

PUCRS

ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

VÍTOR FREIRE E SALVADOR

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE CÉLULAS SOLARES BASE N
COM EMISSOR SELETIVO FORMADO POR RADIAÇÃO LASER**

Porto Alegre

2019

PÓS-GRADUAÇÃO - *STRICTO SENSU*



Pontifícia Universidade Católica
do Rio Grande do Sul



DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE CÉLULAS SOLARES BASE N COM EMISSOR SELETIVO FORMADO POR RADIAÇÃO LASER

VÍTOR FREIRE E SALVADOR

LICENCIADO EM FÍSICA

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

Porto Alegre

Agosto, 2019



DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE CÉLULAS SOLARES BASE N COM EMISSOR SELETIVO FORMADO POR RADIAÇÃO LASER

VÍTOR FREIRE E SALVADOR

LICENCIADO EM FÍSICA

ORIENTADOR: Prof. Dr. ADRIANO MOEHLECKE

CO-ORIENTADORA: Profa. Dra. IZETE ZANESCO

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

**Porto Alegre
Agosto, 2019**

Ficha Catalográfica

S182d Salvador, Vítor Freire e

Desenvolvimento e análise de células solares base n com emissor seletivo formado por radiação laser / Vítor Freire e Salvador . – 2019.

68.

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

Orientador: Prof. Dr. Adriano Moehlecke.

Co-orientadora: Profa. Dra. Izete Zanesco.

1. Célula Solar. 2. Emissor seletivo posterior. 3. Radiação Laser.
I. Moehlecke, Adriano. II. Zanesco, Izete. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da PUCRS
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Bibliotecária responsável: Salete Maria Sartori CRB-10/1363



DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE CÉLULAS SOLARES BASE N COM EMISSOR SELETIVO FORMADO POR RADIÇÃO LASER

CANDIDATO: VÍTOR FREIRE E SALVADOR

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

Adriano Moehlecke

DR. ADRIANO MOEHLECKE - ORIENTADOR

Izete Zanescio

DRA. IZETE ZANESCO - CO-ORIENTADORA

BANCA EXAMINADORA

João Bernardes da Rocha Filho
DR. JOÃO BERNARDES DA ROCHA FILHO - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS E MATEMÁTICA - PPGEDUCEM - PUCRS

Eleani Maria da Costa

DRA. ELEANI MARIA DA COSTA - PGETEMA - PUCRS

*A violência é o último refúgio do
incompetente.*
(Isaac Asimov)

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a minha família, de sangue e de coração, por acreditarem no meu potencial.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a minha família, cujo apoio e incentivo não pouparam, contribuindo em grande parte para quem sou. À minha mãe, meu *paidrasto*, irmãs, vó e vô, tios e tias, meu muito obrigado. Especialmente a minha melhor amiga e companheira Sabrina, que me ajudou e me somou imensuravelmente.

Agradeço a todos do NT-Solar, pelas oportunidades e convivências nesses dois anos de aprendizagem, me ajudando em diversas etapas, tanto na fabricação das células como no pensamento quando necessário. Em especial à Vanessa Alves, Thais Crestani e Nadine Araújo, pelas conversas e ideias. Também um grande agradecimento ao Moussa Ly e Vanessa Ósorio, pelo auxílio na sala limpa e em geral. Muito obrigado.

Agradeço também aos meus orientadores, Prof. Adriano Moehlecke e Profa. Izete Zanenco, pelos ensinamentos, oportunidade e confiança para o desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço à CAPES e à PUCRS pelo apoio financeiro durante o mestrado e pela disponibilização de sua estrutura.

Por último, um muito obrigado a todos que acreditaram em mim e seguem comigo todos os dias. Muito obrigado.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	6
AGRADECIMENTOS	7
SUMÁRIO	8
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS	13
RESUMO	15
ABSTRACT	16
1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	17
1.1. Introdução.....	17
1.2. Objetivos	18
1.2.1. Objetivos específicos	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. Princípios de funcionamento de células solares	19
2.2. Célula solar na indústria.....	20
2.3. Células solares com emissor dopado com boro	21
2.4. Células solares processadas com laser.....	22
2.4.1. Tipos de laser	24
2.4.2. Comprimento de onda do laser	24
2.4.3. Velocidade e frequência do feixe.....	25
2.4.4. Densidade de energia	26
2.4.5. Células solares com regiões dopadas por difusão com radiação laser	27
3. MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1. Características das lâminas de silício	30
3.2. Otimização dos parâmetros do laser	30
3.3. Processo de fabricação da célula solar	30

3.3.1. Texturação e limpezas químicas	31
3.3.2. Formação do emissor seletivo por radiação laser	33
3.3.3. Difusão de boro	35
3.3.4. Difusão de fósforo	35
3.3.5. Oxidação	36
3.3.6. Deposição do filme antirreflexo (AR)	36
3.3.7. Metalização por serigrafia	37
3.4. Caracterização das células solares	39
3.4.1. Tempo de vida dos portadores de carga minoritários.....	39
3.4.2. Curva I-V	40
3.4.3. Resistência de folha	42
3.4.4. Microscopias óptica e eletrônica de varredura	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
4.1. Células solares com emissor seletivo com parâmetros de difusão laser otimizados por Garcia [4]	44
4.2. Formulação de novos parâmetros de difusão com radiação laser.....	46
4.3. Resultados de células solares com emissores seletivos obtidos por novos parâmetros de difusão com radiação laser.....	48
4.3.1. Processo ESP02.....	48
4.3.2. Processo ESP03.....	53
4.3.3. Processo ESP04.....	56
5. CONCLUSÕES.....	60
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Processo teste para otimização dos parâmetros do laser.....	31
Figura 3.2: Processo de fabricação de células solares com emissores seletivos obtidos com radiação laser.	32
Figura 3.3. Superfície de uma lâmina de silício texturada. Imagem obtida em microscópio eletrônico de varredura.	33
Figura 3.4 Esquema do sistema Laser. Adaptado de [38].....	34
Figura 3.5. Equipamento do tipo planetário para deposição do filme AR [4].....	37
Figura 3.6. Esquema de funcionamento do equipamento Screen Printer [4].	38
Figura 3.7. Forno RTC LA-309 [4].....	39
Figura 3.8. Esquema do funcionamento do equipamento para medição do tempo de vida dos portadores minoritários pela reflexão de micro-ondas [46].	40
Figura 3.9. (a) Equipamento utilizado na medição da curva IV sob condições padrão e (b) detalhe da célula solar sobre a plataforma.	41
Figura 3.10. (a) Esquema de funcionamento do aparelho e (b) Cabeçote com as 4 pontas medidoras.	42
Figura 4.1: Região fundida pelo feixe laser utilizando os parâmetros de Garcia [4].	45
Figura 4.2: Mapa do tempo de vida dos portadores de carga em lâmina de silício com regiões: (a) lâmina sem passivação de superfícies e (b) detalhe da lâmina imersa em solução de iodo etanol para reduzir a recombinação nas superfícies. Nas regiões quadradas, houve incidência de radiação laser usando os parâmetros de Garcia [4].	46
Figura 4.4: Esquema de processos com radiação laser e diferentes parâmetros em cada lâmina, onde v_f é a velocidade do feixe e f_p a frequência dos pulsos ou do <i>shutter</i>	47
Figura 4.5: Mapeamento do tempo de vida para cada nível de foco: a) nível A, b) nível B e c) nível C.....	47

Figura 4.6: Imagem de microscopia óptica de lâminas de silício processadas com radiação laser com padrões de parâmetros A, B e C.....	51
Figura 4.7: Microscopia eletrônica de varredura em lâminas de silício processadas com padrões de parâmetros a) A1, b) A2 e c) A3.	51
Figura 4.8: Áreas irradiadas com os níveis de foco a) A1, b) B1 e c) C1.	51
Figura 4.9: Esquema de desfoque do laser, com escala de cores onde quanto mais escuro, maior a irradiância.	52
Figura 4.10: Célula solar do processo ESP02 onde a área fundida não se encontra, por completo, abaixo da região metalizada.	52
Figura 4.11: Área metalizada de uma célula solar do processo ESP02.....	53
Figura 4.12: Curvas J-V de algumas células do processo ESP03.	55
Figura 4.13: Distorção no design do emissor seletivo devido ao desfoque.....	57
Figura 4.14: Curvas J-V de células solares do processo ESP04, com diferentes níveis de foco.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Variações de sistemas de laser e seus respectivos parâmetros. R_{\square} é a resistência de folha da região em que ocorreu a difusão do dopante. Adaptado de [19].	28
Tabela 4.1: Parâmetros elétricos das células solares do processo ESP01, no qual foram usados parâmetros de processo laser extraídos de Garcia [4]. * Dispositivo de maior eficiência.	44
Tabela 4.2: Padrões de parâmetros do laser usados para formação do emissor seletivo.	46
Tabela 4.3: Parâmetros elétricos médios das células solares fabricadas no processo ESP02.	49
Tabela 4.4: Características elétricas dos dispositivos de maior eficiência para cada padrão de parâmetros de radiação laser utilizado no processo ESP02.	49
Tabela 4.5: Parâmetros elétricos médios dos dispositivos fabricados no processo ESP03.	54
Tabela 4.6: Células com maiores eficiências para cada padrão de parâmetros do processo ESP03.	54
Tabela 4.7: Parâmetros elétricos médios dos dispositivos fabricados no processo ESP04. Iluminação pela face n^+ .	56
Tabela 4.8: Características elétricas das células solares de maior eficiência para cada padrão de parâmetros do processo ESP04. Iluminação pela face n^+ .	56
Tabela 4.9: Parâmetros elétricos médios dos dispositivos fabricados no processo ESP04. Iluminação pela face p^+ .	59

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

α	Coeficiente de absorção	cm ⁻¹
AR	Antirreflexo	-
BSF	Campo retrodifusor (<i>Back Surface Field</i>)	-
Cz	Czochralski	-
EQE	Eficiência quântica externa	-
EQI	Eficiência quântica interna	-
FF	Fator de forma	-
f_p	Frequência de pulsos	Hz
FSF	Campo difusor frontal (<i>Front Surface Field</i>)	-
FZ	Zona flutuante (<i>Float Zone</i>)	-
GILD	Dopagem por laser imerso em gás (<i>Gas-immersed laser doping</i>)	-
IBC	Contato enterrado interdigitado (<i>Interdigitated Buried Contact</i>)	-
I_{sc}	Corrente de curto-circuito	mA
I_{mp}	Corrente no ponto de máxima potência	mA
J_{mp}	Densidade de corrente no ponto de máxima potência	mA/cm ²
J_{sc}	Densidade de corrente de curto-circuito	mA/cm ²
λ	Comprimento de onda	nm
LIMPID	Dopagem por fusão a laser de impureza pré-depositada (<i>Laser Induced Melting of Predeposited Impurity Doping</i>)	-
LDSE	Emissor seletivo por difusão a laser (<i>Laser-doped selective emitter</i>)	-
η	Eficiência	%
Nd:YAG	Granada de Itrio-Alumínio dopada com neodímio (<i>Neodymium-Doped Yttrium Aluminium Garnet</i>)	-
N_{melt}	Número de ciclos de fusão	-
T	Temperatura	°C
P	Pressão	Pa

PERC	Célula solar com emissor e face posterior passivada (<i>Passivated Emitter and Rear Cell</i>)	-
PECVD	Deposição química em fase vapor aprimorada por plasma (<i>Plasma enhanced chemical vapor deposition</i>)	-
PERT	Célula solar com emissor passivado e região posterior totalmente difundida (<i>Passivated Emitter Rear Tottally Diffused</i>)	-
P_{mp}	Potência máxima	W
R_s	Resistência em série	Ω
R_{\square}	Resistência de folha	Ω/\square
τ	Tempo de vida dos portadores de carga minoritários	μs
V_{mp}	Tensão no ponto de máxima potência	V
V_{oc}	Tensão de circuito aberto	V
V_f	Velocidade de translação do feixe	mm/s
w	Diâmetro do feixe	μm

RESUMO

SALVADOR, V. F. **Desenvolvimento e análise de células solares base n com emissor seletivo formado por radiação laser.** Porto Alegre. 2019. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

Com a indústria de células solares tendo como base a produção de células com estruturas n^+pp^+ e, tendo em vista a degradação das características elétricas proporcionadas pela exposição à radiação solar, faz-se necessária a introdução de estruturas alternativas nas linhas de produção. Com o objetivo de desenvolver e analisar células solares em silício tipo n, foi implementado e analisado um processo de fabricação de dispositivos n^+np^+ com emissor seletivo p^+ formado por radiação laser. Para reduzir os problemas de sobreposição do feixe laser e evitar a fusão e refusão de regiões da lâmina de silício, foram variados os parâmetros de operação do laser, como velocidade do feixe, frequência e foco. Foram fabricadas e caracterizadas células solares com emissores seletivos e homogêneos. Da análise com microscopia eletrônica de varredura, constatou-se que com a velocidade do feixe de 3000 mm/s e frequência do pulso de 20 kHz e 30 kHz (padrão 1 e 2, respectivamente) e três níveis (A, B e C) de enfoque do laser, se formam cavidades circulares com diâmetro de 60 μm a 110 μm . A eficiência máxima obtida em células solares n^+np^+ com emissor homogêneo foi de 15,2 % e com emissor seletivo e feixe focado sobre a lâmina de silício (padrão A1) foi de 13,8%. Salienta-se que houve células com emissores seletivos mais eficientes do que as de emissor homogêneo em quatro dos cinco processos realizados, sendo que no mesmo lote de processamento, a célula solar de emissor homogêneo alcançou 13,1%. Em relação ao dispositivo iluminado pela face p^+ , desta forma operando na configuração p^+nn^+ , o valor máximo de eficiência foi obtido com o padrão A2, sendo de 12,9 %, superando o maior valor anteriormente obtido no NT-Solar/PUCRS que era de 11,6 %.

Palavras-Chaves: Célula solar; Emissor seletivo posterior; Radiação laser.

ABSTRACT

SALVADOR, V. F. **Development and analysis of n-base solar cells with selective emitter formed by laser radiation.** Porto Alegre. 2019. Master. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

With the solar cell industry having n^+pp^+ cell structures as its production base and, having in mind that solar exposure causes degradation of electrical characteristics of long term, it is necessary to develop and optimize alternative structures. With the aim of developing and analyzing n type silicon solar cells, it was analyzed and implemented a fabrication process for n^+np^+ cells with selective emitters formed by laser radiation. To reduce the superposition problems of the laser beam and avoid cycles of melting and solidification of regions in the silicon wafer, parameters of the laser were varied, such as scan speed, frequency of pulses and focus. Solar cells with selective and homogenous emitters were manufactured and characterized. Regarding the scanning electron microscopy, it was observed that with a scan speed of 3000 mm/s and frequencies of pulses of 20 kHz and 30kHz (pattern 1 and 2, respectively), and three levels (A, B and C) of laser focus, circular cavities with diameters of 60 μm to 110 μm were formed. The maximum efficiency in n^+np^+ with homogenous emitters was 15.2% and, with selective emitters and focused laser beam (pattern A1) was 13.8%. It is important to point out that there were solar cells with selective emitter that were more efficient than with homogenous emitters in four out of the five processes, and in the same processing batch, the most efficient solar cell with homogenous emitter reached 13.1%. Regarding the device illuminated on the p^+ face, in this case operating as a p^+nn^+ cell, the maximum efficiency was obtained with the A2 pattern, being 12.9% efficient, exceeding the highest value previously obtained in NT-Solar/PUCRS, which was 11,6%.

Keywords: Solar cell; Selective Emitter; Laser radiation.

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1. Introdução

Com a crescente demanda de energia no mundo, buscam-se maneiras eficientes e sustentáveis de suprir tais necessidades. Atualmente, o mundo consome cerca de 25 PWh de energia elétrica, sendo somente 21% provindo de fontes renováveis [1]. Apesar de, dentre estas, apenas 2% ser obtida a partir de sistemas fotovoltaicos, o total de energia elétrica produzida a partir da energia solar cresceu mais de 280 vezes desde o ano 2000, indo de 1,15 TWh para 333,05 TWh em 2018 [2].

Dentre todas as células solares fabricadas e comercializadas, cerca de 95% são feitas com substratos de silício cristalino [3], sendo cerca de 5% destas fabricadas em silício tipo-n [3]. Dados de 2017 ainda indicam que por volta de 75% das células utilizam um campo retrodifusor de alumínio (*BSF - back surface field*), e menos de 20% são do tipo PERC (*passivated emitter and rear cell*).

Segundo o *International Technology Roadmap for Photovoltaic* (ITRPV) [3], 40% do custo total da célula é atribuído à lâmina de silício, fazendo com que uma diminuição da espessura resulte em uma redução substancial do valor total. Embora já existam produções em massa de células de 160 μm de espessura, estima-se que este valor diminua nos próximos anos à medida que o mercado se adapta à produção de células com lâminas mais frágeis.

Apesar de cerca de 95% das células de silício cristalino serem do tipo p, isto é, previamente dopada com boro, espera-se um crescente aumento na produção de células de base n, dopadas inicialmente com fósforo [3]. Isto se dá pela falta de

defeitos de boro-oxigênio no substrato, que levam a degradação das características elétricas após a exposição à radiação solar [4]. Além disso, células de base n são menos suscetíveis à contaminação por impurezas metálicas e possuem maior tempo de vida dos portadores de carga minoritários, possibilitando a fabricação de dispositivos de maior eficiência [5]. Atualmente, a célula solar mais eficiente produzida em substrato de silício monocristalino tipo-n tem eficiência de 26,7 %, produzida pelo Instituto Nacional Japonês de Ciência e Tecnologia Industrial Avançada [6].

1.2. Objetivos

Esta dissertação teve como objetivo desenvolver e analisar a eficiência de células solares Czochralski, de base n e com 180 μm de espessura, metalizadas por serigrafia, cujo emissor seletivo foi formado por difusão de boro com radiação laser aplicado em diferentes frequências, velocidades e focos.

A inovação deste trabalho encontra-se no desenvolvimento e análise dos diferentes parâmetros da difusão com laser, tais como frequência, velocidade e mudança de foco, para obtenção de células solares eficientes com metalização por serigrafia.

1.2.1. Objetivos específicos

- Analisar a superfície da lâmina de silício por meio de microscópio óptico e eletrônico de varredura para diferentes parâmetros de difusão com radiação laser, tais como frequência, velocidade e mudança de foco;

- Analisar as características elétricas e eficiência das células solares produzidas com difusão de boro com radiação laser sob diferentes condições de processo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Princípios de funcionamento de células solares

Células solares são definidas como dispositivos capazes de transformar a radiação eletromagnética provinda do Sol em energia elétrica. Tal processo acontece devido a um fenômeno denominado efeito fotovoltaico. A radiação eletromagnética absorvida pelo material acaba por excitar elétrons, fazendo com que sejam transferidos da banda de valência para a banda de condução, gerando um par elétron-lacuna¹. Dado tempo suficiente, tal par volta a se recombinar, reemitindo a radiação que inicialmente foi absorvida. No caso da célula solar, é de fundamental importância a coleta desses pares, a fim de produzir energia elétrica. Para isso, faz-se necessária uma junção pn, onde é criado um campo elétrico e uma diferença de potencial.

Tal zona é formada na interface de dois materiais semicondutores tipo p e tipo n, um com excesso de lacunas e outro com excesso de elétrons, respectivamente, dentro de um mesmo substrato. No caso de células solares feitas em substrato de

¹. Ao se referir à geração do par elétron-lacuna, diz-se do fenômeno da excitação do elétron na banda de valência para a banda de condução, e a geração de uma lacuna em seu lugar. O elétron, por si só, não é gerado, somente excitado a níveis superiores de energia.

silício tipo n, previamente dopado com fósforo, a junção pn é formada pela difusão de boro.

2.2. Célula solar na indústria

O principal material usado para produção de células solares é o silício, constituindo cerca de 95% do mercado atual. Dentre as muitas justificativas para este fato, vale ressaltar a abundância do material na crosta terrestre e preço de manufatura [7].

Das diferentes estruturas cristalinas do silício usadas na fabricação de células solares, até 2017, 40% do mercado era constituído por Si monocristalino, enquanto 60% era multicristalino. No entanto, prevê-se uma mudança neste cenário, principalmente devido aos avanços em estabilizar a degradação de dispositivos do tipo p monocristalino, aumentando a produção de dispositivos deste tipo [7].

Em processos industriais, vê-se um mercado que usa predominantemente substratos de silício do tipo p, dopados previamente com boro. Esta tendência, no entanto, tem mudado nos últimos anos com um crescimento na adoção do tipo n monocristalino, dopados com fósforo. Isto se dá, principalmente, pela busca por células solares mais eficientes, visto que dispositivos fabricados em substrato do tipo n monocristalino possuem, atualmente, eficiências superiores às produzidas com Si do tipo p [7].

Apesar dos primeiros dispositivos para fabricação de células solares terem sido feitos usando silício tipo n, o contexto histórico fez com que o silício tipo p tenha se tornado predominante. Com a primeira célula solar comercialmente disponível feita em 1954 pelos laboratórios Bell e, com o lançamento do satélite *Vanguard 1*, que utilizava células solares produzidas pela *Hoffman Electronics*, seu uso se tornou comum, principalmente, na corrida espacial das décadas de 50 e 60. Embora a primeira célula solar tenha sido feita em substrato de silício tipo n, estes dispositivos são mais suscetíveis a danos de partículas de alta energia e, devido ao uso espacial, o tipo p acabou se consolidando como padrão [4].

Apesar disso, as células solares de silício monocristalino tipo n ainda são superiores em questões como eficiência e durabilidade. Atualmente, os módulos fotovoltaicos mais eficientes disponíveis comercialmente são produzidos pelas empresas *Sunpower*, *CIC Choshu* e *Sunpreme*, atingindo eficiências de acima de 18%, com destaque para a primeira citada, atingindo mais de 21% [7].

2.3. Células solares com emissor dopado com boro

Com as células solares PERC crescendo na produção industrial [11], busca-se substituir as lâminas de silício tipo p devido a maior susceptibilidade de sofrer degradações induzidas pela radiação solar, como mencionado anteriormente.

A substituição do substrato tipo p para o tipo n acarreta em mudanças na estrutura da célula, pois dado que emissores frontais são o padrão industrial, para manter este modelo é necessária uma reestruturação do processo de fabricação, formando células p^+nn^+ . Na hipótese de formação de um emissor posterior com campo retrodifusor frontal (FSF – *front surface field*), usa-se a estrutura n^+np^+ . Enquanto a primeira estrutura se adequa melhor a substratos de baixa qualidade, a passivação da região p^+ , dopada com boro, é mais difícil de ser obtida. Na segunda estrutura, com emissor de alumínio, necessita-se de substratos de maior qualidade para serem obtidas elevadas eficiências quânticas internas (EQI), porém é facilmente empregada em processos industriais com deposição de Al por serigrafia [12].

Da primeira alternativa, um exemplo são as células PERL (*passivated emitter rear locally-diffused*), células com emissor homogêneo frontal formado pela difusão de boro e BSF seletivo formado pela difusão de fósforo. Tais células chegam a alcançar eficiências de 23,9 %, em contraste com células PERT (*passivated emitter rear totally diffused*), que chegam a 22,7 % [4].

Em contraste, uma das alternativas são as células n-PERT com junção posterior, chamada de BJ (*back junction*). Tais células possuem um FSF de fósforo, substrato tipo n e emissor posterior formado pela difusão de boro, seja em forno de quartzo com o dopante tribrometo de boro (BBr_3) ou por filmes finos de dopantes sólidos [11]. As vantagens de uma metalização localizada, ao invés de uma parte

posterior totalmente coberta de metais condutores, estão tanto na economia de pasta de alumínio, quanto na potencialidade de bifacialidade da célula solar.

Por causa do baixo tempo de vida dos portadores de carga minoritários, certos autores optam por usar substratos de Si-FZ. No processo de crescimento do lingote pelo método Cz, apesar de conter uma baixa densidade de defeitos na rede cristalina, a lâmina acaba por apresentar diversas impurezas residuais, como oxigênio, carbono e nitrogênio [13]. Tais impurezas diminuem o tempo de vida dos portadores de carga minoritários, pois os mesmos não conseguem chegar até a junção pn antes de se recombinarem com os portadores de carga majoritários.

No entanto, o uso de lâminas de Si finas viabiliza a utilização de emissores posteriores em células de menor qualidade ao diminuir a distância que o portador de carga terá de viajar até chegar à junção pn, aumentando a EQI. Moehlecke et al. [14] concluem esta afirmação em seu trabalho, demonstrando que nas células finas n^+np^+ a EQI atinge valores de 97 % na faixa de 600 nm a 800 nm, indicando uma boa coleta dos portadores de cargas na região do emissor posterior.

2.4. Células solares processadas com laser

A utilização de lasers na produção de células solares possui diversas aplicações. Há mais de 40 anos, o laser vem sendo usado para diferentes finalidades, desde o recozimento da lâmina de Si até difusões e isolamento de bordas [15] [16]. Isto se dá pela sua alta eficiência energética e grande precisão, fatores essenciais do ponto de vista industrial e científico.

O isolamento de bordas é um dos usos mais comuns de lasers na área de produção de células solares. Devido ao método usado para a difusão convencional em fornos de tubo de quartzo, os dopantes acabam por penetrar não somente na superfície frontal e na posterior da lâmina, mas também em sua lateral. Isso proporciona um contato elétrico entre as duas faces, o que causa curto-circuito entre os terminais da célula solar. Existem diversos métodos para o isolamento das bordas, como isolamento por plasma e isolamento por processo químico, porém o isolamento

por laser se destaca pela alta produtividade em processos industriais, bem como pelo fato de não gerar gases nem resíduos tóxicos [17].

No emissor homogêneo, um dopante é difundido em toda a superfície de uma das faces da lâmina de silício, a fim de criar a junção pn. Contudo, a concentração de dopante deve ser otimizada a fim de obter uma performance adequada do emissor ao mesmo tempo que minimiza a resistência de contato para a coleta dos pares elétron-lacuna [4]. Com a implementação do emissor seletivo, as áreas não metalizadas podem ser otimizadas separadamente daquelas que possuem o contato metálico, possibilitando uma região com menor número de recombinações e outra com uma ótima resistência de contato, respectivamente [18].

Dos diversos métodos para formação do emissor seletivo, destaca-se o enfoque desta pesquisa: o emissor seletivo formado por radiação laser. Existem basicamente três tipos de difusão a laser: dopagem de impureza pré-depositada por fusão induzida por laser (LIMPID - *laser induced melting of predeposited impurity doping*), processos feitos a partir de fontes líquidas de impurezas (*wet laser processing*) e GILD (*gas-immersed laser doping*) [19]. Do ponto de vista industrial, a dopagem por imersão em gases ou feita a partir de líquidos tornam o processo mais difícil, visto que requerem adaptação a equipamentos existentes ou a compra de novos. O LIMPID, contudo, somente requer, inerentemente, a deposição de impurezas a serem difundidas, o que já é feito em todo processo de difusão convencional, podendo ser feito com o borosilicato formado na superfície da lâmina, ou com a aplicação de um novo filme sobre a mesma.

No caso da dopagem por laser para formar emissores seletivos, também chamada de LDSE (*laser-doped selective emitter*), Sugianto et al. [19] relatam a necessidade de uma escolha com relação a qual laser deve ser usado, bem como seus parâmetros de trabalho, a fim de obter resultados ótimos para a aplicação desejada. Dentro dessas duas necessidades, encontra-se uma grande quantidade de itens a serem analisados.

2.4.1. Tipos de laser

Em 2016, cerca de dez bilhões de dólares foram usados na compra de lasers ao redor do mundo [20], sendo 30% deste valor destinado à indústria de processamento de materiais. Dentro deste ramo, Overton et al. relata que cerca de 13,4% dos equipamentos são lasers de estado-sólido, oferecendo vantagens como tamanhos compactos, grande tempo de vida útil e feixes de alta qualidade [21].

Devido a incessante busca pela redução do custo de produção e melhores eficiências das células solares, novas tecnologias usando lasers vêm sendo investigadas para o processamento de dispositivos de silício cristalino [19]. Dentre os usados, uma variedade de trabalhos publicados usam lasers do tipo Nd:YAG (*neodymium-n doped yttrium aluminium garnet*), capaz de gerar feixes de alta potência [22 - 29]. O comprimento de onda (λ) mais comum emitido por esse tipo de laser é de 1064 nm, podendo ser usados cristais para dobrarem ou triplicarem a frequência do feixe, conhecidos como SHG (*second harmonic generator*) e THG (*third harmonic generator*).

2.4.2. Comprimento de onda do laser

Para escolher o comprimento de onda adequado em processos que envolvam lasers, deve-se atentar primeiramente ao perfil de absorção do material a ser irradiado. No caso do silício, seu perfil é extensamente documentado, permitindo uma escolha precisa para a aplicação desejada. Como os comprimentos de onda mais fáceis de se obter e que possuem mais pesquisas relacionadas a emissores seletivos são de 1064 nm, 532 nm e 355 nm, esta seção procura se ater a eles, mostrando suas vantagens e desvantagens para aplicação na produção de células solares.

O laser de comprimento de onda de 355 nm não penetra no substrato de silício significativamente, chegando a profundidades de 10 nm [19]. Neste comprimento de onda, o silício possui um coeficiente de absorção por volta de $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$ [30], fazendo com que toda a radiação emitida pelo laser seja absorvida nos primeiros décimos de micrometros da lâmina. Isso significa que o substrato precisa ser irradiado por tempo suficiente para a fusão do silício e até uma profundidade significativa para a formação

da junção pn, mas o feixe não pode operar em altas potências, caso contrário o material irá sublimar. Estes detalhes fazem com que este tipo de laser não seja o mais escolhido na produção de emissores seletivos.

Lasers com comprimento de onda de 532 nm são relativamente comuns, sendo usados em uma variedade de processos, como remoção de tatuagens, canetas para observações noturnas, interferômetros, etc. [31]. Já em emissores seletivos, diversos estudos foram realizados usando este tipo de laser [19][25][26][32][33]. Isto se dá em parte pelo alto coeficiente de absorção (α) do silício para este comprimento de onda ($\alpha \approx 1 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ [30]), fazendo com que a radiação penetre o silício até uma profundidade de cerca de 1 μm [19], ideal para formação da junção no substrato.

Em contrapartida, o laser de 1064 nm já é amplamente difundido na indústria, sendo usado para diversas etapas na produção de células solares, desde marcações para controle interno (*laser marking*) até a clivagem das lâminas (*laser scribing*). Neste quesito, sua implementação não necessitaria de equipamentos adicionais, precisando somente da otimização dos seus parâmetros de trabalho para melhor formação do emissor seletivo. No entanto, o baixo coeficiente de absorção do silício para esse comprimento de onda ($\alpha \approx 67 \text{ cm}^{-1}$ [30]) impõe desafios para tal utilidade, fazendo com que a radiação seja absorvida até 100 μm de profundidade, causando tensões induzidas por gradiente térmico na lâmina [16].

2.4.3. Velocidade e frequência do feixe

Dentre os muitos parâmetros de trabalho, a velocidade com que o feixe se move e a frequência dos pulsos cumprem papéis importantes na formação do emissor seletivo. Ametowobla et al. [33] analisaram a degradação do tempo de vida dos portadores de carga minoritários, induzido pela radiação laser, em silício cristalino tipo p. Ao fazê-lo, introduziram um conceito importante nesta análise: o número de fusões sofrido por qualquer ponto na superfície do substrato (N_{melt}). Ao ser fundido, o substrato de silício se solidifica entre os pulsos, sendo que, a cada ciclo de fusão-solidificação, a estrutura cristalina do material é prejudicada, criando centros de recombinação e afetando diretamente o tempo de vida dos portadores de carga minoritários na região irradiada. Ao mesmo tempo, quanto maior o número de ciclos

de fusão, maior a concentração de impurezas, como oxigênio, carbono e nitrogênio, que acabam sendo introduzidos na área irradiada. Para o cálculo do número de fusões N_{melt} , os autores utilizam o diâmetro do feixe (w), a velocidade de translação do feixe (v_f) e a frequência de pulsos (f_p), como mostra a Equação 2.1.

$$N_{melt} = \frac{w}{\left(\frac{v_f}{f_p}\right)} \quad (2.1)$$

Além disso, a frequência dos pulsos do laser também afeta a densidade de energia (J/cm^2) recebida pela lâmina [32]. Lasers pulsados que funcionam a partir do fenômeno físico de inversão de população precisam de um certo tempo para que os elétrons sejam excitados a níveis de energia mais altos, podendo emitir um feixe de radiação com a potência desejada. Se a frequência de abertura do *shutter* for menor que o tempo para a inversão de população do laser, a potência do feixe será menor.

2.4.4. Densidade de energia

Devido aos diferentes equipamentos produzidos por diversas empresas, classificar lasers de acordo com sua potência se torna insuficiente na caracterização dos efeitos dos feixes em lâminas de silício. Isso se dá pelas diferentes frequências operantes, pela curva de distribuição de potência gaussiana e, principalmente, pelo diâmetro do feixe. Usa-se, portanto, o termo dose, ou densidade de energia (J/cm^2), quando se caracterizam os diferentes parâmetros de emissores seletivos obtidos por radiação laser.

Alguns estudos relacionando a densidade de energia com certas características elétricas foram realizados na última década [24][27][32][34][35]. Entre eles, a preocupação com os danos causados às lâminas pelo uso de altas doses é evidente, com Ametowobla et al. [33] e Poulain et al. [24] analisando o tempo de vida dos portadores de carga minoritários com relação à dose do laser. Ambos observaram um decréscimo do tempo de vida efetivo com o aumento da dose, mostrando uma necessidade do uso de baixas densidades de energia para a formação de um bom emissor seletivo. Correia et al. [27] também fez essa constatação, usando três diferentes comprimentos de onda e chegando a mesma conclusão que os demais.

Em contraste, Tjahjono (2010) e Slaoui et al. (2012) atentam ao fato de que, quanto maior a dose recebida pela superfície do substrato durante a difusão do dopante, menor é a resistência de folha da região dopada. Baixas resistências de folha na região do emissor seletivo são essenciais em sua formação, permitindo uma menor recombinação sob a malha metálica e menor resistência de contato entre metal e semicondutor.

Em vista dessas considerações, busca-se encontrar um equilíbrio adequado entre tempo de vida efetivo e resistência de folha, a fim da obtenção de um emissor seletivo de alta qualidade.

2.4.5. Células solares com regiões dopadas por difusão com radiação laser

A versatilidade dos sistemas laser permite aplicações em diversos tipos de processos de fabricação de células solares. Além da difusão para formação do emissor, homogêneo ou seletivo, a radiação laser também pode proporcionar a difusão do FSF, como mostram Wang et al. [36]. No referido artigo, os autores desenvolveram uma célula solar n^+np^+ com um emissor homogêneo e FSF seletivo, ao contrário do presente trabalho, que desenvolve uma célula com emissor seletivo e FSF homogêneo.

Algumas questões sobre a utilização do sistema laser no artigo de Wang et al. [36] são relevantes para se entender as dificuldades práticas na implantação de emissores seletivos, tais como a constatação da necessidade de um ótimo alinhamento da zona difundida pela radiação laser com a malha metálica a ser depositada. Os autores destacam a dificuldade de alinhamento e a necessidade de equipamentos de alta precisão e uma margem de cerca de 50 μm para a aplicação correta da malha no processo de serigrafia.

Wang et al. [36] alcançaram a eficiência de 20,65% no dispositivo de maior rendimento, constatando que as limitações para obtenção de maiores valores foram a tensão de circuito aberto (V_{oc}) e fator de forma (FF), devido ao baixo tempo de vida

dos portadores de carga minoritários no substrato e a qualidade da metalização (que produziu uma alta resistência em série, R_s), respectivamente.

Com relação a emissores formados por radiação laser, há o trabalho de Sugianto et al. [19], que apresenta a produção de uma célula solar n^+pp^+ com emissor frontal de fósforo. A principal contribuição deste artigo é a constatação da diferença da V_{oc} entre células com emissor homogêneo e células processadas com laser bem como a diferença entre os sistemas de lasers, variando seu comprimento de onda, velocidade e foco, como mostra a Tabela 2.1, onde * denomina um desfoque no laser.

Tabela 2.1: Variações de sistemas de laser e seus respectivos parâmetros. R_{\square} é a resistência de folha da região em que ocorreu a difusão do dopante. Adaptado de [19].

Laser	Comprimento de onda do Laser (nm)	Velocidade (mm/s)	$R_{\square}(\Omega/\square)$	Redução da V_{oc} (mV)	
				Pós Laser	Pós Recozimento
A	1064	33	412	54,4	50
A*	1064	10	23	42,6	42,9
B	532	10	5	49	42
C	532	10	25	30,7	21,9
D	532	500	2	17,9	6,1

Os autores concluíram que o sistema de laser D foi o mais eficiente para a difusão a laser, porém a resistência de folha aceitável, juntamente com a disponibilidade de lasers de 1064 nm em linhas de produção já existentes, justificam a investigação de métodos para otimização deste tipo de laser em processos de difusão.

Ademais, o trabalho de Sugianto et al. [19] demonstrou a viabilidade da utilização de difusão a laser em linhas de produção comercialmente disponíveis, visto que a única diferença entre as células produzidas convencionalmente e as apresentadas no respectivo trabalho foram as etapas adicionais de difusão a laser. Obtendo uma eficiência máxima de 18,5 %, ainda indicam uma possível melhora na EQI se a passivação de superfície for otimizada.

Além das células PERC, a difusão a laser pode ser utilizada em diferentes estruturas, como as células de contato enterrado (*IBC – interdigitated buried contact*). Dahlinger et al. [22] produziram células IBC de 22 % de eficiência usando difusão a laser na parte posterior de uma lâmina de silício tipo n. No referido trabalho, os autores desenvolveram uma célula fotovoltaica com emissor e BSF produzidos por difusão a laser. Além da difusão, o sistema laser é utilizado para abrir sulcos na face posterior do silício, a fim de promover o contato elétrico entre a célula e a pasta metálica usada no processo de serigrafia. Além disso, os autores variaram alguns parâmetros, como a razão entre os tamanhos do emissor e BSF, bem como a distância entre os mesmos, com o intuito de definir valores que resultassem em eficiências ótimas.

Dahlinger et al. [22] concluíram que é possível obter eficiências ainda maiores que as obtidas em seu trabalho, salientando que, com a possível substituição de etapas como a fotolitografia por processos com laser, com melhores passivações e áreas de contato, é possível atingir até 23 % de eficiência.

Dentre os trabalhos desenvolvidos no NT-Solar/PUCRS, pode-se destacar o trabalho realizado por Garcia [4], que desenvolveu e comparou células solares p^+nn^+ com emissores homogêneos e seletivos obtidos por radiação laser. Com relação a células solares com emissor homogêneo, Garcia [4] obteve dispositivos com eficiências de 14,3%, V_{oc} de 586 mV, J_{sc} de 32,7 mA/cm² e FF de 74,3%. Já em células com emissor seletivo, constatou uma diminuição das propriedades elétricas das células solares, com V_{oc} igual a 561 mV, J_{sc} de 31,3 mA/cm² e FF de 66%, alcançando eficiências da ordem de 11,6%. Esta redução na eficiência e demais parâmetros foi atribuída à deterioração do tempo de vida dos portadores minoritários nas regiões fundidas com a radiação laser. Os parâmetros de trabalho do laser usado por Garcia [4] correspondem a uma v_f de 500 mm/s, f_p igual a 60 kHz e potência de 17,1 W, correspondente a 95% da potência total do sistema laser.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Características das lâminas de silício

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram usadas lâminas de silício grau solar, crescidas pelo método Cz, tipo n, dopadas com fósforo. Essas lâminas vêm de um lingote com uma variação de resistividade de 1 Ω .cm a 20 Ω .cm. Inicialmente tem-se as lâminas com uma orientação de planos cristalinos {100} porém, após a texturação, são expostos os planos {111}.

3.2. Otimização dos parâmetros do laser

Antes da fabricação das células solares, foi necessário um processo de otimização dos parâmetros do laser, a fim de obterem-se os valores desejados para a formação de um emissor seletivo com características adequadas, como baixa profundidade de difusão, alta concentração de dopante, mínimo dano à estrutura cristalina e alto tempo de vida dos portadores de carga minoritários. A Figura 3.1 apresenta o esquema experimental utilizado para otimização de tais parâmetros.

A partir dos resultados das caracterizações desta etapa, foram feitos os ajustes necessários nos parâmetros de trabalho do laser para a otimização das características mencionadas anteriormente.

3.3. Processo de fabricação da célula solar

O processo base para fabricação da célula solar com emissor seletivo posterior formado por radiação laser é apresentado na Figura 3.2. É constituído pelas seguintes etapas: texturação, limpeza química, deposição de líquido contendo boro por *spin-on*, formação do emissor seletivo, difusão de boro em forno convencional, ataque do óxido

da face sem boro, limpeza química, difusão de fósforo em forno convencional, ataque do óxido das duas faces, limpeza química, oxidação, deposição do filme AR, deposição das pastas metálicas para metalização por serigrafia, queima das pastas em forno de esteira e isolamento de bordas em laser.



Figura 3.1: Processo teste para otimização dos parâmetros do laser.

Em cada lâmina de silício foram fabricadas 9 células solares quadradas, de $4,18 \text{ cm}^2$, com malha metálica de 8 trilhas com $100 \mu\text{m}$ de largura. As nove trilhas são conectadas a uma barra coletora (*busbar*).

Foram produzidas células solares com emissores p^+ homogêneos, emissores seletivos com parâmetros otimizados por Garcia [4] e com os emissores seletivos desenvolvidos neste trabalho com diferentes parâmetros de operação do equipamento laser.

3.3.1. Texturação e limpezas químicas

A primeira etapa do processo de fabricação da célula solar é a texturação de suas superfícies, feita em sua respectiva capela. Esse ataque, além de remover imperfeições da superfície da lâmina, forma micropirâmides, diminuindo sua

refletância de cerca de 30 % para 11 %. Isso se dá por uma imersão das lâminas em uma solução de hidróxido de potássio (KOH), álcool isopropílico e água deionizada, em temperaturas de 80 ± 20 °C, por cerca de 40 minutos [37]. A Figura 3.3 apresenta a superfície de uma lâmina de Si com as micropirâmides.

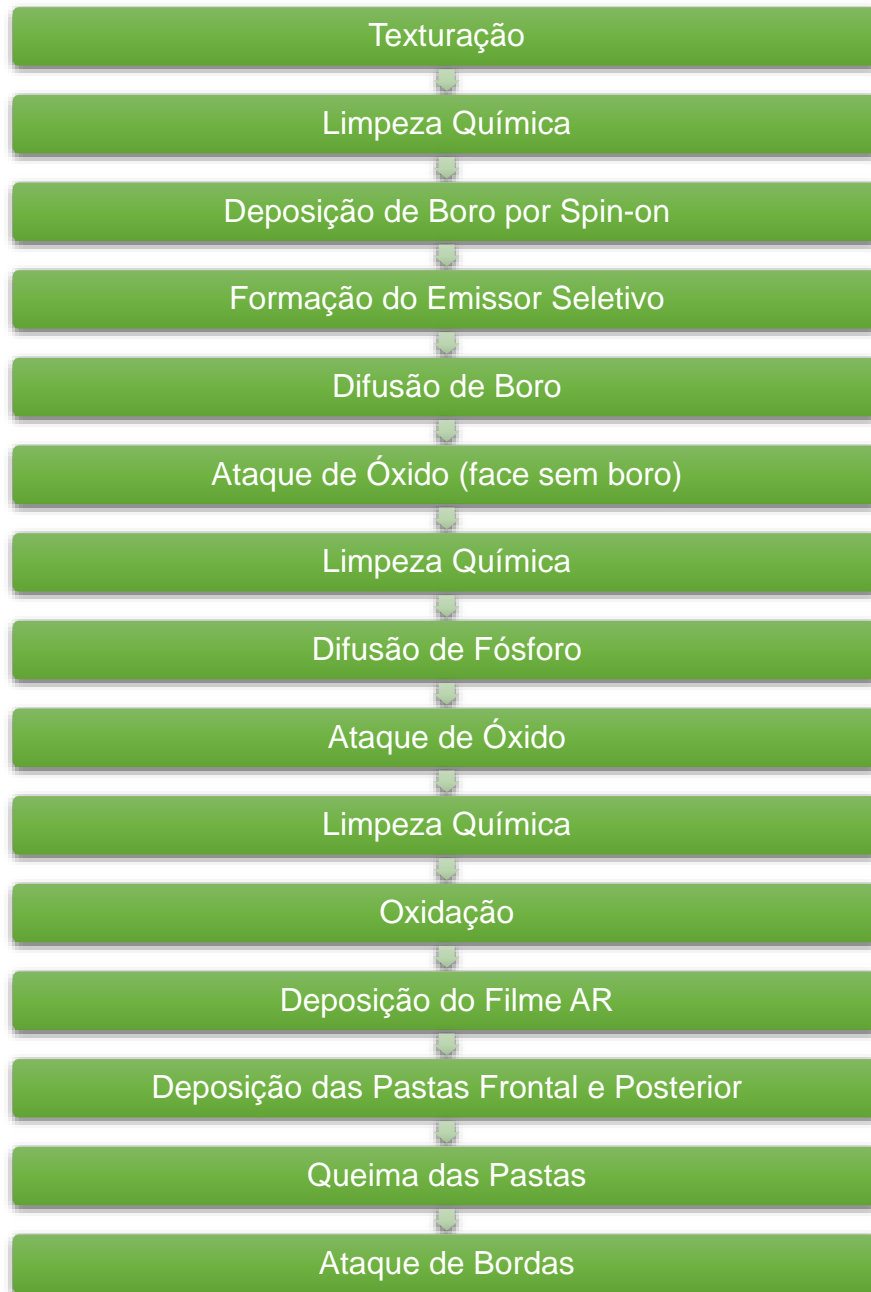


Figura 3.2: Processo de fabricação de células solares com emissores seletivos obtidos com radiação laser.

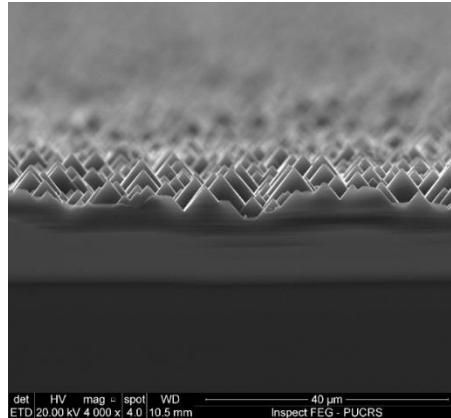


Figura 3.3. Superfície de uma lâmina de silício texturizada. Imagem obtida em microscópio eletrônico de varredura.

Após a texturação, assim como depois de cada um dos processos de difusão, é importante a etapa de limpeza das lâminas, evitando a contaminação dos diferentes equipamentos e impurezas indesejadas nas diferentes etapas de processamento da célula. A primeira limpeza é realizada na capela de metais, sendo usada uma única vez após a texturação, usando uma solução de HF (1,2%) diluída em água, usada para retirada inicial de impurezas na superfície da lâmina. Em seguida é produzida uma solução RCA-2 ($\text{H}_2\text{O}_{\text{DI}}:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}_2$, 5:1:1), mantida em 80 °C. Essa solução remove qualquer íon metálico deixado na superfície da lâmina pelas contaminações com os diferentes ambientes pelo qual passou, e forma uma fina camada de óxido em sua superfície, protegendo-a de futuras impurezas do ambiente. É importante notar que, após cada solução, são feitos cinco enxágues em água deionizada para retirada das soluções da lâmina. A primeira etapa de limpeza é então repetida, imergindo as lâminas novamente em HF diluído e, após o enxague, em RCA-2, porém desta vez, na capela de limpezas. Esta segunda etapa da limpeza é repetida após cada uma das difusões, seja em forno convencional ou usando radiação laser.

3.3.2. Formação do emissor seletivo por radiação laser

A formação do BSF e do emissor seletivo foi realizada por meio de dopagem de boro na parte posterior da lâmina. Para isso, é depositada uma solução alcoólica chamada PBF20, da fabricante *Filmtronics*, sobre a lâmina colocada em um equipamento chamado *Spinner*, cuja função é rotacionar a lâmina a 2000 rotações por minuto durante 30 segundos para um recobrimento homogêneo do líquido sobre a

mesma. Após este procedimento, as lâminas são introduzidas em uma estufa e mantidas a 200 °C por 20 minutos, a fim de evaporar os solventes do líquido dopante.

Para formação do emissor seletivo, foi usado um sistema de laser Nd:YAG pulsado infravermelho modelo DP20F, fabricado pela FOBA, com comprimento de onda na faixa de 1060 nm a 1070 nm. O feixe tem um diâmetro de 50 μm , podendo atingir velocidades de até 5000 mm/s, potência nominal de 18 W e máxima de 25 W. Sendo um sistema pulsado, o laser tem frequências de operação limitadas, de 20 kHz a 100 kHz, porém também é possível alterar o tempo de abertura e fechamento do *shutter*, o que influencia no processo de fusão do substrato.

O sistema do laser é composto por um bastão de cristal de óxido de ítrio e alumínio, dopado com neodímio, que, ao ser excitado por uma lâmpada, geralmente do tipo *flash*, absorve a energia provinda do feixe de luz e, por meio de um fenômeno chamado inversão de população, emite um feixe de radiação laser na faixa do infravermelho. Este feixe é então expandido e direcionado, por meio de galvanômetros conectados a espelhos, para a lente focalizadora, como mostra a Figura 3.4.

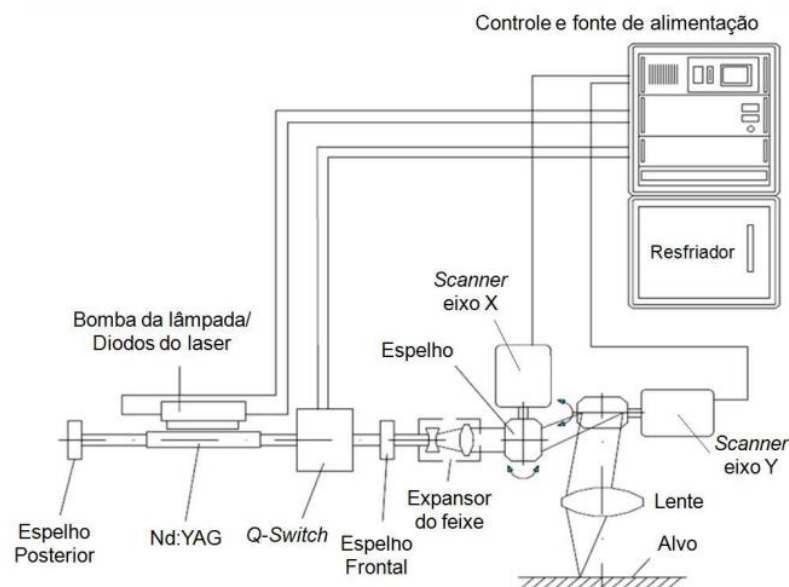


Figura 3.4 Esquema do sistema Laser. Adaptado de [38].

Para a formação do emissor seletivo em áreas pré-determinadas, é utilizado um *software* de design chamado FOBA MarkUS, por meio do qual é possível ajustar

os parâmetros de trabalho do laser, importar vetores de outros trabalhos e editar os desenhos de tais trabalhos para a aplicação desejada.

3.3.3. Difusão de boro

Após a difusão de boro com laser, a lâmina passa por um processo de difusão em forno de difusão de tubo de quartzo da marca *Bruce*, modelo BDF4, onde é submetida a temperatura de 970 °C por 20 minutos, parâmetros definidos em trabalhos anteriores [4] [39]. O processo de dopagem em forno convencional possui a vantagem de formar um emissor homogêneo com baixas profundidades de difusão, fazendo com que a junção pn do dispositivo esteja por volta de 0,8 µm dentro do substrato.

Juntamente à difusão, faz-se uma etapa de oxidação das lâminas, onde o forno é carregado de O₂ e aquecido a temperatura de 900 °C. Essa etapa produz o crescimento de uma fase mista de B₂O₃ (trióxido de boro) – SiO₂ (dióxido de silício), chamado de silicato de boro, fazendo com que a face dopada com boro não seja contaminada pelo fósforo dopante da difusão seguinte [40].

3.3.4. Difusão de fósforo

Para formação do emissor n⁺ da célula solar é realizada uma difusão de fósforo na superfície frontal da lâmina. Para tal difusão, usa-se o mesmo forno da etapa anterior, porém em outro tubo, com o intuito de evitar contaminações por dopantes diferentes em outros processos. A temperatura de difusão do fósforo utilizada foi de 845 °C por um período de 50 minutos [41].

Durante essa etapa, o dopante POCl₃ (cloreto de fosforila), inicialmente em forma líquida, é conduzido até o tubo de quartzo por um gás portador, neste caso N₂ (gás nitrogênio). Ao entrar em contato com a lâmina de silício, o dopante passa por duas reações químicas expressas nas Equações 3.1 e 3.2.





Durante esta etapa, o fósforo produzido pelas reações químicas difunde substitucionalmente na rede cristalina, e forma uma camada de silicato de fósforo.

Após esta etapa, faz-se necessário uma limpeza química mais agressiva, a fim de retirar toda camada de silicato de boro e fósforo, antes da etapa de oxidação. Para tal, é utilizado HF 40%, seguido de uma limpeza RCA-2.

3.3.5. Oxidação

Para diminuir a velocidade de recombinação na superfície do silício, faz-se necessário o crescimento de dióxido de silício como agente passivador em ambas as faces da lâmina. Tal crescimento acontece por meio de oxidação térmica em um forno convencional de tubo de quartzo da marca *Tystar*, modelo *Mini-Tytan 4500*.

O forno é aquecido até 800 °C em um ambiente de nitrogênio, para então as lâminas serem introduzidas. Uma vez que as lâminas tenham sido posicionadas no interior do tubo de quartzo e a temperatura seja estabilizada em 800 °C, se introduz oxigênio no tubo, iniciando a etapa de oxidação. As lâminas são então deixadas por 45 minutos, tempo suficiente para que uma camada de óxido de silício cresça em ambas as faces [41].

3.3.6. Deposição do filme antirreflexo (AR)

O filme antirreflexo tem como função diminuir a refletância da superfície da célula solar. Para isso, é depositado um filme fino de TiO₂ sobre a camada passivadora na face frontal da célula. Devido às propriedades físicas do TiO₂, a espessura ideal pode ser estimada para ter cerca de 60 nm [42], fazendo com que a refletância na faixa do espectro visível decaia cerca de 3% [43], aumentando a eficiência da célula.

As lâminas são depositadas em um suporte tipo planetário, a fim de obter uma deposição uniforme do filme AR, enquanto o material para deposição é colocado em um cadinho no centro do equipamento, como mostra a Figura 3.5. O equipamento usado é uma evaporadora da marca *Temescal*, modelo BJD-2000.

Dentro da câmara de processamento, o material é depositado sobre as lâminas em um suporte, dentro de uma câmara sob pressão de 10^{-4} Pa a 10^{-5} Pa, e irradiado por um feixe de elétrons. O feixe faz com que o material sublime, se depositando na superfície das lâminas. A espessura do filme é controlada automaticamente pelo equipamento, utilizando sensores piezoelétricos que detectam a frequência de colisão de partículas do filme fino a ser depositado.

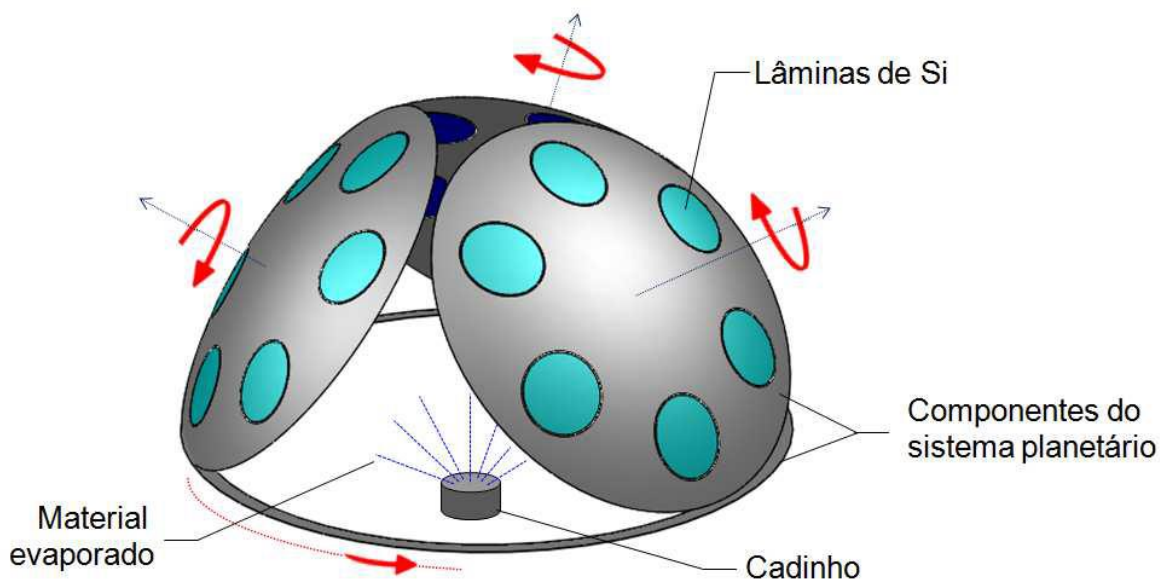


Figura 3.5. Equipamento do tipo planetário para deposição do filme AR [4].

3.3.7. Metalização por serigrafia

Para formação dos contatos metálicos da célula solar, é usado o método de metalização por serigrafia no equipamento *Screen-Printer MSP-485*, da empresa *Affiliated Manufacturers Inc.*, que consiste na aplicação de uma pasta metálica na superfície da lâmina. Esta pasta é depositada sobre uma máscara de poliéster que, por sua vez, é colocada sobre a lâmina a ser metalizada. Para aplicação da malha,

um rodo ajustável passa pela máscara, fazendo com que a pasta passe para o outro lado da mesma e, conseqüentemente, seja depositada sobre a lâmina. Neste trabalho foram usadas as pastas PV3N1 e PV17F, as duas produzidas pela *DuPont*. As máscaras a serem usadas foram desenvolvidas e otimizadas por trabalhos anteriores realizados no NT-Solar/PUCRS, sendo utilizado somente o modelo para células de 4,18 cm². A Figura 3.6 mostra o esquema para deposição da malha metálica no equipamento Screen Printer.

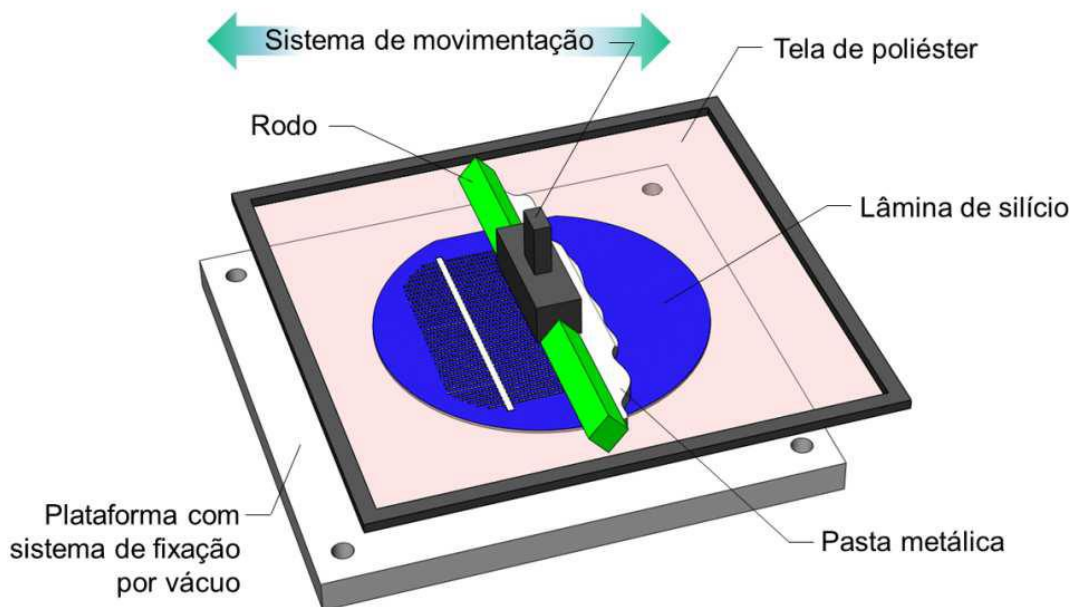


Figura 3.6. Esquema de funcionamento do equipamento Screen Printer [4].

Para secagem da pasta metálica, a lâmina passa por um forno de esteira modelo LA-309 fabricado pela *Radiant Technology Corporation*. O forno é aquecido por lâmpadas halógenas, operando na faixa do espectro visível e infravermelho, até 270 °C e 300 °C para as respectivas pastas mencionadas anteriormente. A esteira do forno opera a uma velocidade variável que, para o processo deste projeto, é de 33 cm/min [44]. Após a secagem, é necessário a queima da pasta, realizada no mesmo forno a uma temperatura de 850 °C e velocidade de esteira de 300 cm/min [45]. A Figura 3.7 mostra o esquema de funcionamento interno do forno de esteira.

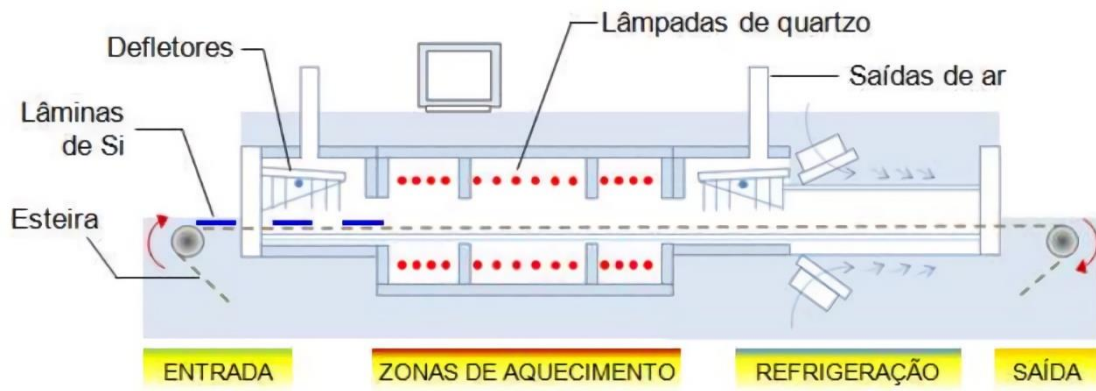


Figura 3.7. Forno RTC LA-309 [4].

3.4. Caracterização das células solares

Após a fabricação é realizada a caracterização das células solares, etapa necessária para o diagnóstico do desempenho das mesmas.

3.4.1. Tempo de vida dos portadores de carga minoritários

Para medição do tempo de vida dos portadores de carga minoritários (τ), foi usado o equipamento WT-2000PV, produzido pela empresa *Semilab*, utilizando o método μ -PCD (*microwave induced photoconductivity decay*), com e sem passivação da superfície da lâmina. Este método funciona baseado no princípio do decaimento da fotocondutividade onde, sob irradiação constante de um laser com comprimento de onda de 905 nm, a fotocondutividade da lâmina consegue chegar a um certo nível e, quando o feixe cessa, ela sofre um decaimento. O tempo de vida dos portadores de carga na região iluminada é, portanto, calculado a partir do tempo de decaimento da fotocondutividade desta região. Para reduzir a recombinação nas superfícies, a lâmina pode ser imersa em solução de iodo-etanol. A Figura 3.8 mostra o esquema de funcionamento do equipamento.

O tempo de decaimento é medido a partir de uma antena circular, situada acima da lâmina, medindo a refletância da amostra, já que a mesma é uma função da condutividade da lâmina [46].

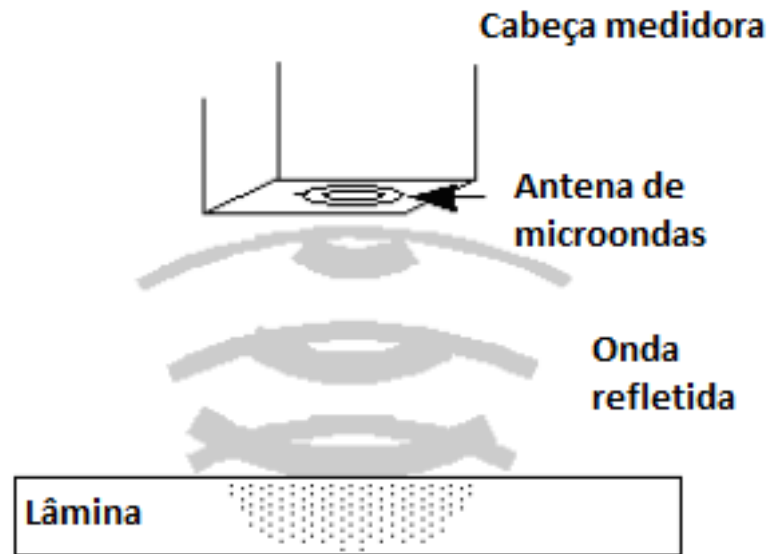


Figura 3.8. Esquema do funcionamento do equipamento para medição do tempo de vida dos portadores minoritários pela reflexão de micro-ondas [46].

3.4.2. Curva I-V

Uma das mais importantes caracterizações a ser feita em células solares é a medição da curva I-V. Esta medição permite simular como a célula se comporta sob a radiação solar, informando suas características elétricas mais importantes. Para isso, faz-se uso de um equipamento chamado simulador solar, modelo *CT150AAA* fabricado pela empresa *PET – Photo Emission Tech., Inc.* A Figura 3.9 mostra o esquema de funcionamento do equipamento, ilustrando como a formação da curva IV é feita pelo medidor.

A célula é posta sobre uma plataforma de metal, que serve como um dos terminais para medição, e duas ponteiras são postas sobre seus contatos elétricos frontais. Após, liga-se um sistema de vácuo para a célula se fixar à mesa, seguido de uma iluminação de 1000 W/m^2 e espectro solar AM1,5G. A temperatura da célula é mantida a $25 \text{ }^\circ\text{C}$, condição padrão para medição da célula.

Uma fonte de tensão variável aplica uma diferença de potencial sobre a célula, gerando uma corrente elétrica medida por um amperímetro conectado em série. Um

voltímetro conectado em paralelo à célula mede a diferença de potencial na célula solar, enquanto o amperímetro mede a corrente resultante. Todo esse processo é feito automaticamente por um computador ligado ao equipamento, gravando todos os dados para, posteriormente, ser construído um gráfico chamado de curva I-V. A partir desta curva I-V são determinados os parâmetros mais importantes da célula solar, tais como:

- Corrente de curto-circuito (I_{sc});
- Tensão de circuito aberto (V_{oc});
- Máxima potência (P_{mp});
- Corrente e tensão no ponto de máxima potência (I_{mp} e V_{mp});
- Fator de forma (FF).

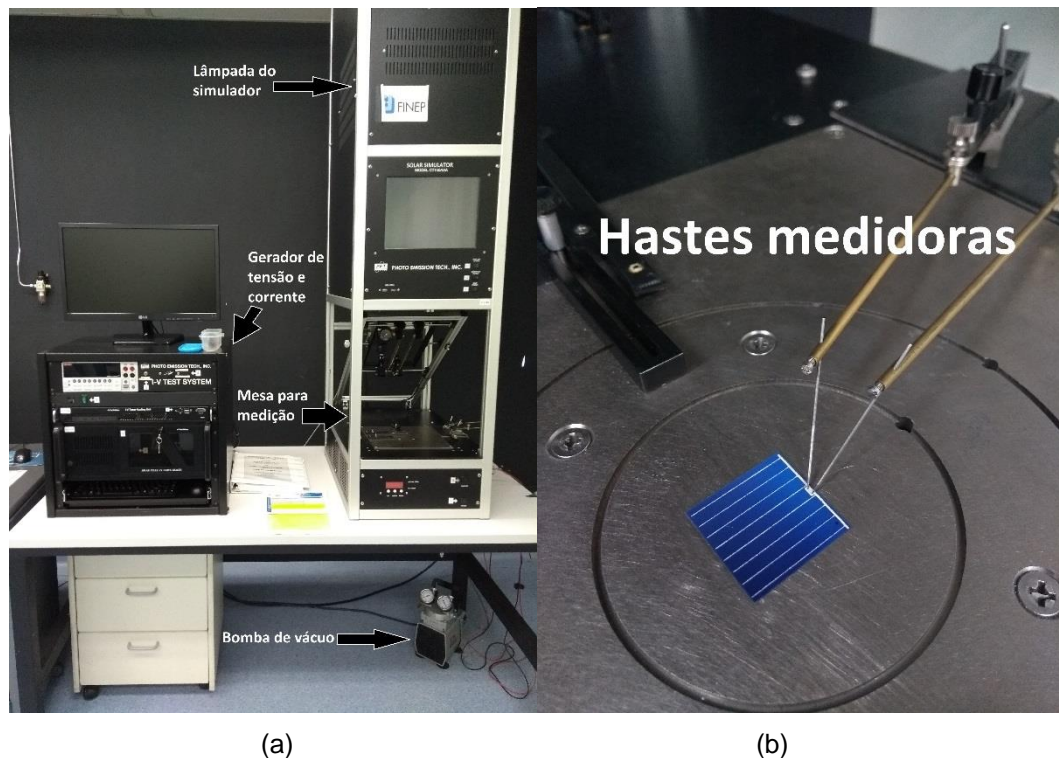


Figura 3.9. (a) Equipamento utilizado na medição da curva IV sob condições padrão e (b) detalhe da célula solar sobre a plataforma.

Com esses parâmetros, é possível calcular a eficiência da célula, expressa pela Equação 3.3. Os parâmetros A e G correspondem à área da célula e a irradiância incidente, respectivamente.

$$\eta = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{A \cdot G} \cdot 100\% \quad (3.3)$$

3.4.3. Resistência de folha

Uma das caracterizações mais importantes para medição de dopagem é a resistência de folha (R_{\square}). Com este método, é possível obter a condutividade de uma certa região dopada da lâmina e, subsequentemente, sua resistividade. Na resistência de folha utilizando a técnica de quatro pontas (*four point probe*), quatro hastes metálicas entram em contato com a superfície do substrato dopado. As duas hastes internas aplicam uma diferença de potencial sob a superfície da lâmina, gerando uma corrente elétrica que é medida por meio das duas hastes externas. Desta forma, estima-se a resistência daquela área medida, definida como resistência de folha, como mostra a Figura 3.10.

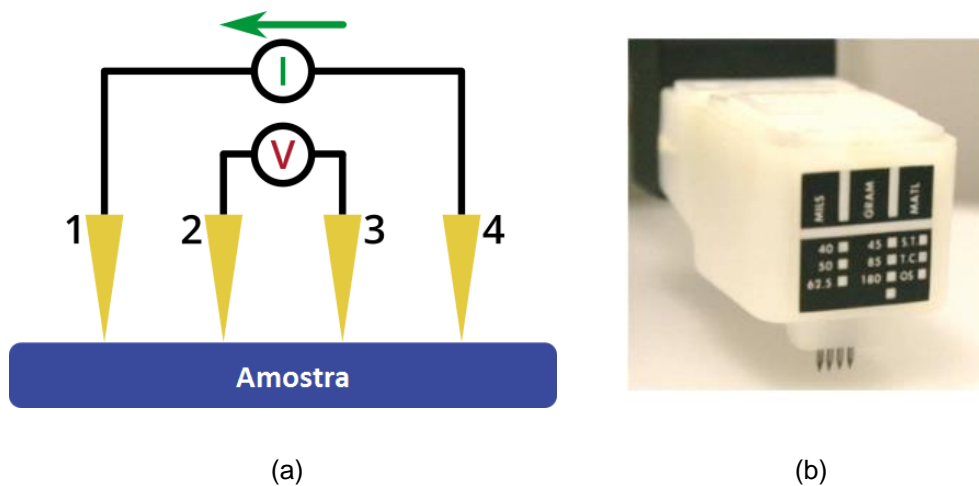


Figura 3.10. (a) Esquema de funcionamento do aparelho e (b) Cabeçote com as 4 pontas medidoras.

A resistência de folha da região dopada depende somente da resistividade (ρ) do material e de sua espessura (e), sendo obtida através da Equação 3.4.

$$R_{\square} = \frac{\rho}{e} \quad (3.3)$$

Usando este método, não é possível distinguir qual tipo de dopante foi introduzido na lâmina, tampouco o tipo de substrato, somente os níveis de resistência elétrica proporcionados pela difusão de impurezas na lâmina.

3.4.4. Microscopias óptica e eletrônica de varredura

Para determinar os parâmetros adequados de utilização do laser, é necessário o uso de microscopias óptica e eletrônica de varredura, a fim de analisar certas características da região do material afetada pela radiação, tais como profundidade, formato, espaçamento, etc.

A microscopia óptica foi utilizada para determinação do espaçamento entre as regiões afetadas pelo feixe laser, fator dependente da velocidade de escaneamento do laser e da frequência de abertura do *shutter*. O equipamento usado foi o microscópio óptico *BX51M*, da marca *Olympus*.

Para análises mais detalhadas, é usado um Microscópio Eletrônico de Varredura, com o objetivo de inspecionar as características da cavidade feita pela radiação laser. Cada cavidade é então comparada as suas respectivas células solares, a fim de estabelecer uma relação entre suas propriedades físicas e características elétricas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Células solares com emissor seletivo com parâmetros de difusão laser otimizados por Garcia [4]

Para padronização dos resultados e comparações posteriores, o primeiro processo realizado foi uma repetição do processo de fabricação que resultou nas células mais eficientes de Garcia [4]. O processo consistiu das etapas apresentadas na Figura 3.2 e discutidas na seção de metodologia, utilizando os padrões de parâmetros do laser que Garcia [4] usara: $v_f = 500$ mm/s e $f_p = 60$ kHz e potência de 17,1 W.

A Tabela 4.1 resume os resultados obtidos. Foi constatado que, com tais parâmetros do processo com laser, a V_{oc} e J_{sc} das células solares com emissores seletivos decresceram em relação as de emissor homogêneo, havendo em média uma perda de cerca de 3% de eficiência.

Tabela 4.1: Parâmetros elétricos das células solares do processo ESP01, no qual foram usados parâmetros de processo laser extraídos de Garcia [4]. * Dispositivo de maior eficiência.

Estrutura	Nº de células	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	η (%)
n⁺np⁺ Emissor seletivo	27	525 ± 28	31 ± 3	0,65 ± 0,10	10,6 ± 1,4
	01*	541,2	34,0	0,676	12,4
n⁺np⁺ Emissor homogêneo	18	589 ± 4	32,9 ± 1,8	0,68 ± 0,07	13,2 ± 1,6
	01*	595,1	35,0	0,730	15,2

Após a análise destes resultados, foram feitas duas caracterizações para otimização dos parâmetros do laser: análise de superfície com microscopia eletrônica de varredura e medição do tempo de vida dos portadores de carga minoritários. A Figura 4.1 mostra uma imagem de MEV da região em que ocorreu o processo com

radiação laser utilizando os parâmetros usados por Garcia [4]. Pode-se observar que na região onde a radiação laser incidiu, as micropirâmides desapareceram, resultado da fusão e solidificação do silício.

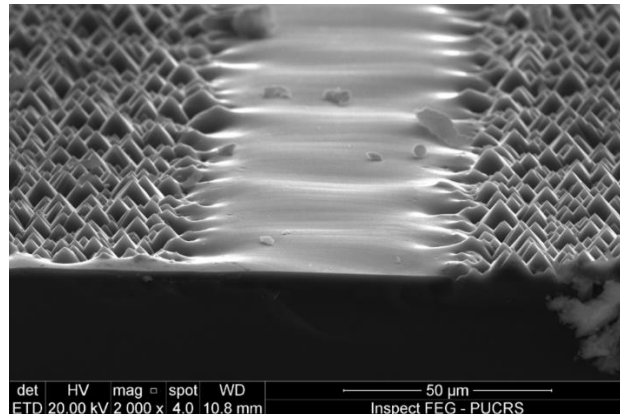


Figura 4.1: Região fundida pelo feixe laser utilizando os parâmetros de Garcia [4].

Ao ser irradiada, a região atingida pelo feixe de radiação laser acaba fundindo e solidificando rapidamente, gerando discordâncias em diversos pontos da região, afetando o tempo de vida dos portadores de carga minoritários, como relataram Ametowobla et al. [33].

Para analisar esta queda no τ , realizou-se o processo com radiação laser sobre nove regiões de uma lâmina de silício, sem deposição de boro. Desta maneira, se poderia analisar o efeito da fusão/solidificação sobre o tempo de vida dos portadores minoritários, sem a influência da recombinação de portadores em regiões altamente dopadas com boro, que serão usadas nas células solares. A Figura 4.2 mostra a diferença do tempo de vida base da lâmina em comparação com a região irradiada, utilizando os parâmetros de Garcia [4]. Para a amostra sem passivação de superfícies, a diferença entre o menor e maior τ observado nas regiões com e sem incidência de radiação laser, respectivamente, não é elevada, pois a recombinação na superfície deve ser o processo de recombinação de portadores de carga mais eficaz. No entanto, quando se observa o detalhe de duas regiões processadas com laser na Figura 4.2.b, para a amostra passivada com iodo-etanol, a diferença é 10 μ s para até 220 μ s entre as regiões com e sem incidência de laser, respectivamente. Tal diferença em

τ justifica, em parte, a diminuição nos parâmetros elétricos dos dispositivos de emissor seletivo frente aos de emissor homogêneo, observada nos resultados da Tabela 4.1.

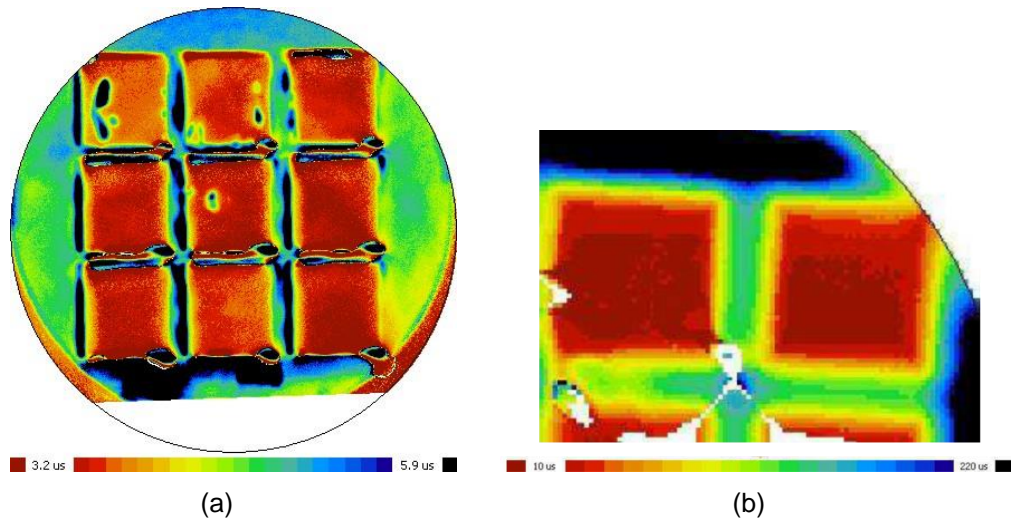


Figura 4.2: Mapa do tempo de vida dos portadores de carga em lâmina de silício com regiões: (a) lâmina sem passivação de superfícies e (b) detalhe da lâmina imersa em solução de iodo etanol para reduzir a recombinação nas superfícies. Nas regiões quadradas, houve incidência de radiação laser usando os parâmetros de Garcia [4].

4.2. Formulação de novos parâmetros de difusão com radiação laser

Baseando-se nos estudos de Ametowobla [33] e na Equação 2.1, derivada de seu trabalho, foram definidos parâmetros de trabalho do laser para que não houvesse sobreposição dos feixes, chamados de padrões 1, 2 e 3, correspondendo a uma combinação de velocidade de escaneamento do feixe e frequência do *shutter*, como mostra a Tabela 4.2. Foram produzidas nove amostras por lâmina, cada uma com 4,18 cm² de área, como mostra a Figura 4.4.

Tabela 4.2: Padrões de parâmetros do laser usados para formação do emissor seletivo.

Padrão	Velocidade do feixe (mm/s)	Frequência do <i>shutter</i> (kHz)
1	3000	20
2		30
3	2000	20

Juntamente com a utilização de parâmetros para evitar a sobreposição de incidência do feixe laser, a partir dos resultados mostrados por Sugianto et al. [19], foram utilizados três níveis diferentes de foco com o intuito de diminuir a densidade de energia, aumentando a área irradiada: a) nível A, focado, b) nível B, desfocado em 5 mm no sentido da lente e c) nível C, desfocado 7 mm no sentido da lente.

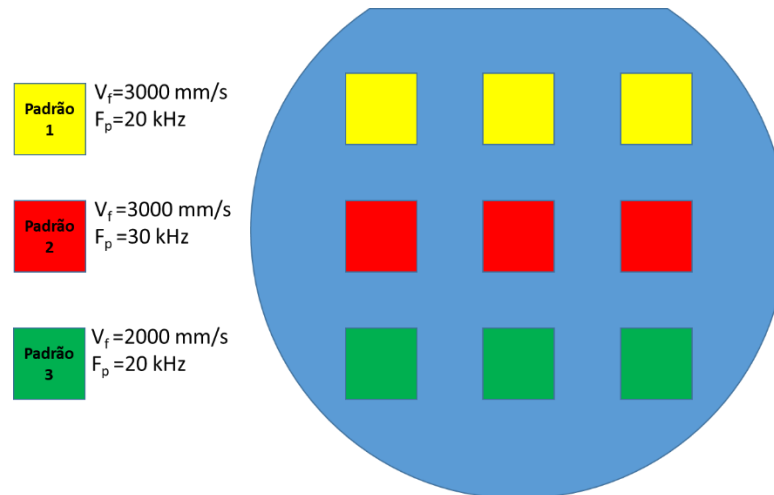


Figura 4.4: Esquema de processos com radiação laser e diferentes parâmetros em cada lâmina, onde v_f é a velocidade do feixe e f_p a frequência dos pulsos ou do *shutter*.

Em função do emprego de diferentes níveis de foco, fez-se uma análise do tempo de vida dos portadores de carga minoritários das amostras após o processamento em cada nível, sendo que os resultados são mostrados na Figura 4.5.

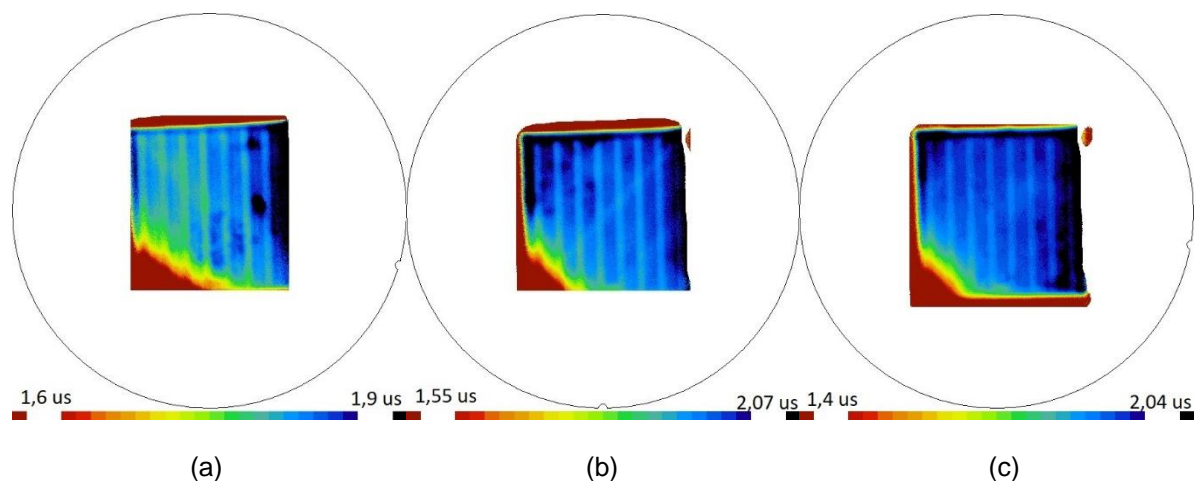


Figura 4.5: Mapeamento do tempo de vida para cada nível de foco: a) nível A, b) nível B e c) nível C.

As amostras apresentadas na Figura 4.5 foram processadas com $v_f = 3000$ mm/s e $f_p = 20$ kHz e as medidas foram realizadas sem passivação de superfícies. Nestas amostras, o laser incidiu somente nas linhas que ficaram sob a malha metálica, sendo identificados na Figura 4.5 pelas linhas com cor mais clara. A partir dos valores do tempo de vida (τ) mostrados na Figura 4.5 para cada nível de desfoque não se pode concluir que houve uma redução da degradação da qualidade das regiões onde incidiu a radiação laser. Com passivação de superfícies, as diferenças produzidas sobre τ pelos diferentes os parâmetros do laser poderiam ser mais evidentes, mas não se conseguiu realizar a medição do τ com passivação de superfícies.

Assim, para avaliação dos diferentes parâmetros de processamento com laser, foram utilizadas cinco lâminas, três com formação do emissor seletivo (cada uma com um nível de desfoque diferente) e duas com emissor homogêneo.

4.3. Resultados de células solares com emissores seletivos obtidos por novos parâmetros de difusão com radiação laser

4.3.1. Processo ESP02

Para o segundo processo, foram utilizados os padrões de parâmetros mencionados na Tabela 4.2. Para tal, utilizou-se o desenho a partir do qual a máscara de serigrafia foi elaborada como guia do escaneamento a laser da lâmina, reduzindo as chances de haver incompatibilidade entre a área fundida e a malha metálica. A Tabela 4.2 apresenta os parâmetros elétricos médios das células solares produzidas e a Tabela 4.4 mostra os resultados das células fotovoltaicas de maior eficiência para cada padrão de parâmetro, bem como a com emissor homogêneo.

Observa-se pelos resultados das Tabelas 4.3 e 4.4 que o padrão A foi o que produziu a menor queda de tensão de circuito aberto (V_{oc}) das células solares de emissor seletivo em relação as de emissor homogêneo, sendo da ordem 14 mV. Na Tabela 4.1, a diferença entre os valores médios de V_{oc} foi de 64 mV. A menor redução observada em V_{oc} nos dispositivos processados com o padrão A indicam que o

processo com laser produziu uma menor degradação do tempo de vida dos portadores minoritários.

Tabela 4.3: Parâmetros elétricos médios das células solares fabricadas no processo ESP02.

Estrutura	Padrão	Nº de células	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF	η(%)
n⁺np⁺ Emissor seletivo	A1	3	564,0 ± 8	29,0 ± 1,5	0,59 ± 0,05	9,6 ± 1,5
	A2	3	564,0 ± 2,9	29,7 ± 0,1	0,57 ± 0,06	9,5 ± 1,1
	A3	3	557,8 ± 2,0	29,8 ± 0,5	0,58 ± 0,04	9,7 ± 0,8
	B1	3	521 ± 7	30,8 ± 0,3	0,58 ± 0,08	9,3 ± 1,3
	B2	3	514 ± 6	30,6 ± 0,4	0,62 ± 0,09	9,7 ± 1,4
	B3	3	493 ± 18	30,4 ± 0,4	0,49 ± 0,09	7,4 ± 1,5
	C1	2	506 ± 4	29,4 ± 0,1	0,63 ± 0,04	9,3 ± 0,6
	C2	3	521,1 ± 2,4	30,2 ± 0,0	0,66 ± 0,02	10,4 ± 0,4
	C3	3	500 ± 5	28,8 ± 0,5	0,70 ± 0,02	10,1 ± 0,4
n⁺np⁺ Emissor homogêneo	-	15	578 ± 7	29,3 ± 1,0	0,64 ± 0,08	10,8 ± 1,3

Tabela 4.4: Características elétricas dos dispositivos de maior eficiência para cada padrão de parâmetros de radiação laser utilizado no processo ESP02.

Estrutura	Padrão	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF	η(%)
n⁺np⁺ Emissor seletivo	A1	570,6	29,9	0,624	10,7
	A2	561,6	29,8	0,642	10,7
	A3	560,1	30,2	0,627	10,6
	B1	528,1	30,9	0,636	10,4
	B2	517,5	30,2	0,685	10,7
	B3	510,2	30,7	0,557	8,7
	C1	509,2	29,4	0,653	9,8
	C2	522,6	30,2	0,690	10,9
	C3	505,0	28,4	0,720	10,3
n⁺np⁺ Emissor homogêneo	-	585,6	28,8	0,734	12,4

Cabe comentar que a média das eficiências das células com emissor homogêneo deste processo não são compatíveis com as do processo anterior, mesmo não havendo diferenças no processo de fabricação das mesmas. Observa-se que a

maior diferença se encontra na J_{sc} , tendo um decréscimo de $3,55 \text{ mA/cm}^2$ (10,8% com relação ao processo ESP01), juntamente com uma diminuição de V_{oc} em 11 mV. Tais fatores indicam um baixo tempo de vida dos portadores de carga minoritários nas lâminas utilizadas neste processo.

A maior média de eficiências foi obtida com o padrão C, principalmente devido ao maior fator de forma (FF) observado nestas células, embora as V_{oc} alcançadas tenham sido as menores. Entretanto, nenhuma das células fabricadas com emissor seletivo superou as eficiências das células com emissor homogêneo.

Para melhor compreensão dos resultados mostrados acima, foi feita uma análise microscópica em lâminas de teste, onde foi realizada somente a fusão a laser da superfície com os padrões de parâmetros usados no processo anterior, juntamente com uma análise microscópica óptica nas células solares do processo ESP02. A Figura 4.6 resume os resultados obtidos. Viu-se que o diâmetro da área afetada pelo feixe laser varia de $60 \mu\text{m}$ até cerca de $110 \mu\text{m}$, dependendo do padrão de parâmetros utilizado. Nas Figuras 4.7 e 4.8 pode-se analisar a diferença entre as partes fundidas em cada padrão de parâmetro no nível de foco A.

Pode-se perceber que o padrão 3 corresponde ao de menor distância entre pontos, obtendo uma maior densidade de pontos para uma mesma área. As células solares produzidas com o padrão 3, em geral, foram as com menor V_{oc} , explicado pela maior região com processos de fusão/solidificação.

Ao se observar as pirâmides nas proximidades das áreas fundidas nas Figura 4.8, pode-se ver que nos níveis de foco B e C, as mesmas estão mais arredondadas, indicando que podem ter sido afetadas pelo desfoque do laser, uma vez que, ao aproximar as lâminas da lente, está se aumentando a área irradiada e mantendo a mesma potência, fazendo com que o feixe cubra uma área maior porém com menor irradiância, como exemplifica a Figura 4.9.

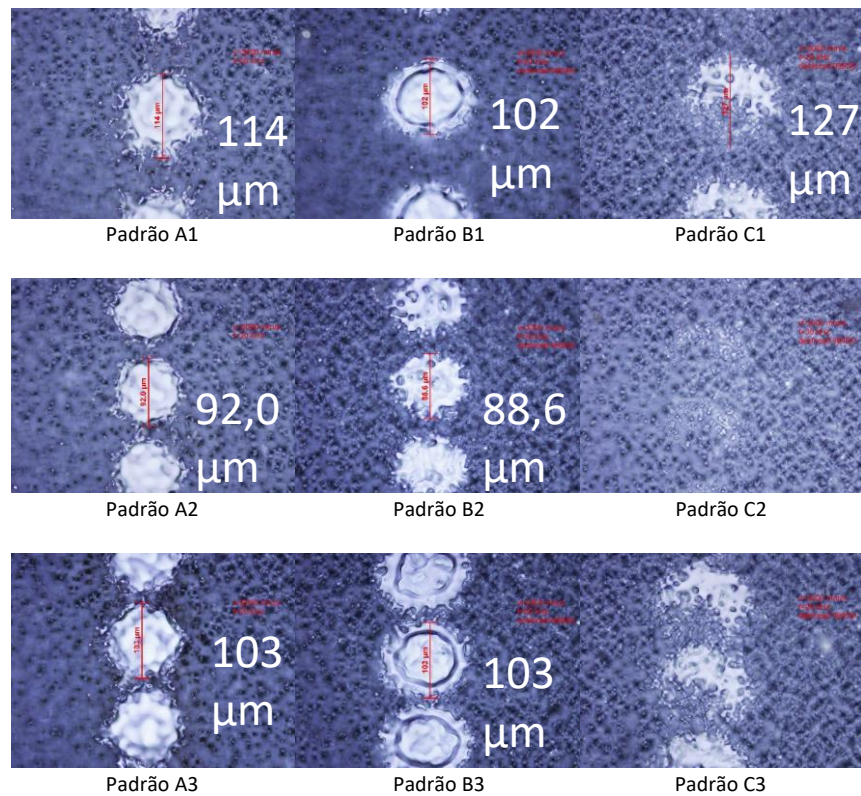


Figura 4.6: Imagem de microscopia óptica de lâminas de silício processadas com radiação laser com padrões de parâmetros A, B e C.

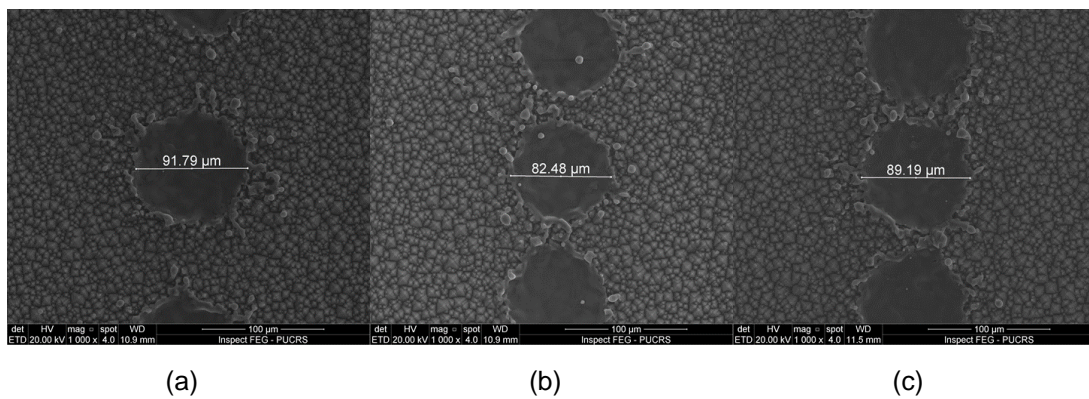


Figura 4.7: Microscopia eletrônica de varredura em lâminas de silício processadas com padrões de parâmetros a) A1, b) A2 e c) A3.

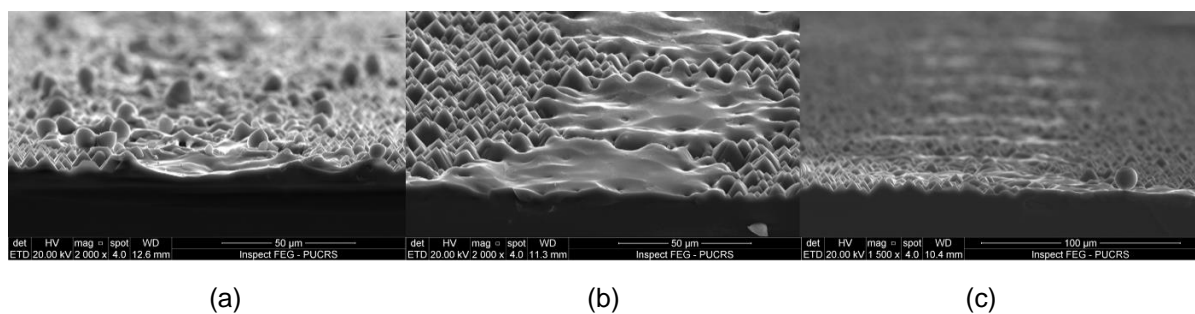


Figura 4.8: Áreas irradiadas com os níveis de foco a) A1, b) B1 e c) C1.

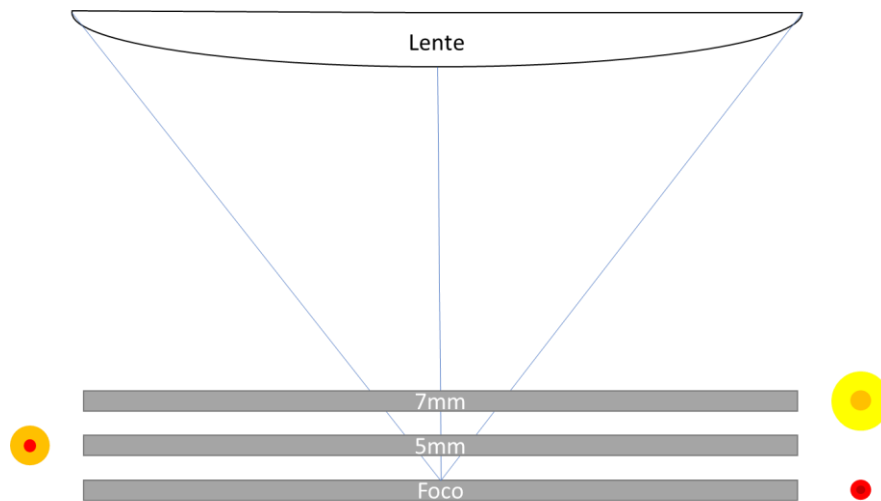


Figura 4.9: Esquema de desfoque do laser, com escala de cores onde quanto mais escuro, maior a irradiância.

Outra explicação para um decréscimo da V_{oc} nas células com emissor seletivo é o não alinhamento por completo da região fundida com a malha metálica, contribuindo ainda mais para criação de centros de recombinação onde não é possível a coleta dos portadores de carga, como mostra a Figura 4.10.

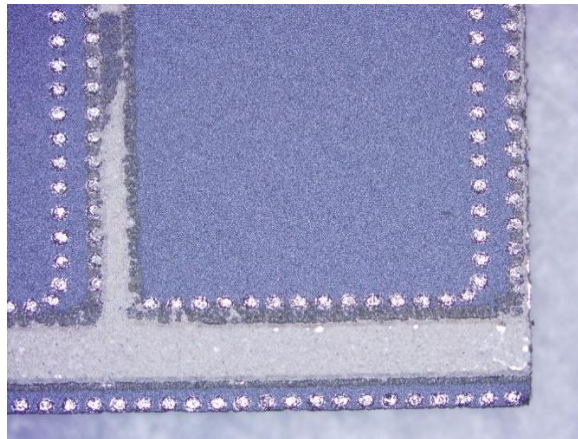


Figura 4.10: Célula solar do processo ESP02 onde a área fundida não se encontra, por completo, abaixo da região metalizada.

Como mencionado anteriormente, o desenho da máscara usada no processo de serigrafia foi exportado para o programa de design do sistema laser. Porém, ao fazê-lo sem nenhuma adaptação, o laser só varria o contorno do desenho, fazendo com que somente metade de cada círculo onde fora fundido o silício ficasse sobre a malha metálica, como mostra a Figura 4.11.

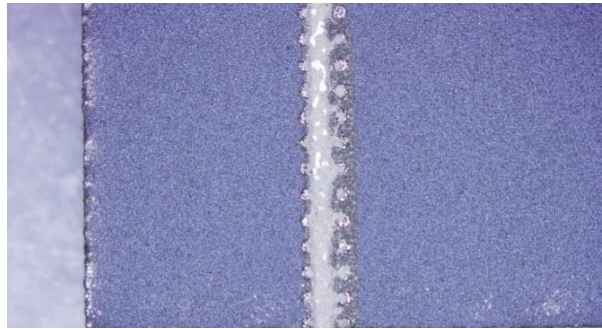


Figura 4.11: Área metalizada de uma célula solar do processo ESP02.

Para os processos seguintes, o desenho cujo laser segue foi modificado para conter uma única linha por dedo, além de preencher o *busbar* (barra coletora) adequadamente.

4.3.2. Processo ESP03

Para este processo, foram feitas modificações no desenho que o equipamento laser usa para fazer a difusão e conseqüentemente o emissor seletivo, a fim de produzir somente uma linha de pontos de fusão para cada dedo e preencher o *busbar*. No entanto, durante o processo de fabricação, mais especificamente na etapa de metalização, não houve alinhamento das trilhas frontais com as trilhas posteriores, resultando em uma difusão de metais Ag e Ag/Al nas bordas da lâmina de silício ao realizar o isolamento de bordas. Isto ocorre devido aos diferentes diâmetros de lâminas de silício em um mesmo lingote, fazendo com que não haja uma padronização de tamanho necessária para processos onde a posição relativa ao centro é de extrema importância, como a formação do emissor seletivo. As Tabelas 4.5 e 4.6 mostram os resultados deste processo.

Baseando-se nos resultados, pode-se tirar algumas conclusões sobre este processo. A primeira delas é de que a diminuição da V_{oc} em função do desfoque se manteve, consolidando a hipótese discutida na seção anterior. A segunda tem relação com a densidade de corrente e fator de forma. Nos padrões B1, B2, C1, C2 e C3, pode-se notar um decréscimo significativo destes parâmetros elétricos. Isto se torna claro na Figura 4.12, que mostra as curvas J-V de algumas células deste processo,

onde se observa claramente o efeito de resistência em série e paralelo nas células B1 e C1.

Tabela 4.5: Parâmetros elétricos médios dos dispositivos fabricados no processo ESP03.

Estrutura	Padrão	Nº de células	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF	η(%)
n⁺np⁺ Emissor seletivo	A1	3	558 ± 6	34,0 ± 0,7	0,67 ± 0,03	12,7 ± 0,9
	A2	3	555 ± 3	33,9 ± 0,4	0,69 ± 0,02	13,0 ± 0,6
	B1	2	544 ± 25	22 ± 5	0,34 ± 0,02	4,2 ± 0,9
	B2	2	530,8 ± 1,2	30,1 ± 2,3	0,59 ± 0,01	9,4 ± 0,7
	C1	2	507 ± 5	15,5 ± 2,1	0,39 ± 0,01	3,0 ± 0,4
	C2	3	517 ± 10	21 ± 7	0,38 ± 0,02	4,2 ± 1,7
	C3	3	517 ± 5	20 ± 4	0,40 ± 0,01	4,1 ± 0,9
n⁺np⁺ Emissor homogêneo	-	7	587 ± 3	32,3 ± 0,3	0,68 ± 0,01	12,8 ± 0,3

Tabela 4.6: Células com maiores eficiências para cada padrão de parâmetros do processo ESP03.

Estrutura	Padrão	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF	η(%)
n⁺np⁺ Emissor seletivo	A1	562,9	34,7	0,703	13,7
	A2	557,8	34,4	0,704	13,5
	B1	526,3	25,6	0,360	4,8
	B2	531,7	31,7	0,586	9,9
	C1	507,9	17,8	0,377	3,4
	C2	523,4	25,8	0,398	5,4
	C3	520,7	24,7	0,397	5,1
n⁺np⁺ Emissor homogêneo	-	589,7	32,0	0,696	13,1

Ao ser difundido no silício, os metais da malha metálica criam um caminho de menor resistência para a corrente passar, fazendo com que a resistência em paralelo da célula caia significativamente. Por outro lado, percebe-se também na Figura 4.12 que a resistência em série, definida como o módulo da taxa de variação da densidade de corrente pela tensão quando a primeira é zero, das células B1 e C1 são muito maiores que as resistências em série das células A1, A2 e B2. Isto pode ocorrer devido à falta de otimização da temperatura de queima das pastas para a superfície que elas estão depositadas sobre, já que as temperaturas utilizadas neste processo foram

utilizadas para áreas texturadas, e não sem textura, como é o caso da região fundida pelo laser.

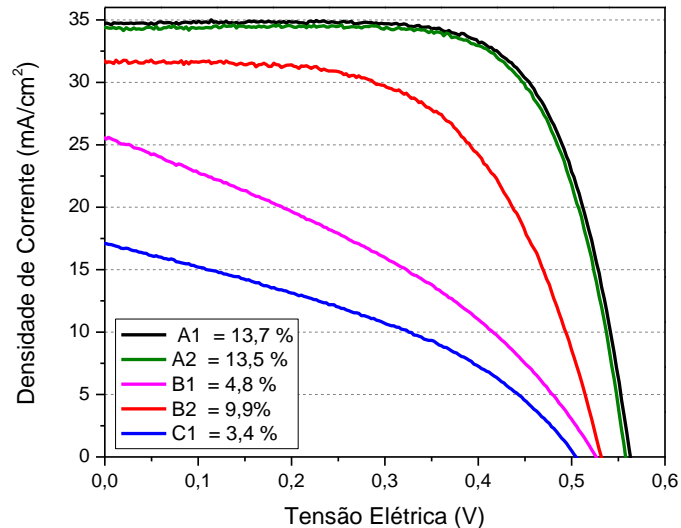


Figura 4.12: Curvas J-V de algumas células do processo ESP03.

É importante notar que, no caso das células dos padrões A1 e A2, não houve difusão da malha metálica, constatado por análise visual, porém ainda houve desalinhamento entre a região metalizada e a região fundida, prejudicando a V_{oc} das células, como constatado em comparação com as com emissor homogêneo. Entretanto, neste processo, a média das eficiências de um dos padrões (A2) supera a média das eficiências das células de emissor homogêneo, além das melhores células de ambos A1 e A2 superarem a mais eficiente do emissor homogêneo, devido a maior densidade de corrente e fator de forma. Estes resultados mostram que é possível alcançar eficiências superiores com o uso de emissores seletivos ao invés de emissores homogêneos. No entanto, a V_{oc} , como comentado anteriormente, continuou sendo menor nos dispositivos de emissor seletivo.

Um problema recorrente durante todos os processos até o presente foi o alinhamento da área fundida com a malha metálica. Pensou-se que a raiz deste problema fosse somente a transposição do desenho da máscara serigráfica para o *software* de design do laser. No entanto, apesar dos dois desenhos serem idênticos, até então não havia sido levado em consideração a deformação na máscara causada pelo rodo do equipamento que, para imprimir a malha metálica, precisa aplicar uma pressão sobre a máscara, causando um tensionamento na mesma.

Para os próximos processos, o desenho no *software* de *design* foi modificado para levar em consideração o tensionamento da máscara durante o processo de serigrafia. Também foi feito a aplicação do filme antirreflexo nas duas faces da lâmina, com o intuito de caracterizar uma célula p^+nn^+ , fazendo uma comparação direta com as células solares produzidas por Garcia [4].

4.3.3. Processo ESP04

Neste processo, foram testadas as modificações feitas do desenho usado para formação do emissor seletivo, a fim de sobrepor a malha metálica ao mesmo. Também foi aplicado um filme antirreflexo na parte posterior da lâmina com o intuito de usar a face p^+ para caracterizar uma célula de silício com a mesma estrutura de Garcia [4], que era p^+nn^+ . As Tabelas 4.7 e 4.8 apresentam os parâmetros elétricos médios das células solares e os parâmetros elétricos das células solares de maior eficiência, respectivamente.

Tabela 4.7: Parâmetros elétricos médios dos dispositivos fabricados no processo ESP04. Iluminação pela face n^+ .

Estrutura	Padrão	Nº de células	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF	η (%)
n^+np^+ Emissor seletivo	A1	3	578,9 ± 4,6	33,1 ± 0,2	0,65 ± 0,05	12,5 ± 1,2
	A2	3	575,8 ± 0,9	33,5 ± 0,4	0,64 ± 0,05	12,3 ± 0,9
	A3	3	572,4 ± 6,3	32,2 ± 1,4	0,64 ± 0,05	11,7 ± 1,5
	B1	3	554,5 ± 2,3	32,6 ± 0,4	0,63 ± 0,00	11,3 ± 0,1
	B2	3	540,7 ± 4,7	30,8 ± 3,6	0,56 ± 0,06	9,4 ± 2,0
	B3	2	533,7 ± 1,9	33,1 ± 0,4	0,58 ± 0,00	10,2 ± 0,2
	C1	2	541,1 ± 0,7	33,4 ± 1,0	0,49 ± 0,05	8,9 ± 1,2
	C2	2	548,9 ± 3,8	32,8 ± 1,3	0,55 ± 0,06	10,0 ± 1,4
	C3	1	520,8	30,6	0,41	6,5
n^+np^+ Emissor homogêneo	-	6	578,4 ± 6,6	29,3 ± 1,0	0,64 ± 0,08	10,8 ± 1,3

Tabela 4.8: Características elétricas das células solares de maior eficiência para cada padrão de parâmetros do processo ESP04. Iluminação pela face n^+ .

Estrutura	Padrão	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF	η(%)
n⁺np⁺ Emissor seletivo	A1	582,1	33,4	0,69	13,4
	A2	575,3	33,2	0,69	13,2
	A3	576,0	33,4	0,66	12,7
	B1	554,0	33,1	0,63	11,5
	B2	546,1	32,2	0,63	11,1
	B3	534,4	33,3	0,58	10,3
	C1	541,6	34,1	0,53	9,8
	C2	546,2	33,7	0,60	11,0
	C3	520,8	30,6	0,41	6,5
n⁺np⁺ Emissor homogêneo	-	588,2	34,5	0,69	14,0

Neste processo, as células com desfoque B e C ainda possuíam sua região do emissor seletivo desalinhada com relação à malha metálica, apesar dos últimos ajustes. No entanto, as células cuja formação do emissor seletivo foi feita com o laser focado (A) não apresentavam tal problema, indicando que a fonte deste desalinhamento era o desfoque em si. Foi então notado que, ao aproximar a lâmina da lente do laser, o mesmo criava uma distorção no design do desenho que usava para formação do emissor, como mostra a Figura 4.13.

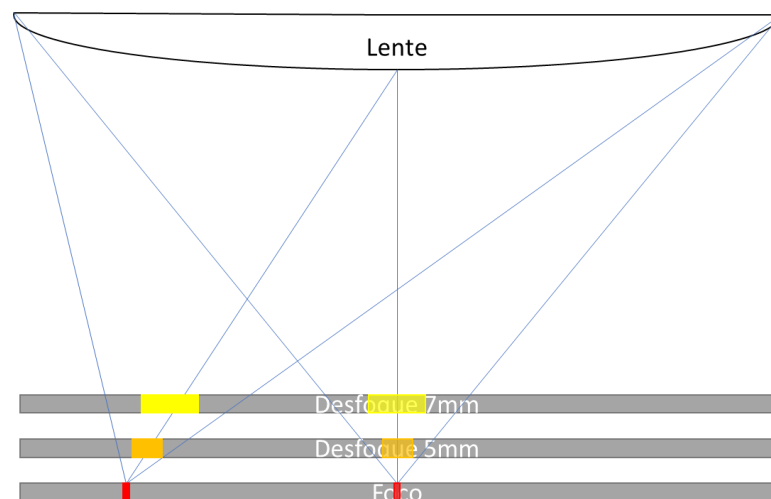


Figura 4.13: Distorção no design do emissor seletivo devido ao desfoque.

Esta deformação faz com que o desenho apareça menor do que foi inicialmente planejado, causando um desalinhamento nas células mais externas ao centro da

lâmina, explicando o motivo de não haver desalinhamento nas células com nível de foco A.

Com relação às demais células, pode-se analisar algumas curvas J-V na Figura 4.14, a fim de identificar os fatores que reduziram suas eficiências. Observa-se que a curva J-V da célula solar processada com nível de foco A tem um comportamento parecido com a célula EH1, as duas possuindo um fator de forma igual a 69% e a primeira possuindo um leve decréscimo em sua V_{oc} e J_{sc} . Entretanto, ao se olhar para as outras curvas, pode-se notar uma baixa resistência em paralelo nas células B, C e EH2, indicando que os metais da malha metálica penetraram na borda da lâmina no processo de isolamento de bordas, criando, portanto, um caminho de menor resistência.

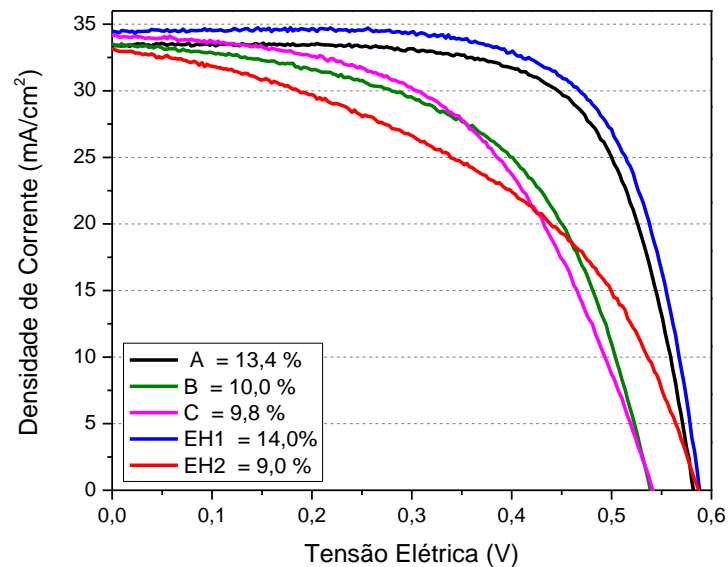


Figura 4.14: Curvas J-V de células solares do processo ESP04, com diferentes níveis de foco.

As células deste processo também foram caracterizadas com iluminação pela face p^+ , isto é, o emissor foi usado como face frontal na caracterização dos parâmetros elétricos. Na Tabela 4.9 estão resumidos os valores médios de cada parâmetro elétrico das células iluminadas pela face p^+ , sendo assim tratadas como células solares p^+nn^+ . A Tabela 4.10 mostra as características elétricas dos dispositivos mais eficientes iluminados pela face p^+ .

Tabela 4.9: Parâmetros elétricos médios dos dispositivos fabricados no processo ESP04. Iluminação pela face p⁺.

Estrutura	Padrão	Nº de células	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF	η(%)
p⁺nn⁺ Emissor seletivo	A1	3	580,0 ± 1,3	32,8 ± 0,4	0,66 ± 0,01	12,5 ± 0,1
	A2	3	570 ± 7	30 ± 5	0,57 ± 0,11	10 ± 3
	A3	1	574,0	33,1	0,57	10,9
	B1	3	553 ± 4	31,8 ± 0,6	0,63 ± 0,01	11,1 ± 0,2
	B2	3	542 ± 5	31,7 ± 0,6	0,63 ± 0,04	10,9 ± 0,7
	B3	1	533,7	31,9	0,60	10,3
	C1	2	534 ± 4	28,0 ± 0,9	0,62 ± 0,01	9,3 ± 0,3
	C2	2	543 ± 4	29,14 ± 0,06	0,62 ± 0,05	9,8 ± 0,7
p⁺nn⁺ Emissor homogêneo	-	4	588,1 ± 1,7	31,6 ± 0,6	0,66 ± 0,03	12,3 ± 0,7

Tabela 4.10: Características elétricas das células solares de maior eficiência para cada padrão de parâmetros do processo ESP04. Iluminação pela face p⁺.

Estrutura	Padrão	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF	η(%)
p⁺nn⁺ Emissor seletivo	A1	580,9	33,1	0,66	12,6
	A2	574,6	32,6	0,69	12,9
	A3	574,0	33,1	0,57	10,9
	B1	557,7	31,9	0,63	11,2
	B2	541,5	32,1	0,66	11,5
	B3	533,7	31,9	0,60	10,3
	C1	536,3	28,6	0,62	9,5
	C2	540,9	29,1	0,65	10,3
p⁺nn⁺ Emissor homogêneo	-	586,2	31,4	0,69	12,7

Assim como na primeira caracterização dos parâmetros elétricos, medindo-os com iluminação pela face n⁺, a média das eficiências dos dispositivos processados com os padrões de parâmetros A1 e A2 superaram a média das eficiências daquelas com emissor homogêneo, mais uma vez confirmando a viabilidade do emprego de emissores seletivos em processos de fabricação de células solares. Pode-se notar também que as eficiências das células com o emprego dos novos padrões de parâmetros superaram as eficiências dos mesmos tipos de células obtidas por Garcia [4].

5. CONCLUSÕES

Ao longo dos cinco processos de fabricação de células solares de base n, fez-se uso de duas análises microscópicas para caracterização da superfície da lâmina de silício em função de diferentes parâmetros de difusão a laser. Por meio de microscopia eletrônica de varredura, pode-se analisar com clareza as superfícies formadas após a fusão da superfície de silício, identificando suas dimensões físicas e características para cada padrão de parâmetro de trabalho do laser. Por meio de microscopia óptica, pode-se constatar as discrepâncias entre as regiões fundidas pelo laser e a malha metálica, proporcionando uma resposta rápida entre processos para correção e ajustes no desenho utilizado pelo sistema laser para fazer a difusão. Com a utilização destas duas técnicas concluiu-se que, devido ao diâmetro da região fundida, que varia de 60 μm a 110 μm , diferentes padrões de parâmetros teriam diferentes impactos com relação à área metalizada, influenciando na V_{oc} e J_{sc} . Concluiu-se também que, devido ao trabalho manual de alinhamento da região fundida com a malha metálica, boa parte da área metalizada não cobriria a região do emissor seletivo, precisando de diversos processos e otimizações para ajustar e padronizar o desenho utilizado pelo software de design do laser, tarefa que até o último processo realizado não fora possível cumprir, devido a uma grande quantidade de fatores, como diâmetro da lâmina, uso de máscaras serigráficas diferentes em alguns processos, precisão não adequada do equipamento, entre outros.

Ao todo, foram realizados cinco processos de fabricação de células solares de silício. O primeiro teve como objetivo reproduzir os resultados de Garcia [4], porém utilizando um emissor posterior de boro por dopagem com PBF20 e campo retrodifusor frontal de fósforo, ou seja, n^+np^+ . Estas células produzidas viriam a se tornar referência para os processos seguintes, buscando alcançar eficiências maiores do que as reproduzidas neste primeiro processo. Utilizando os padrões de difusão com laser de

Garcia [4], $v_f = 500$ mm/s, $f_p = 60$ kHz, a célula mais eficiente produzida possui V_{oc} de 541,2 mV, J_{sc} igual a 34,0 mA/cm², FF igual a 0,676 e uma eficiência de 12,4 %. Neste processo, foi produzida a célula solar de maior eficiência com emissor homogêneo, cujas características elétricas foram: $V_{oc} = 595,1$ mV, $J_{sc} = 35,0$ mA/cm², FF = 0,73 e $\eta = 15,2$ %. A partir destes resultados, seguiu-se para a formulação de padrões de parâmetros que proporcionassem maiores valores de tempo de vida dos portadores minoritários de carga.

A célula solar de estrutura n^+np^+ com emissor seletivo de maior eficiência foi produzida com a configuração A1 de parâmetros do laser, ou seja, $v_f = 3000$ mm/s, $f_p = 20$ kHz, com feixe focado. Foram obtidas as seguintes características elétricas: $V_{oc} = 562,9$ mV, $J_{sc} = 34,7$ mA/cm², FF = 0,703 e uma eficiência de 13,7 %. Salienta-se que houve células com emissores seletivos mais eficientes do que as de emissor homogêneo em quatro dos cinco processos realizados, sendo que no mesmo lote de processamento, a célula solar de emissor homogêneo alcançou 13,1%. A diferença entre maior eficiência de 15,2% frente a esta é atribuída à dispersão na qualidade das lâminas utilizadas neste trabalho.

Em relação ao dispositivo iluminado pela face p^+ , desta forma operando na configuração p^+nn^+ , observou-se que as eficiências obtidas foram similares para emissores seletivos (padrão A1) e homogêneos, atingindo valores médios de 12,5 % e 12,3 %, respectivamente. O valor máximo de eficiência em células solares p^+nn^+ com emissores seletivos formados por difusão de boro com radiação laser foi obtido com o padrão A2, sendo de 12,9 %, superando o maior valor anteriormente obtido no NT-Solar/PUCRS que era de 11,6 %.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, Electricity Information 2018. Disponível em: <<https://www.iea.org/statistics/?country=WORLD&year=2016&category=Key%20indicators&indicator=ElecGenByFuel&mode=chart&dataTable=ELECTRICITYANDHEAT>>. Acesso em: 30 nov 2018.

[2] BP. BP Statistical Report Review of World Energy. 67. ed. Reino Unido, 2018. Disponível em: <<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf>>. Acesso em: 31 nov 2018.

[3] FISCHER, M. ITRPV 9th edition 2018 report release and key findings. In: **PV CellTech conference**. 2018.

[4] GARCIA, S. B. **Desenvolvimento e comparação de células solares p⁺nn⁺ com emissor seletivo e homogêneo**. Porto Alegre. 2016. 198p. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia de Materiais). PGETEMA, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Brasil.

[5] MACDONALD, D.; Geerligts, L. J. Recombination activity of interstitial iron and other transition metal point defects in p- and n-type crystalline silicon, **Applied Physics Letters**, v. 85, n.18, 2004, pp. 4061-4063.

[6] GREEN, Martin A. et al. Solar cell efficiency tables (version 52). **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 26, n. 7, p. 427-436, 2018.

- [7] FRAUNHOFER, I. S. E. Photovoltaics report. Disponível em: <<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>>. Acesso em: 4 dez 2018.
- [8] SHEORAN, M.; UPADHYAYA, V.; UPADHYAYA, A.; ROHATGI, A. Highefficiency screen-printed thin silicon solar cells.In: 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference: 2007, Milão, Itália. Proceedings. Munique: WIP, 2007, p.1738-1741.
- [9] TOOL, C. J. J. et al. Influence of wafer thickness on the performance of multicrystalline Si solar cells: an experimental study. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 10, n. 4, p. 279-291, 2002.
- [10] MACHADO, T. C. P. A. **Implementação de emissores p⁺ com diferentes dopantes para células solares n⁺np⁺ finas**. Porto Alegre, RS: PUCRS, 2018. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2018.
- [11] DULLWEBER, T. et al. **BiCoRE: Combining a PERC-type cell process with n-type wafers**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Nadine_Wehmeier/publication/313526877_BiCoRE_Combining_a_PERC-type_cell_process_with_n-type_wafers/links/589d7219a6fdcc3e8bebfac8/BiCoRE-Combining-a-PERC-type-cell-process-with-n-type-wafers.pdf>. Acesso em: 31 nov 2018.
- [12] KOPECEK, R. et al. Large area screen printed n-type silicon solar cells with rear aluminum emitter: efficiencies exceeding 16%. In: **4 th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion**: 2006, Hawaii. Proceedings... New York: IEEE, 2006, v.1, p. 1044-1047.
- [13] MALLMANN, A. P. **Otimização por simulação e desenvolvimento de células solares com emissor posterior formado por pasta de alumínio e difusão em forno de esteira**. Porto Alegre, RS: PUCRS, 2011. Originalmente apresentada como tese de doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2011.

- [14] MOEHLECKE, A. et al. Development of n⁺np⁺ solar cells in 100 μm thick silicon wafers. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, 2017.
- [15] NARAYAN, J. et al. P-n junction formation in boron-deposited silicon by laser-induced diffusion. **Applied Physics Letters**, v. 33, n. 4, p. 338-340, 1978.
- [16] YOUNG, R. T. et al. Laser annealing of boron-implanted silicon. **Applied Physics Letters**, v. 32, n. 3, p. 139-141, 1978.
- [17] BOOTH, H. Laser Processing in Industrial Solar Module Manufacturing. **Journal of Laser Micro/Nanoengineering**, v. 5, n. 3, 2010.
- [18] DUBÉ, C. E. et al. High efficiency selective emitter cells using patterned ion implantation. **Energy Procedia**, v. 8, p. 706-711, 2011.
- [19] SUGIANTO, A. et al. 18.5% laser-doped solar cell on CZ p-type silicon. In: **Proceedings of the 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference**. 2010. p. 20-25.
- [20] OVERTON, G. A. I. L. et al. Annual laser market review & forecast: where have all the lasers gone?. **Laser Focus World**, v. 53, p. 1-24, 2017.
- [21] MARKETING, RP Photonics; PHOTONICS, R. P. Solid-state Lasers.
- [22] GUPTA, M. C.; CARLSON, D. E. Laser processing of materials for renewable energy applications. **MRS Energy & Sustainability**, v. 2, 2015.
- [23] YABE, T. Universal numerical solver for solid, liquid, and gas: application to laser-induced melting and evaporation. In: **Laser-Assisted Microtechnology 2000**. International Society for Optics and Photonics, 2001. p. 1-8.

- [24] POULAIN, G. et al. Characterization of laser-induced damage in silicon solar cells during selective ablation processes. **Materials Science and Engineering: B**, v. 178, n. 9, p. 682-685, 2013.
- [25] DAHLINGER, M. et al. Laser-doped back-contact solar cells. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 5, n. 3, p. 812-818, 2015.
- [26] TOMIZAWA, Y. et al. Laser doping of boron-doped Si paste for high-efficiency silicon solar cells. **Japanese Journal of Applied Physics**, v. 54, n. 8S1, p. 08KD06, 2015.
- [27] CORREIA, S. A. G. D. et al. Selective laser ablation of dielectric layers. In: **Proceedings of 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milan**. 2007.
- [28] HONG, J. et al. Si paste technology for high-efficiency solar cells. **Solar Energy**, v. 135, p. 70-76, 2016.
- [29] ZIELKE, D. et al. Direct laser texturing for high-efficiency silicon solar cells. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 3, n. 2, p. 656-661, 2013.
- [30] GHOSH, G. **Handbook of optical constants of solids: Handbook of thermo-optic coefficients of optical materials with applications**. Academic Press, 1998.
- [31] MARKETING, RP Photonics; PHOTONICS, R. P. Green Lasers.
- [32] HAMEIRI, Z. et al. Laser induced defects in laser doped solar cells. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 19, n. 4, p. 391-405, 2011.
- [33] AMETOWOBLA, M. et al. Laser induced lifetime degradation in p-type crystalline silicon. **Journal of Applied Physics**, v. 111, n. 11, p. 114515, 2012.

- [34] TJAHJONO, B.S. **Laser doped selective emitter solar cells**. PhD Thesis, University of New South Wales, 2010.
- [35] SLAOUI, A.; PRATHAP, P.; BARTRINGER, J. Laser doping from spin-on sources for selective emitter silicon solar cells. In: **Laser Material Processing for Solar Energy**. International Society for Optics and Photonics, 2012. p. 84730A.
- [36] WANG, Wei et al. Industrial screen-printed n-type rear-junction solar cells with 20.6% efficiency. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 5, n. 4, p. 1245-1249, 2015.
- [37] MOEHLECKE, A. et al. Desenvolvimento de células solares n⁺np⁺ em lâminas de silício de 100 µm de espessura. **Matéria (Rio J.)**, Rio de Janeiro, v. 22, supl. 1, e11926, 2017. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762017000500420&lng=pt&nrm=iso>.
- [38] FOBA. Operating manual laser marking system DP10F/DP20F/DP30F 106000/106200/107360 Rev. 3.0. Alltec GmbH, Alemanha. 2011. 95 p.
- [39] ZANESCO, I.; Moehlecke, A. Desenvolvimento de tecnologias industriais de fabricação de células solares e módulos fotovoltaicos. **Relatório Final de Projeto FINEP**, convênio FINEP 01.080635.00, ref. 1359/08, 2012.
- [40] ZANESCO, I.; MOEHLECKE, A. **Processo de Difusão de Dopantes em Lâminas de Silício para a Fabricação de Células Solares**. BR 10 2012 030606 9, 30 nov. 2012, 12 jun. 2015.
- [41] ZANESCO, I.; MOEHLECKE, A. Desenvolvimento de Processos Industriais para Fabricação de Células Solares com pasta de Al e Passivação. Relatório Final de Projeto. Convênio ELETROSUL n° 1110140010, 2016, p. 379.

[42] LY, M.; ZANESCO, I.; MOEHLECKE, A.. Influência da Espessura do Filme Antirreflexo de TiO₂ nos Parâmetros Elétricos de Células Solares com Base N. In: **IV Congresso Brasileiro de Energia Solar**, CBENS, 2012, São Paulo. CBENS, 2012.

[43] LY, Moussa et al. Influência da espessura do filme antirreflexo de TiO₂ nos parâmetros elétricos de células solares com base n. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 3, n. 1, p. 31, 2012.

[44] MOEHLECKE, A.; ZANESCO, I. Desenvolvimento de células solares eficientes em lâmina de silício tipo n. **Relatório Técnico**, convênio FINEP 2102/09.2015.

[45] 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.

[46] SEMILAB. **WT-2000PV User Manual**. Budapest, v. 1, 2008.



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
Pró-Reitoria de Graduação
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 1 - 3º. andar
Porto Alegre - RS - Brasil
Fone: (51) 3320-3500 - Fax: (51) 3339-1564
E-mail: prograd@pucrs.br
Site: www.pucrs.br