

CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DE CÉLULA SOLAR DE TRIPLA JUNÇÃO

Dalmo Geraldo Pasin – dgpasin@gmail.com

Waldeir Amaral Vilela – waldeir.vilela@inpe.br

Nelson Veissid – nelson.veissid@inpe.br

Marcos Dias da Silva – marcos@las.inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Laboratório Associado de Sensores e Materiais (LAS). Av. dos Astronautas, 1758 – São Jose dos Campos/ SP, 12227-010

Resumo. Neste trabalho propomos um sistema simplificado para avaliar a Resposta Espectral de Células Solares de Tripla Junção, utilizando vários filtros de interferência de bandas estreitas em vez de monocromador. Com isso, foi possível montar um sistema mais simples e mais barato. Embora a resolução espectral seja menor, é possível trabalhar com intensidades luminosa mais altas e com uma relação sinal/ruído melhor. Para testar esse sistema foram obtidas curvas de resposta espectral em células solares de tripla junção (GaInP/GaInAs/Ge), do tipo utilizado no satélite CBERS-4, que responde na região espectral de 280 nm a 1700 nm.

Palavras-chave: Energia Solar, Célula Solar de Tripla Junção, Caracterização Espectral, (GaInP/GaInAs/Ge).

1. INTRODUÇÃO

A medida da Resposta Espectral (RE) de células solares consiste em obter a curva da corrente gerada pelo dispositivo em função do comprimento de onda da radiação incidente (Ferreira, 2012). Segundo Ikegami (2001) as células solares de tripla junção atualmente utilizadas em satélites são formadas por três junções semicondutoras (diodos) em série, onde a corrente total da célula é limitada pela menor corrente gerada por uma das junções (Anaty, 2016 e Meusel 2007). Para obtermos a resposta espectral deste tipo de célula é necessário medir a resposta espectral de cada junção separadamente (King et al., 2000). Sendo assim, para obter a RE de uma determinada junção é necessário fazer com que esta junção seja a geradora da menor corrente (Steiner, 2009) e iluminar a célula com radiação na região espectral das outras junções, e em intensidade suficiente para que elas não funcionem como um diodo limitador (bloqueador) de corrente (Meusel 2003 e Cotal, 2000). Dessa forma, para obter a resposta espectral de uma junção específica, iluminamos a célula com radiação que passou por filtros de interferência de banda estreita ou por um monocromador, a qual denominaremos de luz de medição. Adicionalmente, superposta à luz de medição, iluminamos o dispositivo com radiação dentro das faixas espectrais das outras duas junções, denominada de luz de polarização. A luz de polarização tem que ter intensidade maior que a luz de medição para que as junções que não estão sendo avaliadas no momento não interfiram na corrente total da célula (Field, 1998).

Para separar o sinal gerado pela luz de medida do sinal gerado pela luz de polarização e de outras fontes de luz indesejáveis, a luz de medida deve ser modulada por um *chopper* e o sinal do dispositivo medido por um voltímetro síncrono (amplificador look-in), enquanto que a luz de polarização deve ser contínua.

Um sistema de medida de Resposta Espectral utilizando filtros de interferência foi implementado no laboratório do Grupo de Dispositivos Fotovoltaicos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (GDF/INPE). Ele é composto por três lâmpadas (uma lâmpada de Quartz Tungstênio Halogena (QTH) de 250W, uma lâmpada de Quartz Tungstênio Halogena (QTH) de 200W e uma lâmpada de Xenon (Xe) de 500W), uma ventoinha, um *chopper*, filtros passa banda, filtros de interferência e um amplificador *look-in*. Com este sistema foi possível obter as respostas espectrais de cada junção, de células de tripla junção com resposta entre 280 e 1700nm.

As células solares de tripla junção utilizadas neste trabalho são do mesmo lote das que foram utilizadas no satélite CBERS-4 e são do tipo GaInP/GaInAs/Ge. Nestas células, a junção de topo é constituída de Fosfato de Gálio e Índio (GaInP) e responde na faixa espectral de 280 a 680nm; A junção do meio (GaInAs) é constituída de Arsenêto de Gálio e Índio e responde na faixa espectral de 500 a 940nm e a junção de base é de Germânio e responde na faixa espectral de 870 a 1700nm.

2. SISTEMA SIMPLIFICADO DE CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL

O Sistema desenvolvido no GDF/INPE (Fig. 1) tem como principal objetivo desenvolver estudos para caracterização espectral de células solares de tripla junção. Ele é constituído por três lâmpadas, a saber: uma lâmpada QTH de 250W para fornecer a luz de medida, uma lâmpada QTH de 200W e uma lâmpada de Xe com 500W, sendo as duas últimas utilizadas para a luz de polarização.

Também foram utilizados filtros passa banda para melhor configurar os espectros das luzes de polarização e filtros de interferência de banda estreita (10 a 12 nm) para gerar a luz de medição. A luz de medição foi modulada por um *chopper* (Stanford Research System Modelo: SR540) na frequência de 32 Hz e o sinal da célula medido por um amplificador *look-in* (Stanford Research System Modelo: SR850).



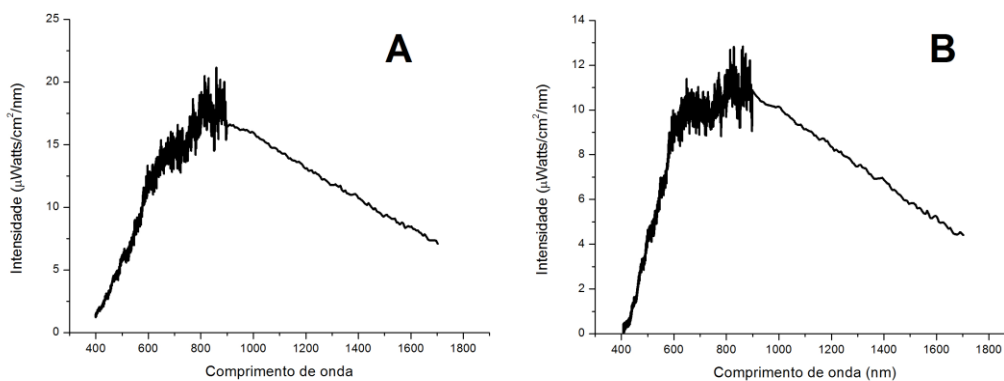
Figura 1 – Sistema de Caracterização espectral de células solares de tripla junção.

- 1) Lâmpada Xe 500W; 2) Lâmpada QTH 250W; 3) Lâmpada QTH 200W; 4) Suporte para filtros passa banda;
- 5) Suporte para filtros passa banda; 6) Suporte para filtro de interferência; 7) Chopper; 8) Suporte para célula solar;
- 9) Ventoinha; 10) Saída do sinal para o amplificador look-in

2.1 Lâmpadas

As três lâmpadas utilizadas no sistema são: uma de Quartzo Tungstênio Halógena (QTH) de 250W (Fig. 2A), que foi utilizada, juntamente com os filtros de interferência, para produzir a luz de medição; uma de Quartzo Tungstênio Halógena (QTH) (Fig. 2B) de 200W, e outra de Xênio (Xe) (Fig. 2C) de 500W para, juntamente com filtros, produzir a luz de polarização. As lâmpadas QTH foram utilizadas por ter um espectro bem-comportado e contínuo sem picos, devido a sua de emissão térmica, e com seu maior valor de irradiância espectral na região do visível e do infravermelho próximo.

A lâmpada de Xe de 500W foi utilizada para fornecer a luz de polarização para a célula de base, pois possui uma maior intensidade e espectro (Fig. 2C) que vai do visível até o infravermelho.



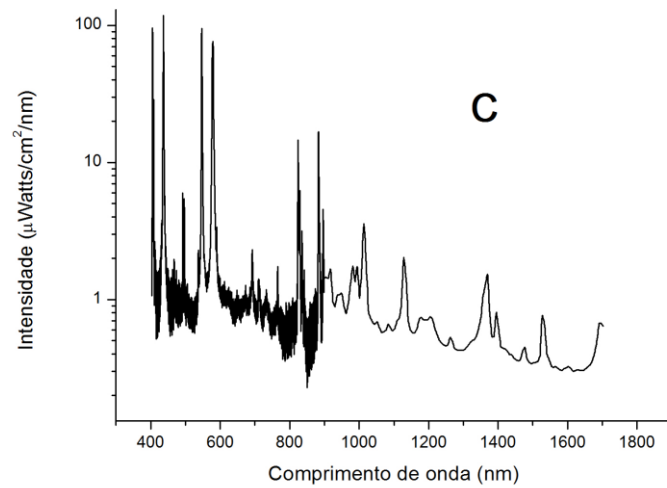
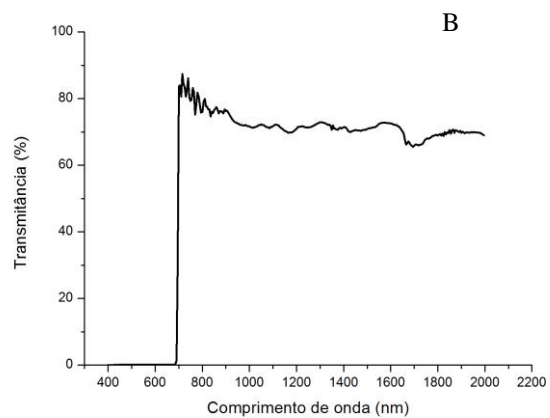
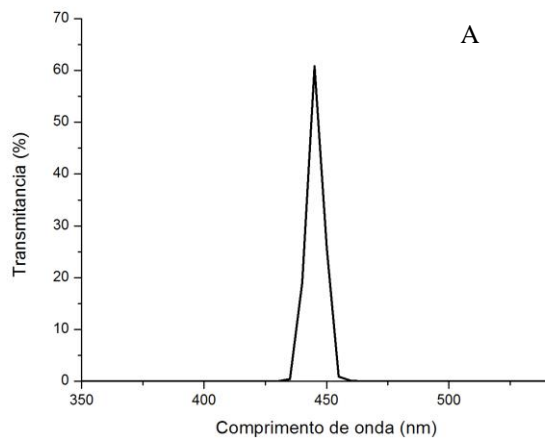


Figura 2 – Irradiância das lâmpadas QTH e de Xe.

- 2A) Irradiância da lâmpada QTH de 250W medida a uma distância de 50cm;
- 2B) Irradiância da lâmpada QTH de 200W medida a uma distância de 50cm;
- 2C) Irradiância da lâmpada Xe de 500W medida a uma distância de 50cm.

2.2 Filtros Ópticos

Para realizar a caracterização espectral foram utilizados neste sistema filtros de interferência (exemplo na Fig. 4a) para fornecer a luz de medição, com banda passante de 10nm a 12nm, centrados nos seguintes comprimentos de onda: 350nm, 400nm, 449.5nm, 500nm, 549.5nm, 600nm, 650nm, 700nm, 749.5nm, 800nm, 849.5nm, 900nm, 950nm, 1000nm, 1050nm, 1100nm, 1150nm, 1200nm, 1250nm, 1300nm, 1350nm, 1400nm, 1450nm, 1500nm, 1550nm e 1600nm. Para a luz de polarização foram utilizados dois filtros passa alta, de 700nm e 900nm (Fig. 4b), para a luz de polarização das células de base e do meio, e dois filtros passa banda: KG1 entre 200nm e 950nm (Fig. 4c) para a célula de topo e meio e BG12 entre 310nm e 510nm para a luz de polarização da célula de topo.



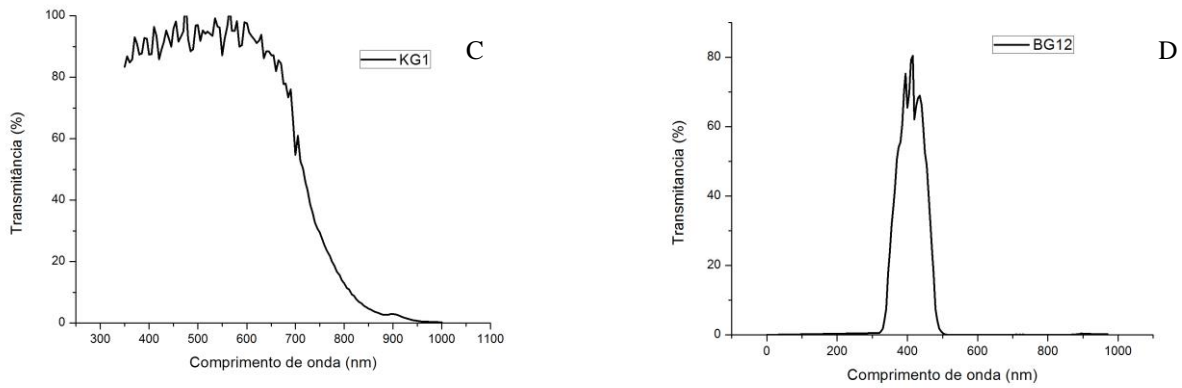


Figura 4 – Transmitância do filtro.

- (A) Transmitância do filtro de interferência de 449nm
- (B) Transmitância do filtro passa alta de 700nm
- (C) Filtro KG1 (200 a 950 nm)
- (D) Filtro Passa banda BG12 (310 a 510 nm)

3. RESPOSTA ESPECTRAL DE CÉLULA DE TRIPLA JUNÇÃO (GaInP/GaInAs/Ge)

A seguir descreveremos como foi realizada a obtenção da curva de Resposta Espectral de cada uma das junções da célula solar de tripla junção (GaInP/GaInAs/Ge) do tipo utilizada no satélite CBERS-4.

3.1 Configuração para caracterização da junção de topo

A junção de topo (GaInP) se caracteriza por ser a que absorve os fótons de maior energia, entre 280nm e 680nm. Para realizar a caracterização desta junção é necessário que sejam iluminadas também as outras duas junções. Nesta configuração (Fig. 5) foi utilizada a lâmpada de Xenon de 500W com um filtro passa alta de 700nm para fornecer a luz de polarização. Para a luz de medida foi utilizada a lâmpada QHT de 250W com filtros de interferência de banda estreita centradas em 350nm, 400nm, 449.5nm, 500nm, 549.5nm, 600nm, 650nm, 700nm, 749.5nm. Para separar a luz de medida da luz de polarização e da luz externa, foi utilizado um *chooper* e para realizar a leitura do sinal modulado foi utilizado um amplificador *Look-in*.

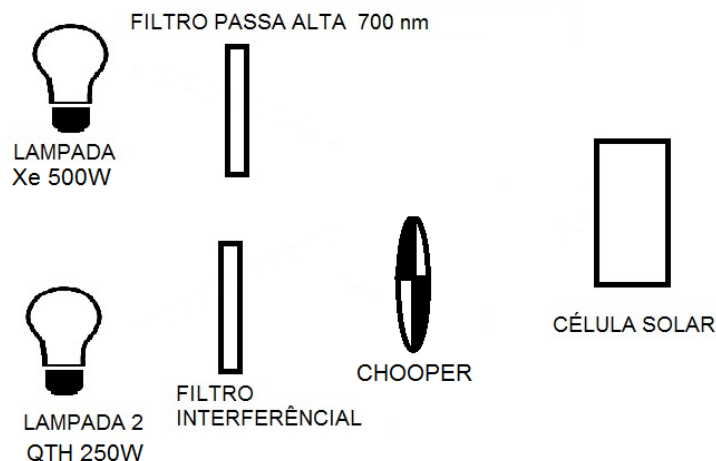


Figura 5 – Configuração para caracterização da junção de topo.

Com a configuração apresentada foi obtida a seguinte irradiância (Fig. 6) na célula solar.

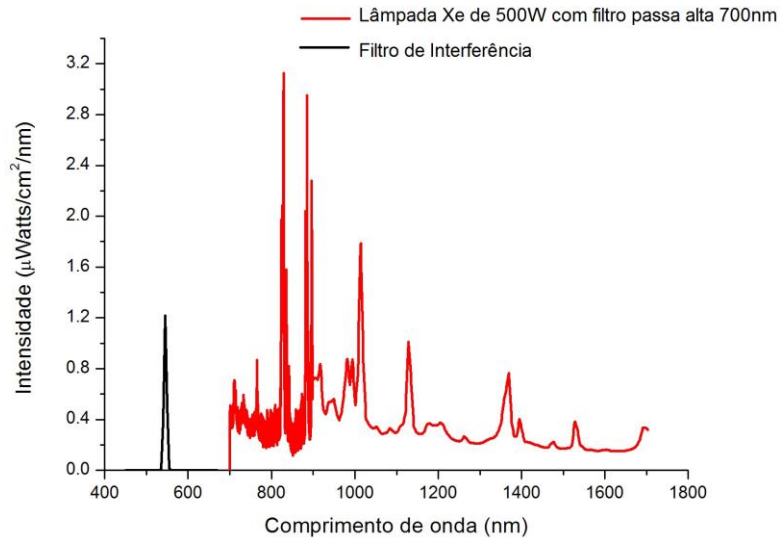


Figura 6 – Irradiância para caracterizar a junção de topo

Espectro para caracterização da junção de topo, em vermelho é apresentado o espectro de uma lâmpada Xe de 500W com um filtro passa alta de 700nm; em preto é apresentado o espectro de um filtro de interferência de 550nm como exemplo para uma luz de medida com banda estreita.

3.2 Configuração para caracterização da junção do meio

A junção do meio (GaInAs) tem uma resposta espectral predominante na região do visível e infravermelho próximo (500nm a 900nm.). Para que seja possível realizar a medida desta junção é necessário iluminar também as junções do topo e da base (Fig. 7). Para a polarizar a junção da base foi utilizada a lâmpada de Xe de 500W com um filtro passa alta de 900nm; para polarizar a junção de topo foi utilizada a lâmpada QTH de 200W junto com o filtro passa banda BG12. Para gerar a luz de medida foi utilizada a lâmpada QHT de 250 W com filtros de interferência de banda estreita centrados em 500nm, 549.5nm, 600nm, 650nm, 700nm, 749.5nm, 800nm, 849.5nm. Da mesma forma, foi utilizado o *Chopper* para modular a luz de medida e o *look-in* para realizar a leitura do sinal.

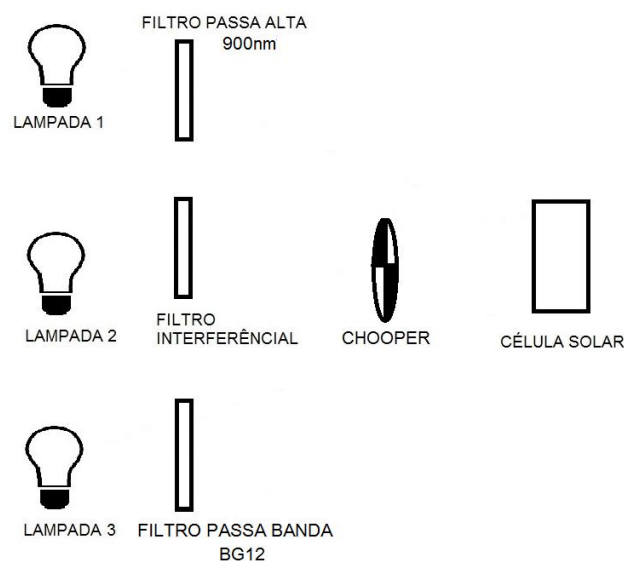


Figura 7 – Configuração para caracterização da junção do meio.

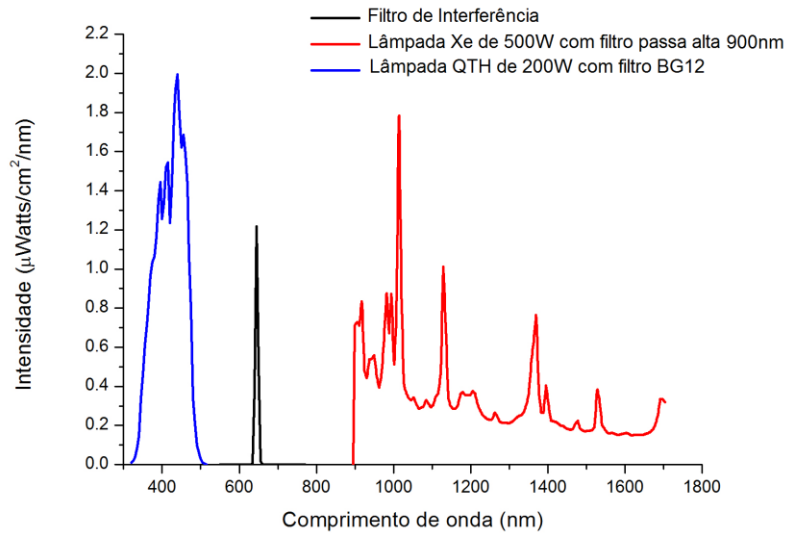


Figura 8 – Espectro para caracterização espectral da junção do meio.

Espectro para caracterização da célula do meio: em azul é apresentado o espectro de uma lâmpada de QTH de 200W com filtro passa banda BG12 e em vermelho é apresentado uma lâmpada Xe de 500W com filtro passa alta de 900nm para a luz de polarização. Em preto é apresentado um filtro de interferência de 649nm para exemplificar a luz de medida.

3.3 Configuração para caracterização da junção de base

Para a caracterização da junção de base, de Germânio (Ge), cuja resposta espectral vai de 850nm a 1700nm, é necessário também iluminar as outras duas junções. Para tanto, foi utilizada a lâmpada QTH de 250W junto com um filtro passa faixa KG1. Para gerar a luz de medição foi utilizada a lâmpada QHT de 250 W com filtros de interferência de banda estreita centrados em 800nm, 849.5nm, 900 m, 950nm, 1000nm, 1050nm, 1100nm, 1150nm, 1200nm, 1250nm, 1300nm, 1350nm, 1400nm, 1450nm, 1500nm, 1550nm e 1600nm, juntamente com o *chooper* e o amplificador *look-in*.

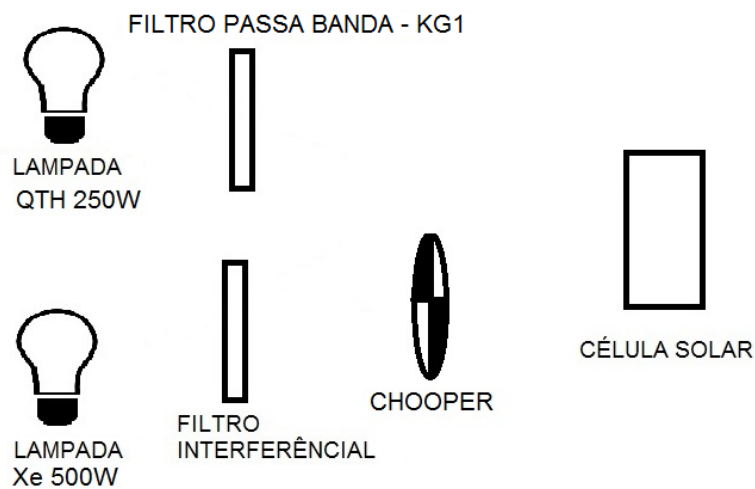


Figura 9 – Configuração para caracterização da junção da base.

O espectro de irradiância que incide na célula solar é apresentado na Fig. 10.

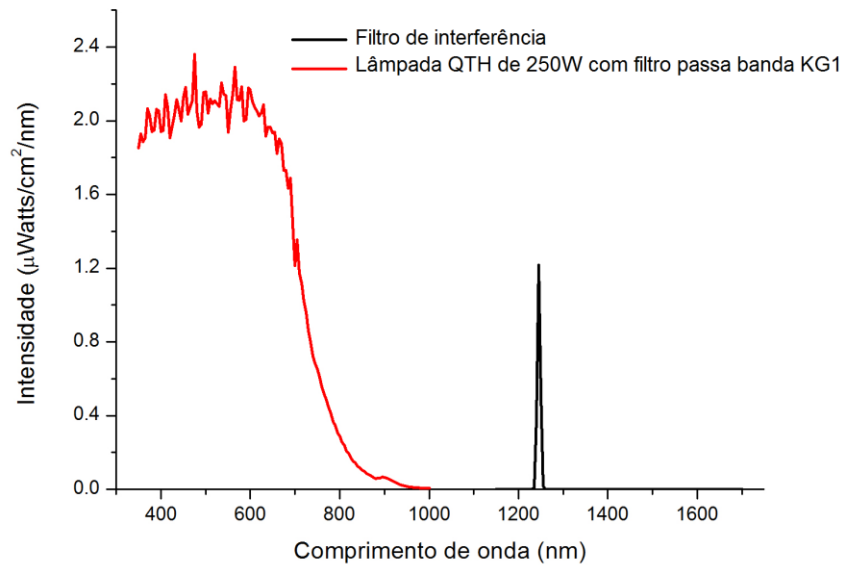


Figura 10 – Espectro para caracterização espectral da junção de base: em vermelho é apresentado o espectro da lâmpada QTH 250W com um filtro passa banda KG1; em preto um filtro interferência de 1250nm como exemplo para a luz de medida.

3 RESULTADOS

Após concluída a montagem do sistema de medida de Resposta Espectral, foi realizada a medição da Irradiância que cada conjunto de lâmpada e filtro de interferência gerava na superfície da célula solar sob teste, com a finalidade de normalizar as medidas, pois cada filtro tem um valor de transmitância e o espectro de emissão da lâmpada não tem intensidade constante em toda a faixa espectral. Para realizar essa medição foi utilizado um radiômetro de termopilha (Laser Precision Corp. Modelo Rk-5720).

Para validar o sistema de medição proposto, foram realizados diversos testes visando determinar os principais erros no processo de medição e do sistema, em seguida, com o sistema devidamente ajustado, foram realizadas as medições de RE em várias células de tripla junção. Na Fig. 11 é apresentado uma das curvas de RE de uma célula solar de tripla junção de (GaInP/GaInAs/Ge) do tipo utilizado no satélite CBERS-4.

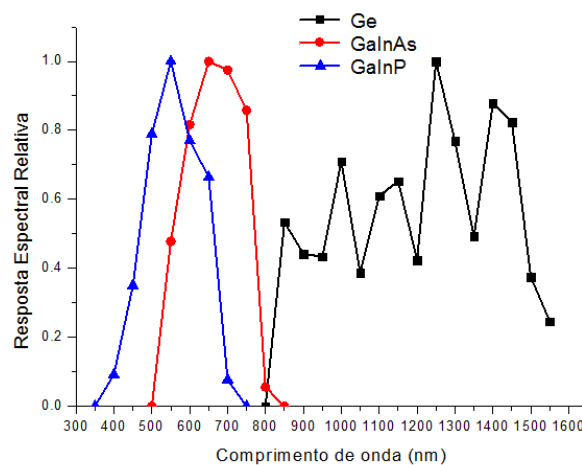


Figura 11 – Resposta espectral de uma célula solar de tripla junção de (GaInP/GaInAs/Ge) do tipo utilizado no satélite CBERS-4.

Para fins de comparação com a literatura, expressamos a resposta espectral da Fig. 11 em termos de eficiência quântica externa normalizada, conforme é mostrado na Fig. 12.

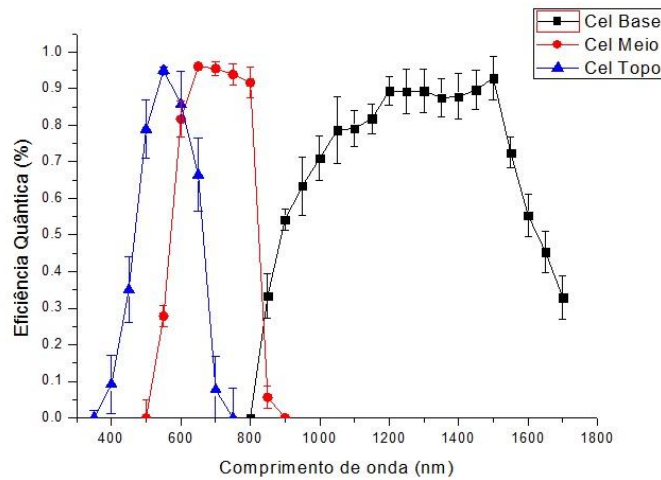


Figura 12 – Eficiência Quântica normalizada da célula solar de tripla junção (GaInP/GaInAs/Ge), conforme obtida das medidas realizadas com o sistema proposto.

Para efeito de comparação, na Fig. 13 abaixo apresentamos os resultados obtidos por M. Meusel, C. Baur, G. Letay, A.W. Bett, W. Warta e E. Fernandez, no artigo Spectral Response Measurements of Monolithic GaInP/Ga(In)As/Ge Triple-Junction Solar Cells: Measurement Artifacts and their Explanation

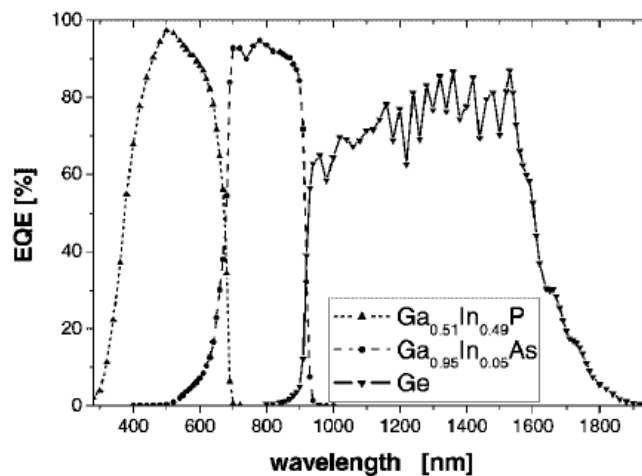


Figura 13 – Resultado obtido da Literatura (Prog. Photovolt: Res. Appl. 2003; 11:499–514 (DOI: 10.1002/pip.514))
 Fonte: Meusel (2003).

Esse resultado obtido na literatura foi gerado através de medições em um sistema de maior precisão, diferente do sistema utilizado neste trabalho. Como podemos observar os nossos resultados estão condizentes com os apresentados na literatura e as diferenças possivelmente são devidos às diferenças entre as células solares utilizadas e a precisão em que as medições foram realizadas.

4 CONCLUSÃO

A curva de resposta espectral de uma célula solar de tripla junção é um parâmetro muito importante para avaliar o seu desempenho quando em funcionamento. Além da responsividade espectral, outros parâmetros podem ser obtidos com a RE, como a eficiência quântica, o comprimento de difusão dos portadores minoritários, os efeitos da profundidade das junções e o efeito da camada antirrefletora. O sistema proposto neste trabalho é pioneiro no INPE e irá contribuir no estudo do funcionamento deste tipo de célula. Embora as células solares de multijunções ainda não sejam comuns para aplicação terrestre, mas elas são amplamente utilizadas em satélites e com a redução dos preços deste depósito, há uma tendência de que no futuro próximo elas também sejam largamente utilizadas em sistemas terrestre.

Os resultados preliminares obtidos no sistema apresentado neste trabalho, possibilita obter uma curva de resposta espectral de células solares de tripla junção que, embora tenha baixa resolução, permite estudar o comportamento deste tipo de célula em análises comparativas. Como continuidade deste trabalho, espera-se melhorar a resolução das medidas utilizando um monocromador no lugar de filtro e reduzir as incertezas das medições com a utilização multímetros de maior precisão e melhor controle das grandezas de interferência.

Agradecimentos

Ao INPE pelo suporte e por disponibilizar suas dependências e equipamentos para a realização deste trabalho experimental e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de mestrado ao aluno Dalmo Geraldo Pasin.

REFERÊNCIAS

Anaty, M. K., Belkasmi, M., Bouziane, K., Aggour, M., Ouahabi, M., 2016. Modeling and simulation of a C3MJ+ triple junction solar cell using Matlab/Simulink. International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Marrakech - Marrocos, p. 840 nos Anais da Conferência.

Cotal, H. L., King, R. R., Haddad, M., Ermer, J. H., Karam, N. H., Krut, D. D., Joslin, D. R., Takahashi, M., Cavicchi, B. T., 2000. The effects of electron irradiation on triple-junction Ga_{0.5}In_{0.5}P/GaAS/Ge Solar Cells, Proceedings of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anchorage.

H. Field; UV-VIS-IR Spectral Responsivity Measurement System for Solar Cells; National Renewable Energy Laboratory, NREL/CP-520-25654, 1998.

King, R. R., Fetzer, C. M., Law, D. C., Edmondson, K. M., Yoon, H., Kinsey, G. S., Krut, Ermer, J. H., Hebert, P., Cavicchi, B. T., Karam, N. H., 2006. Advanced III-V multijunction cells for space, Proceedings of the 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Waikoloa, Hawaii.

Ikegami, T. Maezono, F. Nakanishi, Y. Yamagata, and K. Ebihara, “Estimation of equivalent circuit parameters of PV module and its application to optimal operation of PV system,” Solar Energy Materials & Solar Cells, vol. 67, no. 1–4, pp. 389–395, 2001.

M. Meusel, C. Baur, G. Letay, A.W. Bett, W. Warta and E. Fernandez. Spectral Response Measurements of Monolithic GaInP/Ga(In)As/ Ge Triple-Junction Solar Cells: Measurement Artifacts and their Explanation DOI: 10.1002/pip.514, 2003.

M. Meusel, W. Bensch, T. Bergunde, R. Kern, V. Khorenko, W. Koestler, G. LoRoche, T. Torunski, W. Zimmermann, G. Strobl, W. Guter, M. Hermle, R. Hoheisel, G. Siefert, E. Welsch, F. Dimroth, A. W. Bett, W. Geens, C. Baur, S. Taylor and G. Hey, in Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Milan, Italy (2007), p. 16.

M. Steiner, S.P. Philipps, M. Hermle, A. W. Bett and F. Dimroth, in 24th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany (2009).

T. A. Ferreira, L. A. Berni, T. F. Paes, W. A. Vilela, A. F. Beloto. Sistema para caracterização espectral de dispositivos fotovoltaicos, IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino-Americana da ISES, 2012.

SPECTRAL CHARACTERIZATION OF SOLAR CELL TRIPLE JUNCTION

Abstract. *In this work was proposed a simplified system to evaluate the Spectral Response of Triple Junction Solar Cells, using several narrow bands interference filters instead of monochromator. Therewith, it was possible to assemble a simpler and cheaper system. Although there was a loss spectral resolution, on the other hand, it was possible to work with higher intensities and with a better signal-to-noise ratio. To evaluate this system, was used a triple junction (GaInP / GaInAs / Ge) solar cells of the type used in the CBERS-4 satellite, which responds in the spectral region from 280 nm to 1700 nm.*

Key Words: *Solar Energy, Triple Junction Solar Cell, Spectral Characterization, (GaInP / GaInAs / Ge).*