

ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS - PGETEMA

AUGUSTO DOS SANTOS KOCHENBORGER

**DESENVOLVIMENTO E COMPARAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES BIFACIAIS
PROCESSADAS COM REDUÇÃO DE ETAPAS TÉRMICAS EM LÂMINAS DE SILÍCIO COM
DIFERENTES RESISTIVIDADES DE BASE**

Porto Alegre

2021

PÓS-GRADUAÇÃO - *STRICTO SENSU*



Pontifícia Universidade Católica
do Rio Grande do Sul



**DESENVOLVIMENTO E COMPARAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES
BIFACIAIS PROCESSADAS COM REDUÇÃO DE ETAPAS
TÉRMICAS EM LÂMINAS DE SILÍCIO COM DIFERENTES
RESISTIVIDADES DE BASE**

AUGUSTO DOS SANTOS KOCHENBORGER
BACHAREL EM ENGENHARIA FÍSICA

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

Porto Alegre
Novembro, 2021



**DESENVOLVIMENTO E COMPARAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES
BIFACIAIS PROCESSADAS COM REDUÇÃO DE ETAPAS
TÉRMICAS EM LÂMINAS DE SILÍCIO COM DIFERENTES
RESISTIVIDADES DE BASE**

AUGUSTO DOS SANTOS KOCHENBORGER

BACHAREL EM ENGENHARIA FÍSICA

ORIENTADORA: Profa. Dra. IZETE ZANESCO

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. ADRIANO MOEHLECKE

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. CARLOS DEL CAÑIZO NADAL

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.

**Porto Alegre
Novembro, 2021**

Ficha Catalográfica

K76d Kochenborger, Augusto dos Santos

Desenvolvimento e comparação de células solares bifaciais processadas com redução de etapas térmicas em lâminas de silício com diferentes resistividades de base / Augusto dos Santos Kochenborger. – 2021.

80.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PUCRS.

Orientadora: Profa. Dra. Izete Zanescó.

Co-orientador: Prof. Dr. Adriano Moehlecke.

Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Del Cañizo Nadal.

1. células solares bifaciais. 2. difusão de dopantes. 3. campo retrodifusor.
I. Zanescó, Izete. II. Moehlecke, Adriano. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da PUCRS
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bibliotecária responsável: Clarissa Jesinska Selbach CRB-10/2051



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

**DESENVOLVIMENTO E COMPARAÇÃO DE CÉLULAS
SOLARES BIFACIAIS PROCESSADAS COM REDUÇÃO DE
ETAPAS TÉRMICAS EM LÂMINAS DE SILÍCIO COM
DIFERENTES RESISTIVIDADES DE BASE**

CANDIDATO: AUGUSTO DOS SANTOS KOCHENBORGER

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.

DRA. IZETE ZANESCO - ORIENTADORA

DR. ADRIANO MOEHLECKE - COORIENTADOR

**DR. CARLOS DEL CAÑIZO - COORIENTADOR
INSTITUTO DE ENERGIA SOLAR - UNIVERSIDADE POLITÉCNICA DE MADRI**

BANCA EXAMINADORA

**DR. HENRI IVANOV BOUDINOV
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MICROELETRÔNICA - UFRGS**

DRA. ELEANI MARIA DA COSTA - PGETEMA - PUCRS

PUCRS

Campus Central
Av. Ipiranga, 6631 - Prédio 32 - Sala 507 - CEP: 91219-900
Telefone: (51) 3353.4055 - Fax: (51) 3320.3625
E-mail: engenharia.pg.materiais@pucrs.br
www.pucrs.br/politecnica

O amor é o tom da revolução

Fresno

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais, Analúcia e Sandro, e à minha irmã, Rafaella, que me apoiaram e me incentivaram demais em toda minha jornada acadêmica.

Gostaria de agradecer aos professores Izete e Adriano, que me acolheram no NT-Solar e confiaram em mim para fazer parte do laboratório. Aos meus colegas Andrielen e Fábio, com quem dividi tanto tempo de sala limpa. À Thais, que sempre esteve disposta a me ajudar em tudo que eu precisasse. Ao Moussa, que me ensinou tudo sobre a sala limpa, e me ajudou com todos os equipamentos.

E por fim, à minha noiva Katiane, que ficou do meu lado e viveu comigo todo o processo do mestrado, me ajudando a seguir em frente.

A todos vocês, meu muito obrigado!

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	18
1.1. Justificativas.....	18
1.2. Objetivos.....	22
2. A CÉLULA SOLAR DE SILÍCIO.....	23
2.1. Produção e Resistividade Elétrica da Lâmina de Silício Cristalino.....	23
2.1.1. Grau de Pureza do Silício para Produção de Células Solares.....	23
2.1.2. Métodos de Crescimento de Silício Cristalino para Fabricação de Células Solares.....	24
2.1.3. Resistividade Elétrica da Lâmina de Silício.....	25
2.2. Princípio de Funcionamento da Célula Solar.....	27
2.3. Células Solares da Família PERC.....	29
2.4. Células Solares Processadas com Redução de Etapas.....	30
2.5. Células Solares Bifaciais.....	31
3. METODOLOGIA.....	35
3.1. Processo de Produção das Células Solares Bifaciais.....	35
3.2. Características das Lâminas de Silício.....	35
3.3. Atividades para o Desenvolvimento das Células Solares Bifaciais.....	38
3.2. Etapas do Processo de Produção.....	40
3.2.1. Texturação.....	40
3.2.2. Limpezas Químicas.....	41
3.2.3. Difusão do Boro e Fósforo.....	41
3.2.4. Oxidação.....	42
3.2.5. Deposição do Filme Antirreflexo.....	42
3.2.6. Metalização por Serigrafia e Queima das Pastas Metálicas.....	43
3.2.7. Isolamento das Bordas.....	43
3.3. Métodos de Caracterização.....	44
3.3.1. Resistência de Folha.....	44
3.3.2. Características Elétricas.....	44
3.3.3. Eficiência Quântica.....	47
4. RESULTADOS E ANÁLISE.....	49
4.1. Avaliação da Resistência de Folha.....	49

4.2. Estimativa das Dimensões das Trilhas Metálicas	52
4.3. Análise e Comparação dos Parâmetros Elétricos	54
4.3.1. Células Solares Bifaciais com Menor Resistividade de Base	54
4.3.2 Células Solares Bifaciais com Maior Resistividade de Base	58
4.3.3 Comparação dos Parâmetros Elétricos das Células Solares Bifaciais com Maior Eficiência.....	60
4.4. Análise da Eficiência Quântica Interna e Refletância.....	63
4.5. Comparação de Células Solares Bifaciais com Diferente Resistividade de Base.....	68
5. CONCLUSÕES E PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	73
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Crescimento da potência instalada em sistemas fotovoltaicos no mundo desde 2010 (REN21, 2021).	18
Figura 1.2: Crescimento da potência instalada em sistemas fotovoltaicos no Brasil desde 2021 (ABSOLAR, 2021).	19
Figura 1.3: Quota de mercado mundial dos tipos de lâminas de silício para fabricação de células solares (ITRPV, 2021).	21
Figura 1.4: Quota de mercado mundial das tecnologias de fabricação de células solares de Si (ITRPV, 2021)	21
Figura 2.1: Esquema demonstrando a dopagem do silício: a) tipo n e b) tipo p (J.M.K.C. DONEV ET AL, 2020).	26
Figura 2.2: Resistividade de base em função da dopagem em silício cristalino. A curva azul representa o Si tipo p e a curva vermelha o Si tipo n (ZEGHBROECK, B. V., 2011).	26
Figura 2.3: Ruptura da rede cristalina na superfície de um material semiconductor. Adaptado de Bowden e Honsberg (BOWDEN, S.; HONSBURG, C).	28
Figura 2.4: Diferença entre uma célula solar PERC tipo p e uma PERT tipo n. Adaptado de (CHAN, 2019).	30
Figura 2.5: Comparação das curvas J-V de células monofaciais (círculos azuis) e bifaciais (quadrados vermelhos) (RAINA, SINHA, 2020).	34
Figura 3.1: Etapas do processo de fabricação de células solares para o (a) processo padrão com BBr_3 , (b) processo com deposição de líquido com boro por <i>spin-on</i> e difusão de boro e oxidação na mesma etapa térmica e (c) processo utilizado nesse trabalho, com difusão de boro e fósforo na mesma etapa térmica (CRESTANI, 2021).	36
Figura 3.2: Célula solar bifacial desenvolvida em lâminas de silício (a) do fabricante A com resistividade de base de $0,8 \Omega \cdot \text{cm}$ a $2,6 \Omega \cdot \text{cm}$ e (b) do fabricante B com resistividade de base $1 \Omega \cdot \text{cm}$ a $20 \Omega \cdot \text{cm}$	37
Figura 3.3: Etapas do processo de fabricação das células solares bifaciais desenvolvidas nesse trabalho em azul, destacando em laranja a etapa de otimização e os parâmetros físicos de comparação e em verde as etapas de caracterização.	39
Figura 3.4: Imagem obtida com o microscópio óptico das micropirâmides. Aumento de 100x.	40
Figura 3.5: Ilustração da curva I-V e de potência de uma célula solar.	45
Figura 3.6: Representação da eficiência quântica externa (EQE) de uma célula solar e indicação dos principais fatores de redução. Adaptado de Bowden e Honsberg (BOWDEN, S.; HONSBURG, C).	47
Figura 4.1. Resistência de folha do campo retrodifusor de boro em função da temperatura de difusão de boro em lâminas de silício com diferente resistividade de base.	51
Figura 4.2. Resistência de folha do emissor de fósforo em função da temperatura de difusão de boro em lâminas de silício com diferente resistividade de base.	51
Figura 4.3. Trilha da malha metálica (a) de prata no emissor e (b) de prata/alumínio no campo retrodifusor obtida no microscópio óptico, formada nas células solares bifaciais com resistividade de base de $0,8$ a $2,6 \Omega \cdot \text{cm}$. Aumento de 50 X.	53

Figura 4.4. (a) Tensão de circuito aberto, (b) densidade de curto-circuito, (c) fator de forma e (d) eficiência em função da temperatura de difusão de boro das células solares bifaciais com maior eficiência produzidas com as lâminas de silício de diferente resistividade de base e irradiância no emissor de fósforo.	61
Figura 4.5. (a) Tensão de circuito aberto, (b) densidade de curto-circuito, (c) fator de forma e (d) eficiência em função da temperatura de difusão de boro das células solares bifaciais com maior eficiência produzidas com as lâminas de silício com diferentes resistividades de base e irradiância no campo retrodifusor de boro.	62
Figura 4.6. Eficiência quântica interna medida no emissor em função da temperatura de difusão de boro das células solares com maior eficiência processadas em lâminas de Si-Cz com resistividade de base de (a) 0,8 a 2,6 Ω .cm e (b) de 1 a 20 Ω .cm.	64
Figura 4.7. Refletância medida no emissor das células solares bifaciais em função da temperatura de difusão de boro das células solares com maior eficiência processadas em lâminas de Si-Cz com resistividade de base de (a) 0,8 a 2,6 Ω .cm e (b) de 1 a 20 Ω .cm.	65
Figura 4.8. Eficiência quântica interna medida no campo retrodifusor em função da temperatura de difusão de boro das células solares com maior eficiência processadas em lâminas de Si-Cz com resistividade de base de (a) 0,8 a 2,6 Ω .cm e (b) de 1 a 20 Ω .cm.	66
Figura 4.9. Refletância medida no campo retrodifusor em função da temperatura de difusão de boro das células solares com maior eficiência processadas em lâminas de Si-Cz com resistividade de base de (a) 0,8 a 2,6 Ω .cm e (b) de 1 a 20 Ω .cm.	67
Figura 4.10. Densidade de corrente elétrica em função da tensão aplicada com irradiância no emissor das células solares com maior eficiência processadas em lâminas de Si-Cz com resistividade de base de (a) 0,8 a 2,6 Ω .cm e (b) de 1 a 20 Ω .cm.	68
Figura 4.11. Densidade de corrente elétrica em função da tensão aplicada com irradiância no campo retrodifusor das células solares com maior eficiência processadas em lâminas de Si-Cz com diferente resistividade de base.	69
Figura 4.12. Densidade de corrente elétrica em função da tensão aplicada com irradiância no emissor (a) e no campo retrodifusor (b) das células solares com maior eficiência processadas em lâminas de Si-Cz com diferente resistividade de base neste trabalho e em trabalho anterior (CRESTANI, 2021).	71

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Quadro 3.1 Características das lâminas de silício utilizadas nesse trabalho e fornecidas pelo fabricante A fabricante B.	37
Tabela 4.1. Resistência de folha (R_{SQ}) média do emissor de fósforo ($R_{SQ-Emissor}$) e do campo retrodifusor de boro (R_{SQ-BSF}) em função da temperatura de difusão de boro (T_B). A difusão dos dopantes foi realizada na mesma etapa térmica em lâminas de silício com resistividade de base de 0,8 a 2,6 Ω .cm.	49
Tabela 4.2. Resistência de folha (R_{SQ}) média do emissor de fósforo ($R_{SQ-Emissor}$) e do campo retrodifusor de boro (R_{SQ-BSF}) em função da temperatura de difusão de boro (T_B). A difusão dos dopantes foi realizada na mesma etapa térmica em lâminas de silício com resistividade de base de de 1 a 20 Ω .cm.	50
Tabela 4.3. Estimativa da altura (H) e da largura (L) das trilhas que constituem a malha metálica de prata no emissor e de prata/alumínio no campo retrodifusor, formada nas células solares bifaciais com resistividade de base de 0,8 a 2,6 Ω .cm.	52
Tabela 4.4. Estimativa da altura (H) e da largura (L) das trilhas que constituem a malha metálica de prata no emissor e de prata/alumínio no campo retrodifusor, formada nas células solares bifaciais com resistividade de base de 1 a 20 Ω .cm.	53
Tabela 4.5. Parâmetros elétricos das células solares bifaciais com irradiância no emissor de fósforo produzidas com diferentes temperaturas de difusão de boro (T_B) e de queima das pastas metálicas (T_Q), processadas em lâminas de silício com resistividade de base de 0,8 a 2,6 Ω .cm.	54
Tabela 4.6. Parâmetros elétricos das células solares bifaciais com irradiância no campo retrodifusor produzidas com diferentes temperaturas de difusão de boro (T_B) e de queima das pastas metálicas (T_Q), processadas em lâminas de silício com resistividade de base de 0,8 a 2,6 Ω .cm.	55
Tabela 4.7. Parâmetros elétricos das células solares bifaciais com irradiância no emissor em função da temperatura de difusão de boro (T_B). A temperatura de queima das pastas de metalização foi de 860 $^{\circ}$ C, processadas em lâminas de silício com resistividade de base de 0,8 a 2,6 Ω .cm.	56
Tabela 4.8. Parâmetros elétricos das células solares com irradiância no campo retrodifusor em função da temperatura de difusão de boro. A temperatura de queima das pastas de metalização foi de 860 $^{\circ}$ C, processadas em lâminas de silício com resistividade de base de 0,8 a 2,6 Ω .cm.	57
Tabela 4.9. Eficiência com irradiância no emissor ($\eta_{Emissor}$), no campo retrodifusor (η_{BSF}), bifacialidade e potência com irradiação na face com o emissor ($P_{Monofacial}$) e em ambas as faces ($P_{Bifacial}$) das células solares processadas com diferente temperatura de difusão de boro, processadas em lâminas de silício com resistividade de base de 0,8 a 2,6 Ω .cm.	58
Tabela 4.10. Parâmetros elétricos das células solares com irradiância no emissor em função da temperatura de difusão de boro (T_B) processadas em lâminas de silício com resistividade de base de 1 a 20 Ω .cm.	59
Tabela 4.11. Parâmetros elétricos das células solares com irradiância no campo retrodifusor em função da temperatura de difusão de boro. processadas em lâminas de silício com resistividade de base de 1 a 20 Ω .cm.	59

Tabela 4.12. Eficiência com irradiância no emissor (η_{Emissor}), no campo retrodifusor (η_{BSF}), bifacialidade e potência com irradiação na face com o emissor ($P_{\text{Monofacial}}$) e em ambas as faces (P_{Bifacial}) das células solares processadas diferente temperatura de difusão de processadas em lâminas de silício com resistividade de base de 1 a 20 Ω .cm.	61
Tabela 4.13. Parâmetros elétricos das células solares com maior eficiência processadas em lâminas de silício com diferente resistividade de base desenvolvidas neste trabalho e em trabalho anterior (CRESTANI, 2021).	70
Tabela 4.14. Eficiência com irradiância no emissor (η_{Emissor}), no campo retrodifusor (η_{BSF}), bifacialidade e potência com irradiação na face com o emissor ($P_{\text{Monofacial}}$) e em ambas as faces (P_{Bifacial}) das células solares com maior eficiência, processadas em substratos de Si-Cz de diferente resistividade de base neste trabalho e em trabalho anterior (CRESTANI, 2021).	72

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da célula	cm ²
α	Albedo	-
α	(λ) Coeficiente de absorção	cm ⁻¹
AR	Filme antirreflexo	-
c	Velocidade da luz	m/s
Cz	Czochralski	-
EQE	Eficiência quântica externa	%
EQI	Eficiência quântica interna	%
FF	Fator de forma	-
FZ	Fusão zonal flutuante (float zone)	-
G	Irradiância solar	W/m ²
h	Constante de Planck	J.s
I	Corrente elétrica	A
IL	Corrente elétrica fotogerada	A
I _{MP}	Corrente elétrica no ponto de máxima potência	A
I ₀	Corrente elétrica de saturação no escuro	A
I _{SC}	Corrente de curto-circuito	mA
J _{SC}	Densidade de corrente de curto-circuito	mA/cm ²
k	Constante de Boltzmann	J/K
λ	Comprimento de onda	μ m
L _n	Comprimento de difusão dos elétrons	nm
L _p	Comprimento de difusão das lacunas	nm
η	Eficiência	%
P _{in}	Potência da radiação solar que incide na célula solar	W
P _{MP}	Potência no ponto de máxima potência	W
q	Carga do elétron	C
R _{sq}	Resistência de folha	Ω /sq
RE (λ)	Resposta espectral	%
ρ (λ)	Refletância	-
ρ_B	Resistividade de base	Ω .cm
T	Temperatura	°C
T _B	Temperatura de difusão de boro	°C

T_Q	Temperatura de queima das pastas metálicas	$^{\circ}\text{C}$
V	Tensão elétrica	V
V_{MP}	Tensão no ponto de máxima potência	V
V_{oc}	Tensão de circuito aberto	mV

RESUMO

DOS SANTOS KOCHENBORGER, Augusto. **Desenvolvimento e comparação de células solares bifaciais processadas com redução de etapas térmicas em lâminas de silício com diferentes resistividades de base.** Porto Alegre. 2021. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

No mercado mundial de células solares há a tendência de aumento de dispositivos com estrutura da família PERC e bifaciais. O objetivo desse trabalho é desenvolver células solares bifaciais base p com estrutura PERT, produzidas com a difusão dos dopantes na mesma etapa térmica em substratos com diferente resistividade de base. Para isso, otimizou-se experimentalmente o campo retrodifusor de boro e avaliou-se a resistência de folha, os parâmetros elétricos, a bifacialidade e a eficiência quântica interna das células solares bifaciais produzidas com temperatura de difusão de boro (T_B) de 940 °C a 970 °C em substratos com diferentes resistividades de base. O método de difusão dos dopantes com redução de etapas térmicas está baseado em patente solicitada junto ao INPI, desenvolvida em trabalhos anteriores. Constatou-se que a resistência de folha no emissor de fósforo aumentou com o aumento da temperatura de difusão de boro, que forma o campo retrodifusor. Nos dispositivos com menor resistividade de base (0,8 a 2,6 $\Omega\cdot\text{cm}$) a maior eficiência alcançada com irradiância no emissor (η_{Emissor}) e campo retrodifusor (η_{BSF}) foi de 16,0 % e de 8,2 % e foi obtida com T_B de 970 °C. Neste dispositivo, a bifacialidade foi de 0,51 e a potência no modo bifacial de 17,6 mW/cm^2 . Estes valores foram inferiores aos obtidos com células solares com maior resistividade de base (1 a 20 $\Omega\cdot\text{cm}$). Neste caso, a η_{Emissor} foi de 16,3 % e a η_{BSF} de 10,2 %. A bifacialidade e a potência no modo bifacial também foram um pouco maiores, de 0,63 e de 18,3 mW/cm^2 , respectivamente. Estes resultados foram obtidos com T_B de 950 °C. A eficiência quântica interna (EQI) foi menor na face com o campo retrodifusor em todos os comprimentos de onda e foi afetada pela T_B . Na face com o campo retrodifusor, a EQI das células solares com a maior resistividade de base foi maior. Também se constatou que na face com o emissor de fósforo a refletância foi afetada pela difusão de boro. A eficiência das células solares bifaciais desenvolvidas é um pouco menor que aquela de módulos fotovoltaicos bifaciais comerciais, porém há menos etapas no processo de produção.

Palavras-Chaves: células solares bifaciais, difusão de dopantes, campo retrodifusor

ABSTRACT

DOS SANTOS KOCHENBORGER, Augusto. **Development and comparison of bifacial solar cells processed with reduction of thermal steps in silicon wafers with different base resistivity**. Porto Alegre. 2021. Master Thesis. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

In the global market of solar cells, there is a trend to increase the commercialization of PERC and bifacial devices. The objective of this work is to develop p-type bifacial solar cell with PERT structure, produced with the diffusion of dopants in the same thermal step on substrates with different base resistivity. For this, the boron back surface field was experimentally optimized and the sheet resistance, electrical parameters, bifaciality and internal quantum efficiency of bifacial solar cells, produced with boron diffusion temperature (T_B) from 940 °C to 970 °C in substrates with different base resistivity, were evaluated. The method of dopant diffusion with reduction of thermal steps is based on the patent required in INPI, developed in previous works. The sheet resistance in the phosphorus emitter increased with the increase of the boron diffusion temperature, used to form the back surface field. In the devices with low base resistivity (0.8 to 2.6 $\Omega\cdot\text{cm}$), the highest efficiency achieved with irradiance in the emitter (η_{Emitter}) and in the back surface field (η_{BSF}) was 16.0 % and 8.2% and was obtained with T_B of 970 °C. In this solar cell, the bifaciality was 0.51 and the power output with bifacial mode was 17.6 mW/cm^2 . These values were lower than those obtained with solar cells with higher base resistivity (1 to 20 $\Omega\cdot\text{cm}$). In this case, the η_{Emitter} was 16.3 % and the η_{BSF} was 10.2 %. Bifaciality and power output in bifacial mode were also slightly higher, of 0.63 and 18.3 mW/cm^2 , respectively. These results were obtained with T_B of 960 °C. The internal quantum efficiency (IQE) in the face with the back surface field was lower in all wavelengths and was affected by T_B . In the face with the back surface field, the IQE of the solar cells with base resistivity of 1 to 20 $\Omega\cdot\text{cm}$ was higher. We also found that in the face with the phosphorus emitter, the reflectance was affected by boron diffusion. The efficiency of the bifacial solar cells developed is slightly lower than that of commercial bifacial photovoltaic modules, but there are less steps in the production process.

Keywords: bifacial solar cells, dopant diffusion, back surface field

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1. Justificativas

A célula solar é o dispositivo capaz de converter energia solar diretamente em energia elétrica. As células solares quando associadas eletricamente e encapsuladas formam o módulo fotovoltaico. Este dispositivo, inversores e quadros de comando e proteção formam um sistema fotovoltaico.

Entre as tecnologias de produção de energia elétrica, a fotovoltaica é a que cresce mais rapidamente no mundo. A potência instalada em sistemas fotovoltaicos no mundo chegou a 760 GW em 2020, um aumento de 139 GW em relação à 2019 (REN21, 2021). Pode-se ver a curva de crescimento da potência instalada no mundo na Figura 1.1.

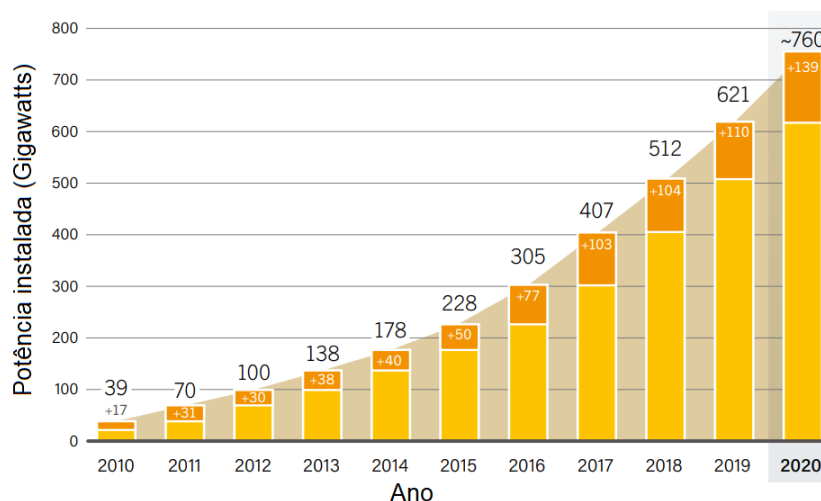


Figura 1.1: Crescimento da potência instalada em sistemas fotovoltaicos no mundo desde 2010 (REN21, 2021).

No Brasil, essa forma de produção de energia está crescendo rapidamente, tendo passado de menos de 100 MW de potência instalada em 2016 para 10,4 GW em agosto de 2021 (ABSOLAR, 2021). Pode-se ver a curva de crescimento da

potência instalada no Brasil na Figura 1.2. Apesar desse aumento, a tecnologia fotovoltaica ainda representa somente 2,1 % da matriz elétrica brasileira (ABSOLAR, 2021).

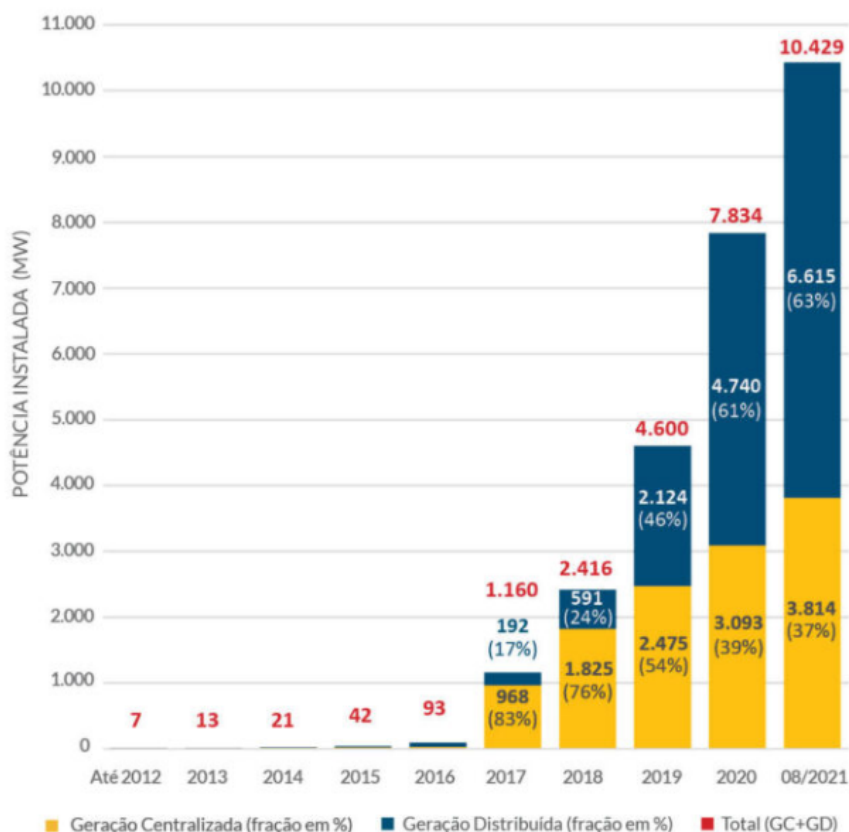


Figura 2.2: Crescimento da potência instalada em sistemas fotovoltaicos no Brasil desde 2021 (ABSOLAR, 2021).

O aumento de potência produzida ao longo do tempo está relacionado com a diminuição do preço por watt das células solares de silício monocristalino, de U\$ 1,791/W em 06/2014 (PV ENERGYTREND, 2014) para U\$ 0,12/W em 03/2021 (PV ENERGYTREND, 2021). A eficiência e o custo de produção estão diretamente relacionados com os materiais e os processos utilizados na fabricação bem como com a estrutura das células solares. Otimizar materiais e processos é um grande desafio.

Os módulos fotovoltaicos podem ser fabricados com diferentes tecnologias, destacando-se as de silício cristalino e de filmes finos. Os módulos fotovoltaicos de silício cristalino, que pode ser mono ou multicristalino, detêm 95 % do mercado atualmente (FRAUNHOFER ISE, 2019). Entre os comercialmente disponíveis, os módulos de silício monocristalino são os que apresentam maior eficiência de

conversão da energia solar em energia elétrica, entre 15 % e 20 %, não ultrapassando 24 % (ENERGYSAGE, 2020).

Anualmente são publicados os recordes em eficiência de células solares fabricadas em laboratório por diferentes processos. Na 55ª edição (GREEN et al., 2020), a maior eficiência da célula de Si cristalino foi de $(26,7 \pm 0,5)$ %. Para o silício, o limite teórico é da ordem de 33 % (RÜHLE, 2016).

No Núcleo de Tecnologia em Energia Solar (NT-Solar) na Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) desenvolveu-se a célula solar com maior eficiência no Brasil (ZANESCO et al., 2018), de 17,3 % de eficiência por meio da otimização dos processos de fabricação. No intuito de simplificar o processo e diminuir os custos, iniciaram-se estudos para diminuição de etapas, como por exemplo com a realização da difusão de boro e oxidação na mesma etapa térmica (ZANESCO; MOEHLECKE, 2012). Outro estudo foi realizado para a difusão de boro e fósforo na mesma etapa térmica. Com base nos resultados obtidos para células solares, foi solicitado o pedido de uma patente para processo de difusão de dopante tipo p e tipo n em lâminas de silício na mesma etapa térmica (ZANESCO; MOEHLECKE, 2018). Utilizando essa patente como base, alguns trabalhos já foram desenvolvidos (CRESTANI, 2021).

No que se refere aos substratos utilizados para fabricação de células solares, em 2020, a participação no mercado de lâminas de silício monocristalino tipo p foi de 70 % e para lâminas de silício monocristalino tipo n foi da ordem de 10 % (ITRPV, 2021). Previsões para 2030 mostram que esses substratos competirão com 40 % do mercado cada, como pode ser visto na Figura 1.3. Apesar da previsão de crescimento do Si tipo n, o Si monocristalino tipo p ainda estará bastante presente.

Em relação a tecnologia, as células solares com emissor e face posterior passivada (PERC - *passivated emitter and rear cell*) apresentam a tendência de ter cada vez mais participação no mercado, como pode ser visto na Figura 1.4. A primeira descrição desse tipo de célula solar foi publicada em 1989 (BLAKERS et al., 1989), e trazia características que foram importantes para obter alta eficiência. Este tipo de célula solar tem se tornado cada vez mais popular desde a década de 2010 (GREEN, 2015). Em 2019, cerca de 80 % das células PERC produzidas com essa tecnologia foram de silício monocristalino tipo p. A célula solar com emissor passivado e região posterior totalmente difundida (PERT - *Passivated emitter and rear totally diffused*) faz parte da família PERC.

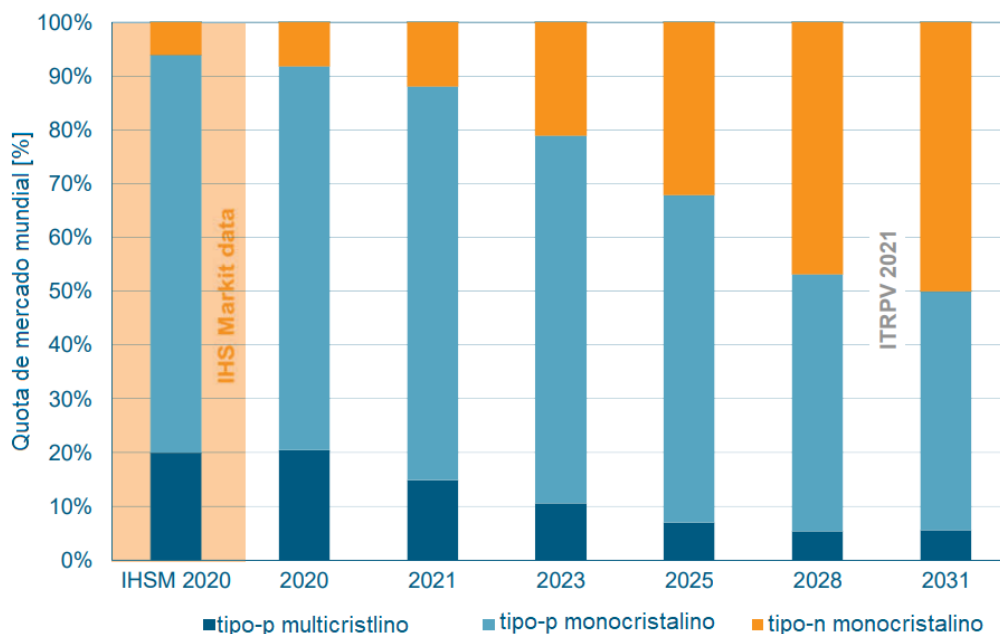


Figura 1.3: Quota de mercado mundial dos tipos de lâminas de silício para fabricação de células solares (ITRPV, 2021).

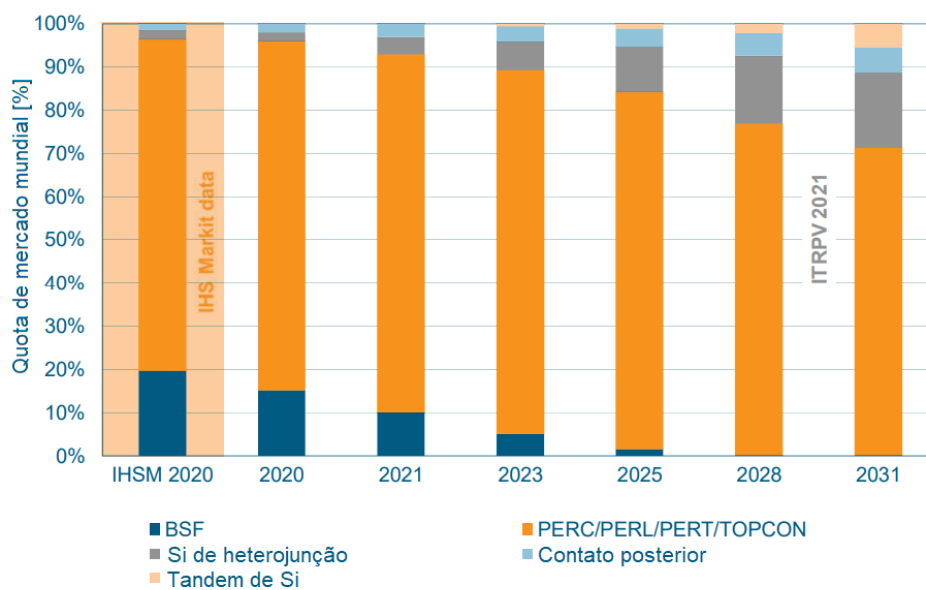


Figura 1.4: Quota de mercado mundial das tecnologias de fabricação de células solares de Si (ITRPV, 2021)

Hoje a maioria dos módulos fotovoltaicos são monofaciais, ou seja, só recebem radiação solar pela face frontal e a face posterior está revestida com um filme polimérico branco. Células solares bifaciais, que absorvem radiação solar nas duas faces, podem ser usadas para produção de tanto módulos bifaciais quanto de módulos convencionais monofaciais. Em 2020 as células bifaciais representavam cerca de 30%

da quota mundial de mercado, com uma previsão de aumentar para 80% nos próximos 10 anos (ITRPV, 2021).

Com base no exposto acima, pode-se notar que a tendência do mercado são células solares fabricadas em lâminas de silício monocristalino com a estrutura PERC e bifacial.

1.2. Objetivos

Neste contexto, o objetivo desse trabalho é desenvolver células solares bifaciais com estrutura PERT, processadas em lâminas de silício monocristalino tipo p com diferente resistividade de base, e difusão dos dopantes na mesma etapa térmica.

Os objetivos específicos são:

- Otimizar experimentalmente o campo retrodifusor de boro produzido em substratos com diferentes resistividades de base e difusão dos dopantes na mesma etapa térmica, variando a temperatura de difusão de boro.
- Analisar e comparar os parâmetros elétricos das células solares bifaciais produzidas em substratos com diferentes resistividades de base e diferentes temperaturas de difusão de boro.
- Avaliar e comparar a eficiência quântica interna na face com o emissor e com o campo retrodifusor das células solares bifaciais produzidas em substratos com diferentes resistividades de base.

A inovação deste trabalho é desenvolver células solares bifaciais com a difusão de boro e fósforo na mesma etapa térmica, com base na solicitação de patente junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) intitulada “Processo de difusão de dopante tipo p e tipo n em lâminas de silício na mesma etapa térmica” (ZANESCO; MOEHLECKE, 2018). Além da redução de etapas térmicas, também são evitadas etapas de limpezas químicas, reduzindo desta forma, o custo do processo de produção. O desenvolvimento e comparação de células solares bifaciais com diferente resistividade de base é outra contribuição científica deste trabalho.

2. A CÉLULA SOLAR DE SILÍCIO

2.1. Produção e Resistividade Elétrica da Lâmina de Silício Cristalino

2.1.1 Grau de Pureza do Silício para Produção de Células Solares

O silício pode ser classificado pelo seu grau de pureza e pode ser denominado de acordo com a indústria que é empregado. O material com 98% de pureza é o silício de grau metalúrgico (MG-Si), com contaminação de carbono, alcalinos-terrosos e metais de transição (PIZZINI, 2010).

O silício policristalino, após o processo de purificação, utilizado na indústria de células solares apresenta uma pureza de 99,9999%, também denominada de 6N (seis noves), enquanto o silício de grau eletrônico (EG-Si) utilizado na indústria de microeletrônica tem pureza de 99,9999999%, ou seja, 9N de pureza (MAURITS, 2014). Para se atingir esse nível de pureza no silício, o material precisa ser purificado. O silicato é reduzido para produzir MG-Si e após é submetido a um processo de purificação para produzir EG-Si.

A sílica (SiO_2) em forma de quartzo é utilizada como matéria prima do MG-Si. Idealmente a sílica possui concentrações baixas de ferro, alumínio e outros metais. A sílica é reduzida através de uma reação com carbono em forma de carvão fundido em um forno a 1500 - 2000 °C.

Dentre os diferentes métodos de purificação, no processo Siemens o MG-Si em pó é colocado em um reator de leito fluidizado para reagir com HCl a 300 °C. Durante essa reação as impurezas reagem formando haletos. O SiHCl_3 formado possui um ponto de ebulição muito baixo de 31,8 °C e é, então, destilado para ser purificado. Finalmente, o SiHCl_3 puro reage com H a 1100 °C por 200 a 300 horas para produzir silício de alta pureza. Esse processo foi primeiramente desenvolvido pela empresa Siemens nos anos 60 e é comumente denominado de processo Siemens (BOWDEN e HONSBURG, 2021).

2.1.2 Métodos de Crescimento de Silício Cristalino para Fabricação de Células Solares

O silício e outros materiais semicondutores cristalinos utilizados para a fabricação de células solares também podem ser classificados de acordo com seus tamanhos de grãos (BASORE, 1994). Materiais que apresentam somente um grão são chamados de monocristalinos. Materiais com grãos entre 1 mm e 10 cm são denominados de multicristalinos, entre 1 μm e 1 mm são policristalinos e menores que 1 μm são microcristalinos. Os materiais também podem ter estrutura amorfa, sem nenhum grau de cristalinidade.

O método mais usado para a fabricação de lâminas de silício monocristalino para a indústria de células solares e a indústria de microeletrônica é o método Czochralski (Cz), que resulta em um lingote de silício monocristalino.

O processo inicia com uma semente do cristal, colocada em um cadinho de quartzo com silício fundido na temperatura um pouco acima do ponto de fusão e o dopante é adicionado. Controlando a temperatura e a velocidade com que a semente é puxada, é possível crescer lingotes com um único cristal de diferentes tamanhos. Devido ao movimento de rotação durante o processo de crescimento, o lingote tem formato cilíndrico.

As lâminas de silício monocristalino produzidas com o método Czochralski (Si-Cz) contém uma concentração de oxigênio e carbono, que diminui o tempo de vida dos portadores de carga minoritários, diminuindo assim a tensão elétrica, a corrente elétrica e a eficiência das células solares. Ainda o oxigênio e seus complexos com outros elementos podem se tornar ativos a altas temperaturas (GLUNZ, 2001).

As lâminas de silício também podem ser fabricadas pelo método da fusão zonal flutuante (Si-FZ). Nesse processo, uma região do lingote de silício policristalino é fundida por uma bobina que se desloca ao longo do material lentamente. Neste método, as impurezas tendem a ficar na região fundida, assim purificando o silício conforme a passagem da bobina. Pela dificuldade de crescimento de grandes lingotes com esse processo e pelo alto custo de produção, lâminas de Si-FZ são tipicamente

utilizadas para células solares de laboratório e na indústria de dispositivos de potência e sensores de radiação.

Técnicas para a produção de silício multicristalino são mais baratas do que aquelas para produzir lingotes de silício monocristalino. Porém, a qualidade do silício multicristalino é menor devido à presença de contornos de grão, que induzem regiões de recombinação devido à novos níveis de energia introduzidos na banda proibida. As discordâncias também diminuem o tempo de vida dos portadores de carga minoritários. Impurezas metálicas também são centros de alta recombinação de portadores de carga minoritários (DÍAZ, 2002).

O processo de produção de silício multicristalino consiste em colocar em um cadinho silício purificado e fundi-lo por indução. Após o silício ser fundido, o recipiente é resfriado lentamente em uma determinada direção para a formação de cristais nesta direção. Controlando a variação de temperatura é possível criar cristais maiores.

2.1.3 Resistividade Elétrica da Lâmina de Silício

O silício cristalino é um material semicondutor de banda proibida de energia indireta. Este semicondutor pode ser dopado com impurezas para ter suas características elétricas modificadas, podendo as impurezas dopantes serem inseridas por diversos métodos.

O átomo de Si possui 4 elétrons de valência que se ligam aos átomos vizinhos. Quando for introduzido um átomo com 5 elétrons de valência (como fósforo), como ilustra a Figura 2.1-a, haverá um elétron fracamente ligado ao átomo, que com pouca energia térmica salta para a banda de condução. Neste caso, o silício é chamado de semicondutor tipo n. Quando for introduzido um átomo com 3 elétrons de valência (como o boro ou alumínio), como mostra a Figura 2.1-b, haverá uma lacuna que, com pouca energia térmica, um elétron pode ocupar o seu lugar, deslocando-se na rede cristalina. Neste caso, o silício é chamado de semicondutor tipo p (ABERLE, 2000).

A dopagem de um semicondutor está diretamente relacionada com a resistividade elétrica do material. A resistividade (ρ) é o inverso da condutividade (σ) e é definida pela quantidade de elétrons (n) e lacunas (p) no material, como representa a Equação 2.1 (ZEGHBROECK, B. V., 2011):

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q(n\mu_n + p\mu_p)} \quad (2.1)$$

onde q é a carga de um elétron, μ_n é a mobilidade dos elétrons e μ_p é a mobilidade das lacunas.

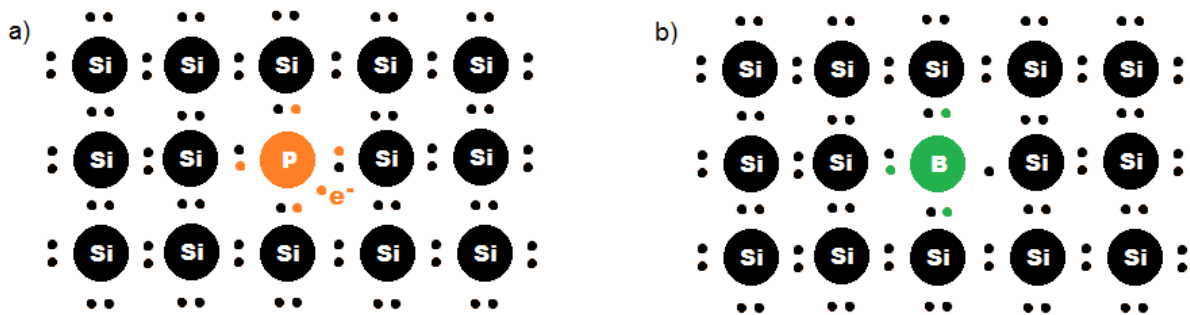


Figura 2.1: Esquema demonstrando a dopagem do silício: a) tipo n e b) tipo p (J.M.K.C. DONEV ET AL, 2020).

Na Figura 2.2 mostra-se a variação da resistividade de base do silício em função da concentração do dopante. Nota-se que se durante o crescimento o silício é dopado com fósforo sua resistividade será menor que se for dopado com boro, considerando a mesma quantidade de átomos do dopante. Este resultado ocorre porque a resistividade elétrica é inversamente proporcional a mobilidade dos portadores de carga, e a mobilidade dos elétrons é maior que a das lacunas.

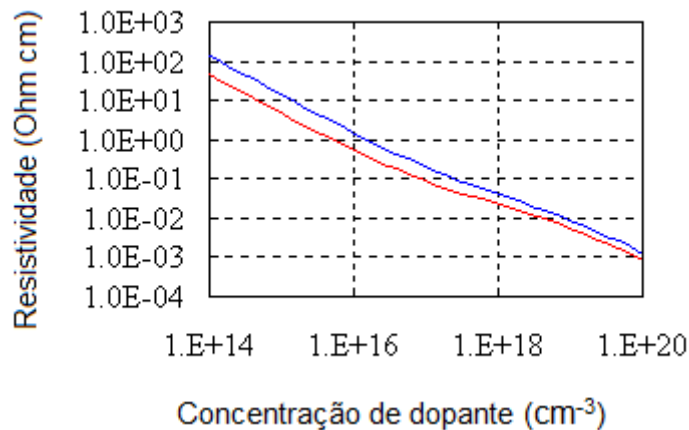


Figura 2.2: Resistividade de base em função da dopagem em silício cristalino. A curva azul representa o Si tipo p e a curva vermelha o Si tipo n (ZEGHBROECK, B. V., 2011).

2.2. Princípio de Funcionamento da Célula Solar

A célula solar é um dispositivo capaz de absorver a radiação solar e, segundo a energia do fóton, pode excitar um elétron para um nível mais alto de energia e ter probabilidade para ser separado pela junção pn e coletado em um circuito externo.

A junção pn é formada na interface desses dois tipos de semicondutor e forma-se uma região de cargas elétricas positivas fixas do lado n pelos átomos terem perdido os elétrons, e de cargas elétricas negativas no lado p. Essas cargas elétricas fixas geram um campo elétrico oposto à difusão inicial dos portadores de carga, impedindo que os portadores de carga majoritários atravessem essa região, que é conhecida como região de depleção (BOWDEN e HONSBURG, 2021).

Especificamente, o par elétron-lacuna é gerado quando um fóton incidente tem energia maior que a energia da banda proibida. Os portadores de carga minoritários podem se recombinar antes de serem separados pelo campo elétrico. Se o portador minoritário for coletado pela junção pn, significa que ele passa para o outro lado da junção, se tornando um portador majoritário. Os contatos elétricos na célula solar coletam os portadores de carga e elétrons podem circular em um circuito externo.

As células solares fabricadas na indústria apresentam menor eficiência que os limites teóricos, devido a mecanismos de perdas. Algumas perdas podem ser descritas como de natureza óptica. Uma lâmina de silício polida reflete cerca de 30% da radiação solar incidente. Para reduzir esse valor é feita uma texturação da superfície por ataque químico e depositado um filme antirreflexo. Devido a necessidade de fazer o contato elétrico, forma-se uma malha metálica que bloqueia de 5% a 8% da radiação solar incidente. Se a célula solar não for espessa o suficiente, parte da radiação incidente não é absorvida e passa pelo material. Portanto, o material determina a espessura mínima do dispositivo semicondutor. Semicondutores de banda indireta precisam de material mais espesso que aqueles de banda direta (GREEN, 1998).

Qualquer defeito ou impureza em um semicondutor promove recombinação dos portadores de carga minoritários. Estes defeitos estão localizados tanto no volume quanto na superfície do silício. A densidade de defeitos no volume pode ser reduzida utilizando métodos de crescimento de Si adequados. Como a superfície representa a

maior perturbação da simetria da rede cristalina, devido às ligações não completas ilustradas na Figura 2.3, ela pode representar uma região das células solares com alta recombinação.

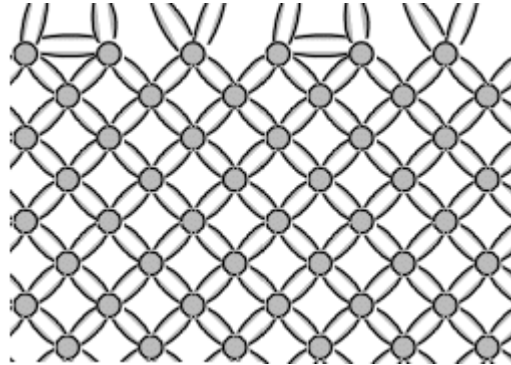


Figura 2.3: Ruptura da rede cristalina na superfície de um material semiconductor. Adaptado de Bowden e Honsberg (BOWDEN e HONSBURG, 2021).

A recombinação dos portadores de carga minoritários na superfície pode ter um impacto significativo na corrente de curto-circuito e na tensão do circuito aberto. Alta taxa de recombinação na superfície frontal tem um impacto particularmente prejudicial na corrente de curto-circuito, uma vez que a superfície frontal também corresponde à região de maior geração de portadores de carga na célula solar. A redução da recombinação na superfície frontal é tipicamente realizada reduzindo o número de ligações incompletas na superfície usando uma camada de "passivação" nessa superfície, que também pode produzir a passivação por ação de campo elétrico.

A passivação das superfícies das células solares de silício cristalino pode ser implementada com diferentes técnicas e materiais para formar filmes finos (RAHMAN; KHAN, 2012). Pode-se citar como os materiais mais usados atualmente o nitreto de silício, o dióxido de silício, o dióxido de titânio, o óxido de alumínio, entre outros (ZANESCO, 2017).

Além da passivação, na superfície posterior o campo retrodifusor também contribui para minimizar o impacto da taxa de recombinação, que afeta a tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito.

Células solares de silício podem ser produzidas com campo retrodifusor (BSF – *back surface field*), que consiste em uma região mais dopada próxima à superfície posterior da célula solar. Na interface entre a região mais dopada e menos dopada forma-se um campo elétrico. Desta forma, introduz-se uma barreira ao fluxo de portadores de carga minoritários para a superfície posterior, que contribui para

manter a concentração de portadores minoritários em níveis mais altos no volume do dispositivo e o BSF tem um efeito de passivação na superfície posterior (FOSSUM, 1977).

Para formar a região altamente dopada n^+ e p^+ nas células, é necessário fazer a difusão dos dopantes na lâmina de Si. Os métodos mais utilizados para a difusão de boro em células solares são o processamento térmico rápido (RTP) e a difusão a partir de fontes dopantes líquidas como o BBr_3 e o BCl_3 . Sendo que o método mais utilizado para a formação do emissor p^+ é a difusão de boro a partir do dopante BBr_3 em fornos com tubo de quartzo convencionais (Chen, 2008).

Outras técnicas também são utilizadas para a deposição de boro ou de fósforo, tais como *spray*, *spin-on*, serigrafia, entre outras. Para a difusão de fósforo, o método mais utilizado é com $POCl_3$ em forno com tubo de quartzo (GHEMBAZA; ZERGA; SAÏM, 2012).

Este trabalho foi desenvolvido com difusão de B e de P na mesma etapa térmica, gerando redução de etapas do processo.

2.3. Células Solares da Família PERC

O primeiro artigo descrevendo uma célula com a estrutura PERC foi publicado em 1989 (GREEN, 2015). A estrutura combinava três características no esquema de contato posterior que se mostraram importantes para a obtenção de alta eficiência. Elas eram a redução de recombinação na face posterior combinando a passivação da superfície com material dielétrico, a diminuição da área de contato entre metal e semicondutor e o aumento da reflexão da superfície posterior (BLAKERS et al., 1989).

As células solares PERC se diferem das células solares com campo retrodifusor de alumínio, pois nestas a face posterior não é passivada e o contato elétrico é colocado diretamente sobre o silício. Por outro lado, nas células PERC tanto a face frontal quanto a posterior são passivadas com materiais dielétricos, e pequenos furos são feitos com laser no dielétrico para que o contato metálico seja realizado no dispositivo, melhorando a eficiência pela diminuição da recombinação de portadores de carga minoritários.

A família PERC inclui, a estrutura PERT, que são células solares que possuem o emissor e o campo retrodifusor passivados e o campo retrodifusor em toda

a face posterior, a célula solar com emissor passivado e difusão posterior localizada (PERL - *passivated emitter and rear locally diffused*), a célula solar com emissor passivado e junção flutuante posterior (PERF - *passivated emitter rear floating-junction*), entre outras. Na Figura 2.4 podem ser vistas as diferenças entre as estruturas PERC e PERT.

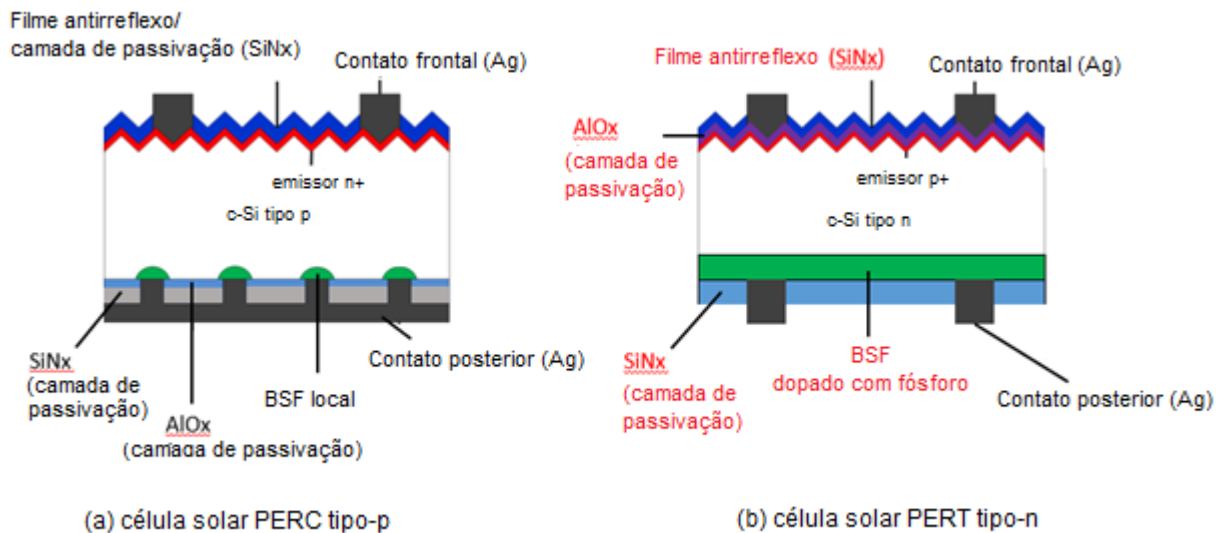


Figura 2.4: Diferença entre uma célula solar PERC tipo p e uma PERT tipo n.

Adaptado de (CHAN, 2019).

2.4. Células Solares Processadas com Redução de Etapas

O processo de difusão simultânea de boro e de fósforo, também denominado de codifusão, traz benefícios na fabricação de células solares.

Alguns autores (ROTHHARDT et al., 2013) discutem a importância de reduzir as etapas térmicas por meio da codifusão, como a redução de complexidade e custo para a fabricação em nível industrial. Os autores utilizaram um processo de difusão simultânea para os dopantes boro e fósforo por meio de fontes sólidas. Através da técnica de deposição química a vapor assistida por plasma (PECVD - *plasma-enhanced chemical vapor deposition*) foi depositado silicato de fósforo em uma face e silicato de boro no outro lado de uma lâmina de Si-Cz tipo n. Após a difusão, os silicatos dopados foram removidos em uma solução de ácido fluorídrico. Obtiveram a eficiência de 17,2 %.

Outro método foi apresentado (ROTHHARDT et al., 2014) de codifusão de boro e fosforo em lâminas de Si monocristalinas tipo n, pseudoquadradas com 156 mm

de lado e resistividade de base de 3 a 6 Ω .cm. Para produzir o emissor de boro, foi depositado silicato de boro (BSG) por APCVD (*atmospheric pressure chemical vapor deposition*) após a texturação, que foi coberto com SiO_x. Em seguida, as lâminas de Si foram inseridas em forno com tubo de quartzo onde foi implementado o processo de codifusão com POCl₃ para formar o BSF. A quantidade de boro no BSG foi definida pela vazão de diborano durante a deposição do filme. Foi obtida a eficiência de 19,2 % com iluminação pela face frontal. Não foi mencionada a eficiência na outra face.

Wei e co-autores (WEI et al., 2017) desenvolveram células solares bifaciais tipo-n com estrutura PERT com processo de codifusão de boro e fósforo. Foram obtidos resultados de 20,4 % de eficiência com irradiância incidente no emissor e de 18,3 % com iluminação no BSF. A estrutura bifacial da célula solar PERT é beneficiada com a reflexão da radiação difusa na face posterior, aumentando a potência. Nesse artigo, os processos de fabricação do emissor frontal e do BSF foram integrados em um só passo pelo método da codifusão. Uma camada densa de pasta de silicato de boro (BSG) foi formada por *spin-on*. Após, o fósforo foi difundido, por um método não especificado, juntamente com o boro. Esse método de fabricação é uma rota para a redução de custos e aumento de produtividade. Houve um aumento na eficiência média de 0,25 % (absoluto) comparado com o processo de difusão em duas etapas. Os resultados de densidade de corrente elétrica indicam que a perda total por recombinação na célula é menor comparada com o processo de difusão em duas etapas. O processo de codifusão é apresentado como uma possível alternativa para a fabricação em massa das células n-PERT.

2.5. Células Solares Bifaciais

As células solares bifaciais absorvem simultaneamente os fótons incidentes na superfície frontal e posterior do módulo fotovoltaico (GUERRERO-LEMUS, 2016). No entanto, as células solares monofaciais somente absorvem os fótons na face frontal do dispositivo. Cuevas e co-autores (CUEVAS et al., 1982) demonstraram que um aumento de 50% na produção de energia elétrica pode ser obtido absorvendo simultaneamente a radiação solar vinda da abóbada celeste e do albedo por meio de um dispositivo que aumenta a radiação do albedo. Por suas características, as células solares bifaciais podem aumentar a densidade de potência dos módulos fotovoltaicos, se comparadas com as células monofaciais e reduzir a relação da área por potência

de sistemas fotovoltaicos. Outra vantagem adicional das células solares bifaciais é a diminuição da temperatura de funcionamento da célula e o aumento correspondente da potência, devido à ausência de alumínio na face posterior (CUEVAS et al., 1982).

A bifacialidade pode ser definida como a razão entre a eficiência medida na face posterior (de menor eficiência) e na face frontal (de maior eficiência), considerando a mesma irradiância incidente em cada face e está representada na Equação 2.2. Alguns pesquisadores também definem a bifacialidade como a razão entre a corrente de curto-circuito medida na face posterior (de menor eficiência) pela corrente de curto-circuito medida na face frontal.

$$Bifacialidade = \left[\frac{\eta_{posterior}}{\eta_{frontal}} \right] \quad (2.2)$$

Devido aos efeitos da irradiação solar incidente nas faces frontal e posterior, as características elétricas das células bifaciais operando sob uma iluminação real, não são necessariamente iguais a soma das características monofaciais da face frontal e posterior (Ohtsuka, et al, 2001). Portanto, seria necessário um sistema de teste com iluminação frontal e posterior simultânea. Uma alternativa é a medição da eficiência das células solares bifaciais independentemente com irradiância em cada uma das faces, mantendo a outra face no escuro (Liang, et al, 2018).

Para facilitar a comparação de dispositivos bifaciais, métodos de medição padronizados estão sendo discutidos. Especificações técnicas da IEC 60904-1-2 foram publicadas introduzindo dois métodos de medição para células solares e módulos fotovoltaicos bifaciais. O primeiro modo consiste em iluminar as duas faces simultaneamente com uma irradiância de 1000 W/m². O segundo método, da irradiância equivalente (G_E), consiste em incidir irradiância somente na face frontal, com uma irradiância maior que 1000 W/m², para considerar a contribuição que incidiria na face posterior.

O método de desempenho em baixa irradiância consiste em diminuir a irradiância na face frontal para menos que 1000 W/m² e incidir irradiância na face posterior com 10% e 20% da irradiância frontal. Calculando da seguinte forma:

$$G_E = G_{Frontal} + \phi * G_{Posterior} \quad (2.3)$$

Onde ϕ é o menor valor entre a razão da I_{sc} com irradiância na face frontal pela I_{sc} com iluminação na posterior (Rauer, et al., 2020).

Vários fatores influenciam na potência produzida por módulos fotovoltaicos bifaciais. Esses incluem a tecnologia das células solares bifaciais utilizada, as condições meteorológicas e geográficas, tais como posição do Sol, presença de sujeira, sombreamento e albedo entre outras e informações da instalação, como orientação, inclinação, distância entre as fileiras e elevação dos módulos em relação ao solo (Gu, et al., 2020).

Simulações computacionais de células solares bifaciais mostraram que a bifacialidade é reduzida com o aumento da concentração do dopante na base (N_B), ou seja, com a redução da resistividade de base (MOEHLECKE et al., 1995). Um valor de N_B maior implica em um menor comprimento de difusão dos portadores de carga minoritários e a consequente redução da bifacialidade. Os resultados experimentais concordaram com as simulações para substratos com alta resistividade de base. Também concluíram que a bifacialidade é menor para células solares de Si tipo p, por causa do menor valor do tempo de vida dos portadores de carga minoritários na base e da maior recombinação na superfície com campo retrodifusor pp^+ .

Em outro estudo (RAINA, SINHA, 2020), por meio de simulação, foram comparadas células solares PERC bifaciais com monofaciais em regiões com diferente albedo. O resultado mostrou que as células bifaciais produzem uma maior densidade de corrente de curto-circuito e potência comparadas com as monofaciais, como mostra a Figura 2.5, foi considerado que a face posterior recebeu 50% da irradiação equivalente que a face frontal.

Zhang e coautores (ZHANG et al., 2020) apresentaram uma célula solar bifacial base p, com estrutura PERC, emissor seletivo e eficiência de 22% quando iluminada pelo emissor e de 15% com irradiância no BSF. Utilizaram uma lâmina de silício monocristalino com área de 242,21 cm². Após a difusão de fósforo para formar o emissor, a lâmina de silício foi submetida à radiação laser na região onde foram depois depositados os contatos metálicos. Com isso, a resistência de folha das regiões menos dopadas e das mais dopadas foi de 130 e 85 Ω/sq , respectivamente. Na face com o BSF foi depositada, pelo método de camadas atômicas, um filme de

Al_2O_3 e, para formar o filme antirreflexo, foi depositado um filme fino de SiN_x nas duas faces. Para chegarem nesse resultado foram otimizadas a potência do laser, a largura, altura e posição dos contatos metálicos, e a espessura do filme antirreflexo.

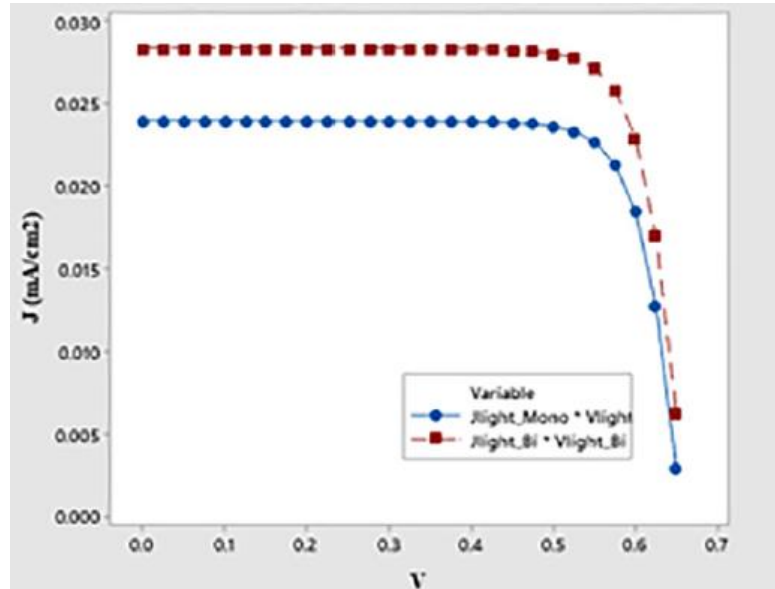


Figura 2.5: Comparação das curvas J-V de células monofaciais (círculos azuis) e bifaciais (quadrados vermelhos) (RAINA, SINHA, 2020)

Foram produzidas células bifaciais tipo n com a difusão de boro e fósforo em uma mesma etapa térmica e com emissor frontal seletivo (YI et al., 2020). Foram utilizadas lâminas de silício tipo n pseudo quadradas de 156,75 mm de lado com a resistividade de base variando entre 1 e 5 $\Omega\cdot\text{cm}$. Para formar o emissor, a camada de silicato de boro foi depositada por APCVD. Após, uma camada de 60 nm de SiO_2 também foi depositada também por APCVD, para proteger a face na qual foi realizada a difusão de boro durante a difusão de fósforo. Na outra face foi depositado por APCVD o silicato de fósforo. Após, as lâminas foram inseridas em um forno para realização da difusão, sendo otimizado o tempo e a temperatura para a difusão dos dopantes na mesma etapa térmica. Foi realizado tratamento com laser para formar o emissor seletivo. Obtiveram uma eficiência com iluminação no emissor de 22 %. Não foi mencionada a eficiência da face posterior.

3. METODOLOGIA

3.1. Processo de Produção das Células Solares Bifaciais

O processo de fabricação de células solares utilizado nesse trabalho, com difusão de boro e fósforo na mesma etapa térmica, está vinculado a solicitação de patente intitulada “Processo de difusão de dopante tipo p e tipo n em lâminas de silício na mesma etapa térmica”, com o número do registro: BR1020180085760 (ZANESCO; MOEHLECKE, 2018). Na Figura 3.1, o processo de produção de células solares é apresentado e comparado com o processo padrão com BBr_3 (Figura 3.1.a) e com o processo com deposição de líquido com boro por *spin-on* e difusão de boro e oxidação na mesma etapa térmica (Figura 3.1.b) (ZANESCO; MOEHLECKE, 2012). Da Figura 3.1 pode-se notar que com o processo com difusão de boro e fósforo na mesma etapa térmica, há a redução de quatro etapas, se comparado com o processo com BBr_3 .

Conforme resume a Figura 3.1.c, para desenvolver as células solares, as lâminas foram submetidas as seguintes etapas de processamento: texturação, limpeza química RCA, deposição do líquido com boro PBF20 por *spin-on*, difusão de boro e difusão de fósforo a partir de $POCl_3$ na mesma etapa térmica, oxidação, deposição do filme antirreflexo (AR), deposição das malhas metálicas por serigrafia, queima das pastas metálicas e isolamento nas bordas com radiação laser. O processo foi desenvolvido a partir de resultados anteriores obtidos para células solares monofaciais (ZANESCO; MOEHLECKE, 2016).

3.2. Características das Lâminas de Silício

Para desenvolver experimentalmente o processo de fabricação de células solares foram utilizadas lâminas de silício monocristalino crescido pela técnica Czochralski, tipo p, grau solar, orientação dos planos cristalinos $\langle 100 \rangle$, com diferente resistividade elétrica de base, produzidas pelo fabricante A (Longi) e fabricante B (Amex).

No Quadro 4.1 comparam-se algumas características das lâminas de Si utilizadas nesse trabalho e produzidas pelo Fabricante A e pelo Fabricante B. Os substratos fornecidos pelo fabricante A possuem espessura de $(180 \pm 20) \mu\text{m}$, são

pseudoquadrados com 156 mm de aresta e resistividade de base de 0,8 Ω .cm a 2,6 Ω .cm. Para este trabalho, as lâminas foram cortadas com radiação laser em 4 partes iguais para desenvolver células solares com área de 57,87 cm^2 . As lâminas de silício adquiridas do fabricante B possuem espessura de (200 ± 30) μm , diâmetro de $(100 \pm 0,5)$ mm e resistividade de base variando de 1 Ω .cm a 20 Ω .cm. As células solares processadas com os substratos do fabricante B são pseudoquadradas com área de 61,58 cm^2 .

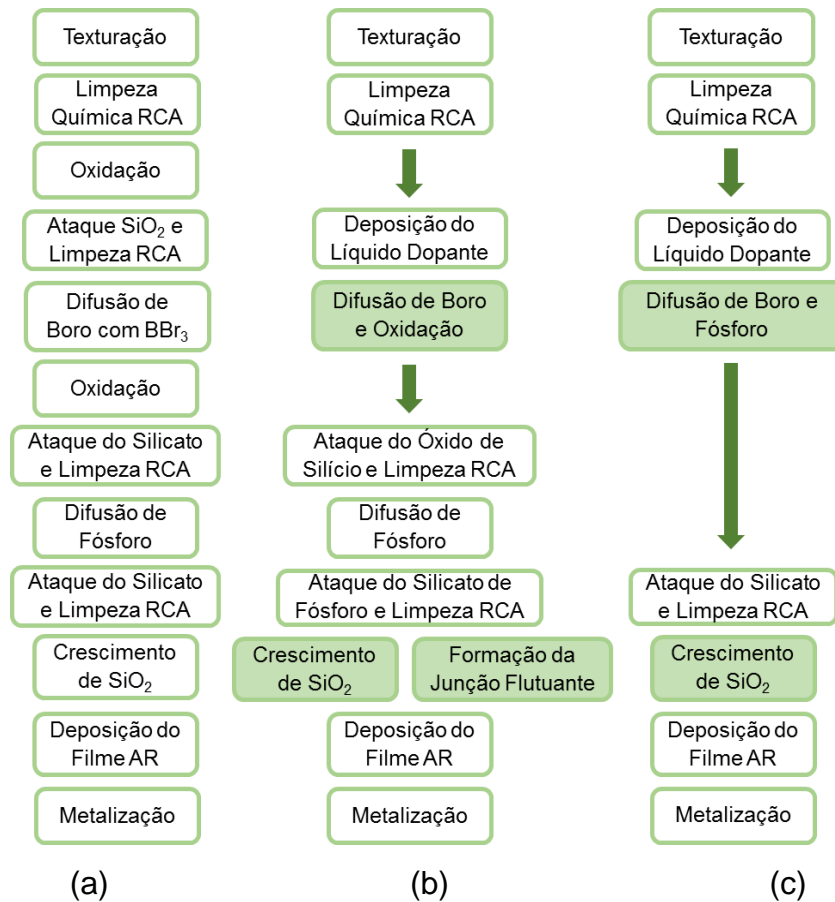


Figura 3.1: Etapas do processo de fabricação de células solares para o (a) processo padrão com BBr₃, (b) processo com deposição de líquido com boro por *spin-on* e difusão de boro e oxidação na mesma etapa térmica e (c) processo utilizado nesse trabalho, com difusão de boro e fósforo na mesma etapa térmica (CRESTANI, 2021).

A principal diferença entre elas está na resistividade de base e no tempo de vida dos portadores de carga minoritários. Outra diferença está nas dimensões das lâminas de Si. As lâminas do fabricante B são circulares com 4 polegadas de diâmetro, nas quais desenvolveram-se células solares pseudoquadradas com 61,58 cm^2 de área. Para desenvolver células solares com área próxima destas, as lâminas de Si do fabricante A foram cortadas e produziram-se células solares com 57,87 cm^2 de área.

Na Figura 3.2 mostra-se a célula solar bifacial desenvolvida com lâminas de Si do fabricante A e do Fabricante B.

Quadro 3.1 Características das lâminas de silício utilizadas nesse trabalho e fornecidas pelo fabricante A fabricante B.

Característica	Fabricante A	Fabricante B
Método de crescimento	Cz	Cz
Cristalinidade	Monocristalino	Monocristalino
Dimensões	Pseudoquadrada 156,75 mm x 156,75 mm	Circular Diâmetro: 4 pol.
Tipo de semiconductor	Tipo p	Tipo p
Dopante	Boro	Boro
Orientação da superfície	<100>	<100>
Resistividade	0,8 – 2,6 Ω .cm	1 – 20 Ω .cm
Tempo de vida dos portadores minoritários	> 20 μ s	~ 40 μ s (PINTO, 2012)
Espessura	180 μ m	200 μ m

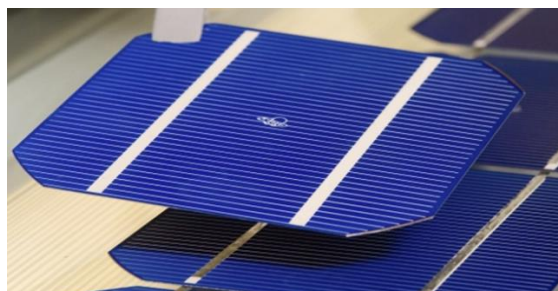


Figura 3.2: Célula solar bifacial desenvolvida em lâminas de silício (a) do fabricante A com resistividade de base de 0,8 Ω .cm a 2,6 Ω .cm e (b) do fabricante B com resistividade de base 1 Ω .cm a 20 Ω .cm.

3.3. Desenvolvimento das Células Solares Bifaciais

Com base em trabalhos desenvolvidos anteriormente (ZANESCO et al., 2018), neste trabalho otimizou-se experimentalmente o campo retrodifusor de boro produzido em substratos com diferente resistividade de base e difusão dos dopantes na mesma etapa térmica. Para isso, variou-se a temperatura de difusão de boro de 940 °C a 970 °C e comparou-se a resistência de folha das regiões altamente dopadas com boro e com fósforo, como ilustra a Figura 3.3, na qual destaca-se a etapa do processo que foi otimizada experimentalmente neste trabalho e as técnicas de caracterização das células solares.

Outro parâmetro de análise foi a comparação dos parâmetros elétricos das células solares bifaciais produzidas em substratos com diferente resistividade de base e temperatura de difusão de boro. Compararam-se as células solares com irradiação monofacial e bifacial, por meio da potência elétrica produzida. Para determinar a potência elétrica com irradiação nas duas faces das células solares (P_{Bifacial}) considerou-se a irradiância de 1000 W/m² na face com o emissor de fósforo (face frontal) e 20 % deste valor (200 W/m²) na face com o campo retrodifusor de boro (menor eficiência) (Yusufoglu et al. 2015). Além disto, se avaliou a bifacialidade dos dispositivos.

Também se analisou e comparou a eficiência quântica interna e a refletância na face com o emissor e com o campo retrodifusor das células solares bifaciais produzidas em substratos com diferente resistividade de base e temperatura de difusão de boro para formar o campo retrodifusor.

As células solares bifaciais desenvolvidas foram comparadas com os resultados alcançados em trabalhos anteriores (CRESTANI, 2021) em lâminas de Si fornecidas pelo fabricante B, com maior resistividade de base, e produzidas com o processo de difusão dos dopantes na mesma etapa térmica. Para isso, avaliaram-se as características elétricas das células solares com irradiância no emissor e no campo retrodifusor.

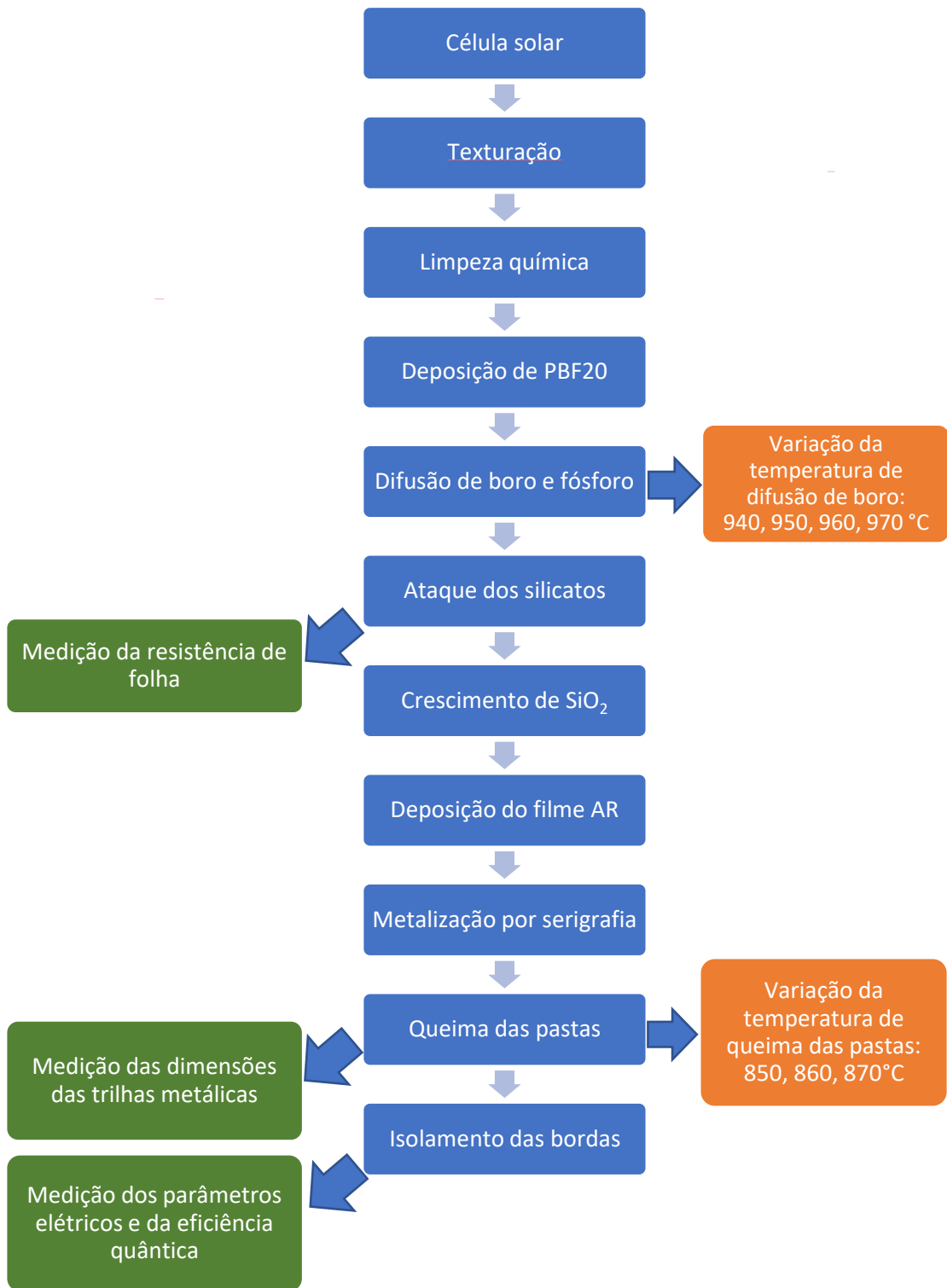


Figura 3.3: Etapas do processo de fabricação das células solares bifaciais desenvolvidas nesse trabalho (em azul), destacando as etapas de otimização experimental (em laranja) e os parâmetros de caracterização (em verde).

3.2. Etapas do Processo de Produção

3.2.1. Texturação

Para diminuir a reflexão das lâminas de silício foi realizada a texturação da superfície. É um processo químico que ataca preferencialmente uma das direções cristalinas, formando micropirâmides de base quadrada que são as intersecções dos planos {111}, as quais são mostradas na Figura 3.4.

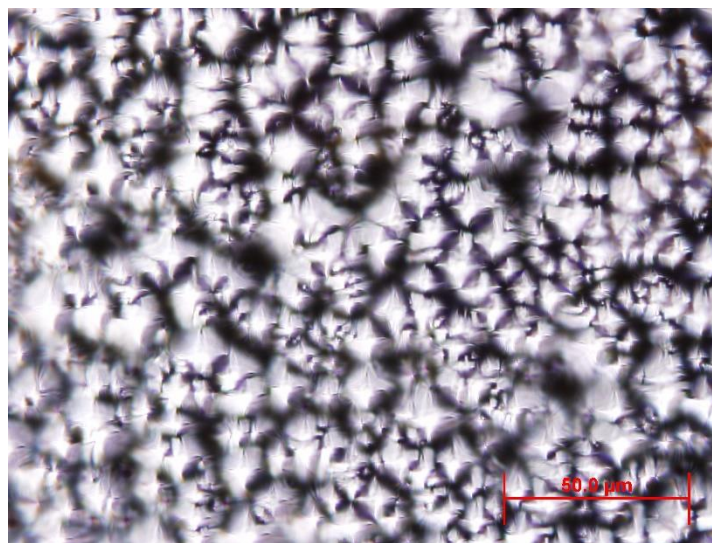


Figura 3.4: Imagem obtida com o microscópio óptico das micropirâmides. Aumento de 100x.

A refletância da superfície é reduzida em média de 30 % para 11 % com o processo de texturação. Os ângulos das pirâmides são definidos pelas orientações dos planos cristalinos, sendo eficazes no aprisionamento da radiação solar em todos os comprimentos de onda em que a célula solar é sensível, incluindo a radiação infravermelha por reflexão interna. Com a texturação, os raios solares incidentes têm pelo menos duas possibilidades de serem absorvidos (GREEN, 1998).

Este é um ataque químico exotérmico em solução de álcool isopropílico, água deionizada e hidróxido de potássio na temperatura de 80 °C a 90 °C, que forma micropirâmides de base quadrada.

3.2.2. Limpezas Químicas

As limpezas químicas têm a função de remover as impurezas indesejáveis na superfície das lâminas, que podem se difundir no silício diminuindo a eficiência das células solares. As limpezas iniciais servem também para tirar os resíduos da texturação.

Para a remoção desses resíduos utilizou-se a solução química denominada RCA2, que é um padrão utilizado na fabricação de dispositivos semicondutores. A solução RCA2 é constituída por: ácido clorídrico, peróxido de hidrogênio e água deionizada. A proporção padronizada é de 1:1:5 e para que ocorra a reação de limpeza e a solução deve atingir e permanecer na temperatura entre 70 °C e 80 °C por um período de 10 minutos.

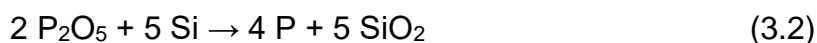
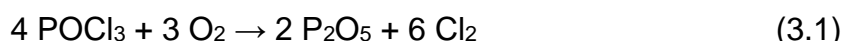
Também foram realizadas limpezas químicas após a difusão de boro e fósforo. Durante a difusão, forma-se o silicato de boro e o silicato de fósforo. Para a remoção desses silicatos, que são indesejáveis para o processo de fabricação de células solares, as lâminas de Si foram imersas em ácido fluorídrico (40%), em seguida enxaguadas com água deionizada e imersas na solução química RCA2.

3.2.3. Difusão do Boro e Fósforo

Para a difusão de boro em silício, em geral, são necessárias altas temperaturas e longos tempos de processamento, a fim de se obter concentrações de átomos dopantes em superfície e profundidade de junção adequadas (MOON, 2009). Para realizar a difusão de boro em uma face da lâmina de silício, foi depositada uma camada de solução líquida contendo boro. A solução utilizada é denominada de PBF20 (da fabricante Filmtronics) e foi depositada pela técnica de *spin-on*. Em seguida, as lâminas foram colocadas em uma estufa à 200 °C por 20 minutos para a evaporação de solventes. Para realizar a difusão do boro, a lâmina de silício foi introduzida no forno com tubo de quartzo e submetida a alta temperatura. Para desenvolver as células solares, variou-se a temperatura de difusão de boro entre 940 °C e 970 °C.

Neste trabalho, o processo de difusão de boro e de fósforo foi realizado em uma única etapa térmica (ZANESCO; MOEHLECKE, 2018) em um forno com tubo de quartzo.

Para a difusão de fósforo, uma vazão de nitrogênio passa pela solução líquida de oxicloreto de fósforo (POCl_3) e arrasta para dentro do tubo de quartzo do forno as moléculas de POCl_3 . A difusão de fósforo foi realizada em $845\text{ }^\circ\text{C}$ (ZANESCO, 2015), (CRESTANI, 2021). Também foi inserido oxigênio que promoveu a oxidação na superfície e a reação química para obtenção do P_2O_5 . As reações químicas que ocorreram com o POCl_3 e a lâmina de silício são apresentadas nas Equações 3.1 e 3.2 (BENTZEN, 2006):



Após a difusão de boro e fósforo, os silicatos formados nas lâminas de silício foram removidos em ácido fluorídrico.

3.2.4. Oxidação

O dióxido de silício pode ser crescido sobre a lâmina de silício por meio de oxidação térmica, para a passivação da superfície frontal e posterior.

A oxidação é realizada em um passo térmico em um ambiente contendo oxigênio, em forno convencional com tubo de quartzo. Para lâminas de Si-Cz tipo p, em trabalhos anteriores foi otimizada experimentalmente a espessura de óxido de silício para uma passivação eficaz e obteve-se o valor de aproximadamente 53 nm na superfície dopada com fósforo e de 10 nm na superfície dopada com boro (ZANESCO; RAZERA; MOEHLECKE, 2017) pois a taxa de crescimento do óxido de silício é maior na superfície dopada com fósforo. A passivação da superfície das lâminas de silício tem a função de completar as ligações rompidas na superfície e desta forma, reduzir a velocidade de recombinação dos portadores de carga minoritários na superfície.

3.2.5. Deposição do Filme Antirreflexo

Com o objetivo de aumentar a eficiência das células solares, foi depositado na superfície frontal e na superfície posterior um filme antirreflexo (AR), que tem a função de diminuir a refletância das células solares. O material utilizado foi o dióxido

de titânio (TiO_2) e foi depositado pela técnica de feixe de elétrons (*e-beam*). A espessura do filme AR na face dopada com fósforo e com boro foi de 25 nm e de 55 nm, respectivamente (ZANESCO et al., 2019), adequadas à espessura da camada de passivação com dióxido de silício.

3.2.6. Metalização por Serigrafia e Queima das Pastas Metálicas

As trilhas metálicas para os contatos elétricos foram feitas depositando uma pasta metálica sobre as lâminas de Si e realizando o processo de queima, após a secagem. As pastas foram depositadas pelo processo de serigrafia. Para o procedimento, utilizou-se o desenho da malha metálica previamente gravado sobre uma tela. A lâmina de silício foi colocada no porta-amostra que fixa a amostra por um sistema a vácuo. Este porta-amostra foi deslocado para baixo da malha e o rodo distribuiu a pasta sobre a lâmina de silício. Os desenhos previamente gravados na malha permitem a deposição da pasta nas regiões permeáveis.

Para cada face foram usadas pastas metálicas diferentes. Na face da lâmina de Si dopada com fósforo foi utilizada a pasta de prata PV19L e na face posterior, dopada com boro, foi utilizada a pasta de alumínio e prata PV3N2. Todas as pastas são produzidas pela DuPont.

Após a deposição da pasta metálica em cada face, as lâminas passaram no forno de esteira, primeiramente para secagem. Após a secagem, as lâminas passaram novamente pelo forno a uma alta temperatura, que foi de 850, 860 e 870 °C, para a queima das pastas metálicas.

3.2.7. Isolamento das Bordas

Por último, as células solares foram levadas para o equipamento de corte a laser, que isola as bordas do dispositivo. Esse procedimento tem o objetivo de evitar o curto-circuito, impedindo que haja alguma forma de contato elétrico entre as faces frontal e posterior pelas bordas dos substratos.

3.3. Métodos de Caracterização

3.3.1. Resistência de Folha

A medição da resistência de folha (R_{SQ}) permite avaliar a dopagem em substratos de silício após o processo de difusão de dopantes. Entretanto, não é possível distinguir regiões altamente dopadas n^+ de regiões p^+ .

A resistência de folha é uma medida utilizada em semicondutores para caracterizar a dopagem. A medição é realizada com o método de quatro pontas, que consiste na aplicação de uma corrente elétrica nos terminais externos e na medição da tensão elétrica entre os terminais internos. A resistência de folha foi medida na face dopada com boro (campo retrodifusor) e na face dopada com fósforo (emissor) em uma amostra para cada processo de difusão. A medição foi realizada em 9 regiões da lâmina de silício do fabricante A e em 13 regiões nos substratos do fabricante B. Após, as medições, calculou-se o valor médio e o desvio padrão.

3.3.2. Dimensões das trilhas metálicas

A largura e a altura das trilhas metálicas depositadas na face frontal e posterior das células solares bifaciais afetam a eficiência. Trilhas metálicas mais largas aumentam o fator de sombra, reduzindo a corrente de curto circuito, e trilhas estreitas aumentam a resistência elétrica do contato metálico, afetando o fator de forma (BOWDEN e HONSBURG, 2021).

As larguras das trilhas metálicas foram estimadas utilizando o microscópio óptico Olympus BX51M, medindo-a em 3 regiões diferentes da malha metálica e realizou-se a média. Para estimar a altura das trilhas metálicas, variou-se o foco da lente entre a superfície da lâmina de silício e a região mais alta da trilha metálica.

3.3.3. Características Elétricas

O principal método para a caracterização elétrica de células solares é a medição da relação entre a corrente elétrica e a tensão elétrica, chamada de curva

I-V. As células solares quando não iluminadas apresentam as características elétricas de um diodo, possuindo uma corrente de saturação no escuro (I_0). Ao iluminar o dispositivo, haverá uma corrente foto gerada (I_L) proporcional à irradiância incidente e, neste modo, a curva I-V é deslocada no eixo da corrente elétrica.

A Equação 3.3 representa a curva I-V de uma célula solar:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] - I_L \quad (3.3)$$

Onde n é o fator de idealidade, k é a constante de Boltzmann, T é a temperatura, q é a carga do elétron e V é a tensão elétrica.

Por convenção, a curva I-V das células solares é invertida, uma vez que estes dispositivos produzem energia elétrica, como ilustra a Figura 3.5.

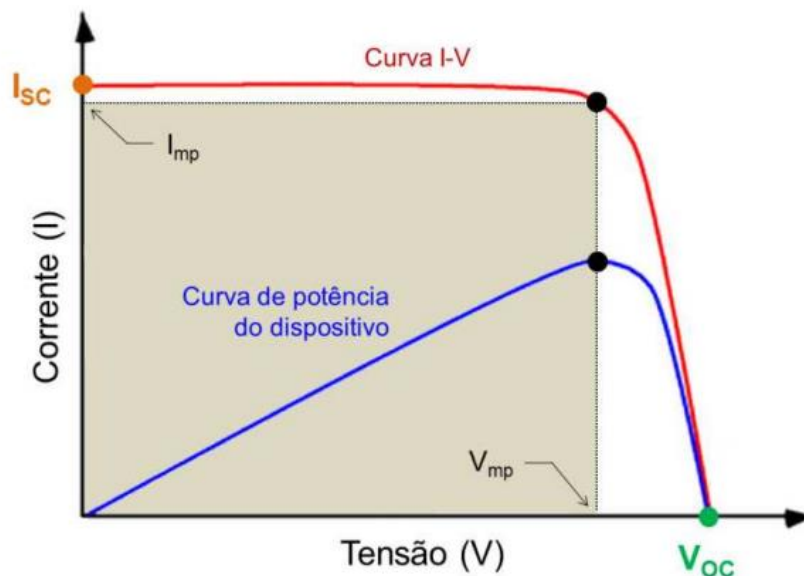


Figura 3.5: Ilustração da curva I-V e de potência de uma célula solar.

A partir da curva I-V, medida em condições padrão, são obtidos os seguintes parâmetros elétricos: corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, fator de forma e eficiência de conversão de energia solar em elétrica.

A corrente de curto-circuito, I_{sc} , é a corrente elétrica da célula solar quando a tensão elétrica é zero. Ela depende de vários fatores, como a quantidade de fótons incidentes, o espectro solar incidente, as propriedades ópticas dos materiais e a área da célula solar. A razão entre a I_{sc} e a área da célula solar é a densidade de corrente

de curto-circuito, J_{sc} . Considerando uma superfície perfeitamente passivada e uma geração uniforme, a J_{sc} é dada por:

$$J_{sc} = qG(L_p + L_n) \quad (3.4)$$

Onde q é a carga do elétron, G é a taxa de geração, L_p é o comprimento de difusão das lacunas e L_n é o comprimento de difusão dos elétrons.

Um segundo parâmetro é a tensão de circuito aberto, V_{oc} , que é a tensão quando a corrente elétrica da célula é zero. A V_{oc} pode ser encontrada igualando a corrente a zero na Equação 3.3:

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (3.5)$$

A Equação 3.5 mostra que a V_{oc} depende da corrente gerada pela radiação solar e da corrente de saturação, que por sua vez depende da recombinação na célula solar.

A potência elétrica de operação em qualquer ponto da célula solar é dada pela multiplicação da corrente e da tensão elétrica naquele ponto. O ponto de máxima potência é determinado pela multiplicação da corrente e a tensão correspondentes ao ponto de máxima potência (I_{mp} e V_{mp}).

Outro parâmetro é o fator de forma, FF , que relaciona os valores de corrente e tensão elétrica no ponto de máxima potência com os máximos valores de corrente e de tensão elétrica. O fator de forma é definido como:

$$FF = \frac{V_{mp}I_{mp}}{V_{oc}I_{sc}} \quad (3.6)$$

Por fim, o parâmetro mais utilizado para comparar células solares é a eficiência de conversão de energia. A eficiência, η , é calculada em função da V_{oc} , I_{sc} e FF como expressa a Equação 3.7:

$$\eta = \frac{V_{oc}I_{sc}FF}{P_{in}} \quad (3.7)$$

Onde P_{in} é a potência da radiação solar que incide na célula solar.

A curva I-V das células solares foi medida utilizando um simulador solar. O simulador solar utilizado para a caracterização elétrica das células solares fabricadas foi o modelo CT150AAA fabricado pela empresa PET - Photo Emission Tech., Inc. O método de medição empregado por este equipamento consiste na iluminação contínua do dispositivo utilizando uma lâmpada de xenônio. Com o auxílio do simulador solar, as células solares desenvolvidas foram caracterizadas eletricamente, medindo-se a curva I-V em condições padrão de medição: espectro solar AM1,5G, irradiância de 1000 W/m^2 e célula solar mantida na temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Utilizou-se uma célula solar padrão para calibrar a irradiância incidente na célula solar a ser caracterizada. Neste trabalho, mediu-se a curva I-V de todas as células solares bifaciais desenvolvidas com irradiância incidente em uma das faces, mantendo-se a outra face no escuro.

3.3.3. Eficiência Quântica

A Eficiência Quântica Externa (EQE) é a razão de portadores de carga (elétrons) que fluem em um circuito externo (em condição de curto-circuito) em relação ao número de fótons incidentes com uma determinada energia (comprimento de onda). Se todos os fótons incidentes fossem absorvidos e seus portadores de carga coletados, a EQE para determinado comprimento de onda seria igual a 1. Para comprimentos de onda com energia abaixo da banda proibida a EQE é zero.

A eficiência quântica diminui por causa dos efeitos de recombinação dos portadores de carga minoritários nas superfícies, na base e no emissor. Quanto maior o comprimento de difusão dos portadores de carga minoritários no emissor e menor a velocidade de recombinação na face frontal, maior a eficiência quântica para baixos comprimentos de onda. A eficiência quântica para os maiores valores de comprimento de onda é maior para elevados comprimentos de difusão dos minoritários na base e baixa velocidade de recombinação na face posterior. A EQE inclui efeitos de perdas ópticas, como transmissão e reflexão (BOWDEN, S.; HONSBURG, C).

A Figura 3.6 apresenta a curva de EQE de uma célula solar e a indicação dos principais fatores de redução da eficiência quântica. Também é ilustrada na Figura 3.3 a eficiência quântica ideal, onde todos os fótons incidentes para cada comprimento

de onda são absorvidos e os portadores de carga resultantes são coletados. Neste caso, considera-se que não há reflexão.

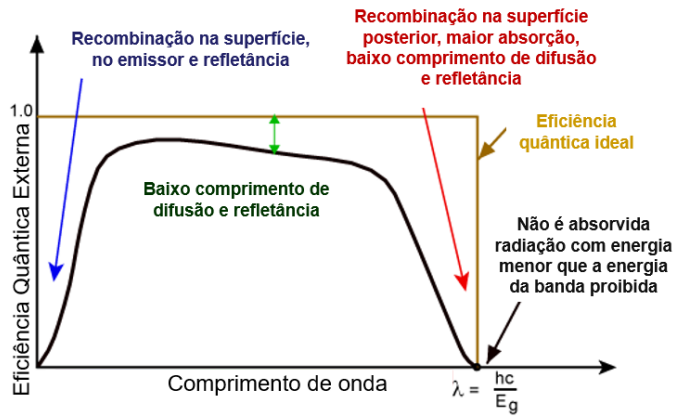


Figura 3.6: Representação da eficiência quântica externa (EQE) de uma célula solar e indicação dos principais fatores de redução. Adaptado de Bowden e Honsberg (BOWDEN, S.; HONSBURG, C).

A EQE pode ser calculada por meio da medição da resposta espectral (RE) que é a razão entre a corrente elétrica gerada e a irradiância incidente, para cada comprimento de onda. A relação entre a RE e a EQE é dada pela Equação 3.8 onde “q” é a carga do elétron, λ é o comprimento de onda, “h” é a constante de Planck e “c” é a velocidade da luz. A RE é dada em A/W, pois é a razão entre a corrente elétrica gerada e a potência da radiação incidente.

$$RE = \frac{q\lambda}{hc} EQE \quad (3.8)$$

A eficiência quântica interna (EQI) representa a eficiência com que os fótons não transmitidos ou refletidos podem gerar portadores de carga coletáveis. A EQI é expressa pela Equação 3.9, na qual ρ_r é a refletância da zona não coberta por metal e F_s é o fator de sombra:

$$EQI(\lambda) = \frac{EQE(\lambda)}{(1 - \rho_r(\lambda))(1 - F_s)} \quad (3.9)$$

4. RESULTADOS E ANÁLISE

4.1. Avaliação da Resistência de Folha

Os valores da resistência de folha média do campo retrodifusor de boro (R_{SQ-BSF}) e do emissor de fósforo ($R_{SQ-Emissor}$) medidas em uma amostra de cada temperatura de difusão de boro nas lâminas de silício com menor resistividade de base (de 0,8 a 2,6 $\Omega.cm$) são mostrados na Tabela 4.1. Para cada temperatura de difusão de boro (T_B) foram realizados dois lotes, denominados de A e B. No intervalo de T_B de 940 °C a 970 °C, o valor médio da $R_{SQ-Emissor}$ e da R_{SQ-BSF} variou de 65 a 86 Ω/sq e de 39 a 50 Ω/sq , respectivamente. Verifica-se que a variação da resistência de folha em diferentes lotes para a mesma temperatura é maior no emissor de fósforo do que no campo retrodifusor de boro. Esta variação foi de até 7 Ω/sq para a $R_{SQ-Emissor}$ e de no máximo de 3 Ω/sq para a R_{SQ-BSF} .

Tabela 4.1. Resistência de folha (R_{SQ}) média do emissor de fósforo ($R_{SQ-Emissor}$) e do campo retrodifusor de boro (R_{SQ-BSF}) em função da temperatura de difusão de boro (T_B). A difusão dos dopantes foi realizada na mesma etapa térmica em lâminas de silício com resistividade de base de **0,8 a 2,6 $\Omega.cm$** .

T_B (°C)	Lote	$R_{SQ-Emissor}$ (Fósforo) (Ω/sq)	$R_{SQ-Emissor}$ (Ω/sq) Média	R_{SQ-BSF} (Boro) (Ω/sq)	R_{SQ-BSF} (Ω/sq) Média
940	A	62 ± 4	65 ± 4	50,8 ± 1,4	50,0 ± 2,2
	B	69 ± 3		49 ± 2,7	
950	A	72 ± 3	73 ± 5	46 ± 1,5	46 ± 2,0
	B	73 ± 6		46 ± 2,4	
960	A	73 ± 4	76 ± 4	44 ± 2,3	42,9 ± 2,1
	B	79 ± 5		43 ± 3	
970	B	86 ± 7	86 ± 7	39 ± 2,0	39 ± 2,0

Na Tabela 4.2 apresentam-se os valores médios da resistência de folha do emissor e do campo retrodifusor para cada processo com diferente temperatura de difusão de boro realizado nas lâminas de silício com maior resistividade de base (de 1 a 20 $\Omega \cdot \text{cm}$). Neste grupo de amostras, a $R_{\text{SQ-Emissor}}$ variou de 65 a 87 Ω/sq e a $R_{\text{SQ-BSF}}$ está no intervalo de 45 a 68 Ω/sq . Nota-se que o desvio padrão é maior na $R_{\text{SQ-Emissor}}$, variando de 3 a 6 Ω/sq . Para a $R_{\text{SQ-BSF}}$, o desvio padrão foi de 1 a 3 Ω/sq . Este resultado está associado ao método de difusão dos dopantes.

Tabela 4.2. Resistência de folha (R_{SQ}) média do emissor de fósforo ($R_{\text{SQ-Emissor}}$) e do campo retrodifusor de boro ($R_{\text{SQ-BSF}}$) em função da temperatura de difusão de boro (T_{B}). A difusão dos dopantes foi realizada na mesma etapa térmica em lâminas de silício com resistividade de base de de **1 a 20 $\Omega \cdot \text{cm}$** .

T_{B} ($^{\circ}\text{C}$)	$R_{\text{SQ-Emissor}}$ (Fósforo) (Ω/sq)	$R_{\text{SQ-BSF}}$ (Boro) (Ω/sq)
940	65 \pm 3	68 \pm 3
950	67 \pm 6	58 \pm 2
960	74 \pm 5	48 \pm 1
970	87 \pm 5	45 \pm 3

A comparação da resistência de folha do campo retrodifusor em função da temperatura de difusão de boro produzida em lâminas de Si com diferentes resistividades de base está mostrada na Figura 4.1. Conforme esperado, para os dois grupos de amostras, a resistência de folha na face dopada com boro diminuiu com o aumento da temperatura de difusão. No entanto, a $R_{\text{SQ-BSF}}$ é menor nas lâminas de Si de menor resistividade de base (ρ_{B}). Por outro lado, como mostra a Figura 4.2, a resistência de folha na face dopada com fósforo aumentou com o aumento da T_{B} . Uma hipótese é que com o aumento da T_{B} ocorreu ou aumentou a difusão de boro na face em que foi realizada a difusão de fósforo no emissor e para a T_{B} menor ou igual a 960 $^{\circ}\text{C}$, a $R_{\text{SQ-Emissor}}$ é maior nas lâminas de Si de menor resistividade de base. Somente, para $T_{\text{B}} = 970$ $^{\circ}\text{C}$ a resistência de folha do emissor de fósforo foi similar nos dois grupos de amostras com diferentes ρ_{B} .

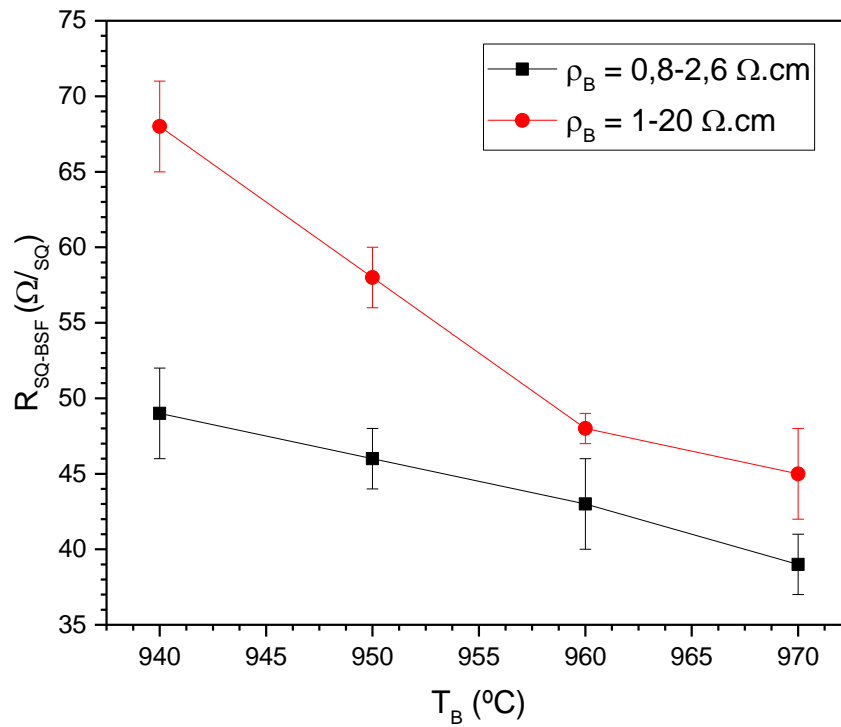


Figura 4.1. Resistência de folha do campo retrodifisor de boro em função da temperatura de difusão de boro em lâminas de silício com diferente resistividade de base.

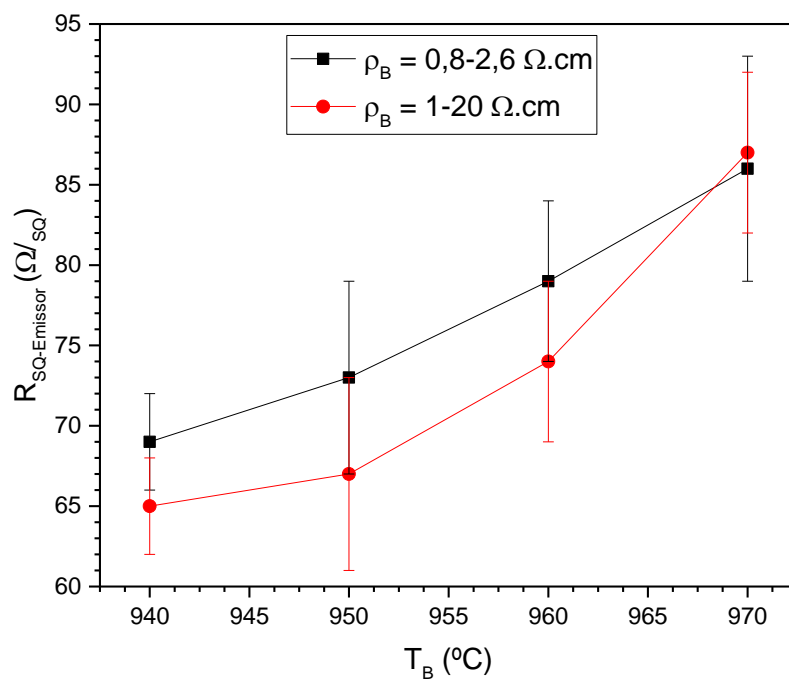


Figura 4.2. Resistência de folha do emissor de fósforo em função da temperatura de difusão de boro em lâminas de silício com diferente resistividade de base.

4.2. Estimativa das Dimensões das Trilhas Metálicas

A estimativa da altura e da largura das trilhas metálicas formadas nas células solares bifaciais com menor resistividade de base (de 0,8 a 2,6 Ω .cm) e com maior resistividade de base (de 1 a 20 Ω .cm) é apresentada na Tabela 4.3 e Tabela 4.4, respectivamente. Nota-se que há variações na largura e na altura das trilhas das malhas metálicas formadas com os dois tipos de pasta em diferentes células solares. A pasta de prata resultou em trilhas com altura menor e maior largura, aumentando o fator de sombra. O aumento na largura das trilhas metálicas aumenta pouco o fator de sombra, de 9% para 10%

Tabela 4.3. Estimativa da altura (H) e da largura (L) das trilhas que constituem a malha metálica de prata no emissor e de prata/alumínio no campo retrodifusor, formada nas células solares bifaciais com resistividade de base de **0,8 a 2,6 Ω .cm**.

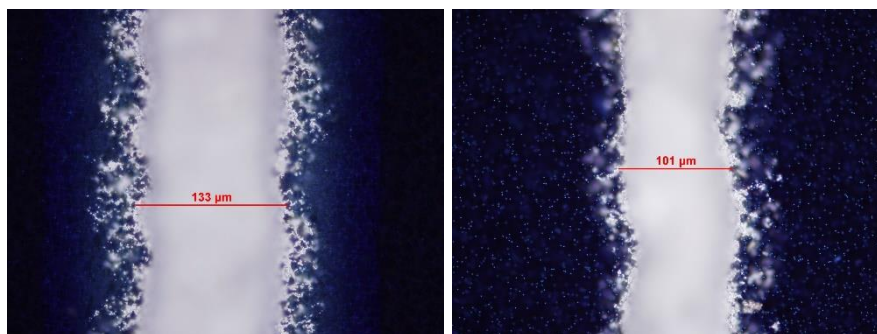
Célula	Emissor de Fósforo Pasta Ag		Campo Retrodifusor de Boro Pasta Ag/Al	
	Altura (H) (μ m)	Largura (L) (μ m)	Altura (H) (μ m)	Largura (L) (μ m)
1	15	137	19	126
3	19	135	14	102
4	16	145	17	111
5	13	129	21	93
6	17	140	19	132
8	22	130	19	128
14	15	123	26	116
13	8	130	22	83
15	13	137	14	91,4
10	12	133	20	101
11	18	126	15	105
12	16	132	16	99
18	17	132	22	118
Média	15 \pm 4	133 \pm 6	19 \pm 4	108 \pm 15

Nas células solares com menor resistividade de base (de 0,8 a 2,6 Ω .cm), o valor médio da altura e da largura das trilhas metálicas formadas com a pasta de

prata foi de $(15 \pm 4) \mu\text{m}$ e de $(133 \pm 6) \mu\text{m}$, respectivamente, enquanto os valores estimados para as trilhas formadas com a pasta de prata/alumínio foram de $(19 \pm 4) \mu\text{m}$ e de $(108 \pm 15) \mu\text{m}$. Para ilustrar, a Figura 4.3 apresenta imagens obtidas no microscópio óptico de uma trilha de prata e uma trilha de prata e alumínio de uma das células solares com menor resistividade de base. Nos dispositivos com maior resistividade de base (de 1 a $20 \Omega\cdot\text{cm}$), cuja espessura da lâmina de Si é um pouco maior, a largura das trilhas com pasta de prata foi um pouco menor, de $(115 \pm 10) \mu\text{m}$, como mostra a Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Estimativa da altura (H) e da largura (L) das trilhas que constituem a malha metálica de prata no emissor e de prata/alumínio no campo retrodifusor, formada nas células solares bifaciais com resistividade de base de **1 a $20 \Omega\cdot\text{cm}$** .

Célula	Emissor de Fósforo Pasta Ag		Campo Retrodifusor de Boro Pasta Ag/Al	
	Altura (H) (μm)	Largura (L) (μm)	Altura (H) (μm)	Largura (L) (μm)
17	15	121	13	101
18	14	103	21	93
11	13	132	23	123
12	18	107	21	104
13	18	115	21	104
14	14	112	21	82
15	9	123	16	112
16	15	109	22	112
Média	15 ± 3	115 ± 10	20 ± 3	104 ± 13



(a)

(b)

Figura 4.3. Trilha da malha metálica (a) de prata no emissor e (b) de prata/alumínio no campo retrodifusor obtida no microscópio óptico, formada nas células solares bifaciais com resistividade de base de 0,8 a $2,6 \Omega\cdot\text{cm}$. Aumento de 50 X.

4.3. Análise e Comparação dos Parâmetros Elétricos

4.3.1. Células Solares Bifaciais com Menor Resistividade de Base

Os parâmetros elétricos das células solares com menor resistividade de base e processadas com diferentes temperaturas de queima das pastas metálicas são mostrados na Tabela 4.5 e Tabela 4.6, com irradiância incidente no emissor de fósforo e no campo retrodifusor de boro, respectivamente. Como mostra a Tabela 4.5, com irradiância no emissor, verifica-se que a temperatura de queima (T_Q) de 860 °C resultou no maior fator de forma médio, de 0,77. Este resultado é observado, nos grupos de células solares processadas com as duas temperaturas de difusão de boro.

Tabela 4.5. Parâmetros elétricos das células solares bifaciais com irradiância no **emissor de fósforo** produzidas com diferentes temperaturas de difusão de boro (T_B) e de queima das pastas metálicas (T_Q), processadas em lâminas de silício com resistividade de base de **0,8 a 2,6 Ω .cm**.

Célula	T_B (°C)	T_Q (°C)	J_{sc} (mA/cm ²)	Voc (mV)	FF	η (%)	
7	940	850	34,30	600,2	0,735	15,1	
8			34,70	600,3	0,738	15,4	
Média			34,50 ± 0,28	600,3 ± 0,1	0,737 ± 0,002	15,3 ± 0,2	
1		860	34,35	597,4	0,775	15,9	
4			34,56	598,0	0,770	15,9	
Média			34,46 ± 0,15	597,7 ± 0,4	0,773 ± 0,004	15,9 ± 0,0	
8		870	34,29	596,9	0,736	14,6	
11		960	850	34,50	596,9	0,693	14,3
12				34,60	601,4	0,701	14,6
13				34,90	602,4	0,703	14,8
14	34,60			599,8	0,717	14,9	
Média			34,65 ± 0,17	600,1 ± 2,4	0,704 ± 0,010	14,7 ± 0,3	
13	860		34,38	599,1	0,736	15,2	
15			34,39	599,8	0,769	15,9	
Média			34,39 ± 0,01	599,5 ± 0,5	0,753 ± 0,023	15,5 ± 0,5	
13	870		34,51	589,3	0,702	14,0	

Da análise da medição dos parâmetros elétricos com irradiância incidente na face com o campo retrodifusor de boro, também se verifica que o maior fator de

forma médio foi obtido com $T_Q = 860 \text{ }^\circ\text{C}$, como mostra a Tabela 4.6. Considerando que a temperatura de queima das pastas metálicas afeta principalmente o fator de forma, constata-se que a T_Q mais adequada é de $860 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tabela 4.6. Parâmetros elétricos das células solares bifaciais com irradiância no **campo retrodifusor** produzidas com diferentes temperaturas de difusão de boro (T_B) e de queima das pastas metálicas (T_Q), processadas em lâminas de silício com resistividade de base de **0,8 a 2,6 $\Omega\cdot\text{cm}$** .

Célula	T_B ($^\circ\text{C}$)	T_Q ($^\circ\text{C}$)	J_{SC} (mA/cm^2)	V_{OC} (mV)	FF	η (%)	
7	940	850	22,20	589,2	0,717	9,4	
8			21,60	587,9	0,716	9,1	
Média			$21,90 \pm 0,42$	$588,6 \pm 0,9$	$0,717 \pm 0,001$	$9,3 \pm 0,21$	
1		860	14,94	577,5	0,771	6,7	
4			14,92	578,2	0,777	6,7	
Média			$14,93 \pm 0,01$	$577,9 \pm 0,4$	$0,774 \pm 0,004$	$6,7 \pm 0,0$	
8			870	22,78	581,1	0,715	9,2
11		960	850	19,00	581,5	0,691	7,6
12				20,50	587,0	0,677	8,1
13				21,50	589,0	0,676	8,6
14	20,30			584,8	0,689	8,2	
Média	$20,33 \pm 1,03$		$585,6 \pm 3,2$	$0,683 \pm 0,008$	$8,1 \pm 0,4$		
13	860		17,59	584,2	0,740	7,6	
15			17,37	584,2	0,774	7,9	
Média			$17,48 \pm 0,16$	$584,2 \pm 0,02$	$0,757 \pm 0,024$	$7,7 \pm 0,2$	
13			870	20,50	574,7	0,685	7,9

Os parâmetros elétricos das células solares bifaciais com menor resistividade de base em função da temperatura de difusão de boro são apresentados na Tabela 4.7 e 4.8 com iluminação no emissor e no BSF, respectivamente. Com irradiância no emissor e no intervalo de T_B de $940 \text{ }^\circ\text{C}$ a $970 \text{ }^\circ\text{C}$, a eficiência média variou de $15,4 \%$ a $15,7\%$. Observa-se que a maior eficiência foi de $16,0 \%$.

A maior eficiência média, de $(15,7 \pm 0,4) \%$, e o maior fator de forma médio, de $(0,760 \pm 0,013)$, foram obtidos com a $T_B = 970 \text{ }^\circ\text{C}$. A tensão de circuito aberto média variou de $(596,2 \pm 2,6) \text{ mV}$ a $(599,4 \pm 0,5) \text{ mV}$, e o maior valor foi medido em dispositivos processados com T_B de $960 \text{ }^\circ\text{C}$ e de $970 \text{ }^\circ\text{C}$. A densidade de corrente de curto-circuito média variou pouco, de $(34,39 \pm 0,01) \text{ mA}/\text{cm}^2$ a $(34,54 \pm 0,23) \text{ mA}/\text{cm}^2$.

Tabela 4.7. Parâmetros elétricos das células solares bifaciais com irradiância no **emissor** em função da temperatura de difusão de boro (T_B), processadas em lâminas de silício com resistividade de base de **0,8 a 2,6 Ω .cm**. A temperatura de queima das pastas de metalização foi de 860 °C.

Célula	T_B (°C)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF	η (%)
1	940	34,35	597,4	0,775	15,9
3		34,39	593,2	0,711	14,5
4		34,56	598,0	0,770	15,9
Média		34,43 ± 0,11	596,2 ± 2,6	0,752 ± 0,036	15,4 ± 0,8
5	950	34,45	600,5	0,769	15,9
8		34,42	596,4	0,726	14,9
14		34,72	597,6	0,763	15,8
Média		34,53 ± 0,17	598,2 ± 2,1	0,753 ± 0,023	15,5 ± 0,6
13	960	34,38	599,1	0,736	15,2
15		34,39	599,8	0,769	15,9
Média		34,39 ± 0,01	599,4 ± 0,5	0,753 ± 0,023	15,5 ± 0,5
10	970	34,64	598,9	0,768	15,9
11		34,71	599,9	0,768	16,0
18		34,28	599,6	0,745	15,3
Média		34,54 ± 0,23	599,4 ± 0,5	0,760 ± 0,013	15,7 ± 0,4

Da Tabela 4.8 nota-se que com irradiância incidente na face com o campo retrodifusor, a maior eficiência média das células solares diminuiu para $(8,0 \pm 0,2)$ %. A densidade de corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto são menores que aqueles medidos com irradiância na face do emissor, porém a J_{sc} foi a grandeza física que apresentou a maior redução. Para as células solares processadas com T_B de 970 °C, verifica-se que a J_{sc} média de $(34,54 \pm 0,23)$ mA/cm² com irradiância no emissor diminuiu para $(17,87 \pm 0,20)$ mA/cm² com iluminação no campo retrodifusor. Para esta temperatura de difusão de boro, a V_{oc} média diminuiu de $(599,4 \pm 0,5)$ mV para $(584,5 \pm 0,4)$ mV, quando a irradiância incidiu no campo retrodifusor. O fator de forma médio foi similar para os dois modos de iluminação. Com irradiância no campo retrodifusor, o fator de forma médio variou de 0,73 a 0,76.

Tabela 4.8. Parâmetros elétricos das células solares bifaciais com irradiância no **campo retrodifusor** em função da temperatura de difusão de boro, processadas em lâminas de silício com resistividade de base de **0,8 a 2,6 Ω .cm**. A temperatura de queima das pastas de metalização foi de 860 °C.

Célula	T _B (°C)	J _{SC} (mA/cm ²)	V _{OC} (mV)	FF	η (%)
1	940	14,94	577,5	0,771	6,7
3		15,10	569,4	0,629	5,4
4		14,92	578,2	0,777	6,7
Média		14,99 ± 0,10	575 ± 5	0,73 ± 0,08	6,3 ± 0,7
5	950	16,70	584,0	0,781	7,6
8		15,81	575,2	0,676	6,2
14		16,41	579,7	0,761	7,2
Média		16,3 ± 0,5	580 ± 4	0,74 ± 0,06	7,0 ± 0,8
13	960	17,59	584,2	0,74	7,6
15		17,37	584,2	0,774	7,9
Média		17,48 ± 0,16	584,2	0,757 ± 0,024	7,7 ± 0,2
10	970	18,05	584,2	0,767	8,1
11		17,90	584,9	0,781	8,2
18		17,66	584,4	0,756	7,8
Média		17,87 ± 0,20	584,5 ± 0,4	0,768 ± 0,013	8,0 ± 0,2

A Tabela 4.9 compara a eficiência com irradiância no emissor e no campo retrodifusor, a bifacialidade e a potência produzida pela célula solar considerando a incidência de irradiância somente no emissor ($P_{\text{Monofacial}}$) e a potência como irradiância nas duas faces (P_{Bifacial}). A maior bifacialidade média, de 0,51, foi obtida na $T_B = 970$ °C. Porém, este resultado é similar ao encontrado com a T_B de 960 °C. O valor médio da $P_{\text{Monofacial}}$ produzida variou de 0,89 W a 0,91 W, sendo o maior valor médio obtido em dispositivos processados com a T_B de 970 °C. No entanto, considerando o modo de operação bifacial, o valor médio da P_{Bifacial} aumentou para o intervalo de 0,97 W a 1,0 W. A maior P_{Bifacial} média foi obtida nas células solares produzidas com $T_B = 970$ °C e a maior valor produzido por uma célula solar foi de 1,02 W.

Tabela 4.9. Eficiência com irradiância no emissor (η_{Emissor}), eficiência com irradiância no campo retrodifusor (η_{BSF}), bifacialidade e potência com irradiância na face com o emissor ($P_{\text{Monofacial}}$) e em ambas as faces (P_{Bifacial}) das células solares processadas com diferentes temperaturas de difusão de boro em lâminas de silício com resistividade de base de **0,8 a 2,6 $\Omega\cdot\text{cm}$** . A área das células solares é de 57,87 cm².

Célula	T _B (°C)	η_{Emissor} (%)	η_{BSF} (%)	P _{Monofacial} (W)	P _{Bifacial} (W)	Bifacialidade
1	940	15,9	6,7	0,92	1,00	0,42
3		14,5	5,4	0,84	0,90	0,37
4		15,9	6,7	0,92	1,00	0,42
Média		15,4 ± 0,8	6,3 ± 0,7	0,89 ± 0,05	0,97 ± 0,06	0,40 ± 0,03
5	950	15,9	7,6	0,92	1,01	0,48
8		14,9	6,2	0,86	0,93	0,41
14		15,8	7,2	0,92	1,00	0,46
Média		15,5 ± 0,6	7,0 ± 0,8	0,90 ± 0,03	0,98 ± 0,04	0,45 ± 0,03
13	960	15,2	7,6	0,88	0,97	0,50
15		15,9	7,9	0,92	1,01	0,50
Média		15,5 ± 0,5	7,7 ± 0,2	0,90 ± 0,03	0,99 ± 0,03	0,50 ± 0,00
10	970	15,9	8,1	0,92	1,02	0,51
11		16,0	8,2	0,93	1,02	0,51
18		15,3	7,8	0,89	0,98	0,51
Média		15,7 ± 0,4	8,0 ± 0,3	0,91 ± 0,02	1,00 ± 0,02	0,51 ± 0,00

4.3.2 Células Solares Bifaciais com Maior Resistividade de Base

Os parâmetros elétricos das células solares bifaciais com maior resistividade de base produzidas com diferentes temperaturas de difusão de boro são apresentados na Tabela 4.10 e Tabela 4.11. Com irradiância no emissor, a maior eficiência, de 16,3 %, foi obtida nas temperaturas de difusão de boro de 950 e 960 °C. Com o aumento da resistividade de base, a eficiência alcançada foi 0,3 % (absoluto) maior. Nestes dispositivos, para o intervalo de T_B avaliado, a maior densidade de corrente de curto-circuito média, de (35,34 ± 0,37) mA/cm², foi obtida com T_B = 950 °C, enquanto o maior valor médio nos dispositivos com menor ρ_B foi obtido com a T_B de 970 °C. Neste caso, a J_{sc} média foi de aproximadamente 1 mA/cm² maior. A maior tensão de circuito aberto, de 599,5 mV, foi medida nas células solares processadas

com T_B de 960 °C. Conforme esperado, este valor é somente um pouco menor que o encontrado nas células solares com menor resistividade de base, que foi de 600,5 mV e foi obtido com a T_B de 950 °C. O fator de forma médio variou de 0,75 a 0,77 e foi similar ao obtido com os dispositivos de menor resistividade de base.

Tabela 4.10. Parâmetros elétricos das células solares bifaciais com irradiância no **emissor** em função da temperatura de difusão de boro (T_B) processadas em lâminas de silício com resistividade de base de **1 a 20 Ω .cm**.

Célula	T_B (°C)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF	η (%)
17	940	35,00	592,1	0,737	15,3
18		30,21	594,0	0,752	13,5
Média		32,61 ± 3,39	593,0 ± 1,3	0,745 ± 0,011	14,4 ± 1,3
11	950	35,07	595,0	0,772	16,1
12		35,60	595,9	0,766	16,3
Média		35,34 ± 0,37	595,4 ± 0,6	0,769 ± 0,004	16,2 ± 0,1
13	960	35,08	599,5	0,776	16,3
16	970	35,20	598,1	0,750	15,8

A Tabela 4.11 mostra os resultados das células solares bifaciais com maior resistividade de base com irradiância incidente na face com o campo retrodifusor. Novamente, nota-se que a V_{oc} e, principalmente a J_{sc} , são menores com iluminação nesta face. Nestes dispositivos, o maior valor médio da J_{sc} foi de (22,09 ± 0,78) mA/cm² e foi obtido com a T_B de 950 °C. Este valor é maior que aquele medido em dispositivos com menor ρ_B , que foi de (17,87 ± 0,20) A/cm². A V_{oc} variou de 582,0 a 588,7 mV e foi um pouco menor que o valor com irradiância no emissor. O fator de forma foi similar, variando de 0,75 a 0,79.

Tabela 4.11. Parâmetros elétricos das células solares bifaciais com irradiância no **campo retrodifusor** em função da temperatura de difusão de boro. processadas em lâminas de silício com resistividade de base de **1 a 20 Ω .cm**.

Célula	T_B (°C)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF	η (%)
17	940	21,94	582,6	0,746	9,5
18		17,37	582,0	0,765	7,7
Média		19,66 ± 3,23	582,3 ± 0,4	0,756 ± 0,013	8,6 ± 1,3
11	950	21,53	584,8	0,782	9,8
12		22,64	586,5	0,769	10,2
Média		22,09 ± 0,78	585,6 ± 1,2	0,776 ± 0,009	10,0 ± 0,3
13	960	18,14	587,3	0,791	8,4
16	970	22,37	588,7	0,754	9,9

Na Tabela 4.12 apresenta-se a bifacialidade, a $P_{\text{Monofacial}}$ e a P_{Bifacial} , encontrados nas células solares com a maior resistividade de base. A bifacialidade variou de 0,57 a 0,63, sendo maior que os valores encontrados para os dispositivos com menor resistividade de base. A potência com iluminação no modo monofacial alcançada foi de 1,0 W e no modo bifacial a potência aumenta para 1,13 W. Este resultado foi obtido com T_B de 950 °C e neste dispositivo a bifacialidade foi de 0,63.

Tabela 4.12. Eficiência com irradiância no emissor (η_{Emissor}), no campo retrodifusor (η_{BSF}), bifacialidade e potência com irradiância na face com o emissor ($P_{\text{Monofacial}}$) e em ambas as faces (P_{Bifacial}) das células solares processadas com diferente temperatura de difusão de boro processadas em lâminas de silício com resistividade de base de **1 a 20 Ω .cm**. A área das células solares é de 61,58 cm².

Célula	T_B (°C)	η_{Emissor} (%)	η_{BSF} (%)	$P_{\text{Monofacial}}$ (W)	P_{Bifacial} (W)	Bifacialidade
17	940	15,3	9,5	0,94	1,06	0,62
18		13,5	7,7	0,83	0,93	0,57
Média		14,4 ± 1,3	8,6 ± 1,3	0,89 ± 0,08	0,99 ± 0,09	0,60 ± 0,04
11	950	16,1	9,8	0,99	1,11	0,61
12		16,3	10,2	1,00	1,13	0,63
Média		16,2 ± 0,1	10,0 ± 0,3	1,00 ± 0,01	1,12 ± 0,01	0,62 ± 0,01
13	960	16,3	8,4	1,01	1,11	0,52
16	970	15,8	9,9	0,97	1,09	0,63

4.3.3 Comparação dos Parâmetros Elétricos das Células Solares Bifaciais com Maior Eficiência

Os parâmetros elétricos em função da temperatura de difusão do boro das células solares bifaciais com diferente resistividade de base e com a maior eficiência são comparados nas Figura 4.4 e Figura 4.5. As curvas em preto correspondem às células solares com menor resistividade de base (de 0,8 a 2,6 Ω .cm) e em vermelho aos dispositivos com maior resistividade de base (de 1 a 20 Ω .cm). Nas figuras foram mantidas as mesmas escalas para facilitar a comparação.

A partir da Figura 4.4-a, com irradiância incidente no emissor de fósforo, conforme esperado verifica-se que a tensão de circuito aberto é maior nas células solares com menor resistividade de base. No entanto, como mostra a Figura 4.5-a, com iluminação no campo retrodifusor, a maior V_{oc} ocorre nos dispositivos com maior resistividade de base.

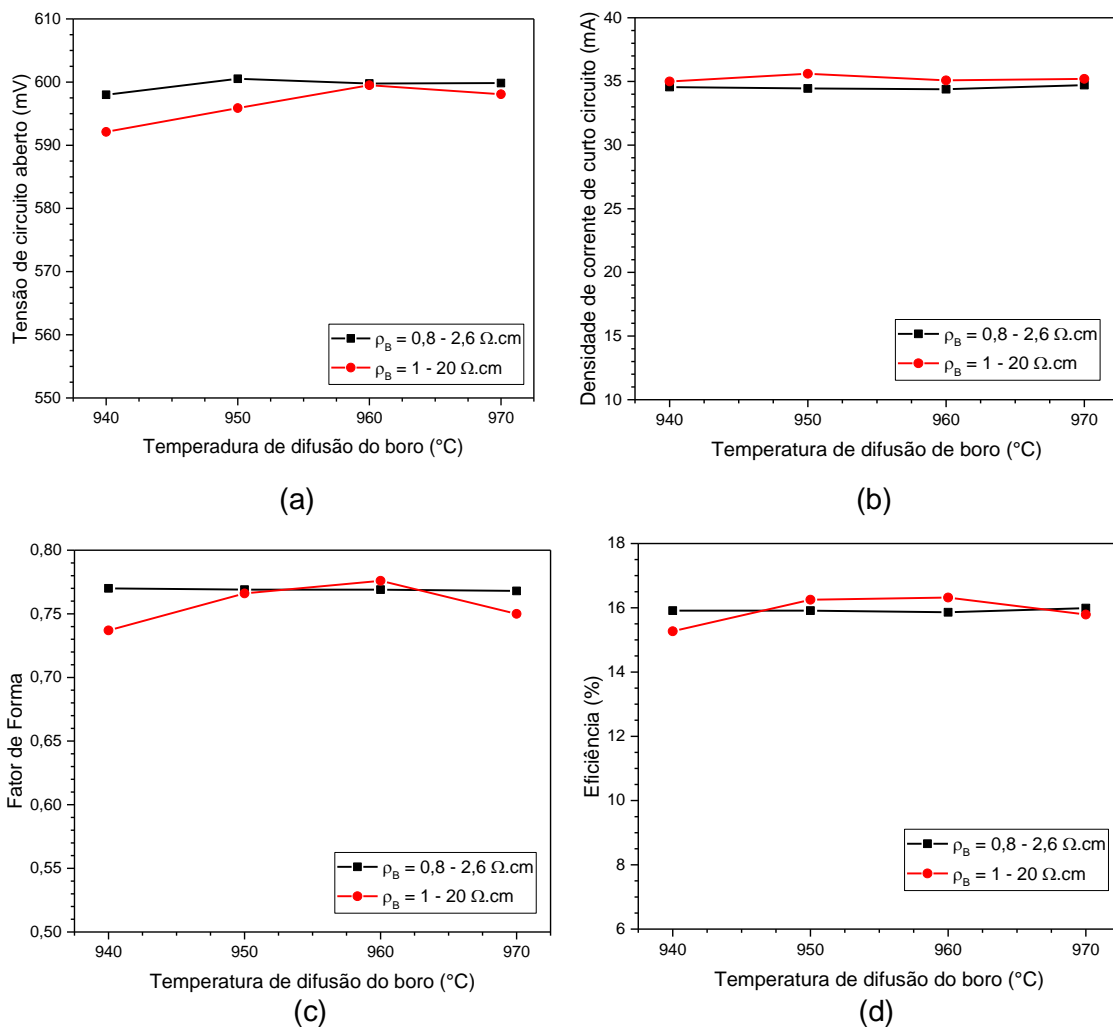


Figura 4.4. (a) Tensão de circuito aberto, (b) densidade de curto-circuito, (c) fator de forma e (d) eficiência em função da temperatura de difusão de boro das células solares bifaciais com maior eficiência produzidas com as lâminas de silício de diferente resistividade de base e irradiância no emissor de fósforo.

Ao comparar a densidade de corrente de curto-circuito, tanto com irradiância no emissor quanto no campo retrodifusor, nota-se que os maiores valores foram encontrados nos dispositivos com maior resistividade de base.

Da Figura 4.4-c e da Figura 4.5-c verifica-se que o fator de forma apresentou uma maior variação nas células solares bifaciais com maior resistividade de base nos dois modos de iluminação.

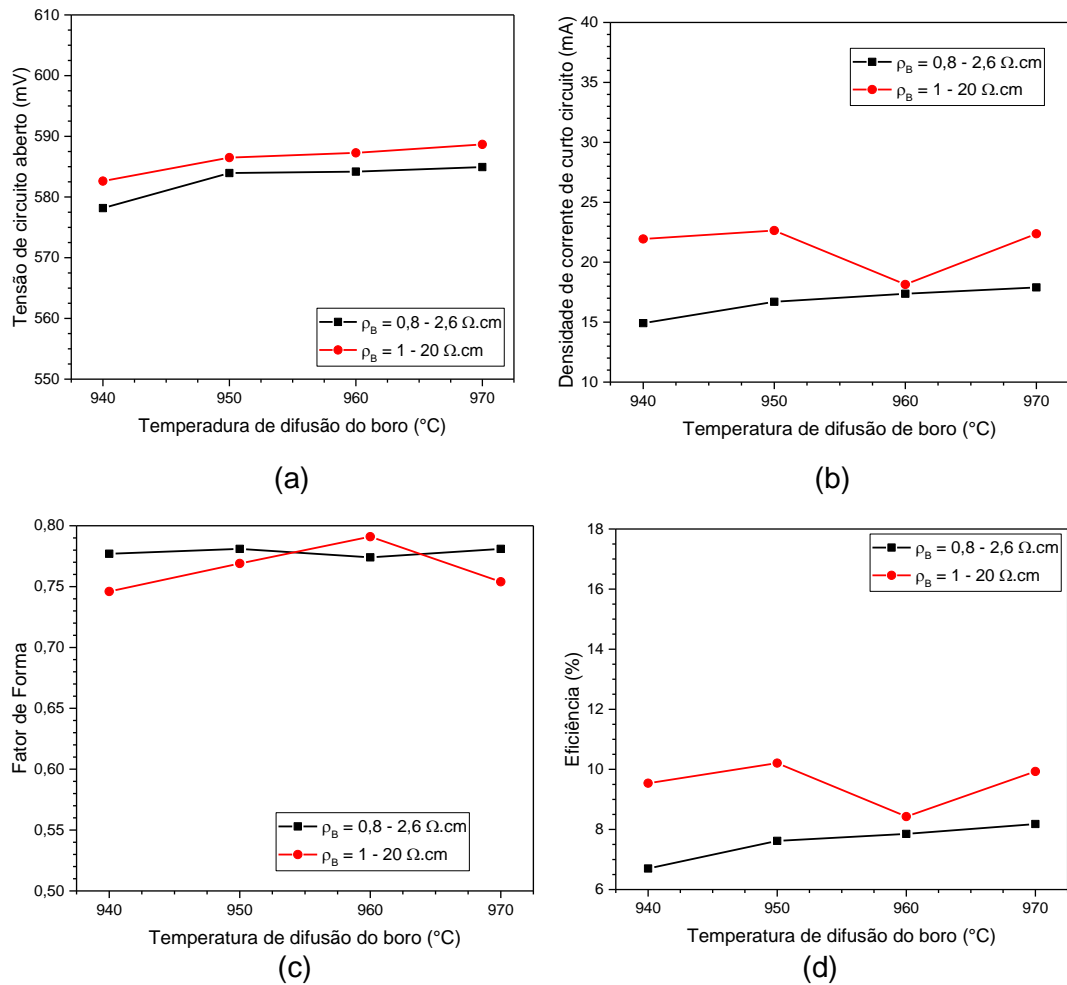


Figura 4.5. (a) Tensão de circuito aberto, (b) densidade de curto-circuito, (c) fator de forma e (d) eficiência em função da temperatura de difusão de boro das células solares bifaciais com maior eficiência produzidas com as lâminas de silício com diferentes resistividades de base e irradiância no campo retrodifusor de boro.

Com irradiância no emissor, a eficiência apresentou maior variação em função da temperatura de difusão de boro nas células solares bifaciais com maior resistividade de base. Nestes dispositivos, a maior eficiência foi obtida no intervalo de T_B de 950 °C a 960 °C, enquanto nas células solares com menor ρ_B a maior eficiência foi encontrada com $T_B = 970$ °C. Com irradiância incidente no campo retrodifusor, a eficiência foi maior nos dispositivos com maior ρ_B no intervalo de temperaturas de difusão de boro avaliado. Neste modo de iluminação, a maior eficiência foi obtida com T_B de 970°C e 950 °C para células solares com ρ_B de 0,8 a 2,6 $\Omega.cm$ e ρ_B de 1 a 20 $\Omega.cm$, respectivamente.

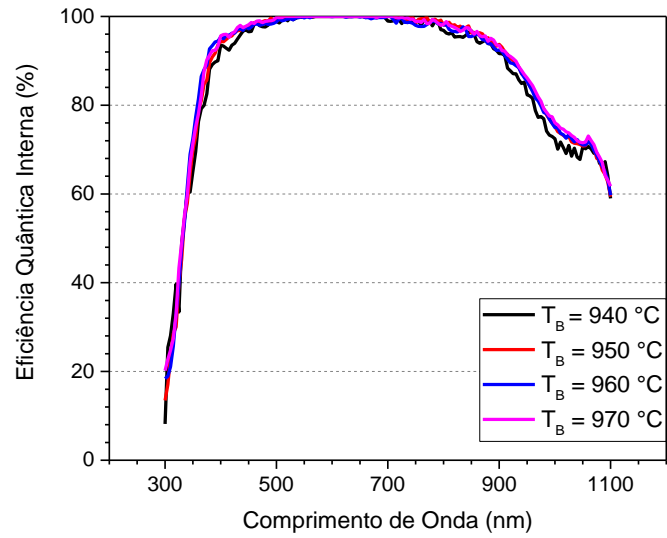
Observou-se que as células solares produzidas com as lâminas de silício de maior resistividade de base apresentaram uma maior variação dos parâmetros

elétricos. Esse resultado pode ser devido à maior variação da resistividade de base, que é uma característica do material fornecido pelo fabricante. A razão entre o maior e menor valor da resistividade de base nas lâminas com menor resistividade de base é da ordem de 3 vezes, enquanto nas lâminas com maior resistividade de base esta razão é de aproximadamente 20 vezes. Outro fator pode ser devido ao tempo de vida dos portadores de carga minoritários e defeitos no substrato cristalino.

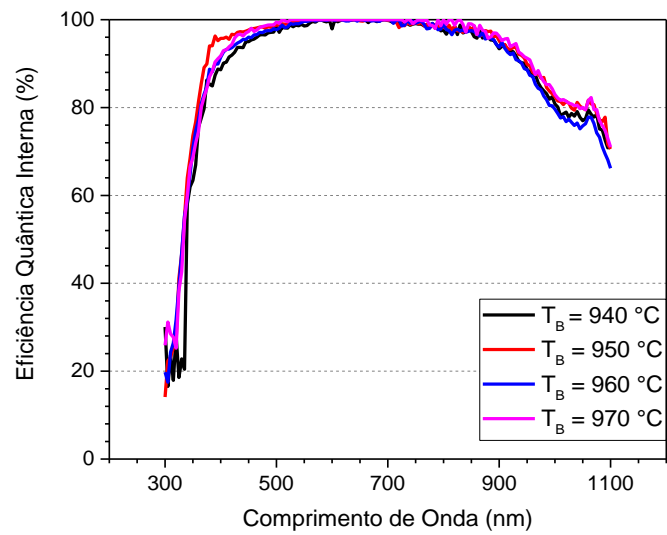
4.4. Análise da Eficiência Quântica Interna e Refletância

Na Figura 4.6 está representada a eficiência quântica interna das células solares bifaciais com maior eficiência, processadas com diferentes temperaturas de difusão de boro, e medida com irradiância na face com o emissor de fósforo. Observa-se que nas células solares com menor resistividade de base (Figura 6.6-a) em comprimentos de onda maiores que 900 nm, a EQI tende a ser menor nos dispositivos com a menor T_B . Neste caso, o campo retrodifusor é menos profundo. No entanto, este resultado não é observado nas células solares com a maior resistividade de base.

Na Figura 4.7 compara-se a refletância medida na face com o emissor de fósforo nas células solares com maior eficiência e processadas com diferentes temperaturas de difusão de boro. Nas células com menor resistividade de base, o pico em aproximadamente 350 nm é dependente da temperatura de difusão de boro, sendo menor para maiores temperaturas. O mesmo resultado é observado para o comprimento de onda que corresponde ao mínimo da refletância, indicando que provavelmente a espessura da camada de óxido de silício variou. Nas células solares com maior resistividade de base, somente para a T_B de 970 °C verificou-se uma variação na refletância.

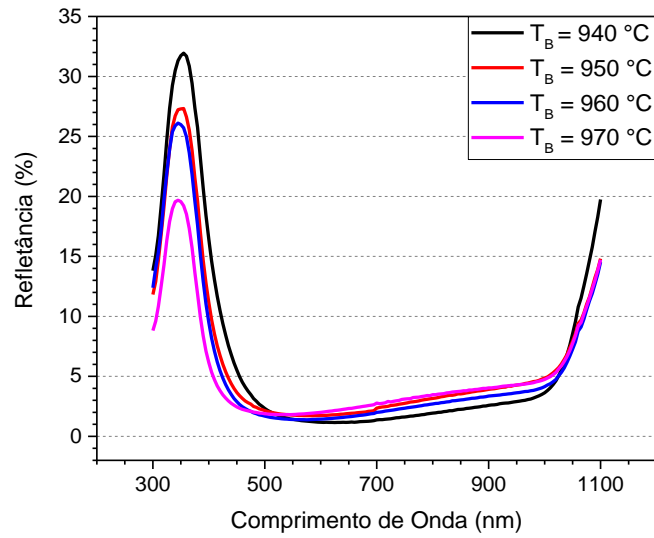


(a)

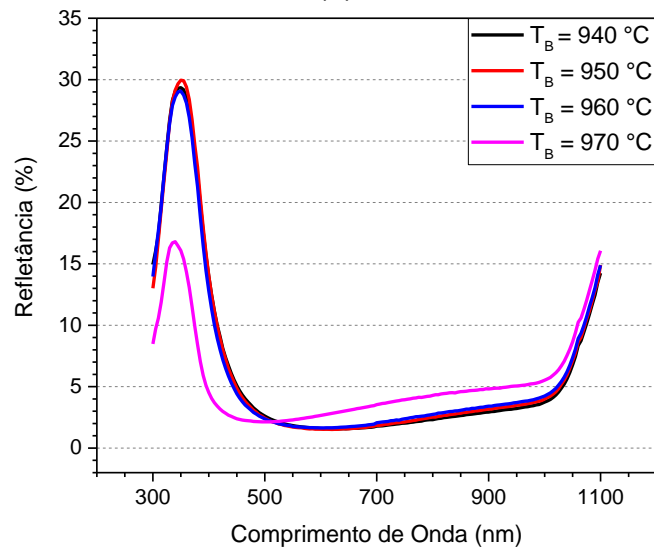


(b)

Figura 4.6. Eficiência quântica interna medida no **emissor** em função da temperatura de difusão de boro das células solares bifaciais com maior eficiência e processadas em lâminas de Si-Cz com resistividade de base de (a) 0,8 a 2,6 Ω .cm e (b) de 1 a 20 Ω .cm.



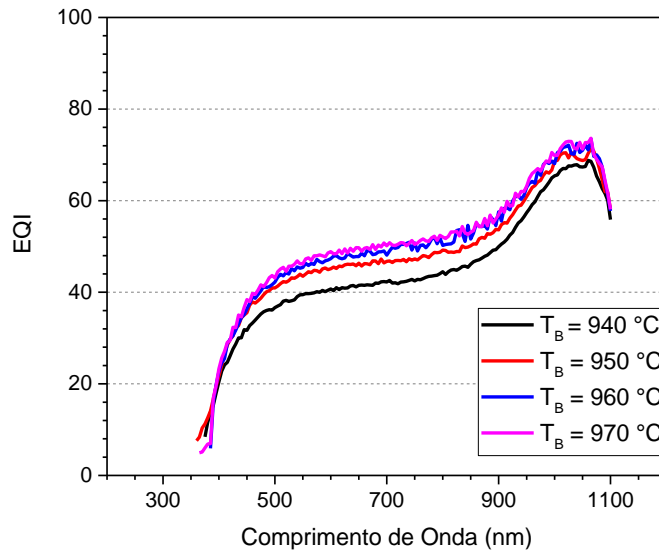
(a)



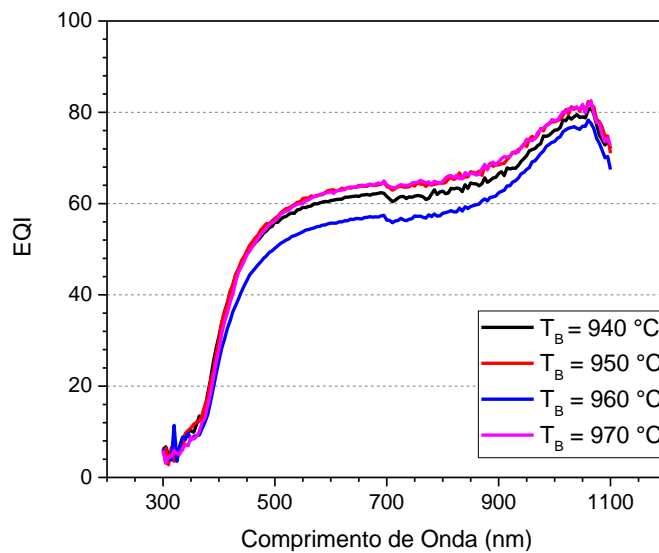
(b)

Figura 4.7. Refletância medida no **emissor** das células solares bifaciais em função da temperatura de difusão de boro das células solares com maior eficiência processadas em lâminas de Si-Cz com resistividade de base de (a) 0,8 a 2,6 $\Omega\cdot\text{cm}$ e (b) de 1 a 20 $\Omega\cdot\text{cm}$.

Na Figura 4.8 é mostrada a eficiência quântica interna medida na face com o campo retrodifusor de boro de células solares com a maior eficiência e processadas com diferentes temperaturas de difusão de boro.



(a)

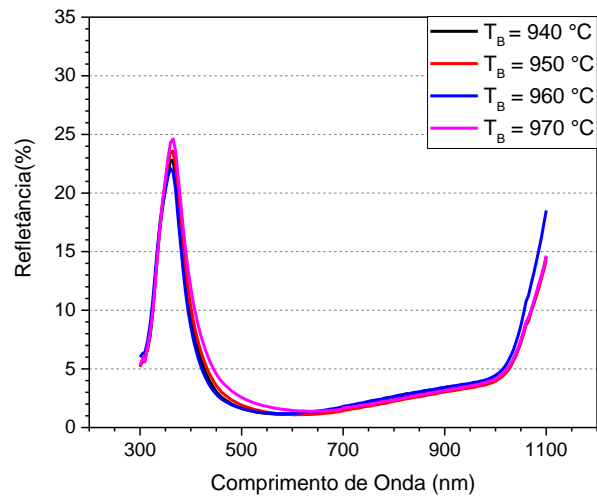


(b)

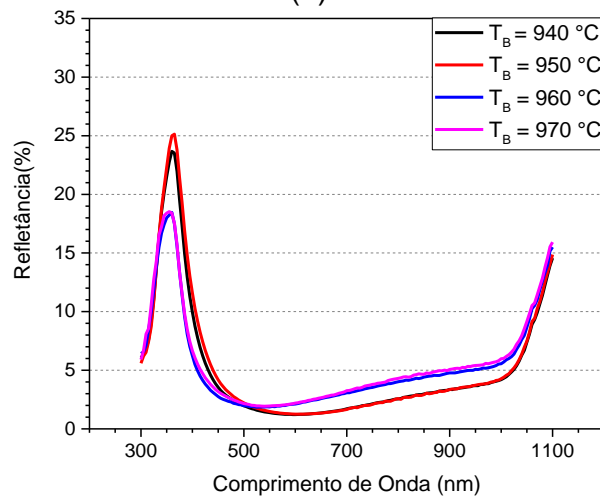
Figura 4.8. Eficiência quântica interna medida no **campo retrodifusor** em função da temperatura de difusão de boro das células solares com maior eficiência processadas em lâminas de Si-Cz com resistividade de base de (a) 0,8 a 2,6 Ω .cm e (b) de 1 a 20 Ω .cm.

Comparando a Figura 4.6 com a Figura 4.8, constata-se que a EQI é menor em todos os comprimentos de onda quando a irradiância incide na face com o campo retrodifusor. Nas células com menor resistividade de base, como indica a Figura 4.8-a, a eficiência quântica interna tende a aumentar com o aumento da temperatura de difusão de boro em comprimentos de onda maiores que 440 - 450 nm. No entanto, nos dispositivos com maior resistividade de base, a menor EQI foi obtida com a T_B de 960 °C e está associada a menor J_{SC} , como se pode ver na Figura 4.5-b.

Na Figura 4.9 apresenta-se a refletância na face com o campo retrodifusor de boro das células solares com maior eficiência produzidas com diferentes temperaturas de difusão de boro. Verifica-se que a refletância foi similar nos dispositivos com menor resistividade de base. Nas células solares com maior resistividade de base, nota-se a tendência de menor espessura da camada de óxido de silício nos dispositivos processados com as maiores temperaturas de difusão de boro, de 960 e 970 °C.



(a)



(b)

Figura 4.9. Refletância medida no **campo retrodifusor** em função da temperatura de difusão de boro das células solares com maior eficiência processadas em lâminas de Si-Cz com resistividade de base de (a) 0,8 a 2,6 Ω .cm e (b) de 1 a 20 Ω .cm.

4.5. Comparação de Células Solares Bifaciais com Diferente Resistividade de Base

A curva J-V (densidade de corrente elétrica em função da tensão aplicada) das células solares com a maior eficiência e processadas com diferentes temperaturas de difusão de boro são mostradas na Figura 4.10 e 4.11, com irradiância no emissor e no campo retrodifusor, respectivamente. Observa-se que a curva J-V das quatro células solares com menor resistividade de base é similar. No entanto, como mostra a Figura 4.10-b, nota-se que a menor potência foi medida nos dispositivos processados com a menor T_B e a maior potência foi encontrada com T_B de 950 °C - 960 °C.

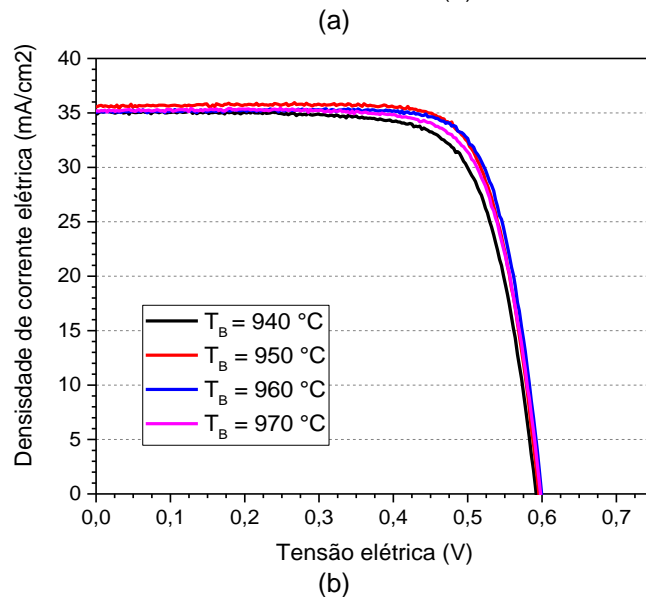
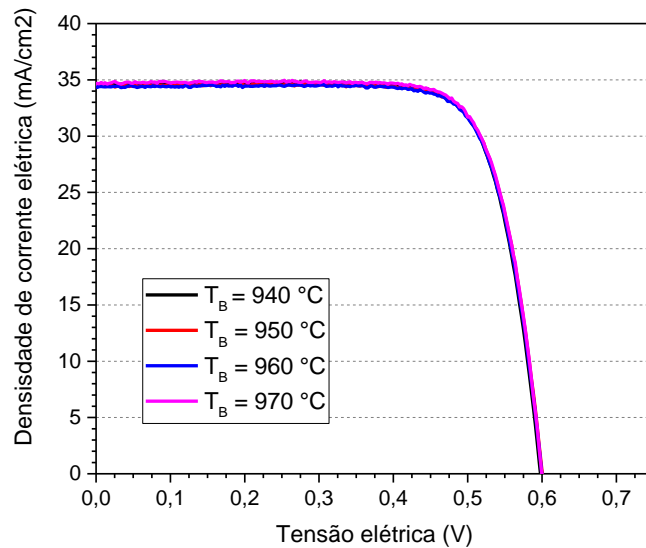
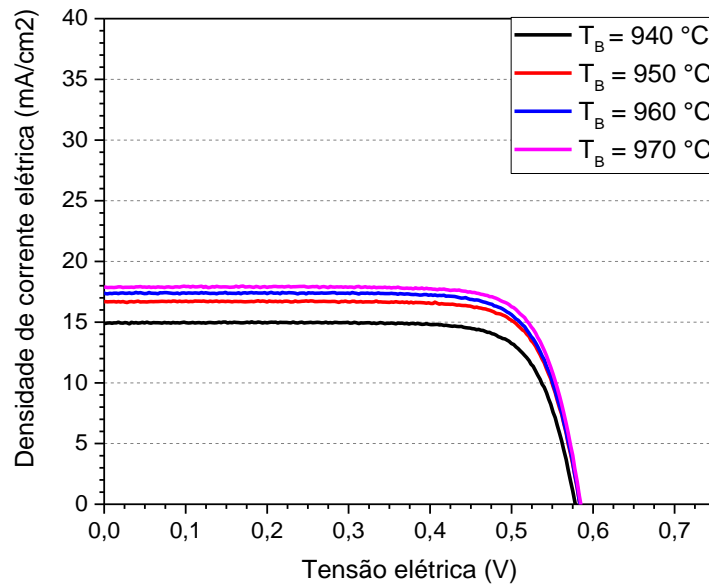
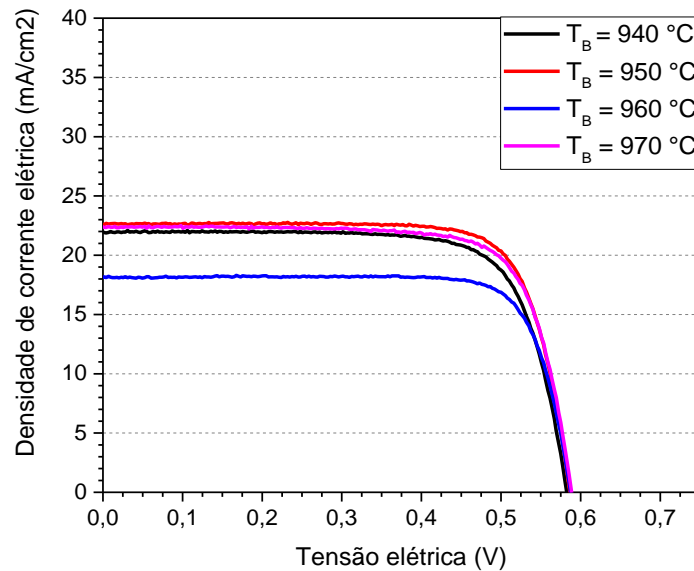


Figura 4.10. Densidade de corrente elétrica em função da tensão aplicada com irradiância no **emissor** das células solares com maior eficiência processadas em lâminas de Si-Cz com resistividade de base de (a) 0,8 a 2,6 $\Omega\cdot\text{cm}$ e (b) de 1 a 20 $\Omega\cdot\text{cm}$.

A partir da curva J-V com irradiância no campo retrodifusor verifica-se que a J_{sc} foi menor que com irradiância no emissor de fósforo para todas as células solares. Também se observa que, na maioria dos casos, a J_{sc} das células solares com menor resistividade de base foi menor que 20 mA/cm^2 e tende a aumentar com a T_B . Por outro lado, este parâmetro nos dispositivos com maior resistividade de base foi maior que 20 mA/cm^2 .



(a)



(b)

Figura 4.11. Densidade de corrente elétrica em função da tensão aplicada com irradiância no **campo retrodifusor** das células solares com maior eficiência processadas em lâminas de Si-Cz com diferente resistividade de base.

Os parâmetros elétricos da célula solar com maior eficiência processada com resistividade de base de 0,8 a 2,6 $\Omega\cdot\text{cm}$ e de 1 a 20 $\Omega\cdot\text{cm}$ são comparados na Tabela 4.13. Também se apresentam os resultados obtidos com células solares bifaciais desenvolvidas em um trabalho anterior (CRESTANI, 2021), com o mesmo processo de difusão dos dopantes utilizado neste trabalho. O trabalho anterior foi o primeiro a utilizar a patente para a difusão dos dopantes na mesma etapa térmica para desenvolver células solares bifaciais.

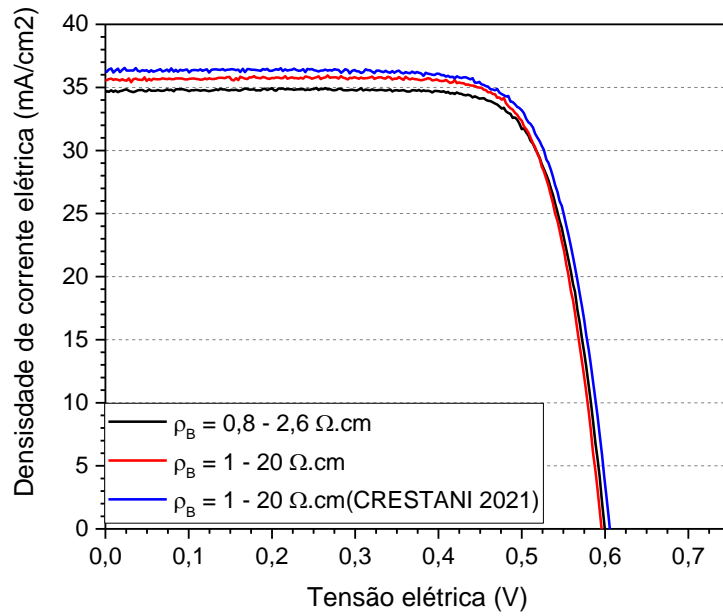
Tabela 4.13. Parâmetros elétricos das células solares com maior eficiência processadas em lâminas de silício com diferente resistividade de base desenvolvidas neste trabalho e em trabalho anterior (CRESTANI, 2021).

ρ_B ($\Omega\cdot\text{cm}$)	Célula	T_B	Face	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (mV)	FF	η (%)
0,8 a 2,6	11	970	Emissor	34,71	599,9	0,768	16,0
			BSF	17,9	584,94	0,781	8,2
1 a 20	12	950	Emissor	35,60	595,9	0,766	16,3
			BSF	22,64	586,49	0,769	10,2
1 a 20 (CRESTANI, 2021)	P3C18B	970	Emissor	36,50	605,7	0,753	16,6
			BSF	27,6	600,5	0,765	12,7

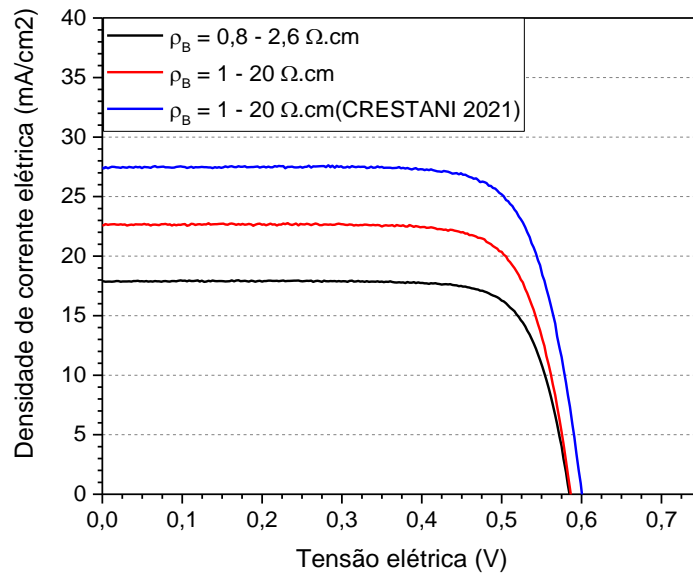
Em todas as células solares a densidade de corrente de curto-circuito é menor com irradiância na face com o BSF. Com o aumento da resistividade de base, a J_{sc} cresce tanto com irradiância incidente no emissor quanto no campo retrodifusor, como mostra a Figura 4.11. Na face com o BSF ocorre o maior aumento da J_{sc} da ordem de 25 %. A V_{oc} também é menor na face com o campo retrodifusor em todos os casos, porém o fator de forma tende a ser maior, como pode ser visto na Tabela 4.13.

Comparando os resultados obtidos no âmbito deste trabalho, a maior eficiência, tanto na face com o emissor quanto na face com o campo retrodifusor, foi obtida com a célula solar com a maior resistividade de base, a qual foi um pouco menor que o valor obtido em trabalhos anteriores (CRESTANI, 2021), como indica a Tabela 4.13. Consequentemente, como apresenta a Tabela 4.14, a maior potência com iluminação no modo monofacial, de 1,0 W, foi medida com o dispositivo com a maior ρ_B e o valor foi 3 % menor que o alcançado em trabalho anterior. Provavelmente,

a diferença seja provocada pelo maior tempo de vida dos portadores de carga minoritários na base.



(a)



(b)

Figura 4.11. Densidade de corrente elétrica em função da tensão aplicada com irradiância no emissor (a) e no campo retodifusor (b) das células solares com maior eficiência processadas em lâminas de Si-Cz com diferente resistividade de base neste trabalho e em trabalho anterior (CRESTANI, 2021).

Da Tabela 4.14, verifica-se que a bifacialidade aumenta de 0,51 para 0,63 com o aumento da resistividade de base e a potência no modo de iluminação bifacial aumenta em 10 %. Em trabalho anterior, a bifacialidade foi maior, de 0,77. Portanto, se constata que a difusão dos dopantes em uma única etapa térmica com o método utilizado tem potencial para o desenvolvimento de células solares bifaciais base p.

Tabela 4.14. Eficiência com irradiância no emissor (η_{Emissor}), no campo retrodifusor (η_{BSF}), bifacialidade e potência com irradiação na face com o emissor ($P_{\text{Monofacial}}$) e em ambas as faces (P_{Bifacial}) das células solares com maior eficiência, processadas em substratos de Si-Cz de diferente resistividade de base neste trabalho e em trabalho anterior (CRESTANI, 2021).

ρ_B ($\Omega\cdot\text{cm}$)	Célula	T_B ($^{\circ}\text{C}$)	η_{Emissor} (%)	η_{BSF} (%)	$P_{\text{Monofacial}}$ (W)	P_{Bifacial} (W)	Bifacialidade
0,8 a 2,6	11	970	16,0	8,2	0,93	1,02	0,51
1 a 20	12	950	16,3	10,2	1,00	1,13	0,63
1 a 20 (CRESTANI, 2021)	P3C18B	970	16,6	12,7	1,03	1,20	0,77

5. CONCLUSÕES E PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Em relação a temperatura de queima das pastas metálicas, concluiu-se que a temperatura de 860 °C resultou no maior fator de forma médio, de 0,75, tanto com irradiância na face do emissor de fósforo quanto com irradiância no campo retrodifusor de boro.

Para as células solares produzidas com lâminas de silício com resistividade de base de 0,8 a 2,6 Ω .cm, concluiu-se que a maior eficiência das células solares bifaciais com irradiância no emissor, de $\eta = 16,0 \%$, foi obtida com a temperatura de difusão de boro (T_B) de 970 °C. Com esta temperatura de difusão, também se encontrou a maior eficiência no campo retrodifusor, de 8,2 %. A bifacialidade foi de 0,51 e a densidade de potência no modo bifacial foi de 17,6 mW/cm².

Nas células solares produzidas com lâminas de silício com maior resistividade de base, de 1 a 20 Ω .cm, a eficiência alcançada no emissor de fósforo foi um pouco maior, de 16,3 % e foi obtida com a temperatura de difusão de boro de 950 °C a 960 °C. Nestas células solares bifaciais, com irradiância no campo retrodifusor, a eficiência também foi um pouco maior, de 10,2 % e foi obtida em 950 °C. Conseqüentemente, a bifacialidade e a densidade de potência no modo bifacial também foram maiores, de 0,63 e de 18,3 mW/cm², respectivamente.

Da análise dos parâmetros elétricos das células solares bifaciais com a maior eficiência, constatou-se que com irradiância no emissor, a tensão de circuito aberto é maior nas células solares com menor resistividade de base. Porém, com iluminação no campo retrodifusor, a maior V_{oc} ocorre nos dispositivos com maior resistividade de base. No que se refere a densidade de corrente de curto-circuito, os maiores valores foram encontrados nos dispositivos com maior resistividade de base, independente do modo de iluminação. Porém,

o fator de forma apresentou maior variação nas células solares bifaciais com maior resistividade de base, nos dois modos de iluminação.

A partir da eficiência quântica interna das células solares com a menor resistividade de base e irradiância no emissor, concluiu-se que em comprimentos de onda maiores que 900 nm, a EQI tende a ser menor nos dispositivos produzidos com a menor temperatura de difusão de boro. No entanto, este resultado não foi observado nas células solares com a maior resistividade de base. Também se constatou que a EQI é menor em todos os comprimentos de onda quando a irradiância incide na face com o campo retrodifusor.

A partir da refletância na face com o emissor, concluiu-se que provavelmente a espessura da camada de óxido de silício para passivação da superfície variou com a temperatura de difusão de boro.

A eficiência das células solares bifaciais desenvolvidas é um pouco menor que aquela de módulos fotovoltaicos bifaciais comerciais, porém há menos etapas no processo de produção.

Como continuidade deste trabalho sugere-se aprimorar o processo de formação das malhas metálicas, principalmente no que se refere a malha formada com a pasta de prata bem como otimizar a camada de óxido de silício para passivação das superfícies. Outra sugestão é avaliar a influência de materiais dielétricos para a passivação das superfícies n^+ e p^+ . Também se sugere o desenvolvimento de células solares de menor espessura, que podem contribuir com o aumento da bifacialidade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABERLE, A. G. Surface passivation of crystalline silicon solar cells: a review. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 8, n. 5, p. 473–487, set. 2000.

BASORE, P. A. (1994). Defining terms for crystalline silicon solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2(2), 177–179. doi:10.1002/pip.4670020213

BENTZEN, A. Phosphorus diffusion and gettering in silicon solar cells. Oslo. 2006. 271p. Tese de Doutorado. Universidade de Oslo, Noruega.

BLAKERS, A. W. et al. 22.8% efficient silicon solar cell. **Applied Physics Letters**, v. 55, n. 13, p. 1363–1365, 25 set. 1989.

BLOOMBERGNEF. **Energy, Vehicles, Sustainability – 10 Predictions for 2020**. Disponível em: <<https://about.bnef.com/blog/energy-vehicles-sustainability-10-predictions-for-2020/>>. Acesso em: 20 fev. 2020.

BOWDEN, S.; HONSBURG, C. **PVCDROM**. Disponível em: <<https://www.pveducation.org/>>. Acesso em: 19 dez. 2020.

CHAN, K. S. **What is a PERC solar cell?** Disponível em: <<https://medium.com/@kengsiewchan/perc-solar-cells-3eb275804ded>>.

CRESTANI, T. **Desenvolvimento de Células Solares Bifaciais Pert Base P: Análise da Passivação com SiO₂ e da Junção Flutuante**. Porto Alegre. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia dos Materiais). Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Brasil.

CUEVAS, A., LUQUE, A., EGUREN, J., & DEL ALAMO, J. (1982). **50 Per cent**

more output power from an albedo-collecting flat panel using bifacial solar cells. *Solar Energy*, 29(5), 419–420. doi:10.1016/0038-092x(82)90078-0

DÍAZ MB, KOCH W, HÄSSLER C, BRÄUTIGAM HG. **Resistivity topography: a grain boundary characterisation method.** *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2002;72(1-4):473-486.

ENERGYSAGE. What are the most efficient solar panels on the market? Solar panel cell efficiency explained. 2020.

FOSSUM, J. G. Physical operation of back-surface-field silicon solar cells. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 24, n. 4, p. 322–325, abr. 1977.

FRAUNHOFER ISE. **PHOTOVOLTAICS REPORT.** Disponível em: <<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>>.

GHEMBAZA, H.; ZERGA, A.; SAÏM, R. Effects of Thickness and Chemical Quality of SiO₂ Barrier on POCl₃ Diffusion During the Formation of Emitter. **Energy Procedia**, v. 18, p. 733–740, 2012.

GLUNZ, S. W., Rein, S., Warta, W., Knobloch, J., & Wettling, W. (2001). Degradation of carrier lifetime in Cz silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 65(1-4), 219–229. doi:10.1016/s0927-0248(00)00098-2

GREEN, M. A. **Solar Cells Operating Principles, Technology and System Applications.** Sydney: UNSW, 1998.

GREEN, M. A. **Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion**, Vol. 12, Springer Berlin Heidelberg, 2006. DOI.org (Crossref), doi:10.1007/b137807.

GREEN, M. A. The Passivated Emitter and Rear Cell (PERC): From conception to mass production. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 143, p. 190–

197, 2015.

GREEN, M. A. et al. Solar cell efficiency tables (Version 55). **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 28, n. 1, p. 3–15, 20 jan. 2020.

GUERRERO-LEMUS, R., VEGA, R., KIM, T., KIMM, A., & SHEPHARD, L. E. (2016). **Bifacial solar photovoltaics – A technology review**. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 60, 1533–1549. doi:10.1016/j.rser.2016.03.041

J.M.K.C. DONEV ET AL. **Energy Education - Dopant**. Disponível em: <<https://energyeducation.ca/encyclopedia/Dopant>>.

MAURITS, J. E. A. (2014). Silicon Production. *Treatise on Process Metallurgy*, 919–948. doi:10.1016/b978-0-08-096988-6.00022-5

MOEHLECKE, A. et al. **Experimental comparison between p and n bases for bifacial solar cells**. In: *Proceedings of the 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. 1995. p. 967-970.

MOON, I. et. al. **Selective emitter using porous silicon for crystalline silicon solar cells**. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, n. 93, p. 846–850, 2009.

Ohtsuka, H.; Sakamoto, M.; Koyama, M.; Tsutsui, K.; Uematsu, T.; Yazawa, Y. (2001). **"Characteristics of Bifacial Solar Cells Under Bifacial Illumination with Various Intensity Levels"**. *Progress in Photovoltaics*. 9: 1–13. doi:10.1002/pip.336.

Palik, E. D. (1985). **Ellipsometric Study of Orientation-Dependent Etching of Silicon in Aqueous KOH**. *Journal of The Electrochemical Society*, 132(4), 871. doi:10.1149/1.2113976

PINTO, J. L. **Otimização e Comparação de Processos para Formação do Campo Retrodifusor com Boro em Células Solares**. Porto Alegre. 2012. Tese

(Doutorado em Engenharia e Tecnologia dos Materiais). Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Brasil.

PIZZINI, S. (2010). Towards solar grade silicon: Challenges and benefits for low cost photovoltaics. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(9), 1528–1533. doi:10.1016/j.solmat.2010.01.016

PV ENERGYTREND. **PriceQuotes**. Disponível em: <<https://www.webcitation.org/6QcjhW4C9>>. Acesso em: 20 fev. 2020.

PV ENERGYTREND. **Price quotes updated weekly – PV Spot Prices**. Disponível em: <<https://www.energytrend.com/solars/>>. Acesso em: 01 mar. 2020.

RAHMAN, M. Z.; KHAN, S. I. Advances in surface passivation of c-Si solar cells. **Materials for Renewable and Sustainable Energy**, v. 1, n. 1, p. 1, 6 dez. 2012.

RAINA, G., & SINHA, S. (2020). A simulation study to evaluate and compare monofacial Vs bifacial PERC PV cells and the effect of albedo on bifacial performance. *Materials Today: Proceedings*. doi:10.1016/j.matpr.2020.08.632

RAUER, Michael & Schmid, Alexandra & Guo, Fan & Neuberger, Frank & Gebhardt, Paul & Hohl-Ebinger, Jochen. (2020). **Comprehensive evaluation of IEC measurement procedures for bifacial solar cells and modules**. 37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition DOI: 10.4229/EUPVSEC20202020-4CO.2.1

REN21. **Renewables 2021 Global Status Report**. [s.l: s.n.].

ROTHHARDT, P. et al. Co-diffusion from solid sources for bifacial n-type solar cells. **Physica Status Solidi - Rapid Research Letters**, v. 7, n. 9, p. 623–626,

2013.

ROTHHARDT, P. et al. Codiffused bifacial n-type solar cells (CoBiN). **Energy Procedia**, v. 55, p. 287–294, 2014.

RÜHLE, S. Tabulated values of the Shockley-Queisser limit for single junction solar cells. **Solar Energy**, v. 130, p. 139–147, 2016.

TRUBE, J. International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV). **International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 2019 Results**, n. 11th Edition, p. 1–38, 2020.

VEDDE, J. et al. **PV-FZ® - A COST EFFECTIVE ROUTE TO HIGH EFFICIENCY SOLAR CELLS?**. 19th European PV Solar Energy Conference, Paris 2004

WEI, Q. et al. High efficiency n-PERT solar cells by B/P co-diffusion method. **Energy Procedia**, v. 124, p. 700–705, 2017.

YUSUFOGLU, U. A.; Pletzer, T. M.; Koduvelikulathu, L. J.; Comparotto, C.; Kopecek, R.; Kurz, H. **Analysis of the annual performance of bifacial modules and optimization methods**. IEEE Journal of Photovoltaics, v. 5, n. 1, p. 320-328, 2015.

ZANESCO, I. et al. Desenvolvimento da Célula solar com Maior Eficiência no Brasil com Processo Industrial. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. IX, n. 1, p. 41–48, 2018.

ZANESCO, I. et al. **Evaluation of the TiO₂ Anti-Reflective Coating in PERT Solar Cells with Silicon Dioxide Passivation**. Proceedings of the ISES Solar World Congress 2019. **Anais...**Freiburg, Germany: International Solar Energy Society, 2019. Disponível em: <<http://proceedings.ises.org/citation?doi=swc.2019.19.13>>

ZANESCO, I.; MOEHLECKE, A. **PROCESSO DE DIFUSÃO DE DOPANTES EM**

LÂMINAS DE SILÍCIO PARA FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES, 2012.

ZANESCO, I., Moehlecke, A., 2015. **Células Solares de Alta Eficiência com Emissores Seletivos**. Relatório Final de Projeto de P&D, Convênio CEEE-D nº 9942400, 210 p.

ZANESCO, I.; Moehlecke, A. **Desenvolvimento de Processos Industriais para Fabricação de Células Solares com pasta de Al e Passivação**, Relatório Final de Projeto de P&D, Convênio ELETROSUL nº 1110140010, 379 p, 2016.

ZANESCO, I.; MOEHLECKE, A. **PROCESSO DE DIFUSÃO DE DOPANTE TIPO P E TIPO N EM LÂMINAS DE SILÍCIO NA MESMA ETAPA TÉRMICA**, 2018.

ZANESCO, I.; RAZERA, R. A. Z.; MOEHLECKE, A. Análise da passivação com SiO₂ na face posterior e frontal de células solares com campo retrodifusor seletivo. **Revista Materia**, v. 22, 2017.

ZEGHBROECK, B. V., **Principles of Semiconductor Devices**, 2011 Disponível em: <<http://ece-www.colorado.edu/~bart/book/>>. Acesso em: 14 abr. 2021.

ZHANG, C., Shen, H., Sun, L., Yang, J., Wu, S., & Lu, Z. (2020). Bifacial p-Type PERC Solar Cell with Efficiency over 22% Using Laser Doped Selective Emitter. **Energies**, 13(6), 1388. doi:10.3390/en13061388