

SIMULAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS DIFERENTES TIPOS DE DOPANTES NO COMPORTAMENTO DA HOMOJUNÇÃO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS BASEADAS EM SILÍCIO.

Fernando Barbosa Matos

José Roberto Camacho

Universidade Federal de Uberlândia

Faculdade de Engenharia Elétrica

Laboratório de Eletricidade Rural e Fontes Alternativas de Energia

CEP 38408-100, C.P. 593, Uberlândia – MG - Brasil

e-mail: nando.cefet@gmail.com

e-mail: jrcamacho@ufu.br

Resumo - As propriedades físicas das células fotovoltaicas baseadas em silício (Si) sofrem influência dos componentes utilizados na composição dos semicondutores tipo N e tipo P. Essa influência se manifesta principalmente no comportamento da camada de depleção. Desta forma é possível observar neste trabalho que as alterações dos dopantes utilizados irão afetar tanto a barreira potencial, quanto o comprimento da camada de depleção, modificando a corrente reversa de saturação e a tensão em circuito aberto, como também as características de tensão e corrente da célula.

Palavras-Chave – Energia Fotovoltaica, Energia Solar, Junção PN, Modelo Computacional.

SIMULATION OF THE INFLUENCE OF DIFFERENT DOPING TYPES IN THE HOMOJUNCTION BEHAVIOR OF SILICON BASED PV CELLS

Abstract – The physical properties of photovoltaic cells based on silicon (Si) have great influence of components used in the formation of type N and P semiconductors. That influence is revealed mainly in the behavior of the layer depletion. Therefore, it is possible to follow in this work that the change of doping used will affect both the potential barrier, as the length of the layer depletion, modifying the reverse current saturation and the open circuit voltage, as well the cell voltage and current characteristics.

Keywords – Computer Modeling, Photovoltaic Energy, PN Junction, Solar Energy.

NOMENCLATURA

Al Alumínio

As Arsênio

Artigo submetido em 15 de maio de 2008; primeira revisão em 22 de setembro de 2008; segunda revisão em 12 de novembro de 2008. Recomendado para publicação pelos Editores da Seção Especial, João Carlos dos Santos Fagundes e Felix Alberto Farret.

B	Bóro
Ga	Gálio
In	Índio
P	Fósforo
Sb	Antimônio
Si	Silício
v_{bi}	Barreira de Potencial (Volts)
k	Constante de Boltzmann (Volt.Coulomb/Kelvin)
T	Temperatura (Kelvin)
q	Carga do Elétron (Coulombs)
N_a	Concentração dos dopantes aceitadores (átomos/cm ³)
N_d	Concentração dos dopantes doadores (átomos/cm ³)
n_i	Concentração intrínseca (átomos/cm ³)
W_n	Comprimento da camada de depleção do lado N
ϵ	Permissividade (N ⁻¹ .m ⁻² .C ²)
v	Carga externa na qual a célula solar está conectada
W_p	Comprimento da camada de depleção do lado P
I_0	Corrente reversa de saturação (Ampéres)
A	Área da célula fotovoltaica (cm ²)
D_n	Coefficiente de difusão dos Elétrons
D_p	Coefficiente de difusão das lacunas
τ_n	Tempo de vida dos portadores minoritários no lado N (segundos)
τ_p	Tempo de vida dos portadores minoritários no lado P (segundos)
L_n	Comprimento percorrido pelos portadores minoritários no lado N (nm)
L_p	Comprimento percorrido pelos portadores minoritários no lado P (nm)
I_{tp}	Fotocorrente produzida no semicondutor tipo P (ampéres)
I_{tn}	Fotocorrente produzida no semicondutor tipo N (ampéres)
F_{ph}	Quantidade de fótons incidentes por cm ²
α	Constante de absorção dos materiais
S_p	Velocidade de recombinação superficial no lado P (cm/s)
S_n	Velocidade de recombinação superficial no lado N (cm/s)
I_t	Fotocorrente total (ampéres)
I_{tn}	Fotocorrente gerada no lado N (ampéres)
I_{tp}	Fotocorrente gerada no lado P (ampéres)
V_{oc}	Tensão em circuito aberto (Volts)
I_0	Corrente de curto circuito

I. INTRODUÇÃO

Um semicondutor puro, sem adição de impurezas, é chamado de semicondutor intrínseco. Nesse tipo de semicondutor, o número de elétrons e de lacunas é o mesmo, pois eles são gerados aos pares pela agitação térmica para temperaturas acima de zero Kelvin.

Quando certas impurezas são adicionadas ao semicondutor de forma controlada, esse semicondutor é denominado como dopado ou extrínseco. Impurezas de elementos químicos das colunas III-A e V-A da tabela periódica constituem dopantes para semicondutores elementares como o Silício (Si). A adição de impurezas em um semicondutor altera a taxa de criação de elétrons e lacunas.

Ao serem adicionadas concentrações de impurezas da coluna V-A da tabela periódica, por exemplo, à rede cristalina do (Si), o átomo da impureza é de valência cinco, por tanto terá um elétron em excesso que não tem como formar um par de ligações covalentes. Este quinto elétron, sem formar par de ligações químicas, ficará fracamente ligado ao seu átomo, sendo facilmente liberado com pouca adição de energia tornando-se um elétron livre do cristal. Assim este elétron passa para a banda de condução do cristal, aumentando a concentração de elétrons.

Portanto com o aumento da concentração de elétrons, tem-se como resultado um aumento na taxa de recombinação dos portadores e conseqüentemente, uma redução na concentração das lacunas. Os elétrons se tornaram portadores majoritários e as lacunas, portadores minoritários.

Como a condução elétrica deste material será feita predominantemente por cargas negativas (elétrons), o mesmo será chamado de material tipo N (de negativo). A impureza da coluna V-A, que liberou o seu quinto elétron, é chamada de doadora, por ter “doado” um elétron. Como dopantes doadores para (Si) tem-se os seguintes elementos: Fósforo (P), Arsênio (As) e Antimônio (Sb). O átomo doador, após doar seu quinto elétron, transforma-se num íon de carga +q. A criação destes íons positivos é concomitante com a geração equivalente de elétrons de carga negativa na banda de condução, de forma que a neutralidade de cargas do material é preservada.

No semicondutor tipo P um processo parecido ocorre, pois são adicionados elementos da coluna III-A da tabela periódica, denominados aceitadores de elétrons. Por terem apenas três elétrons eles favorecem a captura de um elétron livre na rede cristalina do silício (Si) tornando as lacunas como portadoras majoritárias. Para o semicondutor tipo P, os principais dopantes são o Boro (B), Alumínio (Al), o Gálio (Ga) e o Índio (In)

Cada um desses dopantes (seja para o semicondutor tipo N ou tipo P) altera as propriedades físicas da célula fotovoltaica de uma maneira particular, pois diversos fatores são alterados, como por exemplo, a própria concentração intrínseca do silício (Si), modificando principalmente as características de funcionamento da homojunção.

O tipo de dopante utilizado vai influenciar também na energia GAP (a energia necessária para a transição da banda de valência para a banda de condução) do semicondutor. Essa energia representa a distância entre a camada de valência e a camada de condução. No caso do silício (Si) essa

diferença é de 1,12 eV (elétron-volts). Cada dopante diminui o valor dessa energia GAP tanto no semicondutor tipo N quanto no semicondutor tipo P. A Tabela I apresenta o valor de energia introduzido por cada dopante, ou seja, o valor que é diminuído da energia GAP.

TABELA I
Valor de energia introduzido por cada tipo de dopante

Elemento	Semicondutor Tipo N (eV)	Semicondutor Tipo P (eV)
Arsênio (As)	0,054	--
Antimônio (Sb)	0,039	--
Fósforo (P)	0,045	--
Bóro (B)	--	0,045
Alumínio (Al)	--	0,067
Gálio (Ga)	--	0,072
Índio (In)	--	0,16

Quanto maior a energia do dopante, menor será a energia necessária para retirar um elétron da camada de valência e lançá-lo na camada de condução.

A homojunção ou junção PN é a região de maior importância para uma célula fotovoltaica, pois é essa região a responsável pela efetiva geração e condução de corrente elétrica a partir da absorção da luz. Essa junção ocorre quando um semicondutor base é dopado de um lado por um doador de elétrons se tornando um semicondutor do tipo N e por outro lado por um aceitador de elétrons formando um semicondutor do tipo P [1].

Geralmente as células baseadas na homojunção são células simples com apenas um semicondutor do tipo N e outro do tipo P, e são utilizadas para a absorção de uma faixa específica do espectro solar [2]. A adição de dopantes favorece o aumento do número de elétrons no semicondutor tipo N e de uma escassez de elétrons no semicondutor tipo P (excesso de lacunas) o que promove a geração de corrente elétrica a partir a luz solar, [3].

Ao entrarem em contato as faces dos semicondutores tipo N e P, ocorre a tendência de equilíbrio entre a concentração desses portadores próximos da junção [4]. Essa redistribuição dos portadores ocorre em torno do nível Fermi do semicondutor. Esse processo se estende por certo comprimento para o lado do semicondutor tipo N e do semicondutor tipo P. Assim na vizinhança da junção PN um dipolo é formado, consistindo em doadores íons positivos no lado N e de aceitadores íons negativos no lado P. O dipolo gerado forma um campo elétrico no qual conduz o elétron da camada de condução para o semicondutor tipo N e a lacuna da camada de valência para o semicondutor tipo P conforme a Figura 1.

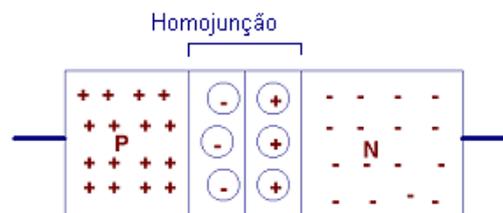


Fig. 1. Representação da homojunção

O dipolo estende-se de ambos os lados da junção, formando uma região denominada camada de depleção, essa

junção PN forma um capacitor, constituído de regiões de condução e regiões onde a camada de depleção funciona como um isolante [5].

A compreensão do funcionamento da homojunção a partir das características físicas de construção da célula solar e dos parâmetros de utilização da mesma se justifica pelo fato da homojunção influenciar tanto a fotocorrente como a corrente intrínseca ou corrente reversa de saturação, entre outros parâmetros da célula.

A simulação por computador desse comportamento baseado num modelo matemático é uma das principais ferramentas para se compreender seu funcionamento.

II. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Na homojunção existe um potencial elétrico que impede a livre passagem dos elétrons para o semiconductor tipo N e de lacunas para semiconductor tipo P, essa barreira é denominada barreira de potencial.

A Equação (1) apresenta o valor da barreira de potencial ou potencial interno da junção *pn* (homojunção) [6].

$$v_{bi} = \left(\frac{k.T}{q} \right) \cdot \ln \left(\frac{N_a \cdot N_d}{n_i^2} \right) \left[\frac{\text{Volts.C}}{\frac{K}{C}} \right] \quad (1)$$

v_{bi} é dado em Volts.

O valor da barreira de potencial é dependente da temperatura do sistema. Quanto mais baixa é a temperatura da célula, melhor é seu desempenho, pois irá diminuir a recombinação de elétrons e lacunas por meio da agitação térmica. As concentrações das impurezas adicionadas para formar os semicondutores tipo P e tipo N (concentração de impurezas aceitadoras (N_a) e doadoras (N_d)) está por volta de 5×10^{14} átomos por cm^2 em impurezas doadoras e de 1×10^{13} átomos por cm^2 em aceitadoras para células comerciais. A mudança nessas concentrações também influencia no desempenho da mesma. Já a concentração intrínseca do semiconductor base da célula solar (n_i), no caso do silício (Si) é de $5,18 \times 10^{10}$ átomos por cm^2 . A Equação 1 mostra a ligação do comportamento da homojunção e as propriedades físicas de construção da célula fotovoltaica e dos parâmetros de utilização.

A modificação dos tipos de dopantes, não somente alteram sua concentração em cada semiconductor (tipo P ou tipo N), mas também influencia a concentração intrínseca do silício (Si). Se ambos os semicondutores tipo N e tipo P não estiverem excessivamente dopados, a região de depleção irá se estender significativamente em ambos semicondutores. Assim a aplicação de uma pequena corrente reversa, implicará na migração desses portadores para a junção [7].

Quando uma tensão V é aplicada de forma direta sobre a homojunção, há um incremento de sua capacitância. Quando a tensão V é aplicada de forma reversa, a capacitância diminui. Assim como existe uma capacitância, existe um campo elétrico ξ na junção PN.

A Equação 2 informa o comprimento da camada de depleção no material tipo N baseado na concentração de impurezas e do potencial interno [8].

$$W_n = \left[\frac{2 \cdot \epsilon \cdot N_a}{q \cdot N_a \cdot (N_a + N_d)} \right]^{1/2} \cdot (v_{bi} - v)^{1/2} \left[\frac{C^2 \cdot \text{atomos}}{N \cdot m^2 \cdot 10^{-2} \cdot m^2} \right]^{1/2} \cdot (\text{Volts})^{1/2} \quad (2)$$

W_n é dado em nanômetros.

Quanto maior essa camada, maior é a probabilidade de uma lacuna gerada pela formação de um par elétron-lacuna a partir da colisão de um átomo com um fóton, chegar à camada de depleção e ser lançada para o semiconductor tipo P.

Assim pode-se observar que o comprimento da camada de depleção (W_n) é dependente da barreira de potencial (v_{bi}) e das concentrações das impurezas (N_a) e (N_d) e também da permissividade do material (ϵ) que no silício é de $11,7$ ($\text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^2$). O parâmetro (v) em volts é relativo à carga aplicada na célula solar, sendo esse valor igual a zero se a célula solar está atuando em vazio. Logo se pode observar que o comportamento da célula fotovoltaica terá seu desempenho variado a partir da carga a qual a mesma estiver submetida.

Da mesma forma pode-se deduzir a equação que irá modelar o comprimento da camada de depleção no semiconductor tipo P. Esta equação simula a geração de elétrons pela formação de par elétron-lacuna a partir da colisão de um átomo com um fóton, que chega à camada de depleção e é lançada no semiconductor tipo N. Como apresentado na Equação 3 [8].

$$W_p = \left[\frac{2 \cdot \epsilon \cdot N_d}{q \cdot N_d \cdot (N_a + N_d)} \right]^{1/2} \cdot (v_{bi} - v)^{1/2} \left[\frac{C^2 \cdot \text{atomos}}{N \cdot m^2 \cdot 10^{-2} \cdot m^2} \right]^{1/2} \cdot (\text{Volts})^{1/2} \quad (3)$$

W_p é dado em nanômetros.

Assim pode-se verificar que o comportamento da camada de depleção independe se a célula fotovoltaica está ou não iluminada. Da mesma forma fica evidenciado que o tempo de vida dos portadores minoritários não tem qualquer influência no comportamento da homojunção. Tanto a fotocorrente quanto à corrente reversa de saturação e a tensão em circuito aberto são dependentes do comportamento da homojunção, principalmente no que se refere ao seu comprimento tanto no semiconductor tipo N quanto no semiconductor do tipo P.

A Equação 4 apresenta a modelagem matemática da corrente reversa de saturação [2].

$$I_0 = q \cdot A \cdot n_i^2 \cdot \left(\frac{1}{N_a} \cdot \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \cdot \coth \left(\frac{W_p}{L_n} \right) + \frac{1}{N_d} \cdot \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \cdot \coth \left(\frac{W_n}{L_p} \right) \right) \quad (4)$$

A análise dimensional da equação 4 é dada por:

$$C \cdot m^2 \cdot \left(\frac{\text{atomos}}{10^{-2} \cdot m^2} \right)^2 \left(\frac{10^{-2} \cdot m^2}{\text{atomos}} \right) \left(\frac{1}{\text{segundo}} \right)^{1/2}$$

I_0 é dado em ampéres.

A corrente reversa de saturação é diretamente proporcional à área da célula fotovoltaica (A) em m^2 , e do coeficiente de difusão dos elétrons e lacunas (D_n e D_p) (adimensional). Este coeficiente varia de acordo com o tipo de material utilizado como base para a formação dos

semicondutores da célula solar e também do tempo de vida dos portadores minoritários (τ_n e τ_p) em segundos. Quanto maior esse tempo, maior é a distância que esses portadores podem percorrer no material aumentando as chances de se chegar à camada de depleção.

A Equação 5 e a Equação 6 apresentam a fotocorrente produzida nos semicondutores tipo N e P respectivamente [2].

$$I_{t_n} = \frac{q \cdot A \cdot F_{ph} \cdot \alpha \cdot L_n}{\alpha^2 \cdot L_n^2 - 1} \left[\frac{S_n \cdot \cosh\left(\frac{W_p}{L_n}\right) + \frac{D_n}{L_n} \cdot \sinh\left(\frac{W_p}{L_n}\right) + (\alpha \cdot D_n - S_n) \cdot e^{-\alpha \cdot W_p}}{S_p \cdot \sinh\left(\frac{W_p}{L_n}\right) + \frac{D_p}{L_n} \cdot \cosh\left(\frac{W_p}{L_n}\right)} \right] \cdot \alpha \cdot L_n \quad (5)$$

$$I_{t_p} = \frac{q \cdot A \cdot F_{ph} \cdot \alpha \cdot L_p}{\alpha^2 \cdot L_p^2 - 1} \left[\frac{S_p \cdot \cosh\left(\frac{W_n}{L_p}\right) + \frac{D_p}{L_p} \cdot \sinh\left(\frac{W_n}{L_p}\right) + (\alpha \cdot L_p - S_p) \cdot e^{-\alpha \cdot W_n}}{S_p \cdot \sinh\left(\frac{W_n}{L_p}\right) + \frac{D_p}{L_p} \cdot \cosh\left(\frac{W_n}{L_p}\right)} \right] \cdot \alpha \cdot L_p \quad (6)$$

I_{in} e I_{ip} são dados em ampères.

Por tanto se pode observar que a fotocorrente tanto do lado N quanto do lado P é função da quantidade de fótons que chega naquele determinado semiconductor (F_{ph}) por m^2 , da constante de absorção (α), do comprimento de difusão das lacunas e dos elétrons (L_n e L_p) em m, e da velocidade de recombinação superficial dos elétrons e lacunas (S_n e S_p) em m/s. Quanto maior essas velocidades menor será o desempenho da célula. A constante α é dependente do material e se altera de acordo com cada tipo de dopante utilizado na célula solar.

A Equação 7 apresenta a fotocorrente total, que é dada pela soma da Equação 5 e da Equação 6 [2].

$$I_t = I_{t_n} + I_{t_p} \quad (7)$$

A Equação 8 apresenta a dependência da tensão em circuito aberto tanto da fotocorrente gerada quanto da corrente reversa de saturação. Assim pode-se observar que os tipos de dopantes e suas respectivas concentrações vão influenciar o comportamento da célula fotovoltaica.

$$V_{oc} = \left(\frac{k \cdot T}{q} \right) \cdot \ln \left(\frac{I_t}{I_0} \right) \quad (8)$$

Os termos da Equação 8 apresentam as características de tensão e corrente e de potência e corrente da célula fotovoltaica.

III. INFLUÊNCIA DOS TIPOS DE DOPANTES

Numa célula solar onde o elemento base para a formação do semiconductor tipo N do tipo P é o Silício (Si), as características da homojunção são afetadas principalmente pelo tipo de dopante utilizado na formação dos semicondutores, na concentração dos mesmos e da temperatura de operação da célula solar. Assim o critério a ser abordado e que tem influência direta sobre o comportamento da homojunção são os tipos de dopantes utilizados na célula solar. Com uma concentração fixa de 5×10^{14} átomos por cm^2 para o dopante que forme o semiconductor tipo N e de 1×10^{13} átomos por cm^2 de dopante que forme o semiconductor tipo P segundo [7]. Os parâmetros de utilização da célula solar estão apresentados na Tabela II.

TABELA II
Parâmetros da célula solar

Faixa do espectro analisado (nm)	400 – 700
Iluminação (W/m^2)	1000
Temperatura de operação (K)	298,15
Espessura do semiconductor tipo N (nm)	0,2
Espessura do semiconductor tipo P (nm)	300
Area da célula (cm^2)	100

Na Tabela III estão presentes os valores encontrados para a barreira de potencial (v_{bi}) e para o comprimento da camada de depleção tanto no semiconductor tipo N (W_n) quanto no semiconductor tipo P (W_p) para cada tipo de dopante. Como os elementos utilizados na camada P e na camada N são independentes, a combinação na utilização dos dopantes vai fornecer resultados variados.

TABELA III
Valores encontrados na simulação

Dopante N	Dopante P	v_{bi} (V)	W_n (nm)	W_p (nm)
Fósforo (P)	Boro (B)	1,00	0,075	3,794
Arsênio (As)	Índio (In)	0,88	0,071	3,553
Antimônio (Sb)	Gálio (Ga)	0,98	0,075	3,754
Fósforo (P)	Alumínio (Al)	0,98	0,075	3,753
Arsênio (As)	Gálio (Ga)	0,96	0,074	3,726
Antimônio (Sb)	Alumínio (Al)	0,98	0,075	3,764
Fósforo (P)	Índio (In)	0,89	0,071	3,571
Arsênio (As)	Boro (B)	0,99	0,075	3,777
Antimônio (Sb)	Índio (In)	0,85	0,069	3,492
Fósforo (P)	Gálio (Ga)	0,97	0,074	3,743
Arsênio (As)	Alumínio (Al)	0,97	0,074	3,735
Antimônio (Sb)	Boro (B)	1,01	0,076	3,806

A variação do tipo de dopante vai alterar diretamente o valor da barreira de potencial e o comprimento da camada de depleção tanto para o lado N quanto que para o lado P. O principal impacto nessa alteração será visível na corrente reversa de saturação e no valor da tensão em circuito aberto V_{oc} da célula fotovoltaica. A fotocorrente é praticamente a mesma para as configurações de dopantes sendo de 2,701 ampères.

A Figura 2 apresenta a variação da corrente reversa de saturação em função dos dopantes utilizados. Pode-se observar que embora a concentração dos dopantes seja a mesma, existe uma grande variação na corrente reversa de saturação, principalmente quando o elemento Índio (In) é utilizado como dopante para o semiconductor tipo P.

Os menores valores de corrente reversa de saturação para a célula de Silício (Si) são encontrados para os dopantes Antimônio (Sb) e Boro (B); Fósforo (P) e Boro (B) com, respectivamente, $6,06 \times 10^{-11}$ ampères e $7,65 \times 10^{-11}$ ampères.

Na Figura 3 é apresentada a variação da tensão em circuito aberto de acordo com a variação dos dopantes utilizados. Pode observar que embora a variação em volts seja pequena, na ordem máxima de 0,160 volts comparando se o maior valor de V_{oc} de 0,630 volts para Sb e B (0,624 volts para P e B) e o menor valor de 0,470 volts para Sb e In essa variação terá um grande impacto nas características de tensão e corrente da célula, pois irá deslocar o ponto de maior eficiência da célula.

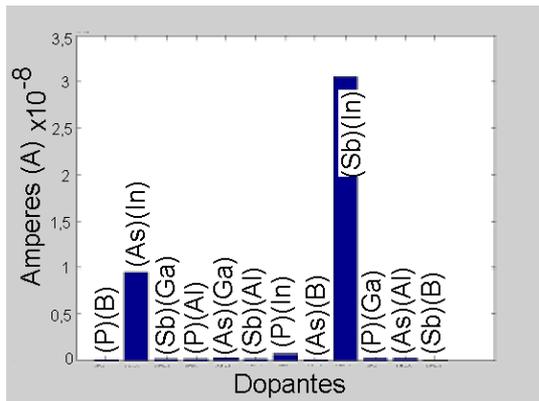


Fig. 2. Valor da corrente reversa de saturação em função do tipo de dopante.

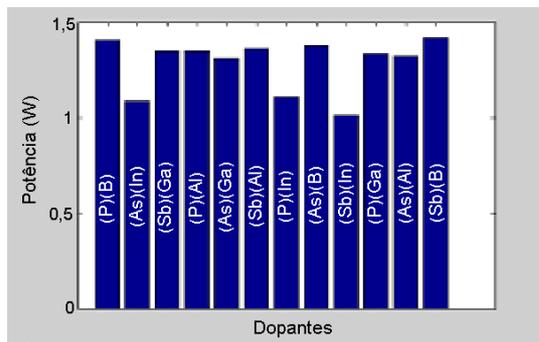


Fig. 3. Valor da tensão em circuito aberto.

A Figura 4 apresenta a variação da potência máxima gerada pela célula solar em função dos dopantes utilizados. Pela comparação das Figuras 3 e Figura 4 é possível observar que a variação da potência máxima gerada pela célula solar é diretamente proporcional à tensão V_{oc} produzida em cada configuração, sendo a de 1,419 watts para Sb e B, de 1,404 watts para P e B e de 1,010 watts para Sb e In.

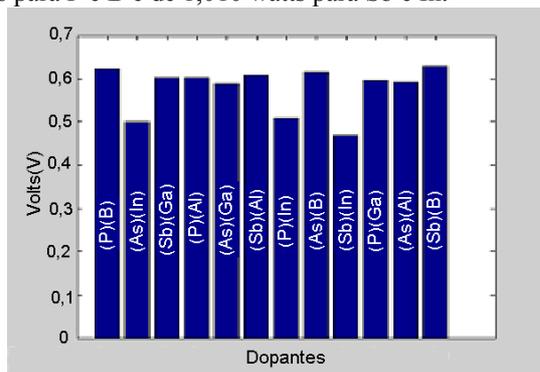


Fig. 4. Gráfico da potência para cada tipo de dopante utilizado.

As Figuras 5 e 6 apresentam os gráficos com as características de tensão e corrente (a) e de tensão e potência (b) para a célula dopada com Sb e B e Sb e In respectivamente. Pode-se fazer um comparativo entre os gráficos das Figuras (5) e (6), principalmente no que se refere à potência. Isso por que no caso do Sb e B a potência máxima é de 1,419 watts enquanto na célula com Sb e In o valor é de 1,010 watts. Essa diferença representa 28,83% que é extremamente significativa se observado que o rendimento de conversão da célula solar é de 17% a 23%.

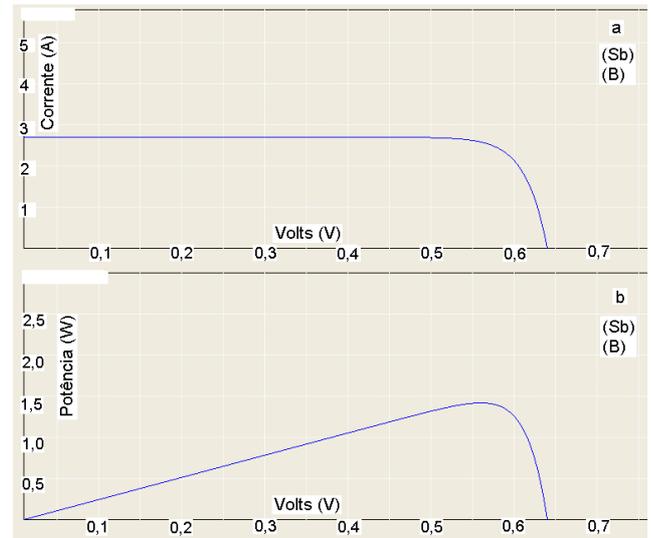


Fig. 5. Gráfico das características de tensão e corrente (a) e de potência e tensão (b) para a célula de Sb dopada com B.

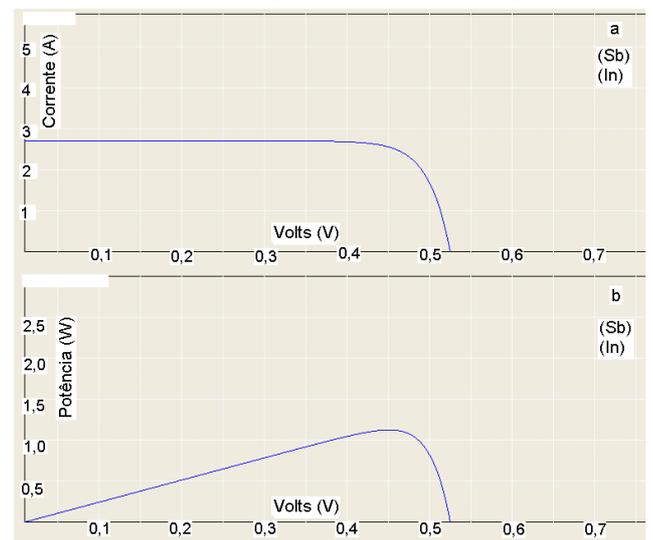


Fig. 6. Gráfico das características de tensão e corrente (a) e de potência e corrente (b) para a célula dopada com Sb e In.

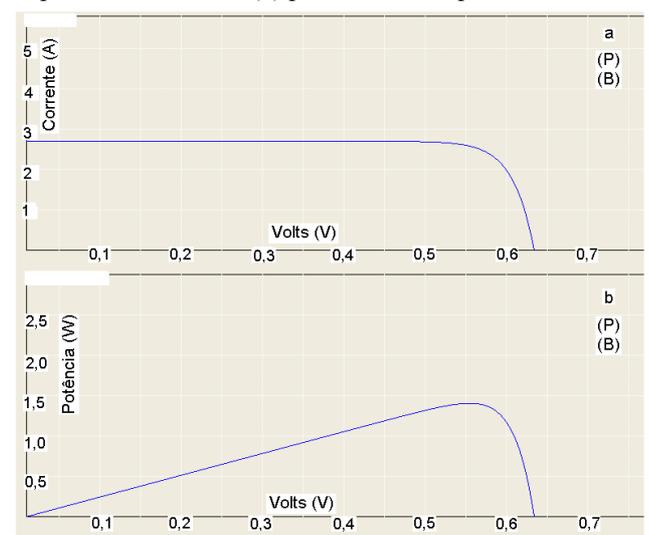


Fig. 7. Gráfico das características de tensão e corrente (a) e de potência e corrente (b) para a célula dopada com P e B.

A Figura (7) apresenta um gráfico das características de tensão e corrente (a) e da tensão e potência (b) para a célula dopada com P e B. Pode-se fazer o mesmo comparativo entre os gráficos das Figuras (5) e (7), principalmente no que se refere à potência máxima, que na célula dopada com P e B é de 1,404 watts. Essa diferença representa 1,06 % que não é tão significativa se observado que o aproveitamento de conversão da célula solar é praticamente o mesmo em ambos os casos.

IV. INFLUÊNCIA DOS TIPOS DE DOPANTES

Ao se estudar o comportamento da homojunção em função dos tipos de dopantes utilizados, é possível observar que a influência no comportamento da célula fotovoltaica é apreciável. Neste caso tanto o comportamento da barreira de potencial quanto o comprimento da camada de depleção tanto para o lado N quanto para o lado P sofre impacto direto na configuração escolhida. Isso resultará em influência direta nas características de tensão e corrente da célula fotovoltaica.

Embora a simulação mostre que o melhor desempenho está nas células com dopagem de Sb e B, estas não são as mais utilizadas comercialmente, ficando com esse papel as células dopadas com fósforo P e boro B [9]. Isso por que o preço do antimônio Sb cotado em aproximadamente US\$ 6.000,00 a tonelada, é muito maior do que o do fósforo (P) cujo valor é de somente US\$ 300,00 a tonelada. E a diferença de desempenho é mínima tanto no que diz respeito à corrente reversa de saturação (26,30% maior), quanto na tensão em circuito aberto (0,95% menor) e na potência (1,06% menor).

Outro fator a ser comparado é a diferença entre o valor da barreira potencial nas células dopadas com (P) e (B) em relação às células dopadas com (Sb) e (B), 0,99% maior, assim como o tamanho da camada de depleção tanto do lado N, que é 1,32% menor, quanto do lado P, que é 0,32% menor. Mesmo sendo o boro (B) o dopante do lado P, isso se deve ao fato da mudança da concentração intrínseca do silício quando é adicionado um dopante.

V. CONCLUSÕES

O estudo das características físicas das células fotovoltaicas por meio de simulação computacional baseada em modelos matemáticos é de fundamental importância para a correta compreensão de seu comportamento. Sem dúvida alguma, um dos principais aspectos a serem modelados e estudados é o comportamento da camada de depleção. Se a mesma por algum motivo apresentar saturação da célula por excesso de concentração dos dopantes, pode-se ter uma interrupção momentânea no funcionamento da mesma, ou pode haver alteração nas características de operação no caso da substituição dos dopantes.

A dopagem pode afetar em até 6% o rendimento das células fotovoltaicas. Isto pode parecer pouco, mas é um valor extremamente alto uma vez que as células fotovoltaicas de uma única camada apresentam rendimentos que variam de 17% a 23%.

Assim, conhecer o funcionamento, suas características, como são influenciadas e quais são os fatores afetados pelo comportamento da camada de depleção é de suma

importância para a sua perfeita compreensão, além de permitir explorar novos caminhos para o aperfeiçoamento do rendimento das células fotovoltaicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. A. Brum, "Ligação química em semicondutores", Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Física 1983.
- [2] F. B. Matos, "Modelamento Computacional de Células Fotovoltaicas Baseadas nas Propriedades Físicas dos Materiais" Universidade Federal de Uberlândia, Dissertação de Mestrado. 2006
- [3] O. Mah, *Fundamentals of Photovoltaic Materials*. NSPRI - National Solar Power Research Institute, Inc. 1998. Documento eletrônico disponível em <<http://userwww.sfsu.edu/~ciotola/solar/pv.pdf>> acessado em 05/10/2005.
- [4] J. I. Pankove, *Optical Processes in Semiconductors*. Dover Publications Inc., New York, 1975.
- [5] R. E. Hummel, *Electronic Properties of Materials*. 3ª ed. Springer Verlag, Londres, UK 2001.
- [6] J. A. Martino et al., *Caracterização Elétrica de Tecnologia e Dispositivos MOS*, Editora Thomson. São Paulo. 2003.
- [7] J. Nelson, "The Physics of Solar Cells", Imperial College, Londres, UK, 2003.
- [8] R. Messenger e J. Ventre, *Photovoltaic Systems Engineering*. CRC Press 2000.
- [9] M. R. Pateeeel, *Wind and Solar Power Systems*. CRC Press 2000.

DADOS BIOGRÁFICOS

Fernando Barbosa Matos nasceu em Ceres, GO, Brasil em 08/12/1977. Formado em Ciências da Computação pela Universidade Federal de Goiás-GO em 2001. Especialista em Gestão Empresarial pelo Centro de Ensino Superior de Catalão - GO em 2004. Recebeu o título de MSc em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia em 2006. É Professor no Centro Federal de Educação Tecnológica de Urutaí. Sua Área de interesse é simulação por computador e fontes alternativas de energia.

José Roberto Camacho (M'1993, SM'2006) nasceu em Taquaritinga, SP, Brasil em 03/11/1954. Recebeu seu grau MSc na UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, em 1987, e o grau de PhD no Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica da University of Canterbury, Christchurch, Nova Zelândia, em Agosto de 1993. É Professor Titular na Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia onde trabalha desde Fevereiro de 1979. Suas áreas de interesse são Eletricidade para Aplicações Rurais, Energia Alternativa e Geração Distribuída.