

ANÁLISE DA LARGURA DAS TRILHAS METÁLICAS EM CÉLULAS SOLARES DE SILÍCIO COM EMISSOR SELETIVO POSTERIOR

Ana Paula Mallmann – ana.mallmann@pucrs.br

Izete Zanesco – izete@pucrs.br

Gabriela Wehr – gabriela.wehr@pucrs.br

Adriano Moehlecke – moehleck@pucrs.br

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

3.2 Células Fotovoltaicas

Resumo. A produção de energia elétrica diretamente da conversão da energia solar, denominada de energia solar fotovoltaica, apresenta baixo impacto ambiental, porém necessita de todo o investimento na instalação. Uma das linhas de pesquisa seguidas para a redução de custos é o desenvolvimento de células solares de alta eficiência e/ou baixo custo. O objetivo deste trabalho foi analisar a influência da largura das trilhas metálicas frontais e posteriores nos parâmetros elétricos de células solares industriais, de 64 cm², para substratos de silício monocristalino crescido por fusão zonal flutuante (Si-FZ) e metalização por evaporação de metais. Foi projetada a estrutura da célula solar e aperfeiçoada a metodologia para otimização da estrutura apresentada. Em relação à otimização das regiões dopadas, foram otimizadas as regiões n⁺ e p⁺ da estrutura n⁺np⁺, com emissor seletivo posterior. Utilizando este método, também foi calculado o número de trilhas e a largura da barra coletora para cada célula solar otimizada. Concluiu-se que a largura das trilhas da malha de metalização na face frontal deveria ser de 30 μm. Também se verificou que quanto maior a largura das trilhas da malha de metalização, maior deve ser a profundidade da junção, independente da região dopada.

Palavras-chave: Célula Solar, Simulação de Células Solares, Emissor Seletivo.

1. INTRODUÇÃO

A demanda de energia elétrica no país será incrementada nos próximos anos e a expansão do sistema energético deverá visar o benefício da sociedade e do meio ambiente. Neste contexto, a produção de energia elétrica diretamente da conversão da energia solar, denominada de energia solar fotovoltaica, ganha destaque por ser simples e rápida de instalar, ser modular, ter baixo impacto ambiental, ter uma fonte de energia inesgotável e grátis, ser silenciosa e necessitar de pouquíssima manutenção.

Em nível mundial, esta tecnologia de conversão de energia está avançada e em pleno crescimento, principalmente nos países desenvolvidos, onde há fortes incentivos financeiros, tanto para a divulgação e instalação de sistemas fotovoltaicos quanto para o desenvolvimento científico e tecnológico. Em 2007, a produção mundial de módulos foi de 4280 MW, com um crescimento de 69 % em relação à produção do ano anterior (*Renewable Energy Focus*, 2008), sendo que 90 % do mercado mundial é relativo a módulos fotovoltaicos fabricados com silício cristalino (*Europe gains PV pole position*, 2005).

O problema primordial que dificulta o uso desta tecnologia é econômico. Conseqüentemente, uma das linhas de pesquisa seguida é o desenvolvimento de células solares de alta eficiência e/ou baixo custo. Porém, manter estas duas características em um mesmo dispositivo não é tarefa fácil. Até hoje, nenhum material ou tecnologia foi capaz de atingir completamente este objetivo, pois as células de alta eficiência são demasiado caras e as de baixo custo não alcançam rendimentos satisfatórios. A maior eficiência alcançada em células de silício monocristalino crescido por fusão zonal flutuante (*float-zone*), de 4 cm² de área, é de 24,7 % (Green *et al.*, 1999). Este dispositivo foi desenvolvido na Universidade de *New South Wales*, Austrália, com um processo não industrializável devido a sua complexidade.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi analisar a influência da largura das trilhas metálicas frontais e posteriores nos parâmetros elétricos de células solares industriais de 64 cm², considerando substratos de silício monocristalino crescido por fusão zonal flutuante (Si-FZ) e metalização por evaporação de metais.

Foi projetada a estrutura da célula solar e aperfeiçoada a metodologia para otimização da estrutura. Em relação à otimização das regiões dopadas foram otimizadas as regiões n⁺ e p⁺ da estrutura n⁺np⁺, com emissor seletivo posterior. A região n⁺ é dopada com POCl₃ e o emissor p⁺ com alumínio.

3. ESTRUTURA DA CÉLULA SOLAR

Para este trabalho foi projetada a estrutura n^+np^+ com emissor posterior seletivo, conforme ilustra a Fig. 1. Na região frontal n^+ , texturizada, forma-se o campo retrodifusor frontal (*Front Surface Field*) e na região posterior, também texturizada, o emissor seletivo. A otimização foi implementada considerando que as regiões n^+ e p^+ são formadas em forno de difusão convencional, com fósforo e alumínio, respectivamente. As lâminas são de silício crescido pela técnica da fusão zonal flutuante, tipo n. A área das células solares é de 64 cm². O emissor seletivo possibilita projetar uma estrutura de célula solar com dopagem profunda e concentração em superfície elevada sob as trilhas metálicas, para diminuir a resistência de contato. Entre as trilhas metálicas realiza-se a difusão de fósforo, similar a difusão na face frontal.

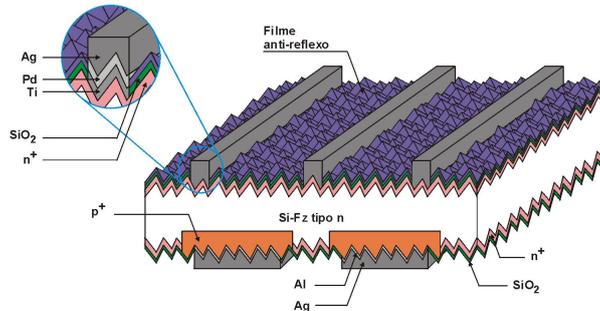


Figura 1 – Esquema da estrutura n^+np^+ da célula solar proposta, com emissor posterior seletivo.

A metalização é de alta qualidade, obtida pela evaporação de metais, seguida da deposição química de prata para aumentar a altura das trilhas metálicas. Neste tipo de metalização a malha é constituída de titânio, paládio e prata sobre a face n^+ e alumínio, titânio, paládio e prata sobre a face p^+ .

4. OTIMIZAÇÃO DE UMA CÉLULA SOLAR

Para a simulação de uma célula solar foi utilizado como ferramenta computacional o programa PC-1D. Além disso, foi aperfeiçoado um programa em *Visual Basic*, denominado MonoCel. Este programa tem como função calcular a velocidade de recombinação em superfície, a resistência série total, a corrente de saturação do diodo, os parâmetros elétricos de caracterização da célula solar e dimensionar a malha de metalização frontal e posterior, bem como organizar de forma seqüencial todo o procedimento de simulação (Mallmann, 2006).

De acordo com o procedimento adotado para a otimização da região frontal de uma célula solar, primeiramente calcularam-se, por meio do programa computacional PC-1D, os valores da tensão elétrica (V_M), corrente elétrica (I_M) e densidade de corrente (J_M) no ponto de máxima potência, considerando um dispositivo sem malha metálica e com área de 20 mm x 80 mm. Os resultados possibilitaram conhecer os limites de conversão do dispositivo.

Otimizaram-se células solares de 80 mm x 80 mm com duas barras coletoras como ilustra a Fig. 2. Na simulação, o dispositivo foi dividido em quatro áreas iguais de 20 mm x 80 mm para facilitar a determinação do número adequado de trilhas da malha de metalização. A velocidade de recombinação na região n^+ sob o metal foi fixada em 3×10^6 cm/s.

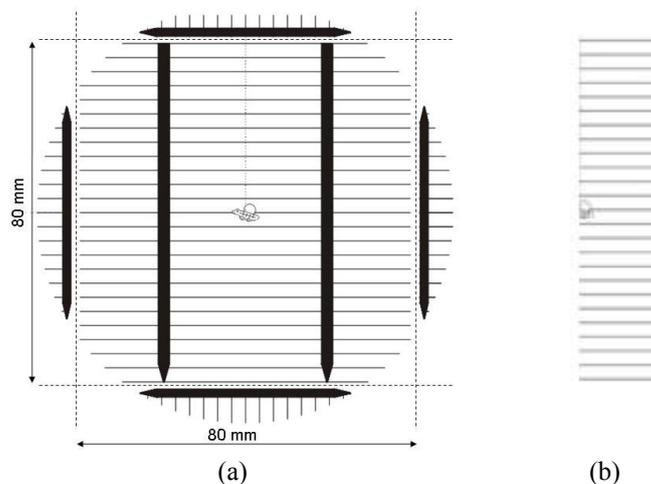


Figura 2 – (a) Célula solar com dimensões de 80 mm x 80 mm e (b) quarta parte do dispositivo, referente à área simulada.

A velocidade de recombinação (S) na superfície frontal n^+ varia com a concentração em superfície (C_s), de acordo com a equação proposta por Aberle (2004).

Da Fig. 1 observa-se que na estrutura da célula solar proposta o emissor é seletivo na região posterior. Entre as trilhas metálicas posteriores é formada uma região n^+ com passivação por óxido de silício. Portanto, a velocidade de recombinação efetiva na superfície posterior foi ponderada considerando a área e o valor da velocidade de recombinação nas regiões n^+ e p^+ sob as trilhas metálicas. A velocidade de recombinação entre as trilhas metálicas (região n^+) foi obtida a partir da equação proposta por Aberle (2004). Para a região p^+ , a velocidade de recombinação na região sob o metal foi fixada em 1×10^7 cm/s.

Uma célula solar necessita de uma malha metálica otimizada. Na região do campo retrodifusor n^+ (FSF) são evaporados três metais distintos, sendo que o titânio realiza contato direto com o silício. Os outros metais, sobrepostos ao titânio, são paládio e prata. Este último material define a resistividade de trilha por ser o de maior espessura. Na região p^+ , o contato entre a malha de metalização e o silício é realizado pela evaporação de Al. Sobre o Al é evaporado Ti, Pd e Ag. Cabe destacar que a altura das trilhas é definida pelo crescimento eletrolítico de prata sobre a prata evaporada. Portanto, na simulação da célula solar, considerou-se a resistividade da prata para calcular a resistência de trilha.

Conhecendo o valor da área metalizada do dispositivo, obtém-se, então, o valor da corrente elétrica de saturação. Para tal, simula-se, com o programa computacional PC-1D, uma célula solar de área igual à metalizada e sem iluminação, correspondendo a um diodo no escuro.

A partir da corrente do diodo (I) foi calculada a corrente de saturação (I_0) por meio da equação do diodo (Green, 1992). A corrente de saturação representa os portadores livres que podem fluir através da junção superando a barreira de potencial. O valor da corrente de saturação do diodo no escuro corresponde à recombinação sob as trilhas metálicas, que reduz principalmente a tensão de circuito aberto das células.

Para determinar a resistência série total, é necessário calcular a resistência lateral do emissor (R_3), as resistências de contato frontal (R_4) e posterior (R_1), a resistência das trilhas metálicas (R_5) e a resistência do metal da barra coletora (R_6). A Fig. 3 apresenta o esquema de uma célula solar mostrando as resistências série.

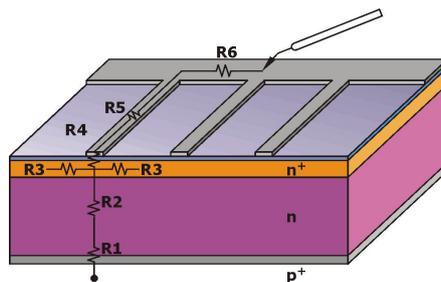


Figura 3 – Resistência série de uma célula solar, onde R_1 é a resistência de contato metal-semicondutor na região de BSF; R_2 é a resistência do material semicondutor; R_3 é a resistência do emissor (entre trilhas metálicas); R_4 é a resistência do contato metal-semicondutor sob as trilhas metálicas; R_5 é a resistência das trilhas metálicas e R_6 é a resistência da barra coletora (*busbar*).

Os valores da resistividade de contato do Ti na região n^+ e do Al na região p^+ empregados na simulação foram apresentados por Lou e Wu (1994).

A resistência de folha (R_{\square}) foi calculada com o programa PC-1D para o perfil de dopagem de cada região da célula solar. O valor da resistência de folha é usado como parâmetro de entrada para o cálculo da resistência série total.

Para a face frontal n^+ , calculou-se a resistência série total, por meio das equações apresentadas por Duerinckx *et al.* (2004), Luque (1989), Goetzberger *et al.* (1998). A resistência série para a face frontal é a soma de R_1 , R_3 , R_4 , R_5 e R_6 . Cabe observar que a resistência do material semicondutor (R_2) é determinada pelo programa PC-1D.

O cálculo da resistência série total posterior (R_1) é realizado da mesma forma que o cálculo para a face frontal, porém considerando a malha metálica e os contatos da região posterior ($R_1 = R_{3p} + R_{4p} + R_{5p} + R_{6p}$).

Alguns parâmetros necessários para simular o dispositivo dependem do substrato. Foi considerado silício monocristalino tipo n, crescido pela técnica de fusão zonal flutuante. Os valores utilizados foram: resistividade de base de $10 \Omega \cdot \text{cm}$, espessura da lâmina de $290 \mu\text{m}$ e tempo de vida dos portadores minoritários na base de $300 \mu\text{s}$. A refletância frontal correspondente a uma superfície texturada com uma camada de SiO_2 de 27 nm e uma camada de TiO_2 de 35 nm .

A malha de metalização de uma região dopada é otimizada variando a distância entre trilhas e a largura da barra coletora e calculando a menor perda de potência da célula solar (Green, 1992 e Mallmann, 2006).

A metodologia para otimizar, por meio de simulação, a região n^+ de FSF da célula solar resume-se em:

- simular a célula solar sem metalização;
- otimizar a malha de metalização da célula solar;
- calcular a corrente elétrica de saturação no escuro;
- simular novamente a célula solar com metalização otimizada.

A região posterior foi otimizada primeiramente variando a distância entre trilhas, isto é, o percentual de área metalizada, e depois variando a largura da barra coletora.

Os resultados da célula solar otimizada são: tensão de circuito aberto (V_{OC}), corrente de curto-circuito (I_{SC}), densidade de corrente de curto-circuito (J_{SC}), fator de forma (FF) e eficiência (η) de conversão de energia solar em elétrica, para a malha de metalização otimizada em ambas as faces.

5. MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO DA ESTRUTURA

A metodologia apresentada permite otimizar uma célula solar com os perfis de dopagem das regiões n^+ e p^+ e largura das trilhas da malha de metalização estabelecidos. Para analisar a influência da largura das trilhas na célula solar projetada, o procedimento foi aplicado para a largura das trilhas na face posterior (L_P) de 200 μm e largura das trilhas na face frontal (L_F) de 10 μm , 30 μm e 100 μm . Desta forma é possível comparar a eficiência da célula solar em função da largura das trilhas da malha de metalização na face frontal.

Para um par L_F e L_P fixos, o objetivo foi otimizar as regiões dopadas n^+ e p^+ e as malhas de metalização. O procedimento adotado foi:

- Selecionaram-se valores de concentração em superfície (C_S) e profundidade da junção (x_j) para cada região dopada e otimizou-se a malha de metalização posterior. Primeiramente, otimizou-se a distância entre trilhas e depois a largura da barra coletora;
- Fixaram-se os valores de C_S e x_j na região posterior bem como a malha metálica otimizada nesta face e variou-se C_S e x_j da região frontal n^+ da seguinte forma: $C_S = 1 \times 10^{19}$, 5×10^{19} , 1×10^{20} e 5×10^{20} átomos/cm³ e profundidade da junção de 0,1 a 2,0 μm , em intervalos de 0,1 μm ;
- Selecionou-se um par C_S e x_j otimizado para a região n^+ correspondente à maior eficiência e otimizou-se novamente a malha de metalização na face posterior;
- Variou-se C_S e x_j no emissor na face posterior da mesma forma que para a região n^+ , considerando a malha e o par C_S - x_j otimizado para a face n^+ ;
- Otimizou-se mais uma vez a malha de metalização na face posterior e repetiu-se o procedimento de otimização para a região n^+ ;
- Selecionou-se, para cada região e para cada C_S , o intervalo de x_j que resulta na maior eficiência (otimização das regiões dopadas) e a distância entre trilhas metálicas e largura da barra coletora (otimização da malha de metalização).

Inicialmente foi realizada a simulação das células solares com trilhas na região frontal de 10 μm de largura e na região posterior de 200 μm de largura. Os valores iniciais utilizados para a concentração de dopante em superfície e a profundidade de junção foram $C_S = 1 \times 10^{19}$ átomos/cm³ e $x_j = 1,0$ μm para a região frontal e $C_S = 1 \times 10^{19}$ átomos/cm³ e $x_j = 1,9$ μm para o emissor na região posterior (Moehlecke, Zanesco e Luque, 1994).

Inicialmente considerou-se 10 % de área metalizada na região frontal, valor maior que o esperado para esta face do dispositivo. Para encontrar o melhor valor da área metalizada na região posterior, realizaram-se simulações para a área com metal entre 10 % e 90 % da área total, para evitar aumento no custo do processo de metalização. Dentre estas, foi selecionado o valor em que a eficiência resultante da simulação da região posterior do dispositivo começa a estabilizar. O passo seguinte foi simular o dispositivo variando a largura da barra coletora de 0,1 cm a 1,0 cm. O critério adotado para selecionar o valor ótimo foi similar ao da área metalizada.

Os resultados das regiões dopadas (C_S e x_j) e da malha de metalização para $L_F = 10$ μm e $L_P = 200$ μm foram utilizados como dados iniciais para o procedimento de otimização da célula solar com largura das trilhas da malha metálica de 30 μm . Da mesma forma, os resultados para $L_F = 30$ μm foram utilizados como dados iniciais para a largura das trilhas na região frontal de 100 μm . Ao todo foram simuladas e otimizadas 637 células solares.

6. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DAS CÉLULAS SOLARES

6.1 Malha metálica frontal com trilhas de 10 μm de largura

Para encontrar o valor da área metalizada na região posterior, realizaram-se simulações variando esta área entre 10 % e 90 %, considerando a largura da barra coletora de 0,1 cm. O valor selecionado para a simulação da região n^+ do dispositivo foi de 40 % de área posterior coberta por metal, conforme mostra a Fig. 4.

O passo seguinte foi simular o dispositivo variando a largura da barra coletora. Os resultados são apresentados na Fig. 5. Selecionou-se a largura da barra coletora posterior de 0,5 cm, correspondendo a 52,6 % de área coberta com metal.

Na Fig. 6 apresentam-se as características elétricas das células solares com malha metálica otimizada em função de C_S e x_j para a região n^+ . Nota-se que a J_{SC} e a V_{OC} diminuem com o aumento da concentração em superfície e da profundidade da dopagem, devido ao aumento da recombinação dos portadores minoritários. Este fato é mais pronunciado para a J_{SC} , pois diminui a probabilidade de coleta dos minoritários. No entanto, para os menores valores de x_j , isto é, dopagens superficiais, a J_{SC} praticamente não é afetada pela concentração em superfície. Para $C_S = 1 \times 10^{19}$ átomos/cm³, a densidade de corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto são levemente afetados pela profundidade da dopagem. Ao contrário, o fator de forma aumentou com a concentração em superfície devido ao aumento da resistência de contato. A eficiência é o resultado dos três parâmetros J_{SC} , V_{OC} e FF e apresenta o comportamento da J_{SC} .

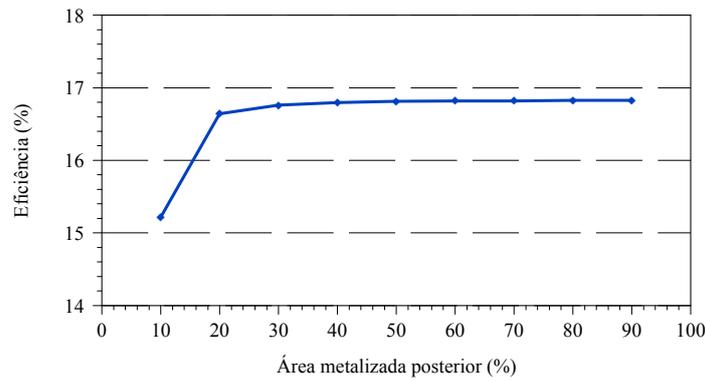


Figura 4 – Eficiência das células solares em função do percentual de área coberta por metal na região posterior do dispositivo.

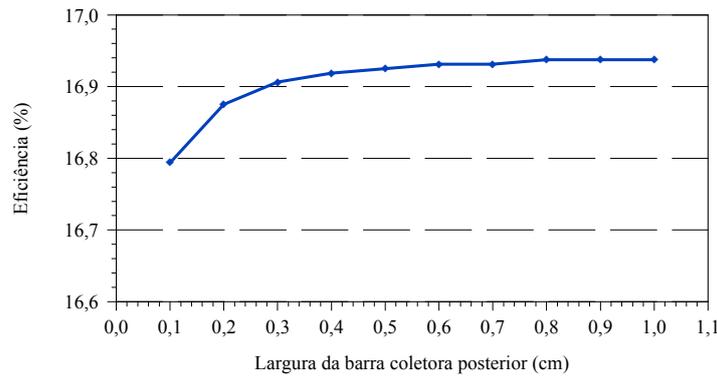


Figura 5 – Eficiência das células solares em função da largura da barra coletora na região posterior do dispositivo.

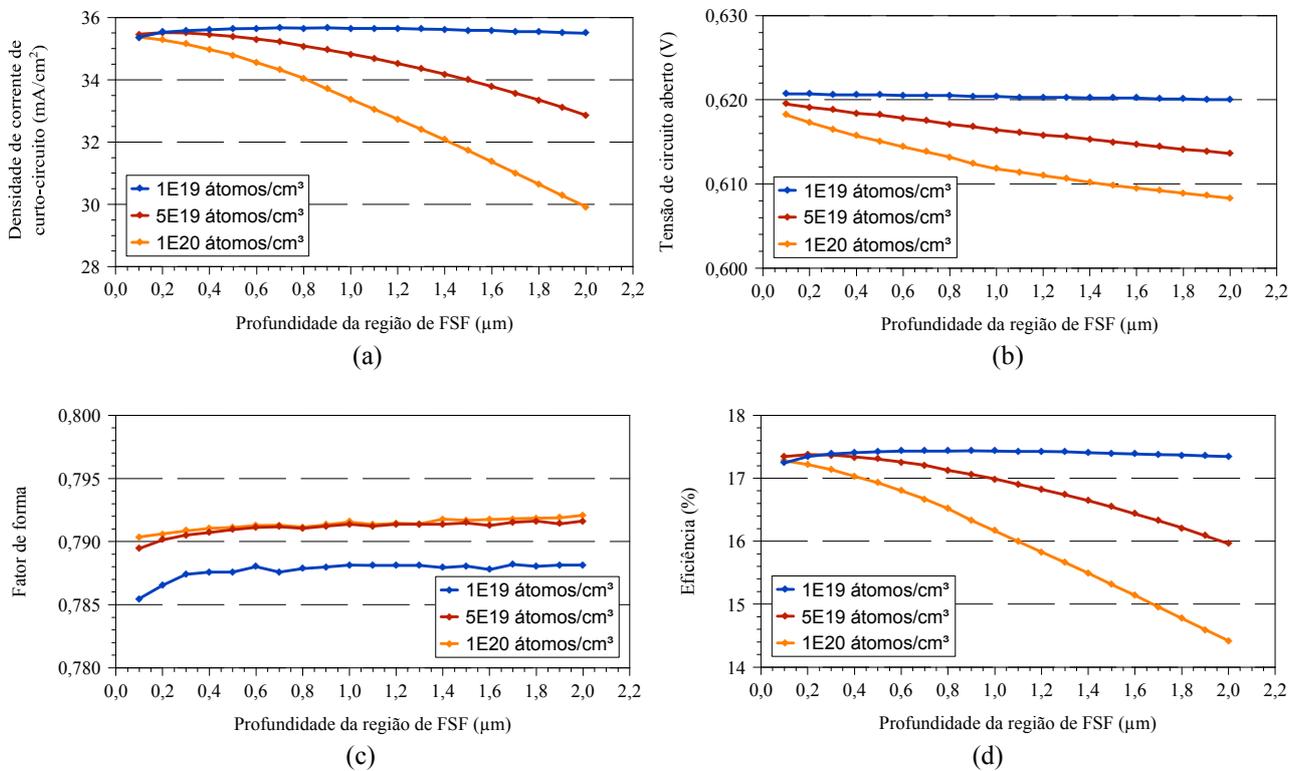


Figura 6 – (a) Densidade de corrente de curto circuito, (b) tensão de circuito aberto, (c) fator de forma e (d) eficiência em função da profundidade da região de FSF e concentração em superfície da região n^+ para $L_F = 10 \mu\text{m}$ e $L_P = 200 \mu\text{m}$.

A maior eficiência, de 17,4 %, é alcançada para os dois menores valores da concentração em superfície. Para $C_S = 1 \times 10^{19} \text{átomos}/\text{cm}^3$, o intervalo da profundidade da dopagem varia de 0,3 μm até 1,9 μm . No entanto, para a

$C_S = 5 \times 10^{19}$ átomos/cm³ o intervalo é bem definido (de 0,2 μ m a 0,3 μ m). Portanto, para otimizar o emissor p⁺, selecionou-se a menor C_S e x_j correspondente ao centro do intervalo: $C_S = 1 \times 10^{19}$ átomos/cm³ e $x_j = 0,9$ μ m. A área metalizada frontal é de 6,2 %.

Após a otimização da região n⁺, verificou-se que os parâmetros iniciais frontais foram modificados e novamente foi necessário calcular a porcentagem de área metalizada posterior do dispositivo. A área metalizada posterior encontrada foi de 40 % para a largura da barra coletora de 0,1 cm. A largura da barra coletora adequada foi de 0,5 cm, que corresponde a 52,6 % da área total, não ocorrem alterações na malha de metalização posterior.

Conhecendo os resultados da simulação da região frontal do dispositivo e as características da malha metálica posterior, foram fixados os parâmetros para a otimização da região posterior.

A região p⁺ posterior foi otimizada utilizando a mesma metodologia aplicada para a região n⁺. Na Fig. 7 mostram-se os parâmetros elétricos das células solares em função da profundidade da junção para $C_S = 1 \times 10^{19}$ átomos/cm³, 5×10^{19} átomos/cm³, 1×10^{20} átomos/cm³ e 5×10^{20} átomos/cm³. A J_{SC} apresenta um comportamento similar ao resultado para a região n⁺, porém menos pronunciado, com variação de 35,3 mA/cm² até 35,7 mA/cm². No entanto, a tensão de circuito aberto aumenta significativamente em função da profundidade da junção e concentração em superfície. Conforme esperado, na região posterior o perfil de dopagem deve ser profundo e com alta concentração em superfície. O fator de forma é maior para maiores valores da profundidade da junção, quando a concentração em superfície é baixa. Para altos valores de C_S o comportamento é o contrário. Para a região posterior p⁺, constata-se que a eficiência é influenciada principalmente pela tensão de circuito aberto.

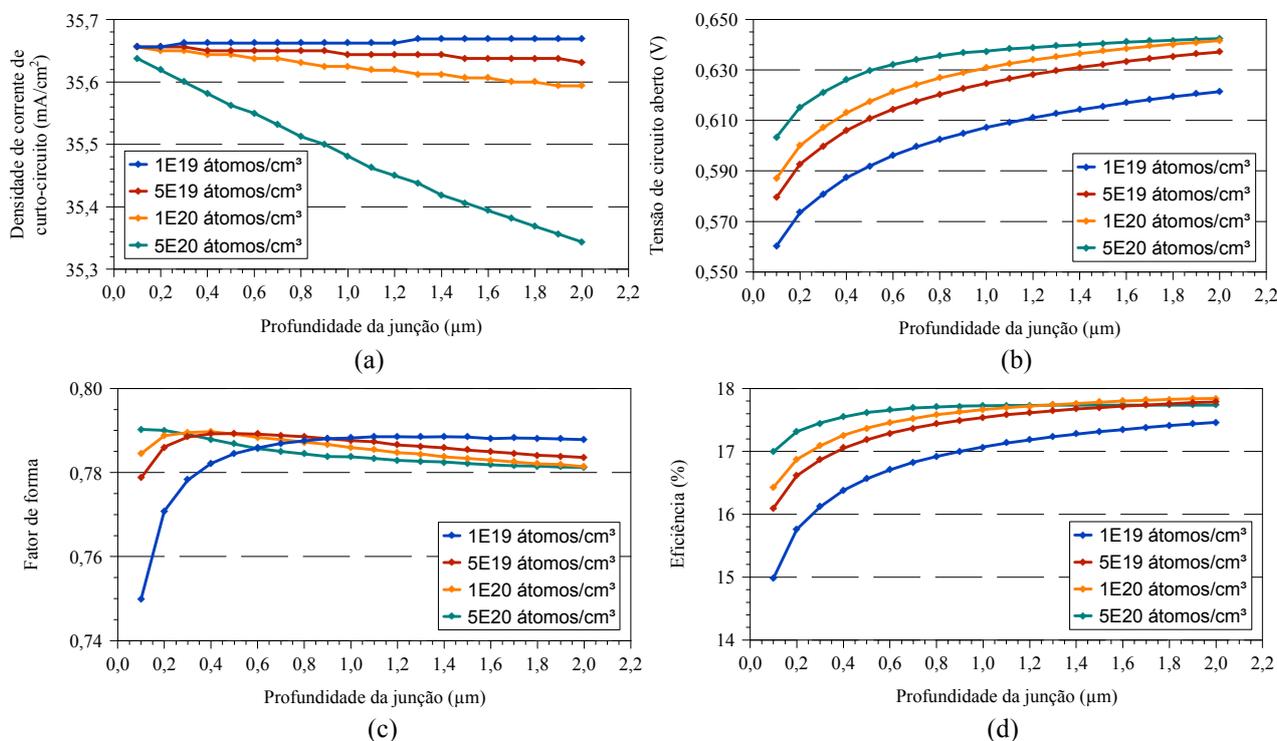


Figura 7 – (a) Densidade de corrente de curto-circuito, (b) tensão de circuito aberto, (c) fator de forma e (d) eficiência em função da profundidade da junção e concentração em superfície do emissor p⁺ para $L_F = 10$ μ m e $L_P = 200$ μ m.

A máxima eficiência da célula solar, após a otimização da região do emissor é de 17,8 %. A maior eficiência ocorre para os maiores valores da concentração em superfície, de 5×10^{19} átomos/cm³ a 5×10^{20} átomos/cm³. Para $C_S = 5 \times 10^{19}$ átomos/cm³ a profundidade da junção é elevada, da ordem de 2 μ m. Para realizar a re-otimização da região n⁺, selecionou-se para a região p⁺ a concentração em superfície de 1×10^{20} átomos/cm³, $x_j = 1,6$ μ m e área metalizada posterior de 52,6 %.

Os valores da eficiência do dispositivo para área metalizada posterior são apresentados na Fig. 8. Fixou-se o valor de 30 % para a largura da barra coletora igual a 0,1 cm. A eficiência em função da largura da barra coletora é mostrada na Fig. 9. Selecionou-se a largura da barra coletora de 0,5 cm, que corresponde a 44,7 % de área posterior coberta por metal.

A metodologia foi aplicada para re-otimizar a região n⁺. Após a análise da densidade de corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, fator de forma e eficiência em função da profundidade da região de FSF e da concentração em superfície verificou-se que a eficiência máxima é de 17,8 % e corresponde a C_S de 1×10^{19} átomos/cm³. Este valor é igual ao encontrado após a otimização da região p⁺. No entanto, o intervalo de valores de x_j para a eficiência de 17,8 % é ligeiramente menor que o encontrado após a primeira otimização da região n⁺. Na Tab. 1 resumem-se os resultados da simulação e as características elétricas da célula solar otimizada para a largura das trilhas na região frontal de 10 μ m e da região posterior p⁺ de 200 μ m.

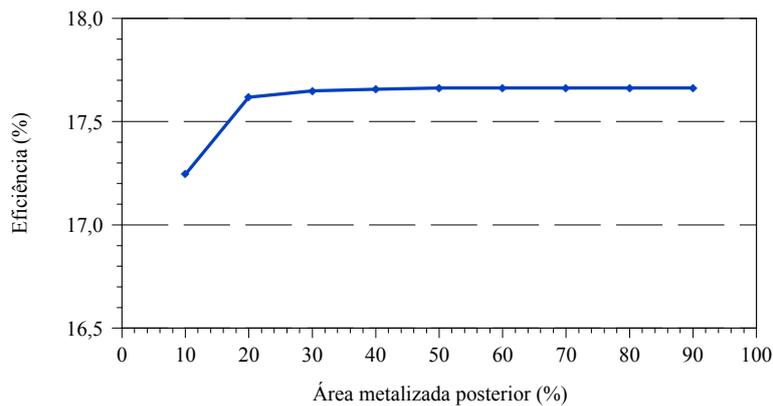


Figura 8 – Eficiência da célula solar em função do percentual de área coberta por metal na região posterior do dispositivo.

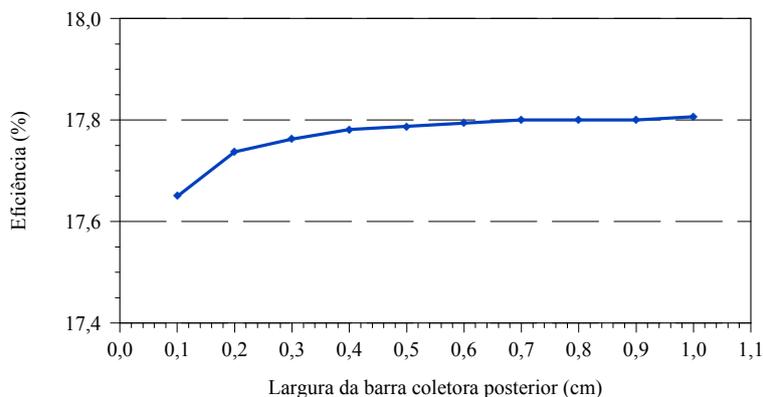


Figura 9 – Eficiência da célula solar em função da largura da barra coletora na região posterior p⁺ do dispositivo.

Tabela 1. Resultados da simulação e características elétricas da célula solar otimizada para trilhas metálicas frontais de 10 μm de largura e trilhas posteriores de 200 μm de largura.

Parâmetros	Frontal	Posterior
C _S (átomos/cm ³)	1x10 ¹⁹	1x10 ²⁰
x _j (μm)	0,4 – 1,3	1,4 – 2,0
R _□ (Ω/□)	369 – 114	34 – 24
J _{SC} (mA/cm ²)	35,55 – 35,56	35,61 – 35,59
V _{OC} (V)	0,639 – 0,638	0,636 – 0,641
FF	0,782 – 0,783	0,784 – 0,781
η (%)	17,8	17,8

6.2 Malha metálica frontal com trilhas de 30 μm de largura

Segundo a metodologia desenvolvida, foram utilizados como dados iniciais os parâmetros resultantes da simulação da célula solar para a largura das trilhas frontais de 10 μm para otimizar a célula solar com trilhas de 30 μm. Inicialmente foram realizadas as simulações para a região n⁺. Na Fig. 10 mostra-se a eficiência em função do x_j para as concentrações em superfície. Nota-se que a eficiência reduziu-se para 17,6 %, ou seja, 0,2 % absoluto. Comparando as características elétricas das células solares com os resultados para a célula solar com trilhas de 10 μm verificou-se que a J_{SC} diminui ligeiramente quando a largura das trilhas na região frontal é aumentada. Por outro lado, a V_{OC} praticamente não se altera. A profundidade da região de FSF aumentou com o incremento da largura das trilhas na região frontal para C_S = 1x10¹⁹ átomos/cm³ e, conseqüentemente, a resistência de folha diminuiu.

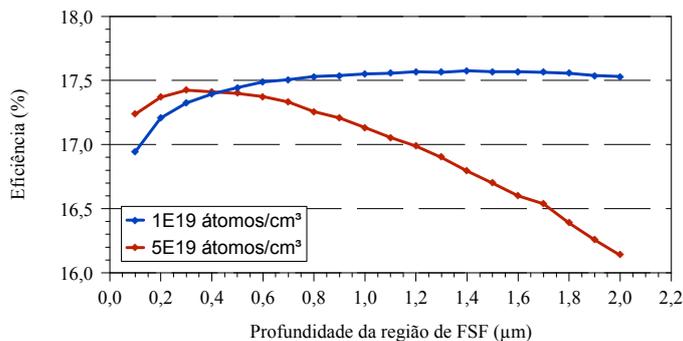


Figura 10 – Eficiência em função da profundidade da região de FSF e concentração em superfície da região n⁺ para L_F = 30 μm e L_P = 200 μm.

A partir dos resultados obtidos para a região n⁺ do dispositivo, foi calculada a área metalizada na região posterior e encontrou-se novamente o valor de 30 %, para a largura da barra coletora de 0,1 cm. Da mesma forma, determinou-se a melhor largura da barra coletora posterior deste dispositivo que foi de 0,5 cm, correspondendo a 52,6 %.

A partir dos valores ótimos da região de FSF, foram variados os parâmetros para o emissor posterior p⁺. Os resultados da metodologia de otimização são apresentados na Fig. 11.

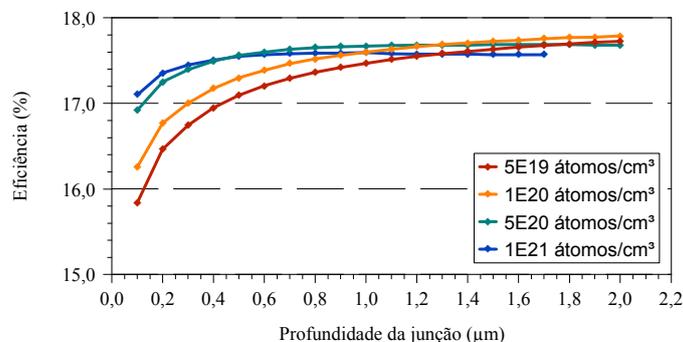


Figura 11 – Eficiência em função da profundidade da junção e concentração em superfície do emissor p⁺ para L_F = 30 μm e L_P = 200 μm.

A máxima eficiência é de 17,6 % para C_S = 1x10²⁰ átomos/cm³, próxima à eficiência para a largura das trilhas frontais de 10 μm. No entanto, o intervalo da profundidade da junção ficou menor.

Novamente foi calculada a área metalizada na região posterior. Concluiu-se que a área com metal permanece em 44,7 %.

A região frontal n⁺ foi re-otimizada, a partir dos valores ótimos da região posterior p⁺. Na Tab. 2 resumem-se os parâmetros de processo e as características elétricas da célula solar com largura das trilhas na região frontal de 30 μm. Nota-se que a eficiência permanece em 17,6 %. Na Fig. 12 comparam-se os resultados para a largura das trilhas da região frontal de 30 μm com os resultados para a largura das trilhas de 10 μm, para C_S = 1x10¹⁹ átomos/cm³. Nota-se que a maior redução na eficiência ocorre para as menores profundidades da região de FSF. Todos os parâmetros sofrem uma pequena redução.

Tabela 2. Resultados da simulação e características elétricas da célula solar otimizada para trilhas metálicas frontais de 30 μm de largura e trilhas posteriores de 200 μm de largura.

Parâmetros	Frontal	Posterior
C _S (átomos/cm ³)	1x10 ¹⁹	1x10 ²⁰
x _i (μm)	0,7 – 2,0	1,7 – 2,0
R _□ (Ω/□)	211 – 74	28 – 24
J _{SC} (mA/cm ²)	35,16 – 35,16	35,52 – 35,51
V _{OC} (V)	0,641 – 0,640	0,639 – 0,641
FF	0,779 – 0,781	0,782 – 0,781
η (%)	17,6	17,6

Para L_F = 30 μm, o intervalo de x_i que resultou na maior eficiência foi de 0,7 μm a 2,0 μm. Comparando estes resultados com os valores para L_F = 10 μm, nota-se que a profundidade da região de FSF aumentou.

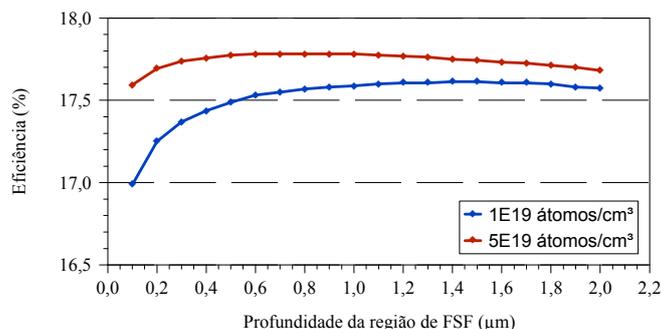


Figura 12 – Comparação da eficiência em função da profundidade da região de FSF para $L_F = 30 \mu\text{m}$, $L_P = 10 \mu\text{m}$ e $C_S = 1 \times 10^{19} \text{ átomos/cm}^3$.

6.3 Malha metálica frontal com trilhas de 100 μm de largura

Utilizando como dados iniciais os parâmetros da célula solar para $L_F = 30 \mu\text{m}$ foi executada a metodologia de otimização para a largura das trilhas na região frontal de 100 μm. A eficiência das células solares em função da profundidade da região de FSF para $C_S = 1 \times 10^{19} \text{ átomos/cm}^3$ e $C_S = 5 \times 10^{19} \text{ átomos/cm}^3$ são apresentadas na Fig. 13. Foi necessário estender as simulações para dopagens mais profundas, de até 3,4 μm. Comparando estes resultados com os resultados da otimização da região n^+ para $L_F = 30 \mu\text{m}$, constatou-se que a J_{SC} e o FF diminuem, enquanto que a V_{OC} permanece praticamente a mesma. Da Fig. 13, constata-se que a eficiência reduz-se para 17,0 % para $C_S = 1 \times 10^{19} \text{ átomos/cm}^3$. Também se verifica que a profundidade da região de FSF aumenta com o incremento da largura das trilhas da região frontal.

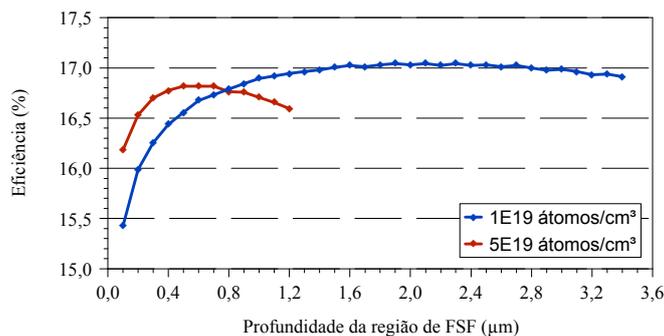


Figura 13 – Eficiência em função da profundidade da dopagem da região de FSF n^+ e da concentração em superfície para $L_F = 100 \mu\text{m}$ e $L_P = 200 \mu\text{m}$.

A partir dos resultados obtidos para a região n^+ do dispositivo, foi calculada a área metalizada na região posterior de 44,7 %. Nota-se que a área metalizada posterior não se altera.

Seguindo a metodologia adotada foram variados os mesmos parâmetros para a região posterior p^+ . Na Fig. 14 apresentam-se os resultados. A eficiência máxima é de 17,1 % e ocorre para $C_S = 5 \times 10^{19} \text{ átomos/cm}^3$ e $C_S = 1 \times 10^{20} \text{ átomos/cm}^3$. Para ambas as concentrações em superfície a profundidade da junção aumentou com o incremento da largura da trilha, com valores superiores a 2,1 μm, como mostra a Fig. 15, na qual compara-se a eficiência para $L_F = 30 \mu\text{m}$ e $L_F = 100 \mu\text{m}$.

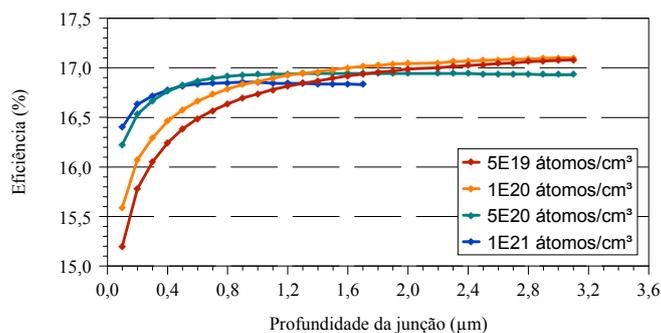


Figura 14 – Eficiência em função da profundidade da junção e concentração em superfície do emissor p^+ para $L_F = 30 \mu\text{m}$ e $L_P = 200 \mu\text{m}$.

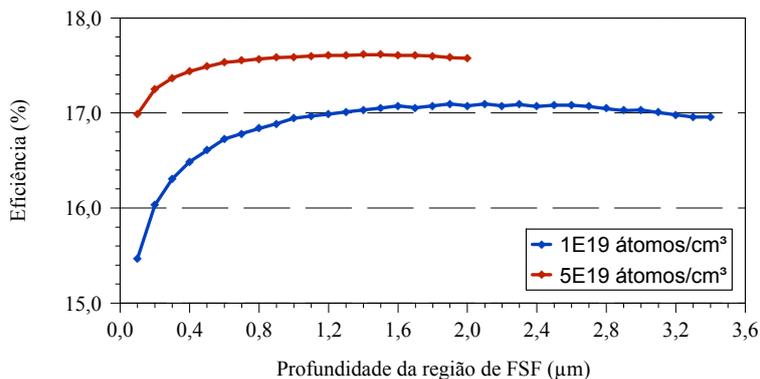


Figura 15 – Comparação da eficiência em função da profundidade da região de FSF n^+ para $L_F = 100 \mu\text{m}$ e $L_P = 30 \mu\text{m}$, após a aplicação da metodologia para re-otimizar a região n^+ e para $C_S = 1 \times 10^{19}$ átomos/cm³.

Tabela 3. Resultados da simulação e características elétricas da célula solar otimizada para trilhas metálicas frontais de 100 μm de largura e trilhas posteriores de 200 μm de largura.

Parâmetros	Frontal	Posterior
C_S (átomos/cm ³)	1×10^{19}	1×10^{20}
x_j (μm)	1,5 – 2,7	2,1 – 3,0
R_{\square} (Ω/□)	98 – 55	22 – 16
J_{SC} (mA/cm ²)	34,34 – 34,28	34,36 – 34,33
V_{OC} (V)	0,644 – 0,643	0,642 – 0,646
FF	0,771 – 0,774	0,774 – 0,772
η (%)	17,1	17,1

6.4 Eficiência de células solares com diferentes larguras de trilhas na região frontal

Comparando-se os resultados obtidos para trilhas posteriores de 200 μm de largura e trilhas frontais variando em 10 μm, 30 μm e 100 μm, verifica-se que quanto mais larga a trilha frontal, maior será a profundidade da junção para a mesma concentração em superfície e, como esperado, menor a eficiência de conversão do dispositivo. A Fig. 16 e Tab. 4 apresentam estes resultados comparativos. Consta-se que em média a eficiência decresce 0,08 % para cada aumento de 10 μm da largura das trilhas na região frontal.

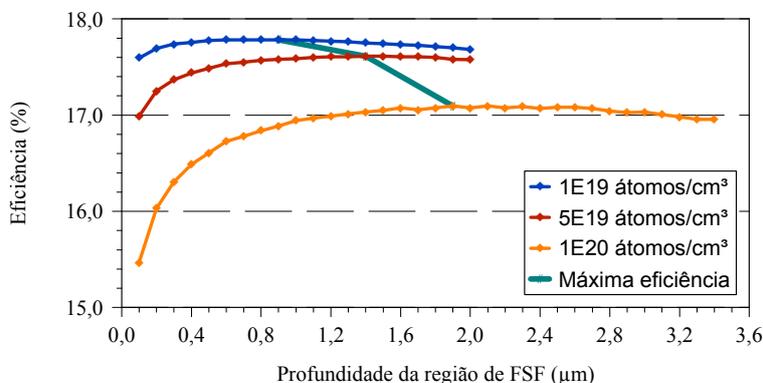


Figura 16 – Comparação da eficiência das células solares para diferentes larguras das trilhas frontais e para largura das trilhas posteriores de 200 μm e $C_S = 1 \times 10^{19}$ átomos/cm³.

Tabela 4. Resultados da simulação e características elétricas das células solares otimizadas para trilhas metálicas frontais de 10 μm , 30 μm e 100 μm de largura e trilhas posteriores de 200 μm de largura.

L_F (μm)	Parâmetro	Frontal	Posterior
10	C_S (cm^{-3})	1×10^{19}	1×10^{20}
	x_j (μm)	0,9	1,6
	R_{\square} (Ω/\square)	164	29
	J_{SC} (mA/cm^2)	35,59	35,61
	V_{OC} (V)	0,639	0,639
	FF	0,783	0,783
	η (%)	17,8	17,8
30	C_S (cm^{-3})	1×10^{19}	1×10^{20}
	x_j (μm)	1,4	1,9
	R_{\square} (Ω/\square)	106	25
	J_{SC} (mA/cm^2)	35,24	35,51
	V_{OC} (V)	0,641	0,641
	FF	0,780	0,781
	η (%)	17,8	17,8
100	C_S (cm^{-3})	1×10^{19}	1×10^{20}
	x_j (μm)	1,9	2,5
	R_{\square} (Ω/\square)	78	19
	J_{SC} (mA/cm^2)	34,38	34,35
	V_{OC} (V)	0,644	0,644
	FF	0,773	0,773
	η (%)	17,1	17,1

7. CONCLUSÕES

Foram otimizadas as regiões dopadas e a malha de metalização de células solares n^+np^+ , com 64 cm^2 e emissor posterior seletivo. O método desenvolvido foi aplicado para células solares com trilhas da malha de metalização na região frontal n^+ de 10 μm , 30 μm e 100 μm , considerando a malha posterior com trilhas de 200 μm . Concluiu-se que quanto maior a largura das trilhas da malha de metalização, maior deve ser a profundidade da junção, independente da região dopada. Em conseqüência, a J_{SC} e o FF decrescem ligeiramente com o aumento de L_F e a V_{OC} aumenta. Constatou-se que para trilhas metálicas na região n^+ de FSF de 10 μm a eficiência é de 17,8 %. Com o aumento de L_F para 30 μm a eficiência é de 17,6 % e para $L_F = 100 \mu\text{m}$ a eficiência é de 17,1 %. Portanto, a largura das trilhas não é um limitador importante para a eficiência do dispositivo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Ministério de Minas e Energia (MME) pelo apoio financeiro por meio do Convênio MME-008/2005, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica (CEEE-D) pelas bolsas de estudos de mestrado e doutorado.

REFERÊNCIAS

- Aberle, A. G. 2004. Crystalline silicon solar cells – Advanced surface passivation and analysis.
- Duerinckx, P.; Choulat, P.; Beaucarne, G.; Young, R. J. S.; Rose, M.; Raby, J. A. 2004. Improved screen printing process for very thin multicrystalline silicon solar cells, 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, França.
- Goetzberger, A.; Knobloch, J.; Voss, B. 1998. Crystalline silicon solar cells, pp. 237.
- Green, M. A. 1992. Solar cells.
- Green, M. A.; Zhao, J.; Wang, A.; Wenham, S. R. 1999. Very high efficiency silicon solar cells – science and technology, IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 46, n. 10, pp. 1940-1947.
- Lou, Y.-S.; Wu, C.-Y. 1994. A self-consistent characterization methodology for Schottky-barrier diodes and ohmic contacts, IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 41, n. 4.
- Luque, A. 1989. Solar cells and optics for photovoltaic concentration.

- Mallmann, A. P. 2006. Metalização serigráfica de células solares bifaciais fabricadas por processos térmicos rápidos, Dissertação de mestrado, PGETEMA, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Moehlecke, A.; Zanesco, I.; Luque, A. 1994. Practical high efficiency bifacial solar cells, 1st WCPEC, pp. 1663-1666, Hawai.
- Europe gains PV pole position, Renewable Energy Focus. 2008, pp. 30-33.
- Super Sonic Solar Market, Photon International, 2005, pp. 66.

ANALISYS OF METAL FINGERS WIDTH ON SILICON SOLAR CELLS WITH BACK SELECTIVE EMITTER

Abstract. *The production of electricity directly from the conversion of solar energy, called photovoltaic solar energy, presents low environmental impact, however it needs initial high investment. One of the research lines used for cost reduction is the development of high efficiency and/or low cost solar cells. The goal of this work was to analyze the width of frontal and back fingers on the electrical parameters of industrial solar cells with 64 cm², for float zone (Si-FZ) monocrystalline silicon taking into account a metal grid obtained by e-beam evaporation. The solar cell structure was projected and the methodology was refined for the optimization of the structure presented. Related to the optimization of the highly doped regions, the n⁺ and p⁺ regions of the structure n⁺np⁺, with back selective emitter were optimized. Using this method, it was also calculated the number of fingers and the width of the busbar for each solar cell optimized. It was concluded that the width of the grid fingers on front side should be 30 μm. It was also verified that as larger the width of metal grid, deeper has to be the junction for n⁺ and p⁺ doped regions.*

Key words: *Solar Cell, Solar Cells Simulation, Selective Emitter.*