

Desenvolvimento e análise de células solares industriais em silício multicristalino com somente uma difusão de fósforo

Development and analysis of industrial solar cells in multicrystalline silicon with single phosphorus diffusion

Gabriela Wehr

Doutora em Engenharia e Tecnologia de Materiais
PUCRS - Av. Ipiranga, 6681, Prédio 96A -
TECNO PUC, Porto Alegre - RS, Brasil
gabriela.wehr@pucrs.br

Izete Zanescio

Doutora em Engenharia
PUCRS - Av. Ipiranga, 6681, Prédio 96A -
TECNO PUC, Porto Alegre - RS, Brasil
izete@pucrs.br

Adriano Moehlecke

Doutor em Engenharia
PUCRS - Av. Ipiranga, 6681, Prédio 96A -
TECNO PUC, Porto Alegre - RS, Brasil
moehleck@pucrs.br

Resumo

O crescimento do mercado de células solares e a necessidade de substratos de menor custo tornam o silício multicristalino a principal alternativa para a fabricação de tais células. O objetivo desse artigo é apresentar o desenvolvimento de um processo industrial para fabricação de células solares em silício multicristalino com somente uma difusão de fósforo e metalização por serigrafia. Por meio de simulações, foram otimizados o emissor n^+ e a malha de metalização. Também foram analisadas a influência da largura das trilhas e a influência do tempo de vida dos minoritários. Experimentalmente, foi avaliada a influência do processo de queima das pastas de metalização. De acordo com as simulações, o valor da resistência de folha deve ser maior que $50 \Omega/\square$, para que a eficiência não diminua. Também se concluiu que a eficiência diminui de 0,3% a 0,5%, quando a largura das trilhas da malha de metalização é dobrada. Dos resultados experimentais, constatou-se que a temperatura de queima das pastas de metalização afeta, concretamente, a eficiência. A maior eficiência alcançada foi de 11,5%, para a temperatura de queima de 860°C .

Palavras-chave: Energia solar, células solares, silício multicristalino, processo de fabricação.

Abstract

The market growth and the need of low cost materials make multicrystalline silicon the main alternative for the solar cell industry. The goal of this article is to present the development of an industrial process for manufacturing multicrystalline silicon solar cells by using only one phosphorus diffusion and screen printing metalization. The n^+ emitter and the metallic grid were optimized through simulations and the influence of the width of the metal fingers and the bulk minority carrier lifetime were also analyzed. The influence of the firing conditions of the metal pastes was experimentally studied. According to the results obtained from the simulations, the value of the sheet resistance must be greater than $50 \Omega/\square$ in order to maintain the efficiency of the solar cells. We also concluded that the efficiency decreases from 0.3% to 0.5% when the width of the metal fingers is doubled. From experimental results, it was found that the firing temperature of metallization pastes significantly affects efficiency. The highest efficiency achieved was 11.5% for a firing temperature of 860°C .

Keywords: Solar energy, solar cells, multicrystalline silicon, fabrication process.

1. Introdução

A produção de energia elétrica, a partir da conversão direta da energia solar, denominada de energia solar fotovoltaica, é uma das alternativas para suprir o aumento da demanda de energia elétrica por meio de sistemas sustentáveis. As células solares são os dispositivos que realizam a conversão de energia. O módulo fotovoltaico é constituído de células solares, protegidas do ambiente externo, tornando o dispositivo resistente a impactos mecânicos e térmicos, com durabilidade superior a 30 anos. Porém o fator que limita a expansão dessa tecnologia é econômico. Consequentemente, uma das linhas de pesquisa seguida é o desenvolvimento de células solares de alta eficiência e/ou baixo custo.

O crescimento exponencial do mercado e a necessidade de um material de custo inferior ao silício monocristalino tornam o silício multicristalino (Si-mc) a principal alternativa. O processo de cristalização é de menor custo e produz um material de qualidade inferior, quando comparado ao processo Czochralski. Como resultado, a eficiência de conversão

de energia das células solares fabricadas em Si-mc, geralmente, é mais baixa que aquela obtida em dispositivos processados em lâminas de silício Czochralski (Si-Cz).

Durante os últimos anos, a procura por lâminas de Si-mc, no mercado, aumentou devido ao crescimento contínuo da eficiência dessas células. Esse aumento é consequência de uma progressiva melhora na qualidade do material e evolução dos processos de fabricação. No momento, o Si-mc apresenta o melhor compromisso entre custo e eficiência (Ponce-Alcántara et al., 2005). Consequentemente, 53% do mercado mundial de células solares é dominado por dispositivos fabricados em lâminas de Si-mc (Hering, 2011).

A maior eficiência alcançada em células processadas em substratos de silício multicristalino é de 20,4%, para dispositivos de área igual a 1 cm². O processo para a obtenção é elaborado e caro e realizado em laboratório (Green et al., 2011). Com processo industrial, foram fabricados dispositivos de até 19,3% em lâminas de Si-mc de 217,7 cm².

As células solares processadas em

substrato de silício cristalino tipo p podem ter a estrutura n⁺pn⁺ ou n⁺pp⁺, conforme mostram a Figura 1-A e a Figura 1-B, respectivamente. No primeiro tipo de dispositivo, é realizada uma difusão de fósforo em ambas faces da lâmina de Si. Outro processo industrial padrão, para se fabricarem células solares em Si-mc tipo p, inclui a formação do campo retrodifusor, também denominado de BSF (*back surface field*) pela deposição por serigrafia da pasta de Al e difusão em forno de esteira. A eficiência média alcançada é da ordem de 15% em produção industrial (Kränzl et al., 2005).

Esse trabalho tem como objetivo otimizar e desenvolver as principais etapas de um processo para fabricação de células solares em Si-mc, com estrutura n⁺pn⁺, isto é, com uma única difusão de fósforo e metalização por serigrafia. Foram otimizadas, por meio de simulações, a região altamente dopada n⁺ e a malha de metalização frontal e experimentalmente, foi otimizado o emissor e, também, foram otimizadas as condições de queima das pastas de metalização.

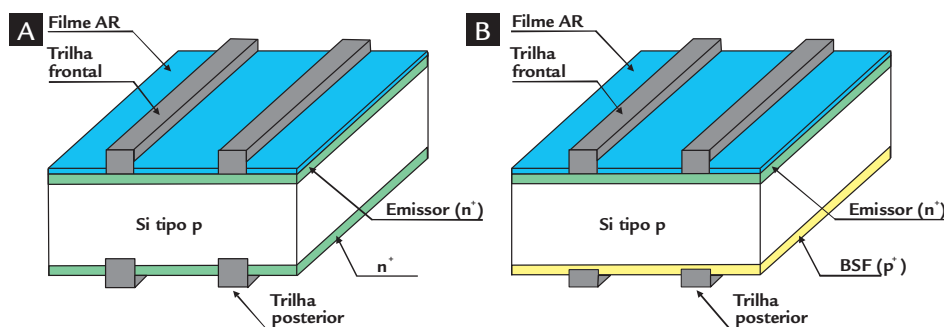


Figura 1
Estrutura (A) n⁺pn⁺ e (B) n⁺pp⁺ de células solares fabricadas em silício cristalino.

2. Materiais e métodos

Método para otimização por simulação de células solares

O objetivo dessa etapa foi otimizar a região altamente dopada n⁺ e a malha de metalização depositada por serigrafia por meio de simulações de células solares com o *software* PC-1D e um programa computacional desenvolvido em *Visual Basic*, para se calcularem os parâmetros da malha metálica (Mallmann, 2011). Para otimizar o emissor n⁺, considerou-se uma célula solar com campo retrodifusor, pois essa estrutura é facilmente simulada no programa computacional PC-1D e o emissor frontal n⁺ é similar para ambas estruturas. Também se considerou que a malha de metalização é constituída de duas barras coletoras e de trilhas per-

pendiculares.

A metodologia utilizada foi: simular a célula solar sem metalização, encontrar a melhor malha de metalização para o emissor considerando a menor perda de potência, calcular a corrente elétrica de saturação no escuro e simular novamente a célula solar com metalização otimizada (Cuevas et al., 1992; Mallmann et al., 2008; Mallmann, 2011). Considerou-se o substrato de Si-mc com resistividade de base de 1 Ω.cm, espessura de 240 μm e com texturação. As células solares foram simuladas com passivação com óxido de silício, filme antirreflexo e altura das trilhas da malha de metalização de

10 μm. A velocidade de recombinação em superfície, para a região n⁺ e p⁺, sem metalização, foi calculada em função da concentração do dopante (Cuevas et al., 1992; Cuevas et al., 1997). Na região sob a malha metálica, para a região p⁺, considerou-se a velocidade de recombinação de 1x10⁷ cm/s. Para a região n⁺, esse parâmetro foi calculado por meio da corrente de saturação do diodo no escuro. Com essa metodologia, determinaram-se a curva da densidade de corrente elétrica, em função da tensão aplicada (J-V), e os parâmetros de desenho da malha de metalização. A curva J-V foi obtida considerando as condições padrão de medição: irradiância

solar de 1000 W/m², espectro solar AM1 de 5G e temperatura da célula de 25°C.

Esse método foi aplicado para cada dispositivo simulado. Para analisar a influência do tempo de vida dos portadores

minoritários (τ) na eficiência, simularam-se células solares para τ igual a 1 μ s, 10 μ s, 50 μ s e 100 μ s. Para cada valor de tempo de vida dos portadores minoritários, foram otimizados dispositivos com trilhas

com largura de 100 μ m e 200 μ m, valores típicos de células solares industriais com metalização por serigrafia. Ao todo foram simuladas, aproximadamente, 1.700 células solares.

Metodologia experimental para o desenvolvimento do processo fabricação de células solares

Utilizaram-se amostras de Si-mc de 60 mm x 60 mm, tipo p, dopadas com boro. Cada amostra apresentava espessura média de 240 μ m e resistividade de base de 0,5 Ω .cm a 2,0 Ω .cm. Nos processos de difusão de fósforo com POCl₃, em forno convencional, variou-se a temperatura, a fim de se obter a resistência de folha necessária para o processamento das células solares. Processaram-se conjuntos de amostras com tempo de difusão de 30 minutos e temperaturas de 800°C, 820°C, 830°C, 840°C, 850°C e 900°C.

3. Resultados e discussão

Influência da largura das trilhas e do tempo de vida dos portadores minoritários na eficiência

Após a aplicação do método de otimização por simulação, para a largura das trilhas da malha de metalização (L) de 100 μ m e 200 μ m e para cada valor do tempo de vida dos portadores minoritários, selecionaram-se a concentração em superfície (C_s) e o intervalo da profundidade de junção (x_j) do emissor frontal que resultaram na máxima eficiência das células solares. Para todos os

valores de τ e largura das trilhas, a concentração em superfície encontrada foi de 5×10^{19} átomos/cm³. Esse valor de C_s pode ser baixo para a metalização com a pasta de Ag por serigrafia, pois a resistividade de contato aumenta com a redução desse parâmetro. Por falta de dados na literatura, considerou-se a resistividade de contato fixa de $7,3 \times 10^{-3}$ Ω cm², medida para uma resistência de folha

me antirreflexo e contata a região n⁺. Essa é uma das estruturas usadas na indústria de células solares pela sua simplicidade e baixo custo (Vasquez, 2010; Wehr, 2008).

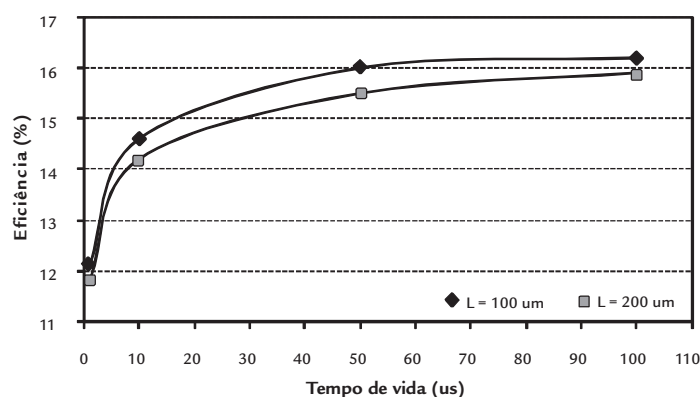
A queima da pasta metálica foi realizada para as temperaturas de 840°C, 860°C, 880°C, 900°C e 920°C e velocidades da esteira de 180 cm/min, 190 cm/min e 220 cm/min. Após o processo de fabricação, todas as células foram caracterizadas por meio do sistema de medição da curva de corrente elétrica, em função da tensão aplicada (I-V), sob condições-padrão de medição.

da ordem de 50 Ω/\square (Bueno, 1997). Os resultados são apresentados na Tabela 1 e na Figura 2. Conforme esperado, a eficiência (η) cresce com o aumento do τ e diminui de 0,3% a 0,5%, quando a largura das trilhas da malha metálica é dobrada. Conclui-se que, para o tempo de vida dos portadores minoritários de 50 μ s e largura das trilhas da malha de metalização de 100 μ m, a resistência de

Tabela 1
Resultados da otimização por simulação do emissor frontal e eficiência de células solares em Si-mc, em função da largura das trilhas (L) e do tempo de vida dos portadores minoritários (τ).

τ (μ s)	L (μ m)	x_j (μ m)	R_{\square} (Ω/\square)	η (%)
1	100	0,4 – 1,0	107 – 43	12,1
	200	0,7 – 1,0	61 – 43	11,8
10	100	0,5 – 1,1	86 – 39	14,6
	200	0,6 – 1,1	71 – 39	14,2
50	100	0,4 – 0,8	107 – 53	16,0
	200	0,5 – 1,1	86 – 39	15,5
100	100	0,3 – 0,9	143 – 48	16,2
	200	0,5 – 1,1	86 – 39	15,9

Figura 2
Eficiência das células solares processadas em Si-mc, em função do tempo de vida dos minoritários para L = 100 μ m e L = 200 μ m.

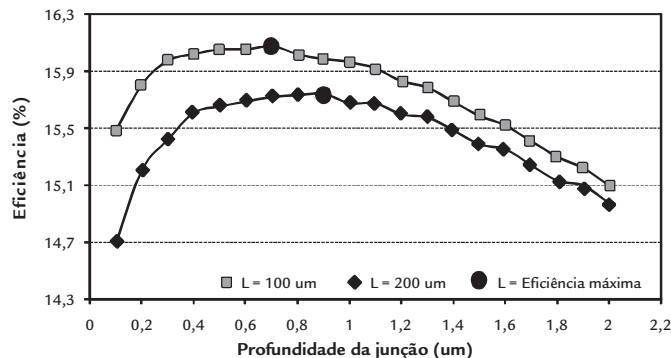


folha (R_{\square}) do emissor está no intervalo de $50 \Omega/\square$ a $110 \Omega/\square$.

Pela Figura 2, nota-se que a eficiência cresce, significativamente, para valores do tempo de vida dos portadores minoritários de até $50 \mu\text{s}$. A partir desse valor, a taxa de aumento da eficiência é menor. Por exemplo, para $\tau = 50 \mu\text{s}$ e $\tau =$

$100 \mu\text{s}$, a eficiência é de 16,0% e 16,2%, respectivamente. Para maiores valores do tempo de vida dos portadores minoritários, a recombinação em superfície torna-se mais efetiva, sendo necessária uma melhor passivação da superfície, para aumentar a eficiência.

A influência da largura das trilhas,



nos parâmetros do emissor, é mostrada na Figura 3. Considerando os dois dispositivos de maior eficiência, destacados na Figura 3, verifica-se que, quanto mais larga a trilha, maior é a profundidade da região altamente dopada. Consequentemente, a resistência de folha diminui, como se pode observar na Tabela 1.

Figura 3

Comparação da eficiência das células solares com diferentes larguras das trilhas, para $\tau = 100 \mu\text{s}$ e $C_s = 5 \times 10^{19}$ átomos/cm³. O ponto destacado corresponde à máxima eficiência.

Influência da largura das trilhas e do tempo de vida dos portadores minoritários na malha de metalização

Para o valor de C_s e para o intervalo de profundidade da região altamente dopada n^+ , que resultaram nas células solares de maior eficiência, selecionaram-se os parâmetros da malha metálica, tais como: distância entre as trilhas (d), largura da barra coletora (L_B) e área metalizada (A_{met}). Esses parâmetros, para $L = 100 \mu\text{m}$ e $L = 200 \mu\text{m}$, são resumidos na Tabela 2, com o objetivo de comparar os resultados para os diferentes valores do tempo de vida dos portadores minoritários considerados na simulação. Observa-se que a largura da barra coletora otimi-

zada cresce, ligeiramente, com o aumento do tempo de vida dos portadores minoritários, para as duas larguras de trilhas. Também se nota que a distância entre as trilhas tende a diminuir com o aumento do tempo de vida dos portadores minoritários, pois estes aumentam a corrente de curto-circuito e, também, a tensão de circuito aberto. Como consequência das duas conclusões anteriores, a área metalizada, na face frontal, cresce com o aumento do tempo de vida dos portadores minoritários, para ambas as larguras das trilhas. Esse resultado deve-se ao fato de

que a corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto aumentam. Para manter o fator de forma superior a 0,78, ocorre o aumento da área metalizada, na face frontal.

Conforme esperado, observa-se que, para o mesmo valor do τ , a distância entre as trilhas aumenta com a largura das trilhas metálicas, porém a largura da barra coletora permanece a mesma. Apesar de a distância entre trilhas ser maior, a área metalizada, na face frontal, aumenta com L , pois a largura das trilhas é dobrada.

L (μm)	τ (μs)	d (cm)	L_B (cm)	A_{met} (cm ²)
100	1	0,1992 a 0,2558	$6,73 \times 10^{-2}$ a $6,68 \times 10^{-2}$	0,83 a 0,73
	10	0,2078 a 0,2564	$6,92 \times 10^{-2}$ a $6,86 \times 10^{-2}$	0,83 a 0,74
	50	0,1950 a 0,2355	$6,94 \times 10^{-2}$ a $6,92 \times 10^{-2}$	0,86 a 0,77
	100	0,1792 a 0,2423	$6,96 \times 10^{-2}$ a $6,93 \times 10^{-2}$	0,91 a 0,79
200	1	0,3128 a 0,3506	$6,73 \times 10^{-2}$ a $6,68 \times 10^{-2}$	0,95 a 0,89
	10	0,2930 a 0,3531	$6,92 \times 10^{-2}$ a $6,86 \times 10^{-2}$	0,99 a 0,90
	50	0,2762 a 0,3522	$6,94 \times 10^{-2}$ a $6,92 \times 10^{-2}$	1,04 a 0,90
	100	0,2756 a 0,3512	$6,96 \times 10^{-2}$ a $6,93 \times 10^{-2}$	1,05 a 0,90

Tabela 2

Resultados da otimização por simulação da malha metálica das células solares, em função da largura das trilhas (L) e do tempo de vida dos portadores minoritários (τ).

Desenvolvimento e análise do processo de fabricação

A resistência de folha do emissor, em função da temperatura, é apresentada na Figura 4, para o tempo de difusão de 30 minutos. Conforme esperado, a resistência de folha diminui com o aumento da temperatura. A resistência de folha de $50 \Omega/\square$ foi selecionada, para o desenvolvimento do processo de metalização por serigrafia, e foi obtida para a temperatura de difusão de 820°C . Para este

processo, o valor do tempo de vida dos portadores de carga minoritários medido com a técnica do decaimento da fotocondutividade foi de, aproximadamente, $65 \mu\text{s}$, superior ao valor inicial de $38 \mu\text{s}$, demonstrando a ocorrência de *gettering* com a difusão de fósforo.

Na Figura 5, mostra-se uma das células solares fabricadas. A variação da velocidade da esteira, praticamente, não

alterou as características elétricas das células solares e selecionou-se a velocidade da esteira de 190 cm/min. A densidade de corrente de curto-circuito (J_{sc}), a tensão de circuito aberto (V_{oc}), o fator de forma (FF) e a eficiência de conversão de energia solar em elétrica das células solares em função da temperatura de queima das pastas são apresentados na Figura 6 e na Tabela 3. Observa-se que as células com maior efi-

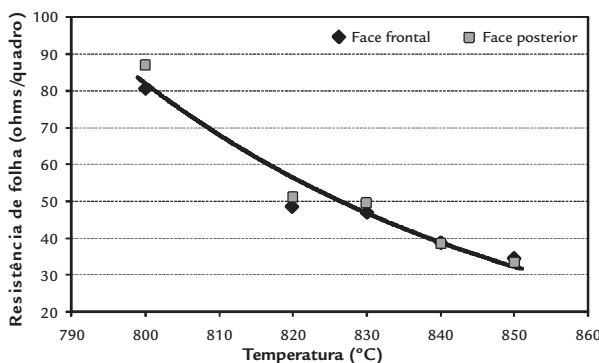


Figura 4 Resistência de folha, em função da temperatura, para o tempo de difusão de 30 minutos.

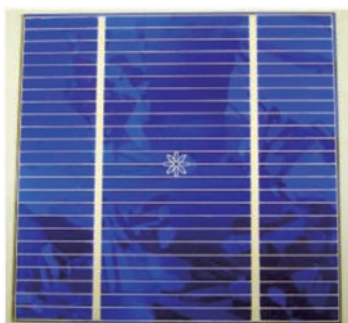


Figura 5 Célula solar desenvolvida em Si-mc com somente uma difusão de fósforo.

ciência foram processadas nas temperaturas de queima das pastas de metalização entre 860°C e 880°C. A maior eficiência alcançada foi de 11,5 %, com FF de 0,74, para a temperatura de queima de 860°C. Nota-se que os maiores valores médios de FF e J_{SC} ocorrem para as referidas temperaturas, porém a J_{SC} é menos afetada pela temperatura de queima da pasta. A V_{OC} aumenta com a diminuição da temperatura de queima das pastas até 860°C. O FF é o parâmetro que mais afeta a eficiência das células solares.

Dessa análise, constatou-se que os parâmetros que limitam a eficiência da célula solar são o fator de forma e a

densidade de corrente de curto-circuito. O primeiro é influenciado, principalmente, pela resistência série e o segundo, pela refletância da superfície da célula solar, pois não foi realizado um processo de texturação.

A fim de se avaliarem as trilhas da malha metálica na face frontal, amostras foram analisadas com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura. Na Figura 7A, ilustra-se a superfície de uma trilha de Ag e observa-se que a deposição foi uniforme, com largura igual a 150µm, definida pela máscara. A espessura da trilha foi de, aproximadamente, 16 µm, conforme mostra a Figura 7B.

Considerando que o tempo de vida dos minoritários é da ordem de 65µs, podem-se comparar os melhores resultados experimentais com os valores otimizados por simulação. Para $\tau = 50 \mu s$ e largura das trilhas de 100 µm, a eficiência máxima é de 16 %, com $J_{SC} = 31,5 \text{ mA/cm}^2$, $V_{OC} = 636 \text{ mV}$ e $FF = 0,79$. Os valores experimentais medidos foram iguais a: $J_{SC} = 26,9 \text{ mA/cm}^2$, $V_{OC} = 577 \text{ mV}$ e $FF = 0,74$, resultando em $\eta = 11,5\%$. Essa diferença pode ser explicada, pois a estrutura utilizada, para a fabricação de células solares, é n⁺pⁿ, enquanto que a estrutura simulada foi n⁺ppⁿ. A estrutura simulada resulta em maior tensão de circuito

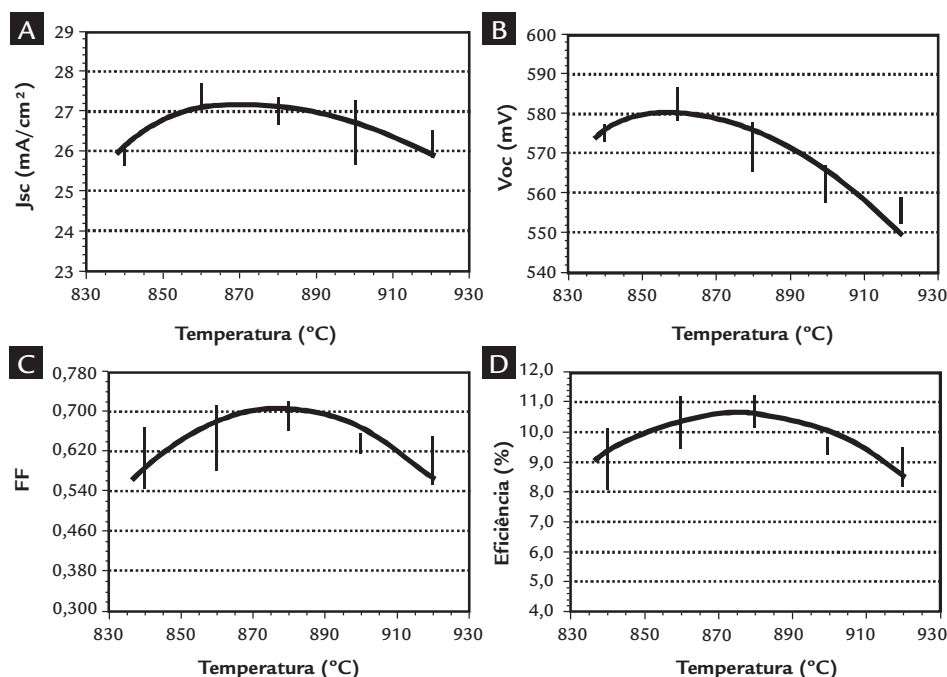


Figura 6 (A) J_{SC} , (B) V_{OC} , (C) FF e (D) η , em função da temperatura de queima das pastas, para a velocidade da esteira de 190 cm/min. As barras apresentam o desvio-padrão para cada temperatura.

aberto e em maior densidade de corrente de curto-circuito. Os dispositivos foram fabricados sem texturação da superfície, o que diminui a J_{sc} . Além disso, a malha metálica das células solares foi implemen-

tada com trilhas com 150 μm de largura, aumentando o fator de sombra e diminuindo a densidade de corrente de curto-circuito. Resultados experimentais com células solares processadas em lâminas

de Si-mc com campo retrodifusor e texturação alcançaram a eficiência de 14,1% (Wehr, 2011). Nesse caso, a diferença entre os resultados experimentais e simulados deve-se à qualidade do substrato.

T (°C)	Valor	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF	η (%)
840	Máximo	26,1	575,9	0,666	10,0
	Médio (2 células)	26,0	575,2	0,607	9,1
860	Máximo	26,9	577,4	0,741	11,5
	Médio (3 células)	27,3	582,5	0,646	10,3
880	Máximo	26,9	573,0	0,738	11,4
	Médio (5 células)	27,0	571,2	0,690	10,7
900	Máximo	27,2	566,5	0,624	9,6
	Médio (2 células)	26,5	562,3	0,638	9,5
920	Máximo	26,2	558,1	0,646	9,4
	Médio (2 células)	26,3	556,1	0,602	8,8

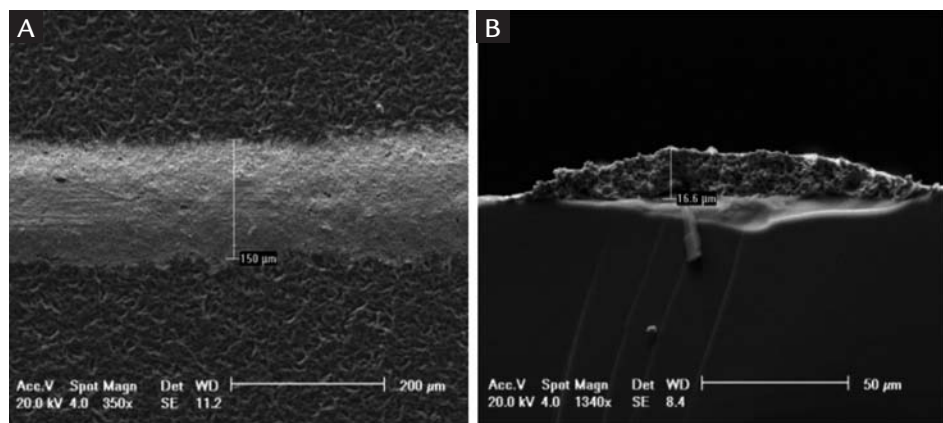


Tabela 3

Características elétricas das células solares, em função da temperatura de queima da pasta, para velocidade de esteira de 190 cm/min.

Figura 7

A) Largura de uma trilha da malha metálica, com aumento de 350 vezes.
B) Altura da trilha metálica, com aumento de 1340 vezes.

4. Conclusões

De acordo com os resultados obtidos, nas simulações com malha metálica com trilhas de 100 μm , é possível obterem-se células solares com 16,0 % de eficiência, com região de campo retrodifusor p^+ e tempo de vida dos portadores minoritários de 50 μs . A resistência de folha do emissor deve ser maior que $50\Omega/\square$.

A comparação dos resultados da simulação de células solares com largura das trilhas da malha metálica de 100 μm e de 200 μm demonstrou que a eficiência é menor, da ordem de 0,3% a 0,5%, para a maior largura das trilhas. Também se verificou que, quanto maior a largura das trilhas, maior a profundidade da junção para a mesma concentração em superfície. O aumento do tempo

de vida dos minoritários provoca um aumento significativo na eficiência até o valor de 50 μs .

Com a comparação das malhas de metalização, pôde-se constatar que, com o aumento da largura das trilhas, a área metalizada, na região frontal, aumentou. Também se verificou que a área metalizada no emissor cresceu com o aumento do tempo de vida dos portadores minoritários, para ambas as larguras das trilhas.

Experimentalmente, constatou-se que a resistência de folha de $50\Omega/\square$, selecionada para a fabricação de células solares com metalização por serigrafia, foi obtida para a temperatura de 820°C e tempo de difusão de 30 minutos, resultando no tempo de vida dos

minoritários de 65 μs .

Da análise das células solares fabricadas, constatou-se que a temperatura de queima das pastas afeta, significativamente, a eficiência das células solares. O fator de forma limita a eficiência dos dispositivos e depende da temperatura de queima das pastas. As maiores eficiências foram encontradas para temperaturas de queima entre 860°C e 880°C. A maior eficiência alcançada foi de 11,5%, com fator de forma de 0,74, para a temperatura de queima de pasta de 860°C. A principal diferença entre os resultados experimentais e os simulados deve-se ao fato de que, nas células solares simuladas, considerou-se o campo retrodifusor e as superfícies texturadas, que melhoram a J_{sc} e a V_{oc} .

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a subvenção da Companhia Estadual de Distribuição

de Energia Elétrica (CEEE-D), contrato CEEE/2009-9928171.

6. Referências bibliográficas

- BUENO, G. et al. Assessment of contact resistance in screen printed metallisations. In: EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION, 14. *Anais...* Barcelona: EUPVSEC, 1997. p. 815-818.
- CUEVAS, A. et al. Co-optimization of the emitter region and the metal grid of silicon solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 8, n. 6, p. 603-616, 1992.
- CUEVAS, A. et al. The recombination velocity of boron diffused silicon surfaces. In: EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION, 14. *Anais...* Barcelona: EUPVSEC, 1997. p. 2416-2419.
- GREEN, M. A. et al. Solar cell efficiency tables (Version 37). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 19, n. 1, p. 84-92, 2011.
- HERING, G. Year of the tiger. *Photon International*, p. 186- 214, março, 2011.
- KERN, W. *Handbook of semiconductor wafer cleaning technology: science, technology and applications*. New York: Noyes Publications, 1993. 623 p.
- KRÄNZL, A. et al. Industrial $\eta=15.5\%$ Mc-Si solar cells with boron BSF and open rear contact. In: EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION, 20. *Anais...* Barcelona: EUPVSEC, 2005. p. 781-784.
- MALLMANN, A. P. et al. Análise da largura das trilhas metálicas em células solares de silício com emissor seletivo posterior. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2 e CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DA ISES, 3. *Anais...* Florianópolis: II CBENS, 2008. p. 1-12.
- 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. (Tese de Doutorado). Disponível em: <http://tede.pucrs.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=3248>. Acesso em: 28 jul. 2011.)
- PONCE-ALCÁNTARA, S. et al. Adaptation of monocrystalline solar cell process to multicrystalline materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 87, n. 1-4, p. 411-421, 2005.
- VASQUEZ, C et al. Efficiency of commercial Cz-Si solar cell with a shallow emitter. *Materials Science and Engineering B*, v. 172, p. 43-49, 2010.
- WEHR, G. *Otimização e desenvolvimento de células solares industriais em substratos de silício multicristalino*. Porto Alegre-RS: PUCRS, 2008. (Dissertação de Mestrado). Disponível em: <http://tede.pucrs.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=1445>. Acesso em: 30 jun. 2011.
- WEHR, G. *Desenvolvimento e comparação de células solares n^+pn^+ e n^+pp^+ em silício multicristalino*. Porto Alegre-RS: PUCRS, 2011. (Tese de Doutorado). Disponível em: <http://tede.pucrs.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=3709>. Acesso em: 18 nov. 2011.

Artigo recebido em 14 de junho de 2011. Aprovado em 28 de março de 2012.