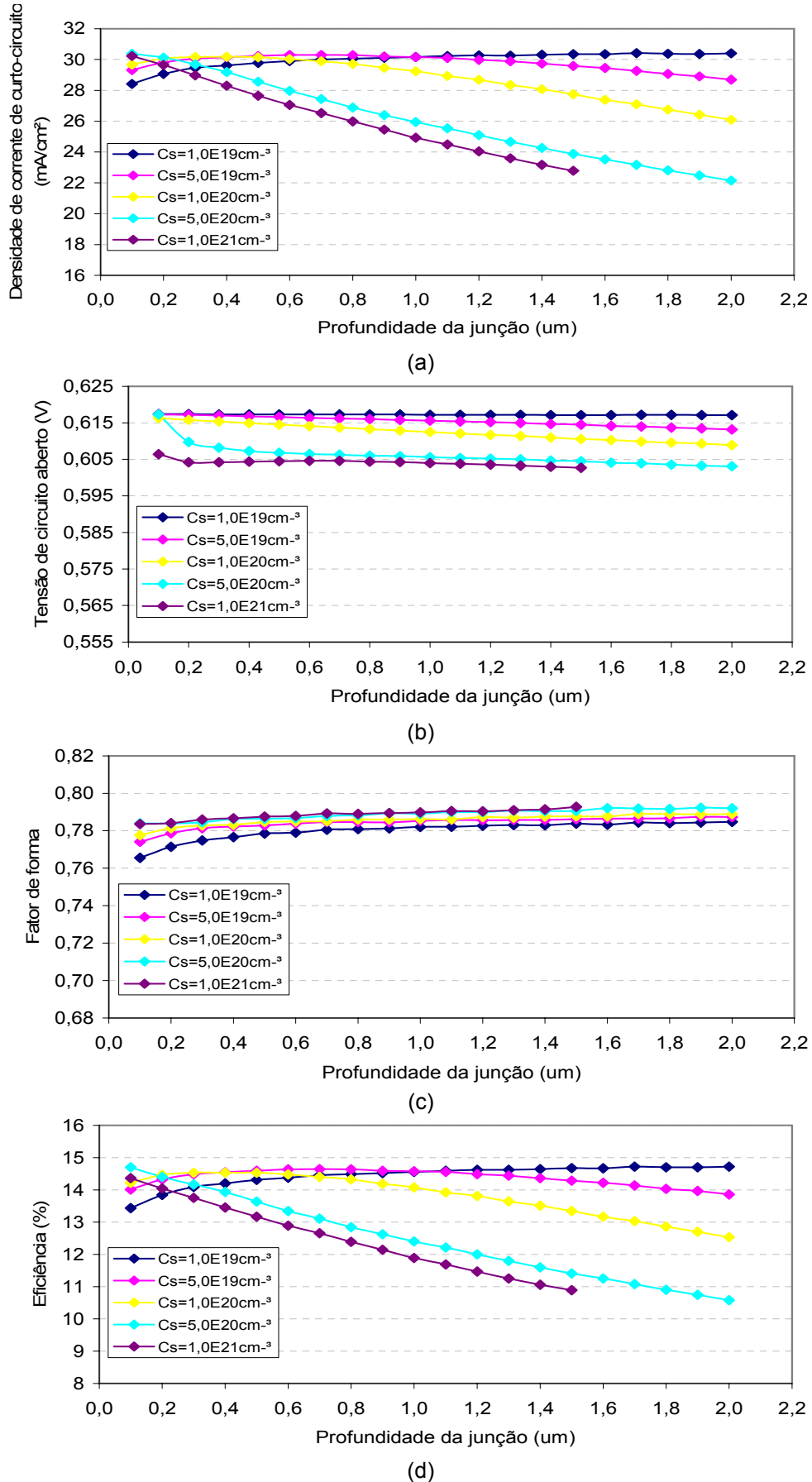
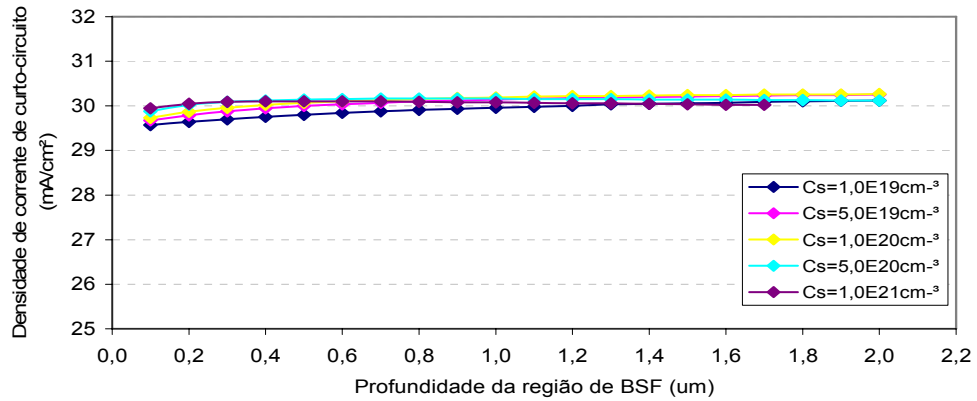
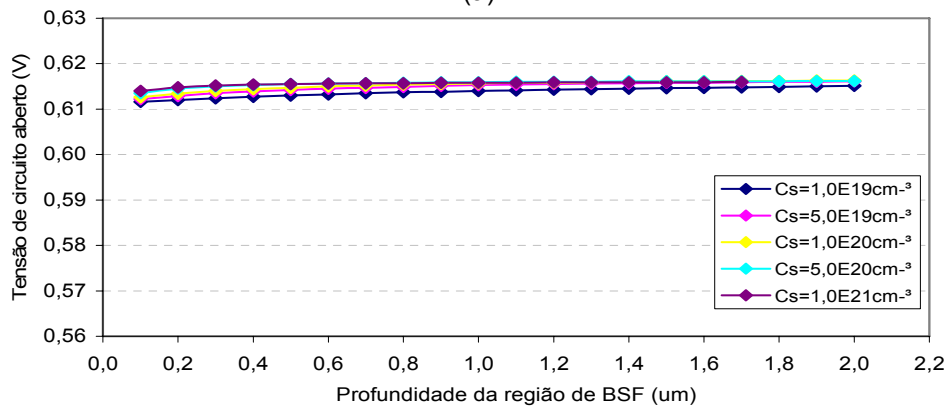


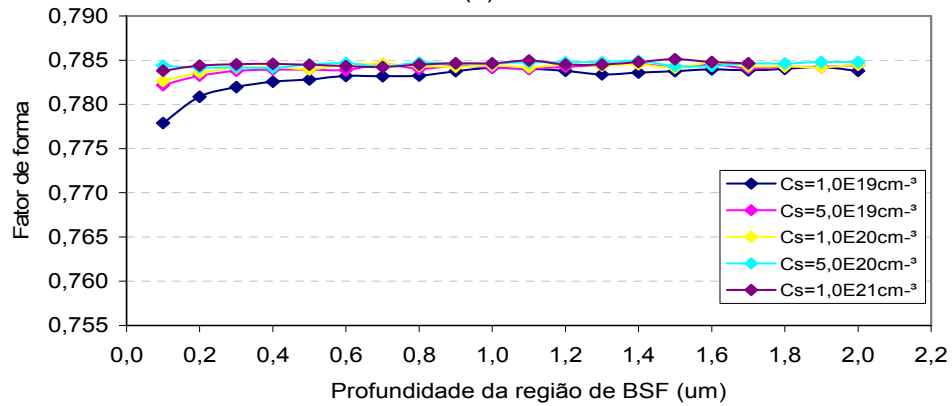
Figura 3.15. (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF e (d) η em função da profundidade da junção e concentração em superfície para a região n^+ e $\tau = 10 \mu s$.



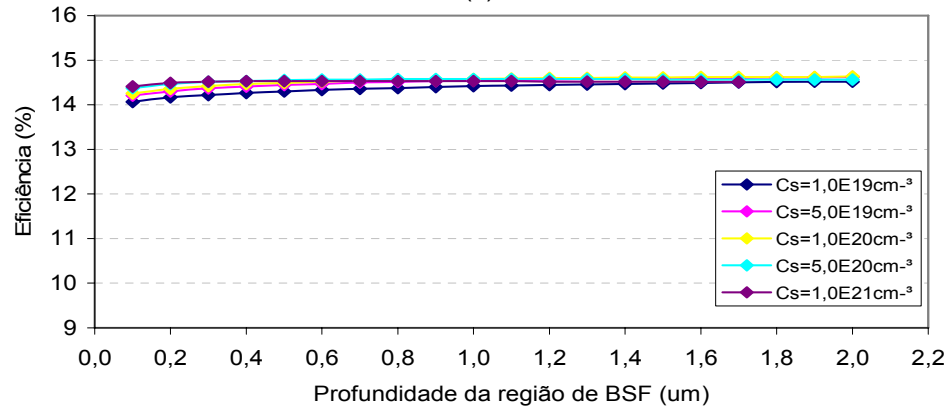
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.16. (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF e (d) η em função da profundidade da junção e concentração em superfície para a região p^+ e $\tau = 10 \mu\text{s}$.

Tabela 3.6. Resultados da simulação e características elétricas de células solares com trilhas metálicas de 100 μm e tempo de vida dos portadores minoritários de 10 μs .

Parâmetros	Frontal	Posterior
C_S (átomos/ cm^3)	5×10^{19}	1×10^{20}
x_j (μm)	0,5 – 1,1	0,8 – 2,0
R_{\square} (Ω/\square)	86 – 39	50 – 20
J_{SC} (mA/cm^2)	30,22 – 30,10	30,16 – 30,27
V_{OC} (V)	0,617 – 0,615	0,615 – 0,616
FF	0,783 – 0,786	0,784
η (%)	14,6	14,6

3.2.1.4. Tempo de Vida dos Portadores Minoritários de 1 μs

Finalmente, para a largura de trilhas de 100 μm , o método foi aplicado para $\tau = 1 \mu\text{s}$. Para a região de BSF, a melhor área metalizada posterior foi de 61,4 % com $L_B = 0,6 \text{ cm}$, que aumentou em relação aos obtidos com valores de tempo de vida dos portadores minoritários analisados anteriormente. Os parâmetros da malha metálica na região posterior fixados são mostrados na Tabela 3.7. Variando C_S e x_j na região frontal, conclui-se que a maior eficiência de 12,1 % ocorre para $C_S = 5 \times 10^{19}$ átomos/ cm^3 e x_j de 0,4 μm a 1,0 μm . O FF fica em torno de 0,77, porém, a V_{OC} e a J_{SC} sofrem uma redução significativa, como ilustra a Figura 3.17.

Tabela 3.7. Parâmetros adotados da malha de metalização da região p^+ para a simulação das células solares com o objetivo de otimizar o emissor n^+ , quando $L = 100 \mu\text{m}$ e $\tau = 1 \mu\text{s}$.

Parâmetros	Posterior
L_B (cm)	0,6
d (cm)	0,028
L (μm)	100
A_{met} (cm^2)	5,53
n (trilhas)	214

Fixou-se o par $C_S = 5 \times 10^{19}$ átomos/ cm^3 e $x_j = 0,7 \mu\text{m}$ para o emissor e otimizou-se a malha metálica posterior. Novamente, a área metalizada encontrada foi de 61,4 % para uma barra coletora de 0,6 cm de largura. Em seguida, variou-se C_S e x_j na face posterior. Os resultados são apresentados na Figura 3.18.

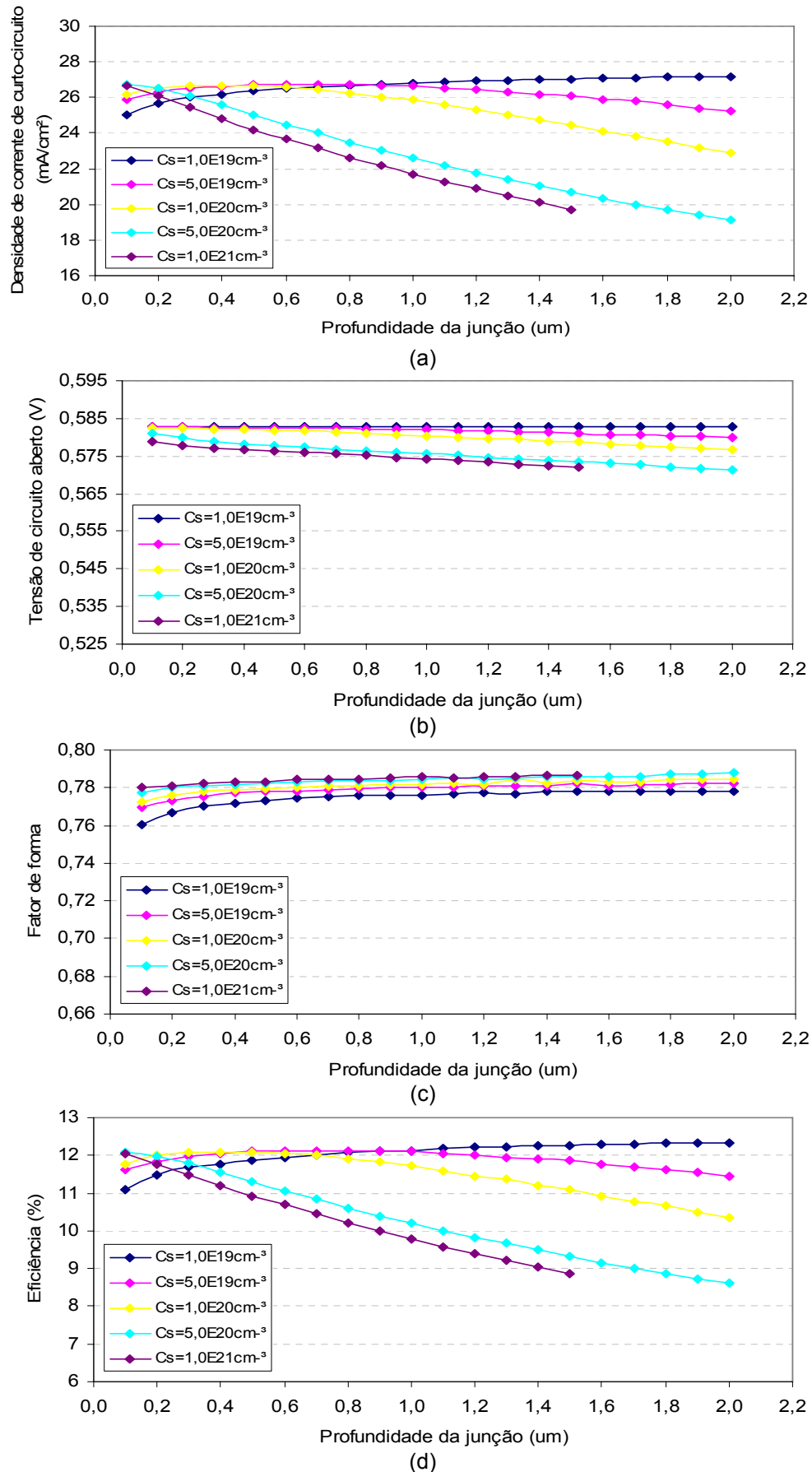


Figura 3.17. (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF e (d) η em função da profundidade da junção e concentração em superfície para a região n^+ e $\tau = 1 \mu s$.

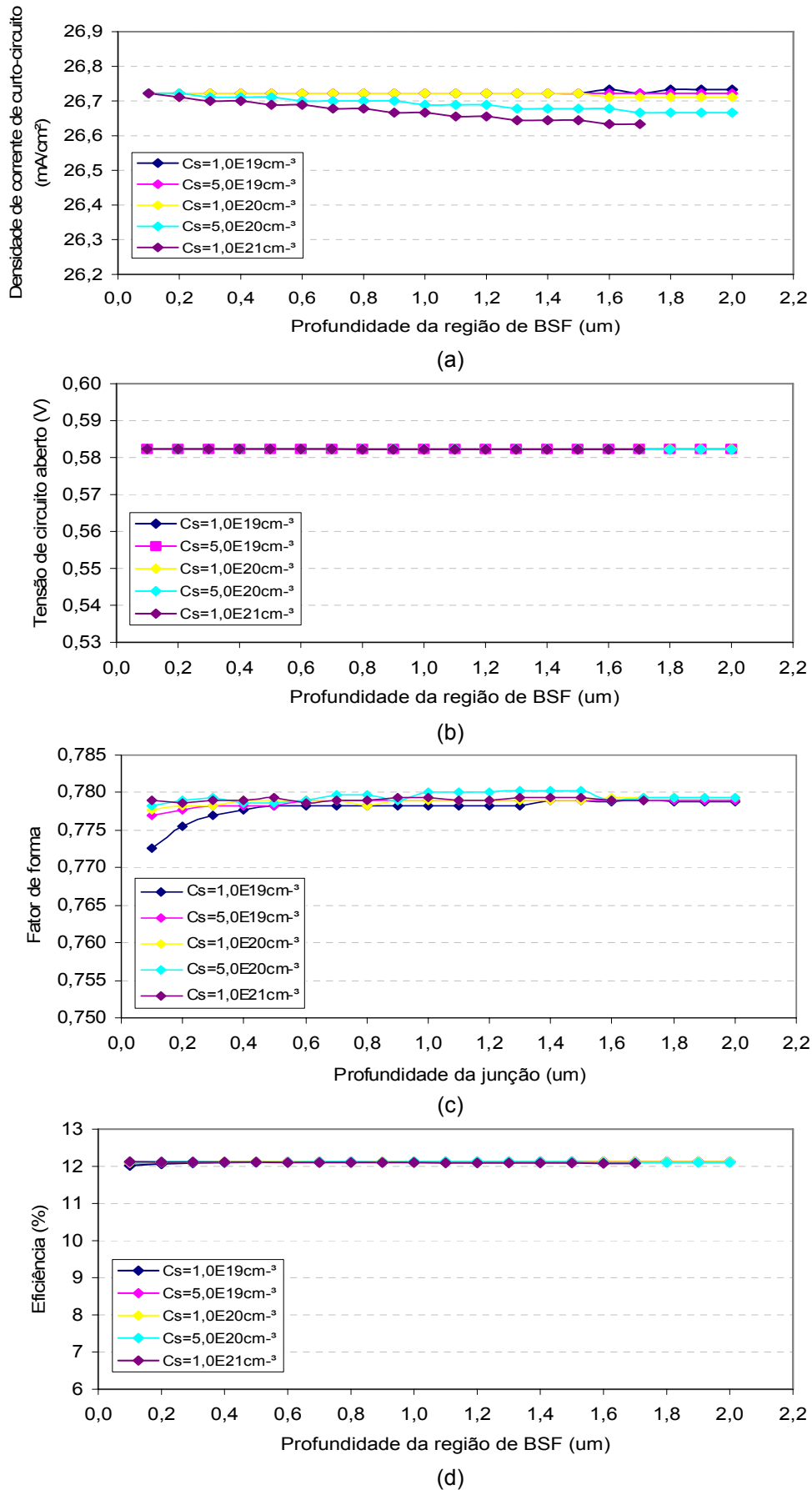


Figura 3.18. (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF e (d) η em função da profundidade da junção e concentração em superfície para a região p^+ e $\tau = 1 \mu s$.

Constata-se que a maior eficiência, de 12,1 %, se mantém para $C_S = 1 \times 10^{20}$ átomos/cm³ e x_j de 0,1 μm a 2,0 μm para a região p^+ . Observa-se que a tensão de circuito aberto e a densidade de corrente de curto-circuito praticamente não são influenciadas pela concentração em superfície e profundidade da região de BSF. Como consequência, a eficiência é quase a mesma para todas as células solares simuladas. O fator de forma permanece em, aproximadamente, 0,78. No entanto, a V_{OC} é de 0,582 V e a J_{SC} de 26,7 mA/cm², conforme mostra a Tabela 3.8.

Tabela 3.8. Resultados da simulação e características elétricas de células solares com trilhas metálicas de 100 μm e tempo de vida dos portadores minoritários de 1 μs .

Parâmetros	Frontal	Posterior
C_S (átomos/cm ³)	5×10^{19}	1×10^{20}
x_j (μm)	0,4 – 1,0	0,1 – 2,0
R_{\square} (Ω/\square)	107 – 43	398 – 20
J_{SC} (mA/cm ²)	26,61 – 26,64	26,72 – 26,71
V_{OC} (V)	0,583 – 0,582	0,582
FF	0,778 – 0,780	0,778 – 0,779
η (%)	12,1	12,1

3.2.2. Largura da Trilha Metálica de 200 μm

A análise anterior demonstrou que, para o emissor n^+ , trilhas de 100 μm de largura e malha de metalização formada por serigrafia, valores de concentração em superfície de 5×10^{20} átomos/cm³ e 1×10^{21} átomos/cm³ não resultam em células solares eficientes. Da mesma forma, para a região p^+ , os valores de concentração em superfície de 1×10^{19} átomos/cm³ e 1×10^{21} átomos/cm³ não produzem os melhores resultados. Portanto, estes valores de C_S não foram utilizados nas simulações para a largura das trilhas de 200 μm . O valor inicial do par C_S - x_j foi o melhor valor encontrado para $L = 100 \mu\text{m}$.

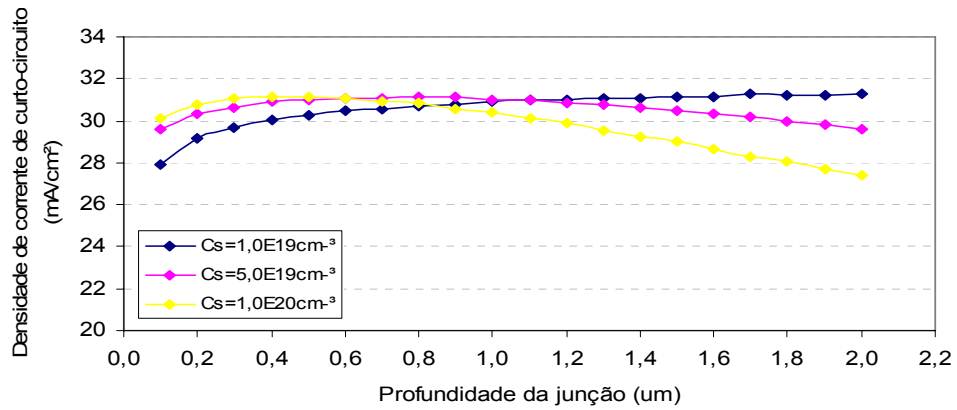
Considerando a largura das trilhas metálicas igual a 200 μm e os valores de tempo de vida dos portadores minoritários iguais a 100 μs , 50 μs , 10 μs e 1 μs , repetiu-se a metodologia.

Primeiro, para $\tau = 100 \mu\text{s}$, otimizou-se a malha metálica posterior a partir de $C_S = 5 \times 10^{19} \text{ átomos/cm}^3$ e $x_j = 0,7 \mu\text{m}$. A área metalizada posterior encontrada foi de 61,4 % para $L_B = 0,6 \text{ cm}$. Variou-se C_S e x_j na face frontal. Da Figura 3.19, nota-se que o comportamento dos parâmetros elétricos das células solares é similar ao resultado encontrado para $L = 100 \mu\text{m}$.

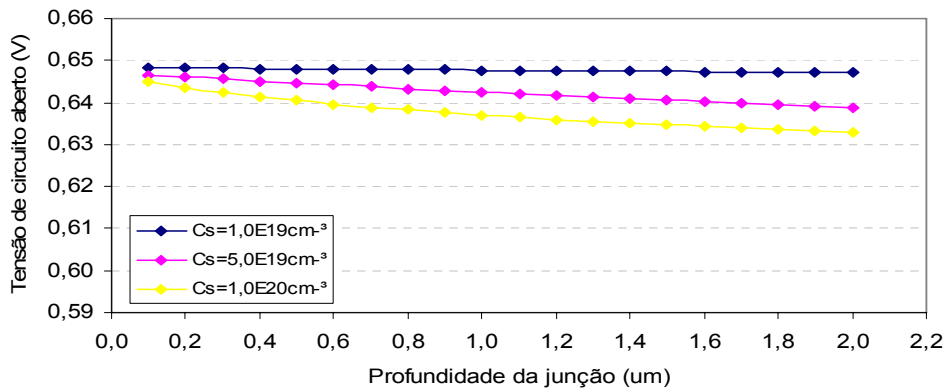
Comparando a Figura 3.10 com a Figura 3.19, verifica-se que a densidade de corrente de curto-circuito diminui ligeiramente quando a largura das trilhas na região frontal é aumentada. Por outro lado, a tensão de circuito aberto praticamente não sofre alteração e o fator de forma decresce quando $C_S = 1 \times 10^{19} \text{ átomos/cm}^3$. A célula mais eficiente atingiu 15,7 % quando $C_S = 5 \times 10^{19} \text{ átomos/cm}^3$ e x_j entre $0,5 \mu\text{m}$ e $1,1 \mu\text{m}$. O FF foi da ordem de 0,78, a V_{OC} de 0,640 V e a J_{SC} atingiu, em média, 31 mA/cm^2 .

Em seguida, fixou-se o par $C_S = 5 \times 10^{19} \text{ átomos/cm}^3$ e $x_j = 0,9 \mu\text{m}$ para a região frontal e otimizou-se a malha metálica posterior. Constatou-se que o percentual da área metalizada posterior não variou, permanecendo em 61,4 % para a largura da barra coletora de 0,6 cm. Variando C_S e x_j na face posterior, a maior eficiência alcançada foi de 15,9 % quando $C_S = 1 \times 10^{20} \text{ átomos/cm}^3$ e x_j entre $1,9 \mu\text{m}$ e $2,0 \mu\text{m}$, conforme pode ser visto na Figura 3.20. Da mesma forma que os resultados para $L = 100 \mu\text{m}$, pouca melhora é observada nos valores de fator de forma, tensão de circuito aberto e densidade de corrente de curto-circuito com relação à simulação da região n^+ . Na Tabela 3.9 resumem-se os resultados da simulação e as características elétricas das células solares.

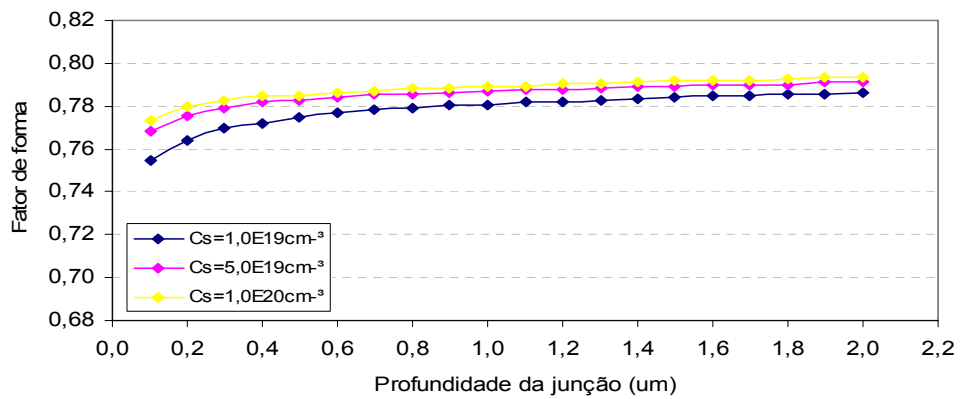
A seguir, a metodologia foi aplicada para os valores de tempo de vida dos portadores minoritários de $50 \mu\text{s}$, $10 \mu\text{s}$ e $1 \mu\text{s}$. Na Figura 3.21 e Figura 3.22 comparam-se os resultados da J_{SC} , V_{OC} , FF e η em função da profundidade da junção para o emissor n^+ e profundidade da região de BSF para a região posterior p^+ . Para o emissor, os resultados são apresentados para a concentração em superfície de $5 \times 10^{19} \text{ átomos/cm}^3$ e para a região de BSF, para a concentração em superfície de $1 \times 10^{20} \text{ átomos/cm}^3$. Conclui-se que as células mais eficientes para $\tau = 50 \mu\text{s}$, de 15,5 %, ocorrem para a profundidade da região de BSF entre $1,5 \mu\text{m}$ e $2,0 \mu\text{m}$ e para $\tau = 10 \mu\text{s}$, a máxima eficiência de 14,2 % corresponde ao intervalo de



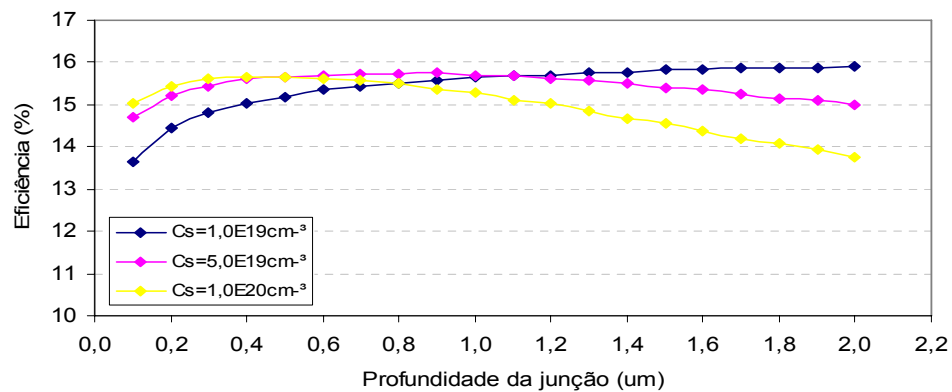
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.19. (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF e (d) η em função da profundidade da junção e concentração em superfície para a região n^+ e $\tau = 100 \mu\text{s}$.

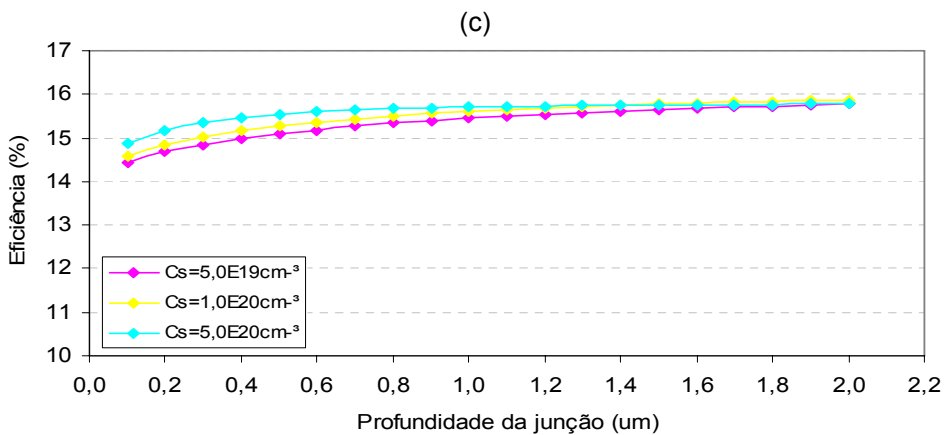
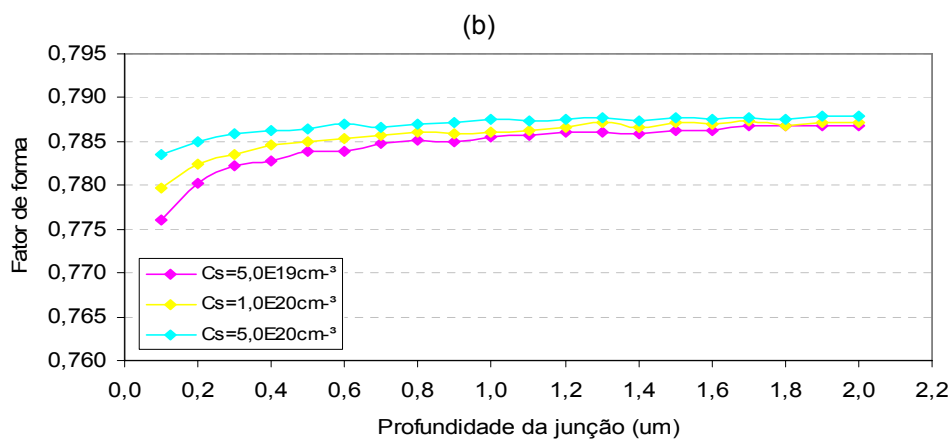
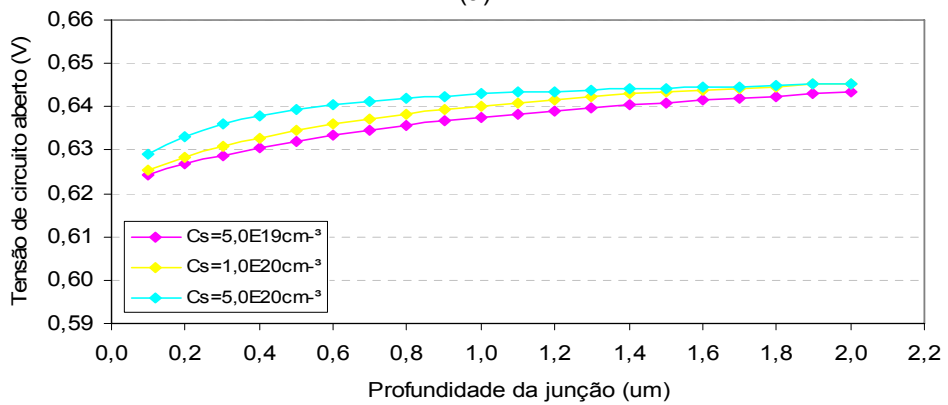
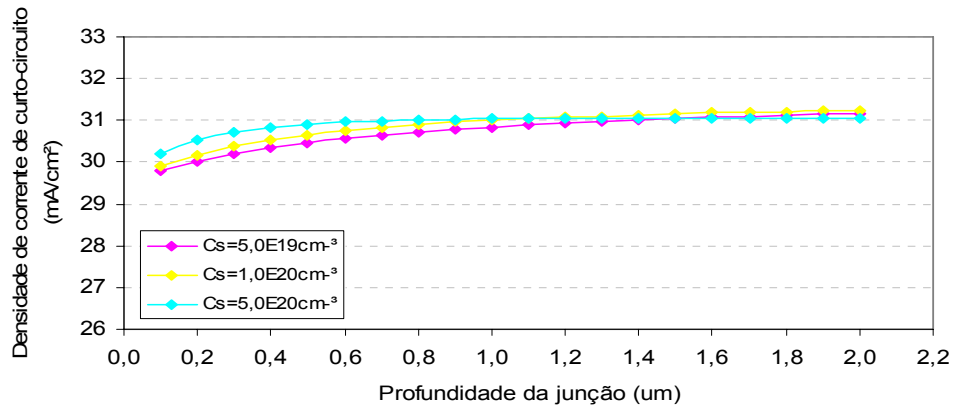


Figura 3.20. (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF e (d) η em função da profundidade da junção e concentração em superfície para a região p^+ e $\tau = 100 \mu s$.

x_j de 0,9 μm a 2,0 μm . Finalmente, a maior eficiência encontrada para $\tau = 1 \mu\text{s}$ foi de 11,8 %, para x_j entre 0,2 μm e 2,0 μm .

Tabela 3.9. Resultados da simulação e características elétricas de células solares com trilhas metálicas de 200 μm e tempo de vida dos portadores minoritários de 100 μs .

Parâmetros	Frontal	Posterior
C_S (átomos/ cm^3)	5×10^{19}	1×10^{20}
x_j (μm)	0,5 – 1,1	1,9 – 2,0
R_{\square} (Ω/\square)	86 – 39	21 – 20
J_{SC} (mA/cm^2)	31,07 – 30,99	31,22 – 31,23
V_{OC} (V)	0,644 – 0,642	0,645
FF	0,784 – 0,788	0,787 – 0,787
η (%)	15,7	15,9

Novamente confirma-se que, para o menor valor de tempo de vida dos portadores minoritários, a eficiência praticamente não varia para as células simuladas.

Na Tabela 3.10 apresentam-se os resultados da otimização para os três valores de tempo de vida dos portadores minoritários. Constatou-se que a densidade de corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto diminuem com a redução do tempo de vida dos portadores minoritários e o fator de forma permanece praticamente o mesmo.

Tabela 3.10. Resultados da simulação e características elétricas de células solares com trilhas metálicas de 200 μm e tempos de vida dos portadores minoritários de 50 μs , 10 μs e 1 μs .

τ (μs)	50		10		1	
	Frontal	Posterior	Frontal	Posterior	Frontal	Posterior
C_S (átomos/ cm^3)	5×10^{19}	1×10^{20}	5×10^{19}	1×10^{20}	5×10^{19}	1×10^{20}
x_j (μm)	0,5 – 1,1	1,5 – 2,0	0,6 – 1,1	0,9 – 2,0	0,7 – 1,0	0,2 – 2,0
R_{\square} (Ω/\square)	86 – 39	27 – 20	71 – 39	44 – 20	61 – 43	199 – 20
J_{SC} (mA/cm^2)	30,78 – 30,74	30,91 – 30,98	29,57 – 29,40	29,48 – 29,56	26,14 – 26,13	26,19 – 26,18
V_{OC} (V)	0,638 – 0,636	0,637 – 0,639	0,616 – 0,615	0,615 – 0,616	0,582	0,582
FF	0,782 – 0,787	0,785 – 0,786	0,779 – 0,783	0,781	0,774 – 0,775	0,772 – 0,774
η (%)	15,4	15,5	14,2	14,2	11,8	11,8

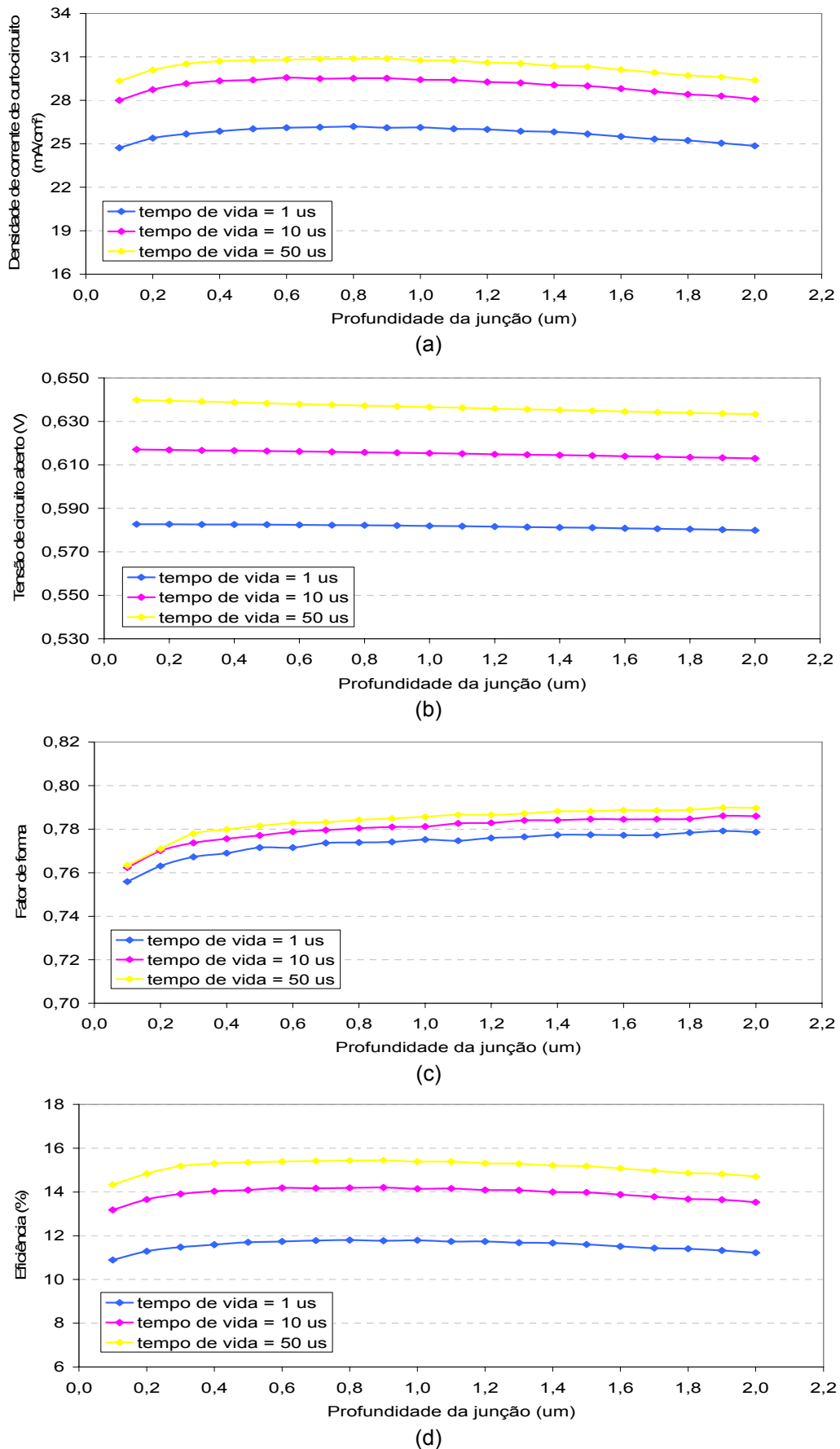


Figura 3.21. (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF e (d) η em função da profundidade da junção e do tempo de vida para o emissor n^+ , concentração em superfície de 5×10^{19} átomos/cm³ e $L = 200 \mu\text{m}$.

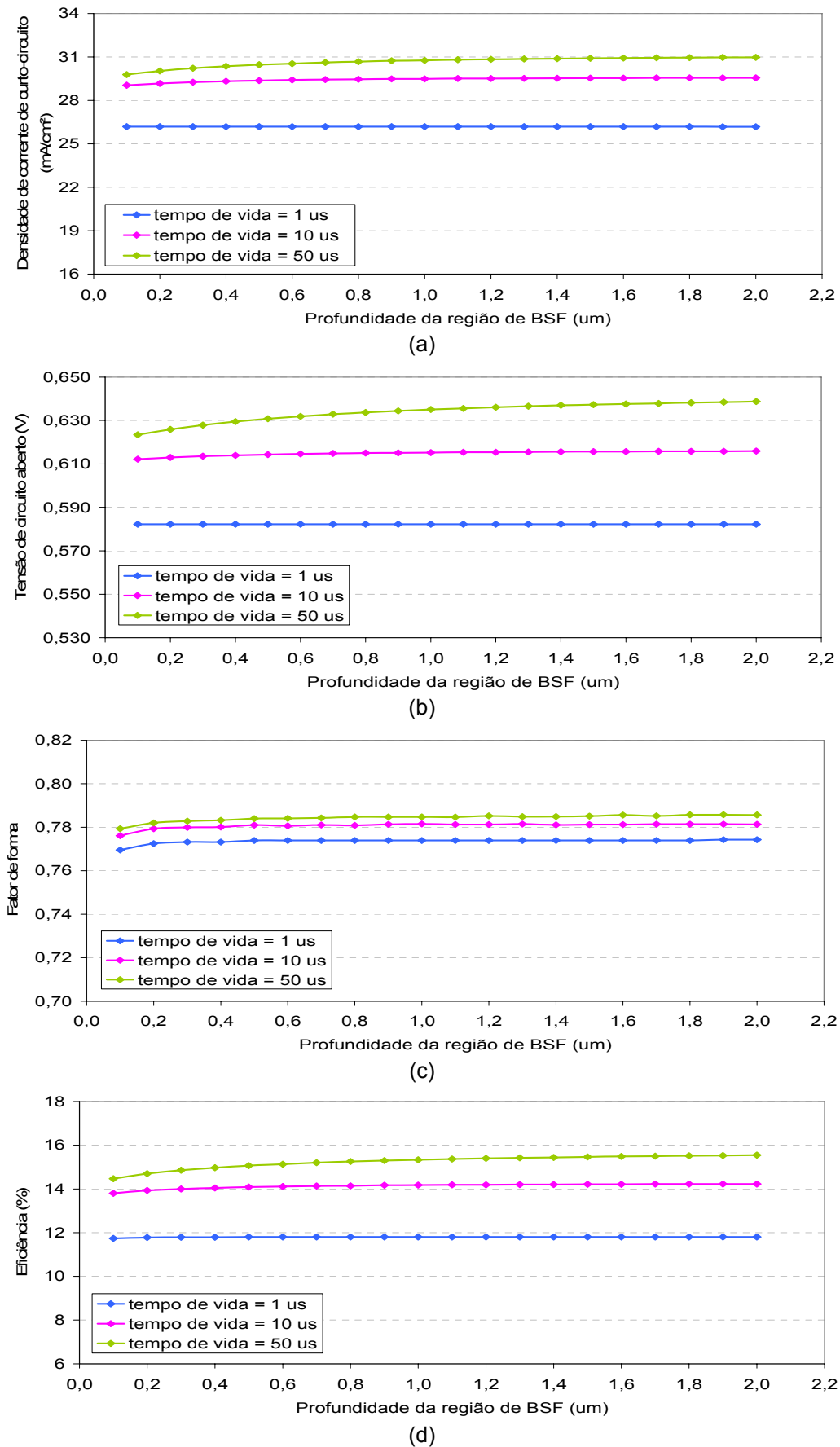


Figura 3.22. (a) J_{SC} , (b) V_{OC} , (c) FF e (d) η em função da profundidade da junção e do tempo de vida para a região posterior p^+ , concentração em superfície de 1×10^{20} átomos/cm³ e $L = 200 \mu\text{m}$.

3.2.3. Comparação de Células Solares com Diferentes Larguras das Trilhas e Valores de Tempo de Vida

3.2.3.1. Regiões Dopadas

Selecionou-se, para ambas as larguras das trilhas e região frontal n^+ e posterior p^+ , a concentração em superfície e o intervalo de x_j que resultaram na máxima eficiência das células solares, para os quatro valores de tempo de vida dos portadores minoritários. O intervalo de resistência de folha, a concentração em superfície e o intervalo de profundidade da junção, para a região frontal e a profundidade da região de BSF, para a região posterior são apresentados na Tabela 3.11, Tabela 3.12, Tabela 3.13 e Tabela 3.14, para os valores de tempo de vida dos portadores minoritários de 1 μs , 10 μs , 50 μs e 100 μs , respectivamente. Conforme esperado, a eficiência cresce com o aumento do τ e é menor, da ordem de 0,3 % a 0,5 %, para a maior largura das trilhas da malha de metalização. A Figura 3.23 ilustra esta conclusão. Também se nota que, somente para os dois maiores valores de τ , a otimização da região posterior aumenta a eficiência da célula solar.

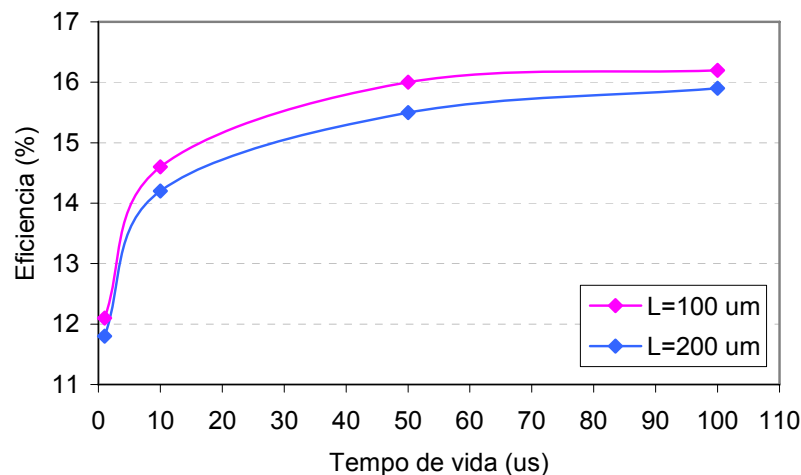


Figura 3.23. Eficiência em função do tempo de vida dos portadores minoritários para $L = 100 \mu\text{m}$ e $L = 200 \mu\text{m}$.

Analisando os resultados das tabelas, observa-se que as concentrações em superfície que resultam em células solares mais eficientes são sempre as mesmas, 5×10^{19} átomos/cm³ e 1×10^{20} átomos/cm³, para a região frontal e posterior,

respectivamente, independentemente do tempo de vida dos portadores minoritários e da largura das trilhas metálicas.

Tabela 3.11. Resultado da otimização por simulação das regiões dopadas para $\tau = 1 \mu\text{s}$.

L (μm)	Região	C_s (átomos/ cm^3)	x_j (μm)	R_{\square} (Ω/\square)	η (%)
100	frontal	5×10^{19}	0,4 – 1,0	107 – 43	12,1
	posterior	1×10^{20}	0,1 – 2,0	398 – 20	12,1
200	frontal	5×10^{19}	0,7 – 1,0	61 – 43	11,8
	posterior	1×10^{20}	0,2 – 2,0	199 – 20	11,8

Tabela 3.12. Resultado da otimização por simulação das regiões dopadas para $\tau = 10 \mu\text{s}$.

L (μm)	Região	C_s (átomos/ cm^3)	x_j (μm)	R_{\square} (Ω/\square)	η (%)
100	frontal	5×10^{19}	0,5 – 1,1	86 – 39	14,6
	posterior	1×10^{20}	0,8 – 2,0	50 – 20	14,6
200	frontal	5×10^{19}	0,6 – 1,1	71 – 39	14,2
	posterior	1×10^{20}	0,9 – 2,0	44 – 20	14,2

Tabela 3.13. Resultado da otimização por simulação das regiões dopadas para $\tau = 50 \mu\text{s}$.

L (μm)	Região	C_s (átomos/ cm^3)	x_j (μm)	R_{\square} (Ω/\square)	η (%)
100	frontal	5×10^{19}	0,4 – 0,8	107 – 53	15,8
	posterior	1×10^{20}	1,7 – 2,0	23 – 20	16,0
200	frontal	5×10^{19}	0,5 – 1,1	86 – 39	15,4
	posterior	1×10^{20}	1,5 – 2,0	27 – 20	15,5

Tabela 3.14. Resultado da otimização por simulação das regiões dopadas para $\tau = 100 \mu\text{s}$.

L (μm)	Região	C_s (átomos/ cm^3)	x_j (μm)	R_{\square} (Ω/\square)	η (%)
100	frontal	5×10^{19}	0,3 – 0,9	143 – 48	16,2
	posterior	1×10^{20}	1,3 – 2,0	31 – 20	16,2
200	frontal	5×10^{19}	0,5 – 1,1	86 – 39	15,7
	posterior	1×10^{20}	1,9 – 2,0	21 – 20	15,9

Comparando os resultados das células solares simuladas com largura das trilhas de 100 μm e 200 μm , tanto para a face frontal quanto para a face posterior, verifica-se que quanto mais larga a trilha, maior o x_j para a mesma concentração em superfície, conforme mostra a Figura 3.24.

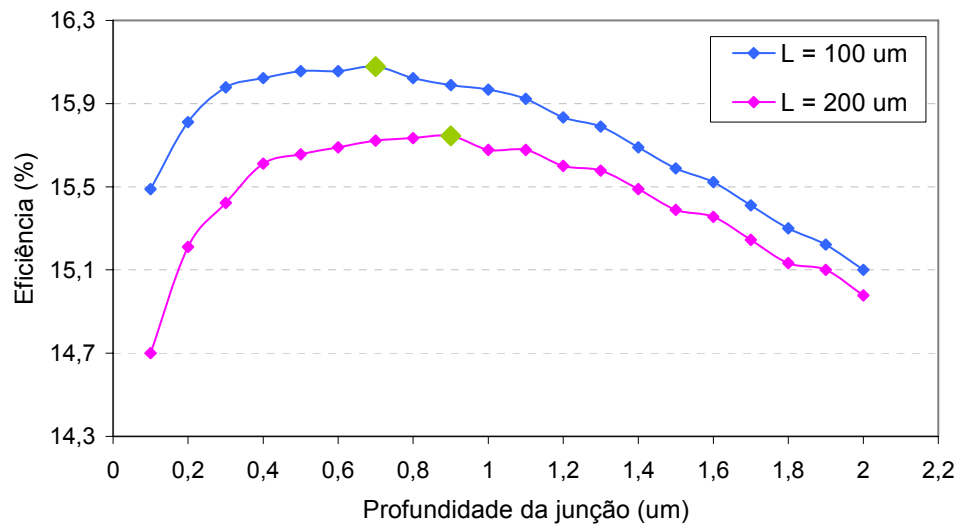


Figura 3.24. Comparação da eficiência das células solares para diferentes larguras das trilhas, $\tau = 100 \mu\text{s}$ e $C_S = 5 \times 10^{19}$ átomos/cm³ no emissor. O ponto destacado corresponde à máxima eficiência.

3.2.3.2. Malha de Metalização

Para cada concentração em superfície e respectivo intervalo de profundidade da junção ou da região de BSF, que resultou nas células solares de maior eficiência, selecionaram-se os parâmetros da malha metálica, tais como: número de trilhas metálicas, distância entre as trilhas metálicas, largura da barra coletora e área metalizada, tanto para a região frontal quanto para a região posterior. Estes parâmetros, para $L = 100 \mu\text{m}$ e $L = 200 \mu\text{m}$, são resumidos na Tabela 3.15, Tabela 3.16, Tabela 3.17 e Tabela 3.18 com o objetivo de comparar os resultados para o tempo de vida dos portadores minoritários de $1 \mu\text{s}$, $10 \mu\text{s}$, $50 \mu\text{s}$ e $100 \mu\text{s}$, respectivamente.

Tabela 3.15. Resultados da otimização por simulação da malha metálica das células solares para $\tau = 1 \mu\text{s}$.

L (μm)	Região	n (trilhas)	d (cm)	L_B (cm)	A_{met} (cm ²)
100	frontal	30 – 23	0,1992 – 0,2558	$6,73 \times 10^{-2}$ – $6,68 \times 10^{-2}$	0,834 – 0,730
	posterior	214	0,0280	0,6	5,526
200	frontal	19 – 17	0,3128 – 0,3506	$6,73 \times 10^{-2}$ – $6,68 \times 10^{-2}$	0,948 – 0,886
	posterior	107	0,0561	0,6	5,526

Tabela 3.16. Resultado da otimização por simulação da malha metálica das células solares para $\tau = 10 \mu\text{s}$.

L (μm)	Região	n (trilhas)	d (cm)	L _B (cm)	A _{met} (cm ²)
100	frontal	29 – 23	0,2078 – 0,2564	$6,92 \times 10^{-2} - 6,86 \times 10^{-2}$	0,830 – 0,741
	posterior	214	0,0280	0,5	5,140
200	frontal	20 – 17	0,2930 – 0,3531	$6,92 \times 10^{-2} - 6,86 \times 10^{-2}$	0,987 – 0,898
	posterior	107	0,0561	0,6	5,526

Tabela 3.17. Resultado da otimização por simulação da malha metálica das células solares para $\tau = 50 \mu\text{s}$.

L (μm)	Região	n (trilhas)	d (cm)	L _B (cm)	A _{met} (cm ²)
100	frontal	31 – 25	0,1950 – 0,2355	$6,94 \times 10^{-2} - 6,92 \times 10^{-2}$	0,860 – 0,773
	posterior	214	0,0280	0,5	5,140
200	frontal	22 – 17	0,2762 – 0,3522	$6,94 \times 10^{-2} - 6,92 \times 10^{-2}$	1,045 – 0,899
	posterior	107	0,0561	0,6	5,526

Tabela 3.18. Resultado da otimização por simulação da malha metálica das células solares para $\tau = 100 \mu\text{s}$.

L (μm)	Região	n (trilhas)	d (cm)	L _B (cm)	A _{met} (cm ²)
100	frontal	33 – 25	0,1792 – 0,2423	$6,96 \times 10^{-2} - 6,93 \times 10^{-2}$	0,913 – 0,791
	posterior	150	0,0400	0,5	4,500
200	frontal	22 – 17	0,2756 – 0,3512	$6,96 \times 10^{-2} - 6,93 \times 10^{-2}$	1,047 – 0,901
	posterior	107	0,0561	0,6	5,526

Comparando as tabelas, observa-se que, para a região frontal, a distância entre as trilhas apresenta uma tendência a diminuir com o aumento do tempo de vida dos portadores minoritários, para ambas as larguras das trilhas. Ainda para essa região, verifica-se que a largura da barra coletora cresce com o aumento do tempo de vida dos portadores minoritários, independente da largura das trilhas metálicas.

Na região de BSF, a distância entre trilhas somente se altera para $L = 100 \mu\text{m}$ e $\tau = 100 \mu\text{s}$, permanecendo a mesma para todas as outras situações avaliadas. A largura da barra coletora para a região posterior é de 0,6 cm para $L = 200 \mu\text{m}$ e de 0,5 cm para a menor largura das trilhas. Nesse caso, somente para o menor valor de

tempo de vida dos portadores minoritários L_B sobe para 0,6 cm, podendo concluir que a largura da barra coletora deve ser maior para células com menor eficiência.

Como resultado da análise anterior, pode-se constatar que com o aumento da largura das trilhas da malha de metalização, a área metalizada ótima para a região frontal cresce. Na região posterior nota-se a mesma tendência. Também se verifica que a área metalizada no emissor cresce com o aumento do tempo de vida dos portadores minoritários, para ambas as larguras das trilhas.

4. DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES

4.1. Difusão de Fósforo em Forno Convencional

4.1.1. Descrição do Processo e Metodologia

Neste trabalho utilizaram-se amostras de 60 mm x 60 mm, ilustradas na Figura 4.1, obtidas a partir de lâminas de silício multicristalino de 125 mm x 125 mm. O substrato é tipo p, dopado com boro, resistividade de 0,5 $\Omega\cdot\text{cm}$ a 2,0 $\Omega\cdot\text{cm}$, concentração de oxigênio de 8×10^{17} átomos/ cm^3 , concentração de carbono de 1×10^{18} átomos/ cm^3 e espessura média de (240 ± 40) μm .



Figura 4.1. Lâmina de silício multicristalino com área de 60 mm x 60 mm.

Esta etapa centrou-se nos processos de difusão em forno convencional, variando o tempo e a temperatura, a fim de se obter a resistência de folha selecionada para o processamento das células solares, da ordem $50 \Omega/\square$ [33] e também realizar a medição do τ para avaliar a existência de *gettering*.

O processo para a otimização experimental do emissor inicia com um ataque planar CP4 na superfície das lâminas constituído de $\text{HNO}_3:\text{CHCOOH}_3:\text{HF}$ (7,7:3,6:1), a fim de retirar os primeiros micrometros danificados nos processos de corte. O ataque é realizado à temperatura ambiente durante 5 minutos. Este tempo foi avaliado e considerado suficiente para atacar aproximadamente 30 μm da superfície das lâminas multicristalinas. Posteriormente ao ataque, as lâminas são lavadas com água deionizada ($\text{H}_2\text{O DI}$).

Antes da limpeza que antecede o processo de difusão, realiza-se a medida de tempo de vida inicial dos portadores minoritários. Esse parâmetro permite avaliar a degradação do material introduzida pelo processamento bem como a recuperação ou melhora proporcionada por mecanismos de *gettering*. O equipamento utilizado em todas as medições é o WCT100 da Sinton Consulting [24].

Após a medição do tempo de vida inicial realiza-se, então, a limpeza RCA nas lâminas. Esta consiste em submergir primeiramente as amostras na solução RCA-1, constituída de $\text{H}_2\text{O}_2:\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O DI}$ (1:1:5) a 80°C durante 10 minutos, a fim de atacar orgânicos e alguns tipos de metais, tais como Cu, Ag, Ni, Co e Cd. Após a lavagem com água deionizada, as lâminas são colocadas na solução de $\text{H}_2\text{O}_2:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O DI}$ (1:1:5) a 80°C durante 10 minutos, conhecida como RCA-2, para atacar os metais tais como Al, Fe, Mg, Au, Cu, Na, K e evitar a deposição destes sobre a superfície do silício [24]. Depois de várias lavagens em água deionizada as lâminas estão prontas para a difusão.

No processo de difusão as amostras foram dopadas com fósforo em ambas as faces e processadas no forno convencional, ilustrado na Figura 4.4. Analisou-se a influência das seguintes temperaturas de difusão: 800 °C, 820 °C, 830 °C, 840 °C, 850 °C e 900 °C. Processaram-se conjuntos de amostras com tempos de difusão de 15 minutos e 30 minutos. Também se variaram as rampas de redução da temperatura do forno, antes da extração para verificar se há influência no tempo de vida dos portadores de carga minoritários. No total foram implementados nove processos diferentes, com cinco amostras cada, para verificar qual o tempo e a temperatura que permitem obter a resistência de folha otimizada por simulação.

Cada amostra difundida foi caracterizada por meio da medição do tempo de vida dos portadores de carga minoritários e da resistência de folha. A resistência de folha foi medida em 20 pontos, nas faces frontal e posterior das lâminas, com o equipamento denominado "4 pontas" [52] após a retirada do óxido de silício. A Figura 4.2 ilustra a distribuição dos pontos utilizada para medir a resistência de folha. A partir das medidas, foram calculados os valores médios e o desvio padrão com o objetivo de caracterizar o processo de difusão. O tempo de vida dos portadores minoritários foi medido com a amostra imersa em HF 48%, após o ataque químico em CP4, para a eliminação da junção p-n.

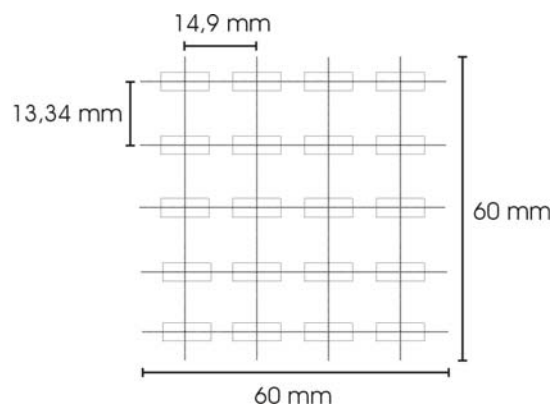


Figura 4.2. Distribuição de pontos utilizada para medida da resistência de folha nas faces frontal e posterior das lâminas.

4.1.2. Resultados Experimentais e Análise

Os valores de resistência de folha em função da temperatura e do tempo de difusão e rampas de redução da temperatura antes da extração das lâminas são apresentados na Tabela 4.1. A rampa de aquecimento após a entrada das amostras foi de 10 °C/min.

Conforme esperado, observou-se que a resistência de folha diminui com a temperatura. Assim, temos regiões mais dopadas para temperaturas mais altas e regiões menos difundidas para temperaturas mais baixas. Este resultado está ilustrado na Figura 4.3 para o tempo de difusão de 30 minutos e rampas de entrada e saída de 10 °C/min [24].

A temperatura e o tempo com os quais se obtém a resistência de folha

selecionada para o processo de metalização por serigrafia é de 820 °C por 30 minutos. Também pôde-se constatar que as rampas de redução da temperatura não afetam a resistência de folha, e foram fixadas as rampas de aumento e redução da temperatura em 10 °C/min.

Tabela 4.1. Resultados das medidas de resistência de folha nas faces frontal e posterior das lâminas de silício multicristalino.

T (°C)	Tempo (min)	Rampa de saída (°C/min)	R _□ frontal (Ω/□)	R _□ posterior (Ω/□)
800	30	10	81 ± 5	87 ± 7
		50	82 ± 9	88 ± 15
820	30	10	48,5 ± 2,5	50 ± 5
		50	58 ± 6	59 ± 4
830	30	10	47,5 ± 1,5	49 ± 3
840	30	10	38 ± 6	38 ± 5
850	30	10	35,1 ± 2,5	33,5 ± 1,9
		50	38 ± 24	28,9 ± 2,9
			37 ± 7	34 ± 4
900	15	50	18,0 ± 1,6	17,9 ± 0,6

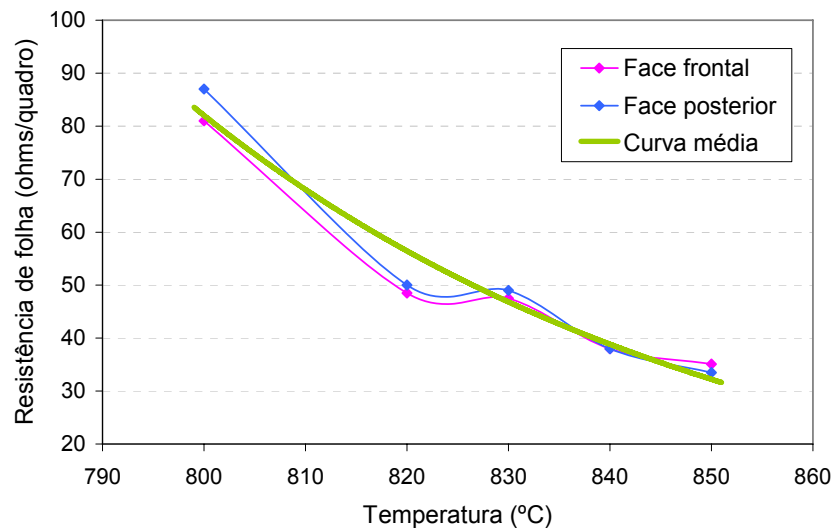


Figura 4.3. Resistência de folha em função da temperatura para as rampas de 10 °C/min e tempo de difusão de 30 minutos.

Na Tabela 4.2 comparam-se os resultados das medidas de tempo de vida dos portadores minoritários antes e após os processos de difusão.

Tabela 4.2. Resultado das medidas de tempo de vida dos minoritários antes e após as difusões.

T (°C)	Tempo (min)	Rampa saída (°C/min)	τ_i (μs)	τ_f (μs)
800	30	10	42 ± 9	85 ± 50
		50	58 ± 27	54 ± 13
820	30	10	38 ± 6	64 ± 18
		50	65 ± 40	56 ± 9
830	30	10	42 ± 5	54 ± 13
840	30	10	40 ± 6	100 ± 50
850	30	10	95 ± 13	49 ± 4
		50	48 ± 28	112 ± 60
			62 ± 30	47 ± 15
900	15	50	31 ± 3	56 ± 21

Com exceção da temperatura de 850 °C, todas as amostras processadas com rampas de saída de 10 °C/min apresentaram uma ligeira melhora no tempo de vida dos minoritários. Por outro lado, aquelas realizadas com rampas de saída de 50 °C/min não apresentaram melhora, exceto para a temperatura de 900 °C e tempo de 15 minutos. O maior valor de tempo de vida alcançado foi de aproximadamente 100 μs e ocorreu para as difusões a 840 °C e 850 °C.

4.2. Fabricação e Caracterização de Células Solares em Substratos Multicristalinos

4.2.1. Processo para a Estrutura n^+pn^+

Para fabricar células solares em silício multicristalino com estrutura n^+pn^+ , o processo foi implementado por meio das seguintes etapas: limpeza, difusão e oxidação das lâminas em forno convencional, deposição de filme anti-reflexo e metalização por serigrafia, como ilustra a Figura 4.4. Após a fabricação, todas as células solares foram caracterizadas sob condições padrão de medição (1000 W/m², espectro AM1,5G e temperatura das células de 25 °C).

Optou-se por fabricar células solares n^+pn^+ , pois nos procedimentos experimentais otimizou-se somente o emissor. Além disso, esse é um processo de fabricação de células solares que produz uma estrutura simples na qual a região

posterior n^+ é perfurada pela malha metálica composta de alumínio e prata. Deste modo, a região n^+ posterior é curto-circuitada e a malha metálica contacta a região p da base. Essa estrutura é a mais usada na indústria de células solares pela sua simplicidade e baixo custo [53].

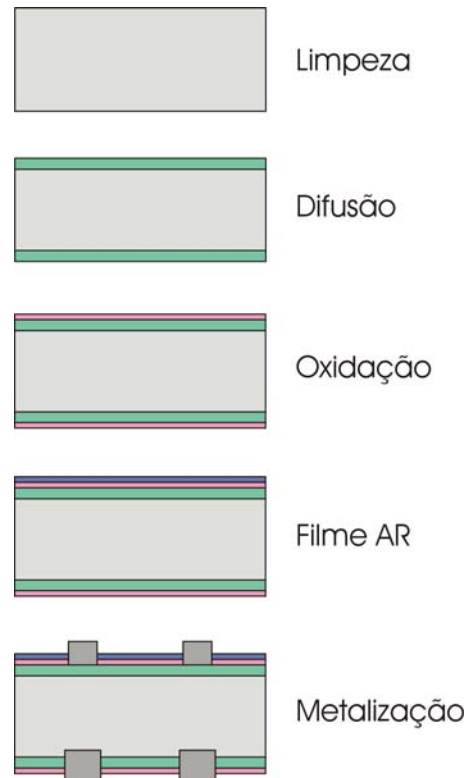


Figura 4.4. Etapas do processo de fabricação das células solares.

As lâminas, ao serem processadas para fabricar células solares, devem ser rigorosamente limpas, pois uma pequena contaminação pode degradar a superfície e o volume do material semicondutor. Portanto, inicialmente todas as lâminas foram atacadas com CP4 pelo tempo de 5 minutos. Posteriormente ao ataque, as lâminas foram lavadas com água deionizada (H_2O -DI) e, em seguida, imersas em RCA-1 e RCA-2, ambas a $80^\circ C$ pelo tempo de 10 minutos. Depois de várias lavagens com água deionizada, as lâminas foram difundidas.

O emissor n^+ foi implementado por meio da deposição de fósforo com $POCl_3$ e fluxo de gases de N_2 e O_2 no forno convencional, este ilustrado na Figura 4.5. A difusão foi realizada a $820^\circ C$ por 30 minutos para o processo de metalização por serigrafia. A Figura 4.5 (b) mostra o detalhe das lâminas de Si-mc saindo do forno de difusão.



Figura 4.5. (a) Forno de difusão da marca Bruce e (b) detalhe das lâminas saindo do forno.

O processo de difusão em forno convencional foi caracterizado em sete passos [24]:

1. Prévio: tempo necessário para a passagem do fluxo de N_2 com objetivo de retirar as impurezas e homogeneizar a temperatura dentro do forno;
2. Entrada: tempo necessário para as lâminas entrarem no forno evitando uma rampa brusca;
3. Rampa de subida: variação da temperatura de $700\text{ }^\circ\text{C}$ para $820\text{ }^\circ\text{C}$ para a realização do processo de difusão;
4. Difusão: tempo necessário para a difusão de $POCl_3$ na lâmina de silício;
5. Purga: tempo necessário para a exaustão do dopante do ambiente;
6. Rampa de descida: variação da temperatura de $820\text{ }^\circ\text{C}$ para $700\text{ }^\circ\text{C}$ para retirada das lâminas do forno;
7. Saída: tempo necessário para as lâminas saírem do forno, evitando elevados gradientes de temperatura.

Realizada a difusão, as lâminas precisam passar novamente pela limpeza

antes de serem passivadas. Para atacar o óxido formado durante a difusão, utilizou-se uma solução de HF (0,1%) diluído, mais lavagem em água deionizada. Em seguida, as lâminas foram novamente imersas em RCA-2 a 80 °C por 10 minutos e lavadas em H₂O-DI. Então, as amostras foram submetidas ao processo de oxidação, para passivação da superfície com óxido de silício. A seguir, foi depositada uma camada AR em uma das faces das lâminas e as mesmas foram metalizadas por serigrafia.

A Figura 4.6 mostra um esquema da estrutura da célula solar n⁺pn⁺ resultante do processo desenvolvido. Células solares com esta estrutura foram desenvolvidas por Janssen et al. [55], para lâminas de 180 μm. Obtiveram eficiências em torno de 14,5 %, utilizando nitreto de silício como filme AR e passivação.

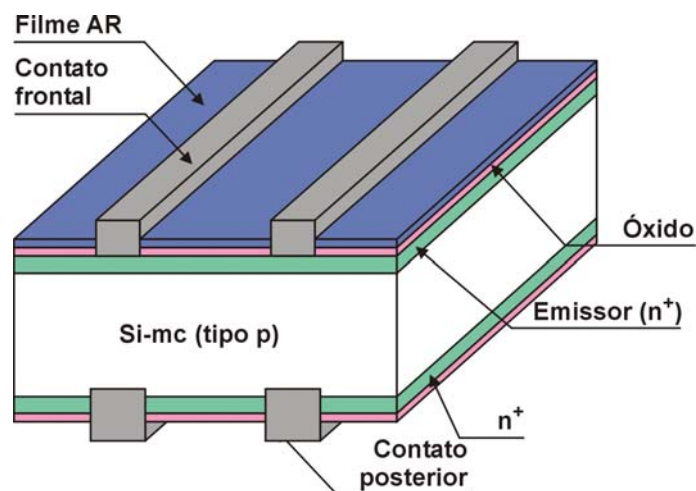


Figura 4.6. Estrutura n⁺pn⁺ da célula solar desenvolvida neste trabalho.

4.2.2. Otimização do Processo de Metalização por Serigrafia

Para a evaporação do filme anti-reflexo utilizou-se a deposição por feixe de elétrons, também conhecida como *electron beam*. O processo foi realizado na evaporadora ilustrada na Figura 4.7 (a), que possui um sistema planetário que permite o processamento de 12 lâminas quadradas de uma única vez.

A dupla camada AR foi obtida evaporando os filmes anti-reflexo de TiO₂ e Si₃N₄. A Figura 4.7 (b) mostra uma lâmina de Si-mc com duplo filme AR, resultado deste processo.

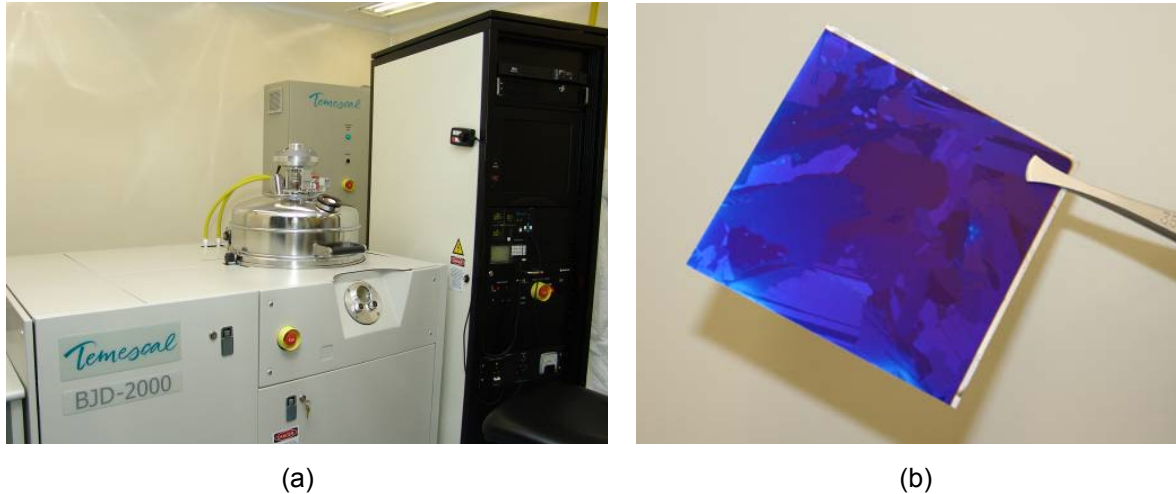


Figura 4.7. (a) Evaporadora Temescal e (b) lâmina de Si-mc com duplo filme AR.

Após a evaporação dos filmes AR, iniciou-se o processo de serigrafia para a metalização. A deposição da pasta serigráfica consiste de três etapas: 1) a lâmina de silício é posicionada em um porta-amostra com sistema de vácuo para a fixação da mesma; 2) o porta-amostra é deslocado para baixo da máscara que contém o desenho a ser transferido à lâmina e 3) um rodo distribui a pasta sobre a máscara que é depositada sobre a lâmina através das regiões permeáveis.

A máscara utilizada na face frontal foi mostrada na Figura 3.3 (a), e possui trilhas de $150\ \mu\text{m}$ e distância entre as mesmas de $0,2423\ \text{cm}$ que, juntamente com as duas barras coletoras de $6,93 \times 10^{-2}\ \text{cm}$ de largura cada, produzem um fator de sombra de 8,79 %. A máscara utilizada na face posterior, ilustrada na Figura 4.8, possui trilhas de $150\ \mu\text{m}$ e barra coletora de $1\ \text{cm}$ de largura, totalizando 49,52 % de área metalizada.

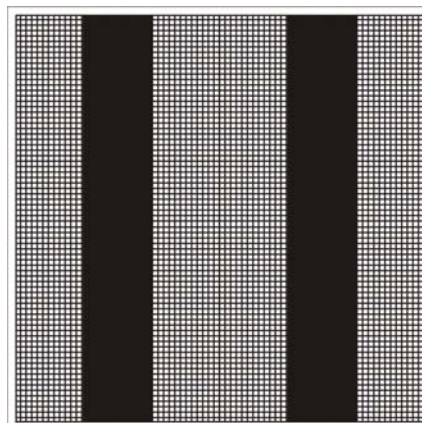


Figura 4.8. Máscara posterior, otimizada para a metalização por serigrafia.

O equipamento utilizado para depositar as pastas sobre o substrato denomina-se *screen-printer* e está ilustrado na Figura 4.9. A Figura 4.9 (b) mostra um detalhe do porta-amostra com a lâmina de Si-mc serigrafada.

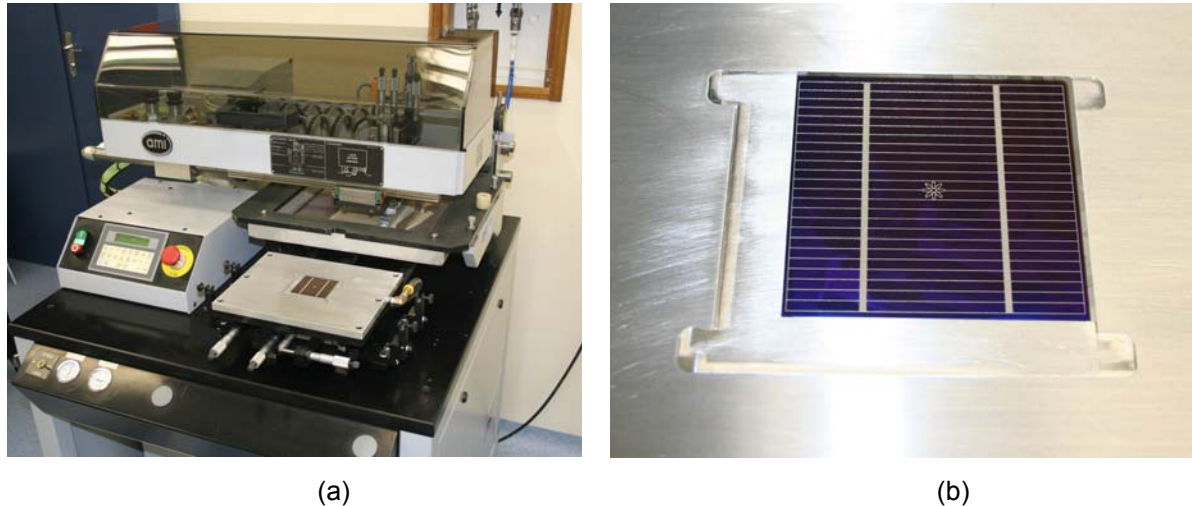


Figura 4.9. (a) *Screen-printer* e (b) detalhe de uma lâmina metalizada sobre o porta-amostra.

Para se obter contatos metálicos uniformes é importante que seja realizado um ótimo ajuste da distância entre a tela e o porta-amostra, entre o rodo e a tela e entre o rodo e o porta-amostra.

Após a deposição da pasta de Ag, a mesma é secada em ambiente controlado no forno de esteira. Utilizou-se a pasta de prata PV156 e a pasta de alumínio PV202, ambas produzidas pela DuPont, nas faces frontal e posterior, respectivamente. Depois da deposição e secagem da pasta de Ag, o processo é repetido para a pasta de Ag/Al. O forno utilizado para secagem e queima das pastas é da marca RTC [37] e pode ser visto na Figura 4.10 (a). A Figura 4.10 (b) mostra uma lâmina com a malha metálica frontal resultante do processo de serigrafia.

O sistema do forno para secagem e queima das pastas é do tipo esteira sendo que o aquecimento é produzido por lâmpadas emissoras de radiação infravermelha, havendo três zonas centrais de aquecimento, onde as temperaturas podem ser controladas independentemente uma da outra.

A queima das pastas foi realizada para as temperaturas de 840 °C, 860 °C, 880 °C, 900 °C e 920 °C e velocidades da esteira de 180 cm/min,

190 cm/min e 220 cm/min. Os valores da temperatura e da velocidade da esteira foram selecionados segundo dados apresentados na literatura para pastas da DuPont depositadas sobre substratos de silício multicristalino [54].

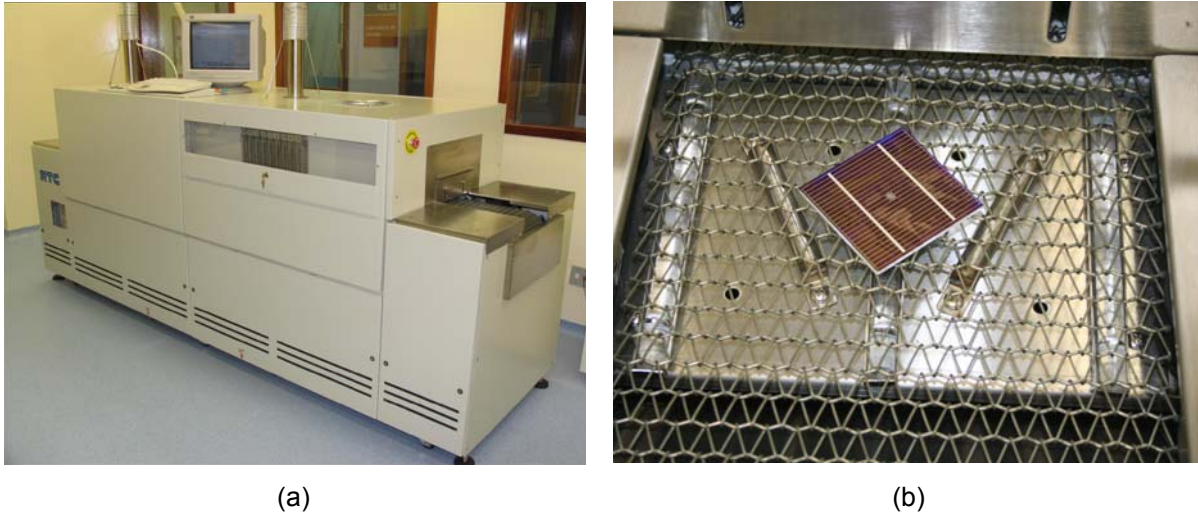


Figura 4.10. (a) Forno RTC de secagem e queima de pastas de serigrafia e (b) detalhe da lâmina saindo do forno.

Após o processo de metalização, as células foram marcadas com um sistema *laser* para separar a região dopada frontal da região dopada posterior, a fim de evitar curto-circuito.

4.2.3. Caracterização das Células Solares

Após a implementação do processo de fabricação, foi realizada a caracterização das células solares fabricadas. As medidas foram realizadas com um simulador solar desenvolvido pela equipe do NT-Solar [56]. A qualidade das trilhas metálicas foi observada no microscópio eletrônico de varredura (MEV).

4.2.3.1. Influência da Temperatura no Processo de Queima da Pasta

Na Tabela 4.3 e Figura 4.11 apresentam-se as características elétricas das células solares em função da temperatura de queima das pastas para a velocidade da esteira de 190 cm/min. Observa-se que as células mais eficientes resultaram das temperaturas de queima das pastas entre 860 °C e 880 °C. A maior eficiência atingida foi de 11,5 %, com FF de 0,741, para a temperatura de queima de 860 °C.

Nota-se que os maiores valores de FF ocorrem para estas temperaturas e determinam a eficiência das células solares. A J_{SC} é pouco afetada pela temperatura de queima da pasta, sendo menor para a menor temperatura. No entanto, a V_{OC} aumenta com a diminuição da temperatura de queima das pastas. Não foram realizadas queimas abaixo de 840 °C e nem acima de 920 °C, pois se observou que os menores FF ocorreram próximos a estas temperaturas.

Tabela 4.3. Densidade de corrente elétrica de curto-circuito (J_{SC}), tensão de circuito aberto (V_{OC}), fator de forma (FF) e eficiência (η) em função da temperatura de queima das pastas para a velocidade de esteira de 190 cm/min.

T (°C)	Célula	J_{SC} (mA/cm ²)	V_{OC} (mV)	FF	η (%)
840	A	26,1	575,9	0,666	10,0
	B	25,8	574,5	0,547	8,1
	Média	26,0	575,2	0,607	9,1
860	A	27,4	584,9	0,571	9,2
	B	26,9	577,4	0,741	11,5
	C	27,7	585,2	0,626	10,1
	Média	27,3	582,5	0,646	10,3
880	A	26,6	559,6	0,646	9,6
	B	27,5	577,7	0,690	11,0
	C	26,8	569,1	0,710	10,8
	D	26,9	573,0	0,738	11,4
	E	27,1	576,7	0,677	10,6
	Média	27,0	571,2	0,690	10,7
900	A	27,2	566,5	0,624	9,6
	B	25,7	558,1	0,651	9,3
	Média	26,5	562,3	0,638	9,5
920	A	26,4	554,0	0,557	8,2
	B	26,2	558,1	0,646	9,4
	Média	26,3	556,1	0,602	8,8

Dessa análise, constatou-se que os parâmetros que limitam a célula solar são o fator de forma e a densidade de corrente de curto-circuito. O primeiro é influenciado principalmente pela resistência série e paralelo e o segundo pela refletância da superfície da célula solar, pois não foi realizado nenhum processo de texturação.

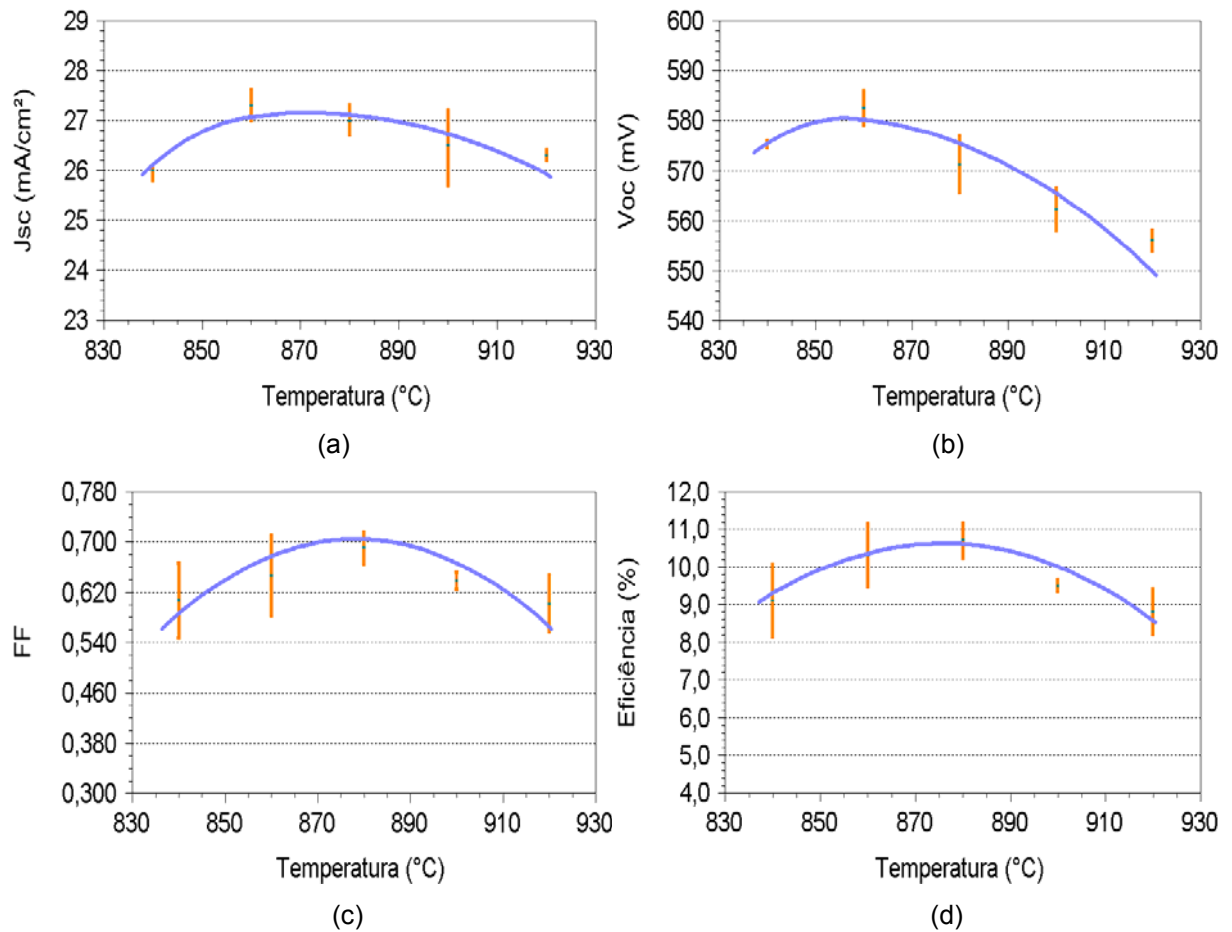


Figura 4.11. (a) J_{sc} , (b) V_{oc} , (c) FF e (d) η em função da temperatura de queima das pastas para a velocidade da esteira de 190 cm/min. As barras apresentam o desvio para cada temperatura.

Foi desenvolvido um processo similar por Olainsen et al. [54] para células solares de 125 mm x 125 mm. Obtiveram-se eficiências de 15,3 %, utilizando temperatura de queima de 870 °C e velocidade da esteira de 200 cm/min.

A fim de verificar a uniformidade dos contatos metálicos obtidos, principalmente na face frontal, algumas amostras foram analisadas com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura (MEV). Na Figura 4.12 ilustra-se a superfície de uma trilha de Ag e observa-se que a deposição foi uniforme e a largura da trilha de 150 μm é a definida pela máscara. A espessura da trilha foi de aproximadamente 16 μm , conforme mostra a Figura 4.13.

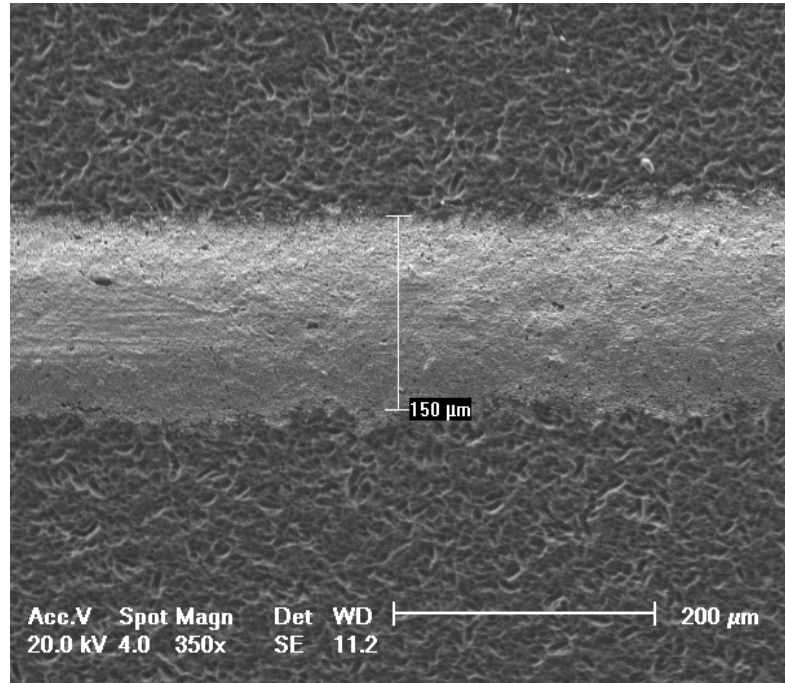


Figura 4.12. Imagem obtida em MEV mostrando a largura da trilha metálica.

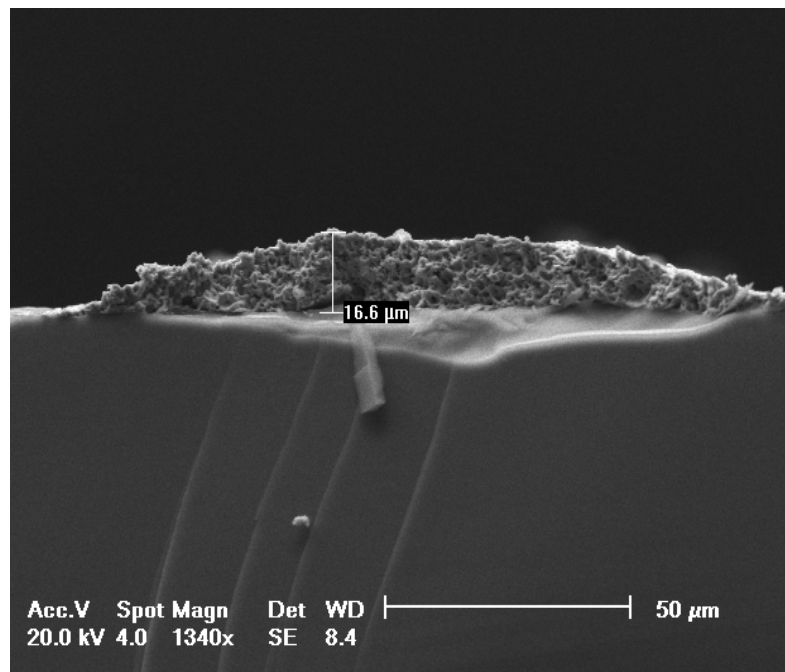


Figura 4.13. Imagem obtida em MEV mostrando a altura da trilha metálica.

4.2.3.2. Influência da Resistência Série e Paralelo na Eficiência da Célula Solar

A resistência em paralelo deve-se à fuga de corrente pelas bordas da célula solar ou regiões de contorno de grãos, enquanto que a resistência série se deve à

resistência da malha de metalização. Sabe-se que o efeito da baixa resistência paralelo reduz principalmente a tensão de circuito aberto e o fator de forma. Por outro lado, uma alta resistência série reduz o FF e a I_{SC} , afetando menos a V_{OC} .

A Figura 4.14 apresenta as características corrente-tensão (I-V) de três células fabricadas: 840-190-B, 880-180-B e 880-190-A e na Tabela 4.4 resumem-se os valores dos parâmetros de caracterização. As temperaturas de queima de pasta foram de 840 °C e 880 °C e a velocidade da esteira de 180 cm/min e 190 cm/min.

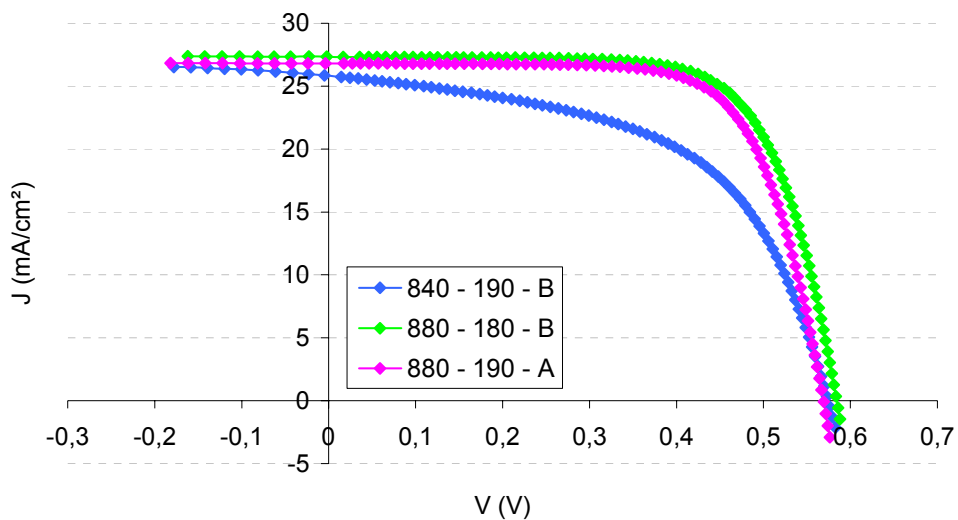


Figura 4.14. Comparação das características elétricas corrente-tensão (I-V) de três células solares fabricadas.

A célula 840-190-B apresentou resistência série e paralelo quando comparada com as outras duas células, provocando o baixo fator de forma de 0,547, como mostra a Tabela 4.4. No entanto, as células 880-180-B e 880-190-A apresentam menor resistência série.

Tabela 4.4. Densidade de corrente elétrica de curto-circuito (J_{SC}), tensão de circuito aberto (V_{OC}), fator de forma (FF) e eficiência (η) de três células solares fabricadas.

Célula	J_{SC} (mA/cm ²)	V_{OC} (mV)	FF	η (%)
840 – 190 – B	25,8	574,5	0,547	8,1
880 – 180 – B	27,3	584,3	0,707	11,3
880 – 190 – A	26,8	569,1	0,710	10,8

4.2.3.3. Influência da Velocidade da Esteira no Processo de Queima da Pasta

Na Tabela 4.5 apresentam os parâmetros elétricos de células solares fabricadas em função da velocidade da esteira para o processo de queima de pasta. Para a temperatura de 880 °C processaram-se células com velocidades de esteira de 180 cm/min e 190 cm/min. Esta redução na velocidade praticamente não modificou o desempenho do dispositivo. O mesmo resultado pode ser verificado para a temperatura de 900 °C, quando a velocidade da esteira foi aumentada de 190 cm/min para 220 cm/min. Concluiu-se, então, que a influência da velocidade da esteira é pequena e predomina o efeito da temperatura na eficiência da célula.

Tabela 4.5. Densidade de corrente elétrica de curto-circuito (J_{sc}), tensão de circuito aberto (V_{oc}), fator de forma (FF) e eficiência (η) em função da velocidade de esteira no processo de queima das pastas.

T (°C)	V_E (cm/min)	Célula	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF	η (%)
880	180	A	25,5	571,4	0,662	9,7
		B	27,3	584,3	0,707	11,3
	Média		26,4	577,9	0,685	10,5
	190	A	26,6	559,6	0,646	9,6
		B	27,5	577,7	0,690	11,0
		C	26,8	569,1	0,710	10,8
		D	26,9	573,0	0,738	11,4
		E	27,1	576,7	0,677	10,6
	Média		27,0	571,2	0,692	10,7
	900	190	A	27,2	566,5	0,624
B			25,7	558,1	0,651	9,3
Média		26,5	562,3	0,638	9,5	
220		A	26,8	563,5	0,631	9,5
		B	27,6	558,3	0,637	9,8
Média		27,2	560,9	0,634	9,7	

4.2.3.4. Influência do Filme AR na Eficiência das Células Solares

O filme anti-reflexo afeta principalmente a corrente elétrica da célula solar e o

fator de forma, na metalização por serigrafia. Comparando os resultados mostrados na Tabela 4.6, pode-se analisar como a espessura do filme anti-reflexo interfere nos resultados finais da célula solar. A camada constituída de óxido de silício com espessura de 15 nm e os dois filmes finos com espessura de 27,5 nm, somando uma espessura total da ordem de 70 nm, resultou na maior eficiência da célula solar, devido, principalmente, ao aumento do fator de forma. Conforme esperado, nota-se que as células solares com a menor refletância média e com o mínimo próximo a comprimentos de onda que correspondem ao pico do espectro solar AM1,5G, apresentam a maior J_{SC} . O filme com 77 nm de espessura, embora apresentasse boa V_{OC} e J_{SC} , resultou em células com baixo FF. Provavelmente, os contatos metálicos não conseguiram perfurar de forma adequada o filme fino mais espesso.

Tabela 4.6. Parâmetros elétricos de caracterização das células solares, espessura da camada anti-reflexo (óxido de silício + nitreto de silício + óxido de titânio), refletância média no intervalo de 400 nm a 1050 nm ($\rho_{média}$) e comprimento de onda que corresponde ao mínimo da refletância de quatro células solares.

Célula	Espessura SiO ₂ + AR (nm)	$\rho_{média}$ (%) de 400 a 1050 nm	λ_{min} (nm)	V_{OC} (mV)	FF	J_{SC} (mA/cm ²)	η (%)
880 – 190 - A	20 + 25 + 25	13,40	560	559,6	0,646	26,6	9,6
880 – 190 - D	15 + 27,5 + 27,5	14,04	560	573,0	0,738	26,9	11,4
880 – 190 - B	-	17,07	450	570,2	0,669	24,9	9,5
880 – 190 - C	15 + 30 + 32	15,29	510	575,8	0,455	26,4	6,9

Considerando que o tempo de vida dos minoritários é da ordem de 60 μ s, podem-se comparar os melhores resultados experimentais com os valores otimizados. Para o tempo de vida dos minoritários de 50 μ s e largura das trilhas de 100 μ m, a eficiência máxima é de 15,8 %, com $J_{SC} = 31,5$ mA/cm², $V_{OC} = 636$ mV e FF = 0,79 . Os valores experimentais medidos foram iguais a: $J_{SC} = 26,9$ mA/cm², $V_{OC} = 577$ mV e FF = 0,74, resultando na eficiência de 11,5 %. Esta diferença pode ser explicada, pois a estrutura utilizada para a fabricação de células solares é n⁺pn⁺, enquanto que a estrutura simulada foi n⁺pp⁺. A segunda estrutura possibilita maior tensão de circuito aberto e densidade de corrente de curto circuito, como mostra a comparação entre os resultados simulados e experimentais. Além disso, a malha metálica das células solares foi implementada com trilhas com 150 μ m de largura, aumentando o fator de sombra e diminuindo a densidade de corrente de curto-

circuito. Também é preciso realizar ajustes no processo, como por exemplo, reduzir a refletância e melhorar a passivação das superfícies.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Nesta dissertação, otimizaram-se e desenvolveram-se etapas de um processo de fabricação de células solares em substratos de silício multicristalino. Primeiramente, foi realizada a otimização por simulação das regiões dopadas e das malhas de metalização. De acordo com os resultados obtidos nas simulações para a metalização realizada por serigrafia com malha metálica com trilhas de 100 μm , é possível obter células solares com 16,2 % de eficiência se o intervalo de resistência de folha para o emissor for de 48 Ω/\square a 143 Ω/\square , com região de campo retrodifusor p^+ e tempo de vida dos portadores minoritários de 100 μs . Para o tempo de vida dos portadores minoritários de 50 μs a eficiência de 15,8 % pode ser alcançada, quando a resistência de folha da região n^+ for de 53 Ω/\square a 107 Ω/\square . Se o tempo de vida dos portadores minoritários for de 10 μs , a eficiência máxima é de 14,6 %, com intervalo de resistência de folha de 39 Ω/\square a 86 Ω/\square . Para o menor valor de tempo de vida dos portadores minoritários, de 1 μs , a eficiência de 12,1 % pode ser alcançada para o intervalo de resistência de folha otimizado de 43 Ω/\square a 107 Ω/\square . Também se verificou que com a diminuição do tempo de vida dos minoritários a tensão de circuito aberto e a densidade de corrente de curto-circuito são os parâmetros elétricos que diminuem.

Para a região de BSF, os intervalos de resistência de folha resultantes da otimização, também para malha metálica com trilhas de 100 μm , foram de 20 Ω/\square a 31 Ω/\square , 20 Ω/\square a 23 Ω/\square , 20 Ω/\square a 50 Ω/\square e 20 Ω/\square a 398 Ω/\square para o tempo de vida dos portadores minoritários de 100 μs , 50 μs , 10 μs e 1 μs , respectivamente.

A comparação dos resultados da simulação de células solares com largura das trilhas da malha de metalização de 100 μm e de 200 μm demonstrou que a eficiência é menor, da ordem de 0,3 % a 0,5 %, para a maior largura das trilhas. Também se verificou que quanto maior a largura das trilhas, maior a profundidade da

junção e da região de campo retrodifusor para a mesma concentração de átomos em superfície.

Com a comparação das malhas de metalização otimizadas por simulação, pôde-se constatar que com o aumento da largura das trilhas, a área metalizada na região frontal aumentou, diminuindo a densidade de corrente de curto-circuito e o fator de forma levemente. Na região posterior observou-se a mesma tendência. Também se verificou que a área metalizada no emissor cresceu com o aumento do tempo de vida dos minoritários, para ambas as larguras das trilhas.

No processo para a otimização experimental das regiões dopadas, obtiveram-se os valores de resistência de folha em função da temperatura da difusão. A temperatura e o tempo com os quais se obtém a resistência de folha de $50 \Omega/\square$, selecionada para a fabricação de células solares com metalização por serigrafia é de $820 \text{ }^\circ\text{C}$ por 30 minutos. A resistência de folha média resultante é de aproximadamente $48 \Omega/\square$, e o tempo de vida dos portadores minoritários é de $64 \mu\text{s}$. Também se verificou que o tempo de vida dos portadores minoritários aumenta levemente com a difusão de fósforo, produzindo um *gettering* pouco eficaz.

Da análise das células solares fabricadas constatou-se que a temperatura de queima das pastas afeta o desempenho das células solares, enquanto que a velocidade da esteira praticamente não influencia nos resultados dos parâmetros elétricos. O fator de forma limita a eficiência dos dispositivos e depende da temperatura de queima das pastas. As maiores eficiências foram encontradas para a temperatura de queima entre $860 \text{ }^\circ\text{C}$ e $880 \text{ }^\circ\text{C}$, com velocidade da esteira de 190 cm/min .

A espessura do filme anti-reflexo influencia o fator de forma e a corrente elétrica das células solares. A camada constituída de óxido de silício, com espessura de 15 nm , e os dois filmes finos, de nitreto de silício e dióxido de titânio com espessura de $27,5 \text{ nm}$, resultaram na maior eficiência da célula solar, devido, principalmente, ao aumento no fator de forma.

A maior eficiência alcançada foi de $11,5 \%$, com fator de forma de $0,74$, para a

temperatura de queima de pasta de 860 °C, velocidade da esteira de 190 cm/min e camada anti-reflexo de 70 nm.

Considerando que o tempo de vida dos minoritários medido é da ordem de 60 μ s, podem-se comparar os resultados experimentais com os valores simulados, para o tempo de vida dos minoritários de 50 μ s. Neste caso, a eficiência máxima é de 15,8 % e para células solares fabricadas com o processo desenvolvido a eficiência foi de 11,5 %. Além de ajustes no processo, essa diferença pode ser explicada, pois a estrutura utilizada para a fabricação de células solares é n^+pn^+ , enquanto que a estrutura simulada é n^+pp^+ .

A continuidade deste trabalho pode ser dada com a implementação de um processo repetitivo para a fabricação de células solares em silício multicristalino com a estrutura n^+pn^+ e n^+pp^+ , o desenvolvimento de processos de texturação da superfície de lâminas de silício multicristalino, a otimização dos processos de *gettering* e o desenvolvimento da metalização por deposição química sem eletrodos (*electroless*).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] LORENZO, E. **Electricidad Solar: Engenharia de los Sistemas Fotovoltaicos**. Espanha, 1994. 337 p.

[2] HIRSHMAN, W.; HERING, G.; SCHMELA, M. The Q factor, Sharp and the Market. **Photon International**. v. 3, p. 140 – 174, 2008.

[3] Commission of the European Communities. Directorate General for Energy. Photovoltaic in 2010: the world PV market to 2010. v. 3, p. 232, 1995.

[4] HONSBURG, C.; BOWDEN, S. Photovoltaics CDROM. Disponível em: <<http://www.udel.edu/igert/pvcdrom>>. Acesso em: 25 janeiro 2008.

[5] VEGA, A. M. In: **Fundamentos, Dimensionado y Aplicaciones de la Energia Solar Fotovoltaica**. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Madrid, 1995, p. 1.3 – 1.27.

[6] GREEN, M. A.; EMERY, K.; KING, D. L.; HISIKAWA, Y.; WARTA, W. Solar Cell Efficiency Tables (Version 27). **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 14, p. 45 – 48, 2006.

[7] GREEN, M. A.; EMERY, K.; KING, D. L.; HISHIKAWA, Y.; WARTA, W. Solar Cell Efficiency Tables (Version 29). **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 15, n. 1, p. 35 – 40, 2007.

[8] FAUST, D. New World Record: Kyocera Achieves 18.5 % Efficiency for Multicrystalline Silicon Solar Cells. Disponível em: <http://www.kyocera.co.za/index/news/news_detail.L3NvbGFyX2VsZW50cmVjX3N5c>

3RIbXMvbmV3cy8yMDA3L05ldWVyX1dlbHRyZWtvcnRfX0t5b2NlcmFfZXJ6aWVsdF9laW5lb9XaXJrdW5nc2dyYWRfdm9uXzE4XzVfUHJvemVudF9fYmVpX211bHRpa3Jpc3RhbgxpbnVuX1NpbGl6aXVtLVNvbGFyemVsbGVu.html>. Acesso em: 16 janeiro 2008.

[9] PONCE-ALCÁNTARA, S.; CAÑIZO, C.; LUQUE, A. Adaptation of Monocrystalline Solar Cell Process to Multicrystalline Materials. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 87, p. 411 – 421, 2005.

[10] GREEN, M. A. **Silicon Solar Cells: Advanced Principles and Practice**. Sydney: UNSW, 1995. 366 p.

[11] LAUTENSCHLAGER, H.; LUTZ, F.; SCHETTER, C.; SCHUBERT, U.; SCHINDLER, R. Mc-Silicon Solar Cells with >17 % Efficiency. In: **Conference Record of the Twenty-Sixth IEEE, Photovoltaic Specialists Conference: 1997**, Anaheim. Proceedings... 1997, p. 7 – 12.

[12] WANG, H.; YANG, H.; YU, H.; XI, J.; HU, H.; CHEN, G. Weak Light Effect in Multicrystalline Silicon Cells. **Microelectronics Journal**, v. 33, n. 8, p. 671 - 674, 2002.

[13] RAMOS, C. R. **Otimização do Emissor n+ e da Metalização por Deposição Química para Células Solares Industriais**. Porto Alegre. 2006. 89 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia dos Materiais), PGETEMA, PUCRS, Brasil.

[14] SCHULTZ, O.; RIEPE, S.; GLUNZ, S. W. Thermal Degradation and Gettering of Solar Grade Multicrystalline Silicon. In: **19th European Photovoltaic Solar Energy Conference: 2004**, Paris. Proceedings... 2004, p. 516 – 519.

[15] CAÑIZO, C.; MOEHLECKE, A.; ZANESCO, I.; LUQUE, A. Cz Bifacial Solar Cells. **IEEE Electron Device Letters**, v. 21, n. 4, p. 179 – 180, 2000.

[16] SANA, P.; SALAMI, J.; ROHATGI, A. Fabrication and Analysis of High-Efficiency

Plycrystalline Silicon Solar Cells. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 40, n. 8, p. 1461 – 1468, 1993.

[17] SCHULTZ, O.; GLUNZ, S. W.; RIEPE, S.; WILLEKE, G. P. High-Efficiency Solar Cells on Phosphorus Gettered Multicrystalline Silicon Substrates. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 14, n. 8, p. 711 – 719, 2006.

[18] NARAYANAN, S. Large Area Multicrystalline Silicon Solar Cells in High Volume Production Environment – History, Status, New Processes, Technology Transfer Issues. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 74, p.107 – 115, 2002.

[19] GREEN, M. A. **Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications**. Kensington: NSW, 1992. 274 p.

[20] LIPINSKI, M.; PIOTROWSKI, T.; PANEK, P.; CICHOSZEWSKI, J. Investigation of Influence of Gettering and Passivation on Lifetime Distribution in Mc-Si. In: **21st European Photovoltaic Solar Energy Conference**: 2006, Dresden. Proceedings... 2006, p. 1493 – 1496.

[21] KUNST, M.; GRUNOW, P. Characterization of Multicrystalline Silicon Wafers by Non-Invasive Measurements. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 83, p. 409 – 419, 2004.

[22] KUROBE, K.; MIURA, M.; HIRANO, K.; MATSUNAMI, H. Spatial Distribution of Minority-Carrier Lifetime and Local Concentration of Impurities in Multicrystalline Silicon Solar Cells. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 74, p. 183 – 193, 2002.

[23] MOEHLECKE, A. **Conceptos Avanzados de Tecnologia para Células Solares con Emissores p⁺ Dopados com Boro**. Madri. 1996. 218 p. Tese (Doutorado em Engenharia), UPM, Espanha.

[24] PEREIRA, M. S. **Análise de Gettering por Alumínio no Processo de**

Fabricação de Células Solares. Porto Alegre. 2007. 83 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia dos Materiais), PGETEMA, PUCRS, Brasil.

[25] NARAYANAN, S.; WENHAM, S. R.; GREEN, M. A. 17.8-Percent Efficiency Polycrystalline Silicon Solar Cells. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 37, n. 2, p. 382 – 384, 1990.

[26] SCHULTZ, O.; GLUNZ, S. W.; RIEPE, S.; WILLEKE, G. P. Gettering of Multicrystalline Silicon for High-Efficiency Solar Cells. In: **21st European Photovoltaic Solar Energy Conference: 2006**, Dresden. Proceedings... 2006, p. 788 – 791.

[27] MACDONALD, D. H.; CUEVAS, A.; KERR, M. J.; SAMUNDSETT, C.; RUBY, D.; WINDERBAUM, S.; LEO, A. Texturing Industrial Multicrystalline **Silicon Solar Cells**. **Solar Energy**, v. 76, p. 277 – 283, 2004.

[28] GANGOPADHYAY, U.; DHUNGEL, S. K.; BASU, P. K.; DUTTA, S. K.; SAHA, H.; YI, J. Comparative Study of Different Approaches of Multicrystalline Silicon Texturing for Solar Cell Fabrication. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 91, p. 285 – 289, 2007.

[29] SZLUFCHIK, J.; DUERINCKX, F.; HORZEL, J.; KERSCHAUER, E.; DEKKERS, H.; WOLF, S.; CHOULAT, P.; ALLEBE, C.; NIJS, J. High-Efficiency Low-Cost Integral Screen-Printing Multicrystalline Silicon Solar Cells. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 74, p. 155 – 163, 2002.

[30] INOMATA, Y.; FUKUI, K.; SHIRASAWA, K. Surface Texturing of Large Área Multicrystalline Silicon Solar Cells Using Reactive Ion Etching Method. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 48, p. 237 – 242, 1997.

[31] ZHAO, J.; WANG, A.; GREEN, M. A. 19.8 % Efficient “Honeycomb” Textured Multicrystalline and 24.4 % Monocrystalline Silicon Solar Cells. **Applied Physics Letters**, v. 73, n. 14, p. 1991 – 1993, 1998.

- [32] ZHAO, J.; WANG, A.; CAMPBELL, P.; GREEN, M. A. A 19.8 % Efficient Honeycomb Multicrystalline Silicon Solar Cell with Improved Light Trapping. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 46, n. 10, p. 1978 – 1983, 1999.
- [33] PANEK, P.; LIPINSKI, M.; BELTOWSKA-LEHMAN, E.; DRABCZIK, K.; CIACH, R. Industrial Technology of Multicrystalline Silicon Solar Cells. **Opto-Electronics Review**, v. 11, n. 4, p. 269 – 275, 2003.
- [34] GOETZBERGER, A.; HOFFMANN, V. U. **Photovoltaic Solar Energy Generation**. Fraunhofer ISE, Freiburg, 2005. 232 p.
- [35] HOFSTETTER, J.; CAÑIZO, C.; PONCE-ALCÁNTARA, S.; LUQUE, A. Application of Optimized SiN_x:H Double Layer Anti-Reflection Coatings on Multicrystalline Silicon Solar Cells. In: **22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference**: 2007, Milan. Proceedings... 2007, p. 1694 – 1697.
- [36] HONSBURG, C.; BOWDEN, S. Photovoltaics CDROM. Disponível em: <<http://www.udel.edu/igert/pvcdrom>>. Acesso em: 24 janeiro 2008.
- [37] MALLMANN, A. P. **Metalização Serigráfica de Células Solares Bifaciais Fabricadas por Processos Térmicos Rápidos**. Porto Alegre. 2006. 74 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia dos Materiais), PGETEMA, PUCRS, Brasil.
- [38] POPOV, V. G. Solar Cells Based on Multicrystalline Silicon. **Semiconductor, Physics, Quantum, Electronics and Optoelectronics**, v. 3, n. 4, p. 479 – 488, 2000.
- [39] LEE, E. J.; KIM, D. S.; LEE, S. H. Ni/Cu Metallization for Low-Cost High-Efficiency PERC Cells. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 74, p. 65 – 70, 2002.
- [40] HILALI, M. M. **Understanding and Development of Manufacturable**

Screenprinted Contacts on High Sheet-Resistance Emitters for Low-Cost Silicon Solar Cells. Atlanta. 2005. 286 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Computacional), Georgia Institute of Technology, EUA.

[41] SZLUFCIK, J.; ELGAMEL, H. E.; GHANNAM, M.; NIJS, J.; MERTENS, R. Simple Integral Screenprinting Process for Selective Emitter Polycrystalline Silicon Solar Cells. **Applied Physics Letters**, v. 59, n. 13, p. 1583 – 1584, 1991.

[42] LIBAL, J.; PETRES, R.; BUCK, T.; KOPECEK, R.; HAHN, G.; FERRE, R.; VETTER, M.; MARTIN, I.; WAMBACH, K.; ROEVER, I.; FATH, P. N-Type Multicrystalline Silicon Solar Cells: BBr_3 -Diffusion and Passivation of P^+ -Diffused Silicon Surfaces. Disponível em: http://www.uni-konstanz.de/photovoltaics/index_pu.htm. Acesso em: 25 janeiro 2008.

[43] UPADHYAYA, A.; SHEORAN, M.; RISTOW, A.; ROHATGI, A.; NARAYANAN, S.; RONCIN, S. Greater Than 16 % Efficient Screen Printed Solar Cells on 115-170 μm Thick Cast Multicrystalline Silicon. Disponível em: <http://www.ece.gatech.edu/research/UCEP/papers/4world/Upadhyaya_4th_WCPEC.pdf>. Acesso em: 25 janeiro 2008.

[44] DUERINCKX, F.; CHOULAT, P.; BEAUCARNE, G.; YOUNG, R. J. S.; ROSE, M.; RABY, J. A. Improved Screen Printing Process for Very Thin Multicrystalline Silicon Solar Cells. Disponível em: <<http://www.imec.be/wwwinter/energy/FILES/Duerinckx.pdf>>. Acesso em: 25 janeiro 2008.

[45] KRÄNZL, A.; KOPECEK, R.; PETER, K.; SCHNEIDER, A.; FATH, P. Industrial $\eta=15.5$ % Mc-Si Solar Cells with Boron BSF and Open Rear Contact. In: **20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition**, 2005, Barcelona. Proceedings of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2005.

[46] CUEVAS, A.; RUSSEL, D. A. Co-Optimization of the Emitter Region and the Metal Grid of Silicon Solar Cells. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 8, p. 603 – 616, 1992.

- [47] CUEVAS, A., STOCKINGS, M., LAU, J., PETRAVIC, M. The Recombination Velocity of Boron Diffused Silicon Surfaces. In: **14th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition**, 1997, Barcelona. Proceedings... 1997.
- [48] BARAÑANO, F. R. **Evaluación de la Serigrafía como Técnica de Metalización para Células Solares Eficientes**. Bilbao. 2001. 240 p. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidad del País Vasco, Espanha.
- [49] ZANESCO, I.; MOEHLECKE, A. Implementação de Duas Unidades Geradoras de Energia Elétrica com Módulos Fotovoltaicos Eficientes. Porto Alegre, 2008. 82 p. (Relatório técnico, MME 008/2005)
- [50] ZANESCO, I.; MOEHLECKE, A. Células Solares Industriais de Alta Eficiência. Porto Alegre, 2005. (Relatório técnico, CEEE 9920468).
- [51] MOEHLECKE, A.; ZANESCO, I.; LUQUE, I. Practical High Efficiency Bifacial Solar Cells. In: **IEEE First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion**: 1994, Hawaii. Proceedings... 1994, p. 1663 – 1666.
- [52] PAN, A. C. **Processos de Fabricação de Células Solares Bifaciais em Fornos de Aquecimento Rápido**. Porto Alegre. 2004. 123 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais), PGETEMA, PUCRS, Brasil.
- [53] SERRANO, J. R. G. **Contribución al Estudio de las Características Eléctricas de Metalizaciones de Células Solares Realizadas por Técnicas Serigráficas**. Bilbao. 2001. 267 p. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidad del País Vasco, Espanha.
- [54] OLAINSEN, B. R.; HOLT, A.; MARSTEIN, E. S. Optimization of a Firing Furnace. In: **21st European Photovoltaic Solar Energy Conference**: 2006, Dresden. Proceedings... 2006, p. 1083 – 1087.
- [55] JANSSEN, L.; RINIO, M.; BORCHERT, D.; WINDGASSEN, H.; BÄTZNER, D. L.; KURZ, H. Passivating Thin Bifacial Silicon Solar Cells for Industrial Production.

Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 15, p. 469 – 475, 2007.

[56] EBERHARDT, D. **Desenvolvimento de um Sistema Completo para Caracterização de Células Solares**. Porto Alegre. 2005. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia dos Materiais), PGETEMA, PUCRS, Brasil.