Eficiência de Semicondutores na Conversão Fotovoltaica

Helmut M. S.; Willames A. Soares; Carlos A. B. Almeida.
Departamento Energia Nuclear
Universidade Federal de Pernambuco
Av. Prof. Luiz Freire, 1000.
helmutmuniz@yahoo.com.br

Resumo: *A energia solar constitui uma fonte energética alternativa e renovável imprescindível a uma relação mais equilibrada entre a humanidade e a natureza. Empregando células solares, a energia soarl pode ser transformada diretamente em eletricidade. Esse princípio de conversão direta é denominado efeito fotovoltaico e sua aplicação implica vantagens como segurança, simplicidade e baixos níveis de poluição em relação às outras formas de conversão. A eficiência das células fotovoltaicas representa um parâmetro determinante para sua viabilidade. Sob condições específicas de iluminação e temperatura, realizou-se uma modelagem computacional do comportamento dos parâmetros externos (corrente, tensão e eficiência) de células fotovoltaicas por intermédio de um programa desenvolvido em linguagem de programação FORTRAN, no qual tais parâmetros foram calculados em função da energia da banda proibida característica dos materiais. Avaliou-se o rendimento apresentado por quatro semicondutores distintos: germânio (Ge), disseleneto de cobre índico ($CuISe_2$), silício (Si) e silício amorfo hidrogenado (a-Si:H). Os resultados obtidos pela metodologia aplicada para o cálculo da máxima eficiência produzida demonstraram uma concordância bastante aceitável com as informações disponíveis na literatura. Embora o silício não apresente o melhor rendimento, sua disponibilidade natural e seu custo perante os demais semicondutores o tornam o material mais empregado na produção de células fotovoltaicas.*

Palavras-chave: Conversão Fotovoltaica; Semicondutores; Eficiência; FORTRAN, Silício.

Introdução

Desde o domínio do fogo até os processos mais modernos de produção de energia, o desenvolvimento da humanidade sempre foi profundamente associado à disponibilidade dos recursos energéticos. Contudo, devido a questões ambientais, a atualidade demanda um novo direcionamento para tais aspectos. Neste sentido, o estabelecimento de fontes alternativas de energia e a reavaliação do consumo por parte das sociedades constituem parâmetros imprescindíveis para a conservação da Natureza [1].

Em relação ao uso de energia solar através da conversão fotovoltaica, processo conhecido desde meados do Século XIX, os níveis de rendimento atingiram a ordem de 30% no início desta década, e já ultrapassam 40%, devido ao desenvolvimento de novas tecnologias [2,3]. A análise de materiais em relação à eficiência e custos de conversão mostra que a geração fotovoltaica apresenta viabilidade em diversas regiões do Planeta, incluindo a região do semi-árido brasileiro onde valores característicos de irradiância atingem 250W/m2 [4,5]. Quanto ao custo, os módulos fotovoltaicos apresentaram, nas últimas três décadas, decréscimo maior que 80%, atingindo 3,75 US$/Wp no final do ano 2000 [6].

Portanto, é de suma importância conhecer os limites de conversão proporcionados por materiais a serem utilizados em células fotovoltaicas. Neste trabalho, foram calculados os valores máximos para a eficiência de alguns materiais semicondutores, considerados ideais, sob condições específicas de iluminação e temperatura.

Metodologia

A análise do fluxo de portadores de carga na região de depleção de uma célula fotovoltaica, através da teoria de difusão, mostra que para um diodo ideal a intensidade da corrente gerada (I) e a tensão (V) aplicada entre os terminais da junção sem iluminação relacionam-se pela seguinte expressão:

$$I = I_0(T)\left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right] \qquad (1)$$

em que: $I_0(T)$ é denominada corrente de saturação, cujo valor é intrínseco ao material que constitui a junção; q é a quantidade de carga; k é a constante de Boltzmann e T a temperatura ambiente [7].

A partir da incidência da luz do sol sobre células fotovoltaicas surge um fluxo de portadores de carga entre os terminais da junção, produzindo uma corrente elétrica I_L denominada fotocorrente. Como, em boa aproximação, as células solares obedecem ao princípio da superposição, a eq. 1 pode ser rescrita como:

$$I = I_L - I_0(T)(e^{qV/kT} - 1) \qquad (2)$$

A descrição do funcionamento de uma célula fotovoltaica, através da relação entre voltagem e a fotocorrente geradas pelo dispositivo, caracteriza-se pela determinação dos seguintes parâmetros: a corrente de curto circuito (I_{sc}), a tensão de circuito aberto (V_{oc}) e o fator de forma (FF).

Sob condições especificas de iluminação e temperatura, foram avaliados os resultados do rendimento obtido de células fotovoltaicas constituídas por quatro materiais semicondutores considerados ideais: o germânio (Ge), o disseleneto de cobre índico ($CuISe_2$), o silício (Si) e o silício amorfo hidrogenado (a-Si:H).

Na avaliação da capacidade de geração fotovoltaica de uma célula fotovoltaica, a incidência da radiação solar e a temperatura de operação são fatores extremamente importantes. Entretanto, podem-se adotar valores padrões para as referidas grandezas com o intuito de se observar a influencia de outros parâmetros relevantes. Quanto à radiação incidente, sua intensidade é determinada pelo grau de atenuação causado pela atmosfera terrestre à constante solar, definida como massa de ar (a_m), dada por:

$$a_m = \frac{1}{\cos z} \qquad (3)$$

sendo z o ângulo formado entre o raio de luz incidente sobre a célula e a vertical. Neste trabalho foi considerada a incidência a da luz solar sob inclinação zenital de aproximadamente 48º ($4\pi/15$ rad). Tal valor acarreta numa massa de ar igual 1.5. Com relação à temperatura, as células foram consideras sob um valor constante e igual à temperatura ambiente, ou seja, 300K [8].

Avaliou-se, então, a capacidade de geração fotovoltaica das células em função da energia da banda proibida (E_g) (gap) característica do material semicondutor que constitui o dispositivo. A partir da relação de Planck obtém-se que a energia mínima absorvida por uma junção *p-n* para o aparecimento da fotocorrente é dada pela expressão:

$$E_g = hc/\lambda_g \qquad (4)$$

sendo λ_g o comprimento onda correspondente a mínima energia necessária ao fóton para atingir a banda de condução. O valor da máxima fotocorrente gerada é obtido pelo produto da carga elétrica fundamental (q) pela integração da função de distribuição do fluxo de fótons, representada na figura 1, a qual é determinada a partir da densidade média de potência do espectro solar e da energia de cada fóton, desde pequenos valores de comprimento de onda até λ_g.

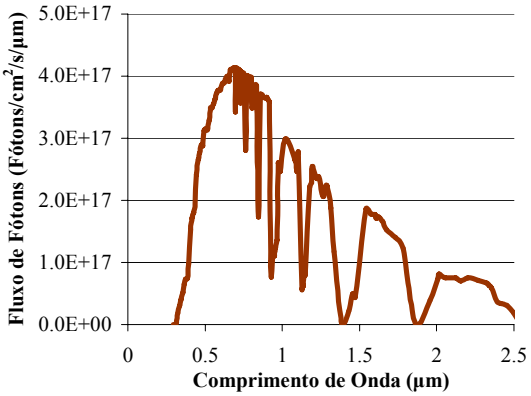

Figura 1: Fluxo de fótons para massa de ar 1,5.

Portanto, para um determinado comprimento de onda λ, o fluxo de fótons Φ(λ) produzido na junção p-n é determinado pela razão entre a irradiância e a energia da banda proibida, donde se pode obter a seguinte expressão para a fotocorrente:

$$I_L = \frac{10^{-10}}{hc} q \int_{\lambda_0}^{\lambda} \Phi(\lambda) d\lambda \qquad (5)$$

onde h é a *constante de Planck* e c é a *velocidade da luz*.

Devido à natureza empírica da relação entre o fluxo de fótons e o comprimento de onda, a integral presente na equação (6) deve ser resolvida numericamente. Como para a massa de ar 1,5 tem-se uma potência de entrada de 84,2 mW/cm^2, e sendo λ_0 = 0,295 µm, determinou-se, assim, o valor da máxima corrente de saturação em função da energia da banda proibida, conforme descreve a figura 2.

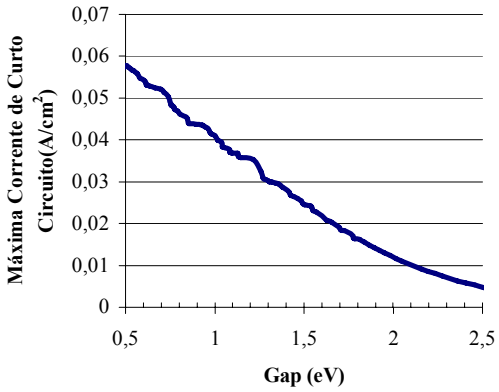

Figura 2: Limite máximo da corrente de curto-circuito.

Com efeito, isto corresponde a obter o valor da fração de energia f do espectro absorvida pela célula fotovoltaica durante o processo. Na Tabela I estão listados os materiais a serem avaliados com seus respectivos valores de energia da banda proibida e de

comprimento de onda máximo, bem como a fração de energia absorvida e a máxima fotocorrente produzida.

Tabela I: Características dos semicondutores avaliados.

Semicondutor	E_g, eV	λ_g, µm	f	I_L, mA/cm^2
Ge	0,68	1,82	0,92	52
$CuISe_2$	1,04	1,19	0,78	39
Si	1,10	1,13	0,74	37
a-Si:H	1,68	0,74	0,51	20

Como a descrição real do fenômeno fotovoltaico ainda necessita de alguns esclarecimentos, o tratamento matemático aplicado ao problema faz uso de algumas aproximações, considerando, assim, os semicondutores avaliados sob condições ideais.

Uma equação empírica que descreve os valores para a corrente de saturação como função do gap do material semicondutor com resultados aceitáveis é a expressão:

$$I_0 = 1,5\mathbf{x}10^5 \exp(-\frac{E_g}{kT}) \qquad (6)$$

Com isso, a tensão de circuito aberto (V_{oc}) para um semicondutor ideal será determinada pela equação:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q}\ln(\frac{I_L}{I_0(T)}+1) \qquad (7)$$

De modo análogo, adotando-se uma tensão de circuito aberto $v_{oc,}$ normalizada por kT/q, com valores superiores a dez, o fator de forma pode ser obtido com aproximação considerável a partir da equação:

$$FF = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc}+0,72)}{v_{oc}+1} \qquad (8)$$

Finalmente, o rendimento de cada semicondutor foi avaliado como função da potência da irradiância incidente sobre a célula de acordo a equação (9):

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \qquad (9)$$

Resultados

A partir dos valores específicos das bandas de energia proibida de cada um dos materiais estudados, foram determinados os valores da corrente de saturação, da tensão de circuito aberto, do fator de forma e do rendimento obtidos para os materiais sob avaliação. A figura 3 mostra o comportamento do rendimento dos materiais em função da energia da banda proibida.

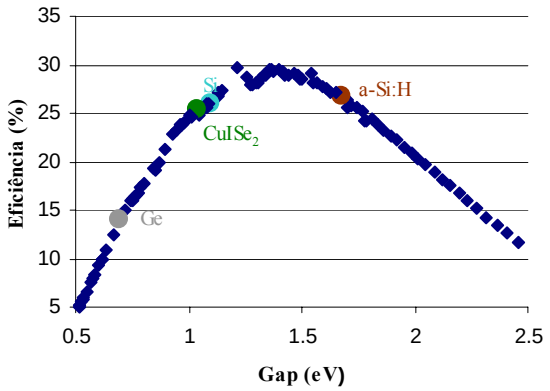

Figura 3: Eficiência máxima em função do gap.

A Tabela II relaciona os valores obtidos para as grandezas determinadas pelas equações (6), (7), (8) e (9) para os semicondutores avaliados.

Tabela II: Grandezas características dos semicondutores.

Semicondutor	I_0, mA/cm^2	V_{oc}, V	FF	η_o, %
Ge	$2,90\times10^{-7}$	0,31	0,73	14,06
$CuISe_2$	$4,78\times10^{-13}$	0,65	0,84	25,40
Si	$5,26\times10^{-14}$	0,70	0,84	26,06
a-Si:H	$9,32\times10^{-24}$	1,27	0,90	26,75

Já a Tabela III apresenta uma comparação percentual entre os resultados obtidos e os tomados na referência [7].

Tabela III: Comparação entre resultados obtidos e da referência.

Semicondutor	η_o, %	η_R, %	$\Delta\eta$, %
Ge	14,06	13,85	1,52
$CuISe_2$	25,40	25,75	1,12
Si	26,06	26,55	1,84
a-Si:H	26,75	27,65	3,25

Conclusões

O aspecto não monotônico da eficiência de conversão fotovoltaica de células monojunção em relação à energia da banda proibida demonstra a presença de um valor máximo, de acordo a energia da banda proibida característica, compreendido entre 1,20 e 1,55eV, privilegiando, assim, a utilização de materiais com gap nessa faixa de energia.Como os níveis de tensão são proporcionais à diferença da energia do gap e os níveis de corrente são proporcionais ao número de elétrons disponíveis à faixa de condução, escolher um gap de energia implica

estabelecer um equilíbrio entre altas tensões (gap de alta energia) ou correntes elevadas (gap da baixa energia).

Os resultados obtidos pela metodologia aplicada demonstraram uma concordância bastante aceitável com as informações disponíveis na literatura utilizada como referência bibliográfica no desenvolvimento deste texto. Embora o silício simples não apresente o melhor rendimento, sua disponibilidade natural e seu custo perante os demais semicondutores o constituem como o material mais empregado na produção de células fotovoltaicas.

Referências

1. OLIVEIRA, A. **Energia e Sociedade.** In: Ciência Hoje, v. 5, n. 29, p. 30-38, 1987.

2. GREEN, M. A. **Silicon solar cells: evolution, high efficiency design and efficiency enhancements.** Semiconductors Science and Technology, v. 8, p. 1-12, 1993.

3. GREEN, M. A. **Prospects for photovoltaic efficiency enhancement using low-dimensional structures.** Nanotechnology, v. 8, p.401-405, 2000.

4. SAHA, A., MEIER, J., TSCHAMER, R. AND WYRSCH, N. **Photovoltaic power generation.** Plasma Physics and Controlled Fusion, v. 34, n. 13, p.1837-1844, 1992.

5. FRAIDENRAICH, N. e LYRA, F. **Energia Solar: fundamentos e tecnologia de conversão heliotérmica e fotovoltaica.** Recife: Ed. Universitária da UFPE, 1995.

6. FRAIDENRAICH, N. ET AL. Energia solar fotovoltaica. In: TOLMASQUIM, M. T. (Org.). **Fontes renováveis de energia no Brasil.** Rio de Janeiro: Interciência: CENERGIA, 2003.

7. GREEN, M. A. **Solar cells**. London: Prentice-Hall, Inc, 1982.

8. DUFFIE, J. A. and BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes.** New York: Wiley-Interscience, 2ª ed., 1991.