

# RUMO A 21% EM EFICIÊNCIA: PROCESSO SIMPLIFICADO DE FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES DE SILÍCIO Cz COM PASSIVAÇÃO NA REGIÃO POSTERIOR ( $V_{oc-imp}$ - 663mV)

N. Stem – nstem@lme.usp.br  
C. A. S. Ramos – cramos@lme.usp.br  
M. Cid Sánchez – mcid@lme.usp.br

Laboratório de Microeletrônica, Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos, Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo (LME/PSI/EPUSP)

*Resumo. Este trabalho descreve o desenvolvimento e implementação de um processo simplificado de fabricação de células solares de silício com região posterior passivada. Utilizando-se a técnica do decaimento fotocondutivo (PCD) caracterizam-se as etapas térmicas necessárias para a fabricação dos dispositivos, oxidação térmica e difusão de fósforo, desenvolvidas levando em conta as restrições impostas por salas limpas de fabricação não ultra-limpas, similares às utilizadas pelas indústrias na produção de células solares. Inicialmente as amostras de silício tipo p e material FZ (25-30 W.cm) são utilizadas para o desenvolvimento e a otimização destas etapas, uma vez que este material apresenta um maior tempo de vida inicial. O estudo de processo realizado utilizando a passivação superficial em silício tipo p através de oxidação térmica seguida por “alnear” permitiu alcançar tempos de vida efetivos de aproximadamente 1ms e uma velocidade de recombinação de superfície de 13,6cm/s. Ao mesmo tempo as passivações realizadas através de difusões de fósforo, seguidas por remoção do PSG, oxidação térmica e “alnear”, (estruturas  $n^+pn^+$  com resistências de folha otimizadas de aproximadamente 130W/quad) permitiram alcançar valores de tempos de vida efetivos similares aos anteriores (com oxidação térmica). Estas estruturas também permitiram comprovar a elevada qualidade dos emissores otimizados como pode ser comprovado pela reduzida densidade de corrente de recombinação obtida, 45fA/cm<sup>2</sup>. A análise das tensões de circuito-aberto implícitas,  $V_{oc-imp}$  das estruturas produzidas com região posterior passivada (filme de SiO<sub>2</sub>) e área frontal de 4cm<sup>2</sup>, utilizando silício Cz tipo p com baixa resistividade (2-3,5W.cm) permitiu comprovar a elevada potencialidade da tecnologia implementada, obtendo-se 652,5mV (fabricante tipo 1 – 2,5W.cm) e 662,6mV (fabricante tipo 2 – 3,3W.cm). Desta forma, utilizando-se um sistema anti-refletor composto por (texturização química aleatória + SiO<sub>2</sub>) similar ao utilizado em células solares com tecnologia (P/Al) pode-se alcançar eficiências no entorno de 19,4% - 19,7%. Caso o filme de SiO<sub>2</sub> for substituído por uma camada dupla de ZnS-MgF<sub>2</sub>, podem ser alcançadas eficiências no intervalo de 20,3% - 20,6% (em material Cz) e ultrapassar a marca dos 21% em material FZ.*

**Palavras-chave:** Passivação de superfícies, células solares de silício, emissores otimizados, superfície posterior passivada.

## 1. INTRODUÇÃO

A elevação do rendimento das células solares, a utilização de lâminas de silício mais delgadas, o desenvolvimento de processos de menor custo na obtenção do silício e na fabricação das células solares se apresentam como o caminho a seguir para a diminuição dos custos da energia fotovoltaica.

Uma das formas mais elegantes de reduzir o custo das células solares está relacionada com uma menor utilização de silício através de lâminas mais delgadas. Contudo, utilizando a tecnologia de fósforo alumínio (P/Al) o rendimento diminui à medida que se reduz a espessura das lâminas. Assim sendo, torna-se necessário mudar a tecnologia de fabricação das células solares visando elevar o rendimento mantendo a simplicidade do processo.

Neste sentido, as células solares de silício com região posterior passivada têm se apresentado como uma das mais proeminentes saídas encontradas pela indústria. Uma outra vantagem apresentada por estas estruturas com região posterior passivada em relação às células solares com BSF em toda região posterior, trata-se da redução do efeito de “bowing” quando utilizados substratos mais delgados, e portanto também das perdas na linha de produção (Choulat et. Al., 2007).

Dentre as células solares com a região posterior passivada destacam-se as estruturas RP-PERC (“random pyramids passivated emitter rear contact”) (Fischer et. al., 2001) e LFC (“LASER fired contact”) (Schneiderlochner et. al., 2004).

Na primeira, o sistema anti-refletor utilizado é mais simples que o apresentado pela célula solar PERC com eficiência recorde 23% (Catchpole et. al., 2000), sendo composto por pirâmides aleatórias e camada anti-refletora simples de SiO<sub>2</sub>. Estes desenvolvimentos representaram uma redução nas etapas de fotolitografia e limpezas químicas, permitindo atingir a eficiência de 19,7% em substratos de Si-Cz com resistividade de 1  $\Omega$ .cm e área de 4cm<sup>2</sup> (Glunz et.

al., 1997); e 21.6% (Glunz et. al., 1997) e 20,4% (Fischer et. al., 2001) em substratos de Si-FZ com resistividades de 1  $\Omega$ .cm e 0,3 $\Omega$ .cm respectivamente, e mesma área.

Ao mesmo tempo, as estruturas LASER fired contact (LFC) (Schneiderlochner et. al., 2004) permitiram a redução de etapas de fotolitografia para abertura dos pontos na região posterior. Nesta tecnologia, o alumínio após ser depositado, penetra o filme de SiO<sub>2</sub> e sinteriza-se apenas nas regiões dos pontos desejados através de um feixe LASER localizado, tornando-se também uma tecnologia proeminente. No processo desenvolvido pelo IMEC (Choulat et. al., 2007), por exemplo, as células i-PERC utilizando silício multicristalino, resistividade de 1,2 $\Omega$ .cm e espessura 180 $\mu$ m, com área de 100cm<sup>2</sup> atingiram 17,4%. Estes dispositivos se caracterizam por possuir passivação posterior através da deposição do filme de SiN, contatos frontais formados por serigrafia e contatos posteriores formados por LASER (tecnologia similar à estrutura LFC).

A figura 1 apresenta as eficiências teóricas correspondentes a uma estrutura RP-PERC como função da razão entre comprimento de difusão e a espessura da base, bem como da velocidade de recombinação de superfície posterior. Neste estudo utiliza-se uma resistividade de base de 1 $\Omega$ .cm e emissor otimizado (perfil Gaussiano). A velocidade de recombinação na superfície frontal (Si – tipo n<sup>+</sup>) com texturização aleatória foi considerada ser igual a 3000cm/s (Altermatt et.al., 2002).

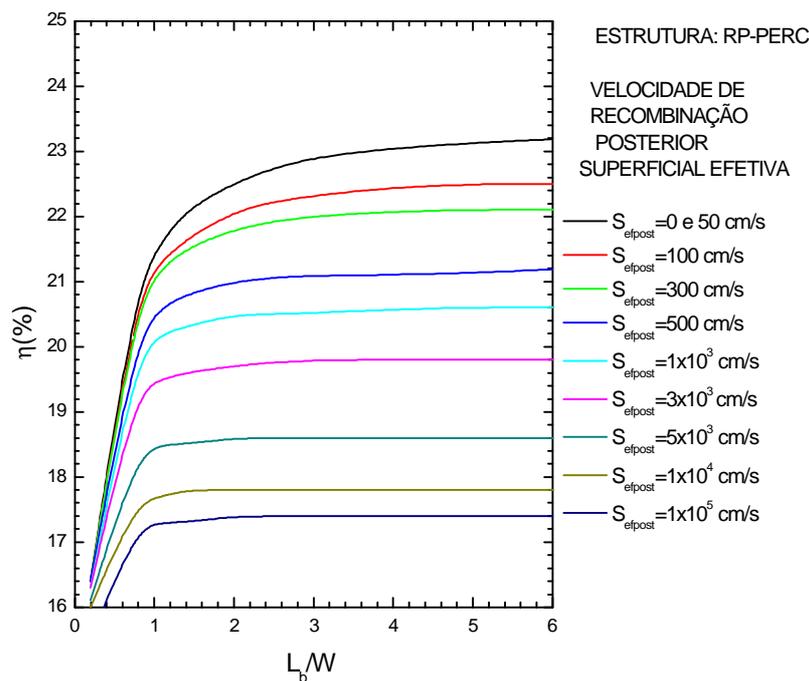


Figura 1: Eficiências teóricas de células solares como função da velocidade de recombinação efetiva posterior ( $S_{efpost}$ ) e da razão comprimento de difusão/espessura ( $L_b/W$ ) com estruturas do tipo RP-PERC.

Como podem ser observados, os valores elevados de velocidades de recombinação na superfície posterior comprometem significativamente as eficiências. Velocidades de recombinação de superfície posterior da ordem de 3000cm/s limitam as eficiências a valores inferiores a 20%, inclusive para o caso de uma elevada relação  $L_b/W$ .

Assim, o desenvolvimento de regiões posteriores com reduzidas velocidades de recombinação de superfície e a manutenção de um elevado tempo de vida de portadores minoritários no volume são condições imprescindíveis para a obtenção de células solares de alto rendimento. Outra restrição importante e relacionada com a utilização do silício Cz reside no fato de que estes substratos possuem elevadas concentrações de carbono e oxigênio, impondo limitações sobre as etapas térmicas a serem utilizadas.

## 2. TÉCNICAS DE PASSIVAÇÃO DE SUPERFÍCIES SOBRE SILÍCIO TIPO P E SILÍCIO TIPO N<sup>+</sup>

A técnica do decaimento fotocondutivo é uma técnica capaz de medir o tempo de vida efetivo,  $\tau_{ef}$  como função da concentração de excesso de portadores,  $\Delta n$ , gerados através de excitação óptica. Por sua vez o tempo de vida efetivo medido está correlacionado com o tempo de vida dos portadores minoritários no volume e com a velocidade de recombinação nas superfícies frontal e posterior do dispositivo.

Visando a extração de informações sobre o tempo de vida no volume da amostra analisada, torna-se determinante minimizar a recombinação nas superfícies através das diferentes técnicas de passivações: passivação química (Lago et. al., 2001), oxidação térmica (Stem et. al., 2007) e (Stem, 2007), difusão de fósforo (Ramos et. al., 2007), (Stem, 2007)

e ( Cuevas, 1999) ou nitreto de silício (Kerr, 2002).

Neste trabalho apresentam-se os resultados obtidos após a utilização das técnicas de passivação através de oxidação térmica (silício tipo p) e através da difusão de fósforo (estruturas  $n^+pn^+$ ), em ambos os casos a técnica de hidrogenação “alneal” foi utilizada após a etapa de oxidação térmica. O trabalho de análise das passivações de superfície foi iniciado utilizando substratos de elevado grau de pureza (silício FZ com 25-30  $\Omega.cm$ ) a fim de melhor caracterizar os processos.

Em seguida, desenvolveram-se estruturas  $n^+p$  compostas por região posterior passivada e área de dispositivo delimitada a  $4cm^2$ . Neste estágio da implementação do processo RP-PERC foram utilizados os materiais Cz - 2.5 $\Omega.cm$  e Cz - 3.3 $\Omega.cm$  de dois fabricantes diferentes.

## 2.1 Passivação de superfícies através de oxidação térmica: caracterização e resultados

As amostras foram submetidas à limpeza química RCA padrão com reagentes com elevado grau de pureza (C-MOS ou superior). A passivação das superfícies do silício tipo p realiza-se através de oxidação térmica na presença de aditivos clorados em ambiente de oxigênio com grau de pureza 99,8% ou superior.

As caracterizações realizadas nas estruturas  $SiO_2 - Si$  tipo p –  $SiO_2$  permitem analisar o tempo de vida do volume do material após as etapas térmicas, bem como, avaliar a velocidade de recombinação nas superfícies, como mostra a expressão (1). Nesta expressão,  $S_{ef}$  corresponde à velocidade de recombinação em uma das superfícies,  $W$ , à espessura da amostra e  $\tau_{vol}$ , ao tempo de vida de portadores minoritários no volume da amostra.

$$\frac{1}{t_{ef}} = \frac{2S_{ef}}{W} + \frac{1}{t_{vol}} \quad (1)$$

A figura 2(a) mostra os tempos de vida efetivos medidos em uma das amostras representante desta etapa do processo após a realização da oxidação térmica e após duas técnicas de hidrogenação (“forming gas” – FGA e “alneal”), considerando a concentração em excesso de portadores igual a  $\Delta n = N_A = 5.4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ . Na figura 2(b) apresenta-se o comportamento do tempo de vida dos portadores minoritários medidos na mesma amostra como função do excesso de portadores após a etapa “alneal”.

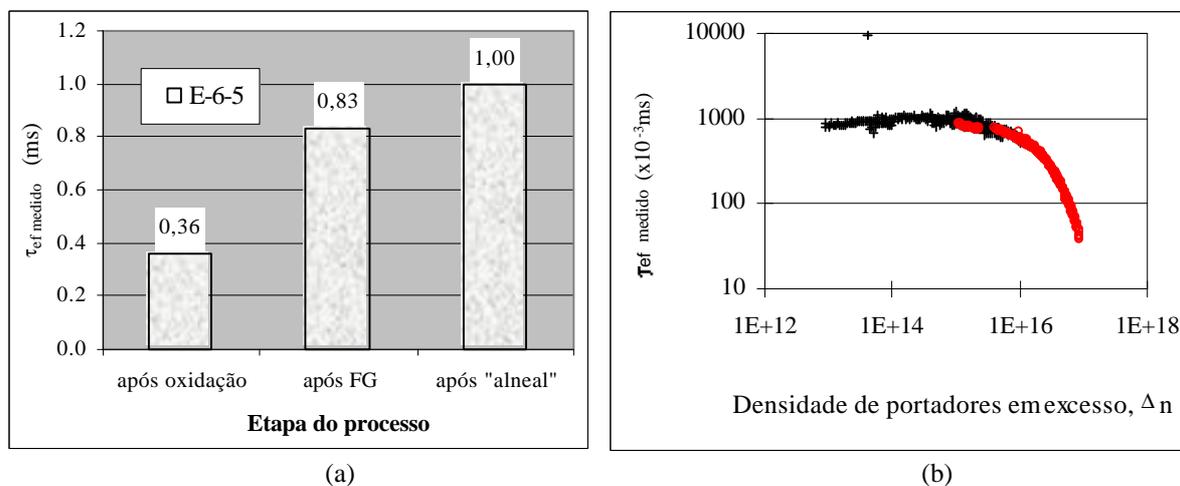


Figura 2: a) Tempos de vida efetivos medidos na concentração de excesso de portadores igual a  $N_A = 5.4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , e b) tempos de vida efetivos medidos como função da concentração de excesso de portadores após a realização da oxidação térmica seguida por “alneal”.

De acordo com esta figura verifica-se que utilizando aditivos clorados durante a etapa de oxidação térmica o tempo de vida dos portadores minoritários pode atingir 1ms, demonstrando assim a qualidade de ambos, do material inicial utilizado e do processo de oxidação térmica desenvolvido.

Considerando-se um tempo de vida de volume suficientemente elevado de forma que o tempo de vida efetivo torne-se dependente da velocidade de recombinação nas superfícies frontal e posterior (neste caso, ambas de tipo p), pode-se calcular o limite máximo da velocidade de recombinação de superfície, como apresentado na figura 3.

Nesta figura, realiza-se uma comparação entre os máximos valores que podem ser alcançados pela velocidade de recombinação superficial após cada etapa térmica realizada: oxidação térmica (37,8cm/s), recozimento em ambiente de “forming gas” (16,4cm/s) e após “alneal” (13,6cm/s).

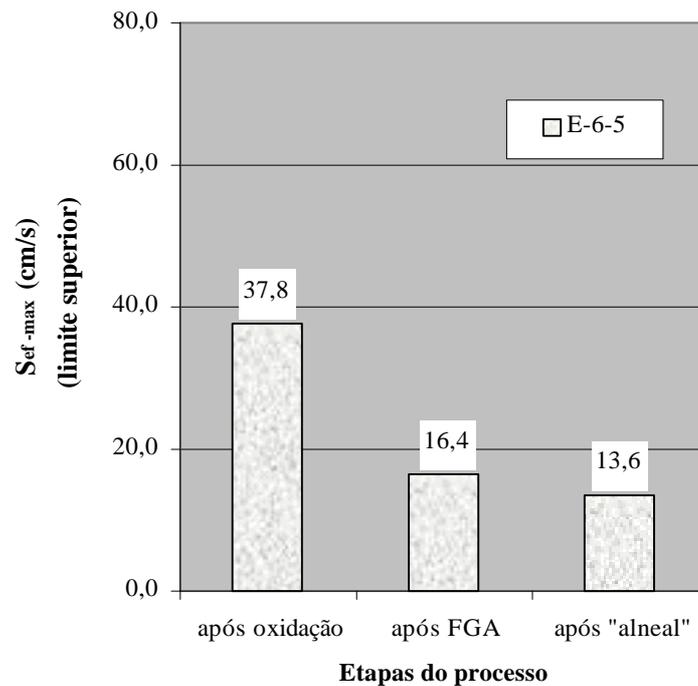


Figura 3: Limite superior da velocidade de recombinação de superfície (silício tipo p) em amostras de Si FZ com  $\rho=25-30\Omega.cm$ .

Comparando-se os valores encontrados para estes limites, pode-se inferir a excelente qualidade passivação de superfície obtida nas amostras após a realização da técnica de hidrogenação “alnear”, sendo esta implementação e o resultados obtidos de enorme interesse para o desenvolvimento de células solares do tipo RP-PERC.

## 2.2 Passivação de superfícies através de difusão de fósforo: caracterização e resultados

As superfícies passivadas através da difusão de fósforo, além de fornecerem informações a respeito do tempo de vida de portadores minoritários no volume,  $\tau_{vol}$ , também podem fornecer informações sobre a qualidade dos emissores formados através das densidades de corrente de recombinação (frontal e posterior). Assim, o tempo de vida efetivo nas estruturas  $n^+pn^+$  tornam-se dependentes do tempo de vida de portadores minoritários no volume, da densidade de recombinação nos emissores ( $2J_{oe}$ ), da concentração de dopantes na base,  $N_A$ , do excesso de portadores,  $\Delta n$ , da carga do elétron,  $q$ , da espessura da base e da concentração intrínseca de portadores,  $n_i$ , como mostra a expressão (2).

$$\frac{1}{t_{ef}} = \frac{1}{t_{vol}} + \frac{2J_{oe}(\Delta n + N_A)}{qWn_i^2} \quad (2)$$

A obtenção das estruturas  $n^+pn^+$  neste trabalho realiza-se em duas etapas: a) pré-deposição de fósforo e b) remoção do PSG seguido por oxidação térmica. As pré-deposições de fósforo são obtidas em fornos convencionais e 850°C de temperatura utilizando-se fonte líquida -  $POCl_3$ . Em seguida, após a remoção do PSG, realiza-se oxidação térmica em ambiente clorado (temperaturas entre 1000° C e 1150° C). Os emissores obtidos caracterizam-se por possuir junção profunda da ordem de aproximadamente 2,0µm, perfil Gaussiano e resistências de folha otimizadas (50Ω/quad – 150Ω/quad) de acordo com otimização teórica realizada em trabalhos anteriores (Stem, 2007) e (Stem et. al., 2006).

Adotando-se como exemplo, a amostra E-17-6, caracterizada por possuir uma resistência de folha de 130Ω/quad nas regiões  $n^+$  e uma resistividade de base de 28Ω.cm, realizaram-se as medidas de tempo de vida efetivo de portadores minoritários após cada etapa térmica envolvida: a) pré-deposição de fósforo; b) remoção do PSG e oxidação térmica; c) recozimento em ambiente de “forming gás” e d) “alnear”. A figura 4 mostra a evolução dos tempos de vida encontrados, considerando a concentração de excesso de portadores igual à concentração de dopantes na base ( $N_A$ ).

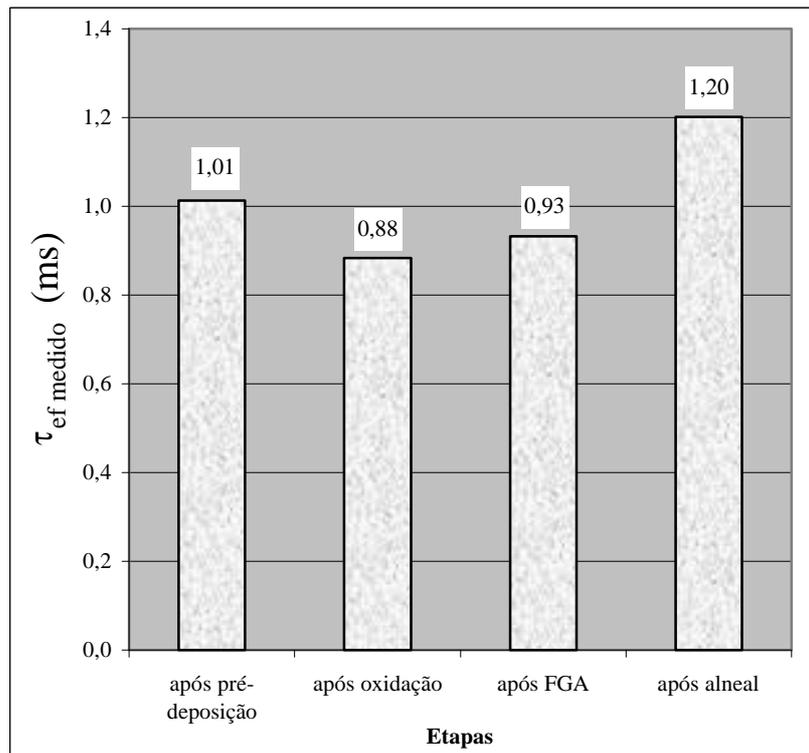


Figura 4: Tempos de vida de portadores minoritários medidos na amostra E-17-6 como função das etapas de processo considerando a concentração de excesso de portadores igual à concentração de dopantes na base,  $N_A$ .

De acordo com esta figura, o tempo de vida efetivo se manteve elevado após a realização de todas as etapas térmicas necessárias, e conseqüentemente, as suas componentes, tempo de vida no volume e a velocidade de recombinação de superfície em ambas as superfícies (tipo  $n^+$  e tipo p), também se mostraram de excelente qualidade.

A figura 5 mostra o comportamento do tempo de vida dos portadores minoritários como função da concentração de excesso de portadores após a realização da técnica de hidrogenação “alneal” na amostra E-17-6. Nesta figura, apresenta-se ainda o tempo de vida limite como função do excesso de portadores, calculado considerando a componente de recombinação no emissor,  $J_{oe}$  como sendo a dominante.

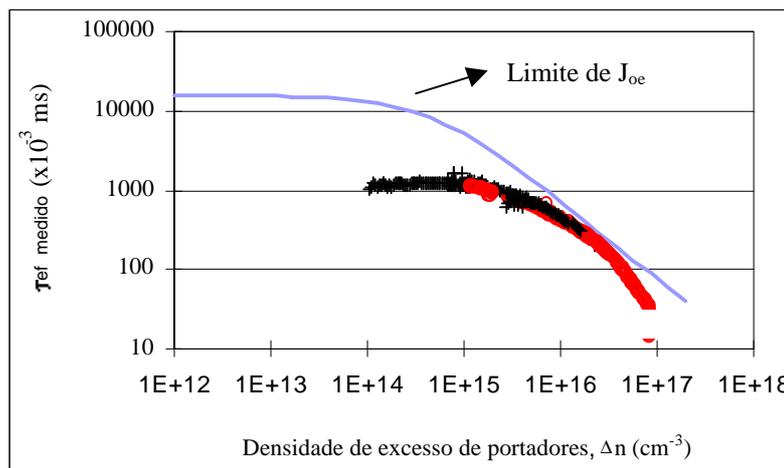


Figura 5: Tempo de vida efetivo,  $\tau_{ef}$  como função da concentração de excesso de portadores,  $\Delta n$  ( $\text{cm}^{-3}$ ) após a realização da técnica “alneal” na amostra E-17-6 (com resistência de folha de aproximadamente de  $130\Omega/\text{quad}$  nas regiões  $n^+$ ). A curva contínua representa os tempos de vida limites calculados considerando a recombinação no emissor,  $J_{oe}$  como sendo a componente dominante.

A análise do tempo de vida limite permite extrair a densidade de corrente de recombinação que ocorre em uma das superfícies. Assumindo que a recombinação é a mesma nas superfícies frontal e posterior, pôde-se estimar a densidade de corrente de recombinação nos emissores dopados com fósforo como sendo da ordem de  $45\text{fA/cm}^2$ , representando portanto um emissor de excelente qualidade.

### 3. MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS N<sup>+</sup>P COM REGIÃO POSTERIOR PASSIVADA (SILÍCIO Cz)

Uma vez desenvolvidos os processos de fabricação de alta temperatura necessários para a fabricação de células solares de tipo RP-PERC e verificada a preservação do tempo de vida de portadores minoritários ao longo de todas etapas térmicas necessárias, iniciou-se o desenvolvimento de estruturas completas n<sup>+</sup>p com área frontal de  $4\text{cm}^2$  utilizando substratos de silício Cz de baixa resistividade.

As amostras com dimensões  $3\text{cm} \times 3\text{cm}$  foram submetidas à limpeza RCA padrão, em seguida oxidadas com aditivos clorados. A delimitação da área frontal realizou-se através de um processo fotolitográfico. Em seguida, as lâminas foram submetidas às etapas de pré-deposição de fósforo, remoção do PSG e re-oxidadas, de maneira análoga ao processo de obtenção das estruturas n<sup>+</sup>pn<sup>+</sup>. As caracterizações através da técnica PCD foram realizadas após cada etapa térmica, permitindo a obtenção do tempo de vida efetivo e a tensão de circuito aberto implícita,  $V_{\text{oc-imp}}$ .

As medidas de tempo de vida efetivo demonstraram a elevada potencialidade do processo desenvolvido para aplicações em células solares com região posterior passivada.

Por exemplo, as amostras A-22-2 (com um emissor de  $55\Omega/\text{quad}$  e resistividade de base de  $2,5\Omega\cdot\text{cm}$ ) e 5-2 (com um emissor de  $101\ \Omega/\text{quad}$  e resistividade de  $3,3\Omega\cdot\text{cm}$ ) apresentaram  $\tau_{\text{ef}}=0,25\text{ms}$  e  $V_{\text{oc-imp}}=652,4\text{mV}$ ; e  $\tau_{\text{ef}}=0,35\text{ms}$  e  $V_{\text{oc-imp}}=662,6\text{mV}$ , respectivamente, considerando-se o ponto de operação de 1 Sol.

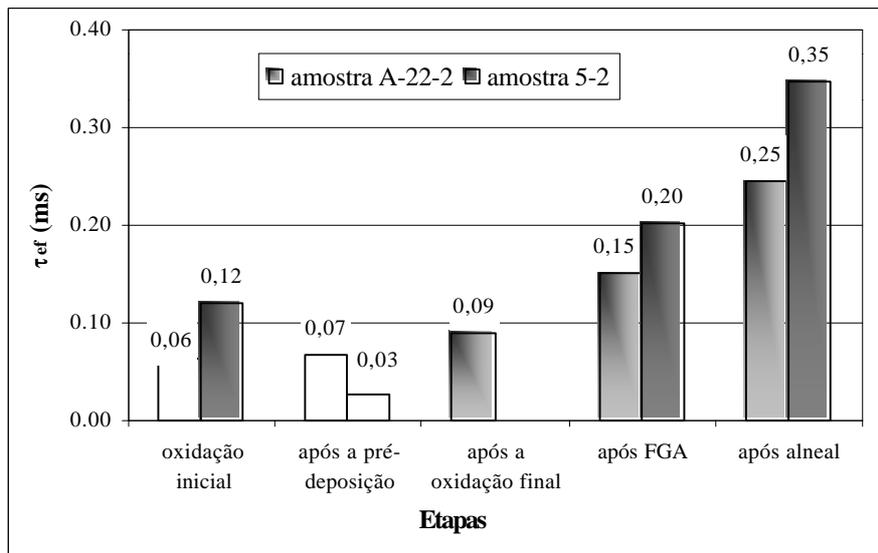


Figura 6: Tempos de vida de portadores minoritários efetivos como função das etapas de processo de duas amostras representativas: a) amostra A-22-2 (Cz com  $2,5\Omega\cdot\text{cm}$ ) e b) amostra 5-2 (Cz com  $3,3\Omega\cdot\text{cm}$ ).

Além dos parâmetros descritos anteriormente, a técnica de caracterização permite ainda extrair a tensão de circuito-aberto implícita dos dispositivos, sem a necessidade de realização dos contatos metálicos. A tensão de circuito-aberto implícita é calculada assumindo que o perfil de concentração de portadores não varia significativamente na região de base, e que o excesso de concentração de portadores na junção se aproxima de um valor médio,  $\Delta n_{\text{med}}$ , como mostra a equação (3).

$$V_{\text{oc-imp}} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{\Delta n (N_A + \Delta n)}{n_i^2} \right) \quad (3)$$

De acordo com trabalhos anteriores (MacDonald, 2001), a tensão de circuito-aberto medida após a colocação dos contatos não difere substancialmente da tensão de circuito-aberto implícita, (cerca de 5mV). Assim, com o intuito de caracterizar a potencialidade do processo de fabricação implementado no LME/EPUSP apresenta-se na figura 7 o resultado da comparação entre os valores medidos para a tensão de circuito-aberto implícita,  $V_{oc-imp}$  nas amostras de tipo Cz, fabricante tipo 1 (A-22-2) e tipo 2 (5-2), após a realização das técnicas de hidrogenação: FG e “alneal” e em uma amostra de Si-FZ com resistividade de  $0,5\Omega.cm$  (Stem, 2007) e (Stem et. al., 2008), considerando a concentração de excesso de portadores igual à obtida no ponto de operação do dispositivo (1 Sol).

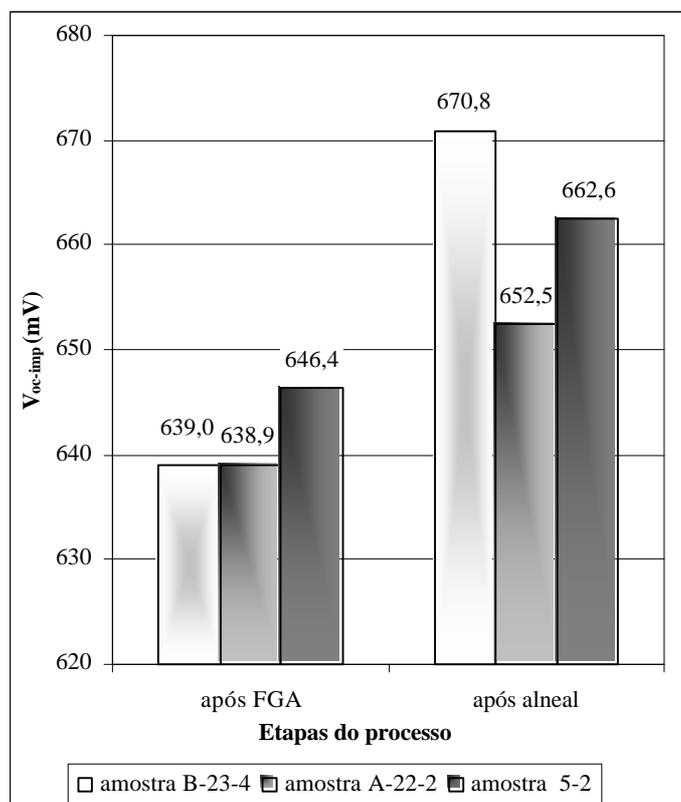


Figura 7: Comparação entre as tensões de circuito-aberto implícitas,  $V_{oc-imp}$  medidas após cada etapa térmica em amostras de Si- Cz (A-22-2 e 5-2), e de Si-FZ (B-23-4) (Stem, 2007).

Considerado um sistema anti-refletor de baixo custo típico, (filme de  $SiO_2$  sobre pirâmides aleatórias) podem ser alcançadas eficiências da ordem de 19,4% e 19,7% para o caso da amostra Cz – A-22-2 (cálculos realizados através do programa PC1D). Enquanto que as eficiências das células solares fabricadas com características similares à amostra 5-2 permitiriam a obtenção de valores entre 19,7% e 20%. Contudo, se substituirmos a camada simples de  $SiO_2$  por uma dupla composta por  $ZnS-MgF_2$ , a eficiência poderia ultrapassar 20% (em material Cz). Resultados similares são encontrados por outros centros de pesquisas utilizando instalações ultra-limpas em material de tipo Cz (Glunz, 1997) e em Si-FZ (Fischer et. al., 2001), (Lee et. al., 1999) e (Kerr, 2002), como pode ser visto na tabela 1.

Nesta tabela, apresentam-se também os resultados obtidos no LME-EPUSP utilizando Si de tipo FZ, e as previsões teóricas projetam ultrapassar 21% de rendimento em células de tipo RP-PERC (Stem, 2007) e (Stem et. al., 2008).

Tabela 1. Comparação entre as tensões de circuito-aberto obtidas no LME-EPUSP em amostras de Si-Cz e Si-FZ (Stem, 2007) e (Stem et. al., 2008), as simulações teóricas com o programa PC1D, e os resultados obtidos em células solares RP-PERC em outros centros de pesquisa.

CENTRO de PESQUISA	Valores	$\rho$ $\Omega.cm$	$R_{quad}$ $\Omega/quad$	$J_{sc}$ $mA/cm^2$	$V_{oc}$ $mV$	FF	$\eta$ (%)
A-22-2 (Si-Cz)	experimental	2,5	55		652,5 ( $V_{oc-imp}$ )		
	teórico (text+ SiO <sub>2</sub> )	2,5	55	37,4 - 37,9	649,4	0,800	19,4 - 19,7
	teórico (text+ZnS/MgF <sub>2</sub> )	2,5	55	38,5 - 39,3	649,4	0,800	20,0 - 20,3
5-2 (Si-Cz)	experimental	3,3	101		662,6 ( $V_{oc-imp}$ )		
	teórico (text+ SiO <sub>2</sub> )	3,3	101	37,7-38,2	659,6	0,794	19,7 - 20,0
	teórico (text+ZnS/MgF <sub>2</sub> )	3,3	101	38,8-39,4	659,6	0,794	20,3 - 20,6
Fraunhofer Institute RP-PERC (FZ) ("planar") (Glunz et. al., 1997)	(text+ SiO <sub>2</sub> )	1,0	—	39,6	676,4	0,807	21,6
	Fraunhofer Institute RP-PERC (Cz) (Glunz et. al., 1997)	(text+ SiO <sub>2</sub> )	1,0	—	37,7	656,3	0,795
B-23-4 (Si -FZ)	experimental	0,51	55		670,8 ( $V_{oc-imp}$ )		
	teórico (text+ SiO <sub>2</sub> )	0,51	55	37,0 - 37,5	665,8	0,810	20,0 - 20,2
	teórico (text+ZnS/MgF <sub>2</sub> )	0,51	55	38,1 - 38,6	665,8	0,810	20,5 -20,8
ANU RP-PERC (FZ) (Kerr, 2001)	(text+ SiO <sub>2</sub> +SiN)	0,3	—	38,6	684,0	0,807	21,4
Universität Konstanz (FZ) (Fischer et. al., 2001)	polida+ SiO <sub>2</sub>	0,5	—	32,5	672,0	0,820	17,9
Universität Konstanz (FZ) (Fischer et. al., 2001)	(text+ SiO <sub>2</sub> )	0,3	—	37,2	671,0	0,818	20,4
Samsung (Lee et. al., 2001)	(text+ SiO <sub>2</sub> )	0,5	—	37,2	666,3	0,807	19,98

#### 4. CONCLUSÕES

As amostras de silício FZ com resistividade de base entre 25-30 $\Omega$ .cm foram caracterizadas utilizando duas técnicas diferentes de passivação de superfície: oxidação térmica e estruturas  $n^+pn^+$  apresentando as premissas necessárias para o desenvolvimento de dispositivos completos com a região posterior passivada: reduzida recombinação no volume e no emissor, e excelente qualidade de passivação de superfície, tanto sobre silício tipo  $n^+$  bem como em silício tipo p (velocidade máxima de recombinação de superfície da ordem de 13,6cm/s).

As estruturas  $n^+p$  processadas utilizando silício tipicamente utilizado pela indústria fotovoltaica (Cz com baixa resistividade) mostraram que eficiências da ordem de 20% podem ser alcançadas através do processo de fabricação desenvolvido. O processo de estruturas análogas utilizando Si-FZ permite projeções de aproximadamente 21% quando o sistema anti-refletor for composto por uma camada dupla de ZnS-MgF<sub>2</sub> sobre uma superfície texturizada quimicamente.

Cabe destacar que pela simplicidade o processo se apresenta como de imediata implementação industrial possuindo a enorme vantagem de permitir a utilização de lâminas mais delgadas sem nenhuma modificação estrutural. Como comentado anteriormente, a diminuição da quantidade de silício utilizado para a fabricação das células solares constitui a forma mais direta de reduzir os custos de fabricação dos dispositivos e por conseqüência os custos de produção da energia elétrica.

#### Agradecimentos

N. Stem recebeu uma bolsa de doutorado do CNPq sob o processo nº 141460/20008.

#### REFERÊNCIAS

- Choulat, P. Agostinelli, Y. Ma. Duerinecx, F. and Beaucarne, G., 2007. Above 17% industrial type PERC solar cell on thin multi-crystalline silicon substrate, 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Milano, Italy, <http://www.imec.be/wwwinter/energy/FILES/Milan/Choulat.pdf>.
- Fischer, B. Keil, M. Fath, P. and Bucher, E., 2001. Simplified RP-PERC process with high-temperature steps. In 17<sup>th</sup> European Solar Energy Conference and Exhibition, CD-ROM.
- Schneiderlochner, E. Emanuel, G. Grupp, G. Lautenschlager, H. Leimenstoll, A. Glunz, S. W. Preu, R. and Willeke, G., 2004. Silicon solar cells with screen printed-front contact and dielectrically passivated, laser-fired rear electrode. In 19<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, França. CD-ROM.
- Catchpole K R and Blakers A W., 2000. Modelling of the PERC structure with stripe and dot back contacts. In 16<sup>th</sup> EC Photovoltaic Solar Energy Conf., Glasgow, May 2000 [http://solar.anu.edu.au/level\\_1/pubs/2000pubs.php](http://solar.anu.edu.au/level_1/pubs/2000pubs.php)
- Altermatt, P. P., Schumacher, J. O. Cuevas, A. Kerr, M. J. Glunz, S. W. King, R. R. Heiser, G. and Schenk, 2002. A. Numerical modeling of highly doped Si: P emitters based on Fermi-Dirac statistics and self-consistent material parameters; *Journal of Applied Physics*, vol. 92, nº 6, pp. 3187 – 3197.
- Stem, N. Moreira, E. G. Cid, M. Ramos C. A. S. and Vasconcelos, M., 2007. Neutron activation analysis in a solar cell fabrication process. In *Proceedings: International Nuclear Atlantic Conference 2007 (XV ENFIR and XVII ENAN)*, 30 de setembro a 5 de outubro de 2007, Santos – S.P.. CD-ROM.
- Stem, N., 2007. Células solares de silício de alto rendimento: otimizações teóricas e implementações experimentais utilizando processos de baixo custo, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3140/tde-02042008-113959>.
- Lago, R. Tobias, I. Cañizo, C. and Luque, A., 2001. Lifetime measurements by photoconductance techniques in wafers immersed in a passivating liquid. *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 148, nº 4, pp. 200.
- Ramos, C. A. Stem, N. and Cid, M., 2007. Utilização de emissores pouco dopados na caracterização de lâminas de silício. In *Anais: I Congresso Brasileiro de Energia Solar (I CBENS)*, 8 a 11 de abril de 2007 em Fortaleza, Brasil. CD-ROM.
- Cuevas, A., 1999. The effect of emitter recombination on the effective lifetime of silicon wafers. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 57, pp. 277-290.
- Kerr, M. J., 2002. Surface emitter recombination and development of silicon nitride passivated solar cells". Tese de Doutorado, Australian National University, Austrália.
- Stem, N. Cid, M. and Cuevas, A., 2006. Silicon solar cells: phosphorus emitter and metal-grid optimization for homogeneous ( $n^+p$ ) and double-diffused ( $n^{++}n^+p$ ) structures. In *Proceedings: 21<sup>st</sup> European Photovoltaic Solar Energy Proceedings*, Dresden – Germany, pp. 439-442.
- MacDonald, D. H., 2001. Recombination and trapping in multicrystalline silicon solar cells, Tese de Doutorado, Australian National University, Austrália.

- Stem, N. Cid, M. and Ramos C. A. S., 2008. Monitoring of silicon device fabrication processes by photoconductive decay technique. International Conference on the Physics of Semiconductors – ICPS 2008, Rio de Janeiro, Brasil, 27 de Jul – 1 de Aug.
- Glunz, S. W. Knobloch, J Hebling, C. and Wettling, W., 1997. The range of high-efficiency silicon solar cells fabricated at Fraunhofer ISE, In 26<sup>TH</sup> PVSC, Anaheim, CA, pp. 231-234.
- LEE, S. H., 2001. Development of high efficiency silicon solar cells for commercialization, Journal of the Korean Physical Society, vol. 39, n° 2, pp. 369-373.

*Abstract. This work describes the development and implementation of a simplified process of rear passivated silicon solar cell fabrication. Using the photoconductive decay technique (PCD), the necessary thermal steps for the device fabrication were characterized, thermal oxidation and phosphorus diffusion, and developed taking into account the requirements imposed by non-ultra-clean facilities, similar to the ones used by industries in the production of solar cells. Initially the p-type samples with (25-30 W.cm) are used to develop and to optimize these steps, since they present a higher starting lifetime. The studies about p-type silicon surface by thermal oxidation followed by alneal allowed to reach effective lifetimes of approximately 1ms and a low surface recombination velocity, 13.6cm/s. At the same time, the passivations performed by using the phosphorus diffusion, followed by PSG dropping out, thermal oxidation ( $n^+pn^+$  structures with optimized sheet resistances, approximately 130W/quad) and alneal allowed reaching similar values to the oxidation over p-type silicon. These structures also allowed proving the high quality of the optimized emitters, presenting low recombination current density, 45fA/cm<sup>2</sup>. The analysis of the implied open-circuit voltages,  $V_{oc-imp}$  of the processed structures with passivated rear surface (SiO<sub>2</sub> film) and frontal area of 4cm<sup>2</sup>, using Cz-Si of type p with low resistivity (2-3,5W.cm) allowed to prove the high potentiality of the implemented technology, resulting in 652.5mV (manufacturer type 1 – 2.5W.cm) and 662.6mV (manufacturer type 2 – 3.3W.cm). Thus, using an anti-reflector typical of solar cells processed using the P/Al technology, composed by random texturization + SiO<sub>2</sub>, efficiencies of about 19.4% - 19.7% can be provided. However, if the SiO<sub>2</sub> film were replaced by a double layer of ZnS-MgF<sub>2</sub>, the efficiencies can be increased to 20.3% - 20.6% (in Cz silicon) and surpass the mark of 21% using FZ silicon.*

**Key words:** Surface passivation, silicon solar cells, optimized emitters, passivated rear surface.