

# INFLUÊNCIA DO TEMPO DE IMERSÃO EM HF NO TEMPO DE VIDA DOS PORTADORES DE CARGA MINORITÁRIOS EM LÂMINAS DE SILÍCIO

Ricardo Augusto Zanotto Razera – ricardo.razera@acad.pucrs.br

Jéssica de Aquino – jessicaaquino.rs@gmail.com

Izete Zanesco – izete@pucrs.br

Adriano Moehlecke – moehleck@pucrs.br

Thais Crestani – realthaiscrestani@gmail.com

José Cristiano Mengue Model – jose.model@hotmail.com

Moussa Ly – moussa.ly@pucrs.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), Faculdade de Física  
Núcleo de Tecnologia em Energia Solar (NT-Solar)

**Resumo.** O tempo de vida dos portadores de carga minoritários ( $\tau$ ) e a velocidade de recombinação em superfície são parâmetros importantes no desenvolvimento de células solares de silício. Estes parâmetros são influenciados pela qualidade da superfície e do volume da lâmina de silício. O objetivo deste trabalho é avaliar a dependência do tempo de vida dos portadores de carga minoritários em lâminas de Si-Cz, tipo p, grau solar, com o tempo de passivação química provida por ácido fluorídrico. Para isso, mediu-se o tempo de vida dos minoritários em lâminas de Si, texturadas e limpas em RCA, em função do tempo de imersão em HF. Todas as lâminas de Si avaliadas apresentaram valores do tempo de vida dos minoritários dependentes do tempo de imersão da lâmina no ácido fluorídrico. Verificou-se que a taxa de aumento do  $\tau$  com o tempo de imersão depende da lâmina de Si e que as amostras com maiores valores do tempo de vida dos minoritários tendem a apresentar uma maior taxa de aumento do  $\tau$  com o tempo de imersão. Foi proposto um modelo teórico para o aumento do  $\tau$  com o tempo de imersão em HF. Ajustando as curvas experimentais para o modelo proposto, encontrou-se uma excelente concordância entre o modelo proposto e os dados medidos. Assim, concluiu-se que a dependência temporal observada para o tempo de vida é causada pela passivação gradual da superfície pelos átomos de hidrogênio do HF.

**Palavras-chave:** Células Solares de Si, Tempo de Vida dos Portadores de Carga Minoritários, Passivação em HF

## 1. INTRODUÇÃO

O tempo de vida dos portadores de carga minoritários ( $\tau$ ) e a velocidade de recombinação de superfície (S) são parâmetros microscópicos importantes que influenciam a eficiência da célula solar de silício. A importância está associada ao fato de que estes parâmetros microscópicos afetam diretamente os parâmetros macroscópicos que definem a qualidade da célula solar, como tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito (Green, 1992; Luque e Hegedus, 2003; Aberle, 2004).

O tempo de vida dos portadores de carga minoritários está diretamente relacionado com a quantidade de defeitos presentes no volume da lâmina e a velocidade de recombinação está associada à qualidade da passivação nas superfícies. A medição destes parâmetros é reconhecida na indústria de microeletrônica e fotovoltaica como um método efetivo de caracterização de lâminas de Si (Shockley e Read, 1952; Green, 1992; Luque e Hegedus, 2003; Aberle, 2004).

O método de passivação química mais usual para a medição do tempo de vida dos portadores de carga minoritários é a imersão da lâmina de Si em ácido fluorídrico de alta pureza, que pode resultar em superfícies livres de defeitos (Aberle, 2004; Yablonovitch *et al.*, 1986, Aurrekoetxea *et al.*, 2001). No entanto, estudos sobre o mecanismo de passivação das superfícies da lâmina de Si com o tempo de imersão no ácido fluorídrico ainda são necessários. Sabe-se que as ligações rompidas na superfície, após serem expostas ao HF, são completadas por átomos de hidrogênio (Trucks *et al.*, 1990), e, portanto, a passivação é atribuída à redução da quantidade de ligações incompletas e formação de ligações Si-H.

Aurrekoetxea *et al.* (2001) demonstrou experimentalmente que o tempo de vida efetivo dos portadores de carga minoritários em uma lâmina de Si crescido pela técnica da fusão zonal flutuante (Si-FZ), tipo p, sem processamento prévio, diminui com o tempo de imersão em ácido fluorídrico e quanto menor a resistividade de base (maior dopagem), maior é a taxa de diminuição do tempo de vida dos minoritários. Também foi constatado que se a lâmina de Si-FZ foi dopada com alumínio, retirada a camada dopada com CP4 (solução com ácido fluorídrico, ácido nítrico e ácido acético) e limpa com RCA, o tempo de vida aumenta com o tempo de imersão.

O objetivo deste trabalho é apresentar e discutir a influência no tempo de vida efetivo dos portadores de carga minoritários do tempo de imersão em ácido fluorídrico da lâmina de silício crescido pelo processo Czochralski (Si-Cz), tipo p e grau solar.

## 2. PROCESSO DE PASSIVAÇÃO EM ÁCIDO FLUORÍDRICO

Espera-se uma dependência do tempo de vida dos portadores de carga minoritários com o tempo de imersão da lâmina de Si em ácido fluorídrico de alta pureza, causada pela redução gradual da quantidade de defeitos na superfície à medida que a seguinte reação ocorre:



Esta interpretação da dependência do tempo de vida dos minoritários com o tempo de imersão é corroborada pelo fato de a ligação H-F ser relativamente forte, sugerindo que a superfície da lâmina leva um tempo mensurável para ser completamente passivada por átomos de hidrogênio.

O tempo de vida efetivo ( $\tau_{eff}$ ) medido é uma função tanto da velocidade de recombinação em superfície quanto do tempo de vida dos minoritários no volume ( $\tau_b$ ) (Luke e Cheng, 1987):

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_b} + \alpha_m^2 D \quad (2)$$

onde  $D$  é a constante de difusão dos portadores minoritários e  $\alpha_m$  é a  $m$ -ésima solução da equação transcendental:

$$\tan\left(\frac{\alpha_m W}{2}\right) = \frac{SW}{2D} \frac{1}{\alpha_m W/2} \quad (3)$$

onde  $W$  é a espessura da lâmina de Si e  $S$  é a velocidade de recombinação de superfície. Portanto, o tempo de vida efetivo depende da velocidade de recombinação em superfície por meio de um parâmetro que é solução de uma equação transcendental. De qualquer forma, a função  $\tau_{eff}(S)$  pode ser obtida em duas situações especiais (Luke e Cheng, 1987):

1) quando  $S \rightarrow \infty$  e 2) quando  $S \rightarrow 0$ . No primeiro caso,  $\frac{\alpha_m W}{2} \rightarrow \frac{\pi}{2}$  e, portanto, tem-se:

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_b} + \frac{\pi^2 D}{W^2} \quad (4)$$

No segundo caso, pode-se expandir o lado esquerdo da Eq. (3) e aceitar apenas o termo de primeira ordem de  $\alpha_m$ , obtendo-se:

$$\alpha_m^2 = \frac{2S}{WD} \quad (5)$$

fazendo com que a Eq. 2 se torne:

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_b} + \frac{2S}{W} \quad (6)$$

Estas duas aproximações são válidas quando  $SW \gg D\pi$  e  $SW \ll D\pi$ , respectivamente (Aberle, 2004).

É comum estimar a velocidade de recombinação em superfície usando:

$$S \sim N_{st} v_{th} \sigma \quad (7)$$

desprezando a dependência de  $S$  com o nível de injeção e evidenciando a sua dependência direta com a quantidade de defeitos na superfície (Haug, 2014; Yablonovitch *et al.* 1986; Shockley e Read, 1952). Na Eq. 7,  $N_{st}$  é a quantidade de estados de superfícies que causam recombinações por unidade de área,  $v_{th}$  é a velocidade térmica (para o silício a 300 K,  $v_{th} \sim 1,7 \cdot 10^7$  cm/s) e  $\sigma$  é a seção de choque de captura dos portadores minoritários.

A dependência temporal do tempo de vida pode ser explorada matematicamente assumindo que a velocidade em que a reação da Eq. (1) ocorre é proporcional a própria quantidade de defeitos na superfície da lâmina. Portanto, o processo pode ser descrito por meio da seguinte equação diferencial:

$$dN_{st} = -kN_{st} dt \quad (8)$$

onde  $kN_{st}$  é a quantidade de átomos de Si na superfície que sofreram a reação representada na Eq. (1) no intervalo  $dt$ . A solução da Eq. 8 é:

$$N_{st} = Ne^{-kt} \quad (9)$$

onde  $N$  é a quantidade inicial de defeitos. Substituindo a Eq. 9 na Eq. 7, tem-se:

$$S = Ce^{-kt} \quad (10)$$

onde  $C$  é uma constante, com valor aproximado de  $\sim 10^6 - 10^7$  cm/s, que representa a máxima velocidade de recombinação em superfície em uma lâmina de Si.

Portanto, espera-se que  $S$  decaia com o tempo de imersão exponencialmente. A partir da Eq. 6, pode-se ver que  $\tau_{eff} \rightarrow \tau_b$  quando o valor de  $S$  for pequeno (o suficiente para que a aproximação  $S \ll D\pi/W$  seja válida) e que  $\tau_{eff}$  depende do tempo por meio da equação:

$$\tau_{eff} = \frac{\tau_b}{1 + \tau_b A e^{-kt}} \quad (11)$$

onde  $A$  é um parâmetro independente do tempo cuja unidade é  $\mu s^{-1}$ . A Fig. 1 representa o resultado do tempo de vida dos minoritários em função do tempo de imersão obtido com a Eq. 11.

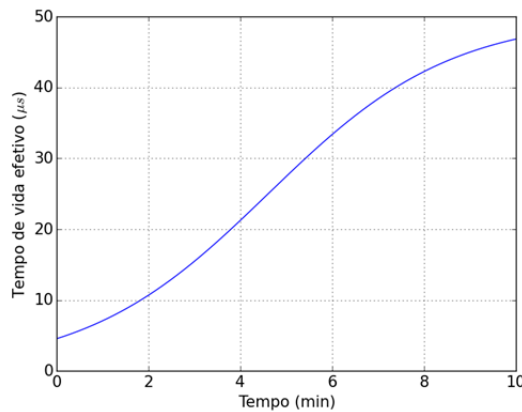


Figura 1 - Tempo de vida efetivo dos portadores de carga minoritários em função do tempo de imersão de uma lâmina de Si em ácido fluorídrico. Utilizaram-se os seguintes parâmetros (referentes a Eq. 11):  $\tau_b = 50 \mu s$ ,  $A = 0,2 \mu s^{-1}$  e  $k = 0,5 \text{ min}^{-1}$ .

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Decaimento da Fotocondutividade

Ao incidir um pulso de radiação eletromagnética (visível e principalmente infravermelha) na amostra, pares elétron-lacuna são gerados. Desta forma, a condutância da amostra é diretamente proporcional aos portadores de carga gerados, que decaem exponencialmente com um tempo igual  $\tau_{eff}$ . Por meio de um acoplamento indutivo entre uma bobina e a lâmina de Si, então, pode-se monitorar a condutância da lâmina de Si em função da diferença de potencial na bobina e, assim, monitorar o decaimento dos portadores gerados pelo pulso.

Muitas técnicas que utilizam a medida do decaimento da fotocondutividade (PCD) foram desenvolvidas nas últimas décadas. Uma das técnicas é a o decaimento da fotocondutividade no estado quase permanente (QSSPCD - *quasi-steady-state photoconductance decay*) (Sinton e Cuevas, 1996). Nesta técnica, a amostra é iluminada por um pulso de radiação visível e infravermelha que possui um tempo de decaimento muito maior do que o tempo de vida efetivo dos portadores minoritários. Assim, pode-se assumir que em cada instante do decaimento da iluminação a quantidade de portadores minoritários já se estabilizou e, portanto, é constante. A medida, portanto, é o resultado de quatro etapas:

1. Irradiação da amostra com um pulso de decaimento lento;
2. Medição da condutância da amostra ao mesmo tempo em que se mede a irradiância incidente;
3. Conversão do valor da condutância para um valor de concentração de portadores minoritários média,  $\Delta n$ , e o valor da irradiância,  $I$ , para um valor de taxa de geração de portadores minoritários,  $G$ ;
4. Cálculo do tempo de vida com a equação:

$$\tau = \frac{\Delta n}{G} \quad (12)$$

As etapas 2-4 são realizadas para cada instante do decaimento do pulso de radiação incidente, que correspondem a valores levemente diferentes de “estados estacionários” do nível de injeção. A irradiância, no passo 2, é medida com uma célula padrão de referência, onde a corrente elétrica de curto-circuito é conhecida.

Para medição do tempo de vida dos portadores de carga minoritários utilizou-se o equipamento WCT-120, da empresa Sinton Consulting, equipado com uma lâmpada de xenônio e filtro passa-alta de 700 nm. A calibração do equipamento foi realizada antes das medições utilizando uma lâmina padrão, onde o tempo de vida e a resistividade são conhecidos. Foi estimado que o erro máximo do equipamento na medida do tempo de vida é da ordem de 5%.

### 3.2 Preparação das amostras

Utilizaram-se lâminas de silício Czochralski tipo p, grau solar, com 100 mm de diâmetro, espessura de  $(200 \pm 30)$   $\mu\text{m}$ , orientação dos planos cristalinos  $\{100\}$  e resistividade de base entre 1  $\Omega\cdot\text{cm}$  e 20  $\Omega\cdot\text{cm}$ , segundo as especificações do fornecedor. Previamente a medição do tempo de vida dos portadores de carga minoritários, as amostras foram texturadas, formando micropirâmides e expondo os planos cristalinos  $\{111\}$ . A seguir as amostras foram limpas em solução padrão RCA e, após a secagem foram imersas individualmente em HF 48% e imediatamente iniciou-se a medição. Foram realizadas medições até que o valor do tempo de vida dos minoritários estabilizasse, indicando que a velocidade de recombinação em superfície atingiu o limite assintótico. Cada medida foi realizada em intervalos de 2 min e em temperatura ambiente de aproximadamente 22 °C. Utilizou-se a densidade de portadores de carga minoritários de  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , que corresponde ao nível injeção da célula solar no ponto de máxima potência, considerando a resistividade de base das lâminas de silício em análise.

As lâminas foram separadas em 5 grupos de A a E, em função dos valores do tempo de vida dos portadores de carga minoritários. Os grupos A, B e D possuem 16 lâminas, enquanto o grupo C possui 18. No grupo E foram apresentadas as 5 lâminas com os maiores valores de tempo de vida dos portadores de carga minoritários. O número total de lâminas de Si avaliadas foi de 71.

Como as amostras utilizadas neste trabalho possuíam espessura de 200  $\mu\text{m}$ , então,  $\frac{D\pi}{W} \sim 4710 \text{ cm/s}$  ( $D \sim 30 \text{ cm}^2/\text{s}$ ). Amostras texturadas não passivadas possuem  $S \sim 10^6 - 10^7 \text{ cm/s}$ , enquanto lâminas imersas em HF podem ter uma velocidade de recombinação em superfície tão baixa quanto 0,25 cm/s (Yablonovitch *et al.*, 1986). Logo, pode-se concluir que a Eq. 6 e Eq. 11 são válidas nos instantes finais da imersão da lâmina em HF. De qualquer forma, em primeira ordem a Eq. 6 é sempre válida.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 2 mostra o tempo de vida dos portadores de carga minoritários em função do tempo de imersão em HF. Pode-se notar que o valor de  $\tau$  cresce com o tempo de imersão e, para algumas amostras, tende a estabilizar após um determinado período, variável para cada lâmina. Com base neste fato, pode-se atribuir uma dependência da velocidade de recombinação com possíveis contaminantes presentes nas superfícies das lâminas. Este comportamento já foi observado por Aurrekoetxea *et al.* (2001), que também constatou que diferentes lâminas de Si tipo p obtidas por fusão zonal flutuante possuem concentrações de defeitos e/ou contaminantes em superfície diferentes. Estes contaminantes retardam a velocidade em que a reação representada na Eq. 1 acontece.

Nota-se que a taxa de aumento do  $\tau$  com o tempo de imersão depende da lâmina de Si. É válido também observar que as diferenças nos valores do tempo de vida entre as lâminas são maiores para maiores tempos de imersão, ou seja, a diferença aumenta com o tempo de imersão. Isto é consequência do fato de que, no início da imersão da lâmina, o tempo de vida efetivo é limitado pela velocidade de recombinação da superfície, que é aproximadamente a mesma para todas lâminas ( $S \sim 10^6 \text{ cm/s}$ ). No final, no entanto, o tempo de vida é limitado pelo tempo de vida dos minoritários na base (volume), que é diferente para cada lâmina.

Além disso, pode-se ver que os tempos de vida assintóticos (i.e., tempos de vida no volume) de cada lâmina possuem bastante variação, apesar de serem do mesmo lote e terem passado pelas mesmas etapas de processo. Estas observações corroboram com a interpretação inicial de que a dependência temporal do tempo de vida é causada pela redução de ligações pendentes dos átomos de silício da superfície.

A Tab. 1 apresenta os valores médios e os desvios padrões em função do tempo de imersão em ácido fluorídrico e a Fig. 3 mostra os valores médios do tempo de vida dos minoritários em cada lâmina para cada grupo de lâminas.

Na Fig. 3, a partir dos valores da média geral, confirma-se o aumento do  $\tau$  com o tempo de imersão. Também se pode concluir que amostras com maiores valores do tempo de vida dos minoritários tendem a apresentar uma maior taxa de aumento do  $\tau$  com o tempo de imersão, conforme se pode verificar pela comparação dos resultados do grupo A e E.

Segundo a Eq. 11, o gráfico de  $\ln\left(\frac{1}{\tau_{eff}} - \frac{1}{\tau_b}\right)$  em função do tempo de imersão deve resultar em uma reta com declividade negativa que intercepta o eixo vertical em  $\ln(A)$  e que possui declividade com módulo  $k$ . Isto deve ser válido a partir do instante em que a aproximação  $S \ll 4710 \text{ cm/s}$  é válida. O valor de  $\tau_b$  pode ser obtido das mesmas

curvas, assumindo que a passivação com HF resulta em velocidade de recombinação de superfície nula, e que, portanto, o valor assintótico do tempo de vida medido é o próprio  $\tau_b$ . No entanto, é importante salientar que, ao utilizar o último valor medido como  $\tau_b$ , perde-se um grau de liberdade estatístico. Por isso, o gráfico do logarítmico da função é implementado excluindo-se o último valor da Tab. 1 para cada grupo, o qual é mostrado na Fig. 4 para as médias dos valores de cada grupo.

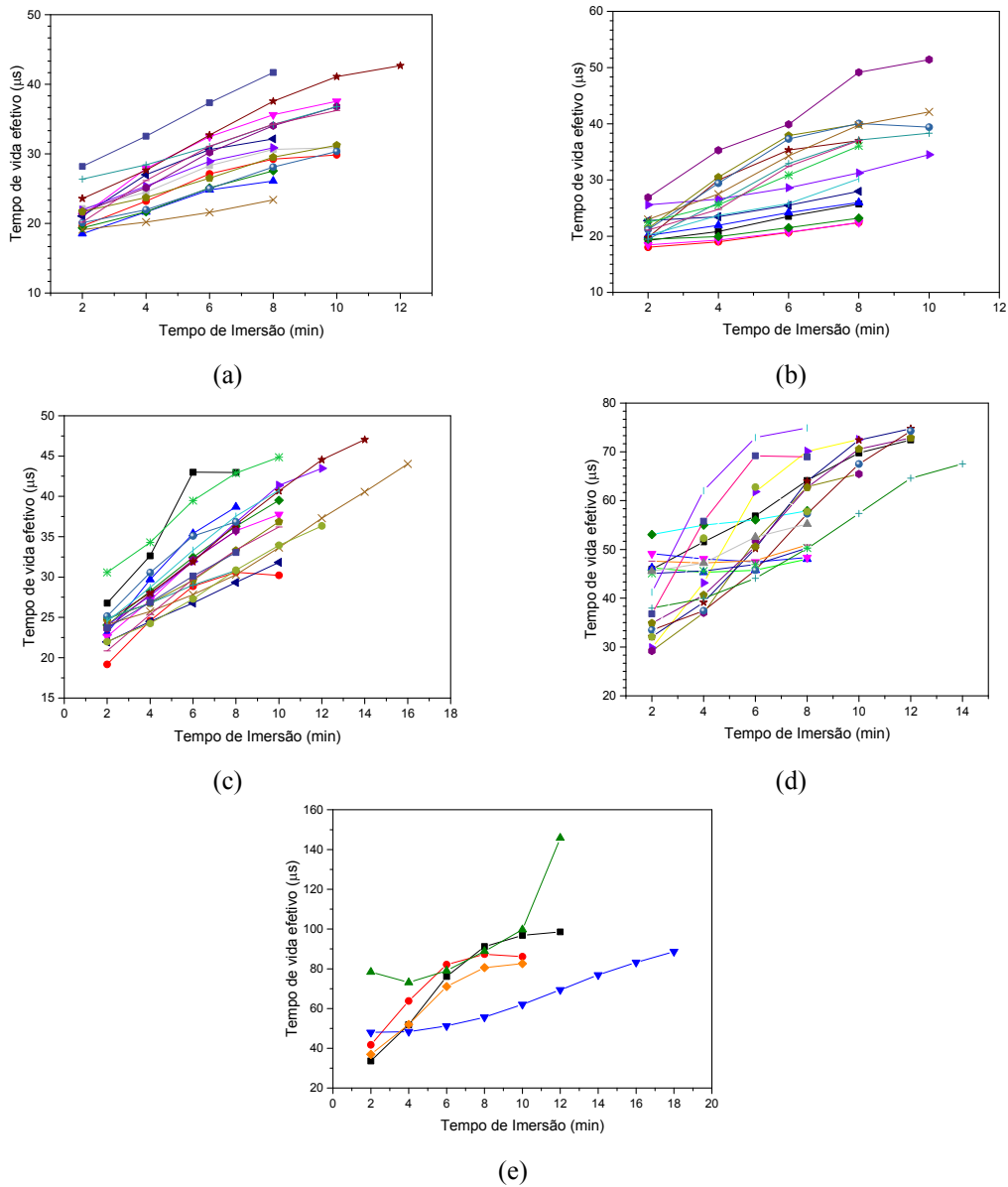


Figura 2 - Tempo de vida dos portadores de carga minoritários de cada lâmina avaliado em função do tempo de imersão para o (a) grupo A, de 16 lâminas, (b) grupo B, de 16 lâminas, (c) grupo C, de 18 lâminas, (d) grupo D, de 16 lâminas, e (e) grupo E, de 5 lâminas, com os maiores valores de  $\tau$ . As cores diferentes representam lâminas diferentes.

Tabela 1 - Valores médios do tempo de vida efetivo para cada grupo de amostras em função do tempo de imersão.

Tempo de Imersão	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D	Grupo E	Geral
2	23 ± 7	21 ± 2	24 ± 2	40 ± 13	48 ± 18	28 ± 11
4	26 ± 6	25 ± 5	28 ± 7	47 ± 7	59 ± 10	33 ± 12
6	30 ± 7	29 ± 6	32 ± 4	54 ± 9	72 ± 12	39 ± 15
8	33 ± 7	32 ± 8	35 ± 4	59 ± 9	81 ± 14	43 ± 17
10	34 ± 4	41 ± 6	37 ± 4	68 ± 5	85 ± 14	49 ± 20
12	-	-	40 ± 4	-		

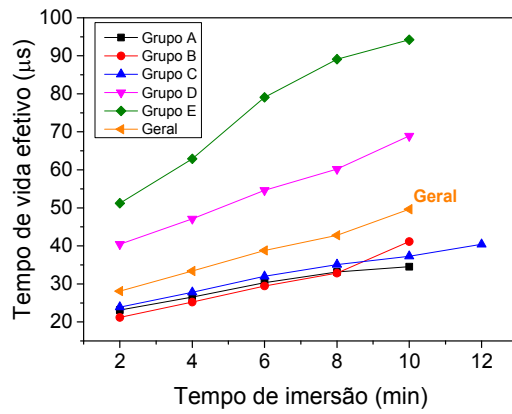


Figura 3 - Valores médios do tempo de vida dos portadores de carga minoritários de cada grupo e média geral de todas as lâminas.

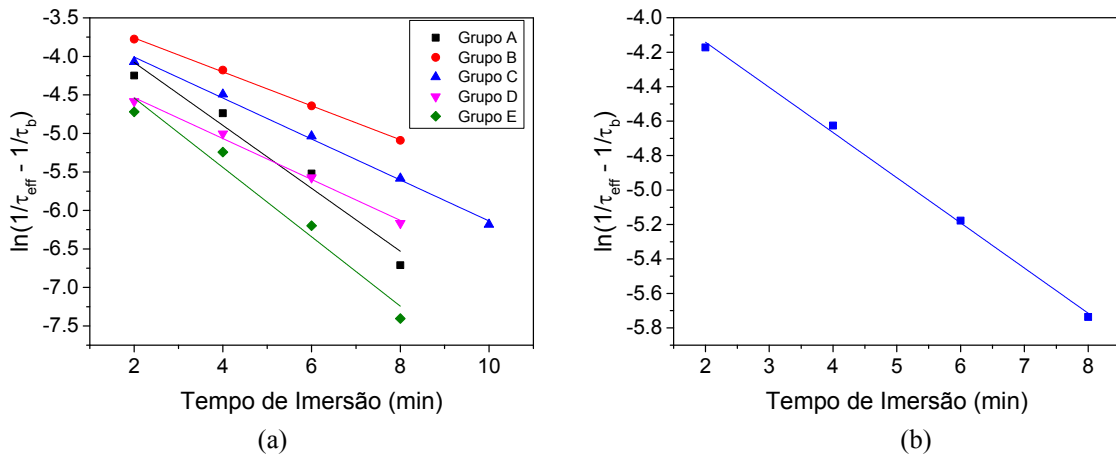


Figura 4 - Representação da função  $\ln\left(\frac{1}{\tau_{eff}} - \frac{1}{\tau_b}\right)$  com o aumento do tempo de imersão em ácido fluorídrico e ajuste linear para os valores médios (a) de cada grupo e (b) para os valores médios considerando todas as lâminas de Si medidas.

Na Fig. 4 pode-se ver claramente a tendência do comportamento linear. Na Tab. 2, são mostrados todos os resultados dos ajustes lineares realizados para cada reta. O coeficiente  $R^2$  representa a variância dos dados experimentais que pode ser explicada pelo modelo teórico apresentado. Portanto, a qualidade do ajuste, caracterizada pelo valor de  $R^2$ , é maior do que 0,99 para a média geral considerando todas as lâminas, assim como para a maioria dos grupos. Somente para o grupo A o valor de  $R^2$  é menor, de 0,95. Este resultado evidencia o comportamento exponencial da velocidade de recombinação de superfície em função do tempo de imersão em HF, e, portanto, confirma a modelagem do fenômeno descrita pela Eq. 1, Eq. 6 e Eq. 11. Avaliando a última linha da Tab. 2, pode-se concluir, portanto, que menos de 0,4% da variância dos dados obtidos não pode ser explicada pelo modelo, demonstrando uma excelente concordância entre o modelo teórico e os resultados experimentais. Além disso, utilizando a média geral, pode-se concluir que a constante  $k$  da reação representada na Eq. 1, para uma concentração de HF de 48% e para  $T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ , é de  $(0,265 \pm 0,011) \text{ min}^{-1}$ .

Tabela 2 - Resultados do ajuste da função  $\ln\left(\frac{1}{\tau_{eff}} - \frac{1}{\tau_b}\right)$  com o aumento do tempo de imersão em ácido fluorídrico. A unidade de A é  $\mu\text{s}^{-1}$ .

Grupo	$-\ln(A)$	$-k \text{ (min}^{-1}\text{)}$	$R^2$
A	$3,3 \pm 0,3$	$0,41 \pm 0,06$	0,946
B	$3,32 \pm 0,03$	$0,220 \pm 0,005$	0,999
C	$3,48 \pm 0,06$	$0,266 \pm 0,009$	0,995
D	$4,02 \pm 0,07$	$0,260 \pm 0,012$	0,993
E	$3,6 \pm 0,3$	$0,44 \pm 0,05$	0,958
Geral	$3,62 \pm 0,06$	$0,265 \pm 0,011$	0,995

## 5. CONCLUSÕES

Foi identificado e proposto um modelo para o fenômeno de passivação química da superfície com ácido fluorídrico de lâminas de Si texturadas. Constatou-se que todas as lâminas de Si avaliadas apresentaram valores do tempo de vida dos minoritários dependentes do tempo de imersão da lâmina no ácido fluorídrico. Também se verificou que a taxa de aumento do  $\tau$  com o tempo de imersão depende da lâmina de Si e que as amostras com maiores valores do tempo de vida dos minoritários tendem a apresentar uma maior taxa de aumento do  $\tau$  com o tempo de imersão. Esta dependência é causada pelo decaimento exponencial da velocidade de recombinação em superfície. Foi proposto um modelo teórico para explicar o aumento do  $\tau$  com o tempo de imersão em HF. Ajustando as curvas experimentais para o modelo proposto, encontrou-se uma excelente concordância entre o modelo e os dados medidos. Assim, concluiu-se que a dependência temporal observada para o tempo de vida é causada pela passivação gradual da superfície pelos átomos de hidrogênio do HF. Por meio de um ajuste linear, compararam-se os dados experimentais com o modelo teórico. Uma excelente concordância, representada pelo coeficiente de ajuste  $R^2$  de 0,995, foi encontrada.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Eletrosul pela subvenção do projeto de P&D intitulado "Desenvolvimento de Processos Industriais para Fabricação de Células Solares com Pasta de Alumínio e Passivação", Convênio ELETROSUL nº 1110140010 e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

### REFERÊNCIAS

- Aberle, A.G., 2004. Crystalline Silicon Solar Cells. Advanced Surface Passivation and Analysis, UNSW Publishing.
- Aurrekoetxea, R.L., Tobías, I., del Cañizo, C., Luque, A., 2001. Lifetime Measurements by Photoconductance Techniques in Wafers Immersed in a Passivating Liquid, Journal of Electrochemical Society, vol. 148, n. 1, pp. G200-G206.
- Cuevas, A., Macdonald, D., 2004. Measuring and Interpreting the Lifetime of Silicon Wafers, Solar Energy, vol. 76, p.p. 255-262.
- Green, M. A., 1992. Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications, Sydney: UNSW Photovoltaics.
- Haug, H., 2014. New Methods for Investigation of Surface Passivation Layers for Crystalline Silicon Solar Cells, Ph.D Thesis, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University of Oslo.
- Luke, K.L, Cheng, L.J., 1987. Analysis of the Interaction of a Laser Pulse With a Silicon Wafer: Determination of Bulk Lifetime and Surface Recombination Velocity, Journal of Applied Physics, vol. 61, p.p. 2282.
- Luque, M.A, Hegedus, S., 2003. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons.
- Shockley, W., Read Jr., W. T., 1952. Statistics of the Recombination of Holes and Electrons. Physical Review, vol 87, n. 5.
- Sinton, R.A, Cuevas, A., Stuckings, M., 1996. Quase-Steady State Photoconductance, a New Method for Solar Cell Material and Device Characterization, Proc. 25<sup>th</sup> IEEE Photovoltaics Specialist Conference, Washington, p. 457-460, 1996.
- Trucks, G.W., Raghavachari, K., Higashi, G.S, Chabal, Y.J., 1990. Mechanism of HF Etching of Silicon Surfaces: A Theoretical Understanding of Hydrogen Passivation, Physical Review Letters, vol. 65, n. 4.
- Yablonovitch, E., Gmitter, T.J., 1992. A Contactless Minority Lifetime Probe of Heterostructures Surfaces Interfaces and Bulk Wafers, Solid-State Electronics, vol. 35, n. 3, p.p. 261-267.

### INFLUENCE OF THE IMMERSION TIME IN HF ON THE MINORITY CARRIER LIFETIME IN SILICON WAFERS

**Abstract.** The minority carrier lifetime ( $\tau$ ) and the surface recombination velocity are important parameters for the development of silicon solar cells. These parameters are influenced by the surface and bulk quality of silicon wafers. The goal of this paper is to evaluate the dependence of the minority carrier lifetime of solar grade p-type Czochralski-grown wafers, on the chemical passivation time provided by hydrofluoric acid. Measurements of the minority carrier lifetime as a function of immersion time in hydrofluoric acid were carried out in silicon wafers that were previously textured and RCA cleaned. All the wafers analyzed in this work presented a minority carrier lifetime depending on the immersion time in HF. The  $\tau$  rate of increasing depended on the silicon wafer and the samples with higher lifetime values tended to present a higher rate of increasing of the minority carrier lifetime with the immersion time. A theoretical model was proposed for the rise of  $\tau$  with the HF immersion time. Fitting the experimental data to the

*proposed model, an excellent agreement between theoretical model and experimental data was found. Thus, we concluded that the immersion time dependence of the minority carrier lifetime is caused by the gradual passivation of the silicon surface by the hydrogen atoms of HF.*

**Key words:** *Silicon Solar Cells, Minority Carrier Charge Lifetime, HF Passivation*