

5

Análise e projeto assistido por algoritmos genéticos

5.1

Algoritmos genéticos

Os algoritmos genéticos são técnicas computacionais de busca e otimização, altamente paralelas, inspiradas na seleção natural das espécies. Estes algoritmos se baseiam na reprodução genética de organismos biológicos para procurar por soluções ótimas ou sub-ótimas [48].

Em um algoritmo genético, cada possível solução de um problema pode ser codificada em uma estrutura denominada cromossomo, que é composta por uma cadeia de bits, números ou símbolos conforme figura 5.1. Os cromossomos representam indivíduos que serão avaliados quantitativamente ao longo do processo indicando o grau de adequação da solução ao problema de otimização.

0	1	1	0	0	Binário
0.75	5.12	1.00	0.00	42.0	Real
B	C	A	E	D	Símbolos

Figura 5.1: Exemplos de cromossomos

A criação dos primeiros indivíduos ocorre de forma aleatória para permitir uma distribuição homogênea das soluções pelo espaço de busca. O conjunto de indivíduos é denominado população e sua quantidade é fixa durante todo processo de otimização.

O algoritmo genético é um processo iterativo em que cada passo é chamada de geração. Durante uma geração os indivíduos da população atual são avaliados e alguns são selecionados para participar do processo de criação de uma nova. A seleção ocorre de tal forma que indivíduos mais aptos tenham mais chances de serem escolhidos.

Uma nova população surge através da aplicação de operadores genéticos sobre os indivíduos selecionados. Os operadores genéticos são procedimentos com finalidades específicas que viabilizam a otimização. Dentre eles os que mais se destacam são o cruzamento e a mutação.

O cruzamento é caracterizado pela troca de informações entre dois ou mais indivíduos. A ideia por trás desse processo é permitir ao algoritmo identificar aspectos particulares de cada solução que levem à otimização do problema.

Na mutação, partes do cromossomo serão modificadas de maneira aleatória. A finalidade desse processo é possibilitar a fuga de mínimos locais deslocando alguns indivíduos para pontos diferentes no espaço de busca.

Os novos indivíduos gerados substituem a população que lhes deu origem finalizando um ciclo da iteração. Todo o processo descrito até aqui se repete até atingir um determinada condição de parada que pode ser número de gerações, número de avaliações ou qualquer outro critério definido pelo usuário. Na figura 5.2 está ilustrado graficamente um algoritmo genético.

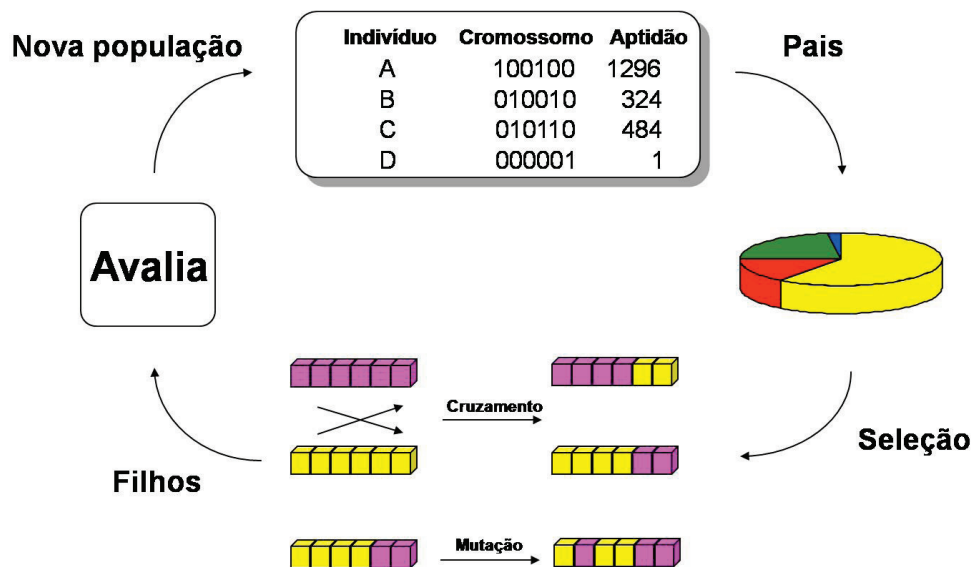


Figura 5.2: Algoritmo genético

Em problemas numéricos os algoritmos genéticos apresentam duas grandes vantagens com relação a outros métodos de otimização. A primeira é a desnecessidade da computação de derivadas com relação a variáveis de otimização. Um procedimento que pode ser bastante complicado principalmente à obtenção da forma analítica. A segunda é a possibilidade de utilizá-lo em problemas não contínuos sem a necessidade de qualquer alteração no método.

Outra característica importante é o paralelismo da busca. Ao término do processo de otimização se obtém uma população de soluções ao invés de uma única solução, o que permite ter uma visão mais ampla do problema.

5.1.1

Parâmetros do algoritmo genético

O comportamento do algoritmo genético é controlado através de alguns parâmetros que permitem ao usuário determinar a velocidade de convergência, a dispersão pelo espaço de busca e o tempo computacional de execução. A flexibilidade proporcionada por esta facilidade permite a adequação do método a prioridades estabelecidas pelo usuário.

Tamanho da população

O tamanho da da população afeta o desempenho global e a eficiência do método. Uma população muito pequena oferece uma pequena cobertura do espaço de busca, causando uma queda no desempenho. Uma população suficientemente grande fornece uma melhor cobertura do domínio do problema e previne a convergência prematura para soluções locais. Contudo, uma população grande exige mais recursos computacionais ou maior tempo de processamento.

Taxa de cruzamento

Quando dois indivíduos são selecionados existe uma probabilidade de aplicação do operador de cruzamento, caso se confirme os indivíduos são submetidos ao operador do contrário são copiados para a geração seguinte. Esta probabilidade é conhecida como taxa de cruzamento, quanto maior o seu valor mais rapidamente novas estruturas serão introduzidas na população acelerando a convergência do método. Entretanto, pode-se gerar um efeito indesejável pois a maior parte da população será substituída ocasionando a destruição de padrões que pertencem a uma boa solução. Valores muito pequenos tornam a convergência muito lenta prejudicando a agilidade do método.

Taxa de mutação

A taxa de mutação é definida como sendo a probabilidade de mudar uma parte do conteúdo de um cromossomo de um indivíduo selecionado. Este parâmetro previne que uma dada população fique estagnada em um determinado ponto do espaço de busca, permitindo o deslocamento para qualquer ponto. Porém taxas muito altas levam o algoritmo a uma busca aleatória descaracterizando o método.

Intervalo de geração (Taxa de steady state)

Este parâmetro controla o percentual da população que será substituída pela próxima geração. Sua finalidade é manter soluções de boa qualidade que foram encontradas em algum momento durante o processo de otimização e impedir que sejam destruídas por alguma ação dos operadores genéticos. Logo, os indivíduos mantidos serão o que possuem maior valor de aptidão.

Número de gerações

Representa o total de iterações do processo. Um número pequeno de gerações leva o algoritmo a uma terminação prematura impedindo a exploração do espaço de busca. Em contrapartida, uma grande quantidade requer maior tempo computacional.

5.1.2

Sistema de otimização

O algoritmo genético por si só não é capaz de avaliar a qualidade de uma solução. É necessário o uso de uma função ou simulador que forneça um valor de aptidão para o indivíduo. Na figura 5.3 está ilustrado de maneira simplificada o sistema de otimização. Neste trabalho o simulador apresentado na seção 4.3 é utilizado para avaliar os indivíduos gerados pelo algoritmo genético. O valor de aptidão de cada indivíduo é igual a eficiência da célula solar que ele representa.

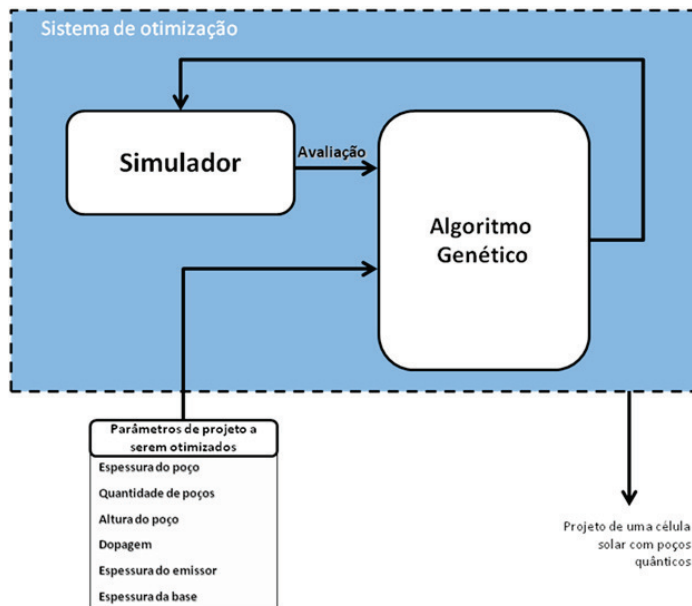


Figura 5.3: Sistema de otimização

5.2

Análise e projeto assistido por algoritmos genéticos em células solares com poços quânticos

A utilização de algoritmos genéticos no auxílio a projetos de engenharia é uma ideia explorada há bastante tempo. Aplicações bem-sucedidas se destacam em diversas áreas tais como eletrônica, construção civil, petróleo e gás, controle e automação, mecânica e meio ambiente. Duas características comuns aos problemas abordados pelo método é a grande quantidade de variáveis e relações conflitantes entre elas.

O projeto de células solares com poços quânticos partilha das mesmas particularidades. É possível identificar, observando os modelos apresentados no capítulo 3, seis parâmetros de projeto passíveis de otimização e comuns a todos os modelos. São eles a largura, profundidade e quantidade de poços, dopagem das zonas neutras, largura da camada P e N. Dependendo do modelo utilizado ou da realização de pequenas modificações o número de variáveis aumenta, essas duas situações serão discutidas mais adiante. A estrutura básica a ser otimizada é a mesma da figura 2.8 para células com um tipo de poço. Para células com mais de um tipo de poço a figura 3.1 pode ser utilizada para exemplificar a estrutura.

Outro fator dificultante neste projeto é a relação de compromisso entre as variáveis envolvidas, por exemplo, o aumento no número de poços eleva a corrente de curto-circuito porém reduz a tensão de circuito-aberto. Como já foi visto, ambos estão diretamente ligados a eficiência, sendo necessário buscar um ponto de equilíbrio.

A conjectura do problema juntamente com a experiência de aplicações bem-sucedidas no passado indicam que o algoritmo genético possa ser uma técnica adequada para o projeto de células solares com poços quânticos.

Um ponto a favor da técnica é a sua eficácia apesar da ignorância sobre o problema. Não é necessário ter um profundo conhecimento sobre o funcionamento do dispositivo para utilização do método. Através do processo de otimização o conhecimento, é obtido de maneira automática, cabendo ao usuário analisar as soluções encontradas ao fim do processo e tirar conclusões.

Ao longo das próximas seções será apresentado o uso de algoritmos genéticos para análise e projeto de células solares de GaAs/AlGaAs em diversas situações. O objetivo é explorar a tecnologia e estabelecer diretrizes que sirvam para qualquer tipo de material.

5.2.1

Resultados

O primeiro dispositivo a ser apresentado é uma célula solar com um tipo de poço iluminada pelo espectro AM1.5. As variáveis de entrada do sistema de otimização juntamente com o resultado obtido pelo algoritmo genético estão expostos na tabela 5.2. O valor dos parâmetros durante a evolução estão na tabela 5.1.

Parâmetro	Valor
Tamanho da população	50
Taxa de cruzamento	0.8
Taxa de mutação	0.08
Taxa de (steady-state)	0.7
Número de gerações	70

Tabela 5.1: Parâmetros de evolução do algoritmo genético

Uma forma de avaliar uma célula solar com poços quânticos é comparando o seu desempenho com um célula homojunção de igual configuração. O objetivo desta comparação é mensurar o real benefício da inserção de poços quânticos na camada intrínseca.

Na célula obtida pelo sistema de otimização o aumento na eficiência sobre a sua equivalente de homojunção é de 4,5%. É possível perceber na tabela 5.2 que a inserção de poços na camada intrínseca degrada a tensão de circuito-aberto porém o aumento na corrente de curto-circuito foi o suficiente para compensar a perda e aumentar a eficiência.

Parâmetro	Evoluída	Homojunção	Limites
Dopagem (cm ⁻³)	4.70×10^{15}	4.70×10^{15}	[10 ¹⁵ , 10 ¹⁹]
Espess. Região N (nm)	5700	5700	[20, 7000]
Espess. Região P (nm)	100	100	[20, 500]
Al barreira (%)	0.1	0.1	[0.1, 0.4]
Largura do poço (nm)	37.16	-	[1, 50]
Núm. de poços	21	0	[15, 100]
$J_{SC}(A/m^2)$	184.48 (+5.87%)	174.25	-
$V_{OC}(V)$	0.92 (-2.13%)	0.94	-
<i>Eficiência (%)</i>	13.2 (+4.50%)	12.67	-

Tabela 5.2: Resultado da evolução de uma célula solar com poços quânticos

Embora a célula encontrada tenha uma eficiência superior, a curva de eficiência quântica na figura 5.4 mostra uma característica interessante do dispositivo. O ganho em eficiência é originado da pequena área em destaque que

corresponde a absorção de fótons nos poços. Devido a pequena profundidade dos poços esta área é muito estreita impedindo uma maior fotocorrente.

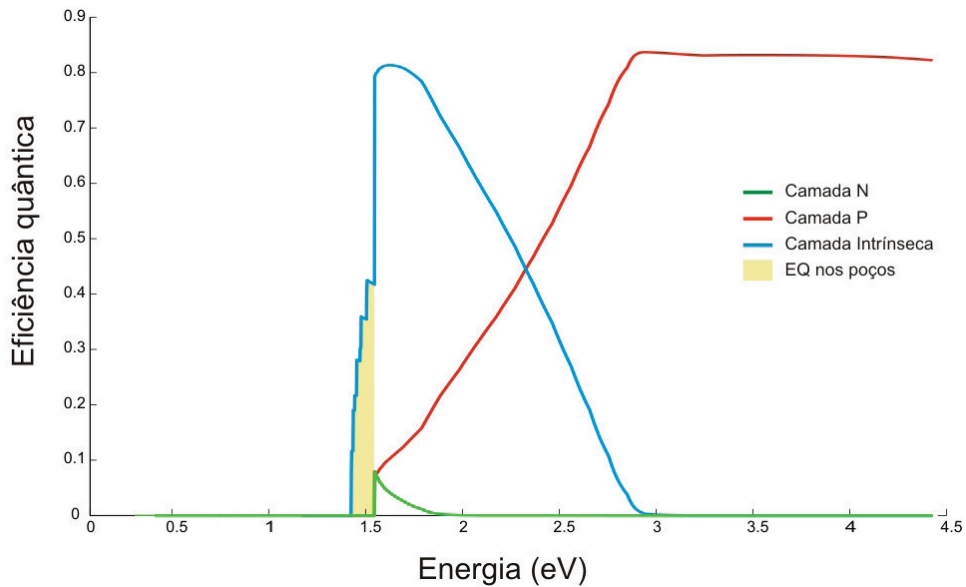


Figura 5.4: Eficiência quântica da célula solar evoluída

A baixa altura da barreira é justificada pela maximização da absorção na barreira e zonas neutras. O algoritmo genético identifica que a diminuição das barreiras fornece um benefício maior do que o aprofundamento dos poços.

O baixo nível de dopagem é um resultado esperado. Ele induz ao alargamento da largura de difusão dos portadores minoritários, aumentando a absorção nas camadas N e P.

As espessuras das zonas neutras refletem duas das melhores características do algoritmo genético. A zona P possui uma espessura intermediária porém não tão espessa a ponto de prejudicar a absorção nas camadas mais profundas e nem tão fina que diminua a sua contribuição para a fotocorrente.

A camada N tem de ser bem espessa para poder absorver toda luz que atravessou as camadas superiores. Na saída do sistema de otimização há 50 soluções que correspondem ao tamanho da população. Em algumas os valores de eficiência estavam idênticos e apenas o valor de espessura da camada N era diferente. Isso reflete uma característica interessante do problema que foi descoberta pelo algoritmo genético. A partir de um determinado valor de espessura o aumento da da região N é irrelevante para o desempenho do dispositivo, já que não implica em um acréscimo a fotocorrente.

O valor disponível na tabela 5.2 para a espessura de camada N não corresponde ao menor valor possível e sim ao menor valor das soluções

fornecidas pelo sistema de otimização, embora seja possível modificá-lo para atender a esta restrição.

Efeito da profundidade do poço

Uma limitação ao aumento da fotocorrente na situação anterior é a baixa profundidade dos poços. Para se avaliar o impacto do tamanho do poço em um dispositivo fotovoltaico foram realizadas evoluções fixando o valor da proporção de alumínio na barreira. Logo, toran-se possível obter um célula solar otimizada para uma determinada profundidade de poço. Os valores escolhidos para se realizar a evolução foram de 0.05, 0.1, 0.2, 0.03, 0.35 e 0.4. O gráfico da figura 5.6 demonstra o comportamento da eficiência, corrente de curto-circuito e tensão de circuito-aberto dos diferentes dispositivos obtidos pelo algoritmo genético para valores distintos de alumínio na barreira.

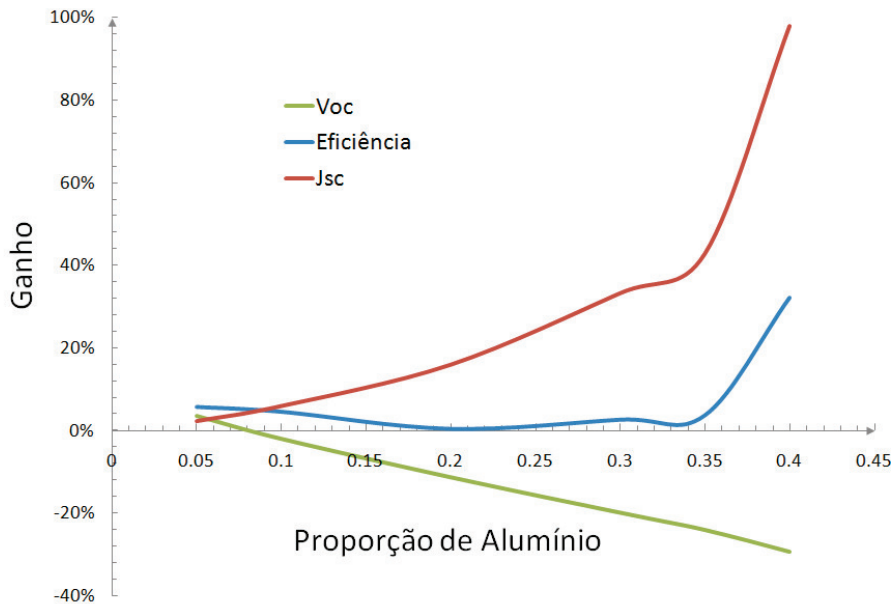


Figura 5.5: Ganho percentual da célula evoluída para eficiência, corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto em relação a célula de homojunção para diferentes concentrações de alumínio na barreira

Na figura 5.6 nota-se que para valores ao redor de 0.2 a inserção de poços quânticos em um célula solar tem benefício quase nulo. Nessa região as perdas na tensão de circuito-aberto equiparam-se aos ganhos da corrente de curto-circuito provocando este comportamento. Ao se afastar para ambos os lados na direção do eixo das abscissas a inserção de poços começa a trazer benefícios para a eficiência do dispositivo.

Nas regiões de baixa profundidade (baixa quantidade de alumínio) os ganhos na fotocorrente não são tão altos, mas são suficiente para compensar as perdas na tensão de circuito-aberto. Por volta da concentração de 0.1 ocorre um fenômeno curioso. A inserção de poços na camada intrínseca deixa de degradar a tensão de circuito-aberto e passa a contribuir para a melhora em relação a uma célula de homojunção. Com a diminuição da profundidade dos poços, a população intrínseca de portadores chega a níveis inferiores em relação a mesma população na barreira. Nessa situação, em comparação a uma célula homojunção, nas regiões onde estão localizados os poços a recombinação é menor devido a baixa concentração de portadores. Isso contribui para a diminuição da recombinação não radiativa na camada intrínseca provocando o aumento na tensão de circuito-aberto na célula com poços quânticos.

Para altos valores de alumínio, o aumento na eficiência com relação a células sem poços tem um comportamento similar a uma exponencial. Este comportamento pode ser atribuído ao forte crescimento da corrente de curto-circuito a partir do ponto 0.3, superando rapidamente as perdas na tensão de circuito-aberto que possui uma tendência aproximadamente linear. Esta súbita mudança pode ser justificada com o auxílio da figura 5.6, nela estão os valores de corrente de curto-circuito normalizados para diferentes concentrações de alumínio.

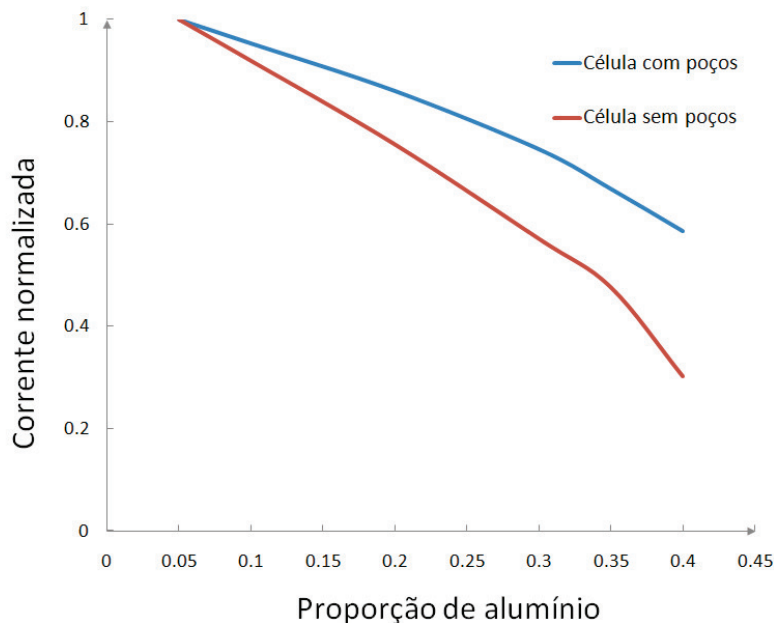


Figura 5.6: Corrente de curto-circuito normalizada para diferentes concentrações de alumínio em uma célula com poços e sem poços

A inserção de poços na camada intrínseca retarda a degradação da

fotocorrente provocada pela diminuição do espectro de absorção. Em uma célula homojunção não existem alternativas compensatórias para elevação do *gap* do material. Em uma célula com poços quânticos há uma maior liberdade. É possível diminuir as perdas provocadas pelo o aumento do *gap* controlando o tamanho e o número de poços. O próprio aprofundamento do poço que degrada a fotocorrente na barreira contribui para o aumento da absorção nos poços através da inserção de mais níveis.

Embora os ganhos em relação a uma célula sem poços sejam maiores para poços com profundidade elevada, os dispositivos de maior eficiência são obtidos para poços rasos. Há duas causas para este resultado do algoritmo genético, primeiro a concentração de alumínio nas zonas neutras está atrelada a camada intrínseca, logo o aumento de absorção na camada P e N implica em na diminuição dos poços. A segunda razão é que nesta região ambas (corrente de curto-circuito e a tensão de circuito-aberto, passam a ser superiores) a uma célula sem poços deixando de ser fatores conflitantes.

Variação da quantidade de alumínio nas zonas neutras

Até o momento, todas as células produzidas pelo sistema de otimização possuíam as camadas N e P com a mesma quantidade de alumínio da barreira dos poços quânticos. Porém não há nenhuma restrição física que impeça uma composição de alumínio diferente nas zonas neutras. Para estudar este novo cenário basta que se adicione uma entrada ao sistema. A configuração do algoritmo genético é novamente igual ao da tabela 5.1 e as características do dispositivo obtido estão na tabela 5.3.

Parâmetro	Evoluída	Homojunção	Limites
Espess. Região N (nm)	7000	7000	[20, 7000]
Espess. Região P (nm)	100	100	[20, 500]
Dopagem (cm ⁻³)	9×10^{15}	9×10^{15}	[10^{15} , 10^{19}]
Al zona neutra (%)	0.1	0.1	[0.1, 0.4]
Al barreira (%)	0.4	0.4	[0.1, 0.4]
Largura do poço (nm)	1	-	[1, 50]
Núm. de poços	15	0	[15, 100]
$J_{SC}(A/m^2)$	168.4 (+0.01%)	168.34	-
$V_{OC}(V)$	1.09 (-0.9%)	1.1	-
<i>Eficiência (%)</i>	15.71 (-0.95%)	15.86	-

Tabela 5.3: Resultado da evolução de uma célula solar com poços quânticos com variação de alumínio nas zonas neutras

A configuração apresentada é surpreendente. A baixa espessura dos poços juntamente com a baixa quantidade é um indicativo da tentativa do algoritmo

em eliminar os poços da camada intrínseca. Mas essa situação só é possível devido a configuração curiosa e não-intuitiva das proporções de alumínio.

As zonas neutras possuem uma menor quantidade de alumínio que as barreiras dos poços, de fato eles estão localizados nos extremos opostos. Nessa disposição a faixa de absorção da camada P coincide com os níveis dos poços, diminuindo a sua importância para a fotocorrente a ponto de ser desnecessário a sua inserção na camada intrínseca.

Porém uma questão ainda permanece em aberto, a razão de haver uma maior proporção de alumínio na região intrínseca que nas zonas neutras. A vantagem desta esquisita configuração está na baixa concentração intrínseca do $Al_xGa_{1-x}As$ para altas quantidades de alumínio. Esta situação leva a uma grande diminuição da corrente de recombinação que se traduz no aumento da tensão de circuito-aberto. Dessa forma a geração da fotocorrente é em grande parte proporcionada pela absorção nas zonas neutras.

Esta célula solar é um pouco superior a sua equivalente de junção PN. Uma situação atípica pois o $Al_xGa_{1-x}As$ não é um material com baixa profundidade de difusão de portadores minoritários, que é uma condição comum em dispositivos PIN, que superam seus equivalente PN. Logo esta configuração traz os benefícios de uma célula solar de junção PN com o acréscimo de fotocorrente típico de células PIN.

Esta situação demonstra o sucesso dos algoritmos genéticos em encontrar soluções atípicas trazendo a atenção a dispositivos novos.

Em uma situação hipotética pode-se atribuir um valor, independente da quantidade de alumínio, à concentração intrínseca do $Al_xGa_{1-x}As$. O propósito desta hipótese é verificar se os benefícios da célula obtida anteriormente são realmente originados na baixa concentração intrínseca. Para isso fixa-se o seu valor em $2.2^{12}m^{-3}$ um número alto e típico do $GaAs$. Novamente a evolução se desenvolve com os parâmetros da tabela 5.1 e seus resultados estão em 5.4.

Parâmetro	Evoluída	Anterior	Limites
Espess. Região N (nm)	6621.37	7000	[20, 7000]
Espess. Região P (nm)	100	100	[20, 500]
Dopagem (cm ⁻³)	3×10^{15}	9×10^{15}	[10^{15} , 10^{19}]
Al zona neutra (%)	0.1	0.1	[0.1, 0.4]
Al barreira (%)	0.1	0.4	[0.1, 0.4]
Largura do poço (nm)	35.28	-	[1, 50]
Núm. de poços	22	0	[15, 100]
$J_{SC}(A/m^2)$	184.71	168.39	-
$V_{OC}(V)$	0.81	0.75	-
<i>Eficiência (%)</i>	11.3	9.28	-

Tabela 5.4: Resultado da evolução de uma célula solar com poços quânticos com variação de alumínio nas zonas neutras com concentração intrínseca na barreira de $2.2^{12}m^{-3}$

Dessa vez, sem os benefícios provocados pela baixa concentração intrínseca a inserção de poços quânticos na camada intrínseca volta a ser vantajosa e algoritmo encontra uma célula muito parecida com a que já foi demonstrada na tabela 5.2. A célula obtida anteriormente sem o artifício de fixar a concentração intrínseca é exposta sob a denominação de “Anterior” para comparação na tabela 5.4.

Poços quânticos heterogêneos

O modelo debatido na seção 3.4 tem como propósito aumentar a eficiência de uma célula solar com poços quântico fornecendo um maior grau de liberdade ao projeto do dispositivo. Dessa forma, espera-se conciliar vantagens da utilização de diferentes tipos de poços na camada intrínseca.

O sistema otimização é utilizado para obtenção de células com dois e três tipos diferentes de poço. O objetivo é avaliar o efeito do acréscimo de tipos de poços no dispositivo. A modificação necessária ao sistema envolve a inclusão das variáveis relativas aos poços quânticos para cada tipo, tais como, porcentagem de alumínio, largura e quantidade de poços. As variáveis de otimização podem ser encontradas na tabela 5.6. Os valores para cada tipo estão separados por barras e estão representados pela denominação de T1, T2 e T3. Dessa vez, os parâmetros do algoritmo genético tem de ser diferentes dos usados anteriormente, pois o número de variáveis envolvidas é maior. Os novos valores estão na tabela 5.5.

Na tabela 5.6 observa-se para células com dois tipos uma divisão em poços largos e rasos e poços finos e profundos. Os poços largos contribuem com o aumento da fotocorrente em energias abaixo do *gap* da camada N, este é o

Parâmetro	valor
Tamanho da população	70
Taxa de cruzamento	0.8
Taxa de mutação	0.1
Taxa de (steady-state)	0.7
Número de gerações	100

Tabela 5.5: Parâmetro de evolução para célula solares com poços quânticos

Parâmetro	Evol. (T1/T2)	Evol. (T1/T2/T3)	Limites
Espess. Região N (nm)	7000	7000	[20, 7000]
Espess. Região P (nm)	100	100	[20, 500]
Dopagem (cm ⁻³)	1×10^{15}	1×10^{15}	[10^{15} , 10^{19}]
Al zona neutra (%)	0.1	0.1	[0.1, 0.4]
Al barreira (%)	0.1/0.4	0.1/0.35/0.4	[0.1, 0.4]
Largura do poço (nm)	45/1	45/3/1	[1, 50]
Núm. de poços	8/30	7/6/18	[5, 100]
$J_{SC}(A/m^2)$	179.04	177.82	-
$V_{OC}(V)$	0.93	0.95	-
<i>Eficiência (%)</i>	13.3	13.5	-

Tabela 5.6: Resultado da evolução de uma célula solar com poços quânticos heterogêneos com os tipos T1, T2 e T3

propósito esperado da inserção de poços na camada intrínseca. O segundo tipo diminui a corrente de recombinação enquanto fornece um pequeno aumento à fotocorrente.

Para células com três tipos percebe-se uma divisão similar, porém o tipo intermediário (T2) possui uma tendência para células finas e com poços profundos mas os valores obtidos não são tão acentuados quanto os poços do tipo T3. Este comportamento traduz uma característica da adição de tipos na célula, o maior benefício está na diminuição da corrente de recombinação na camada intrínseca, porém há espaço para relaxar esta corrente e aumentar um pouco a absorção.

Na tabela 5.7 estão exposto os valores de corrente de curto-circuito, tensão de circuito-aberto e eficiência para células com um, dois e três tipos. Os valores entre parêntesis representam o ganho percentual em relação a célula homojunção da tabela 5.2. Pode-se perceber que a melhora de eficiência com inserção de tipos diferentes de poços é provocado pelo aumento na tensão de circuito-aberto, originado na diminuição da corrente de recombinação na camada intrínseca. O algoritmo reconhece que é preferível perder um pouco da capacidade de absorção para diminuir a recombinação no dispositivo.

Identificação	Um tipo	Dois tipos	Três tipos
$J_{SC}(A/m^2)$	184.48 (+5.87%)	179.04 (+2.74%)	177.82 (+2.04%)
$V_{OC}(V)$	0.92 (-2.13%)	0.93 (-1.06%)	0.95 (+1.06%)
<i>Eficiência</i> (%)	13.2 (+4.5%)	13.3 (+5.0%)	13.5 (+6.5%)

Tabela 5.7: Comparação entre células com diferentes tipos de poços

O alto número de poços finos não caracteriza a tentativa do algoritmo em eliminá-los como no caso anterior, mas indica a vantagem da conciliação da baixa concentração intrínseca com absorção nos poços.

O uso de mais tipos de poços no dispositivo é mais difícil, pois a camada intrínseca não é grande o suficiente para comportar. O sistema de otimização levou cerca de 24 horas para chegar na solução final para o caso com dois tipos e 34 horas para o caso com três tipos. O algoritmo genético em geral é uma técnica mais lenta do que outros métodos de otimização numéricos, porém neste caso o alto tempo se deve ao simulador que ainda está em versão de protótipo sem a inserção de técnicas de otimização de código.

5.3

Conclusões

A grande vantagem da utilização do algoritmo genético está na flexibilidade e facilidade de uso. A técnica foi capaz de identificar configurações ótimas em todas as situações. A população de soluções fornecida na saída é um grande auxílio à análise, pois permite acompanhar a formação de padrões que levam à melhor solução. As grandes desvantagens são o alto tempo de execução, justificada parcialmente pelo alta demanda computacional do simulador e a impossibilidade de se afirmar se a solução obtida é um ótimo global ou local.

A inserção de poços quânticos na célula solar se mostrou ser um fator de aumento de eficiência, porém para se obter um ganho maior é necessário procurar materiais que sejam capazes de formar poços mais profundos, embora seja possível obter ganhos significativos com poços pequenos. Uma das grandes vantagens é o aumento da flexibilidade do dispositivo. Como demonstrado anteriormente o decréscimo de desempenho provocado pela utilização de materiais com *gap* elevado, pode ser compensado com o projeto otimizado dos poços.

A inserção de tipos de poços diferentes no dispositivo também auxilia no aumento da eficiência. O grau de liberdade deste modelo permite um maior aproveitamento das características dos poços quânticos, embora o tamanho da

camada intrínseca limite a quantidade de tipos distintos de poços. A utilização de três tipos distintos provocou um aumento significativo na eficiência da célula, demonstrando a qualidade do modelo. Porém a sua validade ainda está carente de comprovação experimental.

Os modelos apresentados não são restritivos com relação ao material utilizado, podendo ser expansível para qualquer semicondutor. O sistema GaAs/AlGaAs não é uma boa escolha para células solares com poços quânticos, porém por já ter sido estudado contém uma grande quantidade de dados o que facilita a pesquisa.