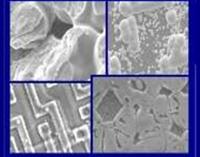




PUCRS

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

IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DE JUNÇÃO FLUTUANTE EM CÉLULAS SOLARES INDUSTRIAIS DE SILÍCIO TIPO N

NATÁLIA FEIJÓ LOPES

QUÍMICA INDUSTRIAL E LICENCIADA

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

Porto Alegre

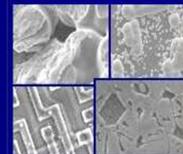
Janeiro, 2013



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

IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DE JUNÇÃO FLUTUANTE EM CÉLULAS SOLARES DE SILÍCIO TIPO N

NATÁLIA FEIJÓ LOPES

QUÍMICA INDUSTRIAL E LICENCIADA

ORIENTADOR: Prof. Dr. ADRIANO MOEHLECKE

CO-ORIENTADORA: Profa. Dra. IZETE ZANESCO

Dissertação de Mestrado 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 aos projetos 1º) "Células Solares Bifaciais em Substratos Finos e com Região p⁺ Localizada", contrato CEEE-D/9942397. 2º) "Desenvolvimento de Células Solares Eficientes em Lâminas de Silício Tipo n, convênio FINEP 2102/09.

**Porto Alegre
Janeiro, 2013.**



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DE JUNÇÃO FLUTUANTE EM CÉLULAS SOLARES INDUSTRIAIS DE SILÍCIO TIPO N

CANDIDATA: NATÁLIA FEIJÓ LOPES

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

Adriano Moehlecke

DR. ADRIANO MOEHLECKE - ORIENTADOR

Izete Zanescio

DRA. IZETE ZANESCO - CO-ORIENTADORA

BANCA EXAMINADORA

G. Wehr

DRA. GABRIELA WEHR - DA FACULDADE DE MATEMÁTICA - PUCRS

R. Ligabue

DRA. ROSANE ANGÉLICA LIGABUE - DO PGETEMA/FENG - PUCRS

PUCRS

Campus Central

Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 30 - Sala 103 - CEP: 90619-900

Telefone: (51) 3353.4059 - Fax: (51) 3320.3625

E-mail: engenharia.pg.materiais@pucrs.br

www.pucrs.br/feng

*Nos campos da observação, o
acaso favorece apenas as mentes
preparadas.*

(Louis Pauster)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a PUCRS e ao PGETEMA pela infraestrutura e pelos profissionais que fazem com que todos os ambientes sejam acolhedores e ótimos para desenvolver um bom trabalho.

À CEEE, pelo auxílio financeiro e a Capes, pela bolsa de estudos.

Aos professores Adriano Moehlecke e Izete Zanesco, pelo voto de confiança e a oportunidade de fazer parte do NT-Solar.

Aos membros da banca examinadora. Rosane Ligabue por todas as contribuições que vem fazendo a minha formação, desde a graduação, e a Gabriela Wehr, pelo auxílio no início deste trabalho e pelas contribuições feitas a essa dissertação.

Ao grupo NT-Solar, especialmente as pessoas que fizeram com que todos os dias fossem mais fáceis, mais alegres... As queridas: Deise, Milena, Vanessa Alves, Vanessa Osório e minha amiga Angélica Cenci, que graças a Deus, esteve ao meu lado em mais uma jornada.

Ao meu amigo, namorado, Tomás. Pelas revisões, figuras e pelos muitos finais de semana dedicados a esse trabalho, com toda paciência, carinho e companheirismo. Sou muito feliz contigo, tive muita sorte de tu estares ao meu lado nesse momento.

Aos meus amigos e minha família, por entenderem minha ausência e sempre me apoiarem. Especialmente ao meu pai Renato, meu padrasto Toninho, à minha irmã Renata, minha mãe Lara e minha sobrinha/afilhada e meu eterno bebê, Rayana. Amo muito vocês! A força desse sentimento que sempre me deu forças para lutar a favor dos meus objetivos.

Muito Obrigada!

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	5
SUMÁRIO	6
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS.....	12
LISTA DE SÍMBOLOS	13
RESUMO.....	15
ABSTRACT.....	16
1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	17
1.1. Justificativas.....	17
1.2. Objetivos	18
2. CÉLULAS SOLARES P⁺NN⁺: ESTRUTURA BÁSICA, PASSIVAÇÃO DE SUPERFÍCIES, CARACTERIZAÇÃO E SIMULAÇÃO	20
2.1. A Célula Solar p ⁺ nn ⁺	20
2.2. Estrutura Básica	20
2.2.1. Recombinação em Superfície	22
2.2.2. Passivação de Superfície com SiO ₂	23
2.2.3. Passivação de Superfície com Nitreto de Silício.....	25
2.2.4. Passivação de Superfície com Junção Flutuante	27
2.2.4.1. Junção Posterior	28
2.2.4.2. Junção Frontal	30
2.3. Técnicas de Caracterização de Regiões Dopadas e de Células Solares.....	33
2.3.1. Caracterização de Regiões Dopadas	33
2.3.2. Caracterização das Células Solares.....	36
2.4. Simulação de Células Solares.....	39
2.4.1. PC-1D	39
2.4.2. Athena e Atlas	40
2.4.3. Criação do Dispositivo no programa ATHENA.....	41
2.4.3.1. Malha	41
2.4.3.2. Material de Partida	42
2.4.3.3. Dopagem	42
2.4.3.4. Eletrodos.....	43

2.4.3.5. O Dispositivo	43
2.4.4. Simulação do Dispositivo no programa ATLAS.....	43
2.4.4.1. Modelos Físicos	43
2.4.4.2. Radiação.....	44
2.4.4.3. Condições de Contorno	45
2.4.4.4. Resultado da Simulação	45
3. IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DE REGIÃO N⁺ SOBRE REGIÃO P⁺ EM CÉLULAS SOLARES P⁺NN⁺	47
3.1. Introdução.....	47
3.2. Análise Experimental da Formação da Junção Flutuante	48
3.2.1. Metodologia.....	48
3.2.1.1. Processo em Forno de Esteira.....	48
3.2.1.2. Processo em Forno de Tubo de Quartzo.....	52
3.2.2. Resultados dos Processos de Difusão de Fósforo.....	53
3.3. Fabricação e Análise de Células Solares.....	59
3.3.1. Metodologia: Processo de Fabricação das Células Solares.....	59
3.3.2. Resultados.....	62
3.3.2.1. Implementação da Junção Flutuante em Forno de Esteira.....	62
3.3.2.2. Implementação da Junção Flutuante em Forno de Tubo de Quartzo...70	
3.4. Análise por Simulações	71
3.4.1. Análise com o Programa PC-1D	71
3.4.2. Análise com os Programas Athena e Atlas	74
3.4.2.1. Perfis de Dopagem	74
3.4.2.2. Caracterização Elétrica	78
4. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE CONTINUIDADE.....	86
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88
APÊNDICE.....	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Estrutura básica da célula solar [7].	21
Figura 2.2. Diagrama de bandas com uma lâmina de silício tipo p com carga fixa positiva em camada isolante [15].	26
Figura 2.3. Razão entre a velocidade de recombinação em superfície vs. nível de dopagem para diferentes relações entre seções de captura de elétrons e lacunas, para superfícies do tipo p e do tipo n [4].	27
Figura 2.4. Perfis de boro e fósforo após uma oxidação a 1000 °C [18].	30
Figura 2.5. Célula solar de estrutura $(n^+)p^+n^+$	31
Figura 2.6. Célula solar de estrutura $(n^+)p^+n^+$, com junção flutuante isolada [21]....	31
Figura 2.7 Perfil de boro (quadrados verdes) e perfil de fósforo (triângulos vermelhos). Perfil do emissor de boro sobrecompensado por uma difusão de fósforo rasa, sendo que o perfil de difusão resultante é apresentado pela linha preta [21].	32
Figura 2.8 . Esquema do funcionamento da técnica <i>ECV</i> [22].	34
Figura 2.9. Esquema da técnica de ponta quente para determinação do tipo de dopagem em uma superfície da lâmina de silício.....	36
Figura 2.10. Influência das resistências (a) série e (b) paralelo sobre a característica I-V de células solares [27].	39
Figura 2.11. Janela com a interface principal do programa PC-1D.	40
Figura 2.12. Exemplo de malha com 3.690 nós na rede, visualizada por meio do TONYPLOT.....	42
Figura 2.13. Exemplo de estrutura básica de célula solar simulada no ATHENA.	44
Figura 2.14. Exemplo de curva I-V de uma célula solar simulada no ATLAS.....	45
Figura 2.15. Exemplo de potencial de fotogeração simulada no ATLAS, visualizada por meio do TONYPLOT.	46
Figura 3.1. Perfil de átomos de boro de uma célula solar p^+n^+ desenvolvida no NT-Solar [36].	47

- Figura 3.2. Formação do filme dopante pela técnica de *spin-on*: (a) o substrato é submetido à alta rotação, (b) evaporação dos solventes na estufa e (c) difusão em forno de esteira.....49
- Figura 3.3. Esquema do forno de esteira usado para a difusão de fósforo. As zonas 1, 2 e 3 são aquecidas por lâmpadas de tungstênio e totalizam 76,1 cm.50
- Figura 3.4. Perfis de temperatura estimados para os processos de difusão de fósforo para obtenção de junção flutuante: (a) processos com uma passagem ou primeira passagem dos processos com múltiplas passagens pelo forno RTC; (b) processos com múltiplas passagens pelo forno RTC.....52
- Figura 3.5. Perfil de fósforo para o processo 5, realizado a 750 °C, com $V_E = 50$ cm/min. Como a concentração de fósforo ficou abaixo da de boro, não ocorreu inversão. Sendo que o perfil de átomos de boro foi reproduzido na figura para auxiliar na comparação.54
- Figura 3.6. Perfis de fósforo para os processos 6 e 8, realizados a 800 °C e 820 °C, respectivamente, com $V_E = 50$ cm/min e com duas passagens pelo forno RTC.....55
- Figura 3.7. Perfis de fósforo para o processo 9, realizado a 850 °C, com $V_E = 50$ cm/min e com duas passagens pelo forno RTC.....55
- Figura 3.8. Perfis de fósforo para os processos 11 e 12, realizados a 900 °C, com $V_E = 50$ cm/min (uma e duas passagens), $V_E = 100$ cm/min e $V_E = 133$ cm/min, com uma passagem pelo forno RTC. O perfil de átomos de boro foi reproduzido na figura para auxilia na comparação.....56
- Figura 3.9. Perfil e tipo de impureza conforme mostrado no programa de controle do equipamento ECV para o processo 12, para $V_E = 100$ cm/min. A mudança nas cores das linhas indica a mudança do tipo de portador de carga e deste modo, de dopagem.....57
- Figura 3.11. Perfil de impurezas medido na face dopada com boro depositado por *spin-on* e fósforo tendo como fonte as paredes do tubo de quartzo onde se difunde fósforo a partir de POCl_3 . Não há evidência de formação de junção flutuante sobre a região p^+ e a linha vermelha é o perfil de átomos de boro.58
- Figura 3.12. Processo para a fabricação de células solares com a estrutura $(n^+)p^+nn^+$59
- Figura 3.13. Desenho da malha metálica usada nas células solares de 4,18 cm²....61
- Figura 3.14. Curvas J-V das melhores células solares produzidas com a estrutura p^+nn^+ (processo padrão) e com difusão de fósforo para produção de

junção flutuante em forno de esteira com $V_E = 50$ cm/min (duas passagens pelo forno) e $T_D = 800^\circ\text{C}$ e $T_D = 850^\circ\text{C}$ 63

- Figura 3.15. Curvas J-V das melhores células solares produzidas com a estrutura p^+nn^+ (processo padrão) e com difusão de fósforo para produção de junção flutuante em forno RTC a 900°C , para quatro condições de processamento: $V_E = 50$ cm/min (uma e duas passagens), 100 cm/min e 133 cm/min. 64
- Figura 3.16. Curvas J-V das melhores células solares produzidas com difusão de fósforo para produção da junção flutuante em forno de esteira com $T_D = 900^\circ\text{C}$ e $V_E = 50$ cm/min, 100 cm/min e 133 cm/min, utilizando diferentes pastas para metalizar a face frota. 66
- Figura 3.17. Distribuição na lâmina de silício das eficiências das células solares produzidas: (a) pelo processo padrão (estrutura p^+nn^+) e (b) pelo processo 6, $T_D = 800^\circ\text{C}$, $V_E = 50$ cm/min (2x). 67
- Figura 3.18. Distribuição na lâmina de silício das eficiências das células solares produzidas: (a) com o processo 09, $T_D = 850^\circ\text{C}$, $V_E = 50$ cm/min (2x), e (b) com o processo 11, $T_D = 900^\circ\text{C}$, $V_E = 50$ cm/min (2x). 68
- Figura 3.19. Distribuição na lâmina de silício das eficiências das células solares produzidas no processo 12b sob $T_D = 900^\circ\text{C}$, $V_E = 50$ cm/min: (a) metalizadas com pasta de Ag/Al e (b) metalizadas com pasta de Al. Não foi determinada a eficiência das células marcadas com “-” porque as mesmas quebraram no processo de clivagem. 68
- Figura 3.20. Distribuição na lâmina de silício das eficiências das células solares produzidas no processo 12b com $T_D = 900^\circ\text{C}$, $V_E = 100$ cm/min: (a) metalizadas com pasta de Ag/Al e (b) metalizadas com pasta de Al. 69
- Figura 3.21. Distribuição na lâmina de silício das eficiências das células solares produzidas no processo 12b com $T_D = 900^\circ\text{C}$, $V_E = 133$ cm/min: (a) metalizadas com pasta de Ag/Al e (b) metalizadas com pasta de Al. Não foi determinada a eficiência das células marcadas com “-” porque as mesmas quebraram no processo de clivagem. 70
- Figura 3.22. Curvas J-V de células solares produzidas com a estrutura p^+nn^+ (processo padrão) e com difusão de fósforo em forno de tubo de quartzo, sem fluxo de POCl_3 , a 900°C , para obtenção de junção flutuante. 71
- Figura 3.23. Diagrama da simulação para a formação da estrutura de uma célula solar com junção flutuante, por meio do programa Athena. 75
- Figura 3.24. Perfil experimental e perfis de átomos de boro simulados no programa Athena. 76

Figura 3.25. Perfil experimental e perfis simulados de fósforo no programa.....	76
Figura 3.26. Estrutura de célula solar simulada com programa <i>Athena</i> , com a junção pn e a junção (n ⁺)p ⁺ destacadas.	77
Figura 3.27. Diagrama da simulação para análise dos parâmetros elétricos de uma célula solar por meio do programa Atlas.	78
Figura 3.28. Distribuição da fotogeração de portadores de carga em uma célula solar p ⁺ nn ⁺	79
Figura 3.29. Campo elétrico em uma célula p ⁺ nn ⁺ : (a) em condição de circuito aberto e (b) em condição de curto-circuito.	80
Figura 3.30. Distribuição da corrente elétrica total (elétrons+lacunas) em uma célula p ⁺ nn ⁺ quando está na situação de curto-circuito.	81
Figura 3.31. Distribuição da corrente elétrica total (elétrons+lacunas) em uma célula p ⁺ nn ⁺ quando está na situação de circuito aberto.	81
Figura 3.32. Fotogeração em uma célula solar (n ⁺)p ⁺ nn ⁺	83
Figura 3.33. Campo elétrico na região frontal de uma célula solar (n ⁺)p ⁺ nn ⁺	83
Figura 3.34. a) Corrente elétrica total em uma célula solar (n ⁺)p ⁺ nn ⁺ e (b) ampliação da mesma distribuição de corrente total.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Características dos processos utilizados para difusão de fósforo em lâminas de Si-Cz tipo p em forno de esteira, para futura formação de junção flutuante.....	51
Tabela 3.2. Características elétricas médias de células solares com difusão de fósforo em forno de esteira para produzir a junção flutuante sobre a superfície p^+ dopada com boro.....	62
Tabela 3.3. Parâmetros elétricos das melhores células solares fabricadas com difusão de fósforo para produzir a junção flutuante.....	63
Tabela 3.4. Características elétricas médias de células solares com difusão de fósforo em forno de esteira para produzir a junção flutuante sobre a superfície p^+ dopada com boro, utilizando diferentes pastas na etapa de metalização.	65
Tabela 3.5. Parâmetros elétricos das melhores células solares fabricadas com difusão de fósforo para produzir a junção flutuante, utilizando diferentes pastas na etapa de metalização.....	65
Tabela 3.6. Parâmetros elétricos médios de células solares p^+nn^+ e de células com junção flutuante de fósforo difundido a 900 °C em forno de tubo de quartzo.	70
Tabela 3.7. Parâmetros elétricos das células solares p^+nn^+ mais eficientes e de células com junção flutuante de fósforo difundido a 900 °C em forno de tubo de quartzo.	71
Tabela 3.8. Características elétricas das melhores células processadas e valores obtidos mediante simulação com o programa PC-1D.	73

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área	cm^2
C	Capacitância	F
C(x)	Concentração de impurezas	cm^{-3}
C_s	Concentração em superfície	cm^{-3}
g^*	Condutância específica	S/cm^2
k	Constante de Boltzmann	J/K
K	Constante dielétrica do semiconductor	-
n_s	Concentração de elétrons na superfície	cm^{-3}
p_s	Concentração de lacunas na superfície	cm^{-3}
I	Corrente elétrica	A
I_{sc}	Corrente de curto-circuito	A
I_{mp}	Corrente do ponto de máxima potência	A
J_{sc}	Densidade de corrente de curto-circuito	mA/cm^2
Δn	Densidade dos portadores em excesso	cm^{-3}
Δn_s	Densidade dos portadores em excesso na superfície	cm^{-3}
n_i	Densidade de portadores intrínsecos do semiconductor	cm^{-3}
n_i e p_i	Densidade de portadores no nível de energia	cm^{-3}
PECVD	Deposição química na fase vapor assistida por plasma	-
ECV	<i>Electrochemical capacitance-voltage profiling</i>	-
E_i	Energia de fermi intrínseca	eV
η	Eficiência	%
FF	Fator de forma	-
M	Mobilidade	$\text{cm}^2/\text{V.s}$
N_{st}	Número de estados de superfície por unidade de área	cm^{-2}
CTO	Oxidação térmica clássica	-
RTO	Oxidação térmica rápida	-
ϵ_0	Permissividade elétrica no vácuo	F/cm
R_{\square}	Resistência de folha	Ω/\square
P	Resistividade	$\Omega.\text{cm}$
σ_n	Seção de captura de elétrons	cm^2
σ_p	Seção de captura de lacunas	cm^2

U	Taxa de recombinação	$\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$
T	Temperatura	K
T_D	Temperatura de difusão	$^{\circ}\text{C}$
T_Q	Temperatura de queima	$^{\circ}\text{C}$
τ_b	Tempo de vida dos portadores minoritários	s
V_{oc}	Tensão de circuito aberto	V
V_{mp}	Tensão no ponto de máxima potência	V
V_E	Velocidade de esteira	cm/min
S_{min}	Velocidade de recombinação em relação ao valor de minoritários	cm/s
S	Velocidade de recombinação em superfície	cm/s
S_{n0}	Velocidade de recombinação em superfície de elétrons	cm/s
S_{p0}	Velocidade de recombinação em superfície de lacunas	cm/s
v_{th}	Velocidade térmica dos portadores de carga	cm/s

RESUMO

LOPES, Natália. **Implementação e Análise de Junção Flutuante em Células Solares Industriais de Silício Tipo n**. Porto Alegre. 2013. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

Pesquisas têm sido realizadas para o desenvolvimento e fabricação de células solares em lâminas de silício tipo n, sendo que uma das questões chave para esse desenvolvimento é a passivação da superfície do emissor dopado com boro na estrutura p^+nn^+ . Uma alternativa para a passivação de superfícies de tipo p^+ é a implementação de uma junção flutuante, tipo n, para reduzir a recombinação em superfície. O objetivo desse trabalho foi implantar, por um método simplificado, regiões tipo n^+ sobre a superfície frontal de células solares p^+nn^+ industriais, formando a estrutura $(n^+)p^+nn^+$. Para produzir experimentalmente a região n^+ flutuante, usaram-se líquidos dopantes depositados por *spin-on* e realizou-se o processo térmico de difusão em forno de esteira. A malha metálica frontal de Ag ou Ag/Al foi depositada por serigrafia e perfurou a região n^+ para estabelecer o contato frontal da célula $(n^+)p^+nn^+$, formando-se uma região n^+ flutuante entre as trilhas metálicas. Foram variadas a velocidade de esteira e a temperatura, durante o processo de difusão de fósforo, a fim de obter uma região n^+ que invertesse superficialmente a região p^+ . Observou-se que a inversão da região p^+ para n^+ somente se confirmou pela técnica da “ponta quente” para uma temperatura de difusão (T_D) de 900 °C e velocidade de esteira (V_E) de 50 cm/min, com duas passagens pelo forno. No entanto, as medidas de perfis realizadas indicaram que processos na mesma temperatura e $V_E = 50$ cm/min, 100 cm/min e 133 cm/min, também poderiam produzir uma inversão da superfície de p^+ para n^+ . A melhor célula solar fabricada com região n^+ sobre p^+ foi processada com $T_D = 900$ °C e $V_E = 133$ cm/min e apresentou as seguintes características elétricas: $V_{OC} = 573$ mV, $J_{SC} = 33,4$ mA/cm², $FF = 0,51$ e $\eta = 9,6$ %. Utilizando simulações uni e bidimensionais da estrutura $(n^+)p^+nn^+$ confirmou-se que as células solares produzidas obtiveram baixa resistência em paralelo devido a correntes de fuga na região n^+ depositada sobre o emissor e que diminuíram a eficiência das células quando comparadas com aquelas de estrutura p^+nn^+ .

Palavras-Chaves: Células Solares, Junção Flutuante, Silício Tipo n.

ABSTRACT

LOPES, Natália. **Implementation and analysis of floating junction in industrial n-type silicon solar cells**. Porto Alegre. 2013. Master Thesis. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

Research has been carried out for the development and manufacturing of solar cells in n-type silicon wafers, and one of the key issues for this development is the surface passivation of boron doped emitter in the p^+nn^+ structure. An alternative to the passivation of p^+ -type surfaces is the implementation of a floating junction, n-type, to reduce the surface recombination. The aim of this work was to implement a n^+ region on the front surface of industrial solar cells p^+nn^+ by using a simplified method, producing the $(n^+)p^+nn^+$. Liquid dopants deposited by spin-on were used and the diffusion thermal process was performed in a belt furnace in order to obtain the floating n^+ region. Front metal grid based on Ag or Ag/Al was deposited by screen-printing and it etched-through the n^+ region to establish the frontal contact of the $(n^+)p^+nn^+$, creating a floating n^+ region between the metal fingers. Diffusion temperature and belt speed were varied in order to obtain a n^+ region that inverted the p^+ emitter surface. It was observed that inversion only was confirmed by hot probe test for a diffusion temperature (T_D) of 900 °C and belt speed (V_E) of 50 cm/min, with two passes through the furnace. However, the processes carried out in the same temperature and $V_E = 50$ cm/min, 100 cm/min and 133 cm/min presented phosphorus profiles (measured by ECV, electrochemical capacitance-voltage profiling) that can produce inversion of the surface p^+ to n^+ . The best solar cell fabricated with n^+ region on p^+ was processed with $T_D = 900$ °C and $V_E = 133$ cm/min and presented the following electrical characteristics: $V_{OC} = 573$ mV, $J_{SC} = 33.4$ mA/cm², $FF = 0,51$ and $\eta = 9.6\%$. By one- and two-dimensional simulations of the $(n^+)p^+nn^+$ structure, it was confirmed that the produced solar cells presented low shunt resistance due to the leakage currents in the n^+ region deposited on the emitter which decreased the cell efficiency when compared with those with p^+nn^+ structure.

Key-words: Solar Cells, Floating Junction, n-type Silicon.

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1. Justificativas

Atualmente, pesquisas têm sido realizadas para o desenvolvimento e fabricação de células solares em lâminas de silício tipo n. O uso desse tipo de silício apresenta vantagens como o potencial para produzir células solares mais eficientes, pois nas lâminas de silício do tipo n o tempo de vida dos portadores de carga minoritários atinge valores maiores do que em lâminas de silício do tipo p [1]. Porém, a utilização de lâminas de silício tipo n requer adaptações no processo de fabricação básico de células solares e também necessita de maiores pesquisas envolvendo a otimização dessa estrutura a fim de obter maior eficiência.

A questão chave para o desenvolvimento de células solares p^+nn^+ com lâminas de silício tipo n é a passivação da superfície. Em laboratório, normalmente é crescido um dióxido de silício de passivação para reduzir a recombinação em superfície. Porém, sabe-se que as propriedades de passivação de óxidos são melhores para emissores n^+ do que para p^+ , pois a seção de captura de minoritários (σ_n) na interface Si-SiO₂ é de cerca de 10 vezes maior para elétrons do que para lacunas [2].

Uma alternativa para a passivação de superfícies de tipo p é a implementação de uma junção flutuante [3]. A junção flutuante é uma junção pn não contatada, que se comporta como uma junção iluminada em condições de circuito aberto. Quando iluminada, a região p^+ injeta elétrons (portadores minoritários) para a camada n, que é polarizada para atingir o equilíbrio e assim, reinjeta os elétrons e evita que se recombinem na superfície. Consequentemente, há uma redução da velocidade de recombinação em superfície [4].

As junções flutuantes podem ser obtidas por difusões específicas em áreas definidas por fotolitografia. Porém, estes processos são aplicados em laboratórios e dificilmente transferidos para ambientes industriais [4, 5]. Por outro lado, como foi proposto por Moehlecke [3], a junção flutuante pode ser obtida mediante a difusão de fósforo sobre uma superfície previamente dopada com boro e se a concentração de fósforo e a profundidade da junção forem adequadas para produzir uma elevada resistência de folha, um contato de alumínio que perfura a região n^+ estará “flutuando” entre as trilhas metálicas.

Portanto, o desenvolvimento de pesquisas e a implementação da junção flutuante para passivação das superfícies de células solares com a estrutura p^+nn^+ , formando a estrutura $(n^+)p^+nn^+$, é um campo muito promissor, e pode ser subsidiado pelo uso de tecnologias de simulação para otimizar esse processo.

1.2. Objetivos

O objetivo desse trabalho foi analisar o uso de regiões tipo n^+ sobre a superfície frontal de células solares p^+nn^+ industriais a fim de reduzir a recombinação na região p^+ . A região n^+ formada sobre a p^+ é obtida por deposição de dopante por *spin-on* e difusão em forno de esteira. A malha metálica deve perfurar a região n^+ para estabelecer o contato frontal da célula p^+nn^+ , formando-se uma região n^+ flutuante entre as trilhas metálicas. Esta técnica industrial de produção de junções flutuantes é analisada pela primeira vez nesta dissertação.

Os objetivos específicos desse trabalho foram:

- Produzir a região n^+ flutuante, pela deposição de líquido dopante por *spin-on* e variando-se a temperatura e a velocidade da esteira no processo de difusão em forno de esteira, avaliando a resistência de folha e o perfil de impurezas;
- Avaliar a formação da região n^+ flutuante por difusão de fósforo a partir de $POCl_3$ em forno de tubo de quartzo;

- Caracterizar eletricamente e comparar células solares p^+nn^+ com diferentes processos de difusão para a formação de junção flutuante;
- Caracterizar eletricamente e comparar células solares com pastas de Ag/Al e Al na face frontal;
- Simular as células solares com programas computacionais unidimensionais e bidimensionais para analisar suas características elétricas;
- Comparar os resultados experimentais e simulados das células solares.

2. CÉLULAS SOLARES P⁺NN⁺: ESTRUTURA BÁSICA, PASSIVAÇÃO DE SUPERFÍCIES, CARACTERIZAÇÃO E SIMULAÇÃO

2.1. A Célula Solar p⁺nn⁺

As células solares industriais produzidas mundialmente são, na grande maioria, de silício cristalino tipo p. Esse padrão foi estabelecido a partir dos anos 60, devido à maior resistência à radiação existente no espaço das lâminas tipo p em relação às lâminas tipo n. Porém, pesquisas têm sido desenvolvidas para a fabricação de células solares em lâminas de silício tipo n, apontando que estas apresentam algumas vantagens frente às de tipo p [1].

As células solares do tipo n possuem maiores valores de tempo de vida dos portadores de carga minoritários comparadas às do tipo p e com isso tem potencial de produzir células solares mais eficientes, bem como possuem uma maior tolerância a impurezas possíveis de serem introduzidas no processamento a altas temperaturas. Além disso, tem como vantagem, a ausência de degradação induzida pela radiação solar, devido à ausência de pares boro-oxigênio [6].

A utilização de lâminas de silício tipo n requer adaptações na fabricação da estrutura básica de células solares e também necessita de maiores pesquisas envolvendo a otimização dessa estrutura a fim de obter maiores eficiências.

2.2. Estrutura Básica

As células solares são dispositivos fotovoltaicos, que convertem diretamente radiação solar em energia elétrica. A estrutura básica da célula solar é formada por uma base de material semiconductor dopado, o emissor, os eletrodos nas partes

frontal e posterior, para formar os contatos, e uma camada de material antirreflexo para diminuir a reflexão da radiação solar, como está ilustrado na Figura 2.1 [7].

No caso de células solares do tipo n, a base é composta por uma lâmina de silício cristalino dopada com fósforo, havendo assim maior densidade de elétrons do que de lacunas na base. O emissor é formado a partir da difusão com dopante tipo p, geralmente boro, originando uma região denominada de junção pn. Com a incidência da radiação solar, há a formação de pares elétron-lacuna no material, que são separados por meio do campo elétrico formado na junção pn. Portadores de carga minoritários podem alcançar a junção pn e serem conduzidos através dela, tornando-se majoritários. Em curto-circuito, os elétrons percorrem o circuito externo voltando ao dispositivo na condição de minoritário, recombinando-se com lacunas.

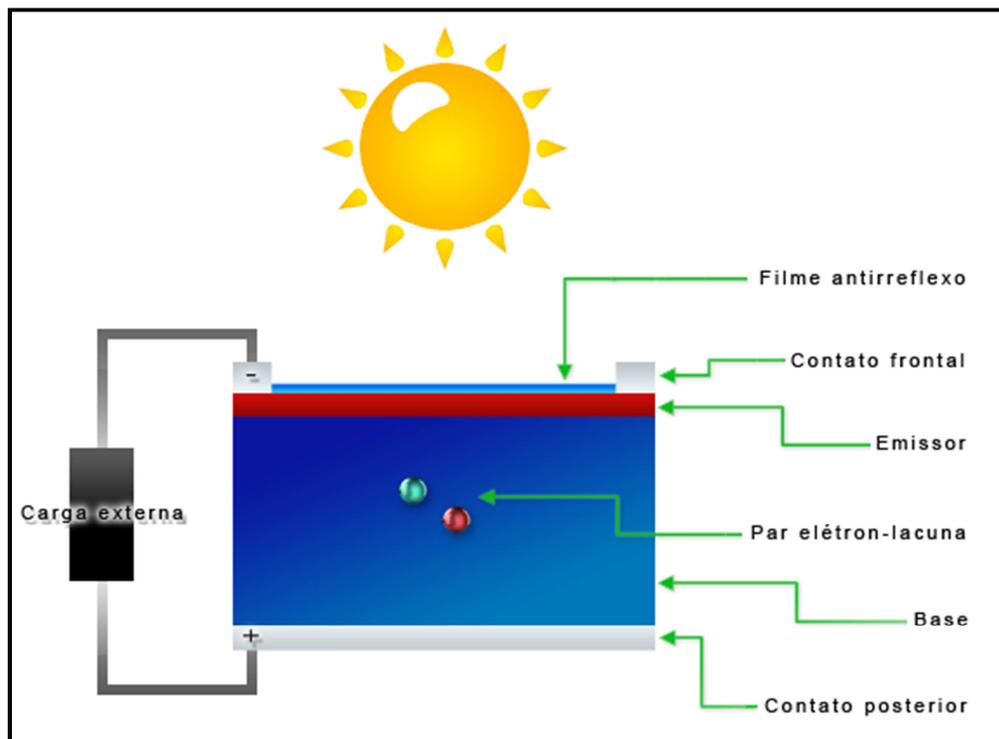


Figura 2.1. Estrutura básica da célula solar [7].

A superfície da célula solar representa uma ruptura da rede cristalina. Assim, a superfície é um local de recombinação de pares elétron-lacuna particularmente elevado. A passivação da superfície da lâmina de silício, na produção das células solares, é essencial para reduzir a velocidade de recombinação dos pares elétron-lacuna em superfície e, assim, aumentar a eficiência da célula produzida [8].

As técnicas mais utilizadas para passivação de superfícies são: o crescimento de uma camada de dióxido de silício a alta temperatura em um forno convencional e a deposição de nitreto de silício sobre a superfície da lâmina de silício [9].

2.2.1. Recombinação em Superfície

Nos processos de recombinação em superfície, um elétron da banda de condução se recombina com uma lacuna da banda de valência via um nível extra de energia dentro da banda proibida (*bandgap*). Esse processo foi descrito matematicamente pela teoria de Shockley – Read – Hall (SRH) [10].

A taxa de recombinação (U_s), via um nível extra de estado de superfície localizado em uma energia E_t , é dada por:

$$U_s = \frac{n_s p_s - n_i^2}{\frac{n_s + n_l}{S_{p0}} + \frac{p_s + p_l}{S_{n0}}} \quad (2.1)$$

$$\text{Com: } n_l = n_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right), \quad p_l = \frac{n_i^2}{n_l}, \quad S_{n0} = \sigma_n v_{th} N_{st}, \quad S_{p0} = \sigma_p v_{th} N_{st} \quad (2.2)$$

Sendo que S_{n0} e S_{p0} são parâmetros da velocidade de recombinação em superfície de elétrons e lacunas, respectivamente, n_s e p_s são as concentrações de elétrons e lacunas na superfície, σ_n e σ_p são as seções de captura eficazes de elétrons e lacunas, N_{st} é o número de estados de superfície por unidade de área, E_i a energia de Fermi intrínseca, v_{th} a velocidade térmica dos portadores de carga (aproximadamente 10^7 cm/s no silício a 300 K), k constante de Boltzmann, T a temperatura em graus Kelvin, n_i a concentração intrínseca de portadores no semiconductor e n_l e p_l a densidade de portadores no seu nível de energia [10].

A velocidade de recombinação em superfície (S) pode ser definida em analogia com a expressão $U_b = \Delta n / \tau_b$ (onde Δn é a densidade dos portadores em excesso e τ_b é o tempo de vida dos portadores), sendo $U_s = S \Delta n_s$ (onde Δn_s é a

densidade de portadores em excesso na superfície) [10]. Então, a velocidade de recombinação em superfície é dada pela razão entre o fluxo de portadores de carga minoritários em excesso atingindo a superfície e a concentração dos portadores de carga minoritários em excesso na superfície [11].

A relação dada pela teoria SRH entre a taxa de recombinação e as propriedades de estado da superfície (Equação 2.1) mostra que existem duas diferentes possibilidades tecnológicas para a redução da taxa de recombinação na superfície de semicondutores: a redução da densidade de estados de superfície e a redução da concentração de elétrons e lacunas livres na superfície [10].

De acordo com a Equação 2.1, pode-se observar que a taxa de recombinação é proporcional a densidade de defeitos na superfície. Por meio da deposição ou do crescimento de um filme fino para passivar a superfície do semicondutor, pode-se reduzir drasticamente a densidade de estados da superfície e, assim, a velocidade de recombinação em superfície. Também, se pode aplicar um perfil de dopagem abaixo da superfície do semicondutor ou uma passivação de efeito de campo devido a cargas elétricas em um isolante sobreposto para reduzir a concentração de elétrons e lacunas livres na superfície. Como o processo de recombinação SRH envolve um elétron e uma lacuna, então, se a concentração de um portador é drasticamente reduzida, conseqüentemente, se reduz a taxa de recombinação [10].

Na prática, para atingir baixas taxas de recombinação em superfície na produção de células solares, combinam-se as duas abordagens acima mencionadas. Cita-se como exemplo, a passivação da superfície com SiO_2 , que reduz significativamente o N_{st} e, além disso, conduz a uma passivação de efeito de campo, devido à cargas positivas no óxido, quando a superfície é do tipo n.

2.2.2. Passivação de Superfície com SiO_2

O dióxido de silício pode ser crescido sobre a lâmina de silício por meio da oxidação térmica clássica (CTO) ou por oxidação térmica rápida (RTO). A CTO é a técnica mais usada para células solares de alta eficiência em escala laboratorial,

com passivação das superfícies frontal e posterior, juntamente com processos a alta temperatura e longa duração [12].

A passivação com SiO_2 de superfícies tipo n é bem mais eficiente do que a mesma com superfícies tipo p. Este comportamento é devido a razão entre a seção de captura de elétrons e a seção de captura de lacunas (σ_n/σ_p), igual a 100, pois as cargas positivas do óxido atraem os portadores majoritários e repelem os minoritários da superfície tipo n e, assim, a recombinação em superfície é diminuída [2].

A qualidade da passivação diminui com a diminuição da espessura do óxido crescido sobre a lâmina de silício. A espessura de óxido ideal para uma boa passivação é de aproximadamente 150 nm [12]. Porém, industrialmente não é possível utilizar óxido com uma espessura grande para passivação, pois as células industriais são encapsuladas sob vidro e assim, o óxido perderia o efeito de filme antirreflexo.

Essa camada de óxido passivador é crescida sob altas temperaturas (~1000 °C), porém essa temperatura elevada pode ocasionar contaminações na lâmina de silício. Essas contaminações podem diminuir o tempo de vida dos portadores de carga minoritários e aumentar indesejavelmente o custo da produção das células solares, diminuindo sua eficiência [10]. Uma alternativa é a incorporação de pequenas quantidades de cloro no crescimento de óxidos com o intuito de baixar a concentração de metais de transição e de íons, acarretando em um aumento no tempo de vida dos portadores de carga minoritários e baixando a densidade de armadilhas (*traps*) na interface, melhorando a qualidade da passivação. Porém esse processo é de alto custo devido a corrosividade, inflamabilidade e toxicidade do Cl_2 e do HCl [13].

Uma alternativa à oxidação a altas temperaturas para passivação é a deposição química na fase de vapor assistida por plasma (PECVD, *plasma-enhanced chemical vapor deposition*) de nitreto de silício (SiN_x) [10].

2.2.3. Passivação de Superfície com Nitreto de Silício

A passivação por meio de uma camada de nitreto de silício pode ser realizada por meio de métodos rápidos e de baixo custo. A deposição de SiN_x por PECVD é a baixas temperaturas. Além disso, a utilização de SiN_x tem duas importantes vantagens: o seu índice de refração pode ser variado e ajustado para proporcionar um desempenho excelente como filme antirreflexo e a qualidade da passivação é elevada [12, 14].

A passivação ocorre por meio da deposição de SiN_x através de gás rico em NH_3 e baseia-se em passivação de efeito de campo, fornecido por uma elevada densidade de cargas positivas fixas nos filmes de SiN_x . A camada de nitreto depositada contém uma elevada concentração de hidrogênio (de até 20 %), fornecido através do gás precursor durante a deposição por PECVD, que auxilia na diminuição de defeitos na superfície, como as ligações incompletas [15].

Cargas fixas são geradas na interface SiN_x -superfície. Esse potencial formado na interface é vantajosamente eficaz para a passivação de efeito de campo. Essa carga fixa formada é positiva e atrai elétrons bem como repele as lacunas, conforme ilustra a Figura 2.2. Esse processo resulta na ‘acumulação’ de elétrons perto da superfície de silício e desta maneira, a recombinação em superfície é menor no caso de carga fixa positiva elevada [2, 12]. Por outro lado, quando a composição da película tem uma baixa carga positiva fixa, os elétrons acumulam-se menos na superfície e simultaneamente algumas lacunas atingem a superfície. Então, o campo formado na superfície frontal é menos eficaz, o que termina aumentando a recombinação de portadores de carga minoritários em superfície [15]. Segundo estudo realizado por Dao *et al.* [15], em 2010, as cargas fixas positivas são consideradas elevadas quando apresentam valor de aproximadamente $2,6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ e são consideradas baixas quando apresentam valores de aproximadamente $1,2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.

Superfícies tipo p na face posterior da célula solar em base p não são adequadamente passivadas por filmes de SiN_x , pois há uma perda de eficiência nas células devido a uma resistência em paralelo formada entre os contatos posteriores e a camada de inversão sob a camada SiN_x . A camada de inversão forma uma região tipo n, que é produzida pela alta concentração de cargas positivas na camada de nitreto de silício [16].

A velocidade de recombinação em superfícies tipo p é maior do que em superfícies tipo n, principalmente em baixa injeção de portadores de carga. Conforme a injeção aumenta, essa diferença é diminuída, sendo que pode se igualar a altas injeções [4, 9]

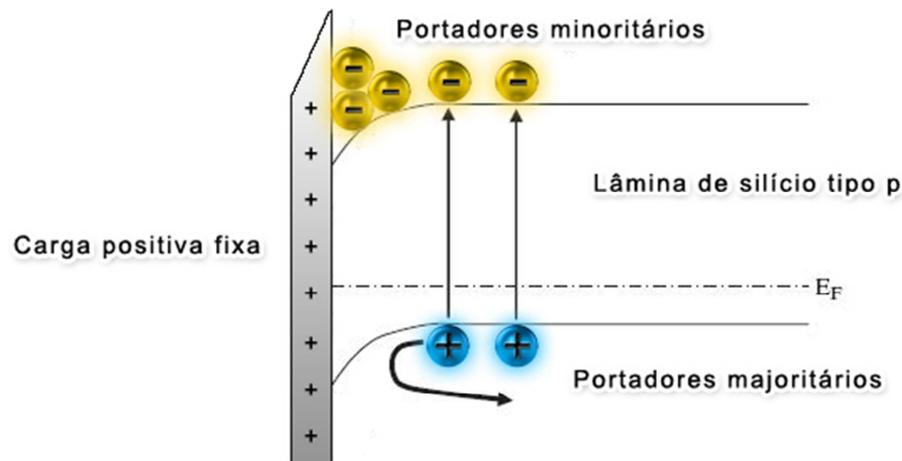


Figura 2.2. Diagrama de bandas com uma lâmina de silício tipo p com carga fixa positiva em camada isolante [15].

A variação da velocidade de recombinação em superfície (S) em relação ao valor da velocidade de recombinação de minoritários (S_{min}) é diferente para superfícies tipo p e tipo n [4]. Para superfícies tipo p a S/S_{min} diminui com o aumento da dopagem e com o aumento da relação das seções de captura, conforme mostra a Figura 2.3. Em baixas dopagens, a recombinação está limitada ao fornecimento de elétrons (minoritários) à superfície ($S \approx S_{min}$). Contudo, em altas dopagens, ambos os portadores de carga tem influência, sendo que as lacunas tem uma contribuição mais importante quanto maior for a razão entre as seções de captura. Para superfícies tipo n, a velocidade de recombinação é praticamente independente do

nível de dopagem sendo que, o limitante é apenas o fornecimento de lacunas (minoritários) para a superfície [4].

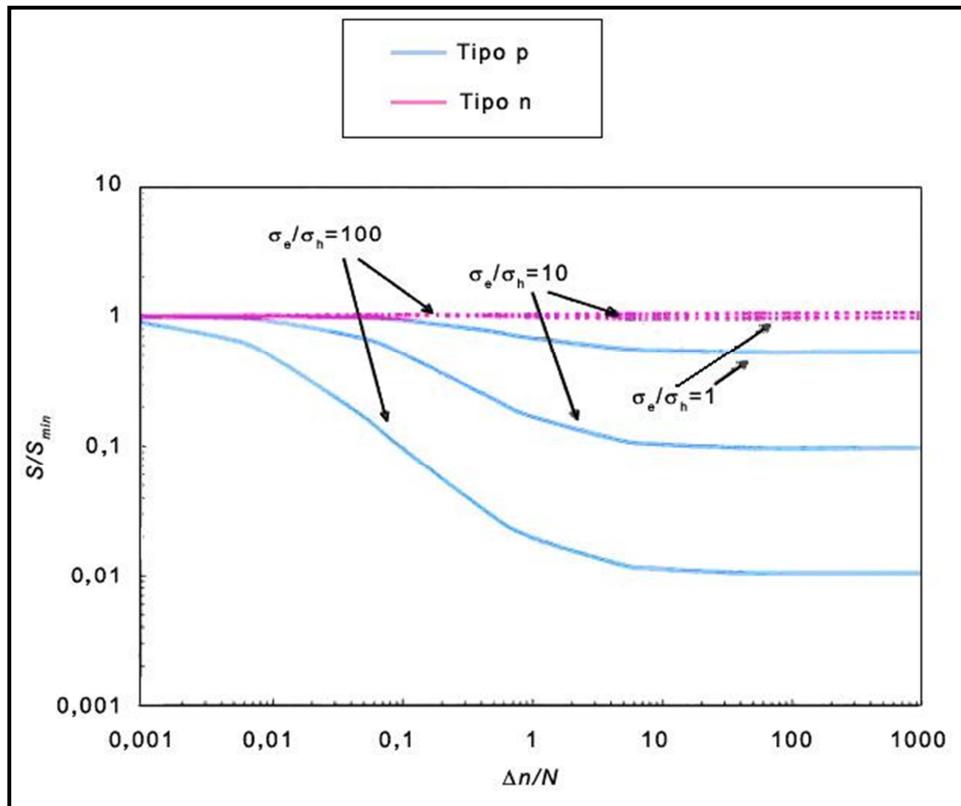


Figura 2.3. Razão entre a velocidade de recombinação em superfície vs. nível de dopagem para diferentes relações entre seções de captura de elétrons e lacunas, para superfícies do tipo p e do tipo n [4].

Essa análise sugere que a transformação da superfície tipo p em tipo n pode melhorar a passivação superficial e uma forma simples para realizar essa transformação é por meio da difusão de uma camada de fósforo na superfície. Isto resulta em o que é conhecido como passivação por junção flutuante.

2.2.4. Passivação de Superfície com Junção Flutuante

A passivação de superfícies por junção flutuante consiste em transformar uma superfície tipo p em tipo n. A junção flutuante é uma junção não contatada, que se comporta como uma junção iluminada em condições de circuito aberto. Quando iluminada, a região p^+ injeta elétrons (portadores minoritários) para a camada (n^+) que é polarizada para atingir o equilíbrio. Assim, os elétrons são reinjetados para a

região p^+ evitando que eles se recombinem na superfície. Isso resulta em uma redução da velocidade de recombinação em superfície [3, 4].

2.2.4.1. Junção Posterior

A ideia de junção flutuante se concebeu para diminuir a recombinação na superfície posterior passivada de células n^+p da estrutura PERC (*passivated emitter and rear contacts*). Atualmente se sugere o emprego da junção flutuante como passivação posterior em diversas estruturas, como por exemplo, a PERL (*passivated emitter rear locally diffused*) [3, 17, 18].

Em 1996, Altermatt *et al.* [17] experimentaram melhorar a passivação posterior das células com estrutura tipo PERL, fabricadas em laboratório, por meio da adição de uma junção flutuante, difundindo uma camada n adicional na superfície posterior, entre os contatos. Eles denominaram esse tipo de célula como PERF (*passivated emitter, rear floating p-n junction*). Foi observado que as curvas da corrente elétrica em função da tensão aplicada (I-V) medidas no escuro dessa célula demonstraram não linearidades. Então, eles investigaram, por meio de modelagem numérica com base em parâmetros do dispositivo determinados experimentalmente, essas não linearidades. Os resultados das simulações indicaram que a passivação da superfície posterior ótima pode ser obtida por meio de metodologias diferentes. A junção flutuante da célula PERF deve ser levemente dopada resultando em uma resistividade de folha de $5000 \Omega/\square$. Assim, as perdas devido as correntes de fuga entre a junção $p-n$ e os contatos de metal da superfície posterior são reduzidas. Além disso, a superfície posterior da célula PERL deve ser passivada com um filme com uma maior densidade de carga positiva do que existe em óxidos termicamente crescidos [17].

Foi realizado por Honsberg *et al.* [5], também em 1996, a otimização da passivação posterior com junção flutuante de células solares comerciais, a partir de lâminas de silício mais finas. Apesar das muitas vantagens da passivação com junção flutuante, a sua aplicabilidade ainda era limitada pela incapacidade de reproduzir os resultados excelentes obtidos em simulações em células solares reais.

Com esse estudo, concluíram que a passivação por meio da junção flutuante é um esquema quase ideal para passivação de superfície. Simularam e confirmaram experimentalmente que uma alta passivação de superfície pode ser naturalmente incorporada em um processo comercial simultaneamente com a difusão do emissor e a difusão da junção flutuante, e que podiam eliminar problemas de resistência em paralelo entre a junção flutuante e o contato metálico posterior por meio da otimização da dopagem da junção flutuante [5].

Honsberg *et al.* [19] continuaram suas pesquisas e, em 1997, demonstraram por meio de resultados experimentais e de simulação que a presença da resistência em paralelo na parte posterior provoca uma dependência entre o nível de dopagem da superfície (junção flutuante) e a velocidade de recombinação em superfície. Os resultados obtidos mostraram que a resistência em paralelo posterior é um efeito localizado que pode ser eliminado ou minimizado, desde que se altere o processamento e se utilize uma junção flutuante com alta resistência de folha [19].

Foram realizadas por McIntosh e Honsberg [20], em 1999, pesquisas de diferentes formas de caracterizar as células solares passivadas com junção flutuante, que não alterassem as propriedades das mesmas. Foi apresentada uma nova técnica que envolve a extração de vários parâmetros unidimensionais das células solares, passivadas com junção flutuante, a partir da curva I-V no escuro. Essa técnica de caracterização é simples e não necessita de contato elétrico na junção flutuante. É aplicável a todas as células solares passivadas com junção flutuante desde que a curva I-V não sofra grandes distorções por resistência em série e que o ganho de corrente fornecido seja de até 0,2. O ganho de corrente representa a razão entre a fração dos portadores minoritários que se difundem da região n para a região p⁺ e a fração dos que se difundem da região p⁺ para a região n, respectivamente. Um valor maior indica que há menor recombinação dos portadores de carga minoritários na célula solar [20].

Cañizo [4], em 2000, experimentou passivar a superfície posterior de células n⁺p com junção flutuante, por meio da difusão de uma camada de fósforo sobre essa superfície. Ele observou que, na prática, ocorrem perdas associadas à resistência em paralelo gerada entre a camada n e o contato subsequente. Como alternativa,

ele propôs a produção de células solares passivadas com junção flutuante pontual na superfície posterior [4].

2.2.4.2. Junção Frontal

A pesquisa de passivação por junção flutuante se iniciou e teve maior enfoque no campo científico com a finalidade de passivar a parte posterior das células solares. Por isso, existem poucas pesquisas publicadas com a aplicação da junção flutuante para a passivação frontal das mesmas.

Moehlecke [3, 18] experimentou passivar a superfície frontal de uma célula solar com a estrutura p^+nn^+ a partir de um forno convencional, por meio da difusão do fósforo impregnado nas paredes do tubo de quartzo, formando assim uma junção flutuante frontal. Com esta técnica, obteve uma resistência de folha na ordem de $300 \Omega/\square$ sobre uma superfície não dopada previamente com boro, sendo que o perfil de impurezas é apresentado na Figura 2.4. Os perfis experimentais e simulados foram obtidos após uma oxidação a 1000°C .

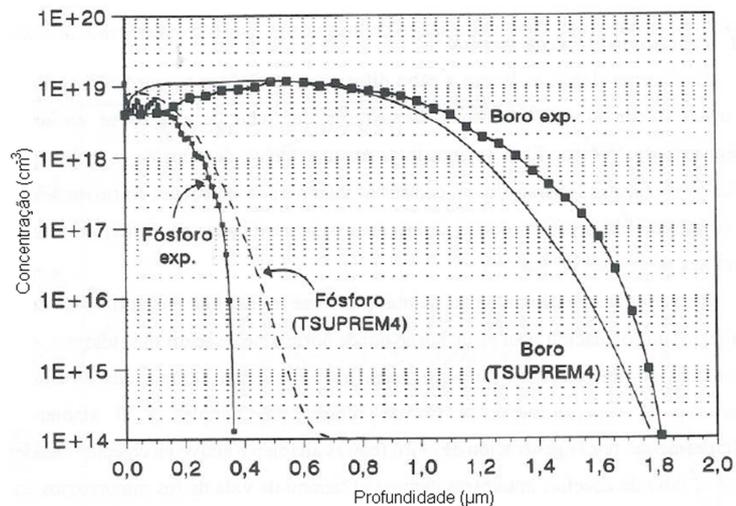


Figura 2.4. Perfis de boro e fósforo após uma oxidação a 1000°C [18].

Após, comparou a eficiência entre células solares de 4 cm^2 , com metalização e com processo de fotolitografia, com duas estruturas diferentes: a convencional com passivação baseada em SiO_2 , p^+nn^+ , e com passivação frontal com junção flutuante, $(n^+)p^+nn^+$ (ilustrada na Figura 2.5). Foram realizadas simulações e as

mesmas mostraram que as células passivadas com a junção flutuante indicaram uma velocidade de recombinação em superfície muito menor do que as células convencionais. Esse resultado foi confirmado experimentalmente, pois as células de estrutura $(n^+)p^+nn^+$ obtiveram uma eficiência absoluta de 2 % maior que as células solares com a estrutura convencional [3].

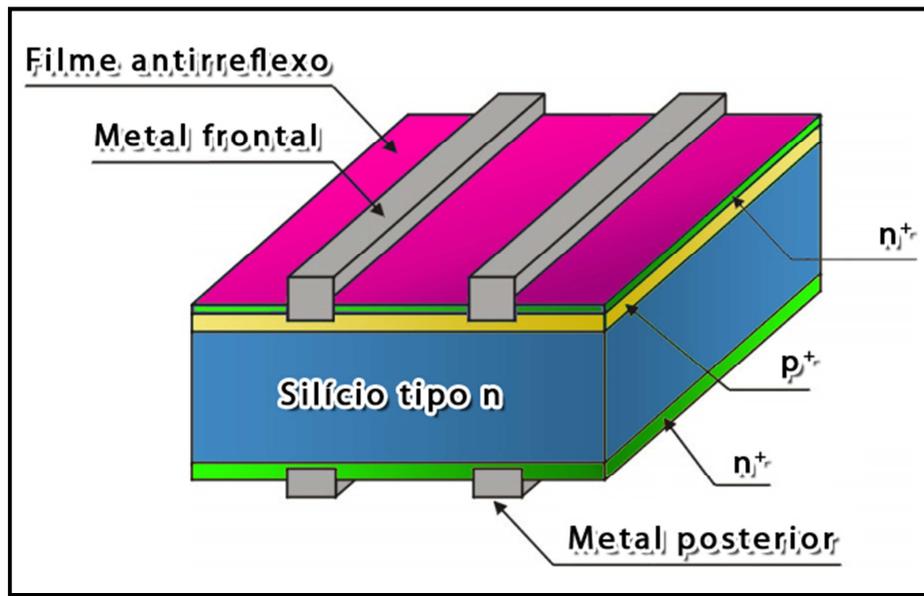


Figura 2.5. Célula solar de estrutura $(n^+)p^+nn^+$.

A fim de investigar a junção flutuante frontal, Benick *et al.* [21], em 2008, fabricaram com lâminas de silício FZ monocristalino, com a orientação $\langle 100 \rangle$, resistividade de $1 \Omega \cdot \text{cm}$ e espessura de $250 \mu\text{m}$, células solares, ilustradas na Figura 2.6, de 4 cm^2 , com difusão local na parte posterior com fósforo e coberta com 100 nm de SiO_2 crescido termicamente e de $2 \mu\text{m}$ de espessura de alumínio, também testaram lâminas com superfícies polidas e texturadas.

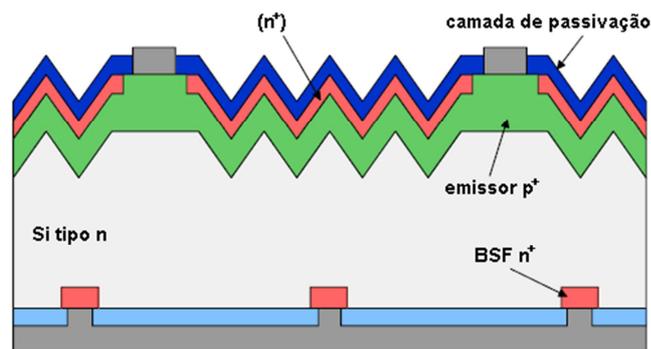


Figura 2.6. Célula solar de estrutura $(n^+)p^+nn^+$, com junção flutuante isolada [21].

O emissor foi obtido por difusão de boro a partir de BBr_3 a $890\text{ }^\circ\text{C}$, seguido por uma oxidação a $1050\text{ }^\circ\text{C}$. A barreira de óxido para evitar a difusão de fósforo na superfície frontal onde será depositada a malha metálica, isolando a junção flutuante desta malha, foi implementada por fotolitografia. Em seguida, as lâminas foram expostas a uma difusão de fósforo a partir de $POCl_3$, a $785\text{ }^\circ\text{C}$. Os perfis das impurezas podem ser observados na Figura 2.7. A superfície frontal foi passivada com uma camada de SiO_2 com 10 nm de espessura, seguido da deposição de 60 nm de filme antirreflexo [21].

Com isso, observaram que a aplicação de uma difusão de fósforo rasa e isolada pode inverter a superfície de p^+ para (n^+) . Porém, para minimizar a geração de correntes de fuga em paralelo, a espessura da camada de fósforo deve ser mantida tão fina quanto possível. Com isso, pode-se utilizar tecnologias padrão para passivar esta superfície, e obter uma eficiência de 21,7 %, com um V_{OC} de 676 mV [21].

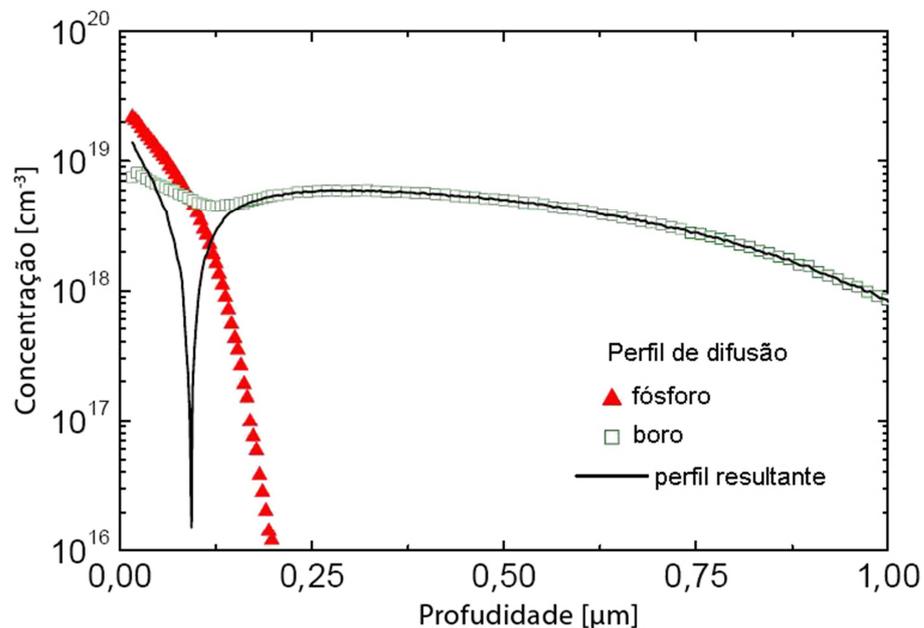


Figura 2.7 Perfil de boro (quadrados verdes) e perfil de fósforo (triângulos vermelhos). Perfil do emissor de boro sobrecompensado por uma difusão de fósforo rasa, sendo que o perfil de difusão resultante é apresentado pela linha preta [21].

2.3. Técnicas de Caracterização de Regiões Dopadas e de Células Solares

2.3.1. Caracterização de Regiões Dopadas

Para uma camada uniformemente dopada, a resistência de folha (R_{\square}), normalmente expressa em Ω/\square , é definida pela Equação 2.3.

$$R_{\square} = \frac{\rho}{e} \quad (2.3)$$

Sendo que ρ é a resistividade da camada e “e” é a espessura da camada [7].

Se a região dopada for caracterizada por um perfil de impurezas, a resistência de folha é calculada por:

$$R_{\square} = \left[\int_0^{x_j} q \mu C(x) dx \right]^{-1} \quad (2.4)$$

Onde μ corresponde a mobilidade do portador de carga, q é a carga do elétron, $C(x)$ é a concentração de impurezas (tipo n ou tipo p) e x_j é a profundidade da junção pn, que se define como a posição em que a concentração de dopante se iguala à concentração no substrato [22].

Mede-se a resistência de folha das regiões n^+ e p^+ com a técnica de medida de quatro pontas, que trata-se, em princípio, de um método não destrutivo, embora a pressão exercida pelos eletrodos sobre a superfície da amostra possa danificar o material caso seja excessivamente alta.

O sistema de medição da resistência de folha tem quatro eletrodos que são dispostos linearmente, espaçados igualmente e conectados a uma fonte de corrente elétrica. As duas pontas mais externas aplicam uma corrente elétrica (I). Essa corrente elétrica circula na lâmina de silício. As duas pontas mais internas estão conectadas para a medição da tensão elétrica (V). Para uma lâmina de silício que a espessura (e) é muito menor que o seu diâmetro, a resistividade é dada pela Equação 2.5 [23].

$$\rho = V\Gamma^{-1}ek \quad (2.5)$$

Onde k é um fator de correção determinado pela razão entre as dimensões da região dopada e a distância entre as ponteiras.

O perfil de dopagem das lâminas pode ser medido por meio da técnica ECV (*electrochemical capacitance-voltage profiling technique*) com o equipamento Wafer Profiler CVP21, que fornece a concentração do dopante em função da profundidade. A técnica ECV é esquematizada na Figura 2.8. Nesta técnica, mede-se a capacitância de um dispositivo formado por eletrólito-semicondutor-contato metálico quando uma tensão contínua é aplicada. Um processo de ataque eletroquímico é realizado entre cada medida de capacitância, retirando uma camada de material semiconductor de, por exemplo, 0,05 μm . Deste modo, a capacitância é medida em função da profundidade e esta é relacionada à concentração de portadores na superfície em contato com o eletrólito [22].

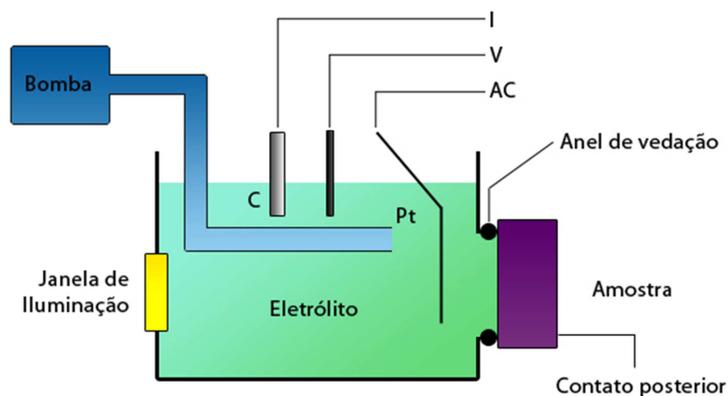


Figura 2.8 . Esquema do funcionamento da técnica ECV [22].

A amostra de semiconductor é pressionada contra um anel de vedação (*sealing ring*) na célula eletroquímica contendo um eletrólito, no caso 0,1 M de NH_4HF_2 [24]. A abertura do anel define a área de contato. As condições de corrosão e de medição são controladas por meio do potencial aplicado na célula eletroquímica, passando uma corrente elétrica entre o semiconductor e o eletrodo de

carbono. Para reduzir a resistência em série, as tensões alternadas são medidas com um eletrodo de platina localizado próximo a amostra [25].

Com uma pequena polarização reversa aplicada entre o eletrólito e a amostra, dois sinais de baixa tensão com frequências diferentes são aplicados ao eletrólito. A medição da densidade de portadores é baseada na equação 2.6 [22].

$$\rho(W) = \frac{2K_s \epsilon_0}{q} \frac{\Delta V}{\Delta(W)^2} \quad (2.6)$$

Onde ΔV é a componente de modulação da tensão alternada aplicada (tipicamente entre 100 mV e 300 mV a 30 Hz a 40 Hz) e o $\Delta(W)^2$ é a modulação de largura resultante do scr (*silicon-controlled rectifier*). A profundidade W é determinada medindo a componente imaginária da corrente com um amplificador sensível a fase, utilizando tipicamente um sinal de 50 mV em frequências de 1 kHz a 5 kHz. Pode ser calculada pela equação 2.7 [22].

$$W = \frac{K_s \epsilon_0 A}{C} \quad (2.7)$$

Onde K_s é a constante dielétrica do semicondutor, ϵ_0 é a permissividade elétrica no vácuo ($8,854 \times 10^{-14}$ F/cm), A é a área, em cm^2 , e C é a capacitância de uma junção.

As Equações 2.6 e 2.7 fornecem a densidade de portadores de carga pela profundidade (W). O perfil de impurezas em função da profundidade é medido através da dissolução do semicondutor eletroliticamente, que depende da presença de lacunas. Nos semicondutores tipo p as lacunas são abundantes e a dissolução é facilmente alcançada pela polarização direta da junção eletrólito-semicondutor [22]. Para semicondutores tipo n, as lacunas são geradas pela iluminação e por polarização reversa da junção. A profundidade W_R depende da corrente de dissolução de acordo com a Equação 2.8 [22].

$$W_R = \frac{M}{zF\rho A} \int_0^t I_{diss} dt \quad (2.8)$$

Sendo, M o peso molecular do semiconductor, z a valência de dissolução (número de portadores de carga necessários para dissolver um átomo de semiconductor), F a constante de Faraday ($9,64 \times 10^4$ C), ρ a densidade do semiconductor e A a área de contato. W_R é determinada pela integração da corrente de dissolução eletrônica. Então, a profundidade que corresponde a densidade dos portadores de carga medida é dada pela Equação 2.9 [22].

$$x = W + W_R \quad (2.9)$$

Para determinar o tipo de dopagem da superfície das lâminas, pode-se utilizar a técnica da ponta quente, que consiste em um sistema seguindo o diagrama da Figura 2.9. Utiliza-se um multímetro e duas pontas de contato sobre a lâmina, sendo que uma é aquecida. Os portadores difundem mais rapidamente perto da ponta quente, produzindo uma corrente que pode ser medida com o multímetro. Dependendo se a superfície é do tipo p ou do tipo n, essa diferença de potencial medida entre as pontas será positiva (+) ou negativa (-).

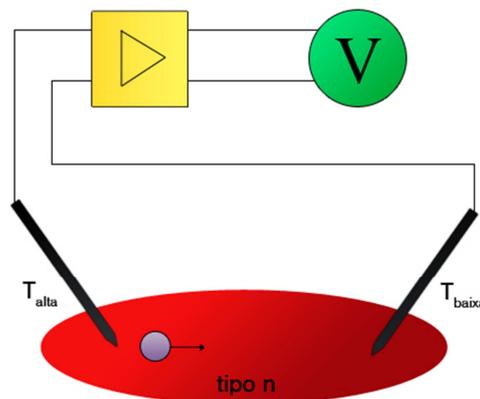


Figura 2.9. Esquema da técnica de ponta quente para determinação do tipo de dopagem em uma superfície da lâmina de silício.

2.3.2. Caracterização das Células Solares

Com o auxílio de um sistema automatizado para medição, é possível a caracterização elétrica das células solares por meio da medição da curva I-V.

Aplicando-se uma diferença de potencial variável e medindo-se a corrente elétrica gerada, obtêm-se a curva de corrente elétrica em função da tensão aplicada (I-V). Essa caracterização é realizada sob condições padrão de medição: irradiância de 1000 W/m^2 , espectro solar AM1,5G e temperatura das células solares de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Utilizando esse sistema de medição é possível obter os seguintes parâmetros de caracterização: tensão de circuito aberto (V_{oc}), corrente de curto-circuito (I_{sc}), tensão no ponto de máxima potência (V_{mp}), corrente no ponto de máxima potência (I_{mp}), potência máxima ($P_{m\acute{a}x}$), fator de forma (FF) e eficiência (η). Também se pode representar a densidade de corrente em função da tensão aplicada (J-V), sendo que a densidade de corrente de curto-circuito (J_{sc}) é a razão entre a I_{sc} e a área do dispositivo.

A corrente elétrica de curto-circuito existe devido à geração e coleta de portadores de carga, e constitui-se na máxima corrente que se pode obter. É medida na célula quando a tensão em seus terminais é igual a zero [26].

Existem vários fatores que devem ser considerados para a obtenção da I_{sc} [7]. Por isso, é comum utilizar a densidade de corrente de curto-circuito nos estudos realizados, pois a I_{sc} depende da área da célula solar. Também se considera o número de fótons incidentes, ou seja, da radiação solar incidente e o espectro da radiação solar incidente, por isso utiliza-se o espectro padrão AM1,5G.

A V_{oc} é dada por:

$$V_{OC} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_l}{I_0} + 1\right) \quad (2.10)$$

Pode-se observar que a V_{oc} depende da corrente de saturação no escuro e da corrente fotogerada e também é influenciada pela temperatura da célula solar. A V_{oc} está relacionada com a recombinação no dispositivo e constitui a máxima tensão que se pode extrair de uma célula solar. Nesta situação, os processos de recombinação se igualam aos processos de geração, e a corrente que se extrai da célula é nula [7, 26].

Outro parâmetro importante é o fator de forma. Que é definido como a razão da máxima potência elétrica produzida pela célula solar pelo produto da I_{SC} pela V_{OC} [27]:

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{OC} I_{SC}} \quad (2.11)$$

O fator de forma é o parâmetro que, em conjunto com a I_{SC} e a V_{OC} , determina a máxima potência da célula solar. A resistência em série (R_S) e a resistência em paralelo (R_P) são dois parâmetros que afetam o fator de forma e, por meio dele, a eficiência [27].

A eficiência é o parâmetro que define quão efetivo é o processo de conversão de energia e é definida pela Equação 2.12, onde representa a relação entre a potência elétrica produzida pela célula solar e a potência da radiação solar que incide sobre ela.

$$\eta = \frac{I_{SC} V_{OC} FF}{AG} 100\% \quad (2.12)$$

Sendo que A representa a área da célula e G a irradiância solar incidente [26].

A resistência em paralelo origina-se pela fuga de corrente na superfície da célula, por difusões ao longo de discordâncias ou contornos de grãos, por pequenos curtos-circuitos nas malhas metálicas, etc. [28]. A baixa resistência em paralelo provoca perda de potência nas células fotovoltaicas, fornecendo um caminho alternativo para a corrente elétrica fotogerada. Sendo que esses desvios reduzem, principalmente, a V_{OC} da célula solar [29].

Já a resistência em série origina-se pela circulação da corrente através do emissor e da base da célula, pela resistência de contato entre o metal e o silício e pela resistência dos contatos frontal e posterior. Quando o fator de sombra de uma célula tende a zero (a malha de metalização deixa passar mais radiação solar), a resistência em série tende ao infinito. O principal impacto da resistência em série é

reduzir o fator de forma, entretanto, valores altos reduzem também a corrente de curto-circuito [28].

A resistência em paralelo, quando suficientemente pequena, reduz a V_{OC} e o FF, por outro lado, uma alta resistência em série, reduz o FF e a I_{SC} . A Figura 2.10 ilustra os efeitos da R_S e da R_P no comportamento da célula solar.

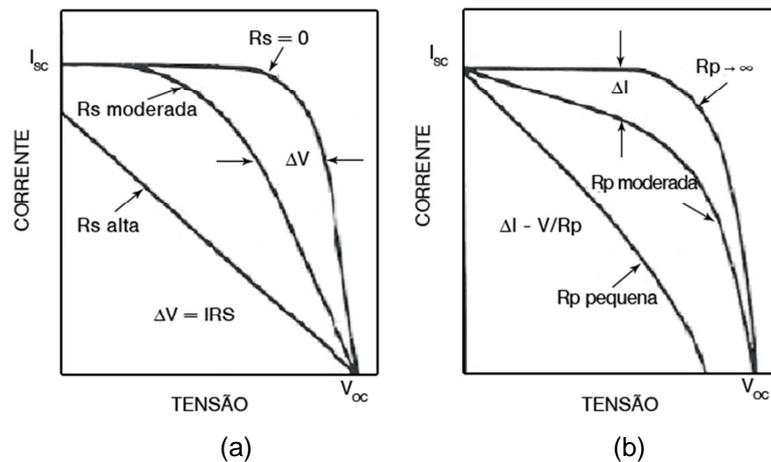


Figura 2.10. Influência das resistências (a) série e (b) paralelo sobre a característica I-V de células solares [27].

2.4. Simulação de Células Solares

2.4.1. PC-1D

O programa computacional PC-1D simula dispositivos resolvendo por métodos numéricos as equações de transporte unidimensionais em semicondutores [30]. É bastante flexível e permite a modificação de características do material semiconductor, podendo, assim, introduzir parâmetros característicos de determinada estrutura, tais como: recombinação (em superfície ou em volume), perfis de impurezas, tempo de vida, refletância (medida ou calculada internamente), etc. Um aspecto vantajoso do programa é a possibilidade da divisão do dispositivo em três regiões distintas e, portanto, podem-se ajustar os parâmetros das diferentes regiões de uma célula solar, emissor – base – campo retrodifusor, separadamente. Perdas por recombinação ou por defeitos intrinsecamente não-unidimensionais

contabilizam-se por diodos ou resistências em paralelo ao dispositivo [18]. A Figura 2.11 mostra a interface inicial do programa PC-1D.

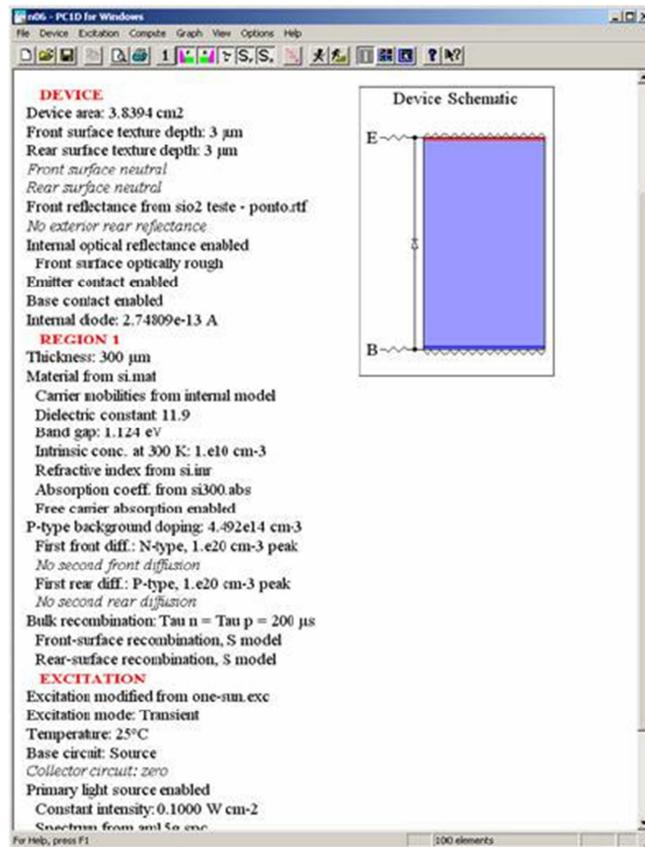


Figura 2.11. Janela com a interface principal do programa PC-1D.

2.4.2. Athena e Atlas

Os simuladores ATHENA e ATLAS podem ser usados simultaneamente para o desenvolvimento de células solares [31-35]. O ATHENA é utilizado para simular o processo de fabricação de dispositivos e o ATLAS para determinar as curvas características a partir da estrutura gerada pelo primeiro. A combinação do ATHENA e do ATLAS torna possível determinar o impacto dos parâmetros do processo sobre as características do dispositivo.

Essa simulação é realizada em um mesmo ambiente, o DECKBUILD, e os resultados gráficos obtidos durante as simulações são apresentados por meio do editor TONYPLOT, ambos pertencentes ao pacote TCAD da Silvaco.

O ATHENA possibilita simulações bidimensionais, tendo como base equações de fenômenos físicos e químicos que reproduzem o processo de fabricação de dispositivos semicondutores. Difere-se de outros simuladores de processos que propõem a modelagem empírica, pois mesmo sendo, normalmente, muito precisos e versáteis para modelar qualquer sistema, não fornecem uma visão do ocorrido no processo.

O ATLAS possibilita simulações bi ou tridimensionais baseado em equações de fenômenos físicos, podendo assim, prever as características elétricas nos regimes de corrente contínua, corrente alternada e transitório, associadas com estruturas físicas específicas e condições de polarização do dispositivo.

2.4.3. Criação do Dispositivo no programa ATHENA

O desenvolvimento da estrutura do dispositivo desejado no ATHENA é realizado em uma linguagem de programação textual para que, então, a simulação seja executada. Para isso, devem ser definidas a geometria do dispositivo e todas as etapas do processo. A seguir será descrito como a estrutura deve ser construída para a simulação.

2.4.3.1. Malha

Primeiramente especifica-se a malha, em duas dimensões, sobre a qual o dispositivo será construído (Figura 2.12). A especificação correta da malha é muito importante para a precisão final dos resultados. Se o número ou densidade de triângulos na malha não for alto o suficiente nas regiões, tais como junções ou limites do material, os resultados da simulação não serão fidedignos. O número máximo de nós na rede é de 20.000 para simulações com o ATHENA, porém, o uso

de muitos triângulos na malha conduz a um aumento significativo e desnecessário no tempo de execução da simulação.

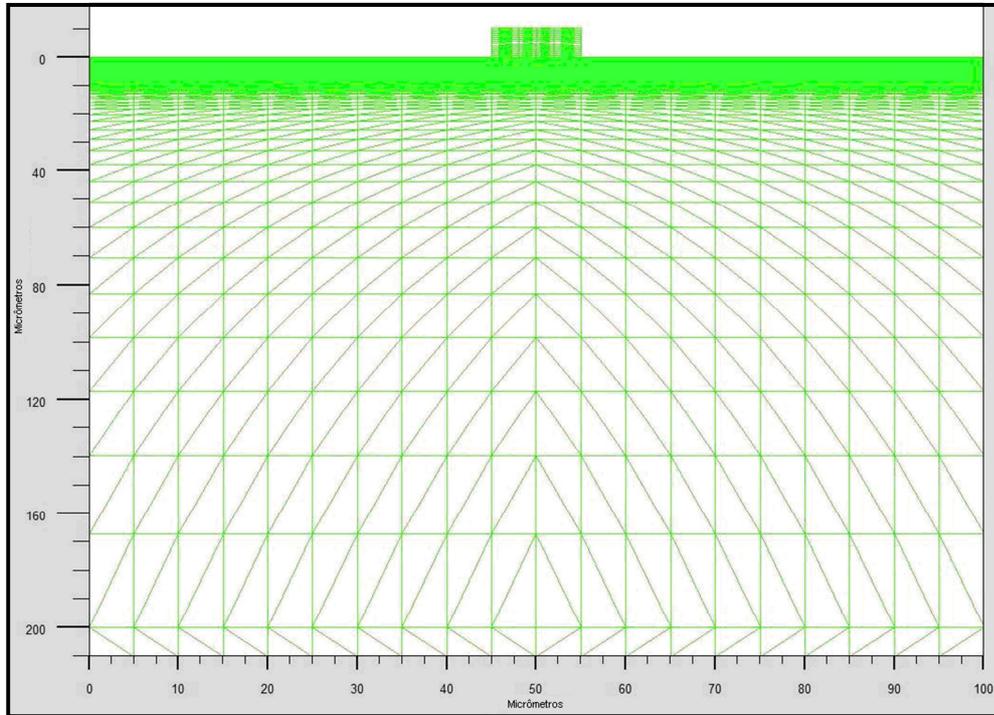


Figura 2.12. Exemplo de malha com 3.690 nós na rede, visualizada por meio do TONYPLOT.

2.4.3.2. Material de Partida

Deve-se especificar o material de partida e a dopagem da base. Os materiais utilizados em toda a simulação podem ser selecionados a partir de uma biblioteca que inclui uma série de elementos comuns, compostos e ligas. Nessa biblioteca já estão definidos parâmetros importantes de cada material.

2.4.3.3. Dopagem

A dopagem do material pode ser realizada por meio de diversas metodologias como, por exemplo, a difusão. Para a simulação, devem-se especificar os parâmetros das etapas da difusão, como tempo, temperatura, concentração de impurezas, etc. e o tipo de equação de difusão a ser resolvido no processo. Os modelos de difusão se baseiam no conceito de “difusão aos pares”, o que quer dizer que o átomo dopante não pode difundir por si próprio e, sim, necessita da

assistência de um defeito pontual (vacância ou auto-interstício na rede de silício) como veículo da difusão. Como padrão é usado o modelo denominado de FERMI, que assume que a densidade de defeitos pontuais está em equilíbrio termodinâmico.

2.4.3.4. Eletrodos

Para definir os eletrodos do dispositivo, é necessário especificar a posição e o tamanho de cada um, podendo-se também especificar o material e a função (cátodo ou ânodo) de cada eletrodo.

Para o processamento da parte posterior do dispositivo, é necessário inserir um comando para inverter a estrutura no eixo x. Após dopar o material e colocar o eletrodo na parte posterior deve-se virar novamente a estrutura.

2.4.3.5. O Dispositivo

Após a definição de todos os parâmetros, a estrutura pode ser desenhada por meio do TONYPLOT (Figura 2.13) e utilizada no simulador ATLAS para a determinação de suas características elétricas.

2.4.4. Simulação do Dispositivo no programa ATLAS

A estrutura simulada por meio do programa ATHENA é usada no simulador ATLAS para prever as características elétricas associadas com condições predefinidas. Para isso, como no ATHENA, é necessário especificar alguns parâmetros. Em seguida, mostra-se uma breve descrição dos mesmos.

2.4.4.1. Modelos Físicos

Os modelos físicos implementados no ATLAS estão agrupados em cinco classes: mobilidade, recombinação, estatística dos portadores de carga majoritários e minoritários, ionização e tunelamento.



Figura 2.13. Exemplo de estrutura básica de célula solar simulada no ATHENA.

Para a simulação, devem-se especificar os modelos físicos conforme a necessidade e a complexidade da estrutura estudada. Por exemplo, utiliza-se modelo de mobilidade quando os elétrons e lacunas, do material do dispositivo, são acelerados por campos elétricos, mas tem seu momento linear reduzido devido a processos de espalhamento por fônons, impurezas ionizadas, defeitos, impurezas neutras e portadores de carga. No manual do ATLAS há descrições e recomendações dos modelos mais importantes [32].

2.4.4.2. Radiação

Para a simulação de células solares é importante especificar a fonte de radiação e definir a localização, orientação, irradiância e espectro a ser utilizado.

Considerando que as células solares simuladas serão componentes de módulos para uso terrestre, deve-se utilizar o espectro solar AM 1,5 global, com irradiância de 1000 W/m^2 no plano das células solares [36]. Para isso é necessário converter os dados do espectro para um arquivo no formato de reconhecimento do programa.

2.4.4.3. Condições de Contorno

O ATLAS suporta diversas condições de contorno, que devem ser especificadas conforme necessidade e complexidade do dispositivo e da simulação realizada. Podem ser especificados contatos ôhmicos, barreiras Schottky, resistores entre os contatos do dispositivo e a fonte de tensão usada para polarizá-lo bem como resistências de contato distribuídas (*spreading resistance*) para considerar o tamanho finito dos contatos.

2.4.4.4. Resultado da Simulação

Após a especificação de todos os parâmetros, podem-se definir os contatos e aplicar uma tensão variável e determinar a curva característica I-V. A partir desta, podem ser determinadas as características elétricas da célula solar, sendo que os resultados dos mesmos são visualizados na própria interface do DECKBUILD.

A partir desses resultados, pode-se obter a curva I-V da célula solar simulada e obter o gráfico por meio do TONYPLOT, como mostrada na Figura 2.14.

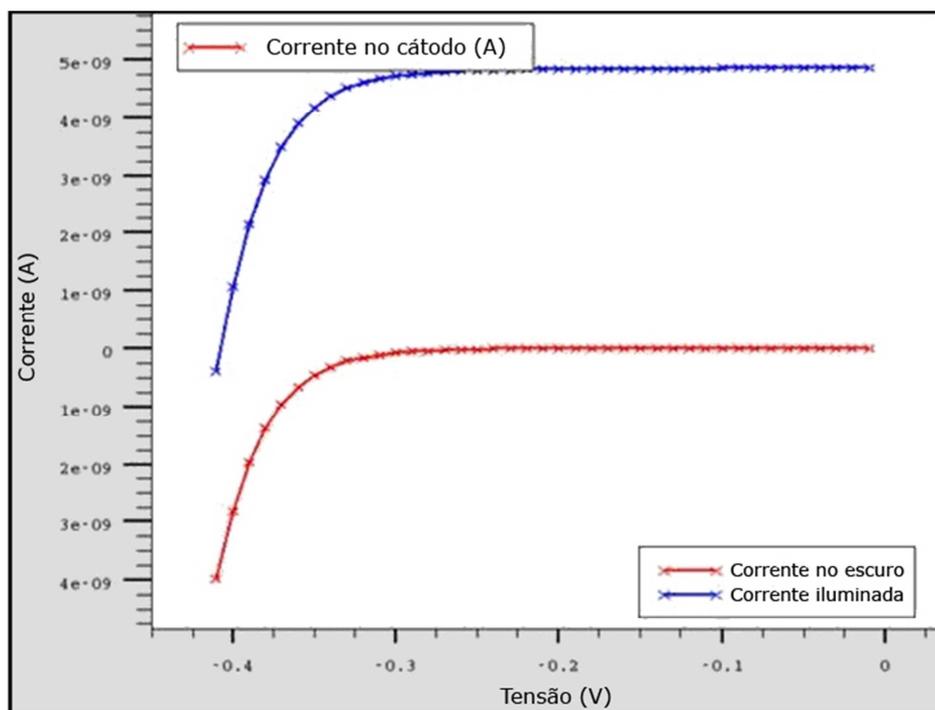


Figura 2.14. Exemplo de curva I-V de uma célula solar simulada no ATLAS.

Uma característica adicional dos resultados apresentados pelo TONYPLOT é a capacidade de fazer medidas a partir de qualquer parte do dispositivo e mostrar imagens de diversos pontos e fenômenos que ocorrem no mesmo, tais como portadores de carga e densidades de corrente elétrica, potencial de fotogeração e campos elétricos. A visualização dessas imagens é muito importante para facilitar a compreensão e a pesquisa dos fenômenos ocorrentes no dispositivo simulado. A Figura 2.15 apresenta um mapa da fotogeração de portadores na célula solar.

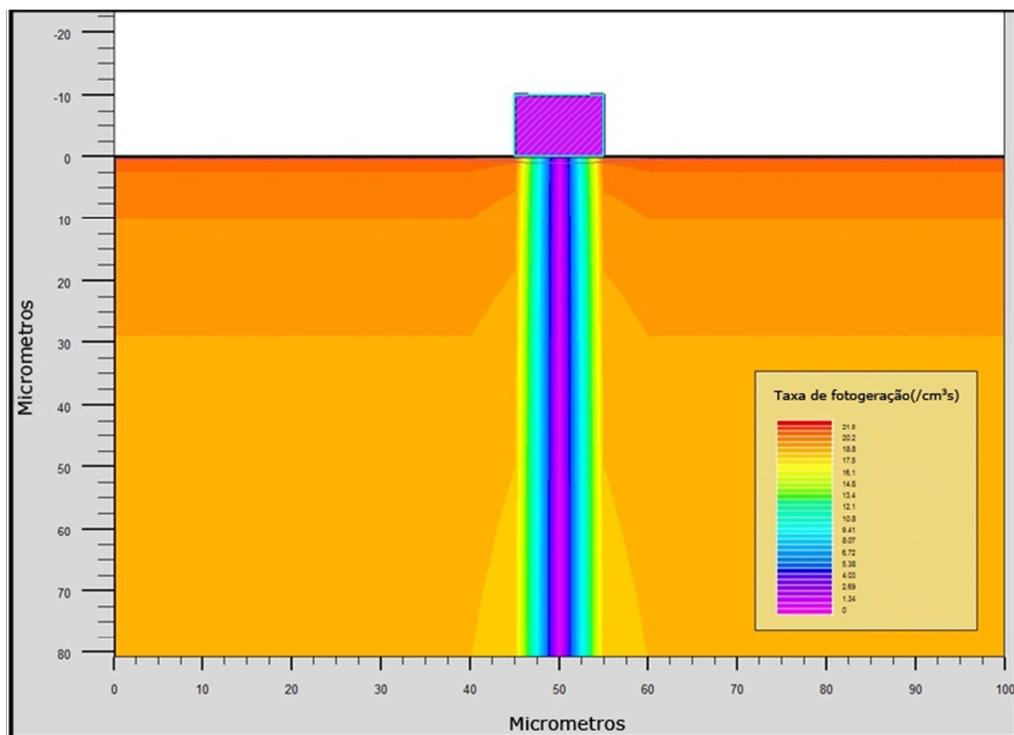


Figura 2.15. Exemplo de potencial de fotogeração simulada no ATLAS, visualizada por meio do TONYPLOT.

3. IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DE REGIÃO N⁺ SOBRE REGIÃO P⁺ EM CÉLULAS SOLARES P⁺NN⁺

3.1. Introdução

A Figura 3.1 apresenta o perfil de átomos de boro típico de processos para fabricar células solares p⁺nn⁺ desenvolvido no NT-Solar [36].

A região p⁺ é obtida pela deposição por *spin-on* do dopante Polyboron PBF20, da empresa Filmtronics e difusão a 1000 °C por 20 min. A concentração em superfície é de aproximadamente $1,7 \times 10^{19}$ átomos/cm³ ou cm⁻³ e a concentração máxima é de $2,7 \times 10^{19}$ cm⁻³, obtida em $x = 0,16$ μm. Para inverter a região p⁺ para n⁺ próximo da superfície e formar a junção flutuante, deve ser realizada uma difusão de fósforo, sobre a de boro, que produza uma concentração maior que estas.

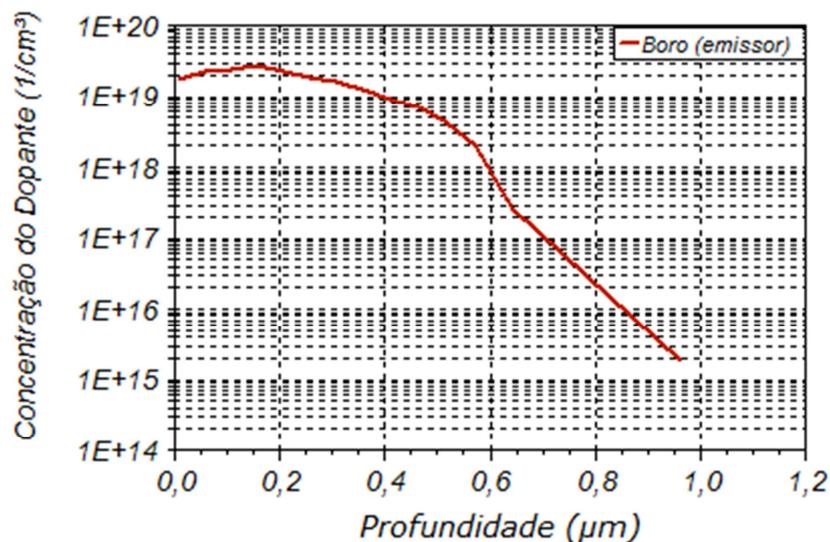


Figura 3.1. Perfil de átomos de boro de uma célula solar p⁺nn⁺ desenvolvida no NT-Solar [36].

Realizaram-se testes para a formação da região frontal tipo n⁺, isto é, a junção flutuante, mediante a deposição uniforme, por *spin-on*, de líquidos dopantes com diferentes concentrações de fósforo sobre a superfície das lâminas e a posterior difusão em forno de esteira. Também, realizou-se um teste para obter a junção flutuante apenas com a difusão em forno de tubo de quartzo. Foram fabricadas

células solares bem como foram utilizados programas de simulação de dispositivos para analisar as mesmas.

3.2. Análise Experimental da Formação da Junção Flutuante

3.2.1. Metodologia

3.2.1.1. Processo em Forno de Esteira

Primeiramente, foram realizados experimentos para analisar a formação da junção flutuante com o uso de dopante depositado por *spin-on* e difundido em forno de esteira. Realizou-se uma série de testes com diferentes dopantes para verificar a formação da junção, para posterior fabricação de células solares.

Depositaram-se sobre lâminas de silício Cz tipo p, texturadas e previamente limpas com solução RCA2 [37], soluções alcoólicas com fósforo, nas concentrações de 1 %, 4 %, 8 % e 10,5 %, da empresa Filmtronics, com denominação comercial de P505, P507, P508 e P509, respectivamente. Essas soluções tem concentrações de fósforo de 0,45, 5, 14,5 e 20×10^{20} átomos/cm³, respectivamente. A solução P509 é normalmente usada no NT-Solar para fabricação de células solares e há vários trabalhos anteriores de outros centros de pesquisa que usaram as outras soluções citadas, principalmente na fabricação de dispositivos por processos térmicos rápidos [38-40]. Enquanto que para a solução P509 há autores que comentam o aparecimento de defeitos superficiais quando os processos térmicos são realizados a temperaturas acima de 700 °C [40], o mesmo não foi relatado para as soluções com menor concentração.

Para depositar o filme com o dopante, sobre a lâmina de silício, foi usada a técnica de *spin-on* com o equipamento denominado *spinner*. Depositou-se o líquido que contém o dopante no centro da lâmina de silício e rapidamente colocou-se a mesma em alta rotação e assim o líquido formou uma película homogênea sobre a superfície. A seguir, a lâmina foi colocada na estufa para a evaporação dos solventes durante 20 minutos na temperatura de 200 °C. A Figura 3.2 ilustra as principais etapas deste processo. A espessura final do filme e outras propriedades

dependem de algumas informações do dopante a ser depositado, como a viscosidade do dopante e dos parâmetros escolhidos para o processo de rotação. Nos processos realizados, utilizou-se uma velocidade angular de 3000 rpm e um tempo de rotação de 20 segundos [41].

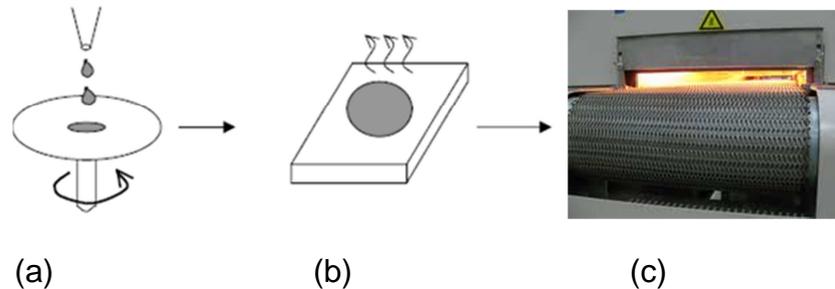


Figura 3.2. Formação do filme dopante pela técnica de *spin-on*: (a) o substrato é submetido à alta rotação, (b) evaporação dos solventes na estufa e (c) difusão em forno de esteira.

Após a deposição do dopante, as lâminas foram introduzidas em um forno de esteira, marca RTC, modelo LA309, com três zonas de aquecimento. A Figura 3.3 apresenta um esquema do forno, sendo que as três zonas de aquecimento tem as seguintes dimensões: zona 1 = 19 cm, zona 2 = 38,1 cm e zona 3 = 19 cm, totalizando 76,1 cm. Além destas, possui uma zona de estabilização na entrada (*entrance baffle/exhaust*) de 38,1 cm, uma zona de estabilização na saída (*insulated transition tunnel exhaust*) de 38,1 cm e uma zona de resfriamento de 76 cm. A velocidade da esteira (V_E) pode ser variada de 33 cm/min a 330 cm/min e o forno pode operar em temperaturas de até 1000 °C. Os parâmetros de velocidade e temperatura devem ser ajustados experimentalmente e nem todas as combinações são possíveis para obter um processo estável. O aquecimento é produzido por lâmpadas de tungstênio com gases halogêneos, emitindo na faixa da radiação visível e infravermelha. A temperatura no interior das zonas é medida com termopares e um sistema de controle de potência regula a temperatura nas mesmas. Ar comprimido é usado nos processos térmicos sendo que o mesmo é filtrado após a produção e no ponto de uso. O fluxo total de ar comprimido no forno, considerando todas as zonas, durante os processos de difusão foi de 570 pés cúbicos/h, isto é, 269 L/min.

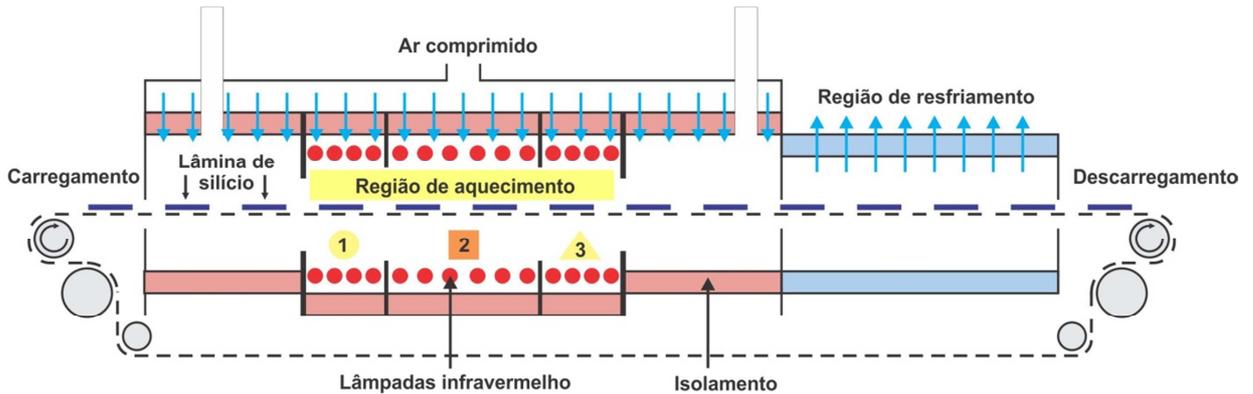


Figura 3.3. Esquema do forno de esteira usado para a difusão de fósforo. As zonas 1, 2 e 3 são aquecidas por lâmpadas de tungstênio e totalizam 76,1 cm.

Na difusão de fósforo é formada, sobre a superfície da lâmina de silício, uma camada de silicatos de fósforo que deve ser eliminada na sequência do processo, pois essa camada cria uma zona de alta recombinação e ao mesmo tempo dificulta o estabelecimento do contato metal-semicondutor durante o processo de queima das pastas metálicas de serigrafia. Os silicatos de fósforo foram extraídos com HF 40 % e as lâminas foram limpas com água deionizada (H_2O_{DI}) e com uma solução de RCA2. Em seguida foram novamente limpas com água deionizada e logo secadas com nitrogênio [38].

No processo de fabricação de células solares, após a limpeza RCA2 é depositado um filme antirreflexo na face frontal e se realiza a metalização que consiste da deposição das pastas metálicas, secagem a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ e queima das pastas. Este último processo é realizado a temperaturas de queima (T_Q) da ordem de $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $900\text{ }^{\circ}\text{C}$. No NT-Solar, para células p^+nn^+ de espessura de $200\text{ }\mu\text{m}$ e com as pastas da DuPont PV202 para a face p^+ e pasta PV159 para face n^+ , os parâmetros ótimos para queima das pastas são: $T_Q = 840\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_E = 240\text{ cm/min}$ [36].

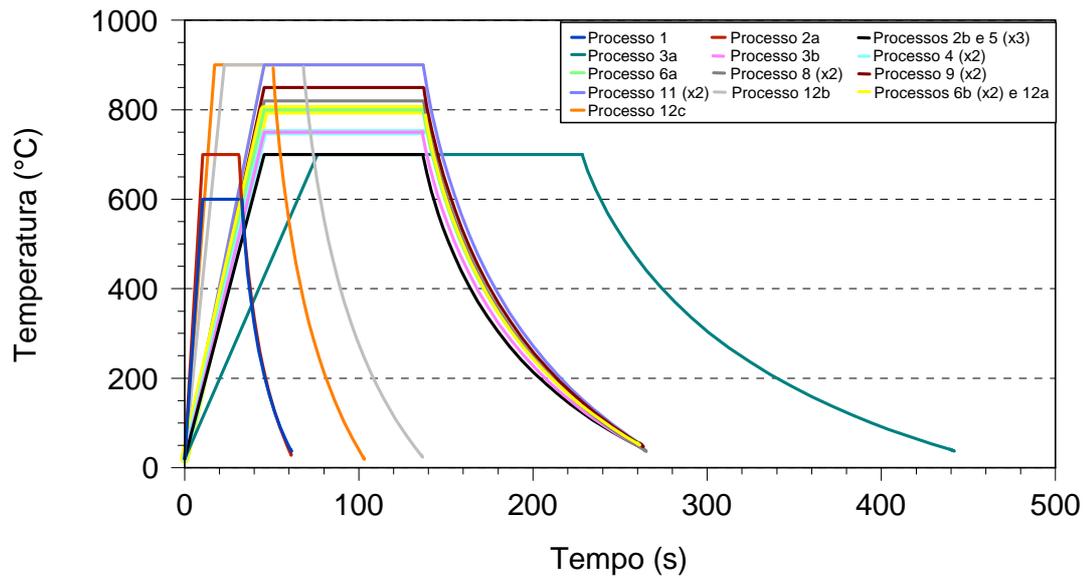
As lâminas que passaram pela deposição e difusão de fósforo também foram submetidas ao processo térmico de queima de pastas a fim de ser mantida a mesma sequência de passos térmicos da fabricação de células solares. Foram utilizadas as condições de temperatura e velocidade de esteira acima citadas.

As regiões n^+ foram caracterizadas pela medida da resistência de folha, medição de perfil de impurezas e, quando formadas sobre regiões p^+ , foi determinado se houve inversão de tipo de dopagem (de p^+ para n^+) pela técnica da ponta quente.

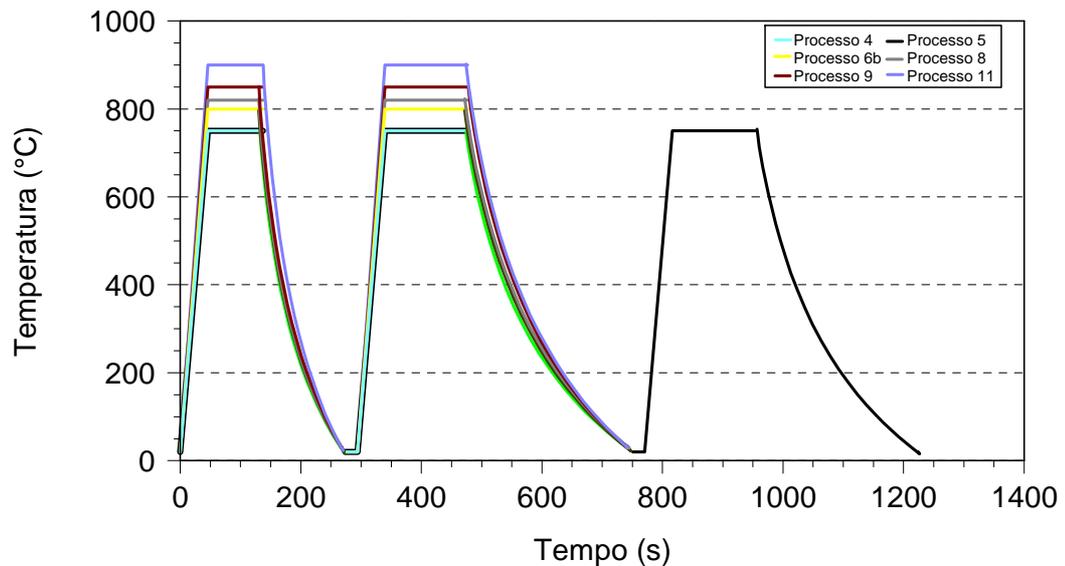
Foram usados nos primeiros testes de difusão os dopantes P505, P507, P508 e P509. A Tabela 3.1 resume os processos realizados e a Figura 3.4 apresenta um gráfico do comportamento da temperatura do forno em função do tempo do processo. As curvas foram desenhadas baseando-se nos comprimentos de cada zona do forno e na velocidade da esteira. As temperaturas somente foram medidas nas três zonas quentes e considerou-se que as lâminas de silício entram e saem do forno na temperatura do laboratório, ajustada para 21 °C. Os processos 7 e 10 não aparecem na tabela porque são idênticos ao 6 e 9, respectivamente, que foram usados para fabricar células solares.

Tabela 3.1. Características dos processos utilizados para difusão de fósforo em lâminas de Si-Cz tipo p em forno de esteira, para futura formação de junção flutuante.

Proc.	Dopante	V_E (cm/min)	Temperatura de difusão T_D (°C)			Nº de passagens	Tempo em zonas aquecidas	
			Zona 1	Zona 2	Zona 3		(min)	(s)
1	P505	220	600	600	600	1	0,35	21
	P507							
	P508							
	P509							
2	P508	50	700	700	700	1	1,52	91
		220					0,35	21
3	P508	50	700	700	700	1	1,52	91
4	P508	50	750	750	750	2	3,04	183
			750	750	750			
5	P508	50	750	750	750	3	9,12	547
	P509							
6	P508	50	800	800	800	1	1,52	91
						2	3,04	183
8	P508	50	820	820	820	2	3,04	183
	P509							
9	P508	50	850	850	850	2	3,04	183
	P509							
11	P508	50	900	900	900	2	3,04	183
12	P508	50	900	900	900	1	1,52	91
		100					0,76	45,7
		133					0,57	34,2



(a)



(b)

Figura 3.4. Perfis de temperatura estimados para os processos de difusão de fósforo para obtenção de junção flutuante: (a) processos com uma passagem ou primeira passagem dos processos com múltiplas passagens pelo forno RTC; (b) processos com múltiplas passagens pelo forno RTC.

3.2.1.2. Processo em Forno de Tubo de Quartzo

Realizou-se um experimento para a implementação da junção flutuante com a utilização de um forno de tubo de quartzo e usando as paredes do tubo como fonte

de fósforo. Este processo foi desenvolvido e aplicado com sucesso em células solares p^+nn^+ de alta eficiência [18].

A difusão de fósforo para obtenção da junção flutuante foi realizada a uma temperatura de 900 °C no forno de tubo de quartzo rico em fósforo, porém sem fluxo de $POCl_3$ durante o processo. Optou-se por medir os perfis de fósforo em lâminas que continham boro previamente difundido para analisar se haveria a inversão.

3.2.2. Resultados dos Processos de Difusão de Fósforo

Nos processos 1, 2, 3 e 4, não se conseguiu medir a resistência de folha nem o perfil de fósforo em lâminas de silício, texturadas e polidas, tipo p, indicando que os valores de resistência de folha eram elevados e a dopagem era muito pequena a ponto do equipamento ECV não conseguir medir a concentração de dopantes.

Nas lâminas do processo 5, com difusão a 750 °C, novamente não foi possível medir a resistência de folha com o equipamento do NT-Solar. No entanto, foi possível medir o perfil. A Figura 3.5 apresenta o perfil de fósforo obtido, onde se observa a baixa dopagem obtida. A resistência de folha foi medida obtendo-se 362 Ω/\square e 340 Ω/\square , para difusões com P508 e P509, respectivamente. Com o uso do sistema de ponta quente, verificou-se que ao deslocar a ponta quente sobre a superfície a corrente sofria variações de sentido, indicando uma dopagem não uniforme.

No processo 6, a temperatura de difusão foi aumentada para 800 °C, mantendo-se a velocidade da esteira em 50 cm/min. A resistência de folha média medida para as lâminas que passaram duas vezes pelo mesmo processo térmico foi de $(570 \pm 40) \Omega/\square$, maior que a medida em lâminas do processo 5. Na lâmina que passou somente uma vez, não se conseguiu medir a resistência de folha. O perfil de fósforo para o processo 6 com duas passagens pelo forno RTC está representado na Figura 3.6, observando que se atingiu a concentração de $3,3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ de

átomos de fósforo próximo da superfície, ainda baixa para produzir inversão de dopagem na superfície.

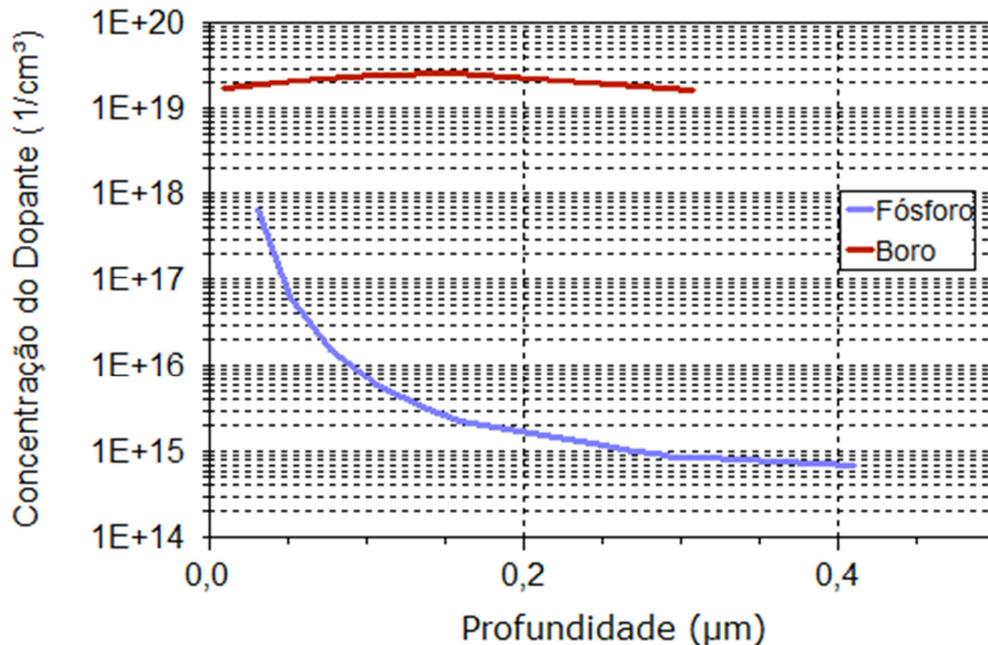


Figura 3.5. Perfil de fósforo para o processo 5, realizado a 750 °C, com $V_E = 50$ cm/min. Como a concentração de fósforo ficou abaixo da de boro, não ocorreu inversão. Sendo que o perfil de átomos de boro foi reproduzido na figura para auxiliar na comparação.

Os resultados do processo 8 também foram colocados na Figura 3.6. Nesse processo, T_D foi igual a 820 °C e $V_E = 50$ cm/min, com duas passagens. Foram usadas lâminas texturadas e dopantes P508 e P509 e não se obteve resultado coerente na medição da resistência de folha. O perfil obtido foi levemente mais profundo que o obtido com a temperatura de 800 °C e o uso de P508 e P509 resultaram em perfis semelhantes.

A Figura 3.7 apresenta os perfis de átomos de fósforo sobrepostos obtidos pela difusão a 850 °C, $V_E = 50$ cm/min, duas passagens pelo forno RTC. Constatou-se que a concentração em superfície (C_S) atingiu valores acima de 1×10^{20} cm⁻³, valor necessário para produzir a inversão. Comparado aos resultados apresentados na Figura 3.6 para o processo a 820 °C observa-se a maior profundidade até a concentração de $6,6 \times 10^{17}$ cm⁻³. A resistência de folha média foi de (680 ± 30) Ω/□ para dopagem com P509 e de (400 ± 50) Ω/□ para P508.

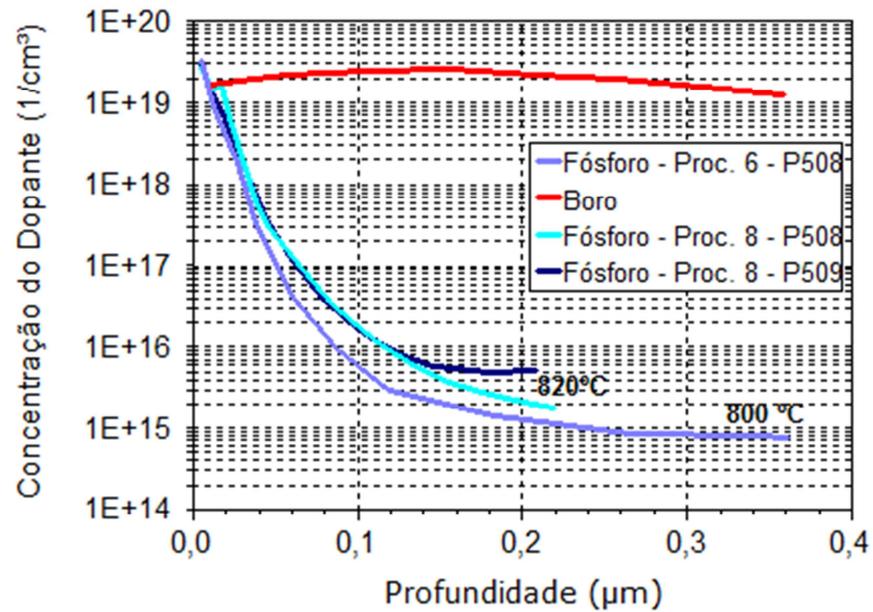


Figura 3.6. Perfis de fósforo para os processos 6 e 8, realizados a 800 °C e 820 °C, respectivamente, com $V_E = 50$ cm/min e com duas passagens pelo forno RTC.

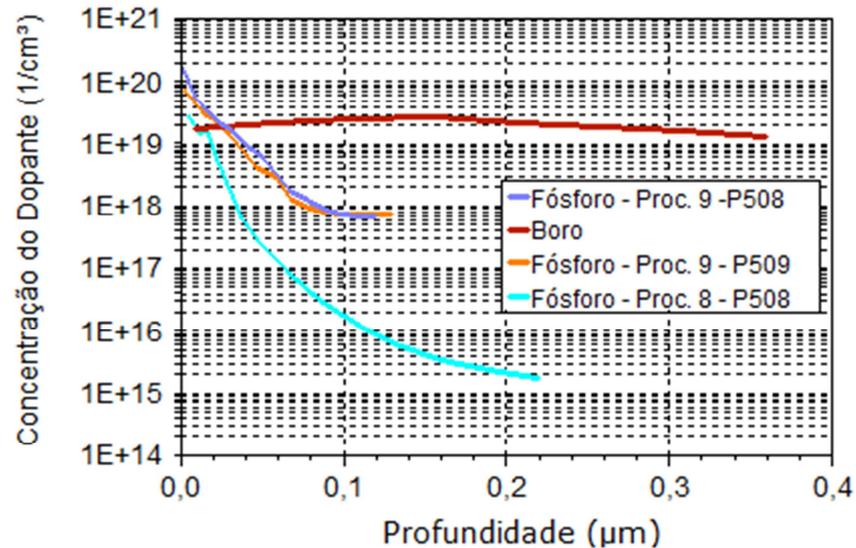


Figura 3.7. Perfis de fósforo para o processo 9, realizado a 850 °C, com $V_E = 50$ cm/min e com duas passagens pelo forno RTC.

Considerando que no processo 9 havia C_S de fósforo maior que 10^{20} cm⁻³, nos processos seguintes e com maior temperatura, optou-se por medir os perfis de fósforo em lâminas que continham boro previamente difundido. A Figura 3.8 apresenta os resultados dos processos 11 e 12, realizados na temperatura de 900 °C e usando P508 com quatro tempos de difusão: $t = 3,04$ min ($V_E = 50$ cm/min, duas

passadas no forno RTC), $t = 1,52$ min ($V_E = 50$ cm/min), $t = 0,76$ min ($V_E = 100$ cm/min) e $t = 0,57$ min ($V_E = 133$ cm/min). Conforme se observa na Figura 3.8, todos os processos produziram concentração de fósforo maior que a concentração de boro e o equipamento ECV apresentou que houve inversão na superfície, pois indicou que o tipo de dopagem era n na superfície.

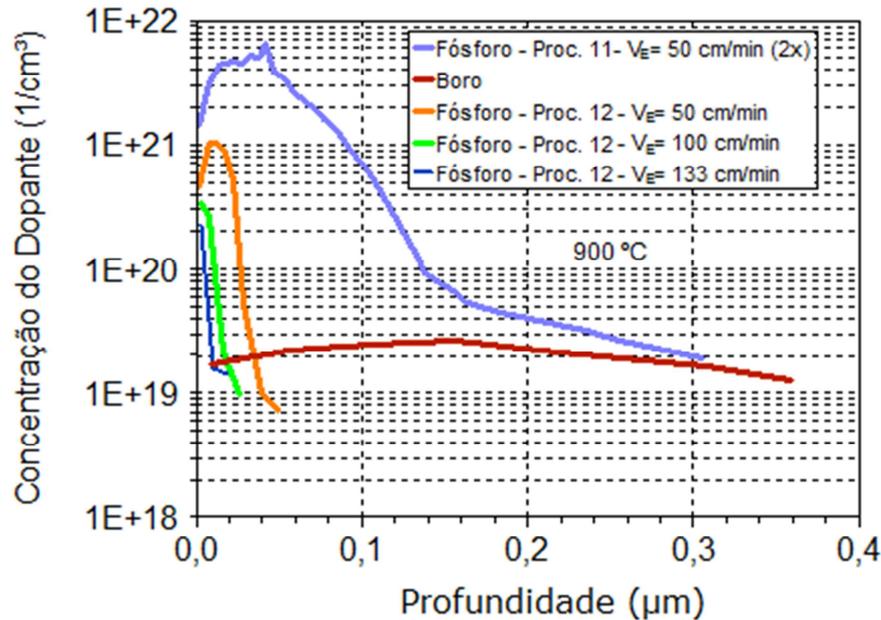


Figura 3.8. Perfis de fósforo para os processos 11 e 12, realizados a 900 °C, com $V_E = 50$ cm/min (uma e duas passagens), $V_E = 100$ cm/min e $V_E = 133$ cm/min, com uma passagem pelo forno RTC. O perfil de átomos de boro foi reproduzido na figura para auxiliar na comparação.

Para o processo 11, a resistência de folha média da região dopada após a difusão de boro foi de $(51 \pm 3) \Omega/\square$. Depois do processo de difusão de fósforo no forno RTC sobre esta face, a resistência de folha média foi reduzida para $(13 \pm 2) \Omega/\square$ e com o teste da ponta quente observou-se que houve inversão na superfície de p^+ para n^+ . Cabe comentar que as técnicas da ponta quente e de quatro pontas podem levar a incertezas elevadas quando há compensação de regiões p^+ e n^+ . Esta incerteza pode explicar a queda observada na resistência de folha.

No processo 12, com $V_E = 50$ cm/min, 100 cm/min e 133 cm/min, as resistências de folha médias na face frontal dopada com fósforo depositado por *spin-on* foram de $(38 \pm 2) \Omega/\square$, $(40 \pm 2) \Omega/\square$ e $(41,8 \pm 1,5) \Omega/\square$, respectivamente. A medida com o teste da ponta quente indicou que não houve inversão de tipo de dopagem na

superfície. No entanto, o equipamento ECV indicou que havia uma região tipo n^+ sobre a região p^+ , conforme mostra o diagrama extraído do equipamento e mostrado na Figura 3.9.

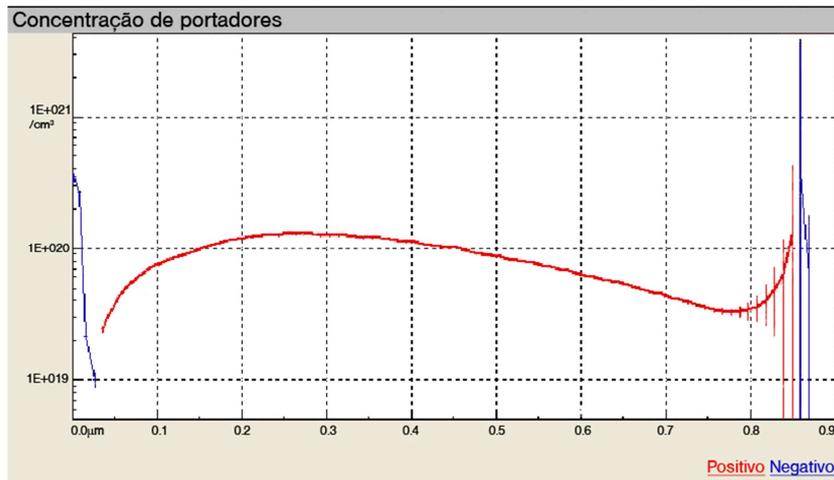


Figura 3.9. Perfil e tipo de impureza conforme mostrado no programa de controle do equipamento ECV para o processo 12, para $V_E = 100$ cm/min. A mudança nas cores das linhas indica a mudança do tipo de portador de carga e deste modo, de dopagem.

Os experimentos 11 e 12 foram repetidos para análise do perfil usando lâminas polidas e somente realizando a difusão de fósforo a fim de evitar possíveis problemas na medida com ECV. Embora o fabricante coloque que podem ser medidos perfis em lâminas texturadas, podem ocorrer mudanças na área de contato do eletrólito durante as medições, acarretando em erros de medições [25]. No teste da ponta quente os resultados se repetiram e só as lâminas relativas ao processo 11 apresentaram inversão de p^+ para n^+ na superfície. Analisando as curvas obtidas com ECV, Figura 3.10, pode-se observar que todos os processos produziram concentração de fósforo maior que a concentração de boro, porém as curvas medidas em lâminas polidas apresentaram que as regiões dopadas tinham menor espessura, o que pode indicar que as medidas realizadas em lâminas texturadas tiveram algum erro devido à área de medição (*ring*). A resistência de folha média da região n^+ para cada processo foi de $(118 \pm 25) \Omega/\square$, $(146 \pm 34) \Omega/\square$, $(334 \pm 74) \Omega/\square$ e $(327 \pm 115) \Omega/\square$, para temperatura de 900°C e duas passagens no forno com $V_E = 50$ cm/min, uma passagem com $V_E = 50$ cm/min, uma passagem com $V_E = 100$ cm/min e uma passagem com $V_E = 133$ cm/min, respectivamente.

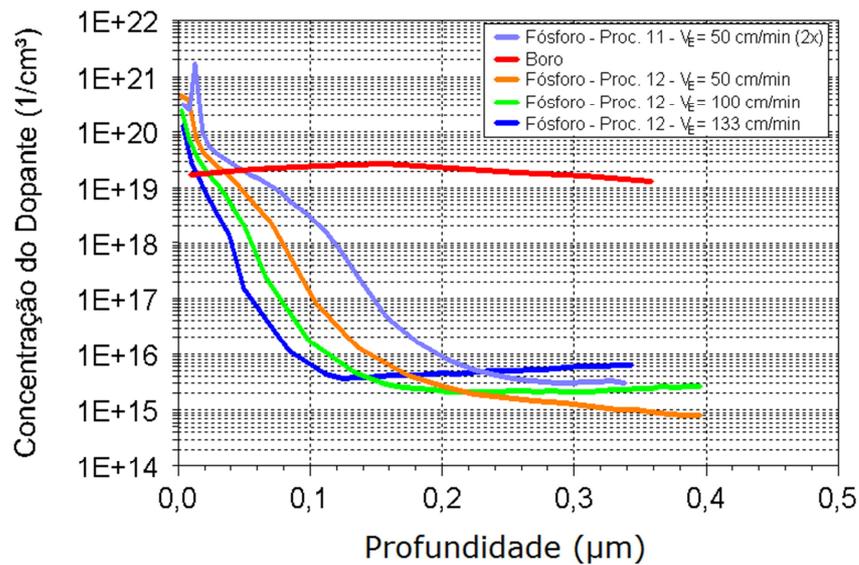


Figura 3.10. Perfis de fósforo relativos aos processos 11 e 12. Foram usadas lâminas polidas e sem emissor dopado com boro (sem região p^+).

Para as lâminas que passaram por difusão em forno de tubo de quartzo previamente carregado com fósforo, a medida com o equipamento ECV não apresentou a existência de camada de fósforo sobre a de boro, como pode ser visto na Figura 3.11, onde somente se observa o perfil de boro. A mesma lâmina foi submetida ao teste da ponta quente e não apresentou a inversão de p^+ para n^+ na superfície.

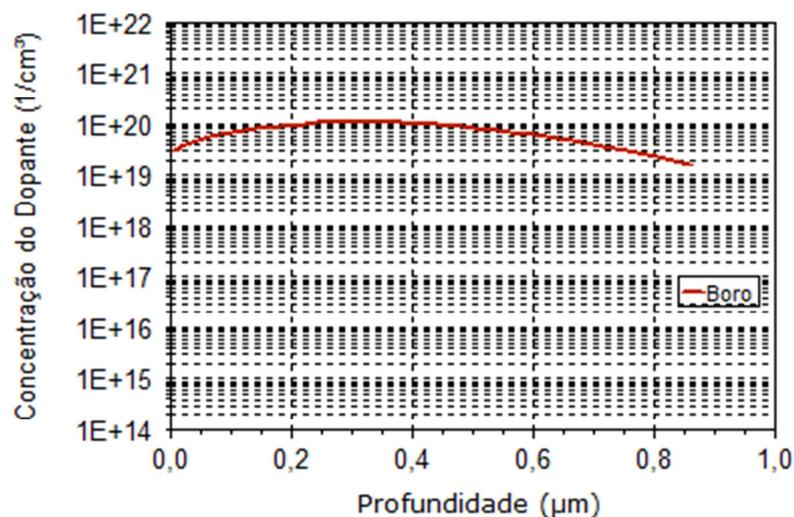


Figura 3.11. Perfil de impurezas medido na face dopada com boro depositado por *spin-on* e fósforo tendo como fonte as paredes do tubo de quartzo onde se difunde fósforo a partir de POCl_3 . Não há evidência de formação de junção flutuante sobre a região p^+ e a linha vermelha é o perfil de átomos de boro.

3.3. Fabricação e Análise de Células Solares

3.3.1. Metodologia: Processo de Fabricação das Células Solares

A Figura 3.12 apresenta um esquema do processo básico para fabricação de células solares p^+nn^+ , onde foram destacados os passos introduzidos para formação da região n^+ flutuante utilizando *spin-on* e forno de esteira, formando uma estrutura $(n^+)p^+nn^+$.

Primeiramente, realizou-se a texturação das lâminas de silício, que se caracteriza pela formação de micropirâmides mediante ataque anisotrópico baseado em uma solução de hidróxido de potássio e álcool isopropílico. Após, as lâminas de silício texturadas passaram por passos de limpeza e a deposição dos dopantes.

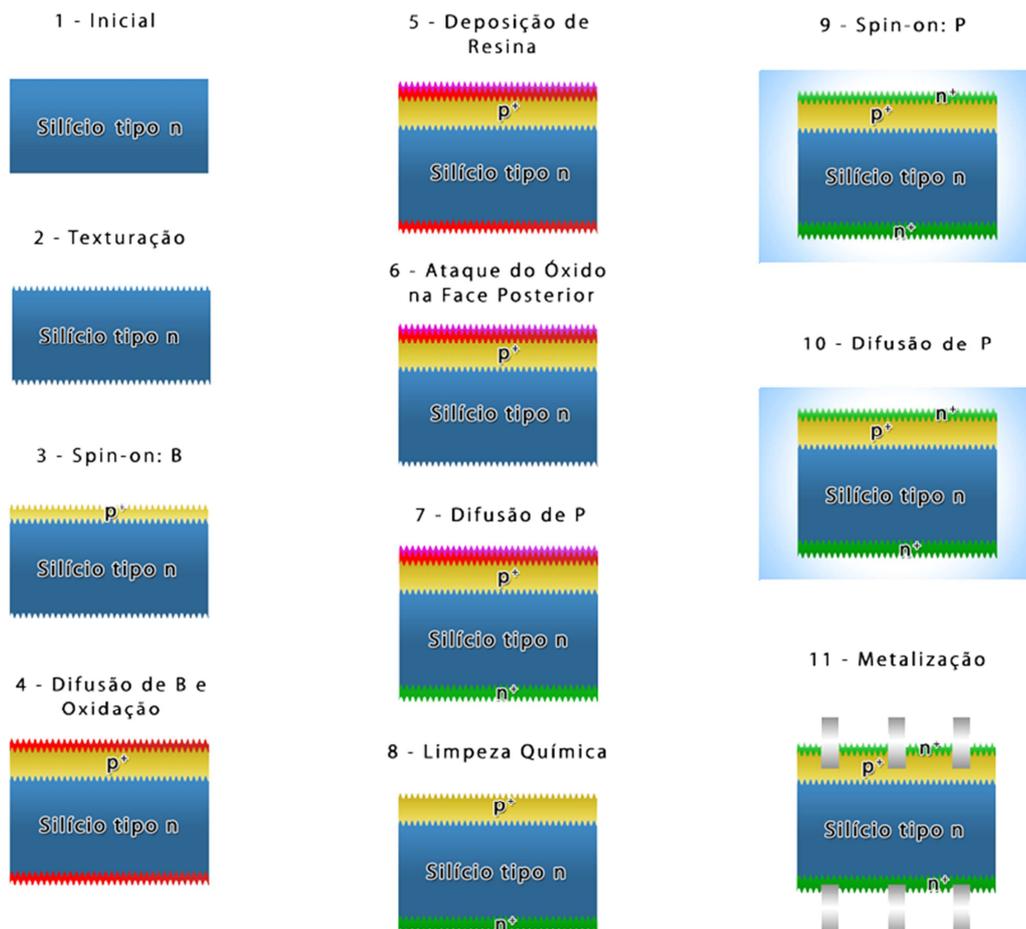


Figura 3.12. Processo para a fabricação de células solares com a estrutura $(n^+)p^+nn^+$.

Formou-se a região frontal p^+ depositando uniformemente sobre a superfície da lâmina de silício uma solução alcoólica com alta concentração de boro. A solução usada foi a Polyboron PBF20, da empresa Filmtronics, depositada por spin-on. Para a difusão da região p^+ , as lâminas passaram por um processo térmico a alta temperatura em forno de tubo de quartzo, quando os átomos de boro difundiram-se nas lâminas de silício. Ao mesmo tempo, uma camada de SiO_2 foi crescida em ambas as faces.

No passo seguinte, depositou-se resina na face frontal, dopada com boro, e se extraiu o dióxido de silício na outra face, para posterior formação da região n^+ na face em que o óxido foi retirado. A extração da camada de SiO_2 foi realizada com ácido fluorídrico tamponado.

A região posterior n^+ foi formada pela difusão de fósforo. As lâminas de silício foram colocadas em um forno convencional, com taxas de aquecimento e resfriamento controladas, usando como fonte o $POCl_3$. Após, foram realizadas limpezas químicas com HF 40 % para a retirada do óxido de proteção remanescente na face frontal e o silicato de fósforo na face posterior.

A região frontal tipo n^+ , isto é, a junção flutuante, foi obtida mediante a deposição uniforme, por *spin-on*, de líquidos dopantes com diferentes concentrações de fósforo sobre a superfície das lâminas e a posterior difusão em fornos de esteira. Depois da extração dos silicatos de fósforo com HF 40 %, H_2O_{DI} , RCA2 e H_2O_{DI} , depositou-se por evaporação em alto vácuo um filme antirreflexo de TiO_2 com espessura de 95 nm [42].

A metalização por serigrafia da célula solar consistiu na implementação de contatos elétricos por meio de uma malha metálica depositada sobre ambas as faces do dispositivo. Para a face frontal dopada com boro, foram testadas duas pastas, uma de Ag/Al (PV202, DuPont) e outra só de Al (PV381, Dupont) e para a face dopada com fósforo usou-se a pasta de prata PV16A, da DuPont. No caso de células com junção flutuante, as pastas devem perfurar a região n^+ frontal, contatando a região p^+ .

A última etapa do processo de fabricação de células solares foi o corte das lâminas de silício nas dimensões requeridas ($4,18 \text{ cm}^2$) bem como o isolamento das regiões dopadas, evitando-se possíveis regiões de curto-circuito. Realizou-se o procedimento de eliminação das bordas mediante um ataque com radiação laser, sendo que o resultado foi a marcação profunda das lâminas conforme a trajetória do feixe laser e, assim, o favorecimento do processo de clivagem manual ou corte das lâminas de silício.

Em cada lâmina de silício foram fabricadas 9 células solares de $4,18 \text{ cm}^2$, com malha metálica de 8 trilhas com $100 \text{ }\mu\text{m}$ de largura, conforme mostra o diagrama da Figura 3.13. Optou-se por fabricar células solares de pequena área para permitir a verificação de possíveis problemas de uniformidade do processo de formação da junção flutuante. Na face posterior foi usada uma malha típica de células solares monofaciais fabricadas no NT-Solar, 14 % de área ocupada com metal.

Foram fabricadas células solares com os processos 6 ($T_D = 800 \text{ }^\circ\text{C}$), 9 ($850 \text{ }^\circ\text{C}$), 11 e 12 (ambos a $900 \text{ }^\circ\text{C}$). Também foram fabricadas células sem a junção flutuante para comparar os resultados e observar os possíveis problemas e/ou melhoras nas características elétricas dos dispositivos com junção flutuante.

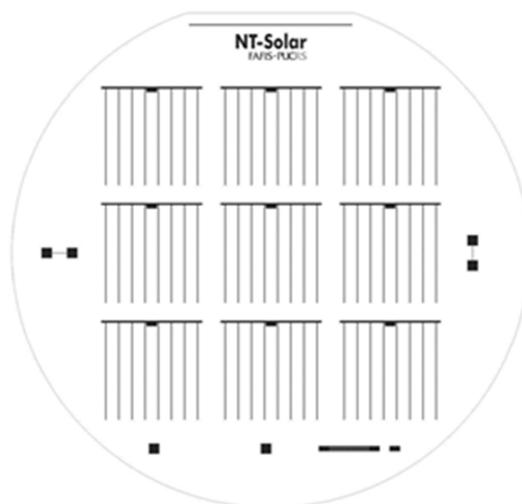


Figura 3.13. Desenho da malha metálica usada nas células solares de $4,18 \text{ cm}^2$.

Realizou-se também, um teste preliminar para a implementação da junção flutuante com a utilização de um forno de tubo de quartzo, conforme explicado anteriormente [18].

O processo usado é similar ao apresentado na Figura 3.12. Ao invés dos passos 9 e 10 destacados na Figura 3.12, a difusão de fósforo para obtenção da junção flutuante foi realizada a uma temperatura de 900 °C no forno de tubo de quartzo rico em fósforo, porém sem fluxo de POCl_3 durante o processo. Foram fabricadas células solares e retirou-se uma lâmina do processo antes das lâminas passarem pela deposição de filme antirreflexo e metalização para a medida do perfil de impurezas e realização do teste da ponta quente.

3.3.2. Resultados

3.3.2.1. Implementação da Junção Flutuante em Forno de Esteira

A Tabela 3.2 apresenta as características elétricas médias das células solares fabricadas e a Tabela 3.3 os parâmetros elétricos da melhor célula fabricada em cada processo. As Figuras 3.14 e 3.15 apresentam as curvas J-V das melhores células solares.

Tabela 3.2. Características elétricas médias de células solares com difusão de fósforo em forno de esteira para produzir a junção flutuante sobre a superfície p^+ dopada com boro.

Processo	Nº de Células	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	η (%)
Padrão 1, sem junção flutuante	35	598 ± 3	33,8 ± 2,4	0,70 ± 0,04	14,2 ± 1,2
Padrão 2, sem junção flutuante	08	595,1 ± 1,6	33,5 ± 0,1	0,71 ± 0,03	14,2 ± 0,6
Proc. 6, $T_D = 800$ °C, $V_E = 50$ cm/min (2x)	27	596 ± 3	33,6 ± 0,2	0,70 ± 0,03	14,0 ± 0,8
Proc. 9, $T_D = 850$ °C, $V_E = 50$ cm/min (2x)	26	587 ± 7	33,5 ± 0,2	0,64 ± 0,07	12,6 ± 1,5
Proc. 11, $T_D = 900$ °C, $V_E = 50$ cm/min (2x)	15	460 ± 140	30,2 ± 1,8	0,35 ± 0,09	5,1 ± 2,5
Proc. 12, $T_D = 900$ °C, $V_E = 50$ cm/min	08	314 ± 51	28,3 ± 2,3	0,255 ± 0,003	2,3 ± 0,4
Proc. 12, $T_D = 900$ °C, $V_E = 100$ cm/min	09	477 ± 51	30,9 ± 0,6	0,290 ± 0,018	4,3 ± 0,7
Proc. 12, $T_D = 900$ °C, $V_E = 133$ cm/min	04	441 ± 17	30,7 ± 0,7	0,275 ± 0,012	3,7 ± 0,3

Tabela 3.3. Parâmetros elétricos das melhores células solares fabricadas com difusão de fósforo para produzir a junção flutuante.

Processo	V _{oc} (mV)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF	η(%)
Padrão, sem junção flutuante	600	34,3	0,74	15,1
Proc. 6, T _D = 800 °C, V _E = 50 cm/min (2x)	601	33,9	0,74	15,0
Proc. 9, T _D = 850 °C, V _E = 50 cm/min (2x)	593	33,5	0,72	14,3
Proc. 11, T _D = 900 °C, V _E = 50 cm/min (2x)	532	31,0	0,34	5,6
Proc. 12, T _D = 900 °C, V _E = 50 cm/min	340	29,9	0,29	2,9
Proc. 12, T _D = 900 °C, V _E = 100 cm/min	509	31,2	0,32	5,1
Proc. 12, T _D = 900 °C, V _E = 133 cm/min	457	31,1	0,29	4,1

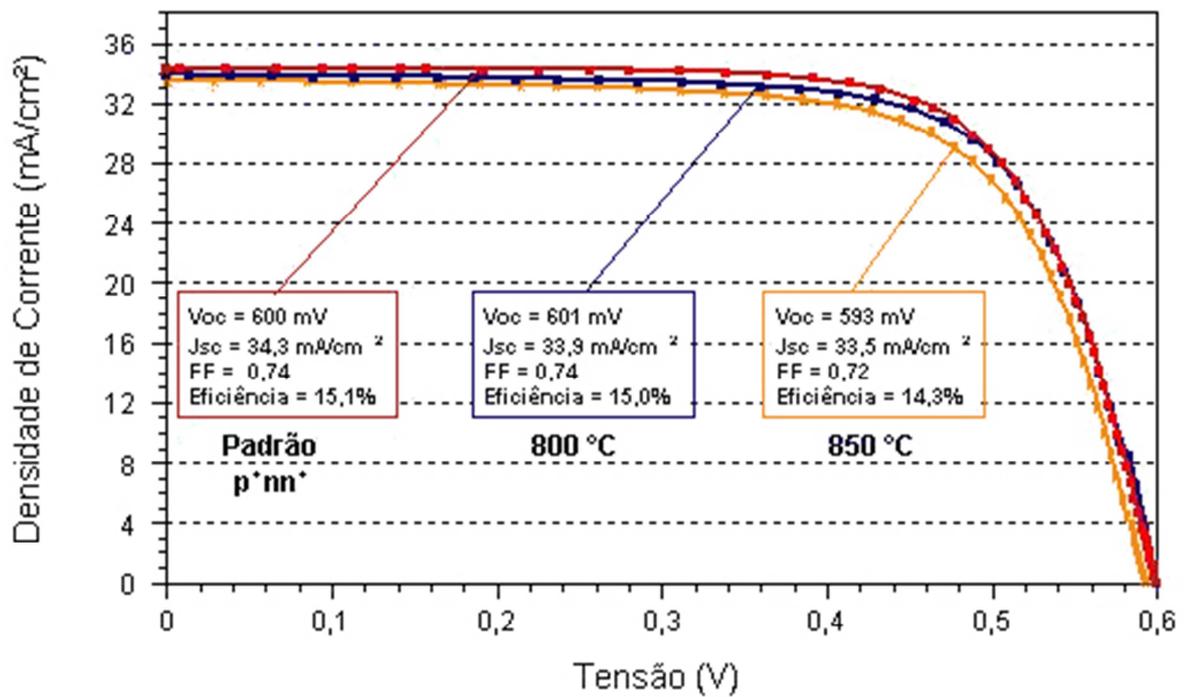


Figura 3.14. Curvas J-V das melhores células solares produzidas com a estrutura p⁺nn⁺ (processo padrão) e com difusão de fósforo para produção de junção flutuante em forno de esteira com V_E= 50 cm/min (duas passagens pelo forno) e T_D= 800°C e T_D= 850°C.

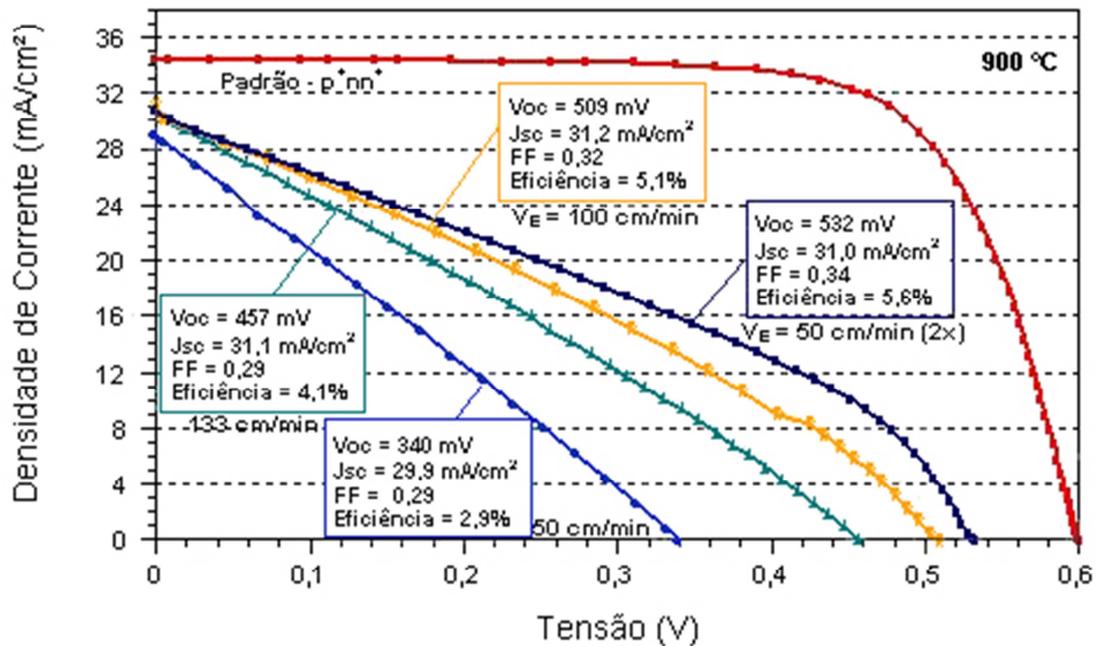


Figura 3.15. Curvas J-V das melhores células solares produzidas com a estrutura p⁺nn⁺ (processo padrão) e com difusão de fósforo para produção de junção flutuante em forno RTC a 900°C, para quatro condições de processamento: $V_E = 50$ cm/min (uma e duas passagens), 100 cm/min e 133 cm/min.

Analisando os resultados obtidos, observa-se que as células solares com difusão de fósforo para obter junção flutuante a 800 °C não sofreram alteração nos seus parâmetros elétricos. Para o processo a 850 °C, observou-se uma pequena queda nas características elétricas das células. No entanto, pela análise das curvas J-V pode-se constatar que nestas condições de difusão, embora não se tenha inversão da região p⁺, os parâmetros elétricos das células solares são menores que o de células sem esta difusão de fósforo. No entanto, o FF médio das células está somente 0,7 % abaixo das células sem fósforo difundido sobre boro e a resistência em paralelo é elevada.

Por outro lado, para a difusão a 900 °C com $V_E = 50$ cm/min e duas passagens no forno de esteira, processo no qual se confirmou a inversão da região p⁺, surgiu uma baixa resistência em paralelo. As difusões realizadas com maior velocidade de esteira produziram células com resistências em paralelo similares, indicando o mesmo comportamento quanto à região p⁺. Atribui-se esta resistência em paralelo ao contato metálico na região (n⁺)p⁺, ou seja, ao contato não uniforme

entre o metal Al/Ag e a região p^+ . O metal deve perfurar completamente a região n^+ e contatar a região p^+ , mantendo uma alta resistência de contato com a região n^+ .

Repetiu-se o processo 12, com $T_D = 900\text{ }^\circ\text{C}$ e $V_E = 50, 100$ e 133 cm/min , testando utilizar uma pasta só de Al na etapa da metalização. O alumínio realiza contato ôhmico (de baixa resistência de contato) com regiões p^+ , mesmo com concentrações de boro em superfície da ordem de 10^{19} cm^{-3} [43]. Com regiões n^+ , dependendo da concentração do dopante, forma-se uma barreira Schottky (de alta resistência de contato). A Tabela 3.4 apresenta as características elétricas médias das células solares fabricadas utilizando as pastas de Ag/Al e de Al para metalizar a face frontal e a Tabela 3.5 resume os parâmetros elétricos das melhores células fabricadas com cada pasta. A Figura 3.16 apresenta as curvas J-V das melhores células solares.

Tabela 3.4. Características elétricas médias de células solares com difusão de fósforo em forno de esteira para produzir a junção flutuante sobre a superfície p^+ dopada com boro, utilizando diferentes pastas na etapa de metalização.

Processo	Contato Metálico	Nº de Células	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	η (%)
Proc. 12b, $T_D = 900\text{ }^\circ\text{C}$, $V_E = 50\text{ cm/min}$	Ag/Al	05	346 ± 84	$28,9 \pm 1,1$	$0,262 \pm 0,003$	$2,6 \pm 0,8$
	Al	09	468 ± 103	$29,1 \pm 1,1$	$0,31 \pm 0,06$	$4,4 \pm 1,7$
Proc. 12b, $T_D = 900\text{ }^\circ\text{C}$, $V_E = 100\text{ cm/min}$	Ag/Al	08	428 ± 151	$31,2 \pm 1,2$	$0,33 \pm 0,06$	$4,7 \pm 2,4$
	Al	09	449 ± 138	$29,0 \pm 1,5$	$0,31 \pm 0,07$	$4,3 \pm 2,2$
Proc. 12b, $T_D = 900\text{ }^\circ\text{C}$, $V_E = 133\text{ cm/min}$	Ag/Al	06	508 ± 73	$32,4 \pm 0,6$	$0,38 \pm 0,08$	$6,3 \pm 2,2$
	Al	07	487 ± 80	$28,2 \pm 1,2$	$0,30 \pm 0,04$	$4,2 \pm 1,2$

Tabela 3.5. Parâmetros elétricos das melhores células solares fabricadas com difusão de fósforo para produzir a junção flutuante, utilizando diferentes pastas na etapa de metalização.

Processo	Contato Metálico	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	η (%)
Proc. 12b, $T_D = 900\text{ }^\circ\text{C}$, $V_E = 50\text{ cm/min}$	Ag/Al	462	30,0	0,267	3,7
	Al	553	30,5	0,391	6,6
Proc. 12b, $T_D = 900\text{ }^\circ\text{C}$, $V_E = 100\text{ cm/min}$	Ag/Al	547	32,4	0,409	7,3
	Al	565	30,2	0,433	7,4
Proc. 12b, $T_D = 900\text{ }^\circ\text{C}$, $V_E = 133\text{ cm/min}$	Ag/Al	573	33,4	0,505	9,6
	Al	553	29,6	0,364	6,0

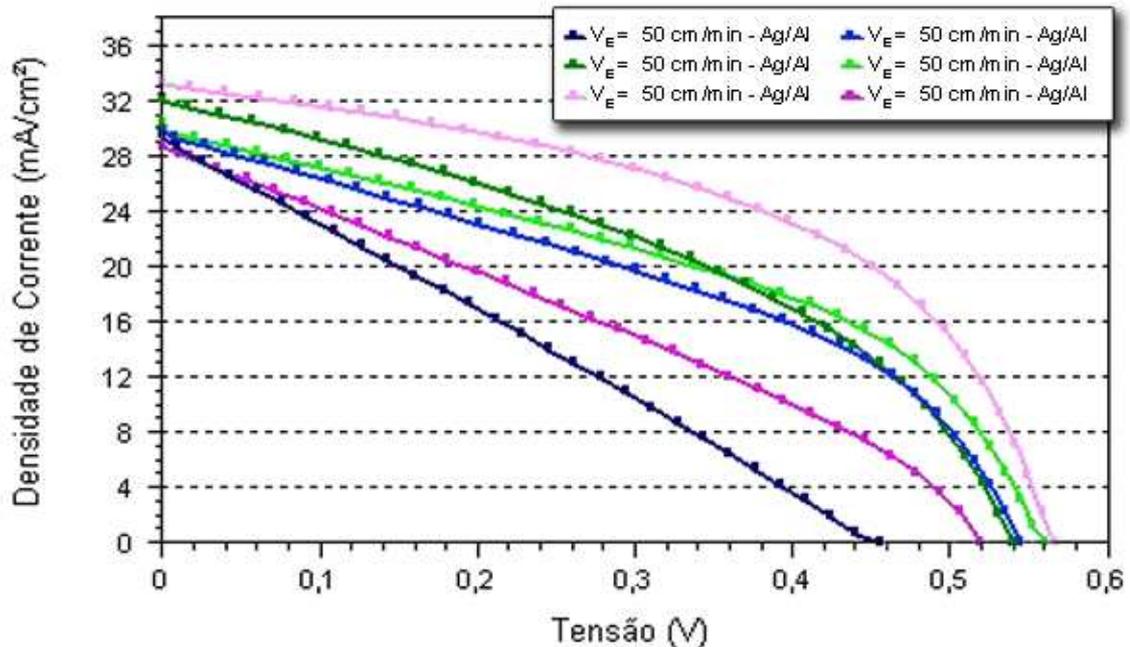


Figura 3.16. Curvas J-V das melhores células solares produzidas com difusão de fósforo para produção da junção flutuante em forno de esteira com $T_D = 900\text{ }^\circ\text{C}$ e $V_E = 50\text{ cm/min}$, 100 cm/min e 133 cm/min , utilizando diferentes pastas para metalizar a face frontal.

Analisando os resultados obtidos, observa-se que as células metalizadas com pasta de Al também apresentaram resistência em paralelo, como as metalizadas com pasta de Ag/Al.

Além disso, analisou-se a homogeneidade das difusões de boro e fósforo (sobre boro) por meio da eficiência média das células solares produzidas segundo a posição na lâmina de silício. A Figura 3.17 apresenta a distribuição das eficiências nas células solares padrão e produzidas no processo 06.

Observa-se que tanto no processo 06 quanto no processo padrão há uma variação nas eficiências das células solares produzidas em uma mesma lâmina de silício. Para o processo padrão, a eficiência média variou de 13,6 % a 15,9 %, diferença de 2,3 % (absoluto), resultado semelhante ao obtido no processo 6. Esta falta de uniformidade é atribuída a difusão de boro baseada em deposição por *spin-on*, o que pode ser explicado pela medida da resistência de folha da região p^+ que pode variar de 46,7 a 57,2 Ω/\square , pela qualidade do substrato e pela malha posterior que não é igual para todas as células.

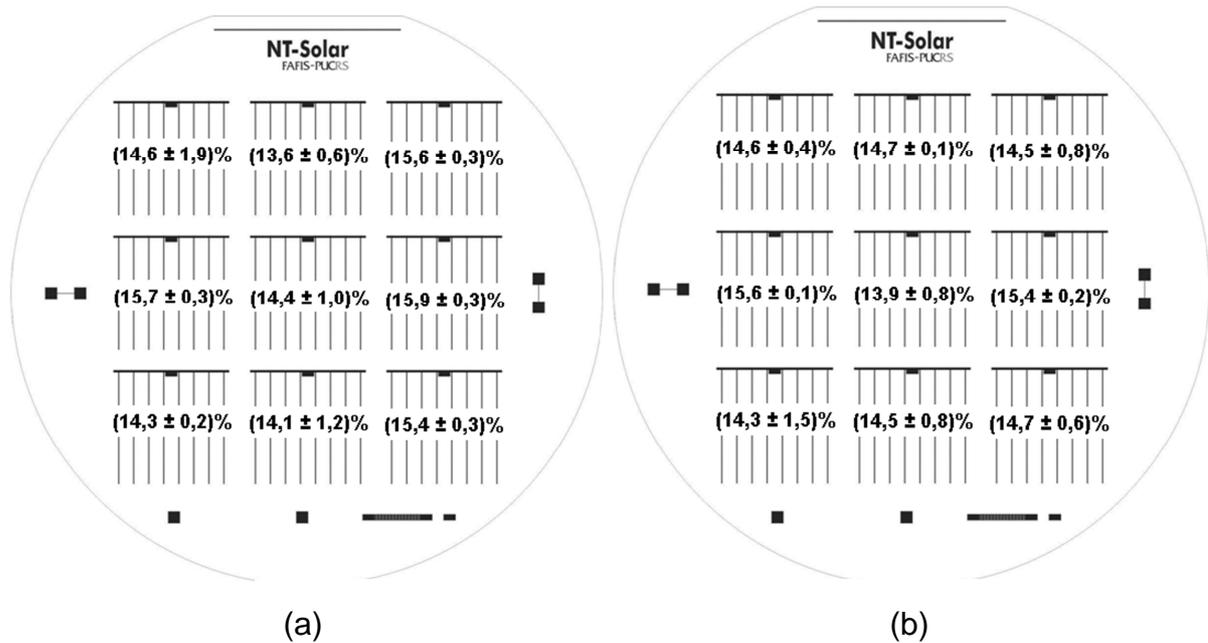


Figura 3.17. Distribuição na lâmina de silício das eficiências das células solares produzidas: (a) pelo processo padrão (estrutura p⁺nn⁺) e (b) pelo processo 6, T_D = 800 °C, V_E = 50 cm/min (2x).

A Figura 3.18 apresenta a distribuição das eficiências nas células solares produzidas nos processos 09 e 11. Para o processo 09 onde não houve inversão da região p⁺, a diferença entre o maior valor médio de eficiência foi de 2 %, similar ao das células p⁺nn⁺. No caso do processo 11, quando houve a inversão, as células têm eficiência reduzida e a diferença entre a menor e maior eficiência aumentou para 3,5 % (absoluto). Este aumento destaca a não homogeneidade na formação da região n⁺ sobre p⁺ e da metalização sobre estas regiões, o que dificultaria a aplicação da região n⁺ em células de grande área, com consequente redução dos parâmetros elétricos.

No processo 12b, analisou-se a homogeneidade das células produzidas com pasta de Ag/Al e com pasta de Al. A Figura 3.19 apresenta a distribuição das eficiências nas células solares produzidas no processo 12 sob T_D = 900 °C e V_E = 50 cm/min. Enquanto que nas células metalizadas com Ag/Al a eficiência é baixa para todos os dispositivos, pode-se observar que as células solares metalizadas com a pasta de Al apresentaram eficiências maiores em algumas regiões, com diferença de até 4,6 % (absoluto). Isto indica que no caso da pasta de Ag/Al, a resistência em paralelo é reduzida e que no caso da pasta de Al, a resistência de contato com a

região n^+ é maior em algumas regiões onde a difusão de fósforo tem menor concentração de átomos.

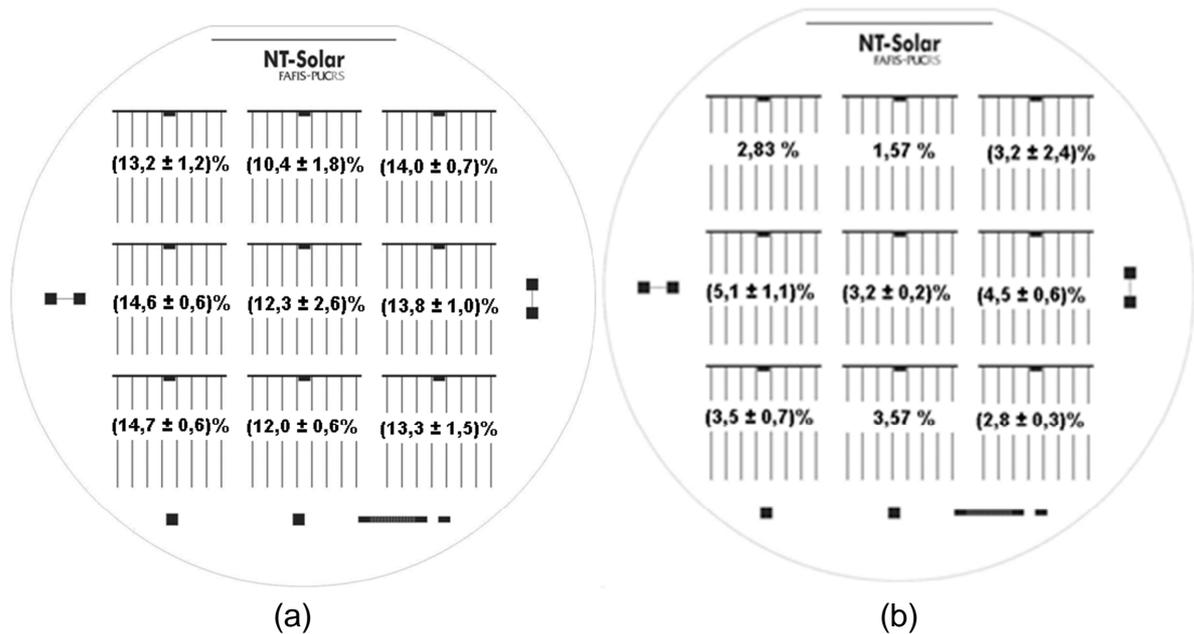


Figura 3.18. Distribuição na lâmina de silício das eficiências das células solares produzidas: (a) com o processo 09, $T_D = 850\text{ °C}$, $V_E = 50\text{ cm/min}$ (2x), e (b) com o processo 11, $T_D = 900\text{ °C}$, $V_E = 50\text{ cm/min}$ (2x).

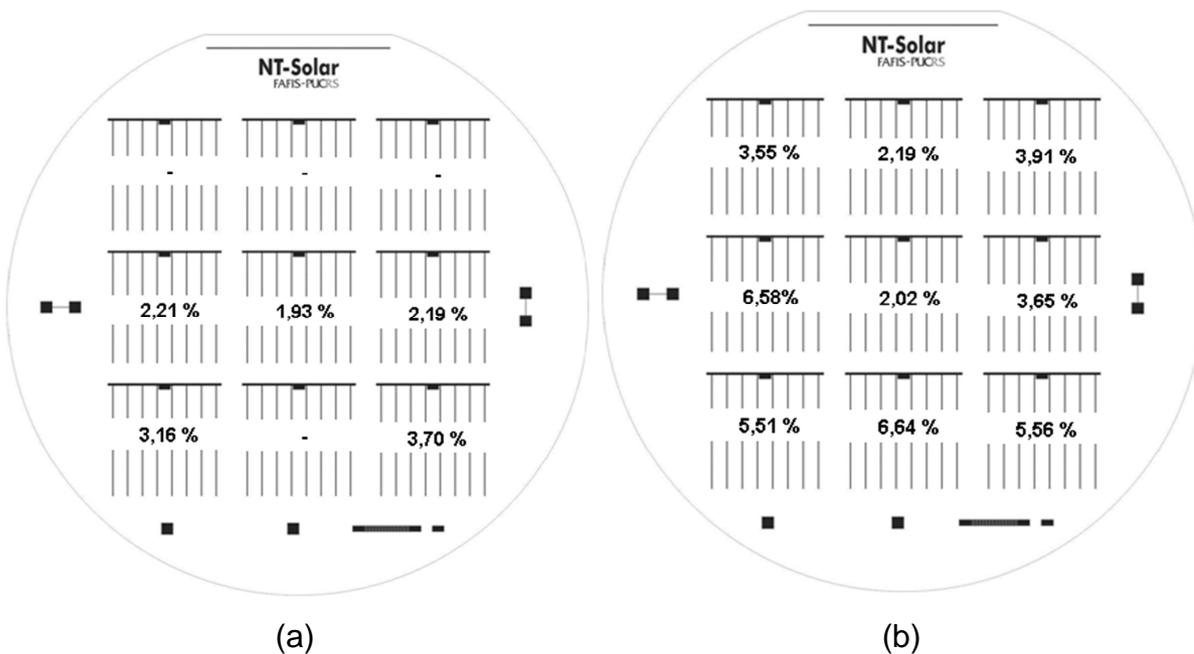


Figura 3.19. Distribuição na lâmina de silício das eficiências das células solares produzidas no processo 12b sob $T_D = 900\text{ °C}$, $V_E = 50\text{ cm/min}$: (a) metalizadas com pasta de Ag/Al e (b) metalizadas com pasta de Al. Não foi determinada a eficiência das células marcadas com “-” porque as mesmas quebraram no processo de clivagem.

A Figura 3.20 apresenta a distribuição das eficiências nas células solares produzidas no processo 12b sob $T_D = 900 \text{ }^\circ\text{C}$ e $V_E = 100 \text{ cm/min}$, onde se pode observar que com o aumento da velocidade de esteira há também um aumento na variação das eficiências distribuídas na lâmina de silício, sendo que a diferença entre a eficiência mínima e máxima é de 5,6 % e 6 % (absoluto) para células metalizadas com Ag/Al e com Al, respectivamente. Isto se pode confirmar analisando a Figura 3.21, que apresenta a distribuição das eficiências nas células solares produzidas no processo 12b sob $T_D = 900 \text{ }^\circ\text{C}$ e $V_E = 133 \text{ cm/min}$, onde esse comportamento se mantém. Para processos de difusão de fósforo com maior velocidade, menor será a uniformidade das regiões n^+ o que termina por causar esta variação. Na melhor célula solar fabricada no processo 12b e metalizada com a pasta de Ag/Al, a eficiência atingiu 9,2 % e, certamente, é uma célula onde não ocorreu inversão da superfície p^+ .

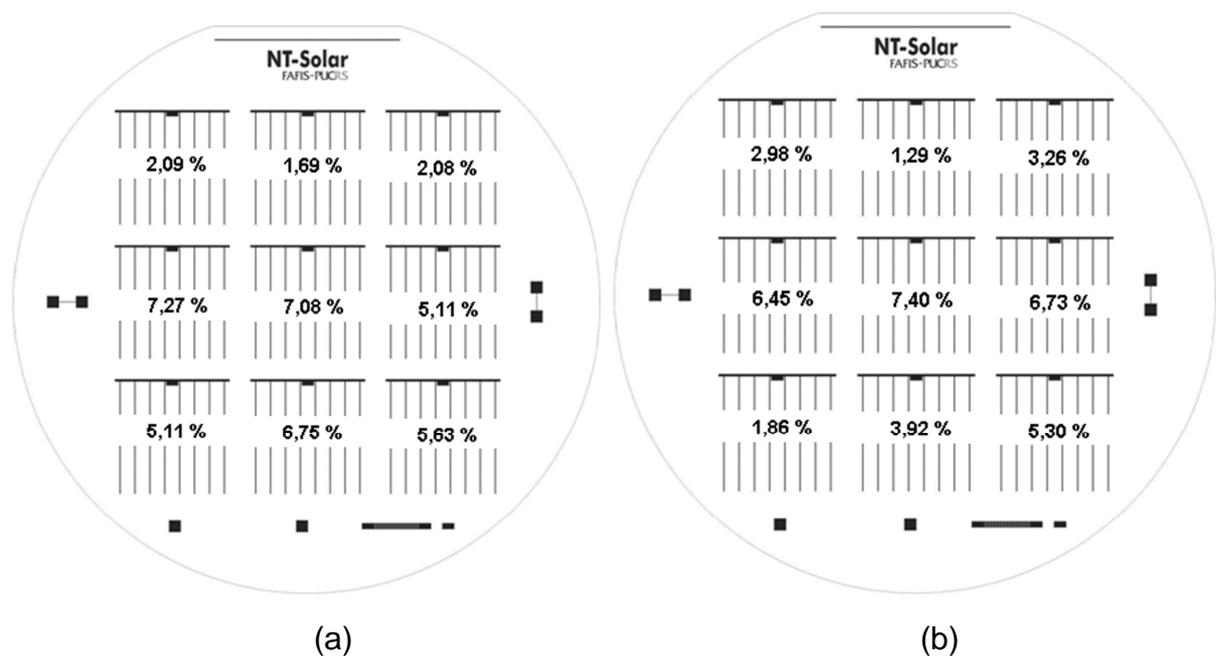


Figura 3.20. Distribuição na lâmina de silício das eficiências das células solares produzidas no processo 12b com $T_D = 900 \text{ }^\circ\text{C}$, $V_E = 100 \text{ cm/min}$: (a) metalizadas com pasta de Ag/Al e (b) metalizadas com pasta de Al.

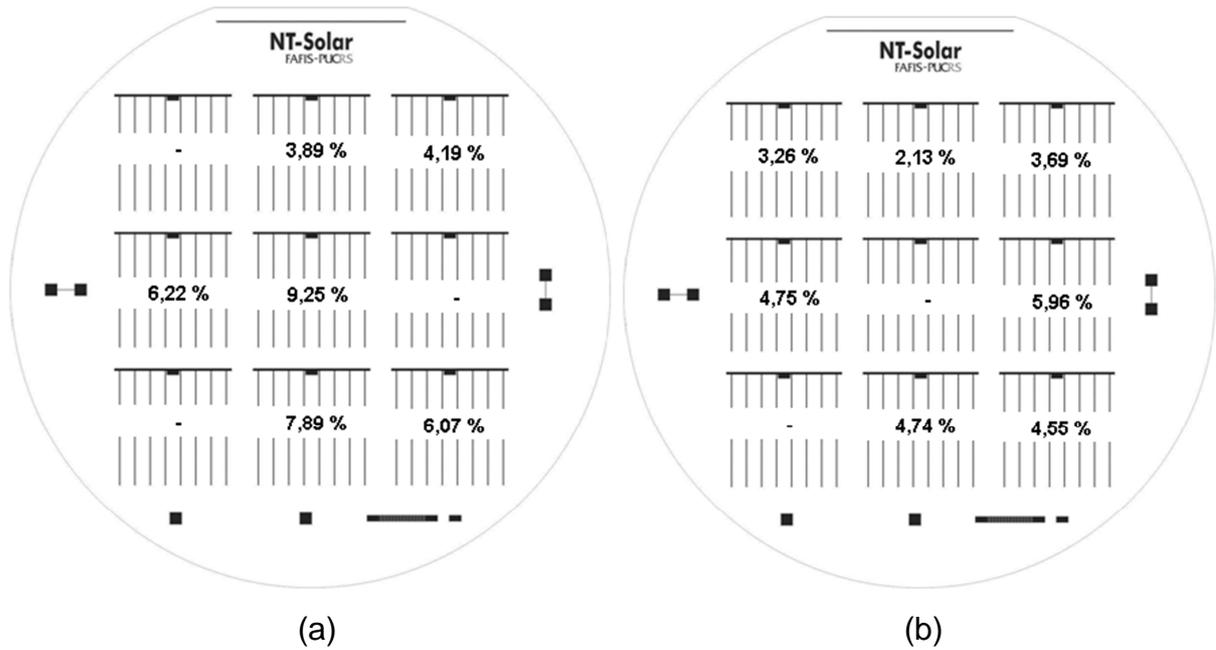


Figura 3.21. Distribuição na lâmina de silício das eficiências das células solares produzidas no processo 12b com $T_D = 900^\circ\text{C}$, $V_E = 133 \text{ cm/min}$: (a) metalizadas com pasta de Ag/Al e (b) metalizadas com pasta de Al. Não foi determinada a eficiência das células marcadas com “-“ porque as mesmas quebraram no processo de clivagem.

3.3.2.2. Implementação da Junção Flutuante em Forno de Tubo de Quartzo

A Tabela 3.6 apresenta os parâmetros elétricos médios das células fabricadas e a Tabela 3.7 e Figura 3.22 resume os resultados da melhor célula. Destaca-se a existência de uma resistência em paralelo que degrada o fator de forma e a eficiência da célula solar e esta fuga de corrente deve ser originada na superfície da região p^+ , parcialmente transformada em n , ou onde a concentração de átomos de boro é compensada pela de átomos de fósforo.

Tabela 3.6. Parâmetros elétricos médios de células solares p^+nn^+ e de células com junção flutuante de fósforo difundido a 900°C em forno de tubo de quartzo.

Processo	Nº de Células	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	η (%)
Padrão, sem junção flutuante	35	598 ± 3	$33,8 \pm 2,4$	$0,70 \pm 0,04$	$14,2 \pm 1,2$
Difusão de fósforo em tubo de quartzo, 900°C , parede do tubo como fonte de fósforo	17	512 ± 79	$31,0 \pm 1,5$	$0,41 \pm 0,09$	$6,7 \pm 2,3$

Tabela 3.7. Parâmetros elétricos das células solares p^+nn^+ mais eficientes e de células com junção flutuante de fósforo difundido a 900 °C em forno de tubo de quartzo.

Processo	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	η (%)
Padrão, sem junção flutuante	600	34,3	0,74	15,1
Difusão de fósforo em tubo de quartzo, 900 °C, parede do tubo como fonte de fósforo	575	33,4	0,54	10,1

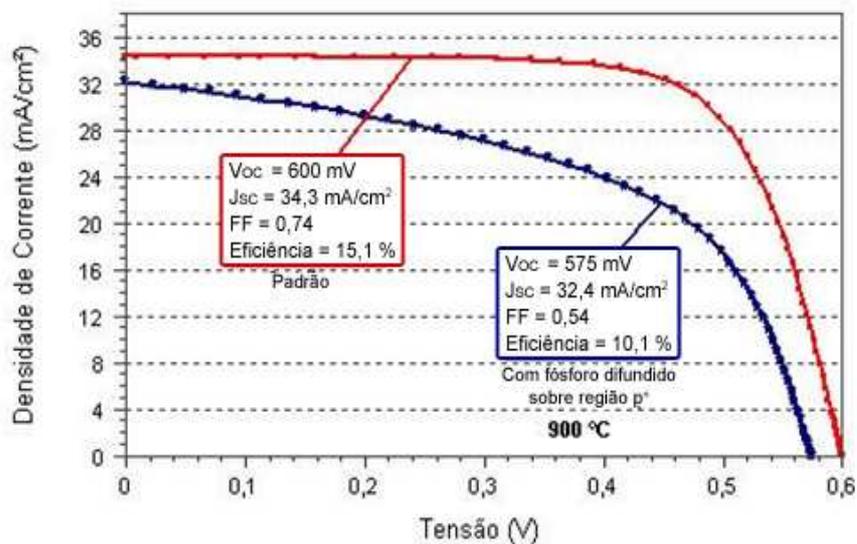


Figura 3.22. Curvas J-V de células solares produzidas com a estrutura p^+nn^+ (processo padrão) e com difusão de fósforo em forno de tubo de quartzo, sem fluxo de $POCl_3$, a 900 °C, para obtenção de junção flutuante.

3.4. Análise por Simulações

3.4.1. Análise com o Programa PC-1D

Para compreensão dos problemas de baixa eficiência encontrados nas células solares com difusão de fósforo para obtenção da junção flutuante, realizaram-se simulações com o programa PC-1D. Foram fixados os seguintes parâmetros nas simulações: espessura da lâmina de silício de 200 μm , refletância da superfície texturada frontal com filme antirreflexo de TiO_2 , fator de sombra de 8 %, resistividade de base de 9 $\Omega\cdot\text{cm}$ (correspondente a concentração de fósforo de $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) e velocidade de recombinação na superfície posterior de $1 \times 10^7 \text{ cm/s}$ (típico de superfícies não passivadas ou metalizadas). Para ajustar os dados obtidos

das simulações com os experimentais, variou-se o tempo de vida dos portadores de carga minoritários (τ), a velocidade de recombinação na superfície n^+ frontal (S_f) e a resistência em série específica (r_s^*). A Tabela 3.8 apresenta os resultados experimentais e da simulação de células p^+nn^+ . Os valores que melhor se ajustaram aos resultados experimentais foram: $S_f = 4 \times 10^5$ cm/s, $\tau = 70$ μ s e resistência em série específica de $1,15 \Omega \cdot \text{cm}^2$. O valor de S_f é menor que o publicado por Moehlecke [18] para células solares p^+nn^+ com menor dopagem superficial, quando foram relatados valores de $5,5 \times 10^5$ cm/s, mas está na mesma ordem de grandeza. O tempo de vida dos portadores minoritários usado na simulação é coerente com valores medidos nas lâminas usadas nesta dissertação e a elevada resistência em série é devido a pasta de Ag/Al, que possui menor condutividade que as pastas de Ag usadas na metalização frontal de células solares n^+pp^+ .

Na Tabela 3.8 também foram colocados os resultados de simulações de células solares com a difusão de fósforo sobre a região p^+ . Para simular essas células, criou-se no programa PC-1D uma segunda difusão na face frontal, tendo-se então uma região n^+ com concentração em superfície de átomos de fósforo de $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, resistência de folha e profundidade de junção segundo os perfis apresentados na Figura 3.10, para temperatura de difusão de $900 \text{ }^\circ\text{C}$: $V_E = 50$ cm/min (2x), $x_j = 0,05 \mu\text{m}$, $R_\square = 336 \Omega/\square$ (valores de x_j e R_\square obtidos no PC-1D); $V_E = 50$ cm/min (1x), $x_j = 0,04 \mu\text{m}$, $R_\square = 439 \Omega/\square$; $V_E = 100$ cm/min (1x), $x_j = 0,03 \mu\text{m}$, $R_\square = 655 \Omega/\square$; $V_E = 133$ cm/min (1x), $x_j = 0,02 \mu\text{m}$, $R_\square = 1009 \Omega/\square$. Considerou-se que a velocidade de recombinação em superfície seria igual a da região p^+ porque na maioria dos processos não ocorreu a inversão da dopagem de superfície. No entanto, cabe comentar que superfícies com concentração de fósforo da ordem de 10^{20} cm^{-3} também apresentam S_f da ordem de 10^4 cm/s ou maiores [44]. O contato frontal foi estabelecido a $0,1 \mu\text{m}$ da superfície, considerando que o mesmo perfura a região n^+ . O programa PC-1D somente simula o dispositivo em uma dimensão e efeitos bidimensionais são simulados pela introdução de componentes em série e/ou paralelo. Para simular a redução nas características elétricas das células solares, considerou-se uma resistência em paralelo, caracterizada por uma condutância específica, g^* , em S/cm^2 .

Tabela 3.8. Características elétricas das melhores células processadas e valores obtidos mediante simulação com o programa PC-1D.

Processo	Metal Frontal	Resultado	V _{oc} (mV)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF	η (%)
Padrão p ⁺ nn ⁺	Ag/Al	Experimental	600	34,3	0,74	15,1
		Simulado, g* = 0	600	34,3	0,74	15,1
Proc. 11, T _D = 900 °C, V _E = 50 cm/min (2x)	Ag/Al	Experimental	532	31,0	0,34	5,6
		Simulado, g* = 50 mS/cm ²	533	30,5	0,30	4,9
Proc. 12b, T _D = 900 °C, V _E = 50 cm/min	Ag/Al	Experimental	462	30,0	0,27	3,7
		Simulado, g* = 69 mS/cm ²	463	29,9	0,25	3,5
Proc. 12b, T _D = 900 °C, V _E = 100 cm/min	Ag/Al	Experimental	547	32,4	0,41	7,3
		Simulado, g* = 40 mS/cm ²	552	30,8	0,36	6,2
Proc. 12b, T _D = 900 °C, V _E = 133 cm/min	Ag/Al	Experimental	573	33,4	0,51	9,6
		Simulado, g* = 25 mS/cm ²	573	30,5	0,54	9,4
Proc. 12b, T _D = 900 °C, V _E = 50 cm/min	Al	Experimental	553	30,5	0,39	6,6
		Simulado, g* = 40 mS/cm ²	552	30,8	0,36	6,2
Proc. 12b, T _D = 900 °C, V _E = 100 cm/min	Al	Experimental	565	30,2	0,43	7,4
		Simulado, g* = 33 mS/cm ²	563	31,0	0,42	7,3
Proc. 12b, T _D = 900 °C, V _E = 133 cm/min	Al	Experimental	553	29,6	0,36	6,0
		Simulado, g* = 37 mS/cm ²	553	30,0	0,38	6,3

Da Tabela 3.8 conclui-se que a condutância em paralelo varia de 25 mS/cm² a 69 mS/cm², valores extremamente elevados, pois em células p⁺nn⁺ de alta eficiência este valor é da ordem de 0,07 mS/cm² [18]. Deste modo, em todas as células em que houve uma difusão de fósforo sobre a região previamente dopada com boro, há fugas de corrente elétrica que reduzem sua eficiência. Conforme relatado por outros autores [3-5, 18] estas fugas advêm do contato entre o metal e a região n⁺.

Mediante simulação da estrutura (n⁺)p⁺nn⁺ com o programa PC-1D, analisou-se que melhorias devem ser introduzidas a fim de se obter o efeito de redução da recombinação na face frontal de células p⁺nn⁺ pela realização de uma difusão de fósforo sobre a região p⁺. Primeiro, deve-se eliminar a resistência em paralelo isolando as trilhas metálicas da região n⁺, reduzindo-se a dopagem na região n⁺ ou isolando mediante o uso de feixe laser, por exemplo. Neste caso, com uma

concentração de fósforo em superfície com $C_s = 4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $x_j = 0,06 \text{ } \mu\text{m}$ e $R_{\square} = 1100 \text{ } \Omega/\square$ e considerando $S_f = 1000 \text{ cm/s}$ (valor atingível para superfícies tipo n, com C_s próximo de 10^{19} cm^{-3} e passivadas com SiO_2), os parâmetros elétricos da célula seriam: $V_{OC} = 603 \text{ mV}$, $J_{SC} = 34,9 \text{ mA/cm}^2$, $\eta = 15,4 \%$. Neste caso, a introdução da região n^+ sobre a p^+ produz um aumento de $0,6 \text{ mA/cm}^2$ na J_{SC} , em relação a célula padrão, sendo este o parâmetro mais afetado positivamente. No entanto, cabe comentar que a redução da resistência em série nas células p^+nn^+ padrão e $(n^+)p^+nn^+$, com uma redução da resistência em série específica de $1,15 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$ para $0,5 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$, implica no aumento da eficiência de $15,4 \%$ para $16,1 \%$. Para tal seria necessário usar outro tipo de pasta de maior condutividade e aumentar a dopagem na região p^+ , o que dificultaria a possível inversão da região p^+ pela difusão de fósforo.

3.4.2. Análise com os Programas Athena e Atlas

Para analisar os caminhos de fugas de corrente, utilizaram-se os programas bidimensionais Athena e Atlas.

3.4.2.1. Perfis de Dopagem

Utilizando o programa Athena e seguindo o fluxo de processo esquematizado na Figura 3.23, criou-se a estrutura de uma célula solar com junção flutuante. Os blocos da Figura 3.23 descrevem a formação da malha, as difusões realizadas ou incorporação de perfis experimentais de dopantes, a deposição de óxido e a formação dos contatos frontal e posterior. O contato frontal é formado pela deposição de alumínio em toda a superfície seguido de ataque químico para extração do Al das regiões que não estarão contatadas. A descrição completa da programação utilizada encontra-se no Apêndice A.

Para a criação da estrutura de uma célula solar similar às fabricadas experimentalmente, primeiramente se comparou os perfis de impurezas simulados com os obtidos experimentalmente. Na Figura 3.24 se pode observar o perfil experimental de átomos de boro e alguns perfis simulados com o programa Athena.

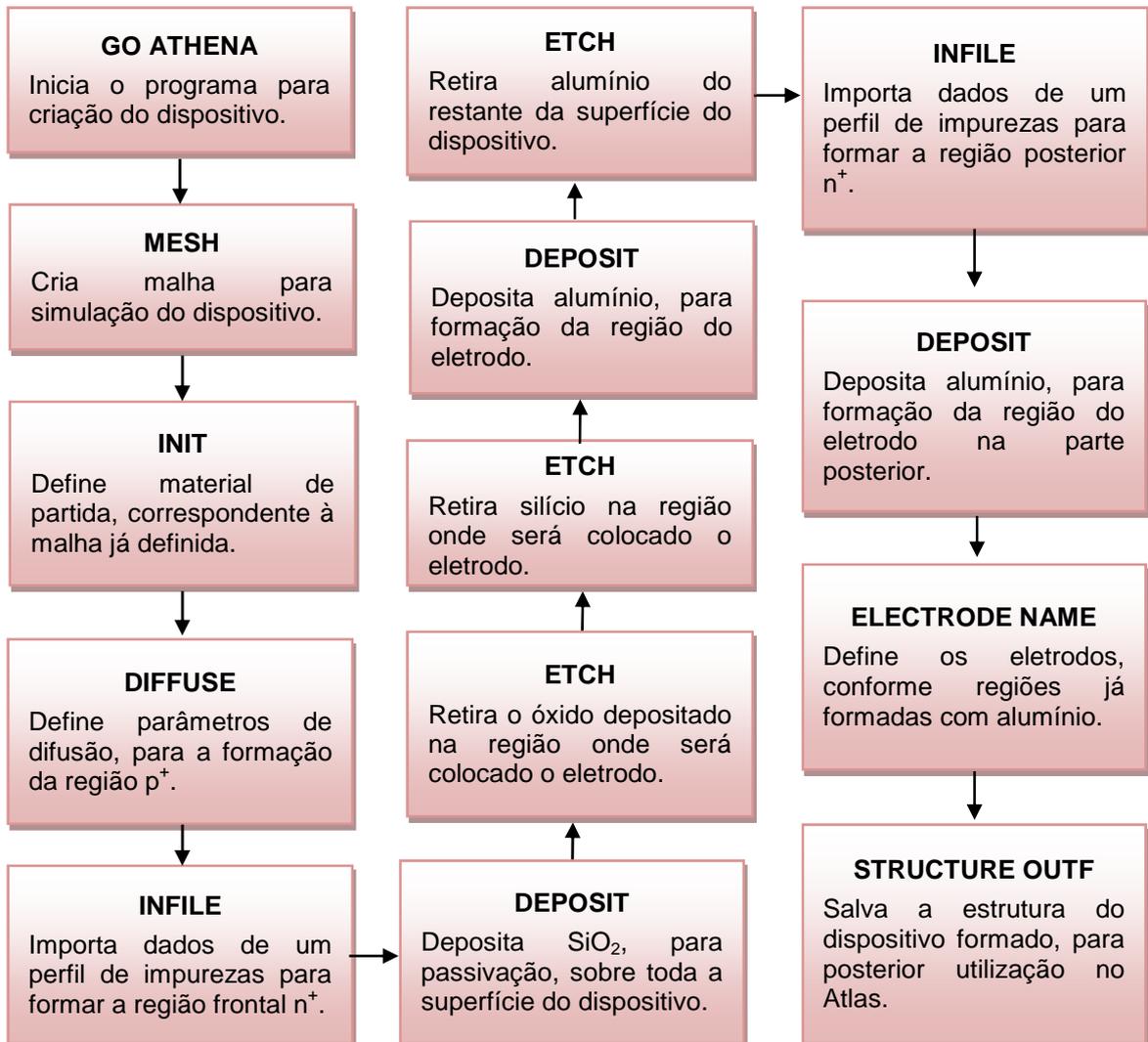


Figura 3.23. Diagrama da simulação para a formação da estrutura de uma célula solar com junção flutuante, por meio do programa Athena.

O perfil experimental de boro foi obtido com uma difusão a uma temperatura de 1000 °C e tempo de 20 minutos e com 30 minutos de oxidação a 900 °C. A primeira simulação realizada foi repetindo esses parâmetros de difusão, porém obteve-se um perfil muito mais profundo. Então, procurou-se variar os parâmetros de difusão até encontrar um perfil mais próximo ao experimental e assim se definiu quais parâmetros simulados deveriam ser usados. No caso do boro, para se aproximar ao perfil experimental foi necessário usar na simulação uma difusão a uma temperatura de 1000 °C, tempo de 15 minutos, e com 5 minutos de recozimento a 925 °C (Simulado 4, na Figura 3.24). Esta discrepância entre o processo real e o

simulado é atribuída a que os modelos internos do Athena são normalmente usados em difusões a partir de fonte líquida ou gasosa presente no tubo de quartzo do forno e não são adequados para a difusão a partir de dopante depositado por *spin-on*.

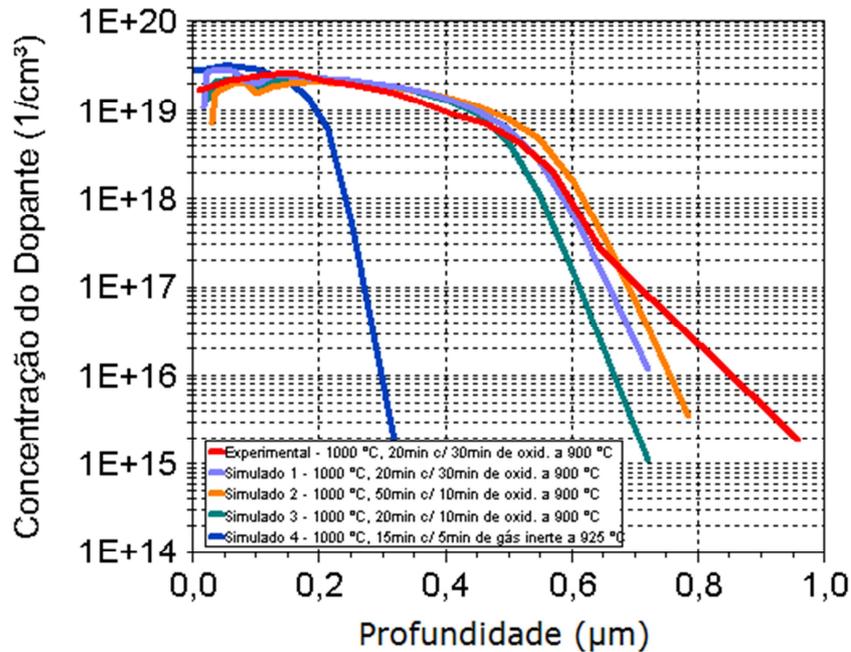


Figura 3.24. Perfil experimental e perfis de átomos de boro simulados no programa Athena.

O segundo passo foi simular o perfil experimental de fósforo da região n^+ posterior. A Figura 3.25 apresenta dois perfis obtidos por simulação e o experimental medido por ECV.

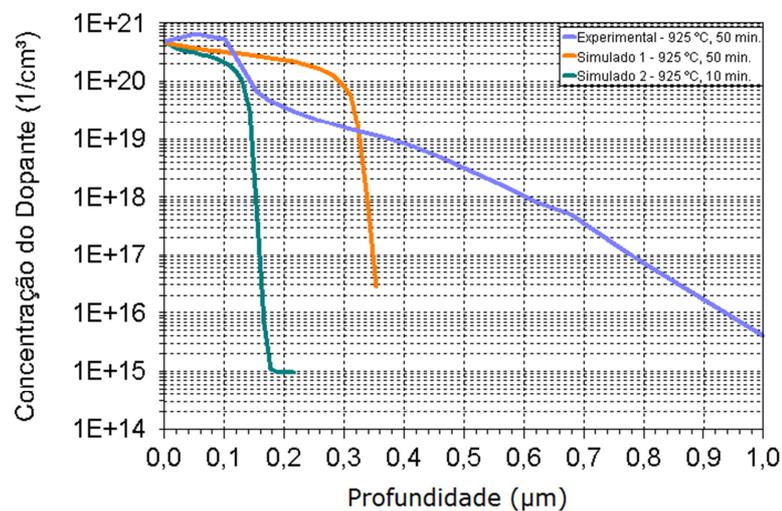


Figura 3.25. Perfil experimental e perfis simulados de fósforo no programa.

O perfil experimental de fósforo da região n^+ posterior foi obtido com uma difusão a uma temperatura de 900 °C e tempo de 50 minutos. A primeira simulação realizada foi repetindo os parâmetros de difusão experimentais, porém se obteve um perfil muito diferente do experimental. Então, testaram-se outros modelos de difusão, e pode-se observar que nenhum deles foi eficaz para se obter um perfil de fósforo similar ao experimental. Isso deve ter ocorrido pelo fato da simulação não conseguir prever os modelos de difusão que ocorrem experimentalmente. Então, uma alternativa para contornar esse problema foi importar no programa computacional os dados do perfil de fósforo experimental, através do comando *infile*.

Para a formação da região (n^+) frontal simulada, optou-se por importar no programa computacional o perfil de fósforo experimental, tendo em vista os problemas de simulação anteriormente comentados. O perfil de fósforo utilizado no programa computacional foi obtido no processo 11 com $T_D = 900$ °C e $V_E = 50$ cm/min (2x), pois foi o único que apresentou inversão da região p^+ para n^+ , segundo o teste da ponta quente. Ajustados estes parâmetros obteve-se a estrutura simulada da célula solar, que pode ser observada na Figura 3.26. A célula possui espessura de 200 μm , largura de 50 μm , trilha frontal de alumínio com 5 μm de largura, camada de SiO_2 na face frontal e na região não metalizada. As regiões dopadas tem as seguintes características: p^+ , $C_S = 2,9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $x_j = 0,249 \mu\text{m}$; n^+ posterior, $C_S = 5,2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$; região n^+ na face frontal, $C_S = 3,2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, $x_j = 0,052 \mu\text{m}$.

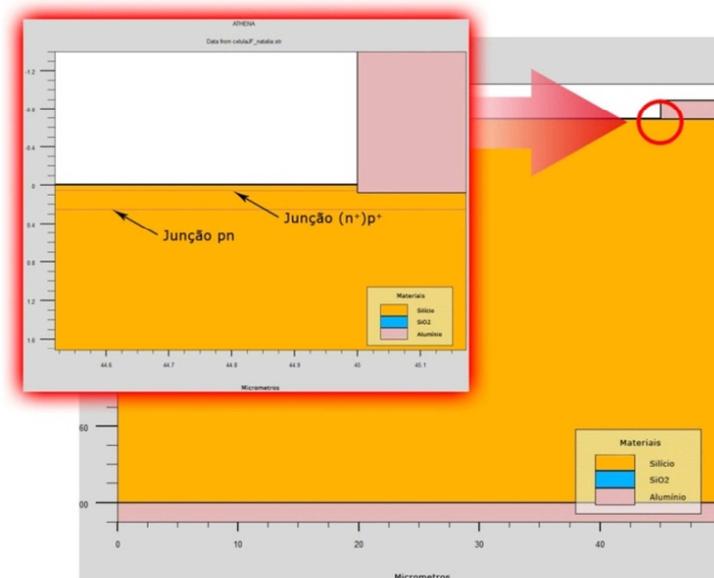


Figura 3.26. Estrutura de célula solar simulada com programa *Athena*, com a junção pn e a junção (n^+) p^+ destacadas.

3.4.2.2. Caracterização Elétrica

Após a estrutura ser simulada no *Athena*, importa-se a mesma no programa *Atlas* para a simulação dos parâmetros elétricos. A Figura 3.27 apresenta o fluxo de programação para a simulação da célula solar e a descrição detalhada desta programação encontra-se no Apêndice A. Basicamente a estrutura é obtida no *Athena*, simula-se o dispositivo para a irradiância de 1000 W/cm^2 com espectro padrão AM1,5G que produz a fotogeração de pares elétrons-lacunas, se extrai a corrente de curto-circuito e se aplica uma tensão variável para obter a curva J-V e a tensão de circuito aberto.

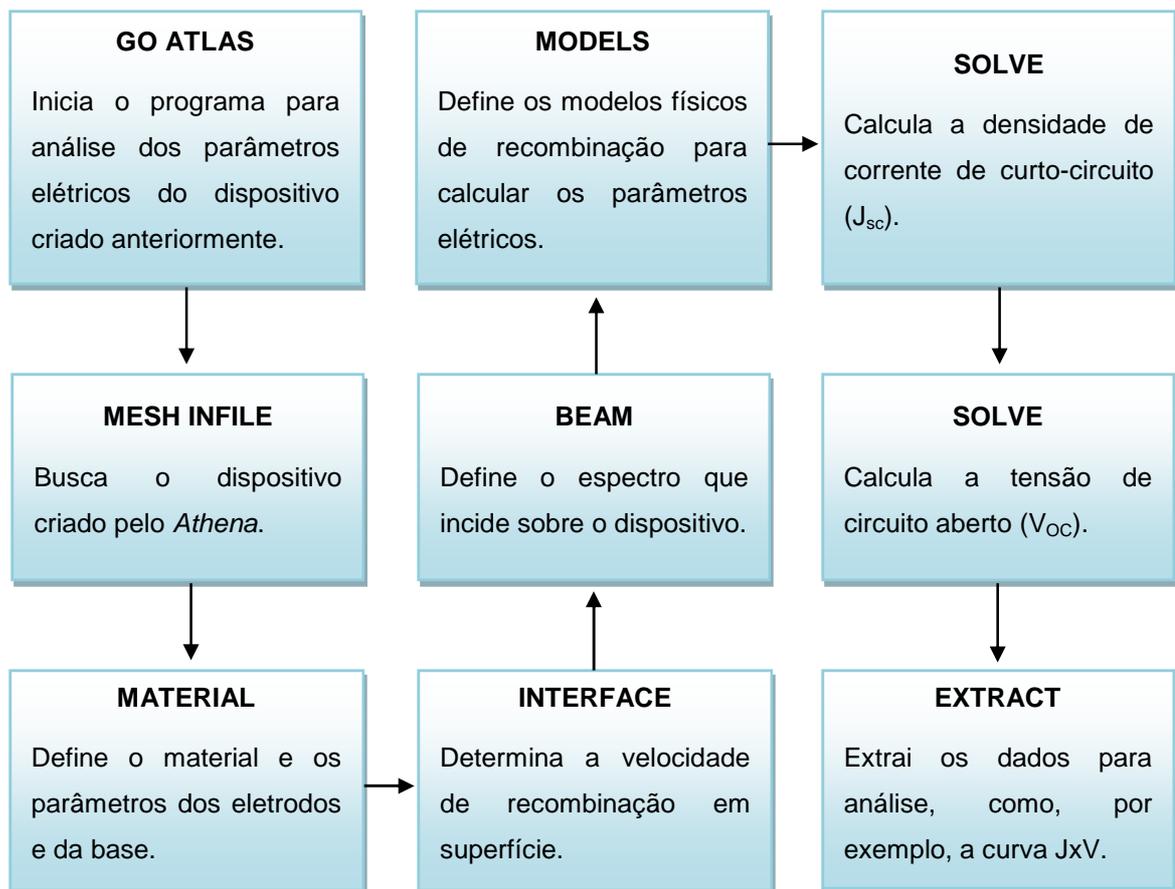


Figura 3.27. Diagrama da simulação para análise dos parâmetros elétricos de uma célula solar por meio do programa Atlas.

A grande vantagem do uso de programas bidimensionais é a possibilidade de visualizar diferentes regiões da célula solar analisando-se o campo elétrico,

correntes elétricas, taxas de fotogeração, taxas de recombinação, etc. Como exemplo, as Figuras 3.28, 3.29, 3.30 e 3.31 apresentam a fotogeração, o campo elétrico, as correntes elétricas (elétrons e lacunas, somados) no ponto de curto-circuito e no ponto de circuito aberto, respectivamente, de uma célula solar p^+nn^+ , sem textura, sem filme antirreflexo e com superfície frontal com $S_f = 0$ (ideal). Observa-se a formação do campo elétrico na região da junção pn (Fig. 3.29), a maior fotogeração próximo da superfície frontal e a fotogeração nula sob o contato frontal (Fig. 3.28), as correntes em condição de curto-circuito onde se observa a corrente de majoritários no sentido de baixo para cima na base e da esquerda para a direita na região p^+ (parte superior do dispositivo) (Fig. 3.30), e finalmente na Fig. 3.31, as correntes no ponto de circuito aberto, situação em que a corrente em uma carga externa será nula.

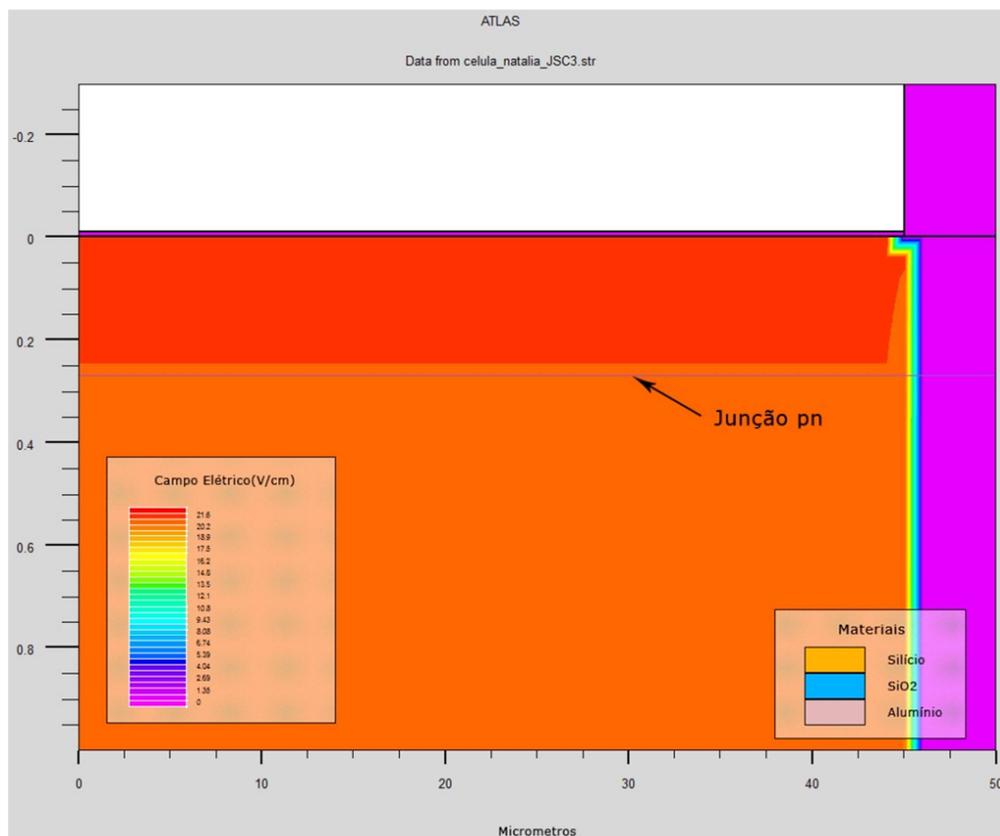
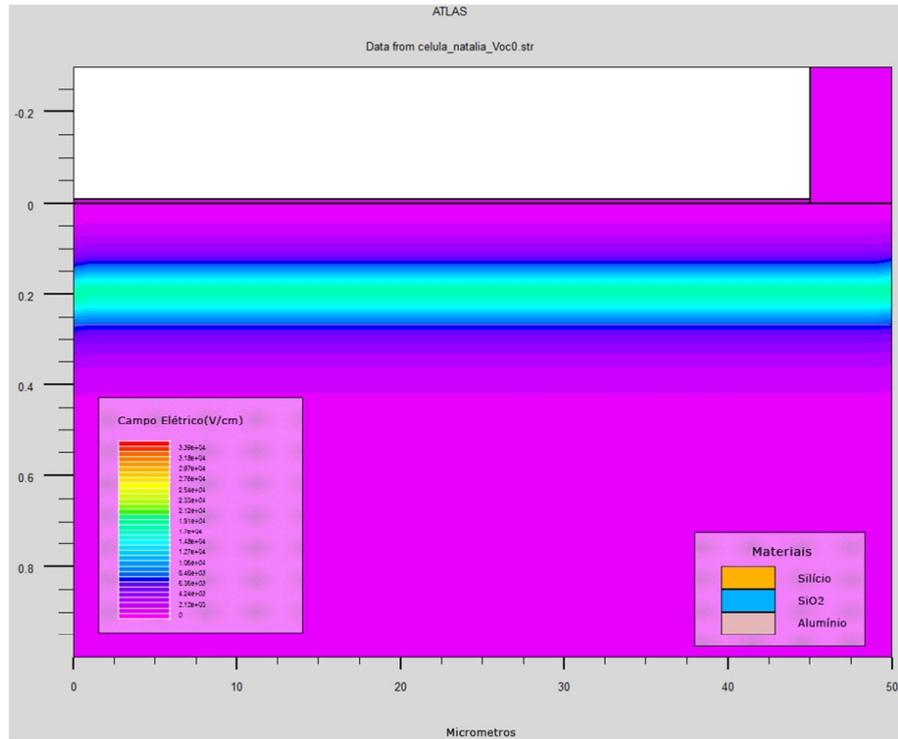
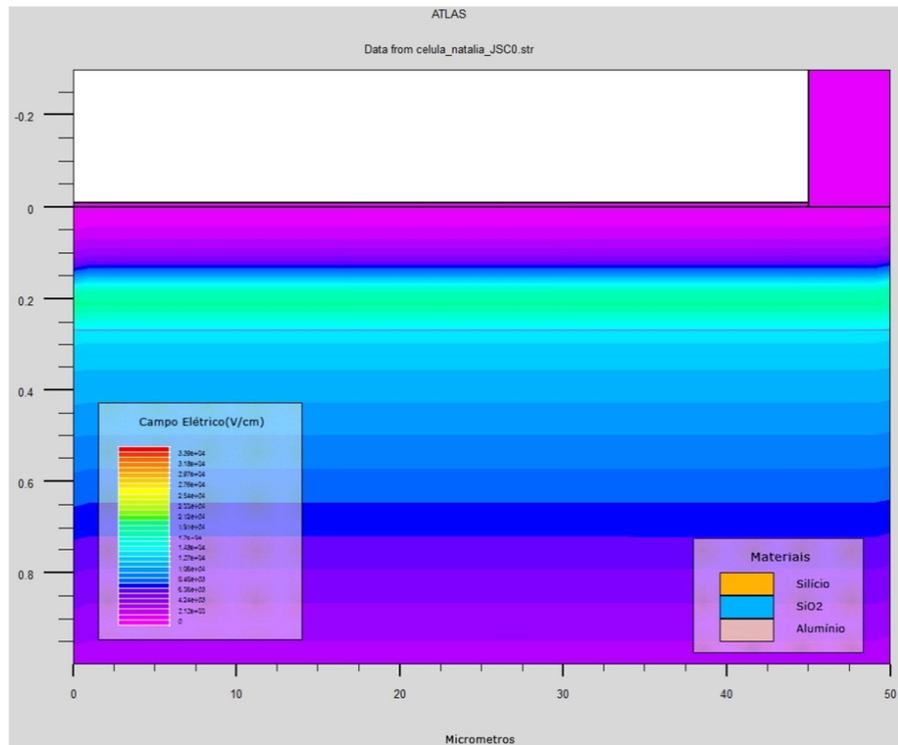


Figura 3.28. Distribuição da fotogeração de portadores de carga em uma célula solar p^+nn^+ .



(a)



(b)

Figura 3.29. Campo elétrico em uma célula p^+nn^+ : (a) em condição de circuito aberto e (b) em condição de curto-circuito.

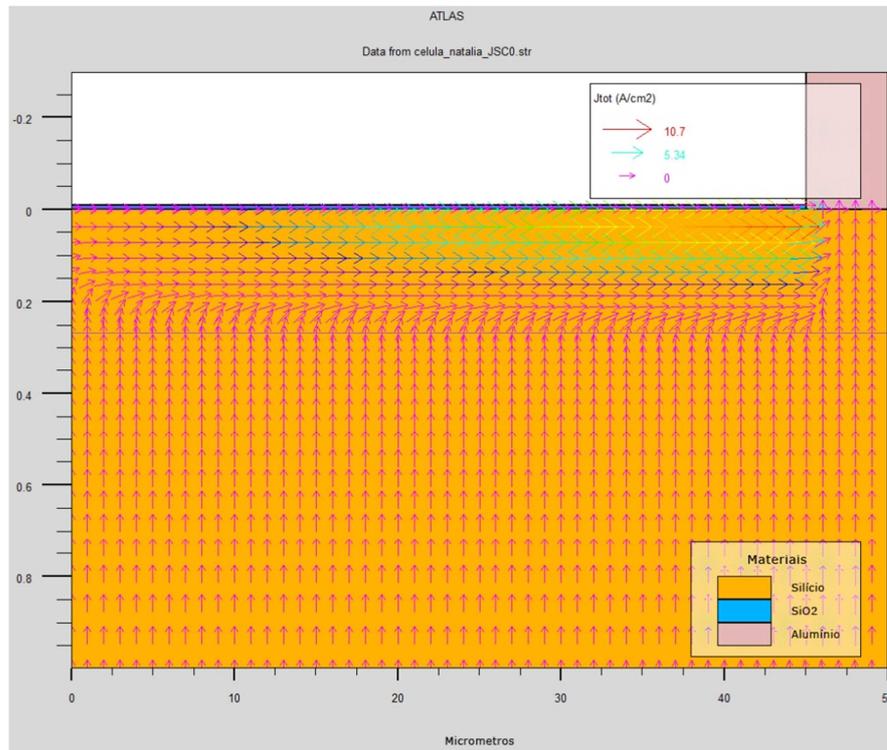


Figura 3.30. Distribuição da corrente elétrica total (elétrons+lacunas) em uma célula p⁺nn⁺ quando está na situação de curto-circuito.

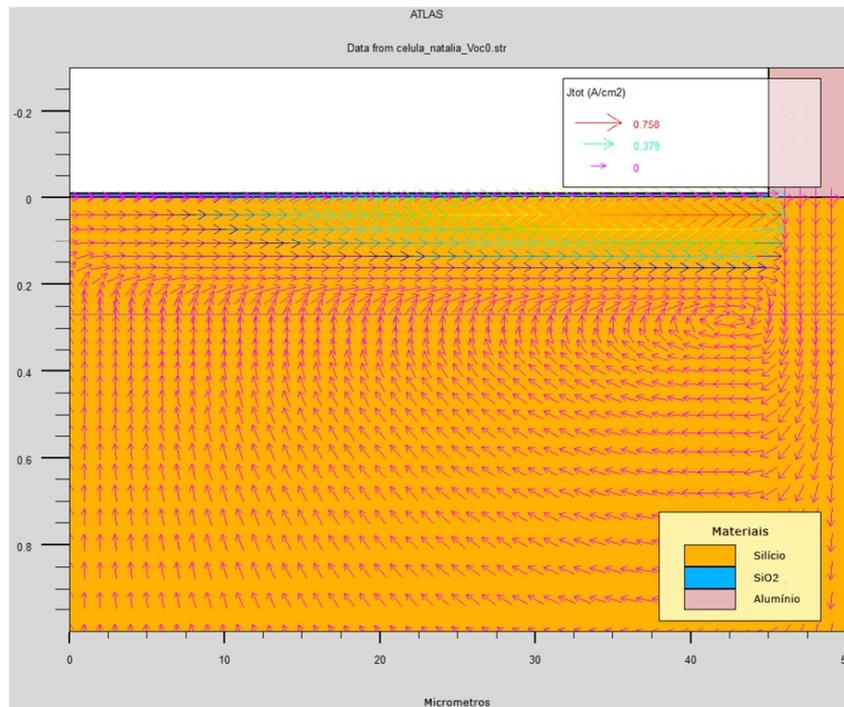


Figura 3.31. Distribuição da corrente elétrica total (elétrons+lacunas) em uma célula p⁺nn⁺ quando está na situação de circuito aberto.

Uma das dificuldades encontradas na simulação das células solares com o programa Atlas foi a obtenção de características elétricas compatíveis com os resultados do programa PC-1D. Por exemplo, para a célula p^+nn^+ , considerou-se uma superfície polida, sem filme antirreflexo e $S_f = 0$ cm/s e a V_{OC} foi de somente 591 mV, 10 mV abaixo do valor experimental obtido. A J_{SC} obtida da simulação foi de 27,7 mA/cm². Ao aumentar a S_f para 1000 cm/s, os parâmetros elétricos permaneceram os mesmos, indicando que os modelos de recombinação não são sensíveis a S_f e deveriam ser corrigidos. Ao aumentar a S_f para 1×10^7 cm/s, a V_{OC} cai de somente 6 mV e a J_{SC} reduz-se em 1,7 mA/cm².

As Figuras 3.32 e 3.33 mostram a fotogeração e o campo elétrico (na condição de curto-circuito), respectivamente, em uma célula solar com região n^+ sobre a região p^+ . Destacam-se nas figuras as linhas onde há junção pn e onde justamente o campo elétrico tem maior intensidade. Comparando-se a fotogeração apresentada na Figura 3.28 com a da Figura 3.32, pode-se observar que os resultados são semelhantes, pois o processo de absorção dependerá somente do material usado. No caso da Figura 3.29-a e 3.33, nota-se na última a presença de duas regiões de campo elétrico formado pelas duas junções pn.

A célula $(n^+)p^+nn^+$ foi simulada utilizando-se o perfil experimental obtido da difusão de fósforo a 900 °C, $V_E = 50$ cm/min (2x) e foi obtida uma V_{OC} de 576 mV e a J_{SC} de 25,1 mA/cm², não importando a velocidade de recombinação em superfície.

Da mesma forma, se simulou uma célula p^+nn^+ onde a difusão de fósforo sobre a região p^+ produziu uma depleção na superfície, não chegando a invertê-la, situação que pode ter ocorrido em processos de fabricação de células tais como aqueles em que foram realizadas difusões de fósforo a 900 °C e $V_E = 50$ cm/min, 100 cm/min e 133 cm/min, com somente uma passagem pelo forno de esteira. Neste caso, a V_{OC} foi de 559 mV e a J_{SC} de 25,5 mA/cm².

As curvas J-V obtidas no Atlas não apresentam uma redução do FF que demonstrem a existência de uma resistência em paralelo. No entanto, a distribuição da corrente elétrica na célula solar mostra que a corrente advinda da região p^+ entra no contato frontal de alumínio e a há uma corrente que sai deste contato e penetra

na região n^+ , percorrendo a região, conforme mostra a Figura 3.34. No canto esquerdo superior pode ser observado que a corrente que circula pela região n^+ , da direita para a esquerda, penetra na região p^+ . Esta corrente se constituirá na corrente de fuga apresentada nos dispositivos experimentais.

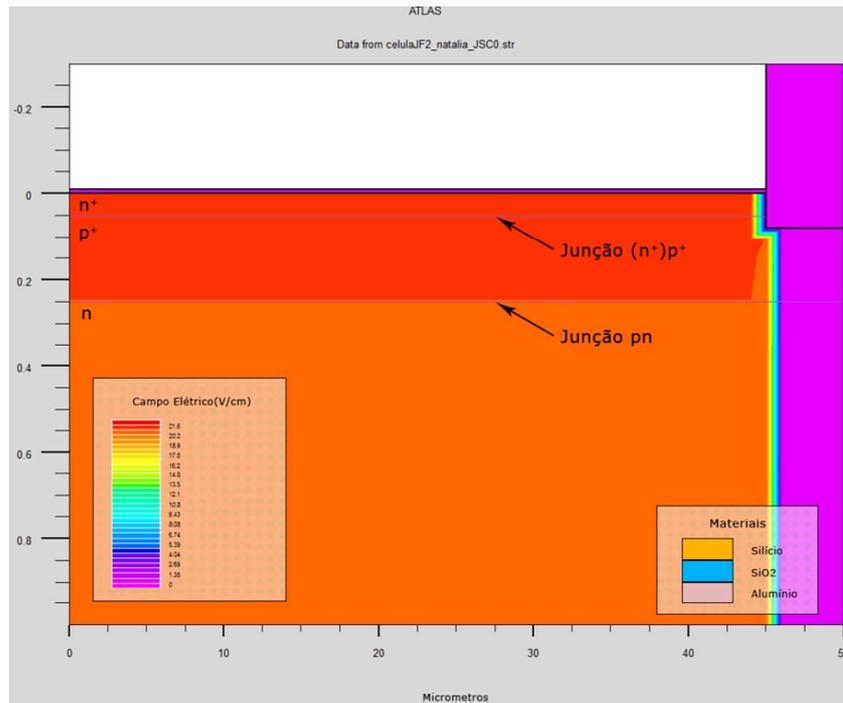


Figura 3.32. Foto-graçaõ em uma célula solar (n⁺)p⁺nn⁺.

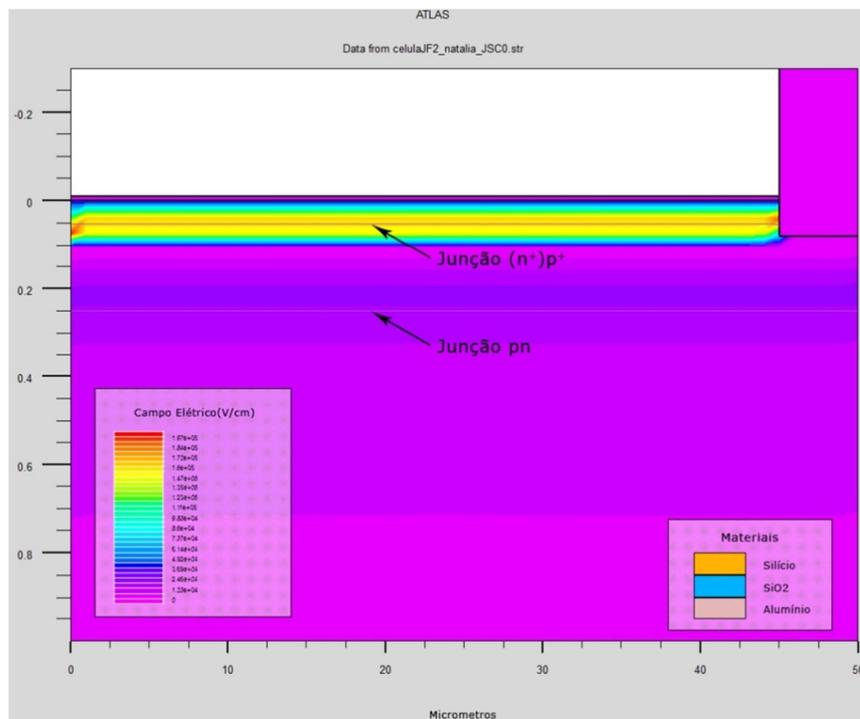
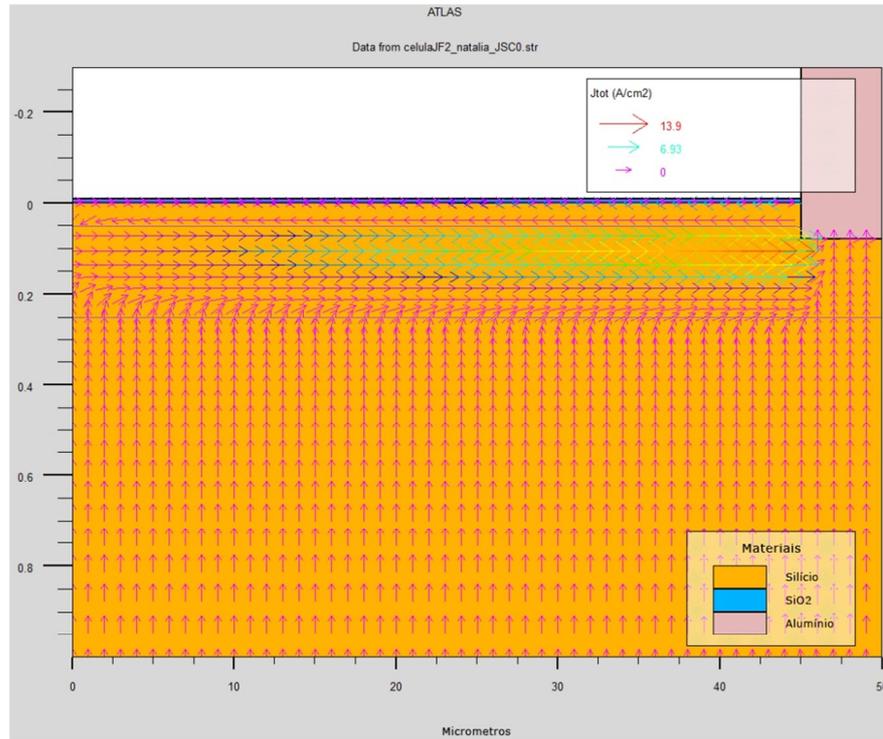
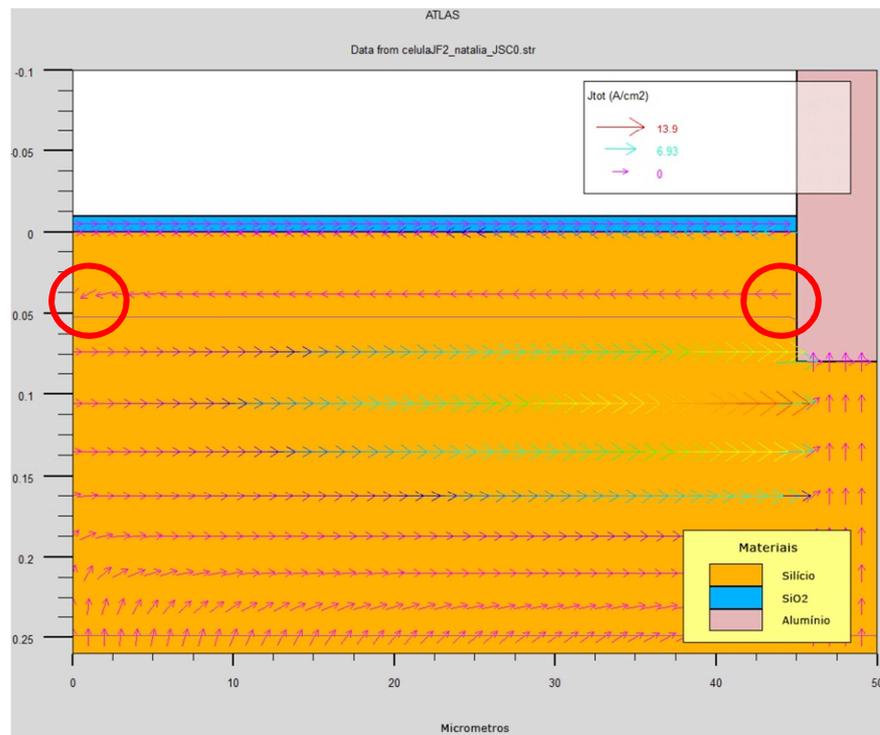


Figura 3.33. Campo elétrico na região frontal de uma célula solar (n⁺)p⁺nn⁺.



(a)



(b)

Figura 3.34. a) Corrente elétrica total em uma célula solar $(n^+)p^+n^+$ e (b) ampliação da mesma distribuição de corrente total.

Como comentário final sobre os resultados experimentais e das simulações cabe ressaltar que a corrente de fuga que degradou as características elétricas das células solares desenvolvidas nesta dissertação foram estudadas no passado por alguns autores e soluções foram propostas [3, 5, 17, 18, 45-49].

Para células p^+nn^+ , Moehlecke [3, 18] usou regiões n^+ de alta resistência de folha e com concentração de dopante menor que 10^{19} cm^{-3} . Neste caso, o contato de alumínio forma uma barreira Schottky e deste modo a região n^+ permanece isolada entre as trilhas metálicas frontais [21].

Em células n^+pp^+ com região n “flutuando” entre os contatos posteriores, estas fugas de corrente foram bastante estudadas em células de laboratório e com metalização baseada em evaporação de metais ou deposição química [5, 17, 45-49]. A maioria dos trabalhos sugeriu como solução o uso de regiões n de alta resistência de folha para evitar as fugas. Wolf *et al.* [49] sugeriram isolar a região n posterior da trilha metálica pela realização de difusão de dopante tipo p em uma região mais larga que a trilha metálica.

Os resultados da literatura são relativos a células que não usavam serigrafia na metalização. As soluções encontradas não podem ser aplicadas diretamente para células solares industriais e como foi visto nesta dissertação, os problemas de fugas foram elevados e reduziram a eficiência das células solares.

4. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE CONTINUIDADE

A implementação de junção flutuante em células solares por processos industriais foi analisada pela primeira vez nessa dissertação. Para produzir a região n^+ flutuante, utilizou-se um processo inovador baseado na deposição de líquidos dopantes por *spin-on* e processamento em forno de esteira.

Foram testados líquidos dopantes com diferentes concentrações de fósforo e diferentes condições de temperatura de difusão e de velocidade de esteira. Usando-se o líquido dopante P508 da empresa Filmtronics, constatou-se pela técnica da ponta quente que para ocorrer inversão da superfície p^+ dopada com boro (com $C_s = 1,7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $x_j = 0,16 \text{ }\mu\text{m}$) para n^+ pela difusão de fósforo em células p^+nn^+ é necessário uma temperatura de difusão de $900 \text{ }^\circ\text{C}$ e velocidade de esteira de 50 cm/min , com duas passagens pela forno, totalizando um tempo de processamento de $3,04 \text{ min}$. No entanto, as medidas de perfis realizadas indicaram que processos na mesma temperatura e $V_E = 50 \text{ cm/min}$, 100 cm/min e 133 cm/min , também poderiam produzir uma inversão da superfície de p^+ para n^+ .

Por outro lado, observou-se que não foi possível a formação da região n^+ flutuante pelo processamento em forno de difusão com tubo de quartzo previamente carregado com fósforo (a partir de POCl_3). No teste realizado não houve a inversão da região n^+ para p^+ sob $T_D = 900^\circ\text{C}$.

Após fabricar células solares p^+nn^+ com diferentes processos de difusão em forno de esteira e tubo de quartzo para a formação de junção flutuante, pode-se concluir que para todos os processos, em que houve e em que não houve a inversão da região p^+ para n^+ , ocorreu uma significativa piora nos parâmetros elétricos, principalmente no FF, quando comparados com os de células produzidas pelo processo padrão. A melhor célula solar fabricada com região n^+ sobre p^+ foi

processada com $T_D = 900 \text{ }^\circ\text{C}$ e $V_E = 133 \text{ cm/min}$ e apresentou as seguintes características elétricas: $V_{OC} = 573 \text{ mV}$, $J_{SC} = 33,4 \text{ mA/cm}^2$, $FF = 0,51$ e $\eta = 9,6 \%$. Uma baixa resistência em paralelo foi o que diminuiu as características elétricas das células solares, que atingiram as seguintes características elétricas: $V_{OC} = 600 \text{ mV}$, $J_{SC} = 34,3 \text{ mA/cm}^2$, $FF = 0,74$ e $\eta = 15,1 \%$.

Testou-se a fabricação de células solares com pastas de Al em vez de pastas de Al/Ag na face frontal como alternativa para resolver o problema da baixa resistência em paralelo formada. No entanto, os parâmetros elétricos das células com ambos os tipos de pastas foram similares, indicando que a alta dopagem presente na região n^+ impede a formação de um contato de alta resistência, o que poderia aumentar a resistência em paralelo.

Mediante simulações uni e bidimensionais da estrutura $(n^+)p^+nn^+$ se confirmou que as células solares $(n^+)p^+nn^+$ produzidas experimentalmente apresentaram baixa resistência em paralelo devido a correntes de fuga na região n^+ depositada sobre o emissor. Foram observadas condutâncias em paralelo da ordem de 25 a 69 mS/cm^2 , de três ordens de magnitude acima do de células solares p^+nn^+ típicas.

Como continuidade deste trabalho, sugere-se desenvolver processos de fabricação de células solares $(n^+)p^+nn^+$ onde a região (n^+) seja isolada das trilhas metálicas mediante, por exemplo, o uso de radiação laser para criar um pequeno sulco próximo das trilhas metálicas. Além disso, para realmente melhorar as características elétricas das células solares p^+nn^+ com o uso da junção flutuante, deverão ser realizados esforços para obtenção de uma região n^+ com concentração em superfícies da ordem de 10^{19} cm^{-3} , que permita uma passivação de superfície mais eficiente. Para atingir este objetivo, deverão ser implementados emissores seletivos dopados com boro, onde a região entre trilhas metálicas deverá ser levemente dopada e deste modo a inversão para tipo n^+ será facilitada, e a região sob as trilhas metálicas deverá ser altamente dopada e profunda.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] SINGH, S.; DROSS, F. POSTHUMA, N. E.; MERTENS, R. Large area 15.8% n-type mc-Si screen-printed solar cell with screen printed Al-alloyed emitter. **Solar Energy Material & Solar Cells**, Vol. 95, 2011, pp. 1151-1156.

[2] GREEN, A. M. **Silicon Solar Cells**. Sydney: N.S.W. 1995. 366 p.

[3] MOEHLECKE, A.; CAÑIZO, C.; ZANESCO, I.; LUQUE, A. Floating junction passivation of p^+ emitters. In: **2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion**, 1998, Austria. Proceedings of the Second World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Austria: Vienna, pp. 1551-1554.

[4] CAÑIZO, C. **Processos de Extracción de Impurezas Contaminantes y Aplicación a Estructuras de Células Solares**. Madrid. 2000. p. 199. Doctorado. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Espanha.

[5] HONSBURG, C.; GHOZATI, S. B.; EBONG, A. U.; TANG, Y-H.; WENHAM, S. R. Elimination of parasitic effects in floating junction rear surface passivation for solar cells. In: **IEEE Photovoltaic Specialists Conference**, 1996. Conference Record of the Twenty-fifth IEEE, pp. 401-404.

[6] RICHTER, A.; BENICK, J.; KALIO, A.; JOHANNES, S.; HORTEIS, M.; HERMLE, M.; GLUNZ, S. W. Towards industrial n-type PERT silicon solar cells: rear passivation and metallization scheme. **Energy Procedia**, Vol. 8, 2011, pp. 479-486.

- [7] HONSBURG, C.; BOWDEN, S. **Photovoltaics CDROM**. Disponível em: <<http://www.udel.edu/igert/pvcdrom>>. Acesso em: 11 outubro 2011.
- [8] ZHAO, J. Recent advances of high-efficiency single crystalline silicon solar cells in processing technologies and substrate materials. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 82, 2004, pp. 53-64.
- [9] ABERLE, A. G. **Crystalline Silicon Solar Cells: Advanced Surface Passivation and Analysis**. Sydney: UNSW. 1999. 335 p.
- [10] ABERLE, A. G. Surface passivation of crystalline silicon solar cells: a review. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, Vol. 8, 2000, pp. 473-487.
- [11] TYAGI, M. S. **Introduction to Semiconductor Materials and Devices**. Singapore. 1991. 669 p.
- [12] LEE, J. Y.; GLUNZ, S.W. Investigation of various surface passivation schemes for silicon solar cells. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, Vol. 90, 2006, pp. 82-92.
- [13] SHARANGPANI, R.; TAY, S. Growth and characterization of rapid thermal chlorinated oxides grown using in situ generated HCl. **Journal of the Electrochemical Society: Solid-State Science and Technology**, v. 148, 2001, pp. F5-F8.
- [14] ABERLE, A.; WARTA, W.; KNOBLOCH, J.; VOB, B. Surface passivation of high efficiency silicon solar cells. In: **Photovoltaic Specialists Conference**, 1990. Conference Record of the Twenty First IEEE, pp. 233-238.
- [15] DAO, V. A.; HEO, J.; KIM, Y.; LAKSHMINARAYAN, N.; YI, J. Optimize surface passivation of n and p type silicon wafers using hydrogenated. **Journal of Non-Crystalline Solids**, Vol. 356, 2010, pp. 2880-2883.

- [16] GATZ, S.; DULLWEBER, T.; MERTENS, V.; EINSELE, F.; BRENDEL, R. Firing stability of $\text{SiN}_y/\text{SiN}_x$ stacks for the surface passivation of crystalline silicon solar cells. **Solar Energy Material & Solar Cells**, Vol. 96, 2012, pp. 180-185.
- [17] ALTERMATT, P. P.; HEISER, G.; DAI, X.; JURGENS, J.; ABERLE, A. G.; ROBINSON, S. J.; YOUNG, T.; WENHAM, S. R.; GREEN, M. A. Rear Surface passivation of high-efficiency silicon solar cells by a floating junction. **Journal of Applied Physics**, Vol. 80, 1996, pp. 3574-3586.
- [18] MOEHLECKE, A. **Conceptos Avanzados de Tecnologia para Células Solares con Emisores p^+ Dopados con Boro**. Madrid. 1996. 202 p. Doutorado. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Espanha.
- [19] HONSBURG, C.; MCINTOSH, K. R.; BOONPRAKAIKAEW, G.; GHOZATI, S.; WENHAM, S. R. Characterisation and measurement of silicon solar cells with floating junction passivation. In: **IEEE Photovoltaic Specialists Conference**, 1997. Conference Record of the Twenty-sixth IEEE, pp. 247-250.
- [20] MCINTOSH, K. R.; HONSBURG, C. A new technique for characterizing floating junction passivated solar cells from their dark IV curves. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, Vol. 7, 1999, pp. 363-378.
- [21] BENICK, J.; WITTMANN, O. S.; SCHÖN, J.; GLUNZ, S. Passivation of Boron Emitters by Local Overcompensation With Phosphorus. In: **23th European Photovoltaic Solar Energy Conference**, 2008, Valência, pp. 1550-1552.
- [22] SCHRODER, D.K. **Semiconductor Material and Device Characterization**. Wiley-Interscience: New Jersey, 2005. 779p.
- [23] OKA, M. M. Método das Quatro Pontas, Fundamentos. DMI - Divisão de Microsistemas Integrados, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 2010. V. 10, 6p. (Apostila).

[24] PEINER, E.; SCHLACHETZKI, A.; KRUGER, D. Doping Profile Analysis in Si by Electrochemical Capacitance-Voltage Measurements. **J. Electrochem. Soc.**, vol. 142, 1995, pp. 576-580.

[25] CVP21, **Manual of Wafer Profiler CVP21, Electrochemical Capacitance Voltage Profiling**. 236 p.

[26] MARTÍ, A. Fundamentos de la conversión fotovoltaica: la célula solar. In: **Fundamentos, Dimensionado y Aplicaciones de la Energía Solar Fotovoltaica**. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Madrid, 1995, p. 1.3 – 1.27.

[27] GREEN, M. A. **Solar cells: Operating Principles, Technology and System Applications**. Sydney: UNSW Photovoltaics, 1992. 274 p.

[28] LORENZO, E. **Electricidad Solar: Ingeniería de los Sistemas Fotovoltaicos**. Progensa, Espanha. 1994. 337 p.

[29] BARANÃÑO, F. R. **Evaluación de la Serigrafía como Técnica de Metalización para Células Solares Eficientes**. Bilbao. 2001. 237 p. Tese de Doutorado, Escuela Superior de Ingenieros de Bilbao, Universidad Del País Vasco, Espanha.

[30] BASORE, P.A., CLUGSTON, D.A. PC1D Version 5: 32-bit solar cell modeling on personal computers, **26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference**, Anaheim, EUA, 1997, pp. 207–210.

[31] Silvaco ATHENA **User's Manual**. 2007. Software version 5.14.0.R. Silvaco International. Santa Clara, CA, EUA. www.silvaco.com

[32] Silvaco ATLAS **User's Manual**. 2007. Software version 5.12.0.R. Silvaco International. Santa Clara, CA, EUA. www.silvaco.com

- [33] MICHAEL, S.; BATES, A. The design and optimization of advanced multijunction solar cells using the Silvaco ATLAS software package. **Solar Energy Material & Solar Cells**, vol. 87, 2005, pp. 785-794.
- [34] MICHAEL, S.; BATES, A .D.; GREEN, M. S. Silvaco ATLAS as a solar cell modeling tool. In: **IEEE Photovoltaic Specialists Conference**, 2005. Conference Record of the 31th IEEE. pp. 719-721.
- [35] LENNIE, A.; ABDULLAH, H.; MUSTAZA, S.M.; SOPIAN, K. Photovoltaic properties of Si_3N_4 layer on silicon solar cell using Silvaco software. **European Journal of Scientific Research**, Vol. 29, N. 4, 2009, pp. 447-453.
- [36] ZANESCO, I.; MOEHLECKE, A.; PINTO, J. L.; LY, M. Development and Comparison of Small and Large Area Boron Doped Solar Cells in n-type and p-type Cz-Si. **Proceedings of the 38th IEEE PVSC**, Austin, TX, USA, 2012; 2284-2288
- [37] KERN, W., 1998. **Handbook of Semiconductor Wafer Cleaning Technology**. New Jersey, USA, Noyes Publications, 623p.
- [38] MATHIOT, D.; LACHIQ, A.; SLAOUI, A.; NOËL, S.; MULLER, J.C.; DUBOIS, C. Phosphorus diffusion from a spin-on doped glass (SOD) source during rapid thermal annealing. **Materials Science in Semiconductor Processing**, vol.1, 1998, pp 231-236.
- [39] VENTURA, L.; SLAOUI, A.; SCHINDLER, R.; LOGHMARTI, M., MULLER, J.C., STUCK, R.; SIFFERT, P. Rapid thermal annealed spin-on glass films for solar cell applications. In: **12th European Photovoltaic Solar Energy Conference**, 1994, Amsterdam, pp. 560-563.
- [40] POSTHUMA, N. **Highly Efficient Thin Germanium Bottom Cells for Mechanically Stacked Photovoltaic Devices**. Tese de doutorado. Katholieke Universiteit Leuven, 2006, 179p.

- [41] RAMOS, C. R. **Otimização do Emissor n^+ e da Metalização por Deposição Química para Células Solares Industriais**. Porto Alegre. 2006. 110 p. Mestrado. Pós-graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.
- [42] LY, M., *et al.* . Influência da espessura do filme antirreflexo de TiO_2 nos parâmetros elétricos de células solares com base n. In: **IV Congresso Brasileiro de Energia Solar (IV CBENS) e V Conferência Latino Americana da ISES**, 2012, São Paulo.
- [43] SCHRODER, D.K.; MEIER, D.L. Solar cell contact resistance – A review. *IEEE Transactions on Electron Devices*, Volume: 31, N. 5, 1984, pp. 637 – 647
- [44] CUEVAS, A. G., *et al.* Extraction of the surface recombination velocity of the passivated phosphorus-doped silicon emitters. **Conference Record, First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion**. Hawaii, 1996 pp. 1446-1449.
- [45] WENHAM, S.R. *et al.* Rear surface effects in high efficiency silicon solar cells. **Conference Record of First World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conference**, Hawaii, EUA, 1994, pp. 1278-1282.
- [46] GHOZATI, S.B. *et al.* Improved fill-factor for the double-sided buried-contact bifacial silicone solar cell. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, vol. 51, 1998, pp. 121-128.
- [47] MCINTOSH, K.R., BOONPRAKAIKAEW, G., HONSBURG, C. An experimental technique to measure the shunt resistance across a local region of a floating junction. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, vol. 64, 2000, pp. 353-361.
- [48] NADAL, C.C. **Procesos de Extracción de Impurezas Contaminantes y Aplicación a Estructuras de Células Solares**. Tese de Doutorado. Universidade Politécnica de Madri. 2000, 200p.

[49] WOLF, S.D., DUERINCKX, F., AGOSTINELLI, G., BEAUCARNE, G. Low-cost rear side floating junction solar cell issues on mc-Si. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, vol. 90, 2006, pp. 3431-3437.

APÊNDICE

Abaixo se apresenta descrita toda a programação usada no aplicativo *Deckbuild*, para a utilização dos programas *Athena* e *Atlas*. Todas as frases iniciadas com o símbolo “#” indicam algum comentário sobre a programação e não são lidas pelos programas.

Criando uma célula solar – Programa *Athena*

Primeiramente deve-se chamar o programa a ser utilizado, para criar a estrutura da célula solar; chama-se o *Athena*:

```
GO ATHENA
```

Cria-se uma malha a ser utilizada como base da estrutura:

```
LINE X LOC=0.00 SPAC=1
```

```
LINE X LOC=50 SPAC=1
```

```
LINE Y LOC=0.00 SPAC=0.01
```

```
LINE Y LOC=0.25 SPAC=0.05
```

```
LINE Y LOC=1 SPAC=0.1
```

```
LINE Y LOC=20 SPAC=1
```

```
LINE Y LOC=190 SPAC=5
```

```
LINE Y LOC=195 SPAC=0.5
```

```
LINE Y LOC=198 SPAC=0.05
```

```
LINE Y LOC=200 SPAC=0.01
```

Define-se o material de partida, indicando algumas informações importantes como a resistividade em ohms.cm do material e a orientação da estrutura cristalina.

```
INIT SILICON RESISTIVITY=4.83 PHOSPHORUS ORIENTATION=100
```

Inicia-se a dopagem, primeiramente da região p^+ . Indicando os parâmetros de difusão (tempo, temperatura e concentração de boro):

DIFFUSE TIME=15 TEMP=1000 C.BORON=5E19

Realiza-se a etapa de recozimento, para que o perfil seja similar ao experimental. Para isto, definem-se os parâmetros de difusão (tempo, temperatura e ambiente inerte):

DIFFUSE TIME 5 TEMP=925 INERT

Dopa-se a região (n^+). Importar arquivo externo com os dados do perfil experimental obtido no Processo 11:

PROFILE INFILE=Fosforo_p11.sims PHOSPHORUS

Deposita-se óxido sobre a superfície da região (n^+) para passivação, definindo alguns parâmetros como espessura (em micrometros) e divisões para cálculo (malha) dentro da região depositada:

DEPOSIT OXIDE THICKNESS=0.01 DIV=1

Retira-se o óxido na região onde será depositado o eletrodo (à direita da posição $x=45$ micrometros):

ETCH OXIDE RIGHT P1.X=45

Retira-se silício da região onde será depositado o eletrodo (é necessário para o eletrodo contatar a região p^+ da célula solar):

ETCH SILICON START X=45 Y=0

ETCH CONTINUE X=45 Y=0.08

ETCH CONTINUE X=50 Y=0.08

ETCH DONE X=50 Y=0.0

Deposita-se alumínio sobre a superfície do dispositivo para a formação do eletrodo, definindo alguns parâmetros como espessura (em micrometros) e divisões para cálculo (malha) dentro da região depositada:

DEPOSIT ALUMINUM THICKNESS=10 DIV=1

Retira-se alumínio no restante da superfície, onde não será depositado eletrodo (à esquerda da posição $x=45$ micrometros):

```
ETCH ALUMINUM LEFT P1.X=45
```

Inverte-se a estrutura no eixo y, a fim de dopar e depositar o eletrodo na região posterior:

```
STRUCTURE FLIP.Y
```

Dopa-se a região n^+ posterior. Importa-se o arquivo externo com os dados do perfil experimental padrão.

```
PROFILE INFILE=Fosforo_exp.sims PHOSPHORUS
```

Deposita-se alumínio sobre a superfície posterior do dispositivo para a formação do eletrodo, definindo alguns parâmetros como espessura (em micrometros) e divisões para cálculo (malha) dentro da região depositada:

```
DEPOSIT ALUMINUM THICK=10 DIV=1
```

Reinverte-se a estrutura no eixo y:

```
STRUCTURE FLIP.Y
```

Definem-se os eletrodos:

```
ELECTRODE NAME=cathode X=45
```

```
ELECTRODE NAME=anode X=0
```

Salva-se a estrutura simulada, com a extensão .str para ser aberta com o aplicativo *Tonyplot*:

```
STRUCTURE OUTFILE=standard_cell.str
```

Abre-se a estrutura simulada com o aplicativo *Tonyplot*:

```
TONYPLOT standard_cell.str
```

Simulação de parâmetros elétricos – Programa *Atlas*:

Primeiramente deve-se chamar o programa a ser utilizado, para calcular os parâmetros elétricos; chama-se o *Atlas*:

```
GO ATLAS
```

Importa-se a estrutura simulada através do *Athena*:

```
MESH INFILE=standard_cell.str
```

Definem-se alguns parâmetros relevantes dos materiais do dispositivo, como o tempo de vida dos portadores de carga:

```
MATERIAL MATERIAL=ALUMINUM IMAG.INDEX=1000.
```

```
MATERIAL MATERIAL=SILICON TAUN0=70E-6 TAUP0=70E-6
```

Define-se a recombinação em superfície; esse parâmetro só é aceito onde houver interface óxido-silício:

```
INTERFACE X.MIN=0 Y.MIN=0 X.MAX=45 Y.MAX=0 S.N=1E7 S.P=1E7
```

Define-se o feixe, o espectro solar e a posição da irradiação sobre o dispositivo.

```
BEAM      NUM=1      X.ORIGIN=50      Y.ORIGIN=-15      ANGLE=90.0
```

```
POWER.FILE=AM1_5G.spec
```

Definem-se os modelos e métodos físicos utilizados:

```
MODELS CONMOB FLDMOB CONSRH PRINT
```

```
METHOD GUMMEL NEWTON BLOCK
```

Calcula-se a densidade de corrente em curto-circuito. Inicia-se o cálculo, chama-se o "b1" que é o feixe pré-definido, extrai-se o dado (sendo que é multiplicado a ele um fator de correção de 2×10^9 para obter o resultado em mA/cm²), salva-se o dado para posterior leitura:

```
SOLVE INIT
```

```
SOLVE PREVIOUS
```

```
SOLVE B1=1
```

```
EXTRACT NAME="SHORT_CIRCUIT" MAX(ABS(I."CATHODE"))*2E9
```

```
SAVE OUTF=Jsc.str
```

```
# Salva-se a estrutura simulada em curto-circuito, com a extensão .str para ser  
aberta com o aplicativo Tonyplot.
```

```
STRUCTURE OUTFILE=standard_cell_Jsc.str
```

```
# Abre-se a estrutura simulada com o aplicativo Tonyplot.
```

```
TONYPLOT standard_cell_Jsc.str
```

```
# Calcula-se a tensão em circuito aberto. Inicia-se o cálculo, define-se o eletrodo em  
que a corrente será fixada (cátodo), chama-se o "b1" que é o feixe pré-definido,  
extrai-se o dado da tensão, salva-se o dado para posterior leitura:
```

```
SOLVE INIT
```

```
SOLVE PREVIOUS
```

```
CONTACT NAME=CATHODE CURRENT
```

```
SOLVE ICATHODE=0 B1=1
```

```
EXTRACT NAME="OPEN_CIRCUIT_VOLTAGE" MAX(ABS(VINT."CATHODE"))
```

```
SAVE OUTF=Voc.str
```

```
# Salva-se a estrutura simulada em circuito aberto, com a extensão .str para ser  
aberta com o aplicativo Tonyplot.
```

```
STRUCTURE OUTFILE=standard_cell_Voc.str
```

```
# Abre-se a estrutura simulada com o aplicativo Tonyplot.
```

```
TONYPLOT standard_cell_Voc.str
```