

FORMAÇÃO DE EMISSORES SELETIVOS EM CÉLULAS SOLARES POR RADIAÇÃO LASER

Eduardo Augusto Zenzen¹ – eduardo.zenzen@pucc.br

Izete Zanesco^{1,2} – izete@pucc.br

Adriano Moehlecke^{1,2} – moehleck@pucc.br

Silvio Luís dos Reis Santos Júnior^{1,2} – silvio.reis@pucc.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, ¹Faculdade de Física, ²Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais

3.2 Células Fotovoltaicas

Resumo. Este artigo apresenta o desenvolvimento de uma técnica para a formação de emissores seletivos por meio de radiação laser para a fabricação de células solares de alta eficiência. O equipamento utilizado foi um sistema laser de estado sólido Nd:YAG, com comprimento de onda $\lambda = 1,064 \mu\text{m}$ e perfil de distribuição de energia gaussiano. Os parâmetros do processo de difusão laser estudados foram a irradiação do feixe e o número de irradiações. A obtenção do emissor seletivo n^{++} consiste na difusão de POCl_3 em forno convencional e posterior difusão laser seletiva sobre o emissor n^+ já formado. A efetividade da difusão seletiva por radiação laser foi caracterizada por meio da medida da resistência de folha. Foi observado que a presença do óxido de silício rico em fósforo, resultante da difusão com POCl_3 em forno convencional é necessária para a obtenção do emissor seletivo. O melhor resultado foi obtido quando a irradiação incidente foi da ordem de $28 \times 10^4 \text{ J/m}^2$ e número de irradiações igual a 25, com valores da resistência de folha da ordem de $17 \Omega/\square$ (n^{++}) e de $41 \Omega/\square$ (n^+).

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica, Células Solares, Emissores Seletivos, Radiação Laser

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Atualmente, grande parte da produção mundial de células solares é dominada pelo uso de lâminas de silício cristalino tipo p, de espessuras maiores que $200 \mu\text{m}$. Basicamente, nas indústrias as células solares são formadas por emissores homogêneos e metalização por serigrafia. São processos simples e de baixo custo. Porém a eficiência média dos módulos fotovoltaicos está limitada a valores entre 13 % e 14 % (Photon International, 2008). O inconveniente desta técnica é a resistência de contato ρ_c entre o emissor e as trilhas metálicas, e é baixa o suficiente somente para concentrações superficiais C_s de fósforo acima de 1×10^{21} átomos/cm³. Para uma elevada resposta espectral da célula solar na região do espectro azul, o emissor deve ter uma profundidade x_j da ordem de $0,3 \mu\text{m}$ a $0,4 \mu\text{m}$, o qual corresponde a resistência de folha R_\square da ordem de $60 \Omega/\square$. Para maiores valores da resistência de folha, a resistência de contato aumenta, ocasionando o aumento da resistência série R_s e diminuindo desta forma o fator de forma da célula solar. Conseqüentemente, a otimização da eficiência de uma célula solar pela diminuição da profundidade do emissor, que aumenta a resposta espectral na região do azul, está limitada pela resistência de folha do emissor (Schlosser *et al.*, 2006). Uma alternativa para minimizar este problema é aplicar uma estrutura de emissor com elevada concentração de dopante embaixo dos contatos metálicos a fim de obter uma baixa resistência de contato e uma elevada resistência de folha, com um emissor pouco profundo nas regiões da célula solar localizadas entre as trilhas metálicas, como ilustrada a Fig. 1. Esta configuração de emissor é denominada de emissor seletivo e pode melhorar a tensão de circuito aberto, o fator de forma e a eficiência de uma célula solar (Carlsson *et al.*, 2006), (Esturo-Breton *et al.*, 2005), (Esturo-Breton *et al.*, 2006) e (Münzer *et al.*, 2006).

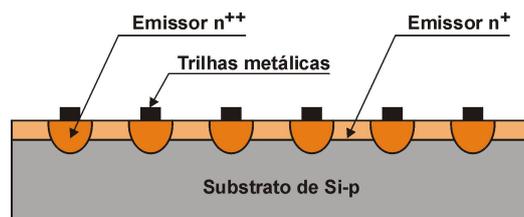


Figura 1. Seção transversal de uma célula solar com emissor seletivo.

Usualmente, a fabricação de células solares com emissores seletivos consiste em duas etapas de difusão e de fotolitografia para definição das diferentes regiões do emissor, tornando-se um processo demorado e de elevado custo. Um método alternativo à difusão em altas temperaturas em forno convencional para formação de emissores seletivos

n^{++} em células solares é a difusão por radiação laser. O processo de difusão por radiação laser tem a vantagem de fundir somente uma pequena região da superfície do silício, sem sobreaquecimento nem alteração da rede cristalina do volume. Pode-se obter pontualmente perfis de concentração e profundidade diferenciados das demais áreas da lâmina de silício (Carlsson *et al.*, 2006).

Estudos recentes sobre difusão laser em silício para obtenção de junções pn e emissores seletivos na fabricação de células solares apresentam resultados satisfatórios, porém os experimentos, na sua grande maioria, são executados em sistemas laser Nd:YAG, Nd:YVO₄ e Nd:YLF, que emitem radiação na segunda harmônica, além de apresentarem um sistema óptico diferenciado (Carlsson *et al.*, 2006), (Besi-Vetrella *et al.*, 1998), (Esturo-Breton *et al.*, 2005), (Ametowobla *et al.*, 2006) e (Esturo-Breton *et al.*, 2006).

O diferencial deste trabalho é a obtenção de emissores seletivos em um sistema laser Nd:YAG com emissão na harmônica fundamental ($\lambda = 1,064 \mu\text{m}$), com sistema óptico padrão, isto é, apresenta feixe laser circular. O objetivo deste trabalho é desenvolver uma técnica para formar a região n^{++} do emissor por meio de difusão por laser sobre o emissor n^+ formado em forno convencional com POCl₃. Foi avaliada a formação da região n^{++} com e sem óxido de silício rico em fósforo formado durante a difusão analisando a R_{\square} dos emissores.

2. DIFUSÃO POR LASER

2.1 Parâmetros

O parâmetro mais importante na difusão por laser é a densidade de energia ou irradiação de um pulso laser, representada por E_p e dada em J/m^2 :

$$E_p = \frac{P_M}{F \cdot A_{PP}} \quad (1)$$

onde P_M é a potência média do feixe laser, F a frequência de comutação e A_{PP} a área do pulso laser.

Outro importante parâmetro é o número de irradiações N_{IRR} incidentes na superfície do emissor. Este parâmetro define o número de fusões e recristalizações de cada elemento da superfície:

$$N_{IRR} = \frac{F \cdot d_p \cdot n}{V} \quad (2)$$

onde d_p é o diâmetro do feixe laser, n é o número de repetições o qual o feixe laser irá percorrer a mesma trajetória e V a velocidade de translação da mesa de trabalho. No sistema laser utilizado, a posição do feixe é fixa e a mesa de trabalho movimentada-se. Assim, considera-se que o feixe laser se move com a mesma velocidade da mesa.

2.2 Características

A quantidade de átomos de dopante incorporados à estrutura cristalina do silício aumenta com o aumento do número de irradiações laser à qual o silício é exposto e a profundidade de penetração dos átomos é função da energia incidente (Wolf e Tauber, 2000). Existe uma dependência entre irradiação incidente e a resistência de folha obtida após a difusão. Com o aumento da irradiação a resistência de folha diminui (Hopman *et al.*, 2007).

Defeitos cristalinos podem ser induzidos pela radiação laser, diminuindo a qualidade da junção pn dos dispositivos fabricados. A região difundida por laser apresenta uma recombinação dos portadores de carga minoritários ligeiramente maior que o resto da lâmina de silício (Besi-Vetrella *et al.*, 1998).

Estudos anteriores de Ametowobla *et al.* (2006), indicam a formação de defeitos em dispositivos fabricados com difusão por laser, porém foi observado que o processamento laser não tem influência nas características do volume da célula solar, evidenciado pela medição do tempo de vida efetivo dos portadores minoritários após a remoção da junção pn . A radiação laser somente tem efeito na região fundida e recristalizada da superfície da lâmina de silício.

No caso de difusão por laser em silício, durante a solidificação, o silício fundido que contém os átomos de dopante, é recristalizado epitaxialmente, mantendo a mesma orientação cristalina da porção de silício não fundida (Besi-Vetrella *et al.*, 1998), (Sarnet *et al.*, 2005), (Mayer e Sigmon, 1995) e (Esturo-Breton *et al.*, 2005). Medições por microscopia de transmissão eletrônica (TEM) mostram a ausência de defeitos cristalinos pós-processamento laser, tais como discordâncias (Ametowobla *et al.*, 2006).

2.3 Difusão por laser em células solares

Carlsson *et al.* (2006) realizaram um estudo sobre a difusão laser para obtenção de emissores seletivos em células solares. Utilizaram um sistema laser Nd:YVO₄ com $\lambda = 532 \text{ nm}$ e feixe laser com formato retangular de dimensões $6 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$ (largura x comprimento). A difusão de fósforo foi executada em forno convencional com POCl₃, onde foi obtida a resistência de folha de $55 \Omega/\square$. Em algumas amostras foi retirado o óxido de silício rico em fósforo

remanescente do processo de difusão. Nas regiões abaixo das trilhas metálicas foi executado o processo de difusão por laser. Os resultados mostraram que a diferença de resistência de folha final entre as lâminas com e sem óxido de silício pode ser desconsiderada. Com o aumento do número de irradiações obtiveram emissores mais profundos, enquanto que ao mesmo tempo a concentração em superfície diminuiu. Os autores apresentaram que a resistência de folha também diminui com o aumento do número de irradiações. Para $E_P = 2,8 \times 10^4 \text{ J/m}^2$ e $N_{IRR} = 24$, a resistência de folha decresceu de $55 \text{ } \Omega/\square$ para $16 \text{ } \Omega/\square$.

3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O sistema laser utilizado neste trabalho é um laser de estado sólido Nd:YAG que opera no comprimento de onda $\lambda = 1,064 \text{ } \mu\text{m}$, apresenta distribuição de energia gaussiano (TEM_{00}), potência máxima de 17 W e feixe laser com diâmetro igual a $25 \text{ } \mu\text{m}$.

O substrato utilizado para formar os emissores foi silício *Czochralski* tipo p, orientação $\langle 100 \rangle$, resistividade de base de $7 \text{ } \Omega\cdot\text{cm}$ a $13 \text{ } \Omega\cdot\text{cm}$, espessura da lâmina de $300 \text{ } \mu\text{m}$ e 100 mm de diâmetro.

Para as regiões do emissor sob as trilhas metálicas foram projetadas resistências de folha da ordem de $15 \text{ } \Omega/\square$ a $30 \text{ } \Omega/\square$. O objetivo foi determinar experimentalmente os parâmetros do processo da difusão por laser (E_P e N_{IRR}) que propiciem a obtenção da resistência de folha desejada.

A fim de possibilitar a caracterização da resistência de folha das regiões difundidas por laser, a radiação laser foi aplicada em regiões retangulares de $10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, sendo que estas regiões foram preenchidas com pulsos laser pela sobreposição entre pulsos e entre fileiras de pulsos, conforme ilustra a Fig. 2. A sobreposição entre pulsos é função da velocidade do feixe, da frequência de comutação e do diâmetro do feixe. A sobreposição entre fileiras de pulsos foi ajustada em 60 %, ou seja, $15 \text{ } \mu\text{m}$.

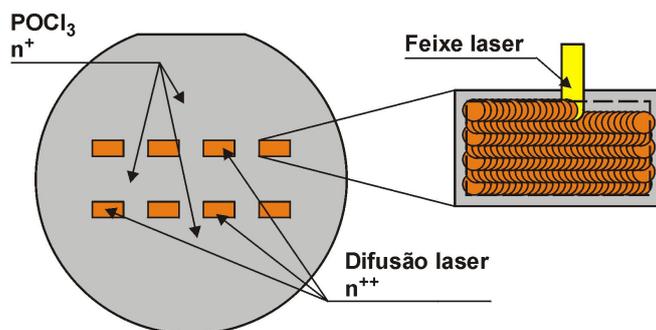


Figura 2. Esquema da aplicação da radiação laser em áreas retangulares. Em detalhe, o preenchimento destas regiões, por meio da sobreposição entre pulsos e entre fileiras de pulsos.

Da planilha de dados do fabricante do sistema laser foram extraídos os valores de potência média testados, em função da frequência de comutação e da corrente elétrica da fonte laser, os quais estão resumidos na Tab. 1.

Tabela 1. Potência média em função da frequência de comutação do sistema laser para diferentes frequências. Valores em watts.

Corrente elétrica (A)	Frequência $\times 10^3$ (Hz)	
	15	20
21,0	1,5	1,5
22,0	2,1	2,1

Fonte: (U.S. Laser Corporation, 2005).

O processo iniciou com as limpezas químicas CP4, RCA₁ e RCA₂. A difusão convencional com POC₁₃ foi implementada sobre toda a superfície da lâmina sendo que a temperatura e tempo de difusão foram de $850 \text{ } ^\circ\text{C}$ e 30 min , respectivamente. O óxido de silício rico em fósforo formado na difusão convencional em uma das amostras foi retirado em ácido fluorídrico diluído em água deionizada ($\text{H}_2\text{O di}$). A presença deste óxido foi um item de estudo deste trabalho. A amostra submetida à remoção do óxido também foi submetida à limpeza RCA₂. Na seqüência foram executadas oito difusões por radiação laser, iguais nas duas amostras, a fim de verificar quais parâmetros de processo são os mais indicados para a obtenção de emissores seletivos. Para cada região retangular foi utilizado um conjunto de parâmetros laser. Foram testados valores de potência média, frequência e velocidades conforme apresenta a Tab. 2. Após a difusão laser, ambas as amostras foram imersas em banho de HF diluído em água deionizada, a fim de remover qualquer óxido que tenha sido formado durante a difusão por laser. Por fim, foi medida a resistência de folha das regiões difundidas com POC₁₃ e das regiões difundidas com POC₁₃ com sobredifusão por laser, por meio da técnica quatro-pontas. A Fig. 3

resume as etapas do processo desenvolvido.

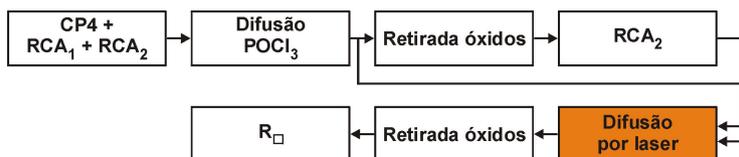


Figura 3. Etapas para formação do emissor seletivo por meio de difusão laser.

Tabela 2. Conjuntos de parâmetros de processo para difusão por laser sobre emissor formado com POCl₃ em forno convencional.

Conjunto	P_M (W)	F $\times 10^3$ (Hz)	V $\times 10^{-4}$ (m/s)	N_{IRR}	E_P $\times 10^4$ (J/m ²)
I-A	1,5	15	15	25	20,4
I-B	1,5	15	25	15	20,4
I-C	1,5	20	15	33	15,3
I-D	1,5	20	25	20	15,3
II-A	2,1	15	15	25	28,5
II-B	2,1	15	25	15	28,5
II-C	2,1	20	15	33	21,4
II-D	2,1	20	25	20	21,4

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados da medição da resistência de folha nas diferentes regiões possibilitou avaliar o processo de difusão por laser posterior à difusão convencional com POCl₃. Para cada região, foram realizadas três medidas e a média aritmética para cada conjunto de parâmetros é apresentada na Tab. 3. A coluna “sem óxido” indica os valores da resistência de folha medidos na amostra em que foi removido o óxido formado durante a difusão de fósforo e a coluna “com óxido” é referente à lâmina na qual o óxido não foi retirado.

Tabela 3. Resistência de folha obtida com os conjuntos de parâmetros de processo para difusão laser sobre emissor formado com POCl₃.

Conjunto	E_P $\times 10^4$ (J/m ²)	N_{IRR}	R_{\square} - (Ω/\square)	
			sem óxido	com óxido
I-A	20,4	25	32,3	41,5
I-B	20,4	15	40,1	39,5
I-C	15,3	33	47,0	41,5
I-D	15,3	20	44,4	48,0
II-A	28,5	25	37,0	17,1
II-B	28,5	15	49,2	18,7
II-C	21,4	33	45,5	27,0
II-D	21,4	20	44,6	26,9
POCl ₃	-	-	41,4	

Verifica-se na Tab. 3 que os menores valores de resistência de folha foram obtidos por meio da utilização do conjunto cuja irradiação foi a maior de todas: II (A e B), na presença do óxido de silício rico em fósforo. Observa-se que em todas as situações do conjunto II, com óxido, a resistência de folha das regiões irradiadas por laser apresentaram valores da resistência de folha menores que aqueles com somente difusão com POCl₃, evidenciando a efetividade da difusão por laser. Com os parâmetros da difusão por laser $E_P = 28,5 \times 10^4$ J/m² (II-A e II-B) sobre o óxido formado durante a difusão com POCl₃ obtêm-se um emissor n⁺ com $R_{\square} = 41 \Omega/\square$ e n⁺⁺ com $R_{\square} = 17 \Omega/\square$.

Da Tab. 3, verifica-se que para o caso de remoção do óxido após a difusão com POCl₃, para ambos os conjuntos I e II, há uma tendência de elevação da resistência de folha da situação de A para B, mesmo sendo a irradiação igual nos dois casos. A Tab. 3 mostra que o N_{IRR} nas situações A é maior que o das situações B (25>15) e, portanto, quanto menor o número de irradiações maior a resistência de folha. Este comportamento está de acordo com outras publicações (Carlsson *et al.*, 2006). Porém, ainda no caso da remoção do óxido, a tendência se inverte se considerarmos a situação C para D, apesar de em C o número de irradiações ser maior que em D (33>20). Contudo, nota-se que não há alteração significativa na resistência de folha após a irradiação laser na lâmina sem óxido quando comparada à amostra com difusão com POCl₃ somente. A incidência da radiação laser na superfície exposta da lâmina com difusão de fósforo

provoca a difusão dos átomos superficiais para o ambiente, reduzindo a concentração em superfície, ao mesmo tempo em que aumenta a profundidade da junção. A diminuição da concentração em superfície e o aumento da profundidade de junção acarretam em um valor de resistência de folha similar à situação inicial, como ilustra qualitativamente a Fig. 4-b.

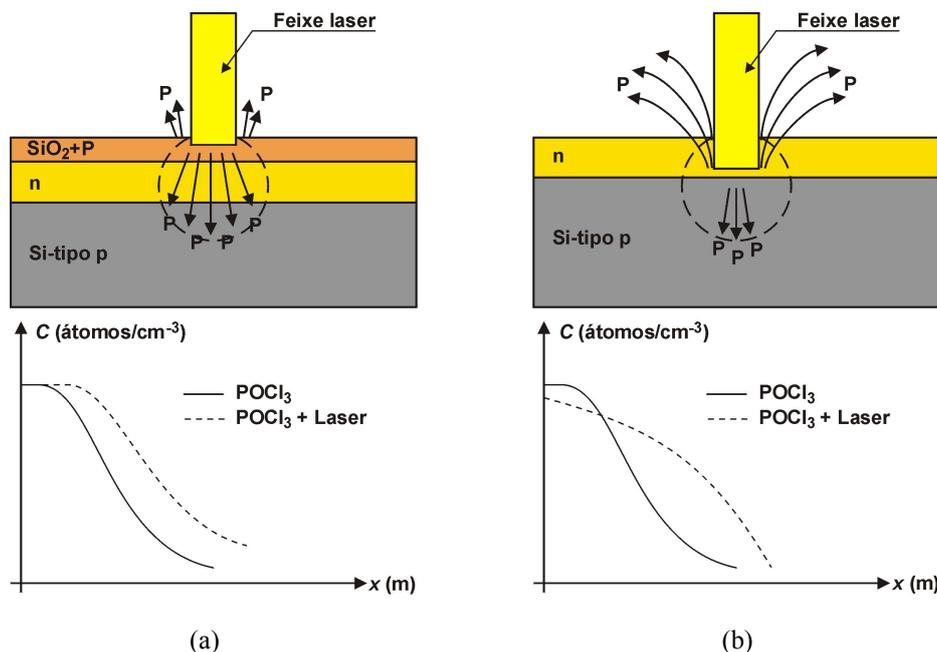


Figura 4. Esquema representativo da influência da (a) presença ou (b) ausência de óxido de silício sobre a superfície frontal na difusão por laser após à difusão de fósforo com POCl_3 .

Supõe-se que para a amostra com óxido de silício rico em fósforo, o próprio óxido forma uma barreira que evita a difusão dos átomos de fósforo presentes no emissor n^+ para o ambiente e também pode servir como uma fonte de fósforo, por conter este elemento em sua composição, como ilustra Fig. 4-a. O óxido atuando como barreira e/ou fonte de fósforo permite uma difusão maior de átomos de fósforo no silício.

Na Fig. 5 são apresentadas duas superfícies de uma lâmina de silício, nas regiões limites entre as áreas com e sem difusão laser, na presença de óxido de silício rico em fósforo. À esquerda da marca central estão localizadas as regiões sem difusão laser. A superfície resultante após o processo de difusão por laser com o conjunto de parâmetros I-A está representada na Fig. 5-a e o resultado alcançado com o conjunto II-A, na Fig. 5-b. Comparando a Fig. 5-a com a Fig. 5-b, observa-se que alterações superficiais ocorrem quando se aplica o maior valor de E_p .

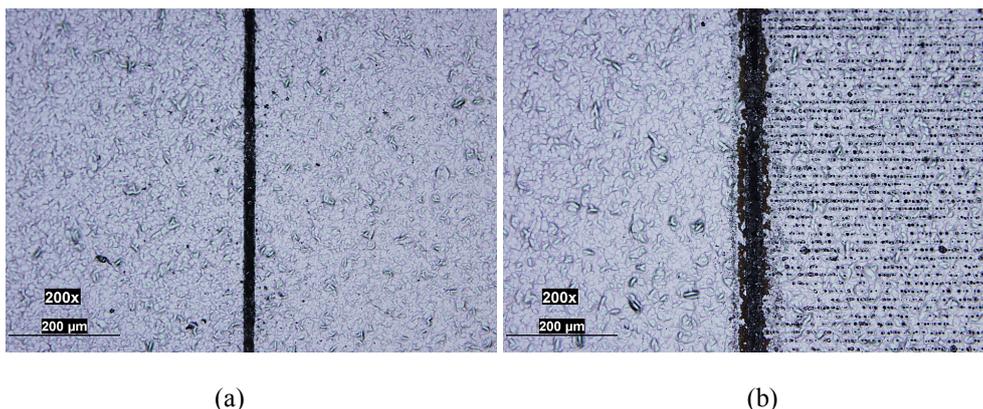


Figura 5. Superfície de uma lâmina de silício após difusão laser após à difusão com POCl_3 . As áreas à direita da marca central foram difundidas com laser: a) conjunto I-A e b) II-A.

5. CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um processo para a formação de emissores seletivos em células solares por meio da aplicação de radiação laser sobre o emissor n^+ formado na difusão com POCl_3 em forno convencional. Analisou-se a influência do óxido de silício rico em fósforo na difusão por laser. Conclui-se que quando o óxido é removido, a resistência de folha após a difusão com laser independente da faixa de valores de irradiação testada, de $15,3 \times 10^4 \text{ J/m}^2$ a $28,5 \times 10^4 \text{ J/m}^2$, praticamente não sofre alteração significativa em relação às regiões sem aplicação de radiação laser. A presença do

óxido tem influência quando a irradiação laser é de $21,4 \times 10^4 \text{ J/m}^2$ e $28,5 \times 10^4 \text{ J/m}^2$ e o número de irradiações é maior que 15, com os melhores resultados de resistência de folha para a maior irradiação e número de irradiações igual a 25. Neste caso, a resistência de folha da região n^{++} obtida com laser foi da ordem de $17 \Omega/\square$, enquanto que nas regiões com somente difusão em forno convencional a resistência de folha foi da ordem de $41 \Omega/\square$.

Agradecimentos

O autor agradece à PUCRS pela disponibilidade da política de educação para cursos de Pós-Graduação e à Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica (CEEE-D), pelos recursos financeiros para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Ametowobla, M. Köhler, J. R. Esturo-Breton, A. Werner, J. H. Characterization of a Laser Doping Process for Crystalline Silicon Solar Cells. Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference (Dresden, 2006), pp. 1440-1443.
- Besi-Vetrella, U. Salza, E. Pirozzi, L. Noel, S. Slaoui, A. Muller, J. C. 1998. Selective doping of silicon by rapid thermal and laser assisted processes, Materials Science in Semiconductor Processing, vol.1, pp. 325-329.
- Carlsson, C. Esturo-Bretón, A. Ametowobla, M. Köhler, J. R. Werner, J. H. Laser Doping for Selective Silicon Solar Cell Emitter. Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference (Dresden, 2006), pp. 938-940.
- Esturo-Breton, A. Ametowobla, M. Köhler, J. R. Werner, J. H. Laser Doping for Crystalline Silicon Solar Cell Emitters. Proceedings of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference (Barcelona, 2005), pp. 851-854.
- Esturo-Breton, A. Ametowobla, M. Carlsson, C. Köhler, J. R. Werner, J. H. 15.4% Efficiency Silicon Solar Cells With Laser Doped Emitter. Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference (Dresden, 2006), pp. 1247-1249.
- Hopman, S. Fell, A. Mayer, K. Aleman, M. Mesec, M. Müller, R. Kray, D. Willeke, G. P. Characterization of Laser Doped Silicon Wafers with Laser Chemical Processing. Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference (Milão, 2007), pp. 1257-1261.
- Horzel, J. Einhaus, R. De Clercq, K. Deurinckx, F. Van Kerschaver, E. Szlufcik, J. Nijs, J. Mertens, R. Optimisation results for an industrially applicable selective emitter process. Proceedings of the 2nd Photovoltaic World Conference (Viena, 1998), pp. 1483-1486.
- Photon International: The Photovoltaic Magazine, n. 2, p. 126, fevereiro de 2008.
- Mayer, J. E. Sigmon, T. W. 1995. Low power electronics and pulsed laser processing, Materials Chemistry and Physics, vol. 42, pp. 129-133.
- Moehlecke, A., 1996. Conceptos avanzados de tecnologia para celulas solares com emissores p^+ dopados com boro, Tese de Doutorado, IES, UPM, Madri.
- Münzer, K. A. Froitzheim, A. Schlosser, R. E. Tölle, R. Winstel, M. G. Over 18% Industrial Screen Printed Silicon Solar Cells. Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference (Dresden, 2006), pp. 538-543.
- Sarnet, T. Kerrien, G. Yaakoubi, N. Bosseboeuf, A. Dufour-Gergam, E. De'barre, D. Boulmer, J. Kakushima, K. Laviro, C. Hernandez, M. Venturini, J. Bourouina, T. 2005. Laser Doping for Microelectronics and Microtechnology, Applied Surface Science, vol. 247, pp. 537-544.
- Schlosser, R. E. Münzer, K. A. Froitzheim, A. Tölle, R. Winstel, M. G. Manufacturing of Transparent Selective Emitter and Boron Back-Surface-Field Solar Cells Using Screen Printing Technique. Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference (Dresden, 2006), pp. 1119-1124.
- U.S. Laser Corporation, 2005, Manual Model 4024 Nd:YAG Laser Micro-Machining System, U.S. Laser Corporation.
- Wolf, S. Tauber, R. N., 2000, Silicon Processing for the VLSI Era, 2^o ed, Sunset Beach: Lattice Press.

Abstract. This work presents the development of a process to form selective emitters to fabricate high efficiency silicon solar cells by using laser irradiation. A pulsed Nd:YAG solid-state laser processing system, with $1,064 \mu\text{m}$ wavelength and gaussian energy distribution was used. The irradiation of the laser beam and the number of irradiations were used as parameters for the laser diffusion process. The n^{++} emitter was obtained by diffusion with POCl_3 in conventional furnace followed by selective laser diffusion on the formed n^+ emitter. The effectiveness of the selective laser diffusion was characterized by the measure of the sheet resistance. It was observed that the silicon oxide with phosphorus, resulting from POCl_3 diffusion, is needed to obtain a selective emitter by laser irradiation. The best result is achieved when laser irradiation was around $28 \times 10^4 \text{ J/m}^2$ and the number of irradiation cycles was 25, in which the sheet resistances obtained were $17 \Omega/\square$ and $41 \Omega/\square$, for n^{++} and n^+ emitter, respectively.

Key words: Photovoltaic Solar Energy, Solar Cells, Selective Emitters, Laser Radiation.