



PUCRS

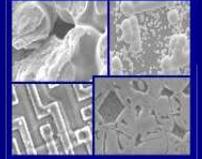
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E  
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia

Faculdade de Física

Faculdade de Química



PGETEMA

## **ANÁLISE DE *GETTERING* POR ALUMÍNIO NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES**

***Márcia da Silva Pereira***

Licenciada em Física

**DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
MESTRE EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

**PORTO ALEGRE, MAIO DE 2007.**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



PUCRS

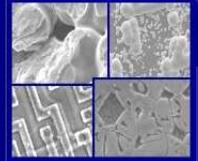
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E  
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia

Faculdade de Física

Faculdade de Química



PGETEMA

## **ANÁLISE DE *GETTERING* POR ALUMÍNIO NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES**

***Márcia da Silva Pereira***

Licenciada em Física

**Orientador: Prof. Dr. Adriano Moehleck**

**Co-orientadora: Profa. Dra. Izete Zanenco**

**Trabalho realizado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e  
Tecnologia de Materiais – PGETEMA, como parte dos requisitos para a  
obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais.**

**PORTO ALEGRE, MAIO DE 2007.**

## **BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Adriano Moehlecke**

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

---

**Profa. Dra. Izete Zanesco**

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

---

**Profa. Dra. Sandra Mara Oliveira Einloft**

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

---

**Prof. Dr. Henri Ivanov Boudinov**

**Programa de Pós-Graduação em Microeletrônica  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul**

"Tristezas são meras curvas  
entre o caminho da  
perseverância e a vitória."

Wenderson S. Pire

“Algumas pessoas marcam a nossa vida para sempre, umas porque nos vão ajudando na construção, outras porque nos apresentam projetos de sonho e outras ainda porque nos desafiam a construí-los.”

Dedico este trabalho a todas as pessoas que me ajudaram nesta fase, em especial a minha mãe, meu pai, e meu marido.

## AGRADECIMENTOS

Meu agradecimento primeiramente é para cinco pessoas que amo muito.

Meu pai Élbio e a minha mãe Maria Helena, meus grandes orgulhos, a quem devo tudo que sou hoje. Obrigada por estarem sempre do meu lado, me dando apoio, carinho, amor... e principalmente por acreditarem e confiarem sempre em mim.

A minha irmã Carmem e meu irmão Regis, por terem sempre me apoiado e entendido a minha ausência.

Ao meu marido Rodrigo, pelo amor, compreensão e paciência. Te amo!

Agradeço a PUCRS pela ajuda financeira (bolsa), a CEEE, ELETROSUL, PETROBRÁS e FINEP pela infra-estrutura e material disponível para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador Adriano pela paciência, apoio e confiança. A minha co-orientadora Izete por sempre ser esta segunda mãe pra mim e sempre me ajudar com minhas dúvidas, medos... Não tenho nem palavras para agradecer a ajuda de vocês para o término deste trabalho. Obrigado de coração.

Claro que não poderia esquecer de agradecer o pessoal do NT-Solar, em especial ao Moussa, Gabriel Filomena, Juliane, Ana Paula, Eduardo, Tiago, e claro, a minha mãezona Jaqueline. Obrigada pessoal, a ajuda de vocês foi essencial.

Agradeço a duas amigonas especiais, Liana e Juliana, pelo apoio, amizade, carinho e por entenderem o porquê da minha ausência.

A toda minha família por sempre estarem torcendo por mim.

Aline Pan, mesmo longe estas sempre perto. Não poderia esquecer de ti nunca. Obrigada pelos conselhos e pelo apoio para não deixar eu nunca desistir das coisas.

Aline, Caroline, Cristiane, claro que não iria esquecer dessas figuras. Obrigada por tudo.

Aos professores presentes em minha banca de mestrado, Sandra e Henri, pela disponibilidade e pelo apoio.

## RESUMO

Os objetivos desta dissertação são comparar e analisar o *gettering* por alumínio, na estrutura  $n^+pp^+$  de células solares, depositado e difundido por diferentes técnicas sobre lâminas de silício crescido pelo método Czochralski. A região  $p^+$  foi implementada em fornos convencionais e de processamento térmico rápido, empregando dois tipos diferentes de deposição: a evaporação de alumínio em alto vácuo e a [REDACTED], [REDACTED]. Nas difusões em fornos convencionais com evaporação de alumínio, houve uma redução no tempo de vida dos portadores minoritários. Foram alcançados aumentos no tempo de vida dos portadores minoritários significativos após a [REDACTED]. Ao final do processo, valores da ordem de 180  $\mu s$  foram encontrados, correspondendo a um aumento de 240 %. Para as difusões [REDACTED], os melhores valores para os tempos de vida da ordem de 116  $\mu s$  foram encontrados para a temperatura de 750 °C, porém em média inferiores à difusão [REDACTED]. Com base nos resultados da difusão em forno convencional de alumínio evaporado, foram implementados quatro processos de fabricação de células solares com metalização por serigrafia. Nos dois primeiros testes, a eficiência máxima foi de 8,7 %, limitada pelo processo de metalização, principalmente na face posterior. Este problema foi superado nos dois últimos lotes e a eficiência média obtida em células de 4  $cm^2$  foi de 11 %. O valor máximo foi de 13,6 %, típico de células industriais com este tipo de metalização.

## ABSTRACT

The aim of this work is to compare and analyze the aluminum gettering in the  $n^+pp^+$  solar cell structure, taking into account that aluminum is deposited and diffused by different techniques in Czochralski silicon wafers. A  $p^+$  region was implemented in conventional and rapid thermal furnaces, by using two aluminum sources: from high vacuum evaporation and [REDACTED]. [REDACTED]. Wafers with evaporated aluminum diffused in conventional furnaces presented a reduction in the minority carrier lifetime. [REDACTED]. [REDACTED], the carrier lifetime achieved values as high as 180  $\mu$ s, related to a lifetime enhancement of 240 %. When [REDACTED] [REDACTED], carrier lifetime was improved and the highest value as achieved for processes at 750 °C. Nevertheless, average lifetime was lower than those obtained in wafers processed in [REDACTED]. Based on aluminum deposited by evaporation, four solar cell fabrication sequences was implemented, all of that with screen-printing metal deposition. First manufacturing sequences allowed the production of solar cells with efficiencies of 8.7%, mainly limited by the rear face metal grid. This shortcoming was eliminated in the last two batches and an average efficiency of 11% was obtained for 4 cm<sup>2</sup> cells. Best cell was 13.6% efficient, typical for industrial silicon solar cells with screen-printed metal grid.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Estrutura  $n^+pp^+$ ..... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 2. Representação da separação de cargas na fronteira entre as regiões p e n no semiconductor e do campo elétrico criado por elas. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 3. Esquema do processo de deposição de dopantes por *spin-on*. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 4. Desenho esquemático de um forno de difusão. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 5. Esquema do forno de processamento térmico rápido típico. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 6. Curva de um diodo. .... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 7. Curva característica I-V de uma célula solar. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 8. Curva I-V da célula solar com eficiência de 17%. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 9. Esquema representativo dos mecanismos de *gettering*. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 10. Esquema do equipamento de medida de tempo de vida dos portadores minoritários baseado no decaimento da fotocondutividade. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 11. (a) Irradiância incidente na amostra de silício e (b) Curva de decaimento da fotocondutividade. .... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 12. Diagrama de fases da liga alumínio-silício. . **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 13. Seqüência de fenômenos que ocorrem enquanto o alumínio se redistribui no silício. .... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 14. Esquema do sistema de formação de cristais pelo método CZ, com aquecimento a) resistivo e b) indutivo [18]. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 15. Esquema do processo FZ: a) detalhe da fusão frontal do Si por corrente induzida pela espira por RF, partindo do terminal com a semente, b) desenho esquemático do lingote completo com os suportes dos terminais [18]. .... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 16. Esquema do processo de difusão de alumínio. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 17. Evaporadora Temescal BJD2000. .... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 18. [REDACTED] **Erro! Indicador não definido.**

Figura 19. Forno convencional utilizado para realizar as difusões. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 20. (a) Forno de processamento térmico rápido e (b) detalhe da câmara de processamento. .... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 21. Tempo de vida dos portadores minoritários das lâminas de silício de 10 cm de diâmetro antes e após a difusão de alumínio evaporado e processadas no forno de difusão convencional. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 22. Tempo de vida dos portadores minoritários antes e após a difusão de [REDACTED] ..... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 23. Tempo de vida dos portadores minoritários antes e após a difusão de alumínio [REDACTED] ..... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 24. Valores do tempo de vida dos portadores minoritários do primeiro (P1) e do segundo processo (P2) com a deposição [REDACTED] **Erro! Indicador não definido.**

Figura 25. Processos A e B de fabricação de células solares. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 26. Forno de infravermelho para queima de pastas serigráficas. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 27. Características J-V das melhores células fabricadas com os processos A e B e com lâminas dos dois fabricantes. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 28. Esquema dos processos de fabricação de células C e D, com difusão de alumínio. .... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 29. Característica J-V da melhor célula do processo C e do processo D. **Erro! Indicador não definido.**

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 - Espessura da camada de alumínio difundida e recristalizada [37]. **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 2 - Tempos característicos de difusão de algumas impurezas intersticiais em uma lâmina de espessura 300  $\mu\text{m}$  [11]. **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 3 - Valores de coeficientes de segregação de vários elementos no contato entre fases sólidas e líquidas de Si [18]. ... **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 4 - Fluxo de gases, temperatura, tempo e rampas para o processo de difusão [56]. **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 5 - Rampas de temperatura para o processo de difusão no forno RTP à [57]. .... **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 6 - Custo por litro do HF e HCl para produtos com diferentes purezas. **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 7 - Tempo de vida inicial ( $\tau_0$ ) e após a difusão ( $\tau_f$ ) de alumínio utilizando dois tipos de ataques, um com HF e outro com HCl. **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 8 - Tempo de vida médio dos portadores minoritários das lâminas de silício antes ( $\tau_0$ ) e após ( $\tau_f$ ) a difusão de alumínio evaporado no forno convencional, maior valor ( $\tau_m$ ) e aumento percentual ( $A_{\text{perc}}$ ) para cada processo. .... **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 9 - Tempo de vida médio dos portadores minoritários das lâminas de silício antes ( $\tau_0$ ) e após ( $\tau_f$ ) a [57]. .... maior valor ( $\tau_m$ ) e aumento percentual ( $A_{\text{perc}}$ ) para cada processo. .... **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 10 - Tempo de vida médio dos portadores minoritários das lâminas de silício antes ( $\tau_0$ ) e após ( $\tau_f$ ) [57]. .... maior valor ( $\tau_m$ ) e aumento percentual ( $A_{\text{perc}}$ ) para cada processo. .... **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 11 - Comparação do tempo de vida médio dos portadores minoritários das lâminas de silício antes ( $\tau_0$ ) e após ( $\tau_f$ ) [57]. .... maior valor ( $\tau_m$ ) e aumento percentual ( $A_{\text{perc}}$ ) para os processos de difusão. .... **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 12 - Características elétricas médias das células solares processadas dos grupos A e B (medidas a 1000  $\text{W}/\text{m}^2$ , 25  $^\circ\text{C}$ ). **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 13 - Características elétricas das melhores células solares processadas dos grupos A e B (medidas a  $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ). **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 14 - Características elétricas médias das células solares do grupo C e D. **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 15 - Características elétricas das melhores células fabricadas do grupo C e D..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela A1- Espessura de alumínio depositado por evaporação, temperatura e tempo de difusão em um forno convencional, tempo de vida inicial e após difusão e tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) das células solares para diferentes tipos de silício. .... **Erro! Indicador não definido.**

## LISTA DE SÍMBOLOS

I	Corrente Elétrica
RTP	Forno de Processamento Térmico Rápido
BSF	Campo Retrodifusor
NT	Solar-Núcleo Tecnológico de Energia Solar.
PVD	<i>Physical Vapour Deposition.</i>
M	Massa molecular do material evaporado.
$p_e$	Pressão de vapor em torr
$I_{SC}$	Corrente de curto-circuito
$I_L$	Corrente gerada pela radiação solar
$V_{oc}$	Tensão de circuito aberto
k	Constante de Boltzmann
T	Temperatura
q	Carga do elétron
$I_0$	Corrente de saturação
$p_{max}$	Ponto de máxima potência
FF	Fator de forma
$\eta$	Eficiência
$P_{inc}$	Potência da radiação incidente
$m'$	Excesso de portadores
U	Velocidade de recombinação
$\tau$	Tempo de vida dos portadores minoritários
PCD	Decaimento da Fotocondutividade
RF	Radio Frequência
V	Tensão associada a fotocondutância da lâmina de teste
n	Densidade de portadores em excesso
$\tau_{efet}$	Tempo de vida efetivo
$\sigma_L$	Condutividade na lâmina
w	Espessura da lâmina
$\mu_n$	Mobilidade de elétrons
$\mu_p$	Mobilidade das lacunas
$J_{fot}$	Corrente de fotogeração

$\Delta n$	Densidade de portadores (elétrons)
$\Delta p$	Densidade de portadores (lacunas)
A	Área
$d_{Si}$	Densidade do silício
$w_{rec}$	Espessura da camada
F	Percentual de Si na liga líquida na temperatura do processo
E	Percentual de Si na temperatura do eutético
$W_{dif}$	Espessura da camada de alumínio difundido
C	Concentradores de segregação
$\sigma$	Coeficiente de segregação entre o Al e o Si
$C_M^L$	Concentração impureza na fase líquida
$C_M^S$	Concentração de impurezas na fase sólida
$C_s$	Concentração do material solvente na fase sólida
$C_L$	Concentração do material solvente na fase líquida
$S_n$	Entropia das impurezas na fase líquida e sólida
$H_n$	Entalpia das impurezas
W	Espessura da lâmina
$Q_E$	Quantidade de impurezas por unidade de área que é possível capturar na camada líquida
$\varepsilon$	Espessura da camada líquida de Si-Al
$C_m$	Concentração de impurezas no semicondutores
$C_o$	Concentração inicial de impurezas
CZ	Czochralski
FZ	<i>Floating Zone</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>16</b>
<b>2 A CÉLULA SOLAR .....</b>	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
2.1 Princípio de Funcionamento .....	Erro! Indicador não definido.
2.2 Campo Retrodifusor (BSF) .....	Erro! Indicador não definido.
2.3 Técnicas de Deposição de Alumínio .....	Erro! Indicador não definido.
2.3.1 Deposição por evaporação.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.3.1.1 Evaporação por aquecimento resistivo.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.3.1.2 Evaporação por aquecimento indutivo.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.3.1.3 Evaporação por feixe de elétrons .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.3.2 [REDACTED] .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.4 Fornos para Difusão de Impurezas.....	Erro! Indicador não definido.
2.4.1 Fornos convencionais.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.4.2 Fornos de processamento térmico rápido .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.5 Caracterização Elétrica .....	Erro! Indicador não definido.
2.5.1 Corrente de curto-circuito .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.5.2 Tensão de circuito aberto .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.5.3 Ponto de máxima potência .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.5.4 Fator de forma .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.5.5 Eficiência .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>3 MECANISMOS DE GETTERING.....</b>	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
3.1 Tipos de <i>Gettering</i> .....	Erro! Indicador não definido.
3.2 Tempo de Vida dos Portadores Minoritários .....	Erro! Indicador não definido.
3.3 <i>Gettering</i> por Alumínio .....	Erro! Indicador não definido.
3.4 Influência do Tipo de Crescimento de Silício .....	Erro! Indicador não definido.
3.5 <i>Co-gettering</i> com Alumínio e Fósforo .....	Erro! Indicador não definido.
<b>4 MÉTODOS DE DEPOSIÇÃO E DIFUSÃO .....</b>	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
4.1 Limpeza Química.....	Erro! Indicador não definido.
4.2 Medição do Tempo de Vida Inicial .....	Erro! Indicador não definido.

<b>4.3 Evaporação de Alumínio.....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>4.4 [REDACTED] .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>4.5 Difusão no Forno Convencional .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>4.6 Difusão no Forno de Processamento Térmico Rápido .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>4.7 Ataque do Alumínio após Difusão .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>5 DIFUSÃO DE ALUMÍNIO E <i>GETTERING</i>.....</b>	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
<b>5.1 Alumínio Evaporado e Difundido em Forno Convencional</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>5.2 [REDACTED] .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>5.3 [REDACTED] .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>5.4 Fabricação de Células Solares.....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
5.4.1 Difusão de Alumínio à 1000 °C .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
5.4.2 Difusão de Alumínio à 800 °C .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE CONTINUIDADE .....</b>	<b>20</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>

# 1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento do homem está associado, em grande parte, ao uso de diferentes fontes de energia, dependendo da disponibilidade de cada momento e lugar.

A nossa sociedade é altamente dependente de energia, desde o carro ou ônibus usado para ir ao trabalho até o rádio e a televisão que informa as notícias. De certa forma, o desenvolvimento das tecnologias e a qualidade de vida estão relacionados com a disponibilidade de energia.

A energia elétrica, sem dúvida, é um vetor de desenvolvimento social e econômico de um país mas, infelizmente, nem todos têm acesso. Famílias com baixa renda e que habitam localidades de menor índice de desenvolvimento humano são as mais prejudicadas. Cerca de 90% dessas famílias têm renda inferior a três salários-mínimos e 80% estão no meio rural [1].

A produção de energia elétrica envolve compromissos sociais, econômicos, políticos e ambientais. A decisão sobre qual das fontes utilizar para produzi-la não deve ser somente de políticos, cientistas e ambientalistas, mas sim deve ser tomada pela sociedade como um todo.

Atualmente, a sociedade brasileira necessita um aumento na oferta de energia. Somado a este fato, ocorre o uso desnecessário da energia, fazendo com que a tendência se volte às novas formas de produção de energia. Além disso, a preocupação com o meio ambiente faz com que a busca de fontes de energia mais limpas seja necessária para a amenização dos problemas ambientais.

Com os recursos petrolíferos cada vez mais próximos da extinção e a crescente necessidade de energia, a sociedade deve estar atenta para a utilização de fontes de energia renováveis e alternativas.

Atualmente, o planeta Terra está sofrendo um grande caos climático devido a alta liberação de gás carbônico. E o que o futuro nos reserva? Como o jovem de hoje vai conviver com as conseqüências dramáticas do efeito estufa antes mesmo de ficar velho? São justamente estes jovens que tem nas mãos o poder de reverter o cenário que se anuncia, reduzindo as emissões de gases que provocam o aquecimento global, em especial o gás carbônico. Isso depende basicamente de

tecnologia e de novas políticas governamentais, mas se cada um fizer sua parte, podemos mudar este quadro. No Brasil a relação entre gasto de eletricidade e emissão de gás carbônico não é tão direta como nos Estados Unidos, por exemplo, cuja principal fonte de eletricidade são as termelétricas. De qualquer maneira, vale a pena investir em energias renováveis [2].

Na atualidade, as fontes de energia renovável destacam-se devido ao esgotamento de recursos fósseis e também aos problemas ambientais causados por estes últimos, como por exemplo, a alta liberação de gás carbônico no mundo, ocasionando o efeito estufa.

Dentre as energias renováveis, a solar mostra-se como uma grande alternativa, pois sua fonte é o Sol. Este astro é uma fonte de energia silenciosa, gratuita e não poluente e é responsável por todas as formas de vida do planeta. Esta mesma fonte pode proporcionar energia para aquecer e resfriar nossas casas, para produzir energia elétrica ou para aquecer a água para o uso doméstico. É renovável e inesgotável, isto é, não depende de reservas naturais formadas a milhões de anos. Seu uso pode ser direto ou indireto.

Mais um ponto favorável ao uso da energia solar no Brasil são os altos índices de radiação solar de norte a sul, e que o País estará, em breve, seguindo uma orientação de política energética similar à dos países desenvolvidos, baseada na gestão plural. “A visão monoenergética saiu de cena a partir dos anos 70 e, nos últimos 30 anos, firmou-se a estratégia de diversificação da matriz energética, que contempla todas as formas de energia, porque nenhuma se mostrou, em termos econômicos, significativamente superior às outras. Se o Brasil tem pretensões de se manter como nação importante no mundo em termos energéticos, seria razoável considerar esta visão”, afirma a economista Carmem Alveal [3].

Podemos obter diretamente energia elétrica a partir da energia do Sol, por meio de dispositivos semicondutores capazes de converter a energia solar incidente em corrente elétrica e tensão, denominados células solares. As células solares, são fabricadas num substrato de material semicondutor, usualmente o silício, que é o material mais abundante na superfície terrestre, depois do oxigênio. O silício é obtido a partir do quartzo, matéria-prima usada na fabricação do vidro, das fibras ópticas e silicone. Purificado e transformado em lâminas, é o material básico para fabricação de células solares.

O princípio físico de funcionamento da célula solar é o efeito fotovoltaico. Ao incidir radiação solar (fótons) nestes dispositivos, os fótons são absorvidos pelo material criando pares elétron–lacuna, isto é, um elétron absorve energia e rompe-se a ligação, tornando-se livre para viajar pelo material. Esta ligação rompida é denominada de lacuna. Estes elétrons e lacunas podem mover-se dentro do material, mas para extrair uma corrente elétrica é necessário introduzir um campo elétrico a fim de separá-los. Isto é possível através da formação de uma junção pn. Para obter uma junção pn é necessário introduzir impurezas no material básico, ou seja, realizar uma dopagem [4].

Para seu emprego prático, as células solares são geralmente associadas em série e encapsuladas. O conjunto de células, conexões e estrutura de proteção denomina-se módulo fotovoltaico, que consiste num dispositivo para a transformação de energia solar em energia elétrica [4].

O problema principal que impede uma maior expansão desta tecnologia é o econômico, pois necessita-se de um grande investimento inicial e a mesma não é subsidiada, como outras formas de energia.

Esta dissertação tem como objetivo, comparar e analisar o *gettering* por alumínio, na estrutura  $n^+pp^+$  de células solares, depositado e difundido por diferentes técnicas sobre lâminas de silício crescido pela técnica Cz. Será comparado o *gettering* por alumínio depositado em evaporadoras e difundido em fornos convencionais com o *gettering* proporcionando quando [REDACTED]

No Capítulo 2 apresentam-se tópicos sobre o processamento, funcionamento e caracterização da célula solar. Os fornos de difusão convencional e de processamento térmico rápido e as técnicas de deposição de alumínio por evaporação e por [REDACTED] também estão descritos neste capítulo.

Uma revisão dos processos de *gettering*, de *gettering* por alumínio e de *co-gettering* por fósforo e alumínio em silício Cz é resumida no Capítulo 3.

O Capítulo 4 descreve a metodologia adotada para os processos de difusão de alumínio em fornos convencionais e de processamento térmico rápido, depositado por evaporação em alto vácuo e por [REDACTED].

No Capítulo 5 são apresentados e analisados os valores experimentais do tempo de vida dos portadores minoritários obtidos antes e após as difusões de alumínio, bem como a fabricação das células solares com alumínio evaporado.

Finalizando este trabalho, no Capítulo 6 são discutidos os resultados mais relevantes bem como sugestões para continuidade do mesmo.

## 2 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE CONTINUIDADE

Os objetivos desta dissertação foram comparar o *gettering* por alumínio, na estrutura n<sup>+</sup>pp<sup>+</sup> de células solares, depositado e difundido por diferentes técnicas sobre lâminas de silício Czochralski tipo p. Foi comparado o *gettering* por alumínio depositado por evaporação e difundido em fornos convencionais com o *gettering* proporcionado quando [REDACTED]

Foram implementados processos de difusão com diferentes temperaturas e tempos para todos os tipos de difusão. Na difusão de alumínio depositado por evaporação não foram obtidos resultados satisfatórios. Em todos os processos, houve uma redução no valor do tempo de vida dos portadores minoritários e em alguns casos, a redução foi de 75 %. A partir dos resultados observou-se que quanto maior o tempo de difusão, maior a redução do tempo de vida dos portadores minoritários. As duas melhores temperaturas para este tipo de difusão foram de 800 °C e 1000 °C, porém o tempo de vida após a difusão foi da ordem de 30 μs.

Na difusão de alumínio depositado [REDACTED] obtiveram-se ótimos resultados. Constatou-se que este tipo de processo foi eficaz no que se refere ao *gettering*. A melhor temperatura e tempo de difusão foi [REDACTED], no qual o aumento do tempo de vida foi de 240% com valor médio final, para dez amostras, de 180 μs. Neste caso, um percentual das impurezas existentes nas lâminas antes do processamento e as introduzidas durante o processo foram coletadas e neutralizadas.

Na difusão em forno de processamento térmico rápido obtiveram-se valores muito baixos para temperaturas de difusão acima de 900 °C e o tempo de vida dos portadores minoritários praticamente não se alterou para as temperaturas de 800 °C, 850 °C e 900 °C. Para estas temperaturas somente ocorre um aumento de 100 % para 800 °C e 1 minuto. Na temperatura de difusão de 750°C houve um aumento significativo de 220 % no tempo de vida, com o valor médio final de 116 μs, podendo-se afirmar que para esta temperatura o *gettering* é eficaz.

Cabe comentar que o comportamento dos processos de *gettering* depende muito do tipo de substrato e do tipo de impureza existente nesse substrato e,

conseqüentemente, os resultados encontrados na bibliografia variam bastante. ■

Após a análise da região p<sup>+</sup> das lâminas, foram fabricados lotes de células solares com fósforo na face frontal, com fonte dopante de POCl<sub>3</sub>, difundido em forno convencional a uma temperatura de 850 °C por 30 minutos. Para formar a região p<sup>+</sup>, foi evaporado alumínio na face posterior e difundido em forno convencional. Optou-se em fabricar células com esta técnica por ser a mais utilizada na indústria de células solares. As temperaturas para a difusão de alumínio evaporado foram selecionadas a partir dos resultados obtidos na análise do *gettering* das lâminas com este tipo de deposição. Os processos A e B foram implementados na maior temperatura e os processos C e D correspondem a temperatura de 800 °C.

Nos primeiros dois lotes, a melhor eficiência obtida foi de 8,7 % limitada pelo fator de forma. As lâminas do grupo B, com a metalização de alumínio em toda a face posterior, foram as que apresentaram as melhores eficiências. Os valores de tensão de circuito aberto foram os esperados devido aos baixos valores de tempo de vida dos portadores minoritários no final do processo.

Nos grupos de células C e D, o processo de metalização foi melhorado. A eficiência média das células solares aumentaram de 5 % para 11 %, devido ao aumento do fator de forma. A melhor eficiência das células, 13,6 %, é similar a média das células solares industriais.

Como continuidade deste trabalho sugere-se a análise das rampas de subida e descida de temperatura durante o processo de difusão, em fornos convencionais, de alumínio evaporado. Alguns autores verificaram a necessidade de rampas mais rápidas para obter melhor *gettering* com alumínio evaporado. Outra sugestão é desenvolver um processo para fabricação de células solares com alumínio ■

■, a baixas temperaturas. Também sugere-se avaliar o *gettering* para temperatura de difusão inferior a 750 °C no forno de RTP.



# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)