"ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DE
CÉLULAS SOLARES DE SILÍCIO MO-
NOCRISTALINO"

Antonio Fernando Beloto

USP/IFQSC

8-2-000623

Dissertação apresentada ao Instituto
de Física e Química de São Carlos ,
para a obtenção do Título de Mes -
tre em Física Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Milton Soares de
Campos

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE _____

ANTONIO FERNANDO BELOTO

APRESENTADA AO INSTITUTO DE FÍSICA E QUÍMICA DE SÃO CARLOS, DA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 13 DE junho DE 1983.

COMISSÃO JULGADORA:

Dr. Milton Soares de Campos - Orientador

Dr. Jarbas Caiado de Castro Neto

Dr. Hari Mohan Gupta

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Milton Soares de Campos - Orientador, pela idéia inicial do trabalho, apoio e acompanhamento durante o transcorrer do mesmo.

Ao Prof. Ádnei Melges de Andrade pela oportunidade de realização de parte deste trabalho no Laboratório de Microeletrônica da EPUSP, pelas sugestões e revisão final do trabalho.

A Profa. Dra. Ines Pereyra de Alvarez pelas discussões, total apoio no desenvolvimento dos sistemas de medidas e colaboração na análise dos resultados.

A Maria Aparecida e Farinha pelas discussões e auxílios nos cálculos realizados neste trabalho.

Ao Prof. Faria pelo incentivo e amizade.

A Yvone que com dedicação e paciência datilografou este trabalho.

Aos técnicos Dante e Marcos pela colaboração na parte técnica do trabalho.

A todos colegas, funcionários e demais Professores do Grupo pela colaboração e amizade.

Este trabalho foi realizado com o apoio financeiro da FAPESP e CNPq.

ÍNDICE

Lista de ilustrações.....	I
Lista de Tabelas	V
Resumo	VI
Abstract	VII
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
1.1 - Objetivos do Trabalho	1
1.2 - Histórico	2
1.3 - Conteúdo do Trabalho	5
CAPÍTULO II - PRINCÍPIOS BÁSICOS DE FUNCIONAMENTO DAS CÉLULAS SOLARES DE SILÍCIO MONOCRISTALINO.....	7
2.1 - Processo de absorção de luz em semicondutores e algumas considerações sobre o espectro solar	8
2.2 - Semicondutores.....	13
2.3 - A junção PN	16
2.3.1 - Junção PN polarizada	19
2.3.2 - Mecanismos de condução em uma junção PN ...	20
2.4 - Junção PN sob iluminação	25
2.4.1 - Expressão da corrente fotogerada por luz monocromática	32
2.4.2 - Eficiência quântica	35
2.5 - Circuito equivalente de uma célula solar ..	37
2.5.1 - Resistência série	39
2.5.2 - Resistência paralelo	41
2.6 - Profundidade de junção	42
2.7 - Principais fatores de perda em uma célula solar de silício	43
CAPÍTULO III - TECNOLOGIA DE FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES DE SILÍCIO MONOCRISTALINO	47
3.1 - Obtenção dos substratos	47

3.2 - Preparação dos substratos	49
3.3 - Formação da junção PN	49
3.3.1 - Difusão térmica	50
3.3.2 - Implantação iônica	51
3.4 - Camadas anti-refletoras	52
3.5 - Aplicação de contatos	53
3.6 - Células utilizadas neste trabalho	56
CAPÍTULO IV - MÉTODOS EXPERIMENTAIS UTILIZADOS NA CARACTERIZAÇÃO DAS CÉLULAS SOLARES DE SILÍCIO MONOCRISTALINO	57
4.1 - Característica corrente-tensão sob iluminação	58
4.1.1 - Determinação da resistência série	62
4.1.2 - Determinação de I_0 e A_0	64
4.1.3 - Circuito utilizado para a medida da característica sob iluminação	64
4.2 - Característica I-V no escuro	66
4.2.1 - Determinação da resistência paralelo	68
4.2.2 - Determinação de I_0 e A_0	70
4.2.3 - Circuito utilizado para a medida da característica de diodo da célula	72
4.3 - Medida da resposta espectral	72
4.3.1 - Montagem utilizada para a medida da resposta espectral	75
4.3.2 - Determinação do comprimento de difusão dos portadores minoritários da base (L_n).....	77
4.4 - Medida da profundidade de junção	80
4.4.1 - Método do desbaste em ângulo.....	80
4.4.2 - Método da oxidação anódica	82
4.4.3 - Método do arco trigonométrico	84
4.5 - Efeito da temperatura sobre o desempenho de uma célula solar	85

	4.5.1 - Circuito utilizado para a medida da característica I-V sob iluminação constante , com variação da temperatura	86
	4.6 - Medida de capacitância de junção em função da tensão inversa aplicada	89
	4.6.1 - Esquema da montagem utilizada nas medidas de capacitância de junção em função da tensão inversa aplicada	91
CAPÍTULO	V - RESULTADOS E CONCLUSÃO	95
	5.1 - Características das células utilizadas para as medidas	95
	5.2 - Desempenho das células determinado pelas características I-V sob iluminação	95
	5.2.1 - Resultados obtidos em medidas de resistência série	99
	5.3 - Determinação de A_0 , I_0 e R_p	102
	5.4 - Resposta espectral e comprimento de difusão dos portadores minoritários da base..	108
	5.5 - Medidas de corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto e eficiência em função de temperatura	114
	5.6 - Obtenção da tensão de barreira e concentração de dopantes aceitadores através das medidas de capacitância em função da tensão inversa aplicada.....	116
	5.7 - Resultados obtidos nas medidas de profundidade de junção	120
	5.8 - Conclusão	122
ANEXO	1 -	125
ANEXO	2 -	128
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	132

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA	1 - Diagrama de bandas de energia de um material <u>semi</u> condutor intrínseco	8
FIGURA	2 - Espectro solar para as condições AM1 e AMO	9
FIGURA	3 - Energia da banda proibida em função do momento pa ra semicondutores com transições diretas	10
FIGURA	4 - Energia da banda proibida em função do momento pa ra semicondutores com transições indiretas	12
FIGURA	5 - Coeficiente de absorção do silício em função do comprimento de onda	12
FIGURA	6 - Cristal de silício dopado (a) com fósforo e (b) com boro	14
FIGURA	7 - Diagramas de bandas de energia para semiconduto - res extrínsecos	15
FIGURA	8 - Diagrama de banda de energia dos semicondutores ti po P e tipo N quando separados	17
FIGURA	9 - Diagrama de banda de energia para uma junção PN..	
FIGURA	10 - Diagrama de energia para uma junção polarizada di retamente	20
FIGURA	11 - Diagrama de energia para uma junção polarizada in versamente	21
FIGURA	12 - Característica típica de uma junção PN polarizada	26
FIGURA	13 - Diagramas de bandas de energia para uma célula so lar sob iluminação	27
FIGURA	14 - Possíveis interações de fótons em uma junção PN..	28
FIGURA	15 - Característica corrente-tensão de uma célula so - lar no escuro e iluminada.....	29
FIGURA	16 - Característica típica de uma célula solar	31
FIGURA	17 - Circuito equivalente de uma célula solar ideal ..	37

FIGURA 18 - Circuito equivalente de uma célula solar real ...	38
FIGURA 19 - Resistência série e paralelo de uma célula solar.	39
FIGURA 20 - Efeito da resistência série sobre as curvas características de uma célula de silício	40
FIGURA 21 - Efeito da resistência paralelo sobre as curvas características de uma célula de silício.....	41
FIGURA 22 - Etapas de fabricação de uma célula de silício monocristalino	48
FIGURA 23 - Diagramas de bandas de energia de uma BSF	55
FIGURA 24 - Típica característica corrente-tensão de uma célula solar operando no modo fotovoltaico	59
FIGURA 25 - Desvio entre I_{cc} e I_L para uma célula com alta resistência série.....	61
FIGURA 26 - Determinação da resistência série	63
FIGURA 27 - Determinação de I_0 e A_0 utilizando-se valores de I_{cc} e V_{ca} para diversas intensidades de luz	65
FIGURA 28 - Circuito utilizado para as medidas de $I \times V$ sob iluminação	65
FIGURA 29 - Arranjo experimental utilizado na obtenção das características $I \times V$ sob iluminação	67
FIGURA 30 - Típica característica $\ln I \times V$ de uma célula solar no escuro	69
FIGURA 31 - Determinação da resistência paralelo.....	70
FIGURA 32 - Determinação de I_0 e A_0 utilizando-se a característica de diodo	71
FIGURA 33 - Arranjo experimental utilizado na medida das curvas $I \times V$ no escuro	72
FIGURA 34 - Contribuição das três regiões de uma célula de Si N/P à resposta espectral	74
FIGURA 35 - Arranjo experimental empregado para a medida da resposta espectral	76

FIGURA 36 - Refletividade na camada anti-refletora	79
FIGURA 37 - $(1-R)/Q V_S \alpha^{-1}$	80
FIGURA 38 - Desbaste em ângulo para medir a profundidade de junção	81
FIGURA 39 - Célula eletroquímica para oxidação anódica	82
FIGURA 40 - Esquema elétrico para oxidação anódica	83
FIGURA 41 - Descrição do método do arco trigonométrico para medidas de profundidade de junção	85
FIGURA 42 - Arranjo experimental utilizado nas medidas IxV com variação da temperatura	87
FIGURA 43 - Criostato utilizado para medir o desempenho da célula em função da temperatura	88
FIGURA 44 - Gráfico para a obtenção da voltagem de barreira e da concentração de átomos aceitadores(j.abrupta)..	92
FIGURA 45 - Gráfico para obtenção da voltagem de barreira e do gradiente de impurezas (junção gradual)	93
FIGURA 46 - Arranjo experimental utilizado para medir a capacitância em função da tensão inversa aplicada	94
FIGURA 47 - Características IxV obtidas para a célula 1436B...	96
FIGURA 48 - Dependência linear da corrente de curto-circuito com a radiação incidente para a célula 1436B.....	98
FIGURA 49 - Efeito da camada anti-refletora de SnO_2 sobre o desempenho da célula 11-20 para radiação simulada AM1	100
FIGURA 50 - Determinação da resistência série para a célula OS3D	101
FIGURA 51 - Característica $\ln I \times V$ da célula 12-6 para medidas realizadas no escuro	103
FIGURA 52 - Característica $I \times V$ no escuro para a célula 12-6	104
FIGURA 53 - Determinação de A_0 e I_0 utilizando a característica fotovoltaica de saída para a célula 12-4	104
FIGURA 54 - Comparação entre a curva experimental e teóricos para a célula 1436B.....	108

FIGURA 55 - Resposta espectral para a célula 11-19	109
FIGURA 56 - Comparação entre as eficiências quânticas das células 11-17, 1436B e 12-4	111
FIGURA 57 - Influência da profundidade de junção na resposta espectral	113
FIGURA 58 - Corrente de curto-circuito e voltagem de circuito aberto em função da temperatura para a célula 1436B.....	115
FIGURA 59 - Eficiência em função da temperatura para a célula 1436B	115
FIGURA 60 - Curva da capacitância da junção em função da tensão inversa aplicada para a célula 1436B	116
FIGURA 61 - $\frac{1}{C_j^2}$ Vs tensão inversa para a célula 11-19	118
FIGURA 62 - $\frac{1}{C_j^3}$ Vs tensão inversa para a célula 11-19	119
FIGURA 63 - Medida do ângulo no processo de desbaste	121

LISTA DE TABELAS

TABELA	V-1	- Características das células utilizadas nas medidas	97
TABELA	V-2	- Características fotovoltáicas sob radiação AM1 simulada	97
TABELA	V-3	- Resultados obtidos em medidas de resistência série	99
TABELA	V-4	- A_o , I_o e R_p obtidos através da característica IxV no escuro	102
TABELA	V-5	- A_o e I_o no intervalo de 0,45 a 0,55 volts ...	105
TABELA	V-6	- A_o e I_o obtidos pela característica IxV para diferentes intensidades de luz.....	106
TABELA	V-7	- Valor máximo da resposta espectral absoluta e comprimento de difusão dos portadores minoritários.....	110
TABELA	V-8	- Tensão de barreira e concentração de dopantes do substrato obtidos no gráfico $\frac{1}{C_j^2} \times V$ inversa	117
TABELA	V-9	- Tensão de barreira obtida no gráfico $\frac{1}{C_j^3} \times \ln^{-}$ versa	117
TABELA	V-10	- Valores obtidos nas medidas de profundidade de junção	121

RESUMO

Foram desenvolvidos sistemas de medidas visando a caracterização de células solares de silício monocristalino. Para isso, foram determinadas as características $I \times V$ no escuro e para diferentes níveis de iluminação. Curvas de resposta espectral e capacitância em função da tensão inversa aplicada foram também obtidas. Foi feita uma avaliação do comportamento dessas células em função da temperatura e realizadas medidas de profundidade de junção utilizando-se três métodos distintos. Os principais parâmetros, que determinam o desempenho dessas células, foram obtidos mostrando boa concordância com a teoria e com os resultados apresentados na literatura.

ABSTRACT

Systems of measurements were developed for the characterization of single crystal silicon solar cells. For that, the curves $I \times V$ were measured in the dark and for different intensity of illumination. Curves of spectral response and of capacitance as a function of the reciprocal of the voltage were also measured. The behavior of the cells as a function of temperature was analysed and also measurements of junction depth were made by three different methods. Values for the parameters that characterize the cells were obtained, showing a good agreement with theoretical values and also with already reported values.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 - Objetivos do Trabalho

Uma opção interessante na busca de fontes alternativas de energia é a conversão de energia solar em eletricidade. Células solares, ou células fotovoltaicas, podem converter a energia solar em energia elétrica. A energia obtida desta maneira apresenta vantagens como não ser poluente, ser renovável, de fácil manutenção e não necessitar de longas linhas de transmissão. Por outro lado, existem desvantagens, como a necessidade de acúmulo de energia e o fato de ainda não serem competitivas economicamente, na maioria dos casos, com outras fontes tradicionais de energia.

Esforços realizados mundialmente indicam que são cada vez maiores as possibilidades de que células solares forneçam parte das necessidades energéticas do mundo. Ou seja, dentro de alguns anos, a energia de origem fotovoltaica terá condições de concorrer economicamente com energias de outras fontes, principalmente em locais afastados e pouco habitados onde os combustíveis tradicionais não são facilmente encontrados.

No Brasil, país de condições excepcionais de insolação, a pesquisa com células solares começou há alguns anos. No Laboratório de Microeletrônica (LME) da Escola Politécnica da USP uma das etapas dessa pesquisa é o desenvolvimento de células solares de silício monocristalino. Neste trabalho, procuramos desenvolver técnicas de medidas para a caracterização das células obtidas no LME, visando a obtenção dos principais parâmetros que determinam o seu desempenho.

1.2- Histórico

A descoberta dos efeitos básicos responsáveis pelo funcionamento das células solares, teve início em 1817 com a descoberta do selenio por Berzelius, que também foi quem primeiro preparou, em 1820, o silício elementar. Seguiu-se a descoberta do efeito fotovoltaico em células eletrolíticas, por Becquerel em 1839, e a descoberta da fotocondutividade no selenio em 1873 por Willoughby Smith. Este último evento teve como consequência a observação do efeito fotovoltaico por Adams e Day, em 1876, que utilizaram estruturas de selenio no estado sólido. Em 1883, Fritts descreve a primeira célula fotovoltaica de selenio. Em 1904, a fotosensitividade de estruturas de óxido cuproso de cobre ($\text{Cu} - \text{Cu}_2\text{O}$) foi observada por Hallwachs, e em 1914 o efeito fotovoltaico foi pela primeira vez relacionado com a existência de uma camada de barreira de potencial elétrico. Posteriormente, a estrutura $\text{Cu} - \text{Cu}_2\text{O}$ foi cuidadosamente explorada e células foram desenvolvidas, bem como sua teoria de operação. Aplicações deste dispositivo surgiram primeiramente em fotometria e sistemas de controle de luz. Dispositivos de selenio também foram bastante desenvolvidos, conseguindo superar os de cobre, com eficiências de 1%, valor também obtido nos dispositivos de sulfeto de tálio, desenvolvido em 1941.

Em 1941 com o desenvolvimento da tecnologia do silício surgiu o primeiro dispositivo de silício monocristalino. Mas, somente doze anos depois, com o método de difusão de impurezas para a formação de junção PN é que a célula solar de silício tornou-se um dispositivo prático, com eficiência de conversão de 6%. Dois anos depois foi iniciada a produção industrial desses dispositivos. Com melhorias no processo de fabricação e desenvolvi-

mento da teoria de operação do dispositivo, a eficiência de conversão chegou a 14% em 1958. Foi nesta época, que a aplicação destas células em sistemas espaciais foi iniciada, tendo sido desenvolvidos dispositivos resistentes à radiação ionizante⁽¹⁾.

Enquanto isso, alguns desenvolvimentos foram realizados com outras células como a de arseneto de galio que tornou-se promissora como um dispositivo de alta eficiência para operar em altas temperaturas. Por outro lado as células de sulfeto de cádmio e telureto de cádmio também tornaram-se promissoras porque sua fabricação na forma de filmes apresentava algumas vantagens principalmente em relação ao custo. Entretanto, o desenvolvimento e aceitação dessas células esbarraram em problemas tais como baixa eficiência de conversão, degradação de seu desempenho etc.

Algumas tentativas para a comercialização e utilização das células solares de silício, por volta de 1956, falharam também devido ao alto custo do dispositivo. Entretanto, com o surgimento da era espacial, concluiu-se que a célula solar era o único dispositivo capaz de suprir quantidades significativas de energia no espaço por longos períodos, com um mínimo de peso e relativo baixo custo. Em 1958, os Estados Unidos e também a URSS lançaram seus primeiros satélites utilizando células solares como principal fonte de energia.

Na década de 70, com o surgimento da crise de energia, aumentou o interesse em células solares para aplicações terrestres.

Como o processo para formar uma junção PN, por difusão térmica, com o silício é lento e realizado a temperaturas altas podendo degradar as propriedades de transporte dos portadores minoritários, algumas alternativas novas⁽²⁾ têm sido exploradas, como por exemplo, implantação iônica, barreira Schottky e heterojunções com camadas transparentes condutoras.

Eficiências entre 14% e 16% têm sido obtidas com o processo de fabricação por implantação iônica que é mais controlável em profundidade de penetração e nível de dopagem que o processo de difusão.

No caso de célula MIS (Metal-Isolante-Semicondutor), filmes finos de 100 Å, de metais como o alumínio ou cromo/cobre são depositados, normalmente por evaporação, sobre um substrato de silício tipo P. Uma fina camada de isolante de 10 a 20 Å é condicionada entre o metal e o semicondutor com a propriedade de impedir o fluxo de portadores majoritários sem impedir o transporte de portadores minoritários. Com isso, a célula exibe maior tensão de circuito aberto. Eficiências de 12% podem ser obtidas através deste método.

No caso de heterojunções é usada uma fina camada de óxido de índio ou algum semicondutor transparente em lugar de metal. Estas camadas podem ser obtidas por evaporação, "sputtering", deposição por fase de vapor (CVD) ou por aspersão ("spray") sobre a superfície de silício. Eficiências de conversão de 13 a 15% têm sido obtidas com heterojunções.

Células de filmes finos têm sido obtidas pela deposição de materiais semicondutores, tais como, CdS, GaAs, Si e InP em substratos de baixo custo, tais como, vidro, metal ou plástico. A espessura mínima requerida do semicondutor depositado deve ser no mínimo, o recíproco do coeficiente de absorção para fótons com energia exatamente acima da banda proibida.

Duas formas de células de silício de filmes finos têm sido pesquisadas: policristalino e amorfo. Silício policristalino pode ser depositado sobre grafite, alumínio, silício metalúrgico e substratos de vidros usando evaporação, CVD e eletrodeposição.

Ultimamente têm sido pesquisadas, com muito interesse,

células de filmes finos de silício amorfo (a-Si). O coeficiente de absorção do a-Si é muito maior que o do silício monocristalino, particularmente acima de 1,8 eV, e apenas cerca de um micrometro (μm) de material é suficiente para absorver a maior parte dos comprimentos de onda do espectro solar contra 25 ~ 50 μm necessário para o silício policristalino. Camadas de a-Si podem ser depositadas por "sputtering", evaporação, CVD ou plasma / "glow discharge". Os resultados mais positivos têm sido obtidos por "glow discharge". Alguns anos atrás, eficiências de 5,5% eram obtidas em células de 10^{-2}cm^2 e cerca de 1% em células com grandes áreas. Alguns laboratórios têm conseguido 3 a 4% em áreas de até 40 cm^2 e, acredita-se que 7-8% possam ser alcançados em áreas grandes.

Resultados mais recentes, do fim do ano de 1982, reportam estruturas de células de silício amorfo obtidas pelo método "glow discharge", com eficiência de conversão superior a 10% em área de cerca de 1 cm^2 .

1.3- Conteúdo do Trabalho

Este trabalho será apresentado na seguinte forma:

No capítulo 2 veremos como funciona uma célula solar de silício monocristalino. Utilizando os diagramas de bandas de energia, discutiremos os principais mecanismos apresentados na literatura, que explicam a condução de corrente. Faremos também uma análise do circuito equivalente de uma célula, detalhando seus componentes. No capítulo 3 explicaremos as etapas de construção de uma célula solar de silício monocristalino, comentando as diferentes maneiras de formação de uma junção PN. No capítulo 4 analisaremos os principais parâmetros que determinam o desempenho de uma célula e apresentaremos os procedimentos ex

perimentais empregados para a sua caracterização. Finalmente, no capítulo 5, os resultados serão analisados e comparados com a teoria apresentada.

X CAPÍTULO II

PRINCÍPIOS BÁSICOS DE FUNCIONAMENTO DAS CÉLULAS SOLARES DE SILÍCIO MONOCRISTALINO

O efeito fotovoltaico pode ser definido como a geração de um potencial quando radiação eletromagnética ioniza a região dentro ou próxima da barreira de potencial de um semicondutor⁽³⁾.

Para se obter energia útil através da interação da luz com o semicondutor é necessário que:

- a) Os fótons sejam absorvidos e pares elétrons-lacunas criados.
- b) Os pares elétrons-lacunas criados pela absorção de fótons sejam separados por um campo elétrico, antes de se recombinar.
- c) Existam propriedades de transportes adequadas, para que os portadores alcancem o circuito externo.

Com o objetivo de entender como se dá a absorção dos fótons e como os pares elétrons-lacunas são separados e conduzidos até os contatos para serem coletados, analisaremos neste capítulo os semicondutores e os mecanismos de corrente, através dos diagramas de bandas de energia. O estudo do circuito equivalente de uma célula solar e a análise de seus componentes (resistências em série e paralelo), também poderão facilitar o entendimento das curvas características obtidas nos próximos capítulos. E, finalmente, um estudo dos mecanismos de perdas em eficiência poderá dar subsídios para a análise dos resultados obtidos.

2.1- Processo de Absorção de Luz em Semicondutores e Algumas Considerações Sobre o Espectro Solar

O processo de geração de pares elétrons-lacunas por absorção de luz em um semiconductor se deve à sua estrutura de bandas de energia (Fig.1). Este processo consiste na excitação de

FIGURA 1 - Diagrama de bandas de energia de um material semiconductor intrínseco.

elétrons da banda de valência para a banda de condução quando da absorção de fótons com energia superior à da banda proibida. O número total de fótons, que podem ser absorvidos, será determinado pela banda proibida do semiconductor e pela distribuição energética dos fótons da radiação incidente. Na Figura 2 pode-se observar que quanto menor a banda proibida do semiconductor, maior a porção de energia do espectro solar que pode ser absorvida. Por outro

FIGURA 2 - Espectro solar para as condições AM1 e AM0.⁽⁴⁾ As linhas tracejadas indicam a energia da banda proibida dos referidos semicondutores.

lado, o coeficiente de absorção (α) do semiconductor varia com o comprimento de onda dos fótons incidentes e isto permite determinar em que região dentro do semiconductor ocorre a absorção. Lembremos que em toda transição devem se conservar a energia e o momento das partículas envolvidas. Se a transição da banda de valência para a banda de condução for direta, ou seja, se o momento do elétron permanece invariável (Fig.3), o coeficiente de absorção será:⁽⁵⁾

$$\alpha = K_{\text{direto}} (h\nu - E_g)^{1/2} \quad (2.1)$$

FIGURA 3 - Energia da banda proibida em função do momento para se micondutores com transições diretas.

Se a transição for indireta, ou seja, necessitar de interação de um fóton , um elétron e um fônon para que a rede provoque uma mudança no momento (Fig.4), o coeficiente de absorção será:⁽⁵⁾

$$\alpha = K_{\text{indireto}} (h\nu - E_g)^2 \quad (2.2)$$

Muitos materiais utilizados na fabricação de células so lares são absorvedores diretos (GaAs e CdS), que precisam de espessura muito pequena ($\sim 1 \mu\text{m}$). Os absorvedores indiretos (Si) precisam de espessuras grandes ($\sim 100 \mu\text{m}$). A Figura 5 mostra o coeficiente de absorção do silício em função do comprimento de onda. Como o coeficiente de absorção aumenta com a energia dos fótons, a absorção de fótons com alta energia se dará na região

próxima à superfície, enquanto que os fótons com energia mais baixa conseguem penetrar mais no material.

Como as células utilizadas neste trabalho foram feitas para aplicações terrestres, devemos considerar o espectro solar tal como é recebido na superfície da terra. A distribuição da energia emitida pelo sol, em função do comprimento de onda, pode ser considerada como a de um corpo negro a 6000K. Quando a luz solar passa pela atmosfera, o espectro é alterado pela absorção seletiva de fótons de determinados comprimentos de onda, pelos gases, vapores e partículas existentes na atmosfera. Como há muito pouca absorção na região do visível, as células solares são feitas de modo a possuir alta resposta nesta região do espectro. A absorção na região do ultravioleta se deve principalmente às transições eletrônicas nos átomos e moléculas do oxigênio, do nitrogênio e do ozônio na atmosfera superior. Este tipo de absorção normalmente impede que fótons com comprimento de onda menor que $0,3 \mu\text{m}$ atinjam a superfície da Terra. A absorção na região do infravermelho do espectro é principalmente devida à vibração e rotação de moléculas de água e gás carbônico. Bandas de absorção de vapor de água ocorrem em $0,7$, $0,8$, $0,9$, $1,1$, $1,4$, $1,9$ e $2,7 \mu\text{m}$ e são muito importantes na baixa atmosfera (abaixo de 50km) ⁽⁶⁾.

O parâmetro mais comumente utilizado para indicar estas mudanças no espectro e na intensidade da luz incidente é a massa de ar "M" que é definida como $M = 1/\cos Z$, onde Z é o ângulo entre a linha vertical que passa pelo observador e a linha do observador ao sol. Quando o sol está a 60 graus da vertical, $M=2$ e a intensidade incidente correspondente é de $72-75 \text{ mW/cm}^2$. A condição AM0 corresponde a 135 mW/cm^2 que é obtida fora da atmosfera, e a condição AM1 representa a luz do sol na superfície da Terra para ótimas condições de tempo com o sol no zênite, que corresponde a 100 mW/cm^2 .

FIGURA 4 - Energia da banda proibida em função do momento para semicondutores com transições indiretas.

FIGURA 5 - Coeficiente de absorção do silício em função do comprimento de onda.

A Figura 2 mostra uma comparação do espectro da luz solar para as condições AMO e AM1.

2.2- Semicondutores

Na Figura 1, o diagrama de bandas de energia representa uma estrutura de cristal ideal, onde não há impurezas químicas e onde os átomos não sofrem deslocamentos de suas posições. Neste caso o cristal é chamado de semicondutor intrínseco. O número de elétrons da banda de condução é igual ao número de lacunas na banda de valência, pois ambos resultam das transições de elétrons através da banda proibida.

As propriedades elétricas de um semicondutor ficam bastante alteradas, quando átomos de impurezas são introduzidos no cristal. Como essas propriedades dependem sobretudo dos átomos de impurezas (dopantes), o cristal é chamado semicondutor extrínseco.

Vamos considerar o átomo de silício, que é o material utilizado nas células que serão estudadas nos próximos capítulos.

O átomo de silício tem quatro elétrons de valência. Se doparmos o cristal de silício com átomos que possuem cinco elétrons de valência, por exemplo, fósforo, arsênico ou antimônio, teremos uma condução por elétrons (portadores majoritários). Se a dopagem for feita com átomos que tenham três elétrons de valência, por exemplo, boro, alumínio, índio (impurezas aceitadoras), teremos uma condução por lacunas (portadores majoritários).

A Figura 6.a mostra um modelo simples da estrutura do silício dopado com fósforo. Quatro elétrons de valência do átomo doante (P) formam ligações covalentes com os elétrons dos quatro átomos de silício adjacentes. O quinto elétron permanece fracamente ligado ao núcleo do átomo de fósforo por forças de interação coulombianas. Fônons de pequenas energias podem liberar este elétron fazendo com que passe para a banda de condução.

FIGURA 6 - Cristal de silício dopado (a) com fósforo e (b) com boro

O modelo da Figura (6.b) apresenta o silício dopado com boro. Em uma das ligações covalentes fica faltando um elétron. A ionização do átomo de impureza corresponde à formação de uma lacuna na rede cristalina de silício. A Figura (7.a) mostra o diagrama de bandas de energia para o semiconductor dopado com átomos doadores. Neste caso temos um elétron na banda de condução para cada átomo doador no cristal. Como o cristal irá conduzir principalmente devido aos elétrons na banda de condução, o semiconductor será do tipo N. Como o número de elétrons na banda de condução é maior que o número de lacunas na banda de valência, o nível de Fermi estará localizado próximo à banda de condução. A condutividade de elétrons em um cristal tipo N será dada por:

a) - Semicondutor tipo N

b) - Semicondutor tipo P

FIG. 7 - Diagramas de bandas de energia para semicondutores extrínsecos.

$$\sigma_n = q \mu_n n \quad (2.3)$$

onde q é a carga eletrônica, μ_n é a mobilidade dos elétrons e n sua concentração. A Figura (7.b) mostra que os átomos aceptadores criam lacunas na banda de valência e, portanto, o semicondutor é do tipo P. Como o número de lacunas na banda de valência é maior que o número de elétrons na banda de condução, o nível de Fermi estará localizado próximo à banda de valência. A condutividade de lacunas em um cristal tipo P será dada por:

$$\sigma_p = q \mu_p p \quad (2.4)$$

onde μ_p é a mobilidade das lacunas e p sua concentração.

2.3- A Junção PN

O que ocorre em uma junção PN pode ser explicado em termos do movimento de cargas positivas (lacunas) e de cargas negativas (elétrons).

Quando uma junção PN é formada, na ausência de uma diferença de potencial externa, a diferença na concentração de portadores majoritários, na região próxima à junção, produz um movimento de difusão desses portadores: lacunas do lado P para o lado N e elétrons do lado N para o lado P. A corrente que surge no sentido de retomar a condição de equilíbrio é proporcional ao gradiente de portadores e é chamada corrente de difusão. Expressando em termos de densidade de corrente elétrica, temos para o caso de elétrons:

$$J_D^n = q D_n \frac{dn}{dx} \quad (2.5)$$

onde $\frac{dn}{dx}$ é o gradiente da concentração e D_n é o coeficiente de difusão. Para lacunas temos:

$$J_D^p = q D_p \frac{dp}{dx} \quad (2.6)$$

Os coeficientes de difusão para elétrons e lacunas estão relacionados com as respectivas mobilidades através das relações de Einstein:

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n \quad (2.7)$$

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p \quad (2.8)$$

D_n e D_p também estão relacionados com o comprimento de difusão, L_n e L_p , para elétrons e lacunas respectivamente, e com o tempo de vida, τ_n e τ_p para esses portadores, através das relações:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \quad (2.9)$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad (2.10)$$

Os elétrons saindo do lado N, deixam ali íons de átomos doadores formando uma região de carga espacial positiva. As lacunas saindo do lado P, deixam ali uma região de carga espacial negativa (Fig.8 e Fig.9). Este fluxo de elétrons e lacunas continua até que os níveis de Fermi nestas regiões se igualem.

FIGURA 8 - Diagrama de banda de energia dos semicondutores tipo P e tipo N quando separados

Quando isto acontece, um estado de equilíbrio é estabelecido entre as regiões N e P e corresponde ao aparecimento da barreira de potencial ϕ_0 . Com a formação da barreira de potencial, os porta-

FIGURA 9 - Diagrama de banda de energia para uma junção PN

dores majoritários, dos dois lados, ficam impedidos de atravessar a junção pois são repelidos pela região de carga espacial de mesmo sinal (Fig.9). Só atravessa a junção aquele portador majoritário que dispõe de energia suficiente para sobrepujar a barreira. Por outro lado, os portadores minoritários ficam sujeitos à ação do campo elétrico $\vec{E}$ que existe na região da junção (Fig.9), formando assim uma corrente de deriva, que age no sentido de anular a corrente de difusão devido ao gradiente de portadores. Expressando a corrente de deriva em termos de densidade de corrente elétrica temos:

$$J_n^E = q \mu_n n E_x \quad \text{para elétrons} \quad (2.11)$$

$$J_p^E = q \mu_p p E_x \quad \text{para lacunas} \quad (2.12)$$

onde E_x é a componente do campo elétrico na direção x.

2.3.1- Junção PN Polarizada

Quando a junção for polarizada diretamente (Fig.10), a barreira de potencial diminui ($\phi = \phi_0 - qV$), ou seja, diminui a largura da região de carga espacial (d).

FIGURA 10 - Diagrama de energia para uma junção polarizada diretamente.

Quando a junção for polarizada inversamente (Fig.11) a barreira de potencial aumenta ($\phi = \phi_0 + qV$), ou seja, aumenta a largura da região de carga espacial (d).

2.3.2- Mecanismos de Condução em uma Junção PN

Sem polarização, temos da região N para a região P a difusão de elétrons J_D^n , na direção x (Fig.9). A difusão de lacunas proporciona J_D^p , também na direção x. Além do movimento de portadores majoritários, temos o movimento de portadores minoritários

FIGURA 11 - Diagrama de Energia para uma junção polarizada inversamente

(elêtrons do lado P que se aproximam da junção e são arrastados pelo campo $\vec{E}$, indo para a região N, o mesmo acontecendo com as lacunas da região N) através da junção, J_n^e e J_p^e que fluem em direções opostas (Fig.9).

Sob condição de equilíbrio, a corrente resultante através da junção é zero pois $J_D^n = J_n^e$, $J_D^p = J_p^e$.

Quando a junção é inversamente polarizada, a altura da barreira de potencial aumenta, diminuindo conseqüentemente a corrente de difusão dos portadores majoritários, por ter que superar uma barreira maior. Como a corrente de deriva, devido aos portadores minoritários, é praticamente independente da polarização, as correntes não se compensam e surge uma corrente resultante de portadores minoritários através da junção.

Quando a junção é polarizada diretamente, a altura da barreira de potencial diminui para os portadores majoritários, aumentando conseqüentemente a corrente de difusão devido a estes portadores. Por outro lado, a corrente de deriva, devido aos portadores minoritários é praticamente independente da polarização. Isto quebra o equilíbrio existente e produz uma corrente resultante cuja magnitude depende da magnitude da diferença de potencial aplicada.

A expressão da corrente, para os dois casos, é obtida resolvendo-se as equações de Poisson e de continuidade de carga, com as apropriadas condições de contorno⁽⁷⁾.

A equação de Poisson relaciona o campo elétrico com a densidade de carga espacial.

$$\nabla \epsilon = \frac{\rho}{\kappa} \quad (2.13)$$

A equação de continuidade indica que o número de portadores gerados menos o número de portadores recombinados, em um determinado volume, deve ser igual ao fluxo de portadores pela superfície que limita esse volume:

$$\frac{1}{q} \nabla \cdot J_p = G_p - R_p \quad \text{para lacunas} \quad (2.14)$$

$$\frac{1}{q} \nabla \cdot J_e = G_n - R_n \quad \text{para elétrons} \quad (2.15)$$

Para simplificar o cálculo vamos supor que:

- 1 - A estrutura é planar, de maneira que as variações ocorrem somente ao longo do eixo x.
- 2 - As regiões N e P são altamente dopadas de modo que a queda de tensão seja desprezível.
- 3 - A região de carga espacial é livre de portadores e, além disso, sua largura $\bar{x}$ muito menor que o comprimento de difusão. Isto implica que os portadores passam por ele sem se recombinar.
- 4 - Os contatos da região N e da região P são perfeitamente ôhmicos e se encontram longe da junção.

Como o campo elétrico nas regiões N e P é quase nulo, a corrente de deriva de minoritários será desprezível. Por outro lado, a corrente de minoritários será importante, uma vez que o número de portadores injetados Δ_p^n e Δ_n^p é comparável aos das concentrações no equilíbrio n_{p0} e p_{n0} . Portanto, basta calcular as correntes de difusão de portadores minoritários nos planos $x = \omega_n$ e $x = \omega_p$, onde ω_n é o limite da região de carga espacial com a região N e ω_p com a região P.

Utilizando a equação de continuidade para lacunas, vamos calcular a concentração de lacunas na região N.

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_p^n}{dx} = G_p - R_p \quad (2.16)$$

$$\text{como} \quad R_p = R_{p0} + \frac{\Delta_p^n}{\tau_p} \quad (2.17)$$

onde $\Delta_p^n = p_n - p_{n0}$

e como $G_{p0} = R_{p0}$ no equilíbrio obtêm-se:

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_p^n}{dx} = - \frac{\Delta_p^n}{\tau_p} \quad (2.18)$$

Substituindo a equação de difusão de lacunas na equação (2.18) obtêm-se a equação para $p_n(x)$:

$$\frac{d^2 p_n}{dx^2} = \frac{p_n - p_{n0}}{D_p \tau_p} \quad (2.19)$$

As condições de contorno são:

$$p_n(x) = p_{n0} \quad \text{para } x = \infty$$

$$p_n(x) = p_{n0} e^{\frac{qV}{kT}} \quad \text{para } x = w_n$$

onde V é o potencial aplicado.

Resolvendo esta equação obtêm-se:

$$p_n(x) = p_{n0} + p_{n0} \left[e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right] e^{-\frac{[x-w_n]}{\sqrt{D_p \tau_p}}} \quad (2.20)$$

onde $\sqrt{D_p \tau_p}$ é o comprimento de difusão das lacunas (L_p)

Portanto, a corrente de lacunas no plano $x = w_n$ será dada por:

$$J_p^n(\omega_n) = -qD_p \left. \frac{dp_n}{dx} \right|_{x=\omega_n} = \frac{qD_p p_{n0}}{L_p} \left[e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right] \quad (2.21)$$

Repetindo os cálculos, obtêm-se a corrente de elétrons no plano $x = \omega_p$. Então, temos:

$$J_e^p(\omega_p) = -\frac{qD_e n_{p0}}{L_n} \left[e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right] \quad (2.22)$$

Portanto, a corrente total será

$$J = q \left[\frac{D_p p_{n0}}{L_p} + \frac{D_e n_{p0}}{L_n} \right] \left[e^{\pm \frac{qV}{kT}} - 1 \right] \quad (2.23)$$

ou $J = J_0 \left[e^{\pm \frac{qV}{kT}} - 1 \right] \quad (2.24)$

onde $J_0 = q \left[\frac{D_p p_{n0}}{L_p} + \frac{D_e n_{p0}}{L_n} \right] \quad (2.25)$

O sinal no expoente indica quando a polarização é direta e quando é indireta. A resposta típica de uma junção PN é vista na Fig.12.

2.4- Junção PN Sob Iluminação

Quando iluminamos uma das superfícies da célula a radiação irá gerar pares elétrons-lacunas na região P. O elétron, sendo portador minoritário, deverá ser arrastado pelo campo $\vec{E}$, para a região N. O mesmo acontece com as lacunas da região N que serão arrastadas para a região P. Por outro lado, as lacunas que permaneceram na região P, pois encontraram a barreira de potencial, i-

FIGURA 12 - Característica típica de uma junção PN polarizada.

rão carregá-la positivamente e os elétrons que ficaram na região N irão carregá-la negativamente. Os pares gerados na região de carga espacial serão separados pelo campo elétrico.

Se a célula está em circuito aberto, a corrente total deve ser nula. Portanto, a altura da barreira deve mudar automaticamente para compensar a corrente fotogerada (J_L). Isto dá origem a uma diferença de potencial nos terminais da célula que é denominada tensão de circuito aberto (V_{ca}), ou seja, a junção, automaticamente, sofre uma polarização direta. Se o circuito externo é simplesmente um fio, com resistência não apreciável, a corrente que flui é denominada corrente de curto-circuito (J_{cc}) e será igual à soma das correntes de portadores minoritários fotogerados em ambas as regiões da junção:

$$J_{cc} = J_L = J_{Le} + J_{Lp} \quad (2.26)$$

onde J_{Le} é a corrente de deriva de elétrons da região P para a região N e J_{Lp} é a corrente de deriva de lacunas de região P para a região N. A Figura 13 mostra os diagramas de bandas de e - nergia para os dois casos.

FIG.13 - Diagramas de bandas de energia para uma célula solar sob iluminação a) em curto-circuito e b) em circuito-aberto.

Quando uma resistência é conectada externamente ao circuito (Fig.14), temos uma queda de tensão nesta resistência e, portanto, diminui a barreira de potencial para os portadores majoritários, diminuindo a polarização. Consequentemente a corrente de difusão através da junção aumenta.

FIGURA 14 - Possíveis interações de fótons em uma junção PN

1- Transmissão ($h\nu < E_G$)

2- Reflexão

3-4-5- Pares elétrons-lacunas gerados e coletados pela junção

6- Pares gerados longe da junção e que sofrem recombinação.

Temos então, através da junção, duas correntes: uma de diodo (J_{diodo}), que é dada por:

$$J_{\text{diodo}} = J_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.27)$$

pois a junção está sendo polarizada diretamente. A outra é a corrente fotogerada (J_L), que flui no sentido oposto ao da corrente de diodo. A corrente total é:

$$J(V) = J_{\text{diodo}} - J_L \quad (2.28)$$

A equação (2.28) indica que a característica corrente-tensão de uma junção iluminada (Fig.15) é simplesmente a característica no escuro deslocada de J_L . Esta suposição está baseada no "princípio de superposição" que só é válido se as equações que descrevem o sistema forem lineares.

FIGURA 15 - Característica corrente-tensão de uma célula solar no escuro e iluminada.

As equações que controlam a densidade de portadores são: a equação de Poisson, a equação de continuidade e as expressões

das correntes de deriva e difusão.

$$J_e = q D_n \frac{dn}{dx} + q \mu_n n \epsilon_x \quad (2.29)$$

$$J_p = - q D_p \frac{dp}{dx} + q \mu_p p \epsilon_x \quad (2.30)$$

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_e}{dx} = G_e - R_e \quad (2.31)$$

$$- \frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} = G_p - R_p \quad (2.32)$$

$$\frac{d\epsilon}{dx} = \frac{\rho}{\kappa} \quad (2.33)$$

Este sistema não é linear, mas podemos torná-lo linear dividindo o dispositivo em três regiões: regiões N e P quase neutras e região de depleção (vazia de portadores livres).

Nas regiões N e P quase neutras, em condições de alta injeção, as equações de continuidade tornam-se lineares e o princípio de superposição é aplicável e neste caso a corrente total em cada região é a soma da corrente de diodo e corrente fotogerada.

Na região de carga espacial, o campo elétrico depende das concentrações de elétrons e lacunas, implicando em equações não lineares, logo o princípio de superposição não é aplicável. Portanto, o princípio de superposição é aplicável somente quando:

- 1 - As regiões quase neutras dominarem na determinação da fotocorrente e da corrente no escuro. Ou seja, quando a largura da região de carga espacial é muito menor que o comprimento de difusão.
- 2 - Idêntico a 1, mas com contribuição da região de carga espacial na fotocorrente.

- 3 - Corrente de diodo dominada pela região de carga espacial e fotocorrente dominada pelas regiões neutras.
- 4 - Idêntico a 3, mas com contribuição das regiões neutras na corrente de diodo.

Logo, a equação (2.28) será válida desde que a célula se enquadre dentro de um modelo que leve em consideração as condições enumeradas acima.

Para obtermos a característica corrente-tensão da célula devemos variar a resistência de carga desde a condição de curto-circuito até circuito aberto (Fig.16).

FIGURA 16 - Característica típica de uma célula solar.

Nas condições de curto-circuito e circuito aberto, a potência de saída é zero. Por outro lado, existe um valor de resistência de carga para o qual a célula fornece potência máxima (P_m).

de saída (Fig.16). A potência máxima de saída corresponde à maior área, do retângulo (R_1), possível de ser obtida sob a curva corrente-tensão.

A eficiência da célula é dada pela razão entre a potência máxima de saída ($I_{\max} \times V_{\max}$) e o produto entre potência total incidente por unidade de área e a área da célula.

O fator de preenchimento é definido como a relação entre a potência máxima de saída e o produto $I_{cc} \times V_{ca}$, ou seja, é a relação entre os retângulos R_1 e R_2 obtidos na curva corrente-tensão (Fig.16). Através deste fator pode-se avaliar a qualidade de uma célula solar. Normalmente, para uma boa célula de silício, o fator de preenchimento é maior que 0,75.

2.4.1- Expressão da Corrente Fotogerada por Luz Monocromática

A expressão para J_L é obtida⁽⁸⁾ considerando-se as três regiões da célula: região N, região P e região de carga espacial. As regiões N e P são uniformes em dopagem e, portanto, o campo elétrico é quase nulo e as correntes de portadores minoritários são apenas correntes de difusão. A contribuição da região de carga espacial será considerada simplesmente a coleção de todos os pares gerados nessa região.

Quando luz de comprimento de onda λ incide sobre a superfície de um semicondutor, a taxa de geração de pares elétrons - lacunas como função da distância x da superfície é:

$$G(\lambda) = \alpha(\lambda)F(\lambda)[1-R(\lambda)] e^{(-\alpha(\lambda)x} \quad (2.34)$$

onde $F(\lambda)$ é o número de fótons incidentes por cm^2 por segundo ,

$R(\lambda)$ é o número de fótons refletidos na superfície e $\alpha(\lambda)$ é o coeficiente de absorção do material.

Para lacunas da região N a equação de continuidade para portadores é dada por:

$$\frac{1}{q} \left(\frac{dJ_p}{dx} \right) - G_p + (p_n - p_{n0})/\tau_p = 0 \quad (2.35)$$

A equação da corrente de lacunas é dada por:

$$J_p = q \mu_p p_n \varepsilon - q D_p (dp_n/dx) \quad (2.36)$$

onde ε é o campo elétrico, p_n é a densidade de portadores minoritários fotogerados e p_{n0} é a densidade de portadores minoritários no equilíbrio, no escuro.

Combinando as equações (2.34), (2.35) e (2.36) temos :

$$D_p \frac{d^2(p_n - p_{n0})}{dx^2} + \alpha F(1-R) e^{-\alpha x} - \frac{(p_n - p_{n0})}{\tau_p} = 0 \quad (2.37)$$

A solução geral é dada por:

$$(p_n - p_{n0}) = A \cosh\left(\frac{x}{L_p}\right) + B \sinh\left(\frac{x}{L_p}\right) - \frac{\alpha F(1-R) \tau_p}{(\alpha^2 L_p^2 - 1)} e^{-\alpha x} \quad (2.38)$$

onde L_p é o comprimento de difusão, $L_p = (D_p \tau_p)^{1/2}$

As condições de contorno são:

$$D_p \frac{d(p_n - p_{n0})}{dx} = S_p (p_n - p_{n0}) \quad \text{para } x = 0$$

Consideramos $x=0$ no contato da região N. No limite com a região de carga espacial ($x=x_j$) o número de portadores minoritários em excesso é reduzido a zero, uma vez que eles são arrastados pelo campo elétrico; então temos $p_n - p_{n0} = 0$ para $x = x_j$. Utilizando as condições de contorno na equação (2.38) obtém-se a densidade de lacunas. Para obter a corrente de lacunas, calcula-se a derivada de $(p_n - p_{n0})$ no limite com a região de carga espacial ($x = x_j$) e obtém-se:

$$J_p = \frac{(qF(1-R)\alpha L_p)}{(\alpha^2 L_p^2 - 1)}$$

$$\left[\frac{(\frac{S_p L_p}{D_p} + \alpha L_p) - e^{(-\alpha x_j)} (\frac{S_p L_p}{D_p} \cosh(\frac{x_j}{L_p}) + \sinh(\frac{x_j}{L_p}))}{\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh(\frac{x_j}{L_p}) + \cosh(\frac{x_j}{L_p})} - \alpha L_p e^{(-\alpha x_j)} \right]$$

(2.39)

onde S_p é a velocidade de recombinação superficial das lacunas.

Repetindo o procedimento anterior para as seguintes condições de contorno:

$$(n_p - n_{p0}) = 0 \quad \text{para } (x = x_j + \omega)$$

$$S_n(n_p - n_{p0}) = -D_n \left[d(n_p - n_{p0})/dx \right] \quad \text{para } (x=H)$$

onde ω é a largura da região de carga espacial e H é a largura da célula toda, obtém-se:

$$J_n = \left[\frac{qF(1-R)\alpha L_n}{(\alpha^2 L_n^2 - 1)} e^{(-\alpha(x_j + \omega))} \right]$$

$$\left[\alpha L_n - \frac{\frac{S_n L_n}{D_n} (\cosh(\frac{H'}{L_n}) - e^{-\alpha H'}) + \sinh(\frac{H'}{L_n}) + \alpha L_n e^{-\alpha H'}}{\frac{S_n L_n}{D_n} \sinh(\frac{H'}{L_n}) + \cosh(\frac{H'}{L_n})} \right] \quad (2.40)$$

onde $H' = H - (x_j + \omega)$ e S_n é a velocidade de recombinação superficial dos elétrons .

A corrente devido à região de carga espacial é dada pelo número total de portadores nela gerados, supondo que o campo elétrico é suficientemente forte para separar os pares antes que se recombinem. Então tem-se

$$J_{CE} = q F(1 - R) \cdot e^{-\alpha x_j} [1 - e^{-\alpha \omega}] \quad (2.41)$$

A corrente total fotogerada para um dado comprimento de onda é dada pela soma das equações (2.39), (2.40) e (2.41). Como podemos ver, a corrente fotogerada J_L depende da velocidade de recombinação superficial , dos componentes de difusão dos portadores minoritários, do coeficiente de absorção e da largura das regiões de topo, de base e de carga espacial.

2.4.2- Eficiência Quântica

A eficiência quântica de uma célula solar é definida como o número de pares elétrons-lacunas coletados sob condições de

curto-circuito, relativo ao número de fótons absorvidos pela célula. Portanto, dividindo a corrente fotogerada por $qF(\lambda)(1-R)$, onde q é a carga eletrônica, $F(\lambda)$ o número de fótons incidentes por cm^2 por segundo e R o número de fótons refletidos na superfície temos:

$$Q_E(\lambda) = \frac{J(\lambda)}{qF(\lambda)(1-R)} \quad (2.42)$$

Para verificar o comportamento da eficiência quântica para baixos valores do coeficiente de absorção (vermelho) temos: $\alpha x_j \ll 1$; $\alpha \omega \ll 1$, de modo que a única contribuição apreciável à fotocorrente é dada pelos elétrons (célula N/P). Então de (2.41) e (2.42) temos que:

$$Q_E = \frac{J_n}{q \frac{I_0}{h\nu} (1-R)} = \frac{\alpha L_n}{\alpha^2 L_n^2 - 1} \left[\alpha L_n - \psi \right] e^{-\alpha(x_j + \omega)} \quad (2.43)$$

onde ψ é

$$\psi = \frac{\frac{S_n L_n}{D_n} \left(\cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right) - e^{(-\alpha H')} \right) + \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \alpha L_n e^{(-\alpha H')}}{\frac{S_n L_n}{D_n} \sinh\left(\frac{H'}{L_n}\right) + \cosh\left(\frac{H'}{L_n}\right)}$$

Se $H' \gg L_n$ e $\alpha H' \gg 1$ temos que:

$$\psi = \frac{\frac{S_n L_n}{D_n} e^{\frac{H'}{L_n}} + e^{\frac{H'}{L_n}}}{\frac{S_n L_n}{D_n} e^{\frac{H'}{L_n}} + e^{\frac{H'}{L_n}}} = 1$$

Como

$$e^{-\alpha(x_j + \omega)} \approx 1 \quad \text{obtem-se}$$

$$Q_E = \frac{\alpha L_n}{\alpha^2 L_n^2 - 1} (\alpha L_n - 1) = \frac{1}{[1 + (\alpha L_n)^{-1}]} \quad (2.44)$$

que é a equação de uma reta cujo coeficiente angular é $\frac{1}{L_n}$

2.5- Circuito Equivalente de uma Célula Solar

O circuito equivalente de uma célula ideal é mostrado na Figura 17.

FIGURA 17 - Circuito equivalente de uma célula solar ideal

Neste caso temos $R_s = 0$ e $R_p = \infty$. A corrente que flui no

circuito externo, segundo o princípio de superposição é:

$$I = I_D - I_L = I_0 \left[e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right] - I_L \quad \text{ERRADO} \quad (2.45)$$

$$I_L - I_D = I_T + I_P \rightarrow \boxed{I_T = I_L - I_D - I_P} \quad (1)$$

onde I_L é a corrente fotogerada e I_D a corrente de diodo.

Em uma célula real devemos levar em conta a resistência série e a resistência paralelo. Neste caso, o circuito equivalente é dado pela Figura 18.

FIGURA 18 - Circuito equivalente ⁽⁹⁾ de uma célula solar real

$$\boxed{I_T = I_L - I_0 \left(e^{\frac{q(V - I_T R_S)}{A_0 k T}} - 1 \right) - \left(\frac{I_T R_S + V_T}{R_P} \right)}$$

Neste caso, a corrente que flui no circuito externo, segundo o princípio de superposição, é dada por

$$I = I_0 \left[e^{\frac{q(V - I R_S)}{A_0 k T}} - 1 \right] + \frac{(V - I R_S)}{R_P} - I_L \quad \text{ERRADO} \quad (2.46)$$

onde A_0 é o fator de qualidade do diodo. Aqui estamos utilizando o modelo mais simplificado que considera somente um termo exponencial. Outros modelos de circuitos levam em consideração dois ou mais termos exponenciais.

2.5.1- Resistência Série

A resistência série (R_s) tem componentes na resistência dos contatos das regiões de topo e de base, na resistência da região de base e na resistência de folha da fina camada difundida (Fig.19)

FIGURA 19 - Resistência série e paralelo de uma célula solar

O efeito da resistência série sobre a curva característica é visto na Figura 20.

FIGURA 20 - Efeitos da resistência série sobre as curvas características de uma célula de silício com área de 2 cm^2 (9)

A resistência série não altera a tensão de circuito aberto (V_{ca}) de uma célula, entretanto seu fator de preenchimento (FF) é seriamente reduzido. A corrente de curto-circuito sofre também uma redução, assumindo valor abaixo do valor da fotocorrente, causada pela queda de tensão através da resistência série⁽⁹⁾.

Para reduzir a resistência série seria desejável entre outras medidas, ter uma região difundida com alta concentração de dopantes além de uma junção profunda. Essas condições, entretanto, representam o oposto daquelas necessárias, para se obter alta eficiência. Pode-se contornar esse problema tomando a região difundida fina mas altamente dopada, e ao mesmo tempo otimizando a forma da grade de contatos ôhmicos. Se aumentarmos o número de dedos da grade e diminuirmos a largura dos dedos e a distância entre eles, conseguiremos diminuir a resistência série.

Este procedimento, implica uma contradição pois se aumen

tarmos muito o número de dedos estaremos aumentando a área da superfície coberta pelos contatos, o que implica em menor quantidade de luz incidindo na junção e consequentemente uma queda na eficiência de conversão. É necessário, portanto, estabelecer condições de compromisso.

Para minimizar o efeito da resistência série sobre a eficiência de uma célula solar é necessário que $R_s < \frac{0.5\Omega}{A}$, onde A é a área do dispositivo em cm^2 (9,17)

2.5.2- Resistência Paralelo

FIGURA 21 - Efeito da resistência paralelo sobre as curvas características de uma célula de silício com área de 2 cm^2 (9)

A resistência paralelo surge em consequência da fuga de corrente através da junção, em virtude dos defeitos ali existentes -

tes. Deve-se enfatizar as fugas laterais e as imperfeições na superfície da célula que pode fazer com que a metalização perfure a junção.

A Figura 21 mostra o efeito da resistência paralelo sobre a curva característica de uma célula. A resistência paralelo não afeta a corrente de curto-circuito, mas a tensão de circuito aberto e o fator de preenchimento são reduzidos quando a resistência paralelo diminui .

Para minimizar o efeito da resistência paralelo sobre a eficiência de uma célula solar é necessário que $R_p > 1000 \Omega \cdot A$, onde A é a área do dispositivo em cm^2 ⁽⁹⁾

2.6- Profundidade de Junção

Na região difundida de uma célula, os principais mecanismos de perda são: a recombinação superficial, causada por ligações insatisfeitas dos átomos do cristal e por impurezas presentes na superfície, e a recombinação interna na "camada morta" próxima à superfície, que é causada por tensões, deslocamentos e impurezas indesejáveis introduzidas durante a difusão do fósforo ou outros passos do processo de fabricação. O efeito dessas perdas por recombinação, na região de topo, podem ser minimizados reduzindo-se a profundidade de junção, o que irá contribuir para um aumento da fotocorrente e da eficiência.

Quando diminuimos a profundidade da junção, diminuimos também o número de portadores gerados na região de topo e aumentamos o número de portadores gerados dentro ou próximo da junção. Como a junção fica mais próxima da superfície, aumenta a probabilidade dos portadores de alcançarem a junção e diminui a probabilidade de recombinação dos mesmos. Portanto, pode-se pensar que quan

to menor a profundidade da junção melhor a eficiência. Mas, tem-se que levar em conta também que se a profundidade da junção for muito pequena pode ocorrer a perfuração da junção pela metalização da grade coletora, daí a necessidade de se encontrar uma profundidade de junção e uma forma geométrica para a grade coletora adequados para obter uma melhor eficiência.

2.7- Principais Fatores de Perda em uma Célula Solar de Silício C

Os fatores de perda podem ser divididos em dois grupos ^(10,11)

- 1- Aqueles que dependem do tipo de material utilizado ou de parâmetros de fabricação do dispositivo.
 - 2 - Aqueles que são inalteravelmente determinados por princípios físicos básicos (geração e separação de cargas e recombinação).
- 1.a - O primeiro fator de perdas está associado à energia perdida devido aos fótons com comprimento de onda longo. A célula para estes fótons se torna transparente, ou seja, os fótons atravessam a célula. É através do coeficiente de absorção do material (α) (Fig.5) que se pode medir a quantidade de luz absorvida. A luz incidente na superfície cai em intensidade por um fator de $1/e$ para cada $1/\alpha$ de distância percorrida dentro do material.
 - 1.b - Neste grupo temos ainda perdas de energia devido aos fótons com comprimento de onda curto, que possuem mais energia do que a necessária para a criação de pares elétron-lacuna, sendo esse excesso de energia perdido pela criação de fonons, pois as forças atrativas existentes entre o e -

lêtron e a lacuna são intensas nesta região.

De 100% da energia que incide sobre uma célula de silício, cerca de 23% é perdido no processo 1.a e 33% perdido no processo 1.b.

Esses dois fatores representam processos físicos básicos impossíveis de redução, uma vez escolhido o semicondutor.

- 2.a - A quantidade de energia utilizada na geração de pares elétron-lacuna é igual à diferença de energia entre o topo da banda de valência e o fundo da banda de condução (banda proibida). A máxima tensão idealmente fornecida pela célula, é a tensão de circuito aberto (V_{ca}) que é sempre menor que a tensão associada à banda proibida. Isto se explica, pois a altura da barreira de potencial é determinada pela diferença entre os níveis de Fermi nos materiais tipo N e P. Esses níveis são função da concentração de impurezas e da temperatura e estão normalmente localizados dentro da banda proibida, de tal modo que a altura da barreira é sempre menor que a banda proibida. Este fator é conhecido como fator voltagem e representa cerca de 17,6% das perdas de energia restantes.
- 2.b - Outro fator de perda está relacionado com a eficiência de coleção, ou seja, a maioria dos pares elétron-lacuna criados pela absorção dos fótons não são gerados dentro da região de carga espacial da junção PN. Portanto, em média, são coletados somente aqueles portadores gerados à distância de um comprimento de difusão da junção. A maioria dos pares gerados a grandes distâncias da junção recombina-se sem atingi-la, diminuindo, desta forma, a eficiência de coleção que é definida como a razão entre o número de pares separados pelo campo elétrico da junção e o número total de

pares gerados. Isto se deve ao fato de que a espessura da célula é sempre superior ao comprimento de difusão, cujo valor nas células de silício monocristalino gira em torno de 100µm. Este fator representa uma perda de 4,8% da energia incidente sobre a célula.

2.c - O fator de preenchimento é responsável por uma perda de cerca de 4,7%. Nas células de silício monocristalino o valor de FF é aproximadamente 0,75. O FF possui um limite físico, embora possa ser influenciado pelo material e pelo processo tecnológico usados, devido ao fato de ser a característica I-V determinada pela equação de diodo que é exponencial, e, portanto, qualquer retângulo inscrito sobre a curva deve ter uma área menor que o retângulo externo.

2.d - O fator de qualidade do diodo (A_0), que representa cerca de 1,7% de perda da energia incidente sobre a célula, tem um efeito sobre a eficiência de conversão através de um arredondamento do joelho da característica I-V. Este fator é determinado pelo termo A_0 no expoente da equação de diodo

$$I_{\text{diodo}} = I_0 \left(e^{\frac{qV}{A_0 kT}} - 1 \right) \quad (2.47)$$

A teoria de difusão para junção PN prediz uma única forma exponencial do tipo da equação (2.47) com $A_0=1$. Entretanto, uma característica mais complicada é geralmente observada, a qual é frequentemente aproximada por uma característica de acordo com a equação (2.47) mas com $A_0 \sim 2$.

2.e - As perdas devido à reflexão, resistência série e resistência paralelo, podem ser reduzidas a um ponto tal que qualquer esforço, no sentido de obter ganhos significantes em

eficiência de conversão, torna-se desprezível

Podemos esperar então, que para 100% da energia incidente sobre uma célula típica de silício monocristalino de junção PN, cerca de 14,2% serão aproveitados, desde que não tenham sido exercidos esforços no sentido de otimizar as características da célula, isto é, tentar diminuir os fatores de perdas que aparecem com o processo tecnológico. Até aqui temos analisado o caso de uma célula fabricada para fins comerciais. Se conseguíssemos otimizar todos os fatores de perdas, encontraríamos eficiências de cerca de 24%. Com o desenvolvimento dos processos tecnológicos tem-se conseguido, em laboratório, eficiências da ordem de 19%.

CAPÍTULO III

TECNOLOGIA DE FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES DE SILÍCIO MONOCRISTALINO

Este capítulo descreve o processo de fabricação de células solares de silício monocristalino. Primeiramente veremos como são obtidas as lâminas de silício tipo P que servem como substrato para a formação da região de base das células. Em seguida, veremos como é formada a junção PN e finalmente como são obtidos os contatos da célula e as camadas anti-refletoras (Fig.22)

3.1- Obtenção dos Substratos

As propriedades elétricas dos dispositivos semicondutores de silício são determinadas por uma pequena porcentagem de átomos dopantes na rede do cristal. Na elaboração dos dispositivos, o número de impurezas presentes no material deve ser pequeno comparado ao número de dopantes a ser adicionado. Isto significa que o silício deve ter um grau de pureza muito alto; as impurezas residuais são medidas em partes por bilhão.

O silício monocristalino é obtido pelo processo Czochralski⁽¹²⁾. Neste processo, uma determinada quantidade de silício puro é fundida em um cadinho de quartzo. Uma "semente" de orientação conhecida, com um sistema de resfriamento adequado é colocada em contato com o silício líquido. O sistema é puxado lentamente por um processo automático à velocidade de várias dezenas de milímetros por hora. Esse sistema apresenta ainda movimento de rotação em relação a um eixo perpendicular ao cadinho, que passa pela semente. O gradiente de temperatura existente na in -

FIG. 22 - Etapas de fabricação de uma célula de silício monocrystalino.

terface semente-líquido, criado pelo resfriamento contínuo da semente, faz com que o silício líquido cristalice sobre a semente, adquirindo uma secção transversal que depende da velocidade de puxamento, da temperatura do cadinho e do gradiente de temperatura na interface. Obtêm-se, assim, lingotes de silício monocristalino com diâmetro na faixa de 25 a 125 mm e com comprimento de até aproximadamente 1000 mm. Para uso fotovoltaico, o cristal produzido é geralmente do tipo P. Durante a fusão do silício, é introduzida uma certa quantidade de boro, que é o material dopante doador. A seguir, o lingote monocristalino é usinado mecanicamente e cortado em lâminas por meio de uma serra diamantada. Esta serra, com espessura de cerca de 300 micrômetros, produz no lingote uma incisão de aproximadamente 320 micrômetros de espessura. A espessura das lâminas cortadas é função de seu diâmetro, por razões de estabilidade mecânica.

3.2- Preparação dos Substratos

A superfície da célula solar deve ser especialmente preparada para garantir propriedades elétricas e óticas adequadas. Com o tratamento das lâminas de silício, utilizando-se finos abrasivos e ataques químicos, produz-se superfícies que possibilitam uma boa aderência dos metais usados para contatos elétricos. Superfícies texturizadas, obtidas através de ataque químico anisotrópico têm sido preparadas para propiciar melhor absorção da luz.

3.3- Formação da Junção PN

Para se obter uma célula de homojunção PN, a lâmina tipo P deve ser submetida a um processo de dopagem que modifica as características elétricas da camada superficial. Isto é feito incor

porando-se átomos de fósforo, em número maior do que os de boro já existentes no substrato, na região que se define como sendo a de topo da célula, tornando-a tipo N. Esta é uma das fases mais importantes do processo de fabricação de uma célula solar, pois envolve a determinação de parâmetros tais como, concentração superficial, profundidade de junção, resistência de folha e tempo de vida na região difundida da célula. O processo de dopagem tradicional é feito por difusão térmica. Um método alternativo, que têm sido bastante utilizado é o da implantação iônica.

3.3.1- Difusão Térmica

A operação de difusão é normalmente efetuada em duas etapas distintas⁽¹³⁾:

- 1 - Deposição - as impurezas desejadas são introduzidas na superfície do semiconductor.
- 2 - Penetração - difusão das impurezas para se obter uma distribuição de concentração adequada no semiconductor.

O processo de deposição é feito colocando-se a lâmina do semiconductor em um forno através do qual flui um gás inerte contendo as impurezas desejadas. As impurezas podem ser introduzidas no gás portador, utilizando-se diferentes tipos de fontes, das quais as mais usuais são:

- a - fonte sólida - neste caso, as impurezas são introduzidas no gás portador por evaporação. O material da fonte é normalmente um óxido da impureza desejada, por exemplo, P_2O_5 para fósforo, B_2O_3 para o boro, As_2O_3 para o arsênico, Sb_2O_4 para o antimônio. O óxido é transportado à superfície do semiconductor pelo gás e então é reduzido na superfície. Um exemplo desta reação pode ser:

Uma camada de óxido é formada sobre a superfície durante este processo.

b - fonte líquida - neste caso, o gás passa através de um frasco contendo o líquido, reage com ele e produz a impureza desejada. Como exemplo de fontes líquidas temos POCl_3 para o fósforo e BBr_3 para o boro.

A penetração das impurezas, no substrato, é feita a uma temperatura elevada ($800 - 1000^\circ\text{C}$) e o perfil de concentração é uma função do tempo e do coeficiente de difusão na temperatura de penetração.

Geralmente, a concentração de impurezas permanece constante em uma região aproximadamente igual a um terço da profundidade de junção e então decai rapidamente com a distância dentro da lâmina⁽¹⁴⁾. Esta região de concentração constante é chamada "camada morta" e é caracterizada por uma alta densidade de deslocamentos e baixo tempo de vida, implicando em altas taxas de recombinação superficial.

3.3.2- Implantação Iônica

Na formação da junção por implantação iônica, íons de átomos de impurezas são acelerados a energias de dezenas a centenas de keV e quando incidem sobre o semicondutor, penetram, parando a uma certa profundidade⁽¹⁵⁾.

Os íons a serem implantados são produzidos na fonte de íons do implantador, no qual o elemento que fornece os íons está presente na forma gasosa: BF_3 , PH_3 , AsH_3 . Os íons desejados são separados de quaisquer outros eventualmente presentes, por exem -

plo, com uso de um separador eletromagnético. Os íons selecionados são acelerados com o uso de um forte campo elétrico, penetrando na rede do cristal. O implantador controla a energia e a quantidade de íons que incidem no semicondutor.

Uma vantagem do método de implantação iônica é que junções muito rasas ($< 0,2\mu\text{m}$) podem ser feitas sempre com concentração superficial bastante alta. Outra vantagem é que o perfil de concentração implantado pode ser ajustado para produzir um alto campo elétrico em toda a região difundida. No processo de difusão, este campo tende a ser eliminado próximo à superfície, devido à dependência da concentração em relação ao coeficiente de difusão das impurezas. Como desvantagem do processo de implantação podemos citar: o custo do equipamento e a geração de defeitos na rede cristalina do substrato, que surgem nos processos de freamento dos íons no cristal. Esses defeitos introduzidos na rede podem, com tratamento térmico, ser eliminados com a restauração da forma cristalina do material. Entretanto, as baixas tensões de circuito aberto encontradas⁽¹⁶⁾ em dispositivos implantados de Si e GaAs comparadas às estruturas difundidas, com mesmos níveis de concentração na região de topo, sugerem que nem todos os defeitos próximos à junção são removidos depois de se utilizar as técnicas de tratamento térmico para essa finalidade.

3.4- Camadas Anti-refletoras

O índice de refração do silício, compreendido entre 3,5 e 4,0 para fótons do espectro solar, implica em uma reflexão de cerca de 35% da luz que incide numa superfície não tratada de silício. Essa parcela refletida não é convertida, resultando assim num dos fatores que diminuem o rendimento das células. Pode-se, entretanto, reduzir essa reflexão com o uso de uma camada anti-re

fletora. Essas camadas, geralmente obtidas através de evaporação a vácuo, crescimento térmico, CYD, aspersão e "sputtering", são de materiais transparentes como por exemplo, SiO , SiO_2 , SnO_2 , TiO_2 , Ta_2O_5 , Si_3N_4 e outros. A espessura dessas camadas é de um quarto de comprimento de onda, na região de máxima densidade de fótons do espectro solar, que incide na superfície terrestre, de tal modo a obter reflexão mínima.

3.5- Aplicação de Contatos

Os contatos da região posterior e da região de topo da célula devem ser contatos ôhmicos com resistência mais baixa possível. O contato da região de topo, que recebe a luz, deve ter a forma de uma grade, de modo a cobrir o mínimo possível de superfície, pois a superfície coberta pela metalização não contribui para o efeito fotovoltaico, e para manter a resistência série em valores aceitáveis. Qualquer resistência de contato significativa é adicionada à resistência série da célula reduzindo a sua potência de saída. A região posterior da célula é totalmente coberta pelo contato, pois a luz não deve passar através desta área. Deste modo, fótons que não tenham sido absorvidos em uma primeira passagem através da célula, podem ser refletidos e ainda contribuir para o efeito fotovoltaico.

Como exemplo, para melhor entender o efeito da geometria da grade nos contatos, vamos descrever as características de células comerciais. Nestas, a grade coletora consiste de uma única barra ao longo da célula, ligada perpendicularmente a seis dedos. Com esse tipo de grade, células de silício N/P com áreas de 4 cm^2 , apresentam resistência série de $0,20 - 0,25 \Omega$. Aumentando o número de dedos da grade de contato, a resistência série diminui consideravelmente. A célula violeta, que possui profundida

de de junção reduzida e baixa concentração de dopantes na região difundida, utiliza uma estrutura de contato, que consiste de 60 linhas finas, ao invés de 6, e apresenta uma resistência série de $0,05\Omega$ para a mesma área, de 4 cm^2 . Lindmayer e Allison⁽¹⁷⁾, mostraram que a resistência série aumenta linearmente com a resistência de folha e diminui com o quadrado do número de dedos na grade coletora.

Em células de silício, têm sido utilizados contatos de níquel, paládio, cobre e suas combinações, obtidos por deposição química ou eletrodeposição. Muito utilizados também são os contatos de Ni, Au, Ag, Ti, Pd e Al obtidos por evaporação ou "sputtering".

Os contatos que têm se mostrado mais adequados⁽¹⁸⁾, para células de silício, são feitos de titânio/paládio/prata que são obtidos por evaporação a vácuo, utilizando-se máscaras ou fotorezista para a formação dos dedos da grade coletora. O titânio proporciona baixa resistência de contato e boa aderência ao silício, a prata proporciona boa condutividade elétrica e o paládio entre o titânio e a prata é utilizado para evitar reações eletroquímicas. Essa estrutura ternária é largamente utilizada em células solares para uso espacial. Muito utilizados para aplicações terrestres são os contatos obtidos através da deposição de níquel por processo de troca iônica seguido da formação de uma liga de níquel-silício e finalmente mergulhando-se a célula em uma liga de estanho e chumbo fundidos. Atualmente a metalização também têm sido feita, utilizando-se técnicas de serigrafia⁽¹⁹⁾, através da aplicação de pastas condutoras.

Na região posterior das células de silício N/P têm sido utilizados, com bons resultados, contatos de alumínio. Particularmente, se a liga Al-Si for feita a uma temperatura de $700 - 800^\circ\text{C}$, um contato BSF ("back surface field")⁽²⁰⁾ pode ser obtido,

possibilitando uma melhora na eficiência de coleção e na tensão de circuito aberto. Esses contatos (BSF) são normalmente produzidos por evaporação de alumínio, seguida de difusão durante quatro horas em uma temperatura de 800°C , na região adjacente ao contato posterior. As vantagens de uma célula com BSF podem ser vistas na Figura 23. A barreira de potencial ϕ_p entre as duas regiões de base tende a "confinar" os portadores minoritários na região P mais levemente dopada. Se w_p é da ordem ou menor que o comprimento de difusão na região 1, elétrons que

FIGURA 23 - Diagrama de banda de energia de uma BSF ⁽²⁰⁾

poderiam ter sido perdidos na superfície posterior, ao contrário, aumentam a corrente de curto-circuito. A tensão de circuito aberto aumenta devido a três fatores: aumento de corrente de curto-circuito, diminuição da corrente de saturação devido à redução da recombinação, na superfície posterior, de elétrons injetados da região de topo na base e aumento da tensão terminal devido a uma contribuição da barreira de potencial ϕ_p .

3.6- Células Utilizadas neste Trabalho

As células utilizadas neste trabalho, foram produzidas de acordo com as etapas de fabricação mostradas na Figura 22. A junção PN foi formada pelo processo de difusão térmica, utilizando-se como fonte de impurezas o POCl_3 . As camadas anti-refletores são de SiO_2 , obtidos por crescimento térmico e CVD, ou SnO_2 obtidos por aspersão ("Spray"). Os contatos da região de topo são de alumínio-silício, obtidos por "Sputtering" ou de níquel-estanho-chumbo, obtidos da maneira indicada no item 3.5. Os contatos da região posterior são de alumínio obtidos por evaporação, ou de níquel-estanho-chumbo.

CAPÍTULO IV

MÉTODOS EXPERIMENTAIS UTILIZADOS NA CARACTERIZAÇÃO DAS CÉLULAS SOLARES DE SILÍCIO MONOCRISTALINO

Sendo a célula solar um conversor de energia, é importante conhecer os parâmetros relacionados com o seu desempenho e processo de fabricação. Alguns desses parâmetros, tais como, eficiência de conversão (η), tensão de circuito aberto (V_{ca}), corrente de curto-circuito (I_{cc}), fator de preenchimento (FF), potência máxima de saída (P_{max}), resistência série (R_s) e paralelo (R_p), corrente de saturação (I_o) e o fator de perfeição da junção (A_o) foram obtidos, neste trabalho, através das características corrente-tensão utilizando-se dois métodos: característica sob iluminação, onde a célula opera no modo fotovoltaico e característica no escuro onde a célula opera como um diodo.

O comprimento de difusão dos portadores minoritários da região de base (L_n), foi obtido através da medida da resposta espectral, que também nos dá informações a respeito da influência da profundidade da junção e da camada anti-refletora sobre o desempenho da célula.

A tensão de barreira (V_B) e a concentração de dopantes aceitadores na região de base (N_A), foram obtidos através da medida da capacitância de junção (C_j) em função da tensão inversa aplicada⁽²¹⁾.

A profundidade de junção (x_j) foi medida utilizando-se três métodos distintos: oxidação anódica, desbaste em ângulo e pelo processo do arco trigonométrico⁽²²⁾.

Finalmente, utilizando-se um criostato, que permite variar a temperatura da célula entre 5 e 60°C foi avaliado o de -

sempenho das células em função da variação da temperatura.

Convém salientar que nenhum resultado experimental será apresentado nesse capítulo. Todas as Figuras referem-se a situações típicas.

4.1- Característica Corrente-tensão Sob Iluminação

Neste caso, a característica corrente-tensão é obtida incidindo-se sobre a célula um feixe de luz de intensidade constante e conhecida, enquanto se faz variar uma resistência de carga entre as condições de circuito aberto e curto-circuito.

Como vimos no capítulo 2, de acordo com o princípio de superposição, a corrente resultante que flui nos terminais da célula é igual à diferença entre a corrente direta através da junção PN e a corrente fotogerada. A equação que descreve a característica corrente-tensão é:

$$I = I_0 \left[e^{\frac{q(V-IR_s)}{A_0 k T}} - 1 \right] - I_L \quad (4.1)$$

onde I é a corrente terminal, V a tensão terminal, R_s a resistência série, I_0 a corrente de saturação, A_0 o fator de perfeição da junção, q a carga eletrônica, k a constante de Boltzmann, T a temperatura absoluta e I_L a corrente fotogerada que, como vimos, é proporcional à intensidade da luz incidente, quando mantida a distribuição espectral da radiação.

De acordo com o circuito equivalente da célula (Fig.18), a corrente que flui nos terminais da célula passa através da resistência série, resultando em uma queda de tensão, e assim a tensão medida nos terminais da célula é menor que a tensão através da junção. A curva característica típica de uma célula solar sob ilu

minação é mostrada na Figura 24.

FIGURA - 24 - Típica característica corrente-tensão de uma célula solar operando no modo fotovoltaico.

Sendo muito pequena a corrente perdida devido à resistência em paralelo e como estamos trabalhando com altos níveis de corrente, não incluímos na equação (4.1) o termo V/R_p .

Quando a resistência de carga for infinita, a corrente nos terminais da célula é zero. Fazendo $I=0$ na equação (4.1), encontramos a tensão de circuito aberto:

$$V_{ca} = \frac{A_0 k T}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (4.2)$$

como $I_L \gg I_O$ temos

$$V_{ca} = \frac{A_0 k T}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_O} \right) \quad (4.3)$$

Quando a resistência de carga for igual a zero, a tensão nos terminais da célula é nula. Substituindo $V=0$ na equação (4.1) encontramos a corrente de curto-circuito:

$$I_{cc} = I_O e^{\frac{q I_{cc} R_s}{A_0 k T}} - I_L \quad (4.4)$$

$$\text{se } I_L \gg I_O \text{ e } - \frac{q I_{cc} R_s}{A_0 k T} \quad (4.5)$$

então

$$I_{cc} \approx - I_L \quad (4.6)$$

ou seja, a corrente de curto-circuito é igual à corrente fotogerada, somente quando a resistência série for desprezível, ou a intensidade de luz incidente suficientemente baixa, de tal modo que os efeitos de uma resistência série possam ser desprezados. Isto quer dizer que:

$$\frac{A_0 k T}{q} \ln \frac{I_L}{I_O} = V_{ca} \gg - I_{cc} R_s \quad (4.7)$$

$$\text{ou seja } R_s \ll V_{ca} / I_L \quad (4.8)$$

O desvio entre a corrente de curto-circuito e a fotocorrente para

uma célula com alta resistência série é mostrada na Figura 25.

FIGURA 25 - Desvio entre I_{cc} e I_L para uma célula com alta resistência série⁽²³⁾

A célula fornecerá a sua potência máxima para um determinado valor da resistência de carga. Na curva característica (Fig.24), esta potência está representada pelo retângulo de máxima área inscrito na curva:

$$P_{m\acute{a}x} = V_{m\acute{a}x} \cdot I_{m\acute{a}x} \quad (4.9)$$

A eficiência de conversão da célula é calculada por:

$$\eta = \frac{V_{m\acute{a}x} \cdot I_{m\acute{a}x}}{P_{in} \cdot A} \quad (4.10)$$

onde P_{in} é a potência incidente por unidade de área e A a área da célula.

O fator de preenchimento, definido como a relação entre a potência máxima de saída e o produto da tensão de circuito aberto pela corrente de curto-circuito será então calculado como:

$$FF = \frac{V_{m\acute{a}x} \cdot I_{m\acute{a}x}}{V_{ca} \cdot I_{cc}} \quad (4.11)$$

Deste modo a eficiência da célula poderá ser expressa por:

$$\eta = FF \cdot \frac{I_{cc} \cdot V_{ca}}{P_{in} \cdot A} \quad (4.12)$$

ou seja, à medida que FF tende a um, a célula é mais eficiente.

4.1.1- Determinação da Resistência Série

A resistência série, neste trabalho, foi avaliada pelo método de Wolf e Rauschembach⁽²³⁾. Neste caso, é traçada a característica corrente-tensão da célula para duas intensidades de luz diferentes (Fig.26) mantendo-se constante a temperatura e o espectro da luz incidente. Não há necessidade de se conhecer a magnitude da intensidade de luz incidente. Escolhe-se um ponto sobre cada curva $I \times V$, correspondente a um deslocamento ΔI em relação à respectiva corrente de curto-circuito. Se a resistência série fosse nula, a reta que une os dois pontos seria paralela ao eixo das correntes, pois a variação da intensidade luminosa apenas deslocaria verticalmente as curvas $I \times V$. Como há resistência série, a queda de tensão nesta resistência depende da corrente de curto-circuito e a reta que une os dois pontos se inclina em relação à vertical. A diferença de tensão ΔV entre os dois pontos correspon

dentess é;

$$\Delta V = R_s (I_{cc1} - I_{cc2}) \quad (4.13)$$

É conveniente escolher ΔI de tal forma que o ponto correspondente se situe na região próxima ao "joelho" das curvas $I \times V$, que é a região mais afetada pela resistência série.

FIGURA 26 - Determinação da resistência série

Para se obter melhor precisão pode-se traçar uma terceira curva $I \times V$, para uma terceira intensidade de luz, mantendo-se a temperatura e o espectro constantes e tomar o valor médio

dos três valores obtidos.

4.1.2- Determinação de I_0 e A_0

Para determinar os valores da corrente de saturação e do fator de perfeição da junção, podemos utilizar a característica sob iluminação, variando-se a intensidade da luz incidente e determinando-se, para cada caso, a tensão de circuito aberto e a corrente de curto-circuito. Da relação (4.3) temos que:

$$V_{ca} = \frac{A_0 k T}{q} \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_0}\right) \quad (4.14)$$

Neste caso, estamos considerando que a resistência série da célula é baixa, ou que a intensidade de iluminação é suficientemente baixa de tal forma que $I_{cc} = I_L$.

Fazendo um gráfico de $\ln I_{cc} \times V_{ca}$, obtém-se uma reta de coeficiente angular $\frac{q}{A_0 k T}$ e coeficiente linear $\ln I_0$ (Fig.27).

4.1.3- Circuito Utilizado para a Medida da Característica $I \times V$ sob Iluminação

As características corrente-tensão sob iluminação foram obtidas utilizando-se o circuito da Figura 28.

FIGURA 27 - Determinação de I_0 e A_0 utilizando-se valores de I_{cc} e V_{ca} para diversas intensidades de luz.

FIGURA 28 - Circuito utilizado para as medidas de $I \times V$ sob iluminação.

Utilizando o circuito da Figura 28 podemos simular uma resistência de carga do circuito que varie entre as condições de circuito aberto e curto-circuito e assim podemos traçar uma curva $I \times V$ diretamente em um registrador X-Y. Para essa medida utilizamos um resistor de referência de $0,1\Omega$ que permite obter o valor da corrente de curto-circuito da célula.

A medida da intensidade da luz incidente sobre a célula é feita utilizando-se uma célula calibrada (Solarex) colocada na mesma posição da célula a ser medida.

Durante a medida, a temperatura da célula é mantida constante fazendo-se circular água de refrigeração no suporte onde ela é fixada. Para a obtenção de bom contato, a região de base da célula é presa ao suporte por meio de vácuo e o contato na grade coletora da região de topo da célula é feito sob pressão. Tanto no suporte, como no eletrodo que faz o contato na região de topo foi depositada uma película de ouro, possibilitando, desta maneira, melhor contato ôhmico. A necessidade de bons contatos ficou evidente no decorrer do desenvolvimento da montagem do sistema de medidas. O esquema da montagem utilizada para as medidas de característica corrente-tensão sob iluminação é o mostrado na Figura 29.

Utilizamos, nas medidas, um gerador H-P modelo 3310A, um registrador da H-P modelo 7001 AM, filtros atenuadores neutros Oriel e uma lâmpada (250w - 120v) de Tungstênio - Helogênio Sylva - nia.

4.2- Característica $I \times V$ no Escuro

Neste caso, a célula é encarada como um diodo. A medida é feita com a célula no escuro, aplicando-se uma tensão no sentido direto em seus terminais. A característica $I \times V$ obtida é a descrita pela equação.

FIG. 29 - Arranjo experimental utilizado na obtenção das características I x V sob iluminação.

$$I = I_0 \left[e^{\frac{q}{A_0 k T} (V - I R_s)} - 1 \right] + \frac{(V - I R_s)}{R_p} \quad (4.15)$$

A diferença entre a característica $I \times V$ no escuro e sob iluminação está na ausência da fotocorrente I_L e no sentido da corrente terminal. Por outro lado, esta corrente circula através da resistência série da célula e, portanto, a tensão terminal é maior que a tensão através da junção PN. A curva característica de diodo será do tipo da mostrada na Figura 30. Nesta Figura também podemos ver os efeitos da resistência série e da resistência paralelo. A corrente que passa através da resistência paralelo é mostrada na Figura 30 pela curva $I = V/R_p$. Se subtraímos esta corrente da corrente direta de diodo obteremos uma nova curva, que é diferente da curva experimental para baixos níveis de injeção e que não apresenta os efeitos da resistência paralelo. Portanto, é neste intervalo de tensão (0 até 0,1V) que devemos avaliar a resistência paralelo. Como podemos notar, a curva obtida não segue um modelo baseado em uma única exponencial. Uma melhor aproximação seria um modelo com duas exponenciais⁽²⁴⁾: uma com fator de qualidade da junção igual a um ($A_0 \approx 1$), para altos níveis de injeção e outra com fator de qualidade igual ou maior que dois ($A_0 \geq 2$), para baixos níveis de injeção. Neste caso teríamos uma equação do tipo:

$$I = I_{01} \left[e^{\frac{q(V - I R_s)}{k T}} - 1 \right] + I_{02} \left[e^{\frac{q(V - I R_s)}{A_0 k T}} - 1 \right] + \frac{(V - I R_s)}{R_p} \quad (4.16)$$

4.2.1- Determinação da Resistência Paralelo

Como a resistência paralelo afeta a característica da célula para baixas densidades de correntes, como visto na Figura 30,

FIGURA 30 - Típica característica $\ln I \times V$ de uma célula solar no es
curo.⁽²³⁾

sua avaliação é feita no intervalo de 0 a 0,1 Volts. Para isto traçamos o gráfico da densidade de corrente (J) em função da tensão (V) neste intervalo e calculamos o coeficiente angular da reta obtida, que será igual à condutância da célula ($G = \frac{\Delta I}{\Delta V}$ siemens/cm²). Calculando o inverso da condutância e di-

vidindo o resultado pela área da célula, obteremos a resistência em paralelo (Fig.31). Como nesta região a característica $I \times V$ pode ser afetada por outros fatores, é conveniente calcular a resistência paralelo para tensões inversas onde o efeito de inclinação da curva $I \times V$ é devida somente a essa resistência.

FIGURA 31 - Determinação da resistência paralelo

4.2.2- Determinação do Fator de Perfeição (A_0) e da Corrente de Saturação (I_0)

Utilizando os valores da resistência série e resistência paralelo calculados, corrigimos os valores da tensão e corrente terminal obtidos através da característica no escuro e traçamos o gráfico da corrente em função da tensão em papel monolog (Fig.32), no intervalo de 0 a 0,6 Volts. Através do método dos mínimos quadrados fazemos a aproximação para uma única

exponencial e obtemos uma reta cuja equação é:

$$\ln I = \ln I_0 + \frac{qV}{A_0 kT} \quad (4.17)$$

onde q é a carga eletrônica, k a constante de Boltzmann e T a temperatura absoluta.

Desta reta obtemos I_0 através do coeficiente linear e A_0 através do coeficiente angular. Os resultados obtidos por este método, no intervalo de 0,5 a 0,6 Volts, devem estar de acordo com os obtidos pelo método do item 4.2.2 que é independente dos efeitos das resistências série e paralelo, pois A_0 e I_0 são fatores intrínsecos à junção PN e ao material.

FIGURA 32 - Determinação de I_0 e A_0 utilizando-se a característica de diodo

4.2.3- Circuito Utilizado para a Medida da Característica de Diodo da Célula

As medidas da característica $I \times V$ de diodo das células foram feitas utilizando-se o arranjo experimental mostrado na Figura 33, com um eletrômetro Keithley modelo 610 C e um multímetro digital H-P modelo 3466A.

FIGURA 33 - Arranjo experimental utilizado na medida das curvas $I \times V$ sem iluminação

4.3- Medida da Resposta Espectral

Dados úteis para a caracterização de uma célula solar, como por exemplo, o comprimento de difusão dos portadores minoritários e os efeitos da profundidade da junção e da camada anti-refletores sobre o desempenho da célula podem ser obtidos através da medida da sua resposta espectral⁽²⁵⁾. Por outro lado, é muito difícil

fazer medidas precisas por causa das limitações físicas e práticas surgidas devido ao baixo nível de iluminação da luz monocromática normalmente utilizada nestas medições⁽²⁶⁾.

A resposta espectral absoluta externa ($RS(\lambda)$) da célula solar é definida⁽⁸⁾ como a razão entre a densidade de corrente de curto-circuito (A/cm^2) e a radiação incidente (w/cm^2) em função do comprimento de onda. A eficiência quântica ($Q(\lambda)$) é definida como o número de pares elétron-lacunas, coletados sob condições de curto-circuito, relativo ao número de fótons incidentes sobre a célula. A relação entre $RS(\lambda)$ e $Q(\lambda)$ é dada por:

$$Q(\lambda) = \frac{hc}{\lambda q} \cdot RS(\lambda) \quad (4.18)$$

onde h é a constante de Planck, c a velocidade da luz e q a carga eletrônica. Define-se também a resposta espectral absoluta interna, que considera somente a fração da potência incidente realmente absorvida na célula, que é proporcional à transmitância, a qual se exprime como sendo $1 - R(\lambda)$, onde $R(\lambda)$ é a refletividade da superfície da célula. Então temos:

$$RS(\lambda)_{int} = RS(\lambda)/(1-R(\lambda)) \quad (4.19)$$

A medida da resposta espectral absoluta interna é importante para a determinação do valor do comprimento de difusão dos portadores minoritários fotogerados na região de base da célula.

Na Figura 34 a resposta espectral de uma célula de silício é mostrada em suas três componentes⁽²⁵⁾: as contribuições da região de base, da camada difundida e da região de carga espacial. Para fótons de baixas energias, a maioria dos portadores são gerados na região de base devido ao baixo coeficiente de ab-

FIGURA 34 - Contribuição à RS das três regiões de uma célula de Si N/P ($\rho_{\text{base}} = 1\Omega \times \text{cm}$) (25)

sorção do silício para comprimentos de onda longos. Acima de 2,4 eV a contribuição da região difundida torna-se predominante. A contribuição da região de carga espacial é considerável no intervalo de 2,0 a 2,9 eV para a célula com resistividade de base igual a $1\Omega\text{cm}$ conforme mostrado na Figura 34. A contribuição desta região torna-se maior para células com altas resistividade de base e junções rasas, mas nunca é tão grande quanto à contribuição da região difundida por causa do alto valor do coeficiente de absorção do silício acima de 3,2 eV, o que faz com que a maior parte dos fótons incidentes com altas energias sejam absorvidos nos primeiros 100 nm.

4.3.1- Montagem Utilizada Para a Medida da Resposta Espectral

No sistema utilizado para medir a resposta espectral a fonte de luz é uma lâmpada de halogeno de 250 Watts e a monocromaticidade foi obtida utilizando-se filtros interferenciais (Oriel) (largura da banda de aproximadamente 10nm) no intervalo de 400 até 1050 nm. Uma limitação comum a este sistema de medida vem do fato de que o nível de irradiância monocromática obtido é muito baixo. Usar uma lâmpada muito mais potente não é aconselhável pois isso iria resultar em um excessivo aquecimento do sistema ôtico, além de ser mais difícil controlar a alimentação da lâmpada.

Como o nível de iluminação obtido é muito baixo, isto implica em tomar medidas de baixa corrente de curto-circuito. Para eliminar a inevitável interferência de ruído elétrico, o sinal fornecido pela célula é transmitido a um amplificador "lock-in" (PARTM 220) sincronizado a um modulador ("chopper") (PAR, modelo BZ-1). Este amplificador seleciona o sinal na frequência e fase de modulação, filtrando a maior parte do ruído e da radiação de fundo que não foram modulados.

Ao invés de usar um fotômetro para medir a intensidade da luz incidente sobre a célula, utilizamos um fotodiodo de silício (EG&G, tipo SGD100) calibrado em resposta espectral, com uma área ativa de 0,051 cm². A montagem do sistema utilizado é mostrada na Figura 35.

A medida é feita variando-se o comprimento de onda utilizando-se filtros interferenciais de 400 nm a 1050 nm controlando-se a tensão na lâmpada, através de um autotransformador (Variac), para cada comprimento de onda. O feixe de luz passa pelo "chopper" e incide sobre a célula ou fotodiodo. A fotocorren -

FIG. 35 - Arranjo experimental empregado para a medida da resposta espectral

te gerada nos terminais da célula passa pelo conversor (Keithley modelo 427) e o sinal amplificado é medido no amplificador "lock-in". É importante controlar o sinal em um osciloscópio, (tektro-nix, modelo 5440), verificando-se as formas de ondas obtidas e a presença de ruídos.

Para cada comprimento de onda fazemos, para a célula e fotodiodo, a leitura da tensão no "lock-in" e convertemos este valor para corrente de acordo com o ganho utilizado no conversor corrente-tensão. A medida da resposta espectral é então obtida através da equação:

$$RS_{cel}(\lambda) = RS_{FD}(\lambda) \frac{I_{cel}(\lambda)/A_{cel}}{I_{FD}(\lambda)/A_{FD}} \quad (4.20)$$

onde $RS_{FD}(\lambda)$ é a resposta espectral do fotodiodo para um determinado comprimento de onda (λ) conhecido, $I_{cel}(\lambda)$ a corrente de curto-circuito da célula medida para o mesmo λ , $I_{FD}(\lambda)$ a corrente de curto-circuito do fotodiodo medido para o mesmo λ , A_{cel} a área da célula e A_{FD} a área ativa do fotodiodo.

4.3.2- Determinação do Comprimento de Difusão dos Portadores Minoritários da Base (L_n)

O comprimento de difusão dos portadores minoritários da base (L_n), foi determinado através da medida da resposta espectral na região de comprimentos de onda de $0,8 \mu m$ até $1 \mu m$ ⁽²⁷⁾. Para este intervalo de comprimento de onda, a resposta espectral da camada difundida e a influência do contato do lado posterior são desprezíveis. Neste caso, a eficiência quântica é dada pela relação (2.44).

Como vamos considerar somente a luz absorvida pela célula

la, multiplicamos a equação (2.44) pela transmitância $(1 - R(\lambda))$:

$$Q(\lambda) = \frac{\alpha [1-R(\lambda)]}{(\alpha + 1/L_n)} \quad (4.21)$$

onde α é o coeficiente de absorção do silício, R a refletividade de e L_n o comprimento de difusão dos portadores minoritários da região de base. A equação (4.21) pode ser escrita como:

$$\frac{[1-R(\lambda)]}{Q(\lambda)} \approx 1 + \frac{1}{\alpha L_n} \quad (4.22)$$

A refletividade $R(\lambda)$ é calculada através de:

$$R = \frac{(r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos 2\theta)}{(1 + r_1^2 r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos 2\theta)} \quad (4.23)$$

onde

$$r_1 = \frac{n_o - n_1}{n_o + n_1} \quad \text{e} \quad r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$$

são as refletâncias individuais, n_1 é o índice de refração da camada anti-refletora, n_2 é o índice de refração do silício, n_o é o índice de refração do ar e θ é a espessura de fase da camada anti-refletora que é dada por: $\theta = (2\pi n_1 d_1)/\lambda$ onde d_1 é a espessura da camada (Fig.36).

Construindo-se um gráfico de $(1-R)/Q$ em função da profundidade de penetração α^{-1} para vários comprimentos de onda entre 0,8 e 1 μm pode-se obter o comprimento de difusão dos portadores minoritários da região de base calculando-se a inclinação da reta obtida (Fig.37).

FIGURA 36 - Esquema indicando a refletividade na camada anti-refletores

O coeficiente de absorção do silício é dado pelas seguintes equações⁽²⁷⁾:

a) Para cristais de silício submetidos a alívio de tensões

$$\alpha = 0,526367 - 1,14425\lambda^{-1} + 0,585368\lambda^{-2} - 0,039958\lambda^{-3} \quad (4.24)$$

b) Para cristais não submetidos a alívio de tensões

$$\alpha = -1,06964 + 3,34928\lambda^{-1} - 3,61649\lambda^{-2} - 1,34831\lambda^{-3} \quad (4.25)$$

No caso das células usadas neste trabalho, a equação usada para o cálculo do coeficiente de absorção é a (4.24), pois, durante o processo de fabricação as lâminas submetidas a vários processos térmicos.

FIGURA 37 - $(1-R)/Q$ vs profundidade de penetração da luz (α^{-1}) A tangente permite calcular o comprimento de difusão dos portadores minoritários da base

4.4- Medida da Profundidade de Junção

Para medir a profundidade de junção utilizamos três métodos: desbaste em ângulo, oxidação anódica e arco trigonométrico.

4.4.1- Método de Desbaste em Ângulo

Neste caso, a lâmina de silício é dividida em cacos de aproximadamente 1 centímetro de lado e desbastada em ângulo através de polimento. Em seguida, é feito um ataque químico com ácido fluorídrico, sob iluminação intensa, durante aproximadamente 30

segundos. A demarcação da junção PN é obtida devido ao ataque preferencial da solução na região P (Fig.38). O efeito é a observação de colorações diferentes nas regiões P e N, que permitem delimitar a junção.

FIGURA 38 - Desbaste em ângulo para medir a profundidade de junção

A profundidade da junção (x_j) será obtida por:

$$x_j = d \cdot \operatorname{tg} \theta \quad (4.26)$$

onde d é a distância horizontal da junção até o ponto onde começa o desbaste e θ o ângulo de desbaste. A medida de d é obtida através de um microscópio e o ângulo de desbaste através de um perfilômetro de precisão. (Talystep - Ramk Precision Industry Ltd)

4.4.2- Método da Oxidação Anódica

Este método consiste na remoção controlada de finas camadas de silício e normalmente é utilizado para a determinação do perfil de distribuição de portadores. No nosso caso estávamos interessados apenas na medida da profundidade de junção para confirmar as medidas realizadas pelos outros métodos.

A célula eletroquímica utilizada para a oxidação é mostrada na Figura 39 e o esquema elétrico na Figura 40.

FIGURA 39 - Célula eletroquímica para oxidação anódica

O eletrólito usado é o nitrato de potássio, (0,04 N) diluído em etilenoglicol contendo 10 ml de água. Esta solução foi escolhida pelos níveis aceitáveis, tanto das tensões como das densidades de corrente envolvidas, por ser de fácil manuseio e pe

FIGURA 40 - Esquema elétrico para oxidação anódica

la degradação desprezível de suas propriedades com o tempo.

O controle do crescimento da camada em óxido de silício é feito mediante uma corrente constante e o tempo de crescimento é utilizado como parâmetro de controle do processo. Outro parâmetro de controle pode ser a queda de tensão existente nos eletrodos ao final de cada crescimento de óxido, pois quando a fonte de corrente constante é ligada, surge nos eletrodos uma tensão inicial V_i . Essa tensão é devida principalmente à resistividade da solução eletrolítica. À medida em que vai se formando óxido na superfície da amostra, a resistência do circuito vai aumentando e consequentemente a tensão elétrica nos eletrodos também aumenta. A variação total dessa diferença de tensões ($V_F - V_i$) é diretamente proporcional à espessura do óxido formado.

A espessura da camada de silício consumida na formação do óxido anódico, é aproximadamente 44% da espessura do óxido formado. A espessura do óxido formado foi medida por elipsometria (Gaertner Mod.116). Uma vez realizada a medida da espessura do óxido é feita a sua dissolução em uma solução de ácido fluorídrico em água. Em seguida, é determinado o tipo de condutividade

na superfície da amostra utilizando-se as propriedades termoelétricas dos semicondutores⁽²⁸⁾. Coloca-se um voltímetro na sua faixa de medidas mais sensível. Aquece-se uma das pontas de prova do voltímetro com um aquecedor resistivo. Toca-se ambas as pontas de prova sobre a amostra de silício e observa-se a deflexão. Se a ponta de prova aquecida estiver com tensão positiva em relação à ponta de prova fria, a amostra é tipo N; se o potencial for negativo, a amostra é tipo P.

A origem deste efeito se deve ao gradiente de temperatura aplicado na amostra que produz uma corrente de difusão da região da ponta quente para a ponta fria. Um campo elétrico produzido em decorrência dos desvios na neutralidade de carga, que é proporcional ao gradiente de temperatura, surge no sentido de neutralizar esta corrente.

No caso das células utilizadas neste trabalho, estruturas N^+ sobre P, inicialmente obtêm-se condutividades tipo N e, após várias oxidações e remoções da camada de óxido, quando o tipo de condutividade for alterado, observamos que a junção foi atingida. Somando as espessuras equivalentes de silício removidas após cada oxidação obtemos, com boa aproximação, a profundidade da junção.

4.4.3- Método Arco Trigonométrico

Neste método, um desbaste com perfil circular é feito na célula, ultrapassando a junção e penetrando o substrato. A camada exposta é então colorida para delinear a junção e, como mostra a Figura 41, são tomadas as medidas de w_1 e w_2 utilizando-se um microscópio. Da diferença entre w_1 e w_2 a profundidade de junção pode ser facilmente calculada através das relações⁽²²⁾;

$$x_j = A_2 - A_1 \quad (4.27)$$

$$x_j = \sqrt{R^2 - \left(\frac{w_1}{2}\right)^2} - \sqrt{R^2 - \left(\frac{w_2}{2}\right)^2} \quad (4.28)$$

FIGURA 41 - Descrição do método arco-trigonométrico para medidas de profundidade de junção.

Neste caso as medidas foram feitas utilizando-se um medidor Arcuic-trigonometric System. (Philtec, mod. 2015)

4.5- Efeito da Temperatura Sobre o Desempenho de uma Célula Solar

Estas medidas foram tomadas para verificar como os parâmetros que determinam o desempenho de uma célula solar variam com a temperatura. O intervalo de temperaturas utilizado foi de 5°C até 60°C.

A corrente de curto-circuito deve aumentar levemente com o aumento da temperatura, em parte devido à melhora do comprimen-

to de difusão dos portadores minoritários da base e em parte devido a um desvio do linear de absorção para baixas energias, sendo que ambos melhoram a resposta espectral para comprimento de onda longo. A melhoria no comprimento de difusão é provocada por mudanças na mobilidade e no tempo de vida dos portadores minoritários na região de base das células (29).

A tensão de circuito aberto deve diminuir linearmente com o aumento da temperatura principalmente devido ao forte aumento da corrente de saturação. A corrente de saturação é composta da corrente de injeção, da corrente de recombinação na região de carga espacial e da corrente de tunelamento. A corrente de injeção depende de n_i^2 , que é proporcional a $e^{\frac{-qE_g}{kT}}$ e a corrente de recombinação depende de n_i , que é proporcional a $e^{\frac{-qE_g}{2kT}}$. Essas duas correntes são fortemente influenciadas pela temperatura, enquanto que a corrente de tunelamento é praticamente independente da temperatura (29).

O fator de preenchimento diminui com o aumento da temperatura devido à diminuição da tensão de circuito aberto e devido a um aumento do arredondamento do "joelho" da curva $I \times V$ relativo ao termo $e^{\frac{qV}{A_0 kT}}$.

A diminuição da tensão de circuito aberto e do fator de preenchimento, embora parcialmente compensadas pelo aumento na corrente de curto-circuito implicam em uma diminuição da eficiência de conversão com o aumento da temperatura.

4.5.1- Circuito Utilizado para a Medida da Característica $I \times V$ sob Iluminação Constante com Variação da Temperatura

O arranjo experimental é o da Figura 42. O suporte para a célula foi montado dentro de um criostato (Fig.43) que é constituído de uma resistência de fio de "Kanthal" enrolado em cerâmica

onde foi colocado um encaixe para podermos fixar a célula calibrada ou a célula cuja curva $I \times V$ queremos obter. A taxa de aumento da temperatura é controlada por um autotransformador ligado aos terminais da resistência. O dispositivo engloba uma serpentina, onde circula um gás (N_2) ou água, para reduzir a temperatura, contém entradas para vácuo e termopares, uma janela de vidro para a luz incidente e também conectores elétricos tipo U.H.F por onde obtemos os sinais para a elaboração da característica $I \times V$.

FIGURA 42 - Arranjo experimental utilizado nas medidas $I \times V$ com variação da temperatura

FIGURA 43 - Criostato utilizado para medir o desempenho da célula em função da temperatura.

A intensidade da luz incidente é controlada com uma célula calibrada (solarex), na mesma posição da célula cuja característica queremos obter. As medidas foram obtidas utilizando-se uma lâmpada de xenônio de 150 Watts, controlando-se a temperatura em pontos diferentes da célula bem como o gradiente de temperatura ao longo da célula.

A diminuição da temperatura abaixo da temperatura ambiente foi obtida através do controle de um fluxo de nitrogênio na serpentina e o aumento foi controlado através de um autotransformador ligado aos terminais da resistência do criostato.

4.6- Medida da Capacitância de Junção em Função da Tensão Inversa Aplicada

Estas medidas foram realizadas visando a verificação do tipo de junção obtido, se é abrupto ou se é gradual, a avaliação da tensão de barreira e a obtenção da concentração de impurezas na região de base das células ⁽²¹⁾.

A largura da região de carga espacial (d) para junções abruptas é dada por ⁽⁶⁾:

$$d = \left(\frac{2\epsilon_0\epsilon\phi_0}{qN_A} \right)^{1/2} \quad (4.29)$$

onde ϵ é a constante dielétrica do semicondutor, ϵ_0 é a permissividade do vácuo, ϕ_0 é o potencial de barreira, N_A é a concentração de impurezas no substrato e q a carga eletrônica.

Para junções graduais temos:

$$d = \left(\frac{12\phi_0\epsilon_0\epsilon}{qa} \right)^{1/3} \quad (4.30)$$

onde "a" é o coeficiente de proporcionalidade que descreve mudanças na concentração de impurezas através da junção. Quando uma diferença de potencial externa (V) é aplicada em uma junção PN temos uma mudança na altura da barreira de potencial $\phi = \phi_0 + qV$ se a polarização for inversa e $\phi = \phi_0 - qV$ se a polarização for direta. Consequentemente temos uma mudança na largura da região de carga espacial para uma junção abrupta:

$$d = \left(\frac{2\epsilon_0\epsilon(\phi_0 \pm qV)}{qN_A} \right)^{1/2} \quad (4.31)$$

para uma junção gradual:

$$d = \left(\frac{12\epsilon_0\epsilon(\phi_0 \pm qV)}{qa} \right)^{1/3} \quad (4.32)$$

Como vemos, a polarização direta diminui d enquanto que uma polarização inversa aumenta. Ou seja, mudanças na tensão aplicada através da junção implicam em mudanças na largura da região de carga espacial: a junção opera como uma capacitância. Esta capacitância é chamada capacitância de barreira e é dada por:

$$C_j = \frac{\epsilon_0\epsilon S}{d} \quad (4.33)$$

onde S é a área superficial da junção.

Substituindo "d" das equações (4.31) e (4.32) na equação (4.33) encontramos as expressões para a capacitância de uma junção abrupta e de uma junção gradual:

$$C_{j(\text{abrupta})} = S \left(\frac{\epsilon_0\epsilon q N_A}{2(\phi_0 \pm qV)} \right)^{1/2}, \quad C_{j(\text{gradual})} = S \left(\frac{(\epsilon\epsilon_0)^2 qa}{12(\phi_0 \pm qV)} \right)^{1/3} \quad (4.34)$$

(a) (b)

ou

$$\frac{1}{C_j^2} = \frac{2(\phi_0^+ - qV)}{S\epsilon_0\epsilon qN_A} \quad , \quad \frac{1}{C_j^3} = \frac{12(\phi_0^+ - qV)}{Sa q(\epsilon_0\epsilon)^2} \quad (4.35)$$

(a) (b)

Se a junção for abrupta, o gráfico de $1/C_j^2$ (Fig.44) em função da tensão aplicada é uma reta cujo coeficiente angular fornece a concentração de impurezas na região de base da célula, N_A , e a intersecção da reta com o eixo das tensões fornece a tensão de barreira.

Se a junção for gradual, o gráfico de $1/C_j^3$ (Fig.45) em função da tensão aplicada é uma reta cujo coeficiente angular fornece o gradiente de impurezas ("a") e a intersecção da reta com o eixo das tensões fornece a tensão de barreira.

4.6.1- Esquema da Montagem Utilizada nas Medidas de Capacitância de Junção em Função da Tensão Inversa Aplicada

As medidas foram feitas utilizando-se multímetro digital (H-P, modelo 34658) e um medidor de capacitância (Rohde & Schwartz - tipo KRT - Mod. ON. 5100), como mostra a Figura 46. Neste caso, a célula é polarizada na ausência de luz, através do próprio medidor de capacitância, que trabalha na faixa de 2,2 kHz a 7 kHz, enquanto que a tensão é monitorada no voltímetro.

FIGURA 44 - Gráfico para obtenção da voltagem de barreira e da concentração de átomos aceitadores (junção abrupta).

O circuito utilizado para as medidas é um circuito ressonante, pois a célula cuja capacitância queremos medir, é colocada em série com uma bobina do medidor (selecionada de acordo com a escala). O circuito é excitado por um oscilador de frequência variável. Durante a medida varia-se a frequência do oscilador até o ponto de ressonância, que é observado quando o painel do medidor indicar tensão máxima. A frequência de ressonância do circuito é igual à frequência do oscilador.

A capacitância é dada pela relação (4.36):

$$C_j = \frac{1}{(2\pi f_{res})^2 L} \quad (4.36)$$

FIGURA 45 - Gráfico para obtenção da voltagem de barreira e do gradiente de impurezas "a". (junção gradual).

onde f_{res} é a frequência de ressonância, L a indutância da bobina e C_j a capacitância a ser medida.

FIGURA 46 - Arranjo experimental utilizado para medir a capacitância em função da tensão inversa aplicada.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E CONCLUSÃO

Neste capítulo apresentaremos os resultados obtidos na caracterização de células solares de silício monocristalino, comentando-os e relacionando-os com a teoria apresentada nos capítulos anteriores. Para isso, inicialmente mostraremos as características das células utilizadas.

5.1- Características das Células Utilizadas nas Medidas

Para a realização das medidas foram utilizadas células cujo substrato é tipo P <1,0,0> com uma concentração de dopantes aceitadores (boro) de $1,6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ e, consequentemente, resistividade de $1\Omega.\text{cm}$. A região tipo N apresenta concentração de dopantes (fósforo) de $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ e profundidade de junção de aproximadamente $0,5\mu\text{m}$. A tabela V-1 resume as características das células mencionadas neste capítulo.

5.2- Desempenho das Células Determinadas Pelas Características I x V Sob Iluminação

As características de corrente em função da tensão, sob iluminação, foram determinadas com o arranjo experimental da Figura 29. Inicialmente, traçamos a curva característica sob radiação AM1 simulada, utilizando uma lâmpada de tungstênio halogênio. Em seguida, utilizando filtros neutros de atenuação, traçamos curvas I x V para outras intensidades de luz. Na Figura 47 são mostradas as curvas obtidas para a célula 1436B. Na mesma Figura indicamos os parâmetros que determinam o desempenho da célula para a condição AM1. A Tabela V-2 mostra os resultados obtidos para uma

FIG. 47 - Caracterís-
 ticas $I \times V$
 da célula
 1436B, obti-
 das para di-
 ferentes in-
 tensidades
 de luz.

TABELA V-1 - Características das Células Utilizadas nas Medidas

Célula	Área (cm ²)	Metálização	Camada Anti-refletora Tipo - espessura (Å)
1436B	4,00	Al-Si/Al	SiO ₂ - 1200
0S3D	4,00	Al-Si/Al	SiO ₂ - 600
12-4	11,34	Ni-Pb-Sn/Al	SnO ₂ - 700
12-6	12,57	Ni-Pb-Sn/Al	SnO ₂ - 700
11-17	6,16	Ni-Pb-Sn/Ni-Pb-Sn	SnO ₂ - 700
11-19	6,16	Ni-Pb-Sn/Ni-Pb-Sn	SnO ₂ - 700
11-20	6,16	Ni-Pb-Sn/Ni-Pb-Sn	SnO ₂ - 700
Y ₄	4,00	Al-Si/Al	SiO ₂ - 1200
MB	4,00	Al-Si/Al	SiO ₂ - 1200

TABELA V-2 - Características Fotovoltaicas Sob Radiação AML Simu-
lada

Célula	J _{cc} (mA/cm ²)	V _{ca} (V)	I _{māx} (mA)	V _{māx} (V)	P _{māx} (mW)	FF	η (%)
1436B	25,83	0,559	95,9	0,425	40,76	0,704	10,19
0S3D	24,93	0,581	90,7	0,440	39,91	0,689	9,98
12-4	30,86	0,574	321,2	0,445	143,07	0,712	12,61
12-6	28,89	0,563	325,0	0,445	144,62	0,707	11,51
11-17	30,40	0,554	171,5	0,420	72,03	0,694	11,70
11-19	30,26	0,554	174,0	0,415	72,21	0,699	11,73

temperatura de 25°C . As características fotovoltáicas foram medidas em várias ocasiões, para as mesmas células, sendo observada uma variação menor que 2% nos resultados obtidos.

Na Figura 48 podemos verificar a dependência linear, prevista nas equações (2.39), (2.40) e (2.41), da corrente de curto-circuito com a radiação incidente para a célula 1436B.

FIG. 48 - Dependência linear da corrente de curto-circuito com a radiação incidente para a célula 1436B.

Utilizando-se medidas de características $I \times V$ sob iluminação, foi verificado o efeito da camada anti-refletora sobre o desempenho de uma célula solar. A figura 49 mostra a curva corrente-tensão para a célula 11-20 antes (linha cheia) e depois (linha tracejada) de ser removida a camada anti-refletora de SnO_2 . Foi constatada uma variação na corrente de curto-circuito de 54,3 mA (28,4%), enquanto que a eficiência sofreu uma variação de 3,21% (26,1%).

5.2.1- Resultados Obtidos em Medidas de Resistência Série

A resistência série foi determinada segundo o procedimento indicado na seção 4.1.1. A Figura 50 mostra a determinação da resistência série para a célula 053D e a tabela V-3, os resultados obtidos, que representam a média de 9 medidas, obtidas pela escolha de 3 valores diferentes de ΔI para cada ΔIL .

TABELA V-3 - Resultados Obtidos em Medidas de Resistência Série

Célula	$R_s (\Omega)$	$R_s (\Omega \cdot \text{cm}^2)$
1436B	$0,65 \pm 0,08$	$2,6 \pm 0,3$
053D	$0,9 \pm 0,1$	$3,6 \pm 0,4$
12-4	$0,22 \pm 0,01$	$2,5 \pm 0,1$
12-6	$0,21 \pm 0,02$	$2,6 \pm 0,2$
11-17	$0,39 \pm 0,01$	$2,40 \pm 0,06$
11-19	$0,42 \pm 0,05$	$2,6 \pm 0,3$

Como podemos verificar, a resistência série diminui com o aumento da área da célula, uma vez que a resistividade da região difundida não muda, pois não muda a resistência de folha e nem a profundidade de junção.

FIG. 49 - Efeito da camada anti-refletora de SnO_2 sobre o desempenho da célula 11-20 para radiação simulada AM_1

5.3-Determinação do Fator de Perfeição, Corrente de Saturação e Resistência Paralelo

Utilizando a característica corrente-tensão no escuro , foram determinados o fator de perfeição da junção (A_o) e a corrente de saturação (I_o) fazendo-se a aproximação para uma única exponencial, visto que, a equação normalmente utilizada para descrever a característica $I \times V$ das células (equação (4.1)) possui um único termo exponencial. Utilizando o arranjo experimental da Figura 33 obtivemos a corrente em função da tensão no intervalo de 0 a 600 mV e utilizando a calculadora HP (9825A) com o programa apresentado no Anexo 1, obtivemos as curvas $I \times V$ e $\ln I \times V$. Vale ressaltar que, para se obter a verdadeira característica de diodo das células, foram eliminados os efeitos das resistências série e paralelo dos valores de corrente e tensão obtidos inicialmente. Os parâmetros A_o , I_o e R_p foram calculados pelos métodos descritos nas seções 4.2.1 e 4.2.2 . As curvas obtidas, para a célula 12-6, são mostradas nas Figuras 51 e 52. A Tabela V-4 mostra os resultados obtidos com as outras células.

TABELA V-4 - A_o , I_o e R_p OBTIDOS ATRAVÉS DA CARACTERÍSTICA $I \times V$ NO ESCURO.

Célula	A_o	I_o (A)	R_p (Ω)
1436B	$1,93 \pm 0,05$	$(6 \pm 1) \times 10^{-7}$	$(115 \pm 5) \times 10^2$
053D	$2,93 \pm 0,08$	$(3,4 \pm 0,5) \times 10^{-6}$	$(102 \pm 0,7) \times 10$
12-4	$1,83 \pm 0,06$	$(2,9 \pm 0,6) \times 10^{-7}$	$(14 \pm 1) \times 10^3$
12-6	$2,26 \pm 0,07$	$(7 \pm 1) \times 10^{-6}$	$(40 \pm 3) \times 10^2$
11-17	$2,19 \pm 0,04$	$(1,6 \pm 0,2) \times 10^{-6}$	$(417 \pm 6) \times 10$
11-19	$1,85 \pm 0,04$	$(2,0 \pm 0,3) \times 10^{-7}$	$(206 \pm 8) \times 10^2$

FIG. 51 - Característica $\ln I \times V$ da célula 12-6 para medidas realizadas no escuro

Observando as curvas obtidas (por exemplo, Figura 52) pode-se verificar que para altos níveis de injeção, a característica da junção PN aproxima-se de uma segunda curva exponencial. Avaliando os valores de A_0 e I_0 nesta região podemos verificar que A_0 aproxima-se de 1 e a corrente de saturação é da ordem de 10^{-9} a 10^{-10} A. Os resultados podem ser vistos na Tabela V-5.

TABELA V-5 - A_0 e I_0 NO INTERVALO DE 0,45 a 0,55 V

Célula	A_0	I_0 (A)
1436B	$1,15 \pm 0,04$	$(5 \pm 3) \times 10^{-10}$
053D	$1,29 \pm 0,05$	$(6 \pm 3) \times 10^{-9}$
12-4	$1,06 \pm 0,03$	$(1,7 \pm 0,8) \times 10^{-10}$
12-6	$1,12 \pm 0,05$	$(1,2 \pm 0,9) \times 10^{-9}$
11-17	$1,43 \pm 0,04$	$(1,3 \pm 0,5) \times 10^{-8}$
11-19	$1,13 \pm 0,01$	$(2,3 \pm 0,3) \times 10^{-10}$

Os valores de A_0 e I_0 para altos níveis de corrente foram determinados utilizando-se a característica $I \times V$ para diferentes intensidades de luz incidente, de acordo com o método descrito na seção 4.2.2. Os dados obtidos são mostrados na Tabela V-6. A Figura 53 mostra a determinação de A_0 e I_0 para a célula 12-4 por este método. Os valores de A_0 e I_0 na Tabela V-6 apresentam-se mais precisos pois neste caso os efeitos das resistências série e paralelo são automaticamente eliminados durante as medidas enquanto que no caso anterior tivemos que subtrair os efeitos dessas resistências nos resultados obtidos, ou seja, devemos considerar além da imprecisão nas medidas corrente-tensão no escuro, que são feitas ponto a ponto, a imprecisão nas medidas das resistências série e paralelo. Por outro lado, estas medidas tam-

TABELA V-6 - Valores de A_0 e I_0 obtidos pela Característica $I \times V$ para Diferentes Intensidades de Luz, γ é o Coeficiente de Correlação das Retas Obtidas pelo Métodos Mínimo Quadrados

Célula	A_0	I_0 (A)	σ
1436B	$1,17 \pm 0,02$	$(9 \pm 2) \times 10^{-10}$	1,00
053D	$1,10 \pm 0,02$	$(1,3 \pm 0,6) \times 10^{-10}$	1,00
12-4	$1,070 \pm 0,003$	$(3,4 \pm 0,2) \times 10^{-10}$	1,00
12-6	$1,148 \pm 0,006$	$(2,1 \pm 0,2) \times 10^{-9}$	1,00
11-17	$0,79 \pm 0,07$	$(3 \pm 7) \times 10^{-13}$	0,97
11-19	$0,79 \pm 0,07$	$(3 \pm 6) \times 10^{-13}$	0,97

bem confirmam os valores de A_0 igual a 1 (μm) e I_0 da ordem de 10^{-10} a 10^{-9} A, com exceção das células 11-17 e 11-39 cujo comportamento apresenta desvios em relação ao modelo inicial. Isto pode ser verificado pelos valores de A_0 e I_0 encontrados, bem como pelo valor do coeficiente de correlação que indica que os pontos não se ajustam a uma reta.

Os resultados encontrados pelos dois métodos estão compatíveis com os encontrados na literatura^(9,23) e indicam o mecanismo de corrente predominante para baixos e altos níveis de corrente. Para altos níveis de corrente, A_0 é aproximadamente 1 e isto significa que predominam correntes de injeção pura. Enquanto que, para baixos níveis, outros mecanismos de correntes são adicionados à corrente de injeção. Valores próximos a 2 são provavelmente devidos à corrente de recombinação provocada pela presença de centros de recombinação dentro da região de carga espacial. Valores de A_0 maiores que 2, para bai

xos níveis de corrente podem ser explicados, em parte, devido aos efeitos da resistência paralelo, uma vez que a fuga de corrente através de R_p domina a característica $I \times V$ para baixos níveis de corrente, podendo, deste modo, se confundir com a corrente de recombinação. À medida que nos aproximamos de altos níveis de corrente, a corrente de recombinação torna-se desprezível frente ao aumento da corrente de injeção de portadores minoritários e por isso A_0 tende a 1. Estes resultados indicam que a característica corrente-tensão de uma célula solar é melhor reproduzida por uma equação contendo dois termos exponenciais (equação 4.16). Isto é confirmado na Figura 54 que mostra a curva $I \times V$ da célula 1436B obtida experimentalmente, junto com as curvas teóricas, utilizando-se uma exponencial (círculos) e duas exponenciais (triângulos).

Do conjunto de células utilizadas nas medidas, a célula 12-6 é a única em que a junção PN é formada em toda a extensão da lâmina de silício tipo P. Nas outras células, a junção PN é formada apenas na região central da lâmina, sendo que na parte onde não existe junção é mantida uma camada de óxido evitando, deste modo, uma possível fuga de corrente pelos bordos da célula, que se constitui em uma das principais fontes de baixa resistência paralelo.

Analisando os resultados obtidos de resistência paralelo (Tabela V-4), podemos concluir que a fuga de corrente pelos bordos da célula é responsável pela baixa resistência paralelo da célula 12-6, bem como da célula 11-17 que se apresentou trincada após as medidas adicionais de $I \times V$ no escuro feitas para a determinação da resistência paralelo. Por outro lado, os resultados da tabela V-4 mostram que existe uma relação entre os valores de A_0 maiores que 2 (células 053D, 12-6 e 11-17) com os baixos valores de R_p , indicando a influência dos efeitos provocados por esta

FIG. 54 - Comparação entre a curva experimental e as curvas teóricas para a célula 1436B.

resistência nos valores de corrente encontrados.

5.4- Resposta Espectral e Comprimento de Difusão dos Portadores Minoritários da Base

Curvas de resposta espectral, para a célula 11-19, são mostradas na Figura 55. A resposta espectral foi obtida através de arranjo experimental da Figura 35. O comprimento de difusão dos portadores minoritários da região de base foi determina

x Eficiência quântica

* Resposta espectral relativa.

— Resposta espectral absoluta

FIG. 55 - Resposta espectral para a célula 11-19

do pelo método descrito na seção 4.3.2. Em ambos os casos, foi utilizada a calculadora HP (9825) com o programa apresentado no Anexo 2.

Os resultados são mostrados na Tabela V-7 e Figura 56. Foram realizadas várias medidas de resposta espectral para cada célula, observando-se uma variação menor que 4% nos resultados obtidos. Essas medidas também foram feitas utilizando-se um monocromador, ao invés dos filtros interferenciais, sendo que os resulta -

dos são idênticos. Portanto, pode-se perfeitamente utilizar monocromadores como forma alternativa ao uso de filtros.

TABELA V-7 - Valor Máximo da Resposta Espectral Absoluta e Comprimento de Difusão dos Portadores Minoritários.

Célula	RS _{máx} (A/w)	λ _{máx}	I _n (μm)
1436B	0,479	800	35,9 ± 0,3
053D	0,479	800	93 ± 2
12-4	0,561	800	124 ± 4
12-6	0,529	800	91 ± 2
11-17	0,540	800	119 ± 5
11-19	0,540	800	119 ± 4

Observando a Tabela V-7 e a Figura 56 verifica-se que os valores de eficiência quântica mais altos, na região entre 400 e 500 nm para a célula 1436B, provavelmente são decorrentes de um baixo valor de velocidade de recombinação superficial apresentado por esta célula. Por outro lado, na região entre 500 a 700 nm a eficiência quântica mais alta das células 11-17 e 12-4 pode ser explicada pela diferença de qualidade do óxido utilizado nas camadas anti-refletoras. Como vimos anteriormente, a refletividade, para um determinado comprimento de onda (λ), terá um mínimo para λ/4. Da equação (4-23) temos que:

$$R_{\min} = \left[(n_1^2 - n_o n_2) / (n_1^2 + n_o n_2) \right]^2 \tag{5.1}$$

que é igual a zero se $n_1 = \sqrt{n_o n_2}$. Como n_o é igual a 1 para o ar, o índice de refração da camada anti-refletora (n_1) deve ser i

FIG.56 - Comparação entre as eficiências quânticas das células 11-17, 1436 B e 12-4

qual à raiz quadrada do índice de refração do semicondutor. O SnO_2 possui índice de refração mais próximo a $\sqrt{n_{s1}}$ que o SiO_2 e, por isso, apresenta refletividade mais baixa.

Acima de 700 nm pode-se verificar que a contribuição da região de base das células 12-4 e 11-7 é muito maior que a da célula 1436B. Isto pode ser justificado pela diferença no comprimento de difusão dos portadores minoritários da região de base (Tabela V-7). Nas células 12-4 e 11-17, que possuem L_n maiores, os portadores gerados na região de base têm maior probabilidade de serem coletados pelo campo elétrico da junção e consequentemente de contribuir para a corrente nos terminais da célula.

A Figura 57 mostra uma comparação entre a resposta espectral da célula Y_4 , que possui uma profundidade de junção de aproximadamente $1\mu\text{m}$, com a célula MB, com profundidade de junção de aproximadamente $0,5\mu\text{m}$. Podemos concluir deste gráfico que a célula com menor profundidade de junção possui melhor eficiência de coleção na região de comprimentos de onda curto. Isto se deve ao fato de que um maior número de pares elétron-lacunas são gerados na região dentro ou próxima da junção e que contribuem para a fotocorrente. Enquanto que na célula com maior profundidade de junção, os pares gerados na camada difundida se recombinaem antes de serem coletados pelo campo, ou seja, a contribuição da região difundida, para fótons com altas energias, diminui devido às perdas por recombinação superficial e de volume.

Comparando os resultados obtidos nas medidas de resposta espectral com os resultados da Tabela V-2, podemos também concluir que os valores mais altos de eficiência, bem como de densidade de corrente das células 12-4, 12-6, 11-17 e 11-19 são em parte, consequência dos altos valores do comprimento de difusão dos portadores minoritários da base e do material constituinte da camada anti-refletora.

FIG. 57 - Influência da profundidade de junção na resposta espectral - comparação entre as células Y_4 e M_B

5.5- Medidas de Corrente de Curto-Circuito, Tensão de Circuito Aberto e Eficiência em Função da Temperatura

Estas medidas foram realizadas utilizando-se o arranjo experimental da Figura 42 para uma intensidade de luz constante e igual a 50 mW/cm^2 . A temperatura foi medida simultaneamente em pontos diferentes na superfície da célula bem como na parte posterior e a diferença observada foi menor que 2°C . As medidas com a célula 1436B são apresentadas nas figuras 58 e 59. No intervalo de temperatura de 5° a 60°C a corrente de curto-circuito aumenta linearmente, a uma taxa de $0,2 \text{ mA}/^\circ\text{C}$. A tensão de circuito aberto diminui linearmente com o aumento da temperatura, a uma taxa de $2,4 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Fazendo uma extrapolação para 0°K encontramos uma tensão de $1,2 \text{ Volts}$. Este resultado era esperado, pois a dependência da tensão de circuito aberto com a temperatura é dada por⁽²⁵⁾:

$$V_{ca}(T) \approx V_{rt} - (E_g/q - V_{rt}) \left[\frac{T}{T_{rt}} - 1 \right] \quad (5.2)$$

onde V_{rt} é a tensão de circuito aberto à temperatura ambiente ; E_g é a energia da banda proibida, q a carga eletrônica e T_{rt} a temperatura ambiente.

Como consequência das variações da corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto, verificamos que a eficiência da célula diminui com o aumento da temperatura. A taxa da variação é menor que $0,025\%/^\circ\text{C}$ e maior que $0,015\%/^\circ\text{C}$.

Os resultados encontrados nessas medidas confirmam as tendências esperadas e estão de acordo com os apresentados pelas literaturas^(29,30).

FIG. 58 - Corrente de curto circuito e tensão de circuito aberto em função da temperatura (para 50 mW/cm^2).

FIG. 59 - Eficiência em função da temperatura (para 50 mW/cm^2)

5.6- Obtenção da Tensão de Barreira e Concentração de Dopantes do Substrato através das Medidas de Capacitância em Função da Tensão Inversa Aplicada

Medidas de capacitância em função da tensão inversa aplicada foram realizadas utilizando-se o arranjo experimental da Figura 46. O gráfico da capacitância em função da tensão inversa para a célula 1436B é mostrado na Figura 60, indicando uma boa con-

FIG. 60 - Curva da capacitância da junção em função da tensão inversa aplicada para a célula 1436B.

cordância entre os valores experimentais e teóricos. Os valores da tensão de barreira e concentração do substrato foram determinados segundo o método descrito na seção 4.6. As Figuras 61 e 62 apresentam os gráficos de $1/c_j^2$ e $1/c_j^3$ em função da tensão inversa aplicada para a célula 11-19. Os resultados para as outras células são apresentadas na Tabela V-8 e os valores de V_B obtidos nos gráficos de $1/c_j^3$ e V_{inv} são apresentados na Tabela V-9.

TABELA V-8 - Tensão de Barreira e Concentração de Dopantes do Substrato Obtidos no Gráfico $1/c_j^2 \times V_{inv}$

Célula	V_B (Volts)	N_A (cm^{-3})
1436B	$0,89 \pm 0,01$	$(1,28 \pm 0,02) \times 10^{16}$
12-4	$0,80 \pm 0,02$	$(6,74 \pm 0,09) \times 10^{15}$
12-6	$0,78 \pm 0,01$	$(6,06 \pm 0,08) \times 10^{15}$
11-17	$0,79 \pm 0,01$	$(7,7 \pm 0,1) \times 10^{15}$
11-19	$0,81 \pm 0,03$	$(7,6 \pm 0,2) \times 10^{15}$

TABELA V-9 - Tensão de Barreira Obtida no Gráfico $1/c_j^3 \times V_{inv}$

Célula	V_B (Volts)
1436B	$0,418 \pm 0,008$
12-4	$0,37 \pm 0,02$
12-6	$0,35 \pm 0,02$
11-17	$0,37 \pm 0,02$
11-19	$0,33 \pm 0,02$

A tensão de barreira pode ser calculada teoricamente pela equação (7)

FIG. 61 - $\frac{1}{C_j^2}$ x tensão inversa para a célula 11-19

FIG. 62 - $\frac{1}{C_j^3}$ x tensão inversa para a célula 11-19

$$V_B = -\frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad (5.3)$$

onde k é a constante de Boltzmann, T a temperatura absoluta, q a carga eletrônica, N_A concentração de dopantes aceitadores, N_D concentração de dopantes doadores e n_i a concentração intrínseca de portadores de silício.

Utilizando-se os dados fornecidos para as células investigadas, encontra-se para a temperatura ambiente um valor de $V_B = 0,89$ Volts. Comparando com os resultados obtidos nas Tabelas V-7 e V-8 podemos concluir que as junções são abruptas, pois a equação 4.34.(a) descreve a variação da capacitância de junção em função da tensão inversa aplicada para uma junção abrupta. Isto também é confirmado pelos valores de N_A obtidos através destes gráficos pois são compatíveis com o valor obtido, por medidas de resistividade do substrato, que é $1,6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

5.7- Resultados Obtidos nas Medidas de Profundidade de Junção

A profundidade de junção foi medida utilizando-se os dois métodos descritos nas seções 4.4.1 e 4.4.2 e posteriormente confirmada utilizando-se o método do arco trigonométrico. As medidas foram feitas em uma lâmina, separada durante o processo de fabricação das células com profundidade de junção estimada em $0,5 \mu\text{m}$. Para uma determinada região da lâmina foram realizadas medidas utilizando-se os três métodos conseguindo-se os resultados da Tabela V-10.

Utilizando-se o método de arco trigonométrico, verificamos a profundidade de junção em outros pontos da lâmina obtendo-se medidas que vão de $0,43$ até $0,54 \mu\text{m}$.

TABELA V-10 - Valores Obtidos nas Medidas de Profundidade de Junção

Método	x_j (μm)
oxidação anódica	$0,41 \pm 0,07$
desbaste em ângulo	$0,39 \pm 0,09$
arco trigonométrico	$0,43 \pm 0,04$

A Figura 63 mostra a medida do ângulo no processo de desbaste em ângulo, utilizando-se um perfilômetro. Dos resultados obtidos, nas medidas com o método do arco trigonométrico, podemos concluir que a profundidade de junção não é homogênea, para as células analisadas, constatando-se uma variação de $\pm 0,05\mu\text{m}$ ao longo da lâmina. Por outro lado, os resultados da Tabela V-11 mostra um bom ajustamento entre as três técnicas de medidas utilizadas para a medida da profundidade de junção.

FIG. 63 - Medida do ângulo no processo de desbaste

De um modo geral, os resultados obtidos demonstraram com clareza a variação nos valores dos parâmetros de células solares fabricadas com diferentes tecnologias. Isto pode ser confirmado através do aumento obtido nas eficiências das células 12-4 , 12-6, 11-17 e 11-19 que, como vimos, são decorrentes do aumento do comprimento de difusão dessas células que possibilitaram maior eficiência de coleção. As células com camadas anti-refletoras de SnO_2 também mostraram, através das curvas de resposta espectral , uma vantagem em relação às células com SiO_2 devido à diferença no índice de refração. Pode-se notar também uma variação das tensões de circuito aberto. Isto fica evidente nas células 12-4 e 12-6 , embora a 12-6 apresente uma V_{ca} menor em virtude da baixa resistência paralelo que, como vimos no capítulo II, seu efeito principal é o de provocar uma queda na V_{ca} (ver equação 4.14) em decorrência de um aumento na corrente de saturação do diodo. Nas células 11-17 e 11-19 os baixos valores de V_{ca} podem ser justificados pelo tipo de metalização na parte posterior da célula (Tabela V - 1); que pode induzir a formação de uma barreira Shottky e consequentemente uma redução da tensão de barreira (ver Tabela V-8) e portanto da tensão de circuito aberto.

Por outro lado, é importante enfatizar que bons desempenhos são obtidos nas células com metalização de níquel onde o processo de formação dos contatos envolve tecnologias mais simples e de menor custo.

5.8- Conclusão

Uma célula solar de homojunção pode ser representada por diferentes modelos físicos, dependendo de como ela é feita. Neste trabalho utilizamos o modelo que geralmente é utilizado para descrever dispositivos com região de topo difundidos. Este modelo ,

como vimos no capítulo II, é baseado em uma série de aproximações para possibilitar a aplicação do princípio de superposição, no qual as equações que descrevem as características $I \times V$ das células estão fundamentadas.

A análise dos resultados obtidos na caracterização das células solares, bem como a análise dos sistemas de medidas utilizados devem considerar o fato de que partimos de um modelo previamente estabelecido e que os dispositivos fabricados podem, como decorrência do processo tecnológico, não se enquadrar perfeitamente naquele modelo. Pode-se também justificar imprecisões nos resultados em virtude dos erros cometidos durante as medições.

Em vista disso, podemos concluir que tanto os parâmetros obtidos como os métodos desenvolvidos para caracterização são satisfatórios e estão plenamente de acordo com aqueles encontrados na literatura. Deste modo, consideramos que o trabalho desenvolvido pode contribuir de maneira a facilitar a compreensão das várias nuances do processo tecnológico e, desta forma, permite sugerir mudanças no sentido de aperfeiçoá-lo.

Por outro lado, uma série de mudanças poderá ser feita no sentido de melhorar a precisão das medidas, agilizar o processo de caracterização e conseguir informações sobre outros parâmetros, de maneira que não somente as células solares de silício monocristalino possam ser analisadas, como também células de outros tipos. Como exemplo destas mudanças podemos citar:

- adaptação do criostato, utilizado nas medidas com variação de temperatura, de modo que sejam possíveis as medidas de resposta espectral e comprimento de difusão dos portadores minoritários da base em função da temperatura.
- acoplamento do sistema de medidas de característica $I \times V$ no escuro e também do sistema de medidas de capacitância em função da tensão inversa aplicada a um terminal de computador ou à calcula

dora HP (9825A), de modo que as medidas sejam obtidas automaticamente.

- fazer as medidas de capacitância também em função da tensão direta aplicada e em função da frequência, o que possibilita a determinação da profundidade de junção e tempo de vida dos portadores minoritários.
- aperfeiçoamento do método de oxidação anódica para medir o perfil da concentração de dopantes doadores na camada difundida da célula.

A N E X O 1

```

J: "PEQUENA: CARACTERISTICA DAIA":
1: "03 de Novembro de 1981":
2: dim V[50], I[50], P[1], L[50], N[15], O[50], S[1]
3: 0→r30
4: flt 1
5: fmt 1,2x,e9.2,12x,e9.2;fmt 2,e9.2
6: fmt 3,3/;fmt 4,e9.2,z
7: ent "CELULA ? (Nome)",N$
8: ent "Numero de pontos N =?",N
9: ent "Calculos com I ou J?(I/J)",P$
10: if P$="I";gto "continue"
11: ent "Area(cm2)=?",A
12: "continua":fmt 1,2x,e9.2,12x,e9.2
13: fmt 2,e9.2;fmt 3,3/;fmt 4,e9.2,z
14: if r30=1;gto "noval"
15: for Y=1 to N
16: ent "vf[mV]=?",V[Y];if P$="I";gto "corrente"
17: ent "J(A/cm2)=?",I[Y];I[Y]*A→I[Y];gto "densidade"
18: "corrente":ent "I(A)=?",I[Y]
19: "densidade":next Y
20: wrt 701,"CALCULO DA CARACTERISTICA DE UMA CELULA NO ESCURO!"
21: wrt 701,"";wrt 701,"* * * * * CELULA : ",N$
22: wrt 701.3,""
23: wrt 701," TENSÃO (mV) CORRENTE (A)"
24: wrt 701,"-----";wrt 701,""
25: for Y=1 to N;wrt 701.1,V[Y],I[Y];next Y
26: if P$="I";gto "nprta"
27: wrt 701,"";wrt 701.2,"Area(cm2)= ",A
28: "nprta":int(log(I[N]))→Y
29: int(1+I[N]*10(-Y))*10Y→Y
30: int(log(V[N]))→X;int(1+V[N]*10(-X))*10X→X
31: dsp "ATENCAO:Coloque papel no plotter";stp
32: pclr;sc1 -X/2,3*X/2,-Y/2,3*Y/2
33: pen= 2;wrt 705,"VS10"
34: xax 0,X/10,0,X,2;yax 0,Y/10,0,Y,2
35: csiz 1.5,2,1,0;pen= 3;plt 2*X/3,-Y/3,5
36: lbl "Tensao (mV)";pen;csiz 1.5,2,1,90;plt -X/3,Y/3,5
37: lbl " Corrente (A)"
38: for W=1 to N;wrt 705,"sm.";plt V[W],I[W];next W
39: wrt 705,"sm ";csiz 1.5,2,1,0;pen;plt X/4,Y,5
40: lbl "Celula: ",N$
41: "noval":
42: 0→F;0→G;0→P;0→J
43: for Y=1 to N;ln(I[Y])→L[Y];F+V[Y]2→F
44: G+V[Y]→G;H+V[Y]*L[Y]→H;J+I[Y]→J
45: next Y;(H-G*J/P)/(F-G2/N)→T
46: (J-T*G)/N→K;int(L[N])+1→F
47: int(L[1])→G;abs((F-G)/3)→H
48: if r30=1;gto "noval2"
49: dsp "ATENCAO:Coloque papel no plotter";stp
50: pclr;wrt 705,"VS10"
51: sc1 -X/2,3*X/2,G-3*H/2,F+H;pen= 2
52: xax G,X/10,0,X,2;flt 2;yax 0,(F-G)/10,G,F,2
53: flt 1;csiz 1.5,2,1,0;pen= 3;plt 2*X/3,G-H,5
54: lbl "Tensao (mV)"
55: csiz 1.5,2,1,90;pen= 3;plt -X/3,G+2*H/3,5
56: lbl " ln de Corrente"
57: for W=1 to N;wrt 705,"sm.";plt V[W],I[W]

```

```
58: next W; pen# 4; pen
59: for W=1 to N; T*V[W]+K+F; wrt 705, "sm."
60: plt V[W], F; next W
61: exp(K)+F; 38.67/(T*1e3)+T
62: wrt 701.2, "Ao =", T
63: csiz 1.5, 2, 1, 0; wrt 705, "sm "; plt X/1.2, G+H, 5
64: lbl "Celula: ", N$; pen; plt X/1.2, G+2*H/3, 5; flt 2
65: lbl "Ao =", T; pen; plt X/1.2, G+H/2, 5
66: lbl "Io =", F; wrt 701.2, "Io =", F
67: "noval2": flt 1; ent "Vmax(mV)?", r1; ent "Imax(A)?", r2
68: wrt 701, " "; wrt 701.2, "Vmax(mV)=", r1; r1/1000+r1
69: wrt 701.2, "Imax(A)=", r2; wrt 701, " "
70: if r30=0; goto "noval3"
71: exp(K)+F; 38.67/(T*1e3)+T
72: "noval3":
73: "nvAo": ent "Quantos valores para Ao ?", r3
74: "noval3": r2-F*(exp(38.7*r1/T)-1)+O[1]; T+L[1]
75: for Y=2 to r3+1
76: ent "Ao ?", L[Y]
77: r2-F*(exp(38.7*r1/L[Y])-1)+O[Y]; next Y
78: for Y=1 to r3+1
79: wrt 701.4, "Ao= ", L[Y]
80: wrt 701.2, "                                Iout(A)= ", C[Y]
81: next Y
82: ent "Novos valores para Ao ? (S/N)", S$
83: if S$="S"; goto "nvAo"
84: ent "Melhor valor de Iout(A) ?", r4
85: wrt 701.3, ""
86: wrt 701.2, "Valor escolhido de Iout = ", r4
87: wrt 701, ""
88: for Y=1 to r3+1
89: (r2-r4)/(exp(38.7*r1/L[Y])-1)+r5
90: wrt 701.4, "Ao= ", L[Y]
91: wrt 701.2, "                                Io (A) = ", r5
92: next Y
93: ent "Valor escolhido de Ao ?", r6
94: wrt 701.3, ""; wrt 701.2, "Valor escolhido de Ao= ", r6
95: wrt 701, ""; .025+r3
96: "Vout": if r3>.6; goto "Voutf"
97: wrt 701.4, "Vout(V)= ", r3
98: r2-F*(exp(38.7*r3/r6)-1)+r4
99: wrt 701.2, "                                Iout(A)= ", r4
100: r3+.025+r3; goto "Vout"
101: "Voutf": wrt 701, ""
102: wrt 701, "-----"
103: fix 3; for Y=1 to 24
104: .025*Y+r3; gsp "Vout(V)=", r3; wait 1500
105: ent "Iout(A) ?", O[Y]; next Y; flt 1
106: int(log(r2))+r9; int(1+r2*10^(-r9))*10^r9+r9
107: gsp "ATENCAO: Coloque papel no Plotter"; str
108: polr; scl -.3, .9, -r9/2, 3*r9/2
109: pen# 1; xax 0, .05, 0, .6, 2; wrt 705, "Vx10"
110: yax 0, r9/10, 0, r9, 2; csiz 1.5, 2, 1, 0; pen# 2
111: plt .4, -2*r9/5, 5; lbl "Tensao(V)"; pen
112: csiz 1.5, 2, 1, 90; plt - 2, r9/3, 5
113: lbl "Iout (A)"; wrt 705, "Vx10"
114: for Y=1 to 24
115: if O[Y]<0; goto "pulando"
116: wrt 705, "sm."; plt .025*Y, O[Y]; next Y
```

```
117: "pulando":pen# 3;pen
118: for Y=1 to 24
119: r2=F*(exp(.968*Y/r6)-1)+r4
120: if r4<0;goto "negat"
121: wrt 705,"sr.";plt .025*Y,r4;next Y
122: "negat":wrt 705,"sr.";csiz 1.5,2,1,0;plt .5,r9,5
123: lbl H$;flt 1;ent "Rp(Ohms)",r20;ent "Rs(Ohms)",r21;wrt 701.3,""
124: wrt 701.2,"Rp(Ohms)= ",r20;wrt 701.2,"Rs(Ohms)= ",r21
125: wrt 701,"";wrt 701,"      Vout (V)          Iout* (A)"
126: wrt 701,"-----";wrt 701,""
127: for Y=1 to 24
128: r20/(r20+r21)*(r2-.025*Y/r20-F*(exp(.968*Y/r6)-1))+r22
129: wrt 701.1,.025*Y,r22;next Y
130: wrt 701.3,""
131: wrt 701,"-----"
132: wrt 701.3,""
133: l+r30
134: dsp "TERMINOU, TENHA UM BOM DIA, TCHAU.";stp
*28814
```

A N E X O 2

Programa : Resposta Espectral

```
1: "versao 1 - Setembro de 1992 - Farinha":
2: dim D$(9),O$(15),R$(1)
3: ent "Seu nome ?",O$
4: ent "Data?(dd/mm/aa)",D$
5: dim I$(6,10),T$(10),N$(8),R(15),A,C,I(15),L(2,15)
6: trk 1;luf 0,I$
7: dsp "Posicione o papel no Printer";beep;wait 2000
8: gsb "Repadrao"
9: dim J$(10),M$(15),A(4,15),B,D,C$(10),O(3,5),E,L$(8),F,G
10: sfg 1
11: "loop1":if not flg1;gto "fim"
12: gsb "IscCel"
13: gsb "Calcula"
14: gsb "Imprime"
15: cfg 4
16: ent "Os valores do PADRAO conferem?(s/n)",R$
17: if cap(R$)="N";sfg 4;gsb "IscPadrao"
18: ent "Os valores do DISPOSITIVO conferem?(s/n)",R$
19: if cap(R$)="N";fmt 1,3/;wrt 701.1;jmp -7
20: if flg4;fmt 1,3/;wrt 701.1;jmp -7
21: gsb "Plota"
22: if flg3;gsb "CalcLn"
23: if flg3;gsb "ImpLn"
24: if not flg3;fmt 1,13/;wrt 701.1
25: ent "Mais alguma medida?(s/n)",R$
26: if not cap(R$)="S";cfg 1;gto "final"
27: for I=1 to 15;O=L(2,I);next I
28: ent "Foi mudado o padrao?(s/n)",R$
29: if not cap(R$)="S";jmp 4
30: for I=1 to 15;O=L(1,I)+R(I)+I(I);next I
31: gsb "Repadrao"
32: gto "final"
33: ent "Foi mudada a iluminacao?(s/n)",R$
34: if not cap(R$)="S";gto "final"
35: for I=1 to 15;O=I(I);next I
36: gsb "IscPadrao"
37: "final":gto "loop1"
38: " ":
39: "Repadrao":
40: ent "Tipo do padrao?(fotodiodo/celula/radiometro)",T$
41: ent "Nome do padrao?",N$
42: len(N$)+r2;B=r2+r2
43: for I=1 to r2;A$=" "+N$;next I
44: l+r1;cfg 2
45: if r1>6 or flg2;jmp 3
46: if cap(I$(r1,1,3))=cap(N$);sfg 2
47: r1+l+r1;jmp -2
48: r1=l+r1;if not flg2;gto "loop3"
49: dsp "Caracteristica do padrao esta sendo lida da fita"
50: val(I$(r1,9,10))+r2
51: trk 1;luf r2,R[*],A
52: for I=1 to 15;300+50I+L(1,I);next I
53: gto "ImpPadrao"
54: "loop3":cfg 13
55: dsp "Inicio da obtencao da .....";beep;wait 2000
56: dsp "caracteristica do padrao ";beep;wait 2000
57: ent "Comprimento de onda?(nm)",r3
58: if flg13 or r3<325 or r3>1074;gto "fim3"
59: r3/50-6+r3;50r3+300+L(1,prnd(r3,0))
60: ent "Responsividade absoluta?(Unid.SI)",R[prnd(r3,0)]
```

```
61: jmp -4
62: "fim3":if T$="radiômetro";1→A;gto "ImpPadrao"
63: ent "Area do dispositivo padrao?(m^2)",A
64: "ImpPadrao":1→r4
65: fmt 1,9//;wrt 701.1
66: fmt 1,10x,3cl0,3//;wrt 701.1,T$," padrao ",N$
67: fmt 1," Operador: ",cl5,2//;wrt 701.1,O$
68: fmt 1," Data : ",c8,2//;wrt 701.1,D$
69: fmt 1,7x,"Comprimento de onda",3x,"Sensibilidade absoluta";wrt 701.1
70: fmt 1,14x,f4.0,20x,e10.3
71: for I=1 to 15;wrt 701.1,L[I,I],R[I];next I
72: fmt 1,3//;wrt 701.1
73: if not A=1;fmt 1,es.1,z;wrt 701.1,"Area do dispositivo = ",A," m^2"
74: 26-int(A)→r4;for I=1 to r4;wrt 701;next I
75: ent "A caracteristica esta correta?(s/n)",R$
76: if cap(R$)="N";gto "RePadrao"
77: " ":
78: "IscPadrao":
79: cfg 13;1→r3
80: dsp "Forneca a medida obtida sobre +-";beep;wait 2000
81: dsp "o padrao , conforme requisitado";beep;wait 2000
82: ent "Comprimento de onda?(nm)",r3
83: if flgl3 or r3<325 or r3>1074;gto "fim4"
84: r3/50-6→r3
85: ent "Resposta medida?(Unidades S.I.)",I[prnd(r3,0)];jmp -3
86: "fim4":ent "Constante de medida?(K1)",C;ret
87: " ":
88: "IscCel":
89: ent "Tipo do dispositivo sob teste?(fotodiodo/celula/radiômetro)",J$
90: ent "Nome do dispositivo?",M$
91: ""→C$;0→G→E→B
92: sfg 3;if U$="radiômetro";cfg 3;jmp 6
93: ent "Camada antirefletora?(SiO2/...)",C$
94: if not (cap(C$)=cap("SiO2")) or cap(C$)=cap("SnO2"));jmp 2
95: ent "Espessura do Oxido?(Angstroms)",G
96: ent "Numero de dedos da grade?",E
97: ent "Area ativa do dispositivo?(m^2)",B
98: ent "Lock-in utilizado?(PAR-220/HR-8)",L$
99: ent "Intensidade do bias?(Unidd.S.I.)",F
100: dsp "Forneca a medida obtida sobre o";beep;wait 2000
101: dsp "dispositivo,conforme requisitado";beep;wait 2000;cfg 13
102: ent "Comprimento de onda?(nm)",r3
103: if flgl3 or r3<325 or r3>1074;gto "fim5"
104: r3/50-6→r3;300+50r3→L[2,prnd(r3,0)]
105: ent "Resposta medida?(Unidades S.I.)",M[4,prnd(r3,0)];jmp -3
106: "fim5":ent "Constante da medida?(K2)",D;ret
107: " ":
108: "Calcula":sfg 14;cfg 15;0→r5;1→r6
109: for I=1 to 15
110: M[4,I]D/B*R[I]A/I[I]C→N[1,I];1240M[1,I]/L[2,I]→A[3,I]
111: if flgl5;cfg 15;0→M[3,I]→M[1,I]
112: if A[1,I]>r5;I→r6;M[1,I]→r5
113: next I
114: for I=1 to 15;M[1,I]/M[1,r6]→N[2,I];next I
115: cfg 14;ret
116: " ":
117: "Imprime":
118: 5→r4;fmt 1,4//;wrt 701.1
119: fmt 1,10x,cl0," sob medida : ",cl5,2//;wrt 701.1,J$,L$
```



```

120: fmt 1," operador: ",cl5;wrt 701.1,D$
121: fmt 1," data :      ",8x,c8;wrt 701.1,D$;r4+5→r4
122: fmt 1,2/,10x,"camada antirefletora : ",3x,cl0,3x,f8.0," Angstroms"
123: wrt 701.1,C$,G
124: fmt 1,10x,"numero de dedos da grade:",5x,f3.0;wrt 701.1,E
125: fmt 1,10x,"Area ativa do dispositivo(m^2):",e8.1;wrt 701.1,3
126: fmt 1,/,5x,"Lock-in utilizado : ",8x,c8;wrt 701.1,L$
127: fmt 1,5x,"Intensidade do bias(W/m^2): ",e11.4;wrt 701.1,F
128: fmt 1,35x,"K1= ",f5.2,/,35x,"K2= ",f5.2,/,;wrt 701.1,C,D
129: fmt 1,10x,"Resposta maxima= ",f8.5," A/W  ,  a ",f4.0," nm"
130: wrt 701.1,r5,(r6+6)50
131: fmt 1,3/;wrt 701.1
132: fmt 1,"Comprimento      Ifd      Icel      Resposta      Resposta      Eficiencia
133: wrt 701.1
134: fmt 1," de onda",23x," absoluta      relativa      quantica";wrt 701.1
135: fmt 1,5x,"nm",6x,"      A      ",4x,"      A      ",3x,"A/W";wrt 701.1
136: fmt 1;wrt 701.1;r4+21→r4
137: for I=1 to 15
138: if L[2,I]=0;jmp 3
139: fmt 1,3x,f4.0,5x,e8.1,3x,e8.1,2x,e8.1,2x,f7.4,4x,f7.4
140: wrt 701.1,L[2,I],1[I],M[4,I],M[1,I],M[2,I],M[3,I];r4+1→r4
141: next I
142: 53-r4→r4;for I=1 to r4;wrt 701;next I
143: ret
144: " ":
145: "Plota":
146: ent "Voce deseja plotar graficos?(s/n)",R$
147: if not cap(R$)="S";ret
148: ent "Coloque papel no ploter;(continue)",R$
149: pclr;wrt 705,"VS10"
150: scl 50,1350,-.15,1.33;deg
151: pen# 1;fxd 0;xax 0,50,350,1050,2
152: csiz 1.5,2,1,0;plt 600,-.15,1
153: lbl "Comprimento de onda (nm)";pen
154: fxo 1;yax 350,.1,0,1,1
155: pen# 2;csiz 1.5,2,1,90;plt 220,.33,1
156: lbl "Responsividade (A/W)";pen
157: pen# 3;plt 150,.33,1
158: if flg3;lbl "Eficiencia quantica";pen
159: pen# 2;wrt 705,"SM "
160: for I=1 to 15;if not L[2,I]=0;plt L[2,I],M[1,I]
161: next I
162: wrt 705,"SM*";pen;if not flg3;jmp 6
163: for I=1 to 15;if not L[2,I]=0;plt L[2,I],M[2,I],1
164: next I
165: pen# 3;wrt 705,"SMX";pen
166: for I=1 to 15;if not L[2,I]=0;plt L[2,I],M[3,I]
167: next I
168: pen# 1;wrt 705,"SM ";csiz 1.5,2,1,0;pen
169: plt 600,1.25;lbl U$;lbl " ";lbl R$;pen
170: plt 1100,1;lbl O$;pen
171: plt 1100,.9;lbl D$;pen
172: ret
173: " ":
174: "CalcLn":
175: ent "Voce deseja o calculo de Ln?(s/n)",R$
176: if cap(R$)="N";cfg 3;ret
177: trk 1;ldf 1,0[*]
178: if cap(C$)=cap("SiO2");1.46→H;gto "CalcR"
179: if cap(C$)=cap("SnO2");2→H;gto "CalcR"

```

```
180: dsp "Forneca os dados conforme pedido";beep;wait 2000
181: "loop6":cfg 13
182: ent "Comprimento de onda(800 a 1000 nm)",r3
183: if flgl3 or r3<775 or r3>1024;gto "fim6"
184: r3/50-15+r3;50r3+750+O[1,prnd(r3,0)]
185: ent "Refletividade da superficie?",O[2,prnd(r3,0)]
186: jmp -4
187: "fim6":for I=1 to 5
188: (1-O[2,I])/M[3,I+9]+O[2,I]
189: O[2,I]-1+O[2,I];1/O[3,I]+O[3,I];next I
190: O+r7+r8+r9
191: for I=1 to 5
192: r7+O[2,I]*O[3,I]+r7;r8+O[3,I]^2+r8;r9+O[2,I]^2+r9
193: next I
194: (r9-r7^2/r8)/4+r10
195: r8/r7+r11
196: r11^2*sqrt(r10/r8)+r12
197: ret
198: "Calcp":
199: rad
200: for I=1 to 5
201: 2πHG/100[1,I]+r7
202: (1-H)/(1+H)+r8
203: (H-O[2,I])/(H+O[2,I])+r9
204: r8^2+r9^2+2r8r9cos(2r7)+r7
205: r7/(1+r7)+O[2,I]
206: next I
207: gto "fim6"
208: " ":
209: "ImpoLn":
210: fmt 1,10x,"Comprimento de difusao de minoritarios ",z;wrt 701.1
211: fmt 1," calculado por fotocorrente de curto circuito";wrt 701.1
212: fmt 1,2/,20x,"Ln = ",f8.4," +- ",f8.4," microns",9/
213: wrt 701.1,r11,r12
214: pen;wrt 705,"SM ";plt 1050,.5;pen# 4
215: lbl "Ln = ",r11
216: plt 1060,.45;lbl " +- ",r12," microns"
217: ret
218: "Fim":
219: dsp "Servico encerrado ",D$
220: end
*20055
```

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. M.WOLF - "Historical development of solar cells". In: Proceedings of the 25th Power Sources Symposium, May 1972.
2. H.J.HOVEL - Solar Energy Materials, 2, 277-312 (1980)
3. P.RAPPAPORT - RCA Rev. 20, 373-397 ((1959)
4. M.P.THEKAEKARA - "Data on incident solar energy". The Energy In: Crisis and energy from the sun, Institute of Environmental Sciences, 1974.
5. J.I.PANKOVE - "Absorption". In: Optical Processes in Semiconductors. Prentice Hall, INC , 1971. Cap.3, pg.35.
6. N.ROBINSON - "Solar Radiation". Elsevier, Amsterdam the Netherlands, 1966.
7. G.YEPIFANOV - "Contact Phenomena". In: Physics Principles of Microelectronics. English Translation, Mir Publishers, 1974, cap.8, p.226-239.
8. H.J.HOVEL - "Carrier Collection, Spectral Response and Photocurrents". In: Semiconductors and Semimetals. Academic Press, INC, 1975. V.II, cap.2, p.15-20
9. H.J.HOVEL - "Solar cell electrical characteristics", In: Semiconductors and semimetals. Academic Press, INC, 1975. V.II, cap. 3, p.56-70.
10. M.WOLF - Proc.IRE, 48, 1246-1263 (1960)
11. M.WOLF - Energy Conversion, 11, 63-73 (1971)
12. BRIAN R. PAMPLIM - "Crystal Growth" - International Series of Monographs in the Science of the Solid State - Pergamon Press, 1975.
13. A.S.GROVE - "Solid-State Diffusion". In: Physics and technology of semiconductor devices. John Wiley and Sons, INC. 1967 , cap.3, p.35-78.
14. H.J.HOVEL - "Solar cell technology". In: Semiconductors and Semimetals. Academic Press, INC., 1975. Vol.II, cap.9, p.18.

15. PETER E. GISE - "Impurity introduction and redistribution".
In: Semiconductor & Integrated Circuit Fabrication. Res-
ton Publishing Company, INC, 1979, cap.9, p.69.
16. H.J.HOVEL - (ref.13,p.202)
17. J.LINDMAYER and J.F.ALLISON - Comsat Tech.Rev. 3, 1-22
18. H.J.HOVEL - (ref.13, p.207)
19. L.FRISSE; P.LAUWERS ; P.BULTEEL; L.DESMET, R.MERTENS; R.GO-
VOERTS ; R.VAN OVERSTRAETEN - 13th IEEE Photovoltaic Specia-
lists Conference, p.590, 1978.
20. H.J.HOVEL - (ref.7, p.23)
21. A.R.MOORE - RCA Review, 36, 551-565 (1975)
22. CARL L.ALEY & SCOTT TURNER - Semiconductor International,
May, 1980.
23. M.WOLF & H.RAUSCHENBACH - Advanced Energy Conversion, 3,
455-479 (1963)
24. R.N.HALL - Solid-State Electronics, 24, 595-616 (1981)
25. H.J.HOVEL - (ref.7, p.24)
26. V.L.DALAL & A.ROTHWARF - J.Appl.Phys. 50, 2980 (1979)
27. B.O.SERAFHIN - "Solar Energy Conversion". In: Topics in
Applied Physics, v.31, p.180-188
28. R.B.ADLER; A.C.SMITH ; R.L.LONGINI - "Determining Conducti-
vity Type". In: Introduction to Semiconductor Physics,
John Wiley & Sons, INC. New York. London. Sydney. Apêndi
ce, p.197 (1964)
29. H.J.HOVEL - "Temperature e Intensity". In: Semiconductors
and Semimetals. Academic Press, INC, 1975, v.II, cap.8,
p.166-180.
30. N.D.ARORA & J.R.HOUSER - Solar Energy Materials. 6, 151-158
(1981).