

# ANÁLISE DE TEXTURAÇÃO SELETIVA NA FORMAÇÃO DE EMISSORES P<sup>+</sup> COM RADIAÇÃO LASER PARA CÉLULAS SOLARES N-PERC

Bruno Krever Lopes – lopes.bruno@edu.pucrs.br

Adriano Moehlecke

Izete Zanesco

Moussa Ly

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande Sul (PUCRS), Escola Politécnica, Núcleo de Tecnologia em Energia Solar (NT-SOLAR)

**Resumo.** Este artigo apresenta o processamento e análise de emissores dopados com boro, formados com difusão a laser e texturação seletiva. As amostras foram produzidas por meio de dois processos de fabricação, denominados de A e B, com três distintas configurações do laser para difusão do boro. No processo A ou de texturação seletiva, a difusão de boro foi realizada antes do ataque anisotrópico necessário para formar uma superfície texturada. Para este processo, analisou-se o emprego de quatro tempos de texturação. No processo B, a texturação das superfícies foi realizada antes da difusão de boro com laser. Os dispositivos foram analisados por microscopia óptica, medida de resistência de folha ( $R_{SQ}$ ) e tempo de vida dos portadores de carga minoritários ( $\tau$ ). As amostras desenvolvidas pelo processo B (processo de controle) apresentaram valores de resistência de folha na ordem de 26 – 28  $\Omega/sq$ , enquanto as amostras desenvolvidas pelo processo A (processo com texturação seletiva) obtiveram um aumento nos valores de  $R_{SQ}$ , sendo da ordem de 53 - 60  $\Omega/sq$ . Por meio da análise de tempo de vida dos portadores minoritários não foi possível constatar uma diferença significativa entre os danos ocasionados pelas diferentes configurações do laser. Ao se analisar a diferença percentual entre os valores de tempo de vida dos portadores de carga minoritários das regiões onde ocorreu a difusão com laser (trilhas) e das regiões sem difusão (entre trilhas), observou-se uma maior redução do  $\tau$  nas amostras do processo de controle, com texturação pré-laser (processo B). Esses resultados são um indicativo de que o uso de um ataque anisotrópico com KOH pós-difusão a laser reduz parcialmente os danos gerados no processamento.

**Palavras-chave:** Emissor seletivo; Difusão a laser; Emissor de Boro.

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a célula solar com emissor e face posterior passivadas (PERC *passivated emitter and rear cell*), tornou-se o padrão da indústria, substituído a célula de campo retrodifusor de alumínio (Al-BSF, Al - *back surface field*). Isso se deve ao fato de a estrutura PERC apresentar uma menor taxa de recombinação dos portadores de carga minoritários na superfície e uma menor refletância na face posterior da célula solar em relação a estrutura Al-BSF (Blakers, 2019). Contudo tanto na estrutura Al-BSF quanto na PERC, os contatos metálicos em linha de produção industrial são, normalmente, implementados pela técnica de serigrafia. Haverkamp *et al.* (2008) destacam que as perdas elétricas no emissor formado pelo processo de serigrafia tornaram-se um dos principais limitantes da eficiência das células solares produzidas industrialmente. Essas perdas são devidas a alta resistência de contato ( $\rho_c$ ) entre o emissor homogêneo e as trilhas metálicas. Uma maneira de contornar esse problema é a formação de um emissor seletivo, que consiste em produzir uma região profunda e altamente dopada na região das trilhas metálicas enquanto que a área iluminada entre as trilhas tem uma menor concentração de dopantes e menor profundidade da junção pn. Esse emissor seletivo reduz a  $\rho_c$  bem como as recombinações Auger e Shockley-Read-Hall (SRH) (Kuo *et al.*, 2018), permitindo um aumento da eficiência da célula solar. Dentre as diversas técnicas para a formação do emissor seletivo, a técnica de difusão seletiva a laser se destaca devido a: i) velocidade do processo; ii) menor custo em relação a outras técnicas para formação do emissor seletivo; iii) fácil implantação em linha industrial e iv) poucas etapas extras para a produção da célula solar (Jäger *et al.*, 2013; Kuo *et al.*, 2018). Embora rápida e economicamente atraente, a técnica de difusão seletiva a laser introduz defeitos na estrutura cristalina do silício relacionados principalmente a fusão superficial induzida durante o processo. Destaca-se a formação de centros de recombinação dos portadores de carga minoritários que reduzem significativamente a eficiência dos dispositivos, como observado em trabalhos anteriores (Salvador, 2019; Garcia, 2016; Muñoz-Cerón *et al.*, 2009). Além disso, a fusão do silício durante o processamento a laser pode facilitar a incorporação de impurezas presentes na superfície do material, induzir microfissuras e reduzir os parâmetros elétricos da célula solar. A Fig. 1 mostra a superfície de uma lâmina de silício texturada e após o processamento com laser, destacando-se que na região onde incidiu a radiação laser as superfícies deixaram de ser texturadas.

Segundo o *International Technology Road Map for Photovoltaics* (VDMA, 2022) a técnica de difusão a laser é uma tendência do mercado para a formação de emissores seletivos na próxima década. Assim, pesquisas que busquem formas de reduzir ou até mesmo remover os defeitos gerados durante o processamento a laser são de fundamental importância.

Uma técnica que vem sendo estudada para a remoção de defeitos induzidos pelo processamento a laser ou LID (*laser induced defects*) é a corrosão química (*chemical etching*). Essa corrosão química é normalmente realizada por ataque anisotrópico da superfície com solução baseada em hidróxido de potássio. No trabalho de Hwang *et al.* (2015), avaliou-se a remoção dos LID após o processamento a laser usando soluções com diferentes concentrações de KOH. Os resultados dessa pesquisa indicaram que a remoção química dos LID é efetiva e houve uma melhora dos parâmetros elétricos das células solares. Resultados semelhantes foram obtidos por Radfar *et al.* (2020), que utilizaram o processamento a laser para a texturação de células solares em lâminas de silício multicristalino. Os resultados demonstraram que após o processo químico com KOH ocorreu uma melhora nos parâmetros elétricos da célula fotovoltaica, em especial um aumento na tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ).

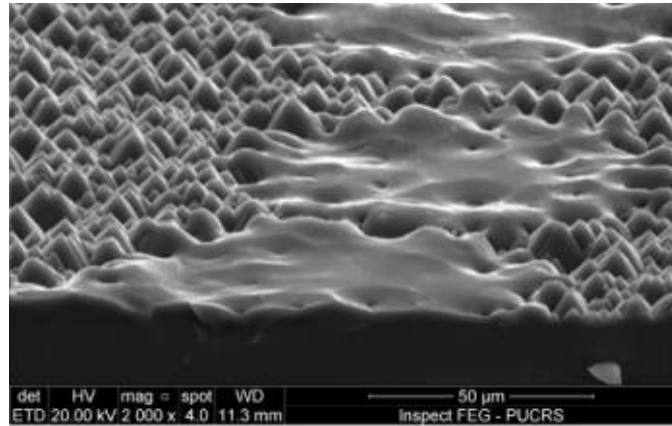


Figura 1 - Imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de região fundida durante o processamento com laser (Salvador, 2019).

Moehlecke e Luque (1994) propuseram que o ataque anisotrópico da superfície em solução de KOH, pode ser aplicado para a formação de emissores seletivos devido a propriedade das superfícies de silício dopadas com boro serem resistentes ao ataque anisotrópico. Isso se deve à difusão substitucional do boro na rede cristalina do silício, que aumenta a rigidez da rede cristalina, bem como a quantidade de energia necessária para remover um átomo de silício. No caso de soluções com KOH, a taxa do ataque anisotrópico pode ser reduzida em 20 vezes na superfície do silício com excesso de átomos de boro, de aproximadamente  $10^{20}$  átomos/cm<sup>3</sup> (Petersen, 1982).

O objetivo deste artigo é analisar a formação de emissores  $p^+$  seletivos produzidos com difusão a laser de boro e texturação seletiva. A texturação seletiva baseia-se na resistência ao ataque anisotrópico induzida pelo boro difundido. Analisou-se a possibilidade da texturação seletiva aumentar o tempo de vida dos portadores de carga minoritários na região do emissor seletivo, que possui defeitos relacionados ao processamento a laser.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Preparação das amostras

Foram processadas cinco lâminas de silício monocristalino crescido pela técnica de fusão zonal flutuante (FZ), tipo n, dopadas com fósforo. As amostras foram divididas em dois processos denominados de A e B e especificados na Tab. 1 e na Tab. 2, respectivamente. Em cada uma das cinco lâminas de silício, foram processadas seis amostras quadradas de 4,18 cm<sup>2</sup> com difusão a laser seletiva e três amostras de 4,18 cm<sup>2</sup> com difusão a laser homogênea, totalizando 45 amostras. No processo A, foi empregada a texturação seletiva por meio de solução baseada em KOH, realizada após a difusão a laser, enquanto que, no processo B a texturação é realizada antes do processamento a laser, sendo essa a sequência convencional aplicada em indústrias e em outros trabalhos realizados no NT-Solar (Garcia, 2016; Salvador, 2019).

As quatro lâminas de silício destinadas ao processo A passaram inicialmente por uma limpeza química em solução CP4 (solução de ácido nítrico, ácido fluorídrico e ácido acético) a fim de remover região superficial da lâmina de Si que foi degradada durante o corte a partir do lingote. Em seguida as lâminas de Si foram imersas em uma solução de ácido fluorídrico diluído em água deionizada, seguida de imersão em solução RCA2 constituída de peróxido de hidrogênio, ácido clorídrico e água deionizada na proporção de 1:1:5. Essa etapa de limpeza tem como função remover as impurezas metálicas da lâmina de silício, além de formar uma fina camada de óxido em sua superfície, protegendo-a de futuras impurezas do ambiente.

A técnica empregada para o processamento a laser foi a de difusão de impurezas pré-depositadas por fusão induzida por laser (LIMPID – *laser induced melting of pre-deposited impurity doping*), na qual a fonte do dopante é depositada na superfície da lâmina de silício, por exemplo, na forma de um filme fino e o dopante é fundido no silício. A fonte do dopante de boro utilizado foi o líquido PBF20, da *Filmtronics*. A deposição do dopante sobre a superfície da lâmina foi realizada pela técnica de *spin-coating*, representada na Fig. 2, em que o líquido PBF20 é gotejado na superfície da lâmina

de silício e esta é rotacionada à uma velocidade angular que pode variar de 1000 – 5000 rpm a fim de espalhar o líquido dopante de maneira uniforme. Após essa etapa, é realizada a evaporação dos solventes em uma estufa.

O processamento a laser foi realizado utilizando o equipamento FOBA Nd:YAG modelo DP20F, com comprimento de onda na faixa do infravermelho de 1064 nm. Esse laser possui potência nominal de 18 W e potência máxima de 25 W. A frequência de pulsos pode ser variada de 20 kHz a 100 kHz.

Tabela 1 – Sequência de etapas realizadas no processo A.

Etapa	Descrição da Etapa
1.	Limpeza CP4
2.	Limpeza RCA2
3.	Deposição de boro por <i>spin-coating</i> e evaporação dos solventes
4.	Formação do emissor seletivo e homogêneo com difusão a laser
5.	Texturação seletiva em quatro tempos: 20, 30, 45 e 60 min
6.	Limpeza após texturação

Tabela 2 – Sequência de etapas realizadas no processo B.

Etapa	Descrição da Etapa
1.	Ataque anisotrópico das superfícies (texturação)
2.	Limpeza RCA2
3.	Deposição de boro por <i>spin-coating</i> e evaporação dos solventes
4.	Formação do emissor seletivo e homogêneo com difusão a laser
5.	Limpeza RCA2

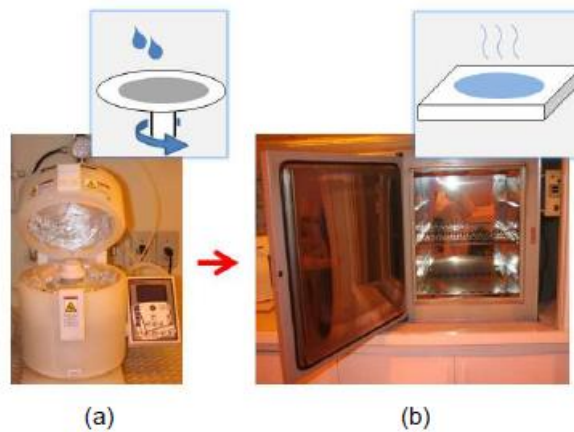


Figura 2 - (a) Equipamento para deposição de filmes por *spin-coating* e (b) estufa para secagem dos solventes. Adaptado de (Garcia, 2016).

As lâminas com boro depositado por *spin-coating* foram processadas com três diferentes configurações de laser (1, 2 e 3) conforme mostra a Fig. 3. Essas três configurações para o processamento a laser foram escolhidas com base nos processos realizados anteriormente no NT-Solar (Salvador, 2019) e (Garcia, 2016), sendo:

1. Configuração baseada no trabalho de Salvador (2019): intensidade do laser de 95 %, velocidade do feixe de 3000 mm/s e frequência de pulsos de 30 kHz.
2. Configuração baseada no trabalho de Garcia (2016): intensidade do laser de 95 %, velocidade do feixe de 500 mm/s e frequência de pulsos de 60 kHz.

- Essa configuração possui os parâmetros do laser idênticos aos padrões anteriores, porém em toda a área de 4,18 cm<sup>2</sup> foi realizada a difusão de boro de forma homogênea. Isso se faz necessário para a realização da medida da resistência de folha pela técnica de quatro pontas.

Sendo:

3.1: Intensidade do laser de 95, velocidade do feixe 3000 mm/s e frequência de pulsos de 30 kHz.

3.2: Intensidade do laser de 95%, velocidade do feixe de 500 mm/s e frequência de pulsos de 60 kHz.

Após a difusão com laser as quatro lâminas do processo A foram submetidas à texturação seletiva. Todas as lâminas foram imersas simultaneamente em uma solução de hidróxido de potássio, álcool isopropílico e água deionizada a uma temperatura de 80 – 90 °C. As lâminas foram removidas do banho em quatro tempos distintos, sendo eles 20 min, 30 min, 45 min e 60 min, a fim de averiguar como a superfície com difusão de boro com laser se comportaria durante o ataque anisotrópico. Para a lâmina de controle que passou pelo processo B, a texturação foi realizada no padrão do NT-Solar com a lâmina de silício estando imersa na solução por 60 min.

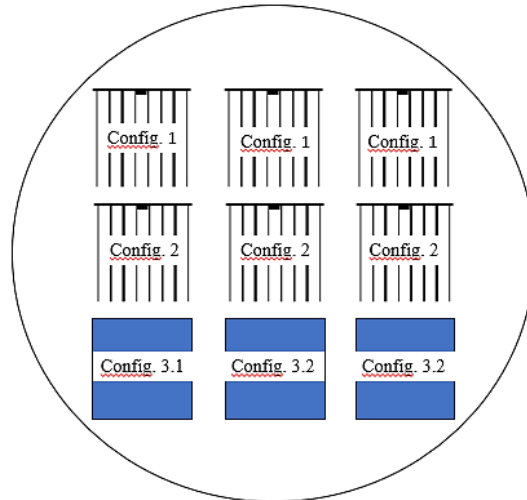


Figura 3 - Esquema das amostras para análise do processamento com laser.

Após o término dos processos, todas as lâminas foram imersas na limpeza em HF diluído em água deionizada seguido de limpeza em solução de RCA2.

## 2.2. Técnicas de caracterização

As amostras foram caracterizadas por microscopia óptica, medição de resistência de folha pela técnica de quatro pontas e tempo de vida dos portadores de carga minoritários ( $\tau$ ).

### 2.2.1 Microscopia óptica

A análise em microscopia ótica foi a primeira caracterização realizada após o processamento das amostras. O equipamento usado foi o microscópio ótico BX51M, da marca Olympus. Foram adquiridas imagens das regiões processadas com laser e formadas na parte central da lâmina de silício, sendo duas imagens de cada configuração em 5x e 10x de aumento. O objetivo dessa caracterização foi observar variações na textura superficial das amostras nos diferentes tempos de texturação seletiva bem como comparar a largura das trilhas com emissor seletivo.

### 2.2.2 Resistência de folha

A medida da resistência de folha ( $R_{SQ}$ ) de um dispositivo semiconductor permite realizar uma estimativa do nível de dopagem, além de uma medida indireta da homogeneidade da difusão. A técnica utilizada para a medida da resistência de folha consistiu no método de quatro pontas (Schroder, 2005). Nesse método quatro ponteiras condutoras espaçadas entre si são posicionadas em uma região de interesse sobre a superfície dopada. Uma corrente elétrica é aplicada nas duas ponteiras externas enquanto que entre as internas se mede a diferença de potencial.

### 2.2.3 Tempo de vida dos portadores de carga minoritários

A medição do tempo de vida dos portadores de carga minoritários ( $\tau$ ) foi realizada pela técnica do decaimento da fotocondutividade e reflexão de micro-ondas ( $\mu$ PCD). Nessa técnica, a lâmina de silício recebe radiação pulsada de um

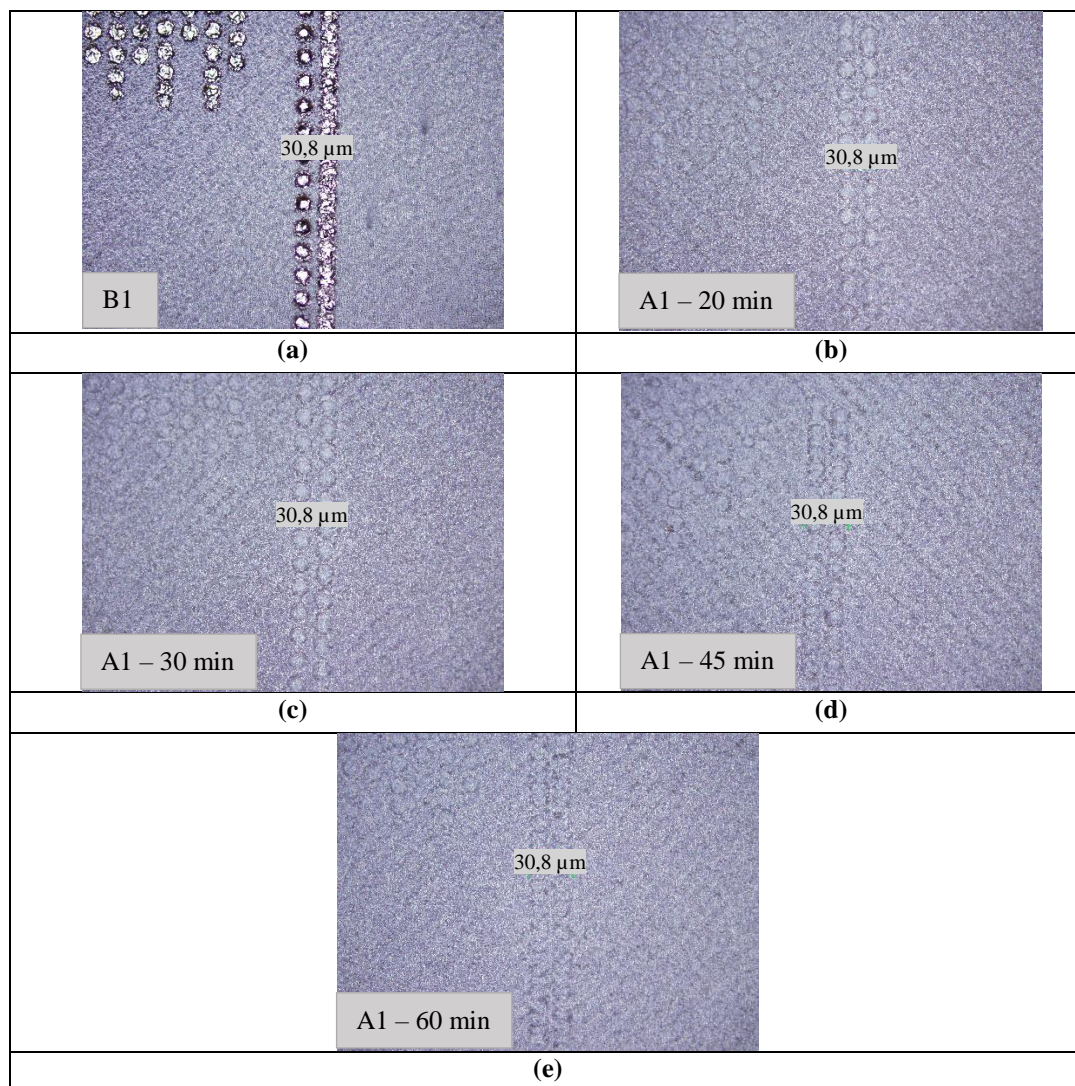
laser de modo a iniciar o processo de geração de pares elétron-lacuna. Micro-ondas de 10 GHz são direcionadas à lâmina de silício. As ondas eletromagnéticas de 10 GHz são refletidas pela lâmina, detectadas e amplificadas. A potência refletida de micro-ondas depende da condutividade da amostra e esta é relacionada à quantidade de portadores de carga minoritários (Asada *et al.*, 2019). A taxa de recombinação dos portadores de carga minoritários é medida com base no tempo de decaimento da condutividade do dispositivo observado por meio da detecção da potência refletida das micro-ondas. A partir da taxa de recombinação obtém-se o tempo de vida dos portadores de carga minoritários (Schroder, 2005). O equipamento utilizado para esse tipo de medição foi o WT-2000PV, produzido pela Semilab. Para reduzir a recombinação em superfície, as lâminas foram imersas em solução de iodo-etanol (Horányi *et al.*, 1993).

### 3. RESULTADOS E ANÁLISE

#### 3.1. Análise das trilhas por microscopia

A Tab. 3 apresenta as imagens obtidas durante a análise por microscopia das trilhas do emissor seletivo formado no processo A nos quatro tempos distintos comparando com o resultado do processo B, para a configuração de laser 1. A configuração 1 baseada no trabalho de Salvador (2019), foi projetada para que não ocorresse sobreposição do feixe do laser durante a difusão. Assim o laser atinge a lâmina de maneira pontual, evitando-se as múltiplas fusões.

Tabela 3 - (a) Processo B1, (b) Processo A1- texturação por 20 min, (c) Processo A1- text. por 30 min, (d) Processo A1- text. por 45 min e (e) Processo A1- text. por 60 min.

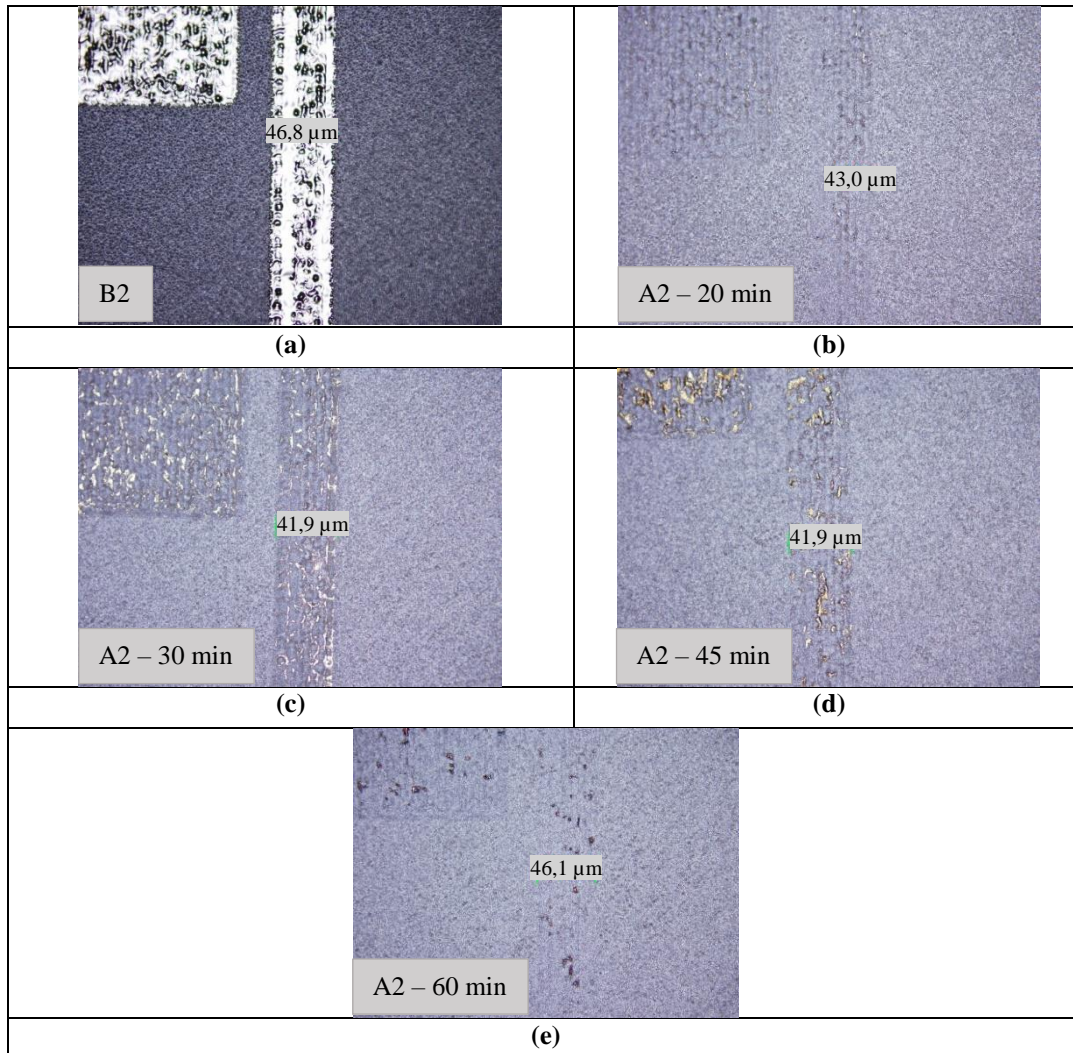


Observando-se os resultados das imagens da Tab. 3 é possível averiguar que a texturação seletiva removeu boa parte da região do emissor formado com laser, sendo que acima de 45 min de texturação seletiva torna-se muito difícil localizar a região do emissor seletivo.

A Tab. 4 mostra as imagens obtidas por microscopia óptica das trilhas do emissor seletivo formado no processo A nos quatro tempos distintos, comparando com o resultado do processo B, para a configuração de laser 2. A configuração

2, baseada no trabalho de Garcia (2016), foi projetada para formar uma trilha contínua na região onde posteriormente estarão as trilhas metálicas. Nessa configuração ocorre a sobreposição do feixe do laser durante a difusão. Assim o laser atinge a lâmina múltiplas vezes na região do emissor seletivo ocasionando múltiplas fusões. As múltiplas fusões aumentam a probabilidade de geração de defeitos da rede cristalina.

Tabela 4 - (a) Processo B2, (b) Processo A2 – texturação por 20 min, (c) Processo A2-text. por 30 min, (d) Processo A2-text. por 45 min e (e) Processo A2- text. por 60 min.



Analisando os resultados obtidos para a configuração 2, observa-se que a texturação seletiva foi capaz de remover boa parte da região formada durante o processamento com laser. Ainda é possível identificar as zonas, destacadas por sua coloração distinta, nos quatro tempos de texturação seletiva. Contudo, é difícil identificar essas regiões nas lâminas processadas com tempo de texturação a partir dos 45 min.

### 3.2. Análise de resistência de folha das regiões dopadas com boro

As amostras com emissor homogêneo  $p^+$  obtidos via processamento a laser foram utilizadas para as medidas de resistência de folha, pois devido a reduzida largura das trilhas, não é possível analisar a resistência de folha das trilhas formadas com laser. Na região de  $4,18 \text{ cm}^2$  dos dispositivos homogêneos foi possível obter três medidas de resistência de folha. A Tab. 4 apresenta os valores da média e do desvio padrão obtidos para a resistência de folha do emissor dopado com boro e submetidas aos distintos processos e tempos de texturação seletiva.

A medida da resistência de folha é um indicativo da homogeneidade da difusão de boro pelo processamento com laser. As amostras submetidas ao processo B apresentaram valores adequados para resistência de folha com baixo desvio padrão, indicando que o emissor formado pela difusão com laser é equivalente ao emissor formado por difusão em fornos convencionais com tubo de quartzo. Observa-se que os valores obtidos para todas as amostras que passaram por texturação seletiva, independentemente do tempo de texturação, apresentaram uma resistência de folha na faixa de  $53 - 60 \text{ } \Omega/\text{sq}$ ,

sendo maiores que os valores obtidos nas amostras do processo B, que foi de 26 a 28  $\Omega/\text{sq}$ . Esses dados são um indicativo que a texturação seletiva pode ter afetado a concentração e a profundidade do dopante de boro. Contudo, destaca-se que esses valores estão de acordo com resistências de folha obtidas por outras pesquisas que produziram emissores seletivos com boro (Lin *et al.*, 2020; Tomizawa *et al.*, 2016).

Tabela 4 – Média de resistência de folha obtida em cada amostra.

Amostra	Resistência de folha ( $\Omega/\text{Sq}$ )
B 3.1	$28,2 \pm 1,5$
B 3.2	$26,5 \pm 1,4$
A 3.1 Text 20 min	$60,0 \pm 5,6$
A 3.2 Text 20 min	$60,0 \pm 1,9$
A 3.1 Text 30 min	$55,1 \pm 2,5$
A 3.2 Text 30 min	$53,4 \pm 2,9$
A 3.1 Text 45 min	$60,7 \pm 3,9$
A 3.2 Text 45 min	$60,4 \pm 0,8$
A 3.1 Text 60 min	$59,5 \pm 1,8$
A 3.2 Text 60 min	$60,6 \pm 1,6$

### 3.3. Análise do tempo de vida dos portadores de carga minoritários

O tempo de vida dos portadores de carga minoritários foi analisado pela técnica de decaimento de fotocondutividade. Os resultados obtidos durante a análise por microscopia indicaram que, acima de 45 min de texturação seletiva, grande parte da região com difusão de boro por laser havia sido removida. Os resultados de resistência de folha indicaram um maior desvio padrão para o processo com 20 min de texturação seletiva, sugerindo uma menor homogeneidade da difusão de boro. Com base nesses resultados, foram selecionadas as amostras submetidas à texturação seletiva de 30 min e 45 min para a análise do  $\tau$ . O resultado dessas amostras foi comparado ao resultado obtido para o padrão B. A Fig. 5 apresenta a distribuição bidimensional do  $\tau$  obtido nas diferentes amostras.

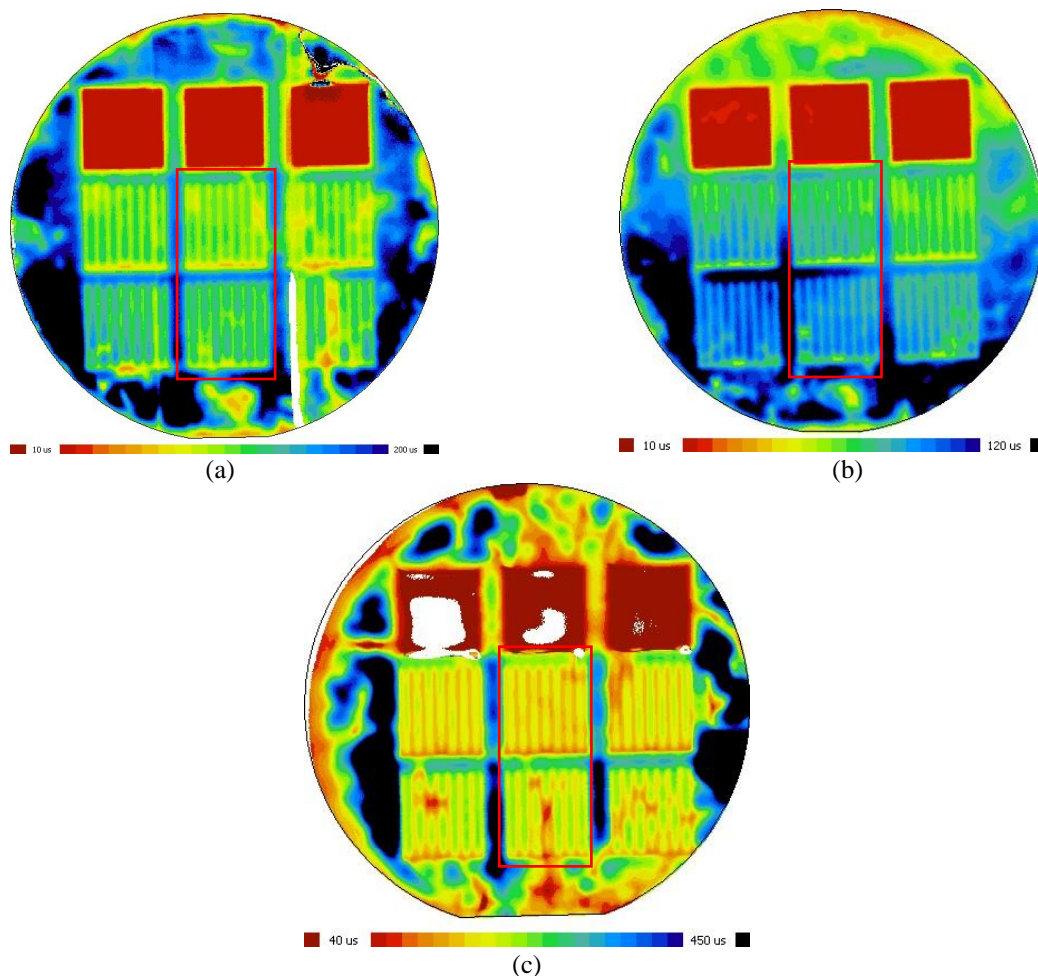


Figura 5 –Distribuição bidimensional do tempo de vida dos portadores de carga minoritários obtidos pela técnica  $\mu$ PCD para: (a) amostra do processo A, com texturação de 30 min, (b) amostra do processo A com texturação de 45 min e (c) amostra do processo B.

A fim de se obter uma análise quantitativa do tempo de vida dos portadores de carga minoritários na região do emissor seletivo formado com laser, foram calculados os valores médios  $\tau_{p+}$  de cada uma das 8 trilhas das amostras localizadas na região central da lâmina de Si, destacadas na Fig. 5, e onde ocorreu a difusão de boro com laser. Também se obteve os valores médios de  $\tau_{sem\ difusão}$  para cada região entre as trilhas. Desta forma, foi possível calcular a diferença percentual entre  $\tau_{sem\ difusão}$  e  $\tau_{p+}$ , ou seja,  $\Delta\tau$  (%), sendo um valor relativo que indica a degradação da região processada com laser ou possíveis melhoras introduzidas pela texturação seletiva. A Tab. 5 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 5 – Média dos valores de  $\tau_{p+}$ ,  $\tau_{sem\ difusão}$  e  $\Delta\tau$  (%) obtidos em duas amostras de cada lâmina de silício processada, conforme destacado na Fig.5.

Processo	$\tau_{p+}$ ( $\mu$ s)	$\tau_{sem\ difusão}$ ( $\mu$ s)	$\Delta\tau$ (%)
A1 30 min	113	127	11%
A2 30 min	97	106	9%
A1 45 min	90	97	7%
A2 45 min	74	82	9%
B1	186	216	14%
B2	159	187	15%

Analisando os mapas de  $\tau$  na Fig. 5 e os dados da Tab. 5, observa-se que a configuração 1 do laser baseada em Salvador (2019) apresentou valores de  $\tau$  absolutos maiores que a configuração 2 do laser baseada em Garcia (2016), para todas as amostras analisadas. Contudo, como as lâminas de silício possuem tempo de vida de base distintos ( $\tau$  inicial na lâmina de silício), a comparação só se torna viável ao se analisar a diferença percentual entre as regiões onde ocorreu a difusão a laser (trilhas) e a região sem difusão (entre trilhas). A partir da análise do  $\Delta\tau$  constata-se que não é possível identificar uma diferença significativa entre a configuração 1 e a configuração 2 do laser.

Observa-se que os maiores valores de  $\Delta\tau$  foram observados nas amostras do processo B, processo em que a texturação é realizada antes da difusão de boro com laser. Este resultado é um indicativo de que a texturação seletiva usada nas amostras A1 e A2 é capaz de remover parte dos danos ocasionados pelo processamento a laser resultando em menores valores  $\Delta\tau$ .

#### 4. CONCLUSÕES

Analisou-se a formação de emissores seletivos de boro em lâminas de silício monocristalino, obtidos com três distintas configurações de difusão com laser e quatro tempos de texturação seletiva. A análise em microscopia óptica das regiões com difusão com laser indicou que a texturação seletiva foi capaz de remover parte da região formada durante o processamento a laser, independentemente da configuração do laser. Observou-se que as regiões do emissor não são facilmente identificadas por microscopia óptica após 45 min de texturação seletiva. As amostras desenvolvidas pelo processo B (processo de controle) apresentaram resistências de folha de 26 – 28  $\Omega$ /sq, enquanto as amostras desenvolvidas com o processo A (processo com texturação seletiva) apresentaram um aumento nos valores de  $R_{sq}$ , sendo de 53 - 60  $\Omega$ /sq, o que não seria adequado. As regiões dopadas com boro e que ficarão sob as trilhas metálicas deveriam ter uma menor resistência de folha, com maior concentração de átomos de boro e maior espessura da região  $p^+$ .

Com relação a análise dos resultados de tempo de vida dos portadores de carga minoritários, não foi identificada diferença significativa no  $\Delta\tau$  das amostras processadas com a configuração 1 do laser em relação as amostras processadas com a configuração 2. Observou-se que o processo de texturação seletiva, após a difusão de boro com laser, gerou um menor valor de  $\Delta\tau$  que o observado nas amostras do processo B com texturação prévia ao processamento com laser. Esses resultados são um indicativo de que o uso de um ataque anisotrópico com KOH pós-difusão com laser reduz parcialmente os danos gerados no processamento.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), a Hewlett-Packard Brasil Ltda. (com recursos provenientes da Lei nº 8.248, de 1991) e à Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.



## REFERÊNCIAS

- Asada, T., Ichikawa, Y., Kato, M., 2019. Carrier lifetime measurements in semiconductors through the microwave photoconductivity decay method. *Journal of Visualized Experiments*, 146. <https://doi.org/10.3791/59007>.
- Blakers, A., 2019. Development of the PERC Solar Cell. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 9(3), pp. 629–635. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2899460>.
- Garcia, S. B. 2016. Desenvolvimento e Comparação de Células Solares p<sup>+</sup>nn<sup>+</sup> com Emissor Seletivo e Homogêneo. Tese de Doutorado, PGETEMA, PUCRS, Porto Alegre.
- Haverkamp, H., Dastgheib-Shirazi, A., Raabe, B., Book, F., Hahn, G., 2008. Minimizing the electrical losses on the front side: Development of a selective emitter process from a single diffusion. 2008 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2008.4922443>.
- Horányi, T.S., Pavelka, T., Tüttö, P., 1993. In situ bulk lifetime measurement on silicon with a chemically passivated surface. *Applied Surface Science*, 63, pp. 306-311.
- Hwang, Y., Park, C., Kim, J., Kim, J., Lim, J.-Y., Choi, H., Jo, J., Lee, E., 2015. Effect of laser damage etching on i-PERC solar cells. *Renewable Energy*, 79, pp. 131–134. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.067>
- Jäger, U., Mack, S., Wufka, C., Wolf, A., Biro, D., Preu, R., 2013. Benefit of selective emitters for p-type silicon solar cells with passivated surfaces. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 3(2), pp. 621–627. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2012.2230685>.
- Kuo, C.W., Kuan, T.M., Chueh, W.L., Wu, L.-G., Huang, C.C., Yu, C.Y., 2018. Impact of laser-doped selective emitters parameter for industrial mono PERC solar cells. 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC), pp. 1029–1032. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2018.8547466>.
- Lin, W., Daming chen, Liu, C., Wang, Y., He, Y., Zou, Y., Yuan, L., Gong, J., Yang, Y., Feng, Z., Liu, Z., Chen, Z., Xie, Q., Liang, Z., Chen, Y., Shen, H., 2020. Green-laser-doped selective emitters with separate BBr<sub>3</sub> diffusion processes for high-efficiency n-type silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 210, 110462. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110462>.
- Moehlecke, A., Luque, A., 1994. New approach to obtain boron selective emitters for Si solar cells. *Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion - WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PVSEC)*, 2, pp. 1492–1495. <https://doi.org/10.1109/WCPEC.1994.520233>
- Muñoz-Cerón, E., de la Casa, J., Ortega-Jódar, M. J., Almonacid, G., Talavera, D. L., P.G.Vidal, P.Pérez-Higueras, J.Gallego, Ruiz, A. M., Paramio, M. A. R., Jesus, M. J. del., 2009. Influence of different laser parameters in laser doping from phosphosilicate glass. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany, 1771–1774. <https://doi.org/10.4229/24THEUPVSEC2009-2CV.5.18>.
- Petersen, K. E., 1982. Silicon as a mechanical material. *Proceedings of the IEEE*, 70(5), pp. 420–457. <https://doi.org/10.1109/PROC.1982.12331>.
- Radfar, B., Es, F., Turan, R., 2020. Effects of different laser modified surface morphologies and post-texturing cleanings on c-Si solar cell performance. *Renewable Energy*, 145, pp. 2707–2714. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.031>.
- Salvador, V. F., 2019. Desenvolvimento e Análise de Células Solares Base N com Emissor Seletivo Formado por Radiação Laser. Dissertação de mestrado, PGETEMA, PUCRS, Porto Alegre.
- Schroder, D. K., 2005. *Semiconductor Material and Device Characterization*. Wiley.
- Tomizawa, Y., Ikeda, Y., Shiro, T., 2016. development of n-type selective emitter silicon solar cells by laser doping using boron-doped silicon paste. *Energy Procedia*, 92, pp. 419–426. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.07.122>.
- VDMA, 2022. *International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) - 2021 Results*. 13th Edition, 1(13).

### ANALYSIS OF SELECTIVE TEXTURING IN THE FORMATION OF P<sup>+</sup> EMITTERS WITH LASER IRRADIATION FOR N-PERC SOLAR CELLS

**Abstract.** *This article presents the processing and analysis of boron-doped emitters, formed through laser diffusion and selective texture etching. The samples were produced through two manufacturing processes, denoted as A and B, employing three distinct laser configurations for boron diffusion. In process A, or selective texture etching, boron diffusion occurred before the anisotropic etching to form a textured surface. This process involved the examination of four texturing times. In process B, surface etching was carried out before laser boron diffusion. The devices were analyzed through optical microscopy, sheet resistance measurement ( $R_{SQ}$ ), and minority carrier lifetime ( $\tau$ ). Samples developed by process B (the control process) exhibited sheet resistance values in the range of 26 – 28  $\Omega/sq$ , while samples developed by process A (selective texturing process) showed an increase in  $R_{SQ}$  values, in the order of 53 - 60  $\Omega/sq$ . Through the analysis of minority carrier lifetime, no significant difference in damage caused by different laser configurations was observed. When analyzing the percentage difference between the values of minority carrier lifetime in regions where laser diffusion occurred (fingers) and regions without diffusion (between fingers), a higher reduction in  $\tau$  was observed in*

*samples from the control process, with pre-laser texturing (process B). These results indicate that the use of an anisotropic etching post-laser diffusion partially reduces the damage generated during processing.*

**Keywords:** *Selective emitter; Laser diffusion; Boron emitter.*