

# 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

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

**Resumo.** Este trabalho descreve o desenvolvimento e a 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 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 $\Omega$ .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 “alneal” 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 “alneal”, (estruturas  $n^+pn^+$  com resistências de folha otimizadas de aproximadamente 130 $\Omega$ /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 completas ( $n^+p$ ) produzidas com região posterior passivada (filme de SiO<sub>2</sub>) e área de 4cm<sup>2</sup>, utilizando silício Cz tipo p com resistividade (2,5-3,5 $\Omega$ .cm) permitiu comprovar a elevada potencialidade da tecnologia implementada, tendo sido obtido 652,5mV (fabricante tipo 1 – 2,5 $\Omega$ .cm) e 662,6mV (fabricante tipo 2 - 3,3 $\Omega$ .cm). Ao mesmo tempo a utilização de silício FZ tipo p (com resistividade de 0,5 $\Omega$ .cm) permitiu alcançar uma tensão de 670,8mV. 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) no LME-EPUSP pode-se alcançar eficiências no entorno de 19,4% - 19,7% e 20,0% - 20,2% utilizando silício Cz e FZ, respectivamente. Caso o filme de SiO<sub>2</sub> seja 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 atingir 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 os caminhos 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) (Cid et. al., 2007), 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 interessantes soluções tecnológicas encontradas pelos centros de pesquisa e indústrias. Outra vantagem apresentada pelas estruturas com região posterior passivada em relação às células solares com BSF de Alumínio está relacionada com a redução do efeito de “bowing” quando utilizados substratos mais delgados, solução que permite redução 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 and rear contact cell”) (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), composto por pirâmides aleatórias e camada anti-refletora de SiO<sub>2</sub>. Estes desenvolvimentos representaram uma redução nas etapas de fotolitografia e limpezas químicas, permitindo atingir eficiências de 19,7% em substratos de Si-Cz com resistividade de 1Ω.cm e área de 4cm<sup>2</sup> (Glunz et. al., 1997); 21,6% (Glunz et. al., 1997) e 20,4% (Fischer et. al., 2001) em substratos de Si-FZ com resistividades de 1 Ω.cm e 0,3Ω.cm respectivamente, e mesma área.

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, primeiramente deposita-se o alumínio e em seguida, através de um feixe LASER localizado o Al penetra o filme de SiO<sub>2</sub> e se sinteriza apenas nas regiões dos pontos desejados, 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 1,2Ω.cm e espessura 180μm, 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(a) 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 1Ω.cm e emissor otimizado (perfil Gaussiano). A velocidade de recombinação frontal (Si – tipo n<sup>+</sup>) com texturização aleatória foi considerada igual a 3000cm/s (Altermatt et.al., 2002). Um esquema simplificado da estrutura RP-PERC apresenta-se na figura 1(b) (Glunz et. al., 2000).

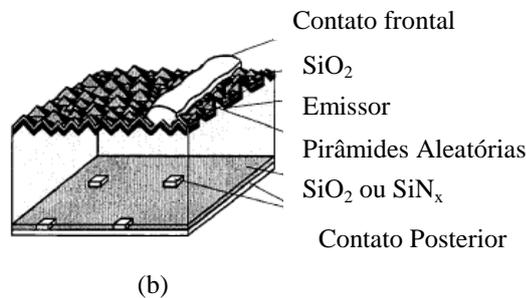
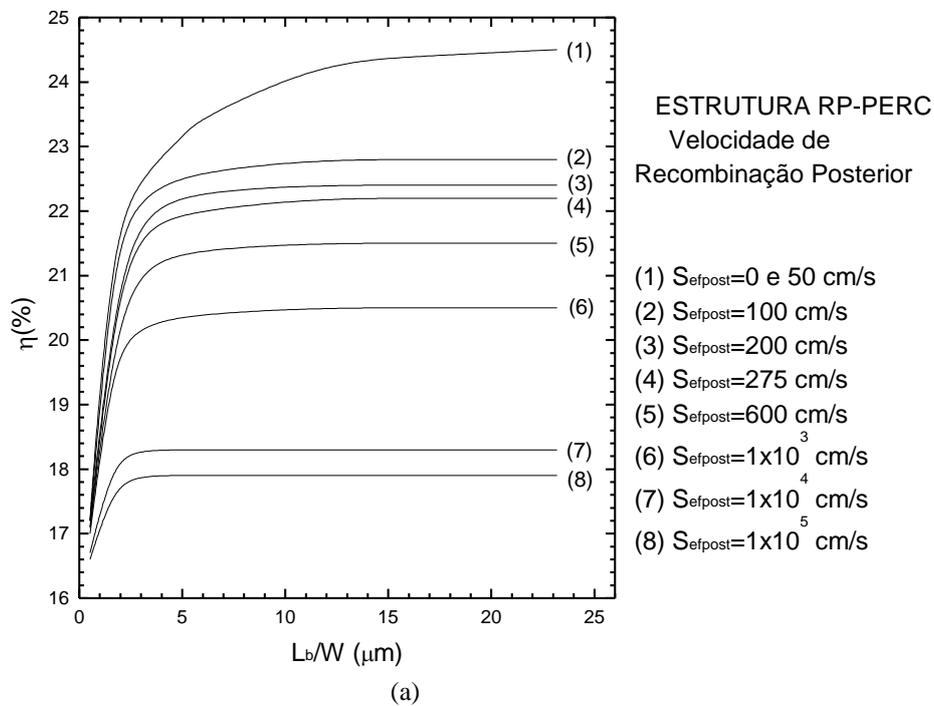


Figura 1: (a) Eficiências teóricas de células solares como função da velocidade de recombinação efetiva posterior (S<sub>efpost</sub>) e da razão comprimento de difusão/espessura (L<sub>b</sub>/W) com estruturas do tipo RP-PERC; (b) Esquema simplificado da estrutura RP-PERC (Glunz et. al., 2000).

Como pode ser observado, elevados valores de velocidades de recombinação na superfície posterior comprometem significativamente as eficiências. Velocidades de recombinação de superfície posterior da ordem de 3000 cm/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 se caracteriza por ser 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: passivação química (Lago et. al., 2001), oxidação térmica (Kerr, 2002), (Stem, 2007), difusão de fósforo (Cuevas, 1999), (Ramos et. al., 2007), ou o 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 permitir uma melhor caracterização dos processos.

Em seguida, desenvolveram-se estruturas  $n^+p$  compostas por região posterior passivada e área de dispositivo delimitada a 4cm<sup>2</sup>. 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, bem como substratos FZ – 0,5 $\Omega$ .cm visando o monitoramento do processo.

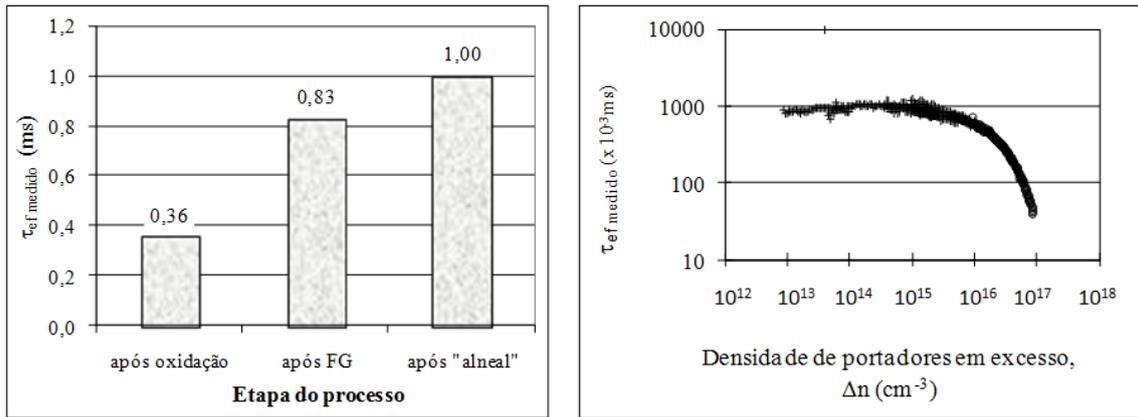
### 2.1 Passivação de superfícies através de oxidação térmica: caracterização e resultados

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<sub>2</sub> – Si tipo p – SiO<sub>2</sub> permitem analisar o tempo de vida efetivo 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.

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

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  $\Delta n=N_A=5.4 \times 10^{14}$  cm<sup>-3</sup> (25 $\Omega$ .cm). 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”.



(a)

(b)

Figura 2: Medidas realizadas na amostra 6-5 (FZ – 25Ω.cm): (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 apenas 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.

Na figura 3 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).

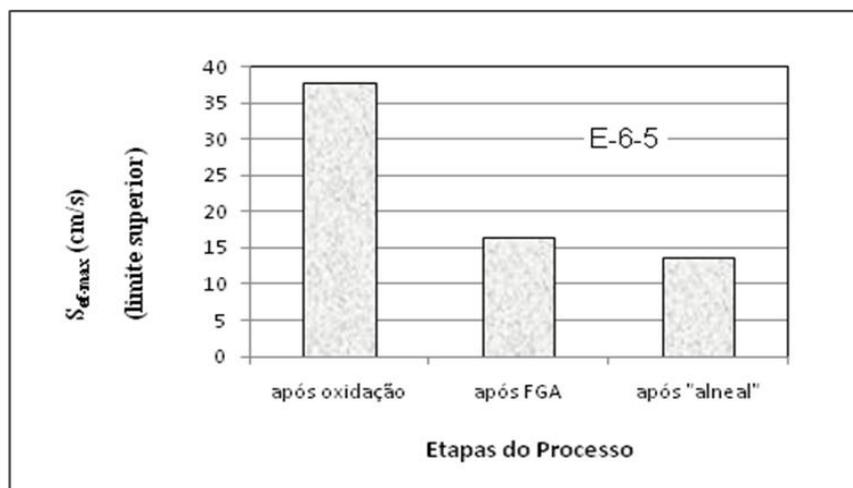


Figura 3: Limite superior da velocidade de recombinação de superfície (silício tipo p) em amostras de Si-FZ com  $\rho=25\Omega.cm$ .

Comparando os valores encontrados para estes limites, pode-se observar a excelente passivação obtida nas amostras após a realização das técnicas de hidrogenação (“FGA” e “alneal”), necessárias para o desenvolvimento de células solares do tipo RP-PERC.

## 2.2 Passivação de superfícies através de difusão de fósforo (estrutura n<sup>+</sup>pn<sup>+</sup>): 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<sup>+</sup>pn<sup>+</sup> 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).

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

Neste trabalho, a obtenção das estruturas n<sup>+</sup>pn<sup>+</sup> realiza-se em duas etapas: a) pré-deposição de fósforo e b) remoção do PSG seguido por oxidação térmica. As pré-deposições de fósforo foram realizadas em fornos convencionais a 850°C de temperatura utilizando-se fonte líquida - POCl<sub>3</sub>. Em seguida, após a remoção do PSG, realiza-se a oxidação térmica em ambiente clorado (temperaturas entre 1000° C e 1150° C). Os emissores obtidos caracterizam-se por possuírem junções profundas, da ordem de 2,0µm, perfil Gaussiano e resistências de folha otimizadas (50Ω/quad – 150Ω/quad) de acordo com as otimizações teóricas realizadas em trabalhos anteriores (Stem et. al., 2001).

Adotando-se como exemplo, a amostra E-17-6, caracterizada por possuir uma resistência de folha de 130Ω/quad nas regiões n<sup>+</sup> 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 ( $N_A$ ).

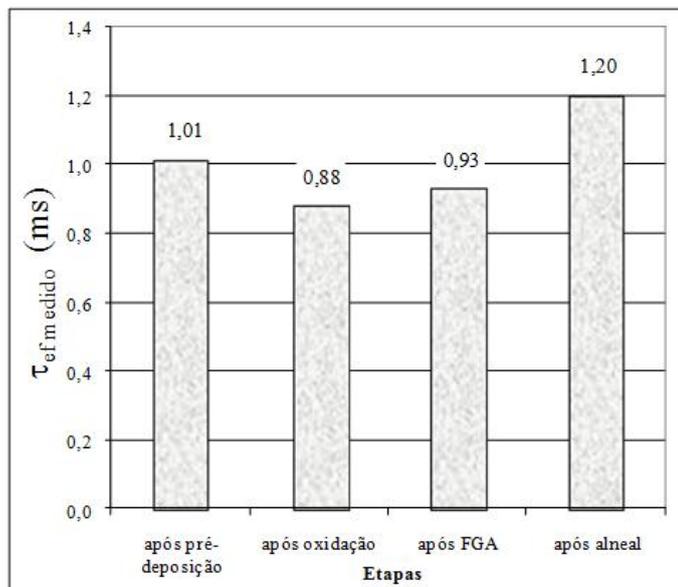


Figura 4: Tempos de vida efetivo de portadores minoritários medidos na amostra E-17-6 (estrutura n<sup>+</sup>pn<sup>+</sup>) como função das etapas de processo considerando a concentração de excesso de portadores igual à concentração de dopantes na base,  $N_A$ .

De acordo com esta figura, o tempo de vida efetivo se manteve elevado após a realização de todas as etapas térmicas necessárias, e conseqüentemente, segundo expressão (2), as suas componentes: tempo de vida no volume e a densidade de corrente de recombinação nos emissores (velocidade de recombinação de superfície e recombinação no volume do emissor).

A figura 5 mostra o comportamento do tempo de vida efetivo dos portadores minoritários como função da concentração de excesso de portadores após a realização da técnica de hidrogenação “alnear” 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.

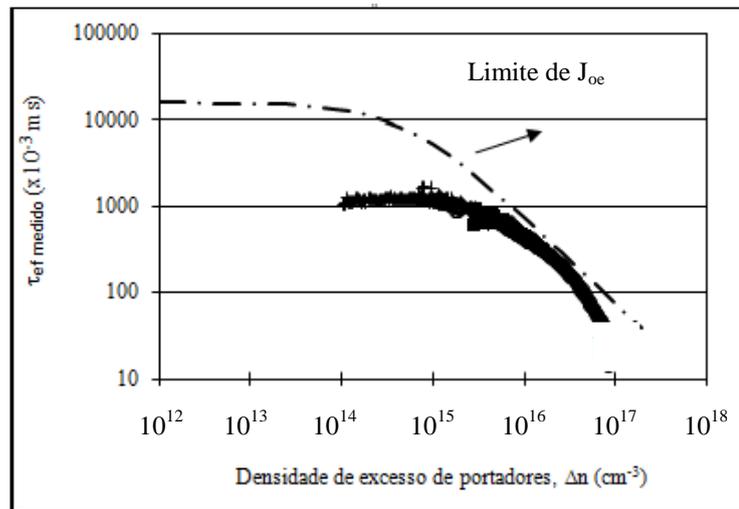


Figura 5: Tempo de vida efetivo,  $\tau_{ef}$  como função da concentração de excesso de portadores,  $\Delta n$  ( $\text{cm}^{-3}$ ) após a realização da técnica “alnear” na amostra E-17-6 (com resistência de folha de aproximadamente de  $130\Omega/\text{quad}$  nas regiões  $n^+$ ). A curva tracejada 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  $45\text{fA}/\text{cm}^2$ , representando, portanto, um emissor de excelente qualidade.

### 3. MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS $N^+P$ 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 as etapas térmicas necessárias, iniciou-se o desenvolvimento de estruturas completas  $n^+p$  com área frontal de  $4\text{cm}^2$  utilizando substratos de silício Cz de baixa resistividade. Nas figuras 6(a), 6(b) e 6(c) observam-se parte da estrutura do LME; a sala de limpeza química, os fornos de tubo-aberto e parte dos equipamentos de metalização utilizados no processamento dos dispositivos.

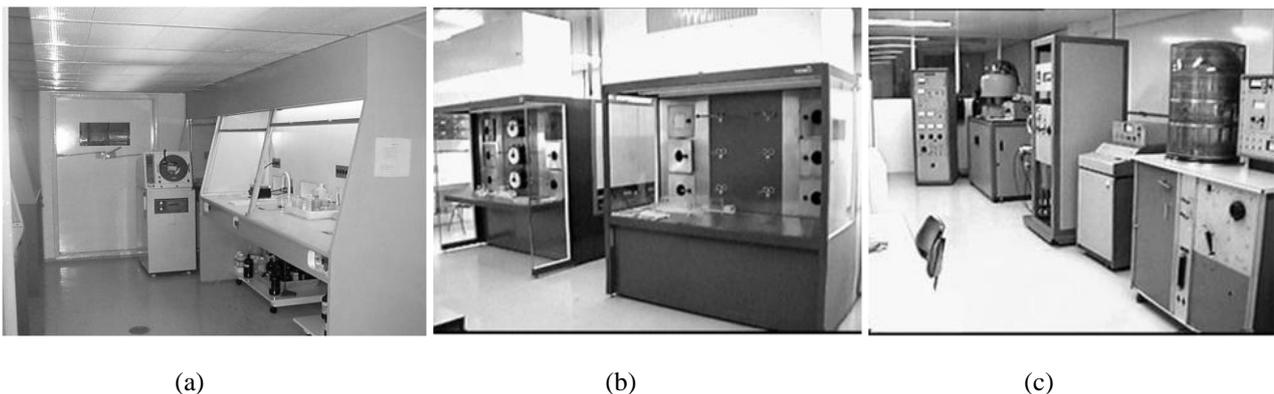


Figura 6: Infra-estrutura do LME-EPUSP: (a) sala de química; (b) fornos de tubo-aberto e (c) parte do setor de metalização.

As amostras com dimensões  $3\text{cm} \times 3\text{cm}$  foram submetidas à limpeza RCA padrão, e posteriormente 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 (visando realizar a passivação da superfície frontal, concomitantemente à redistribuição de fósforo), de maneira análoga ao processo de obtenção das estruturas  $n^+pn^+$ , como apresentado na figura 7.

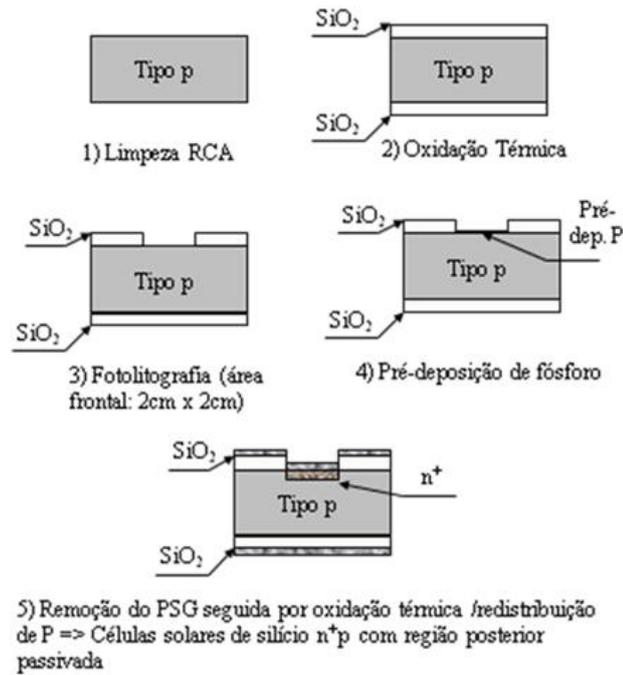


Figura 7: Esquema simplificado das etapas de fabricação das células solares precursoras com região posterior passivada.

A figura 8 apresenta as medidas de tempo de vida efetivo após cada etapa do processo de fabricação: a) oxidação térmica inicial; b) pré-deposição; c) oxidação final; d) após FGA e, e) após alneal, considerando-se o ponto de operação de 1 Sol. Neste experimento foram utilizadas amostras de silício de tipo Cz, contudo, lâminas de silício FZ de  $0,5\Omega\cdot\text{cm}$  foram inseridas com o objetivo de monitorar de processo com material de alta qualidade.

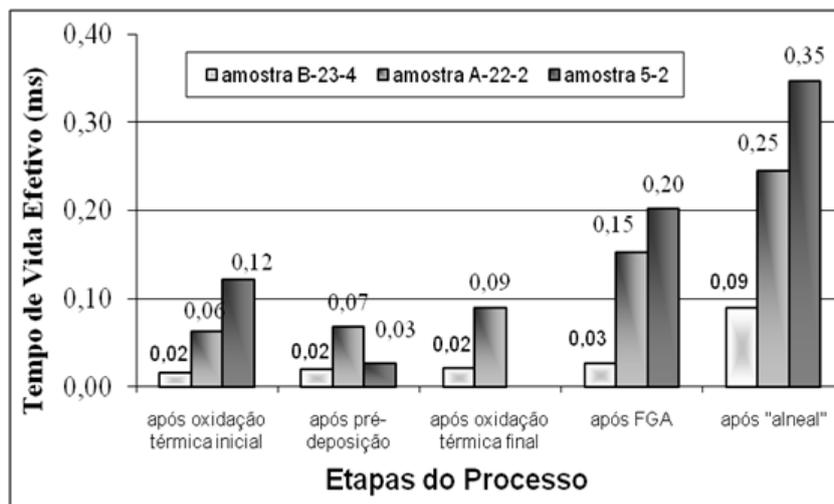


Figura 8: Tempos de vida efetivos de portadores minoritários como função das etapas de processo de três amostras representativas: a) amostra B-23-4 (FZ com  $0,5\Omega\cdot\text{cm}$ ), b) amostra A-22-2 (Cz com  $2,5\Omega\cdot\text{cm}$ ) e b) amostra 5-2 (Cz com  $3,3\Omega\cdot\text{cm}$ ).

Como pode ser observado através dos resultados obtidos, a evolução do tempo de vida efetivo demonstra a importância do processo desenvolvido para aplicações em células solares com região posterior passivada, atingindo o seu máximo valor após a etapa térmica "alneal" (após toda a carga térmica envolvida no processo). A manutenção deste tempo de vida em valores elevados permite desenvolver dispositivos não dependentes do armadilhamento de impurezas através da difusão de alumínio, mesmo utilizando ambientes não ultra-limpas, conforme citado anteriormente.

Além do tempo de vida efetivo, a técnica de caracterização através do PCD 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 pode ser 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,  $\Delta n_{med}$ , como mostra a equação (3).

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

Assim, com o intuito de caracterizar a potencialidade do processo de fabricação implementado no LME/EPUSP apresenta-se na figura 9 o resultado da comparação entre os valores para as tensões de circuito-aberto implícitas,  $V_{oc-imp}$ , 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 utilizada como guia no processo de fabricação. Nestes casos foram consideradas as concentrações de excesso de portadores iguais às obtidas no ponto de operação de cada um dos dispositivos (1 Sol).

Como exemplo, as amostras A-22-2 (com um emissor de 55 $\Omega$ /quad e resistividade de base de 2,5 $\Omega$ .cm) e 5-2 (com um emissor de 101 $\Omega$ /quad e resistividade de 3,3 $\Omega$ .cm) apresentaram  $\tau_{eff}=0,25ms$  e  $V_{oc-imp}=652,4mV$ ; e  $\tau_{eff}=0,35ms$  e  $V_{oc-imp}= 662,6mV$ , respectivamente, considerando-se o ponto de operação de 1 Sol. Ao mesmo tempo, a amostra B-23-4, de material Si-FZ com resistividade de base de 0,5 $\Omega$ .cm e emissor de 55 $\Omega$ /quad, apresentou  $\tau_{eff}=0,09ms$  e  $V_{oc-imp}=670,8mV$ .

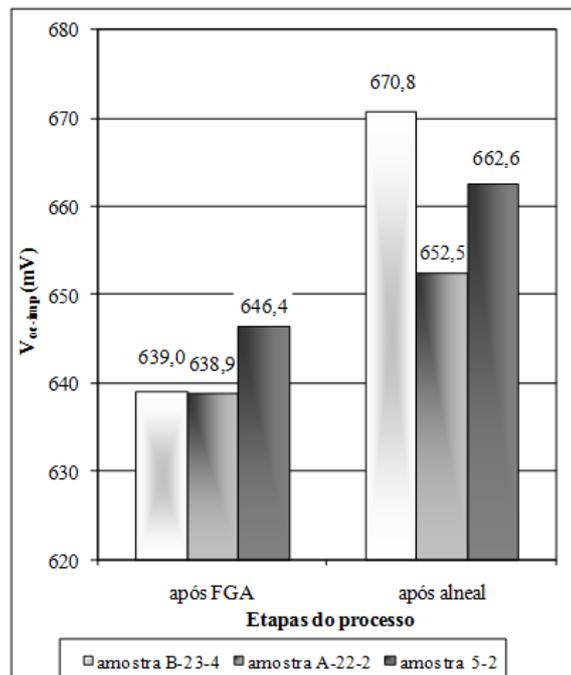


Figura 9: Comparação entre as tensões de circuito-aberto implícitas,  $V_{oc-imp}$ , correspondendo a cada etapa térmica em amostras de Si-Cz (A-22-2 e 5-2), e de Si-FZ (B-23-4).

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). Considerado um sistema anti-refletor de baixo custo típico, (filme de SiO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> por um sistema composto por uma camada delgada “passivadora” de SiO<sub>2</sub> e uma camada dupla composta por ZnS-MgF<sub>2</sub>, a eficiência poderia ultrapassar 20% (em material Cz). Resultados similares são encontrados por outros centros de pesquisas utilizando instalações

ultras-limpas em material de tipo Cz (Glunz, 1997) e em Si-FZ (Fischer et. al., 2001), (Lee et. al., 2001) e (Kerr, 2002), como pode ser observado na tabela 1. Também foram inseridos os resultados obtidos em lâminas processadas no LME utilizando silício de tipo FZ, assim como suas projeções de eficiência (aproximadamente  $\eta=21\%$ ).

A comparação entre os resultados apresentados neste trabalho e os obtidos em outros centros é somente qualitativa, e foi realizada com o objetivo de ilustrar o potencial da técnica desenvolvida, mesmo utilizando ambientes não ultra-limpas. Um ponto a ser considerado está relacionado com os elevados fatores de forma utilizados no cálculo das eficiências das células que utilizam resistividades de base de  $2,5\Omega\cdot\text{cm}$  e  $3,3\Omega\cdot\text{cm}$ . Neste caso cabe ressaltar que elevados fatores de forma podem ser experimentalmente obtidos somente se tecnologias como a “LASER-fired contact” forem utilizadas para obtenção dos contatos posteriores (Schneiderlochner et. al., 2002), caso contrário a resistência imposta será elevada. Contudo, uma vez que o processo desenvolvido demonstrou-se extremamente robusto, excelentes eficiências também serão encontradas com materiais de tipo Cz e resistividades no entorno de  $1\Omega\cdot\text{cm}$ , neste caso, com contato posterior obtido com tecnologia convencional.

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

AMOSTRAS	Valores	$\rho$ $\Omega\cdot\text{cm}$	$R_{\square}$ $\Omega/\square$	$J_{sc}$ $\text{mA}/\text{cm}^2$	$V_{oc}$ $\text{mV}$	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
RP-PERC (FZ) ("planar") (Glunz et. al., 1997)	(text+SiO <sub>2</sub> )	1,0	—	39,6	676,4	0,807	21,6
RP-PERC (Cz) (Glunz et. al., 1997)	(text+SiO <sub>2</sub> )	1,0	—	37,7	656,3	0,795	19,7
B-23-4 (Si -FZ)	experimental	0,50	55		670,8 ( $V_{oc-imp}$ )		
	teórico (text+SiO <sub>2</sub> )	0,50	55	37,0 - 37,5	665,8	0,810	20,0-20,2
	teórico (text+ZnS/MgF <sub>2</sub> )	0,50	55	38,1 - 38,6	665,8	0,810	20,5-20,8
RP-PERC(FZ) (Kerr, 2001)	(text+SiO <sub>2</sub> +SiN)	0,3	—	38,6	684,0	0,807	21,4
	(FZ) polida+SiO <sub>2</sub>	0,5	—	32,5	672,0	0,820	17,9
(Fischer et. al., 2001)	(FZ) (text+SiO <sub>2</sub> )	0,3	—	37,2	671,0	0,818	20,4
(Fischer et. al., 2001) (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  $n^+pn^+$ . Estas técnicas apresentaram 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 corroborar as projeções realizadas para os dispositivos com material Si-Cz, e comprovar a viabilidade de alcançar eficiências de  $\eta=21\%$  quando o sistema anti-refletor estiver 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 consequência os custos de produção da energia elétrica.

#### Agradecimentos:

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

#### REFERÊNCIAS

- Cid, M.; Stem, N.; Ramos, C. A. S.; Processo simplificado de fabricação de células solares com eficiências de 17% utilizando substratos Cz de baixa resistividade. In: XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2007, Rio de Janeiro. XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (CD\_ROM), 2007.
- Choulat, P. Agostinelli; Ya. Ma. Duerinekx, F. and Beaucarne, G., 2007. Above 17% industrial type PERC solar cell on thin multi-crystalline silicon substrate, 23<sup>rd</sup> European Photovoltaic Solar Energy 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, Munich, Germany, 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, France, 1 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> E. C. Photovoltaic Solar Energy Conference, Glasgow, May 2000, [http://solar.anu.edu.au/level\\_1/pubs/2000pubs.php](http://solar.anu.edu.au/level_1/pubs/2000pubs.php).
- Glunz, S. W.; Knobloch, J.; Hebling, C.; Wettling, W., 1997. The range of high-efficiency silicon solar cells fabricated at Fraunhofer ISE. In Proceedings of 26<sup>th</sup> PVSC, Anaheim, CA, USA, pp. 231-234.
- Altermatt, P. P.; Schumacher, J. O.; Cuevas, A.; Kerr, M. J.; Glunz, S. W.; King, R. R.; Heiser, G.; Schenk, A. Numerical modeling of highly doped Si: P emitters based on Fermi-Dirac statistics and self-consistent material parameters, 2002. Journal of Applied Physics, vol. 92, nº 6, pp. 3187 – 3197.
- Glunz, S. W.; Preu, R.; Schaefer, S.; Schneiderlochner, E.; Plefging, W.; Ludemann, R.; Willeke, G.. New simplified methods for patterning the rear contact of RP-PERC high efficiency solar cells, 28<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anorage, USA, 2000, pp. 168 – 171.
- Lago, R.; Tobias, I.; Cañizo, C.; Luque, A., 2001. Lifetime measurements by photoconductance techniques in wafers immersed in a passivating liquid. Journal of The Electrochemical Society, vol. 148, nº 4, p. 200.
- Kerr, M. J., 2002. Surface emitter recombination and development of silicon nitride passivated solar cells. Tese de doutorado, Australian National University, Austrália.
- 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>.
- Cuevas, A., 1999. The effect of emitter recombination on the effective lifetime of silicon wafers. Solar Energy Materials & Solar Cells, v. 57, pp. 277-290.
- 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.
- Stem, N. and Cid, M., 2001. Studies of phosphorus Gaussian profile emitter silicon solar cells. Materials Research, v. 4, n. 2, pp. 143-148.
- MacDonald, D. H., 2001. Recombination and trapping in multicrystalline silicon solar cells. Tese de doutorado submetida a Australian National University, Austrália.

Lee, S. H., 2001. Development of high efficiency silicon solar cells for commercialization, Journal of the Korean Physical Society, v. 39, n° 2, pp. 369-373.

Schneiderlochner, E.; Grobe, A.; Balif, C.; Glunz, S. W.; Preu, R.; Willeke, G., 2002. Investigations on LASER-fired contacts for passivated rear solar cells. In: 29<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, USA, p. 300.

*Abstract. This work describes the development and implementation of a simplified process of rear passivated silicon solar cell fabrication. Using the photodecay 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  $\Omega\text{cm}$ ) are used to develop 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 surface recombination velocity, 13.6cm/s. At the same time, the passivations performed by using the phosphorus diffusion, followed by PSG dropping out and thermal oxidation ( $n^+pn^+$  structures with optimized sheet resistances, approximately 130 $\Omega/\text{quad}$ ) and alneal 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 ( $\text{SiO}_2$  film) and frontal area of 4cm<sup>2</sup>, using Cz-Si of type p with low resistivity (2,5-3,5 $\Omega\text{cm}$ ) allowed to prove the high potentiality of the implemented technology, resulting in 652.5mV (manufacturer type 1 – 2.5 $\Omega\text{cm}$ ) and 662.6mV (manufacturer type 2 – 3.3 $\Omega\text{cm}$ ). Meanwhile, the FZ p-type silicon (0.5 $\Omega\text{cm}$  resistivity) sample allowed reaching the implied open-circuit voltage of 670.8mV. Thus, using an anti-reflector typical of solar cells processed using P/Al technology, composed by random texturization +  $\text{SiO}_2$ , efficiencies of about 19.4% - 19.7% and 20.0% - 20.2% can be provided by Cz and FZ silicon wafers, respectively. However, if the  $\text{SiO}_2$  film were replaced by a double layer of  $\text{ZnS-MgF}_2$ , the efficiencies can be increased to 20.3% - 20.6% (in Cz silicon), reaching the mark of 21% using FZ silicon.*

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