

ESPECTRÔMETRO DE RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA COM FOTODIÓDOS DE Si

Carmen C. Bueno^{*,**}, Josemary A. C. Gonçalves^{*,**}, Rodrigo R. de Magalhães^{*} e Marcello Damy S. Santos^{*}

*Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP
Caixa Postal 11049
05508-900, São Paulo, Brasil

**Pontifícia Universidade Católica de São Paulo
Rua Marquês de Paranaguá, 111
01303-050, São Paulo, Brasil

RESUMO

O presente trabalho contempla o desenvolvimento de um sistema para a espectrometria de radiação eletromagnética de baixa energia, baseado no emprego de fotodiodos comerciais de Si (Siemens SFH00206 e Hamamatsu S2506-02), de baixo custo, como detectores destas radiações. Para otimizar as condições de resposta destes fotodiodos na espectrometria de alta resolução de raios-X, foi desenvolvido um sistema de resfriamento tanto do fotodiodo como do primeiro estágio de amplificação (FET) do pré-amplificador, mediante o uso de células *Peltier*. Os melhores valores de resolução em energia para o raio- γ de 59,5 keV do ^{241}Am obtidos, em 9°C, foram FWHM = 2,10 keV para o fotodiodo Siemens SFH00206 e FWHM = 1,82 keV para o Hamamatsu S2506-02.

I. INTRODUÇÃO

A espectrometria de radiação eletromagnética de baixa energia tem sido intensamente estudada na última década em consequência da grande utilização desta técnica em aplicações industriais, pesquisas de física atômica e nuclear, astrofísica e física do estado sólido [1-9]. Em cada caso, a escolha do detector é fundamentalmente determinada pela sua resolução em energia e em tempo, eficiência intrínseca, estabilidade de resposta e sensibilidade. Nesse contexto, o uso de diodos de Si tem crescido muito nos últimos anos devido à possibilidade de obtenção de espectros com menores distorções na parte de menor energia, compatíveis aos obtidos com detectores de Si(Li) – os quais apresentam o inconveniente de refrigeração permanente, além do preço elevado.

Em virtude da ótima resolução em energia, os diodos de Si têm sido empregados em quase todas as técnicas que envolvem espectrometria de partículas carregadas [10-13] e de radiações eletromagnéticas de baixa energia: experimentos de radiação de síncrotron [14], medidas de coeficiente de difusão na produção de filmes condutores ou semicondutores [15], entre outros.

Os resultados recentemente obtidos em nosso laboratório [16], associados a nossa necessidade de desenvolver um sistema de espectrometria de raios-X de baixa energia para ser empregado em medidas de abundância isotópica nos minérios brasileiros, nos incentivaram a dar continuidade ao estudo de fotodiodos comerciais de Si em espectrometria destas radiações, a fim de aprimorar os resultados e aprofundar o conhecimento dos fenômenos limitantes das resoluções em energia encontradas.

II. ARRANJO EXPERIMENTAL

Em um estudo prévio [16], verificou-se que a obtenção de melhores resoluções em energia com os fotodiodos usados está limitada pelo ruído eletrônico do pré-amplificador. Portanto, decidiu-se desenvolver um pré-amplificador com características operacionais superiores às do pré-amplificador 142A da Ortec (anteriormente empregado), dispondo, inclusive da possibilidade de resfriamento do transistor de efeito de campo (FET) no primeiro estágio de amplificação. Uma análise das características dos FET's disponíveis no mercado adequados ao acoplamento direto com os diodos estudados, nos conduziu à escolha do FET 2SK152, que possui baixo ruído

de tensão e pequena capacidade de entrada. O pré-amplificador operacional usado, o dispositivo híbrido A250 da AMPTEK, foi escolhido devido à sua grande versatilidade de uso como pré-amplificador sensível à carga ou também sensível a corrente e tensão. A montagem do sistema constituído pelo fotodiodo e pré-amplificador foi feita diretamente na tampa de uma nova câmara de aço-inoxidável (Fig. 1). Esta tampa era dotada de conectores especiais que permitiam a polarização independentemente do A250, das células *Peltier*, do fotodiodo e também do FET. Os impulsos de saída eram enviados ao amplificador linear (Ortec-572) e deste ao analisador multicanal (Ortec Spectrum Ace). A Fig. 1 também mostra as duas células *Peltier* (Melcor, modelo FCO.45-66-05) empregadas no resfriamento independente do FET e do diodo.

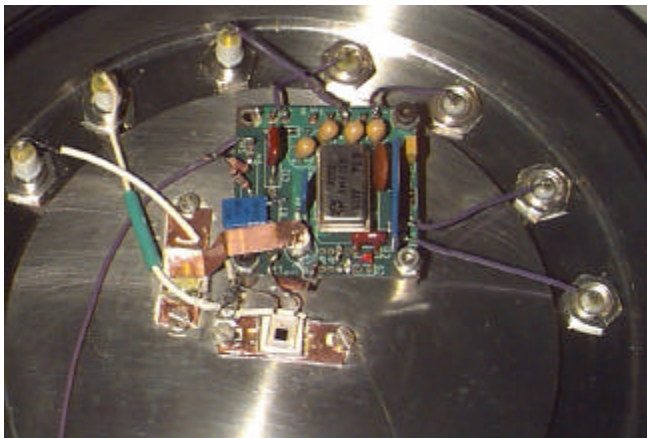


Figura 1. Montagem do pré-amplificador de baixo ruído eletrônico.

III. RESULTADOS OBTIDOS

Resolução em função da Tensão de Polarização. Os espectros de energia da fonte selada de ^{241}Am em função da tensão de polarização reversa dos diodos foram registrados em temperatura ambiente (21°C) e os respectivos valores de resolução em energia (FWHM) estão representados na Fig. 2. Nela pode-se observar que a resposta do diodo S2506-02 é ligeiramente melhor do que a do SFH00206, o que pode ser explicado pelas suas próprias características medidas como corrente de fuga e capacidade da zona de depleção. Por outro lado, existe um valor de tensão para o qual a resolução é a melhor possível, visto que, à medida que se aumenta a tensão de polarização do detetor ocorre a superposição de dois parâmetros importantes: o crescimento da corrente de fuga e a redução da capacidade do diodo. Estes parâmetros atuam de forma contrária na contribuição ao ruído eletrônico e conseqüentemente na resolução em energia encontrada. Os espectros de energia do ^{241}Am

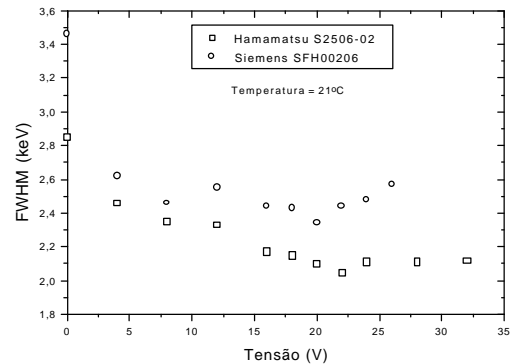


Figura 2. Curva da resolução em energia (FWHM) em função da tensão de polarização do diodo para o raio- γ de 59,5 keV do ^{241}Am

obtidos com os diodos SFH00206 e S2506-02 estão representados nas Figs. 3 e 4 e indicam uma ligeira vantagem do diodo da Hamamatsu em relação ao da Siemens. É importante salientar que os dois diodos são adequados para espectrometria, sendo possível identificar nos espectros citados as linhas principais dos fótons do ^{241}Am .

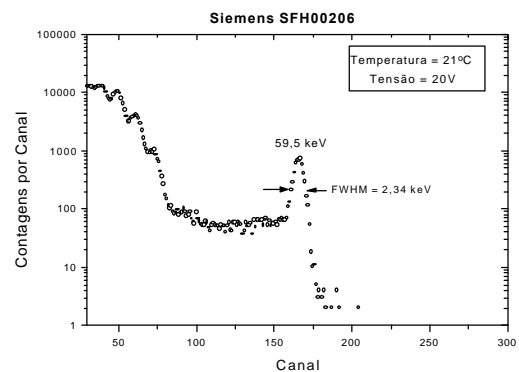


Figura 3. Espectro da radiação eletromagnética do ^{241}Am

Resolução em função da Temperatura do Diodo. Uma vez determinadas as melhores condições de resposta de ambos diodos em temperatura ambiente, iniciaram-se as medidas de resolução em energia, para a mesma linha γ de 59,5keV, em função da temperatura dos mesmos (mantendo-se o FET em temperatura ambiente). Para tanto, fixou-se

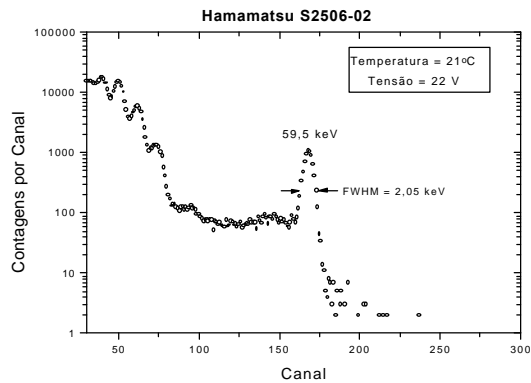


Figura 4 Espectro da radiação eletromagnética do ^{241}Am

para cada fotodiodo a tensão de polarização que conduziu ao melhor resultado em temperatura ambiente ($V = 20\text{V}$ para o SFH00206 e $V = 22\text{V}$ para o S2506-02) e variou-se a temperatura do diodo através da célula *Peltier*. As resoluções em energia medidas para ambos estão representadas na Fig. 5, onde é possível verificar uma ligeira melhora nos resultados com a redução da temperatura.

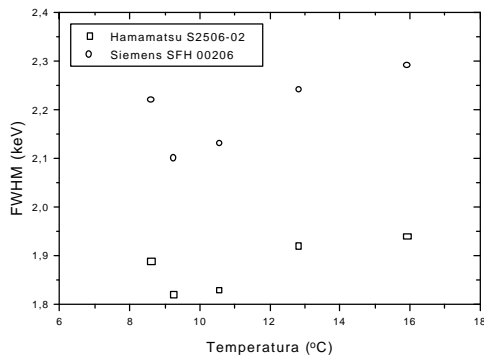


Figura 5. Curva da resolução em energia (FWHM) em função da temperatura dos diodos para o raio- γ de 59,5 keV do ^{241}Am

É importante esclarecer que, como ambos fotodiodos estão encapsulados com uma camada de plástico de 0,7 mm de espessura, a temperatura dos mesmos não é reduzida significativamente, de modo que o resultado não é muito melhor do que o obtido em temperatura ambiente. No entanto, o efeito da redução da temperatura é maior no diodo SFH00206 do que no S2506-02 indicando um menor grau de pureza do primeiro, como era esperado pelas medidas de corrente de fuga. Os espectros de energia do ^{241}Am obtidos com os diodos SFH00206 e S2506-02 estão representados nas Figs. 6 e 7.

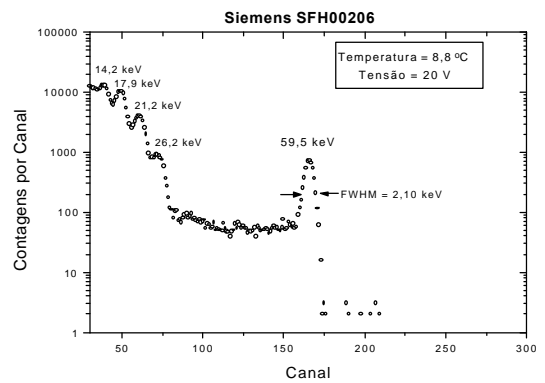


Figura 6. Espectro de radiação eletromagnética do ^{241}Am

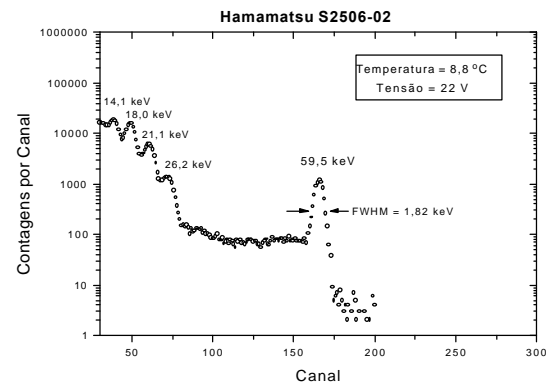


Figura 7. Espectro de radiação eletromagnética do ^{241}Am

Resolução em função da Temperatura do FET. A partir dos resultados obtidos anteriormente, pôde-se determinar o valor de tensão de polarização e de temperatura dos diodos que conduziram à melhor condição de resposta dos mesmos. Desta forma, mantendo-se fixas estas condições: $V = 20\text{V}$ e $T = 8,8^\circ\text{C}$, para o SFH00206 e $V = 22\text{V}$ e $T = 8,8^\circ\text{C}$, para o S2506-02, iniciaram-se as medidas de resolução em energia em função da temperatura do FET. O resfriamento do transistor foi feito através de um dedo frio que o conectava à face fria da célula *Peltier*, como pode ser visto na fotografia do sistema (Fig. 1). Os resultados obtidos estão representados na Fig. 8, cuja análise mostra que praticamente não se tem uma influência significativa da temperatura do FET nas resoluções medidas. Isto deve-se ao fato de a corrente de fuga do diodo, que se superpõe à do FET, ser muito superior à do transistor e, portanto, é a que mais influencia o ruído eletrônico.

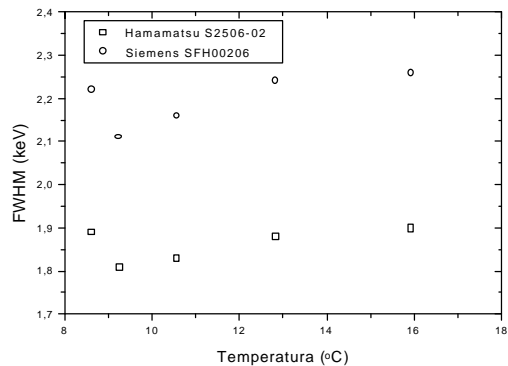


Figura 8. Curva da resolução em energia (FWHM) em função da temperatura do FET para o raio- γ de 59,5 keV do ^{241}Am – mantidos os diodos à 8,8 °C

Sistema XR100CR Amptek. Com a finalidade de efetuar estudos comparativos entre o sistema de espectrometria que desenvolvemos e o melhor existente no mercado, que também se baseia no uso de um fotodiodo e FET resfriados por células *Peltier*, adquirimos o dispositivo de espectrometria de r-X e gama de baixa energia, o XR-100CR desenvolvido pela AMPTEK. Este sistema é constituído por um diodo desencapsulado de Si (de tipo não citado pelo fabricante) acoplado diretamente a um transistor de efeito de campo, ambos resfriados a uma temperatura de -30°C (constante) e mantidos em uma pequena câmara em alto vácuo. As condições de resposta foram estudadas usando-se as fontes de ^{241}Am , ^{109}Cd e ^{133}Ba , cujos espectros estão representados nas Figs. 9 a 11, respectivamente. A resolução em energia encontrada para a linha γ de 59,5keV do ^{241}Am foi de 433, 34 eV.

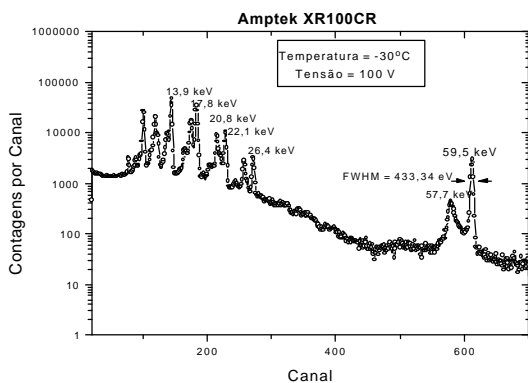


Figura 9. Espectro de radiação eletromagnética do ^{241}Am

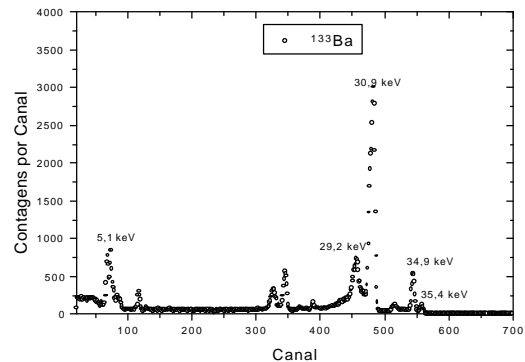


Figura 10. Espectro de radiação eletromagnética do ^{133}Ba

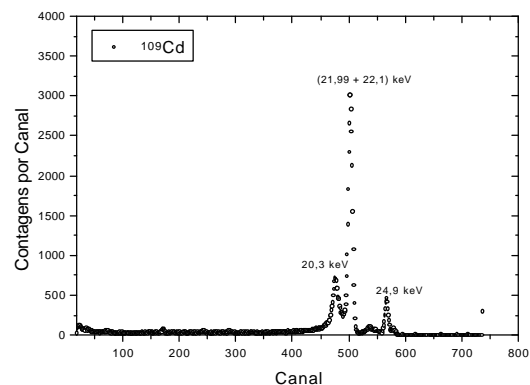


Figura 11. Espectro de radiação eletromagnética do ^{109}Cd

Comparação dos Resultados. A fim de estabelecermos uma comparação das condições de resposta para a espectrometria de radiação eletromagnética entre nosso sistema e os da ORTEC e AMPTEK, estão representados na tabela 1 abaixo os melhores resultados com eles obtidos para a linha γ de 59,5keV do ^{241}Am .

Tabela 1. Resumo dos resultados obtidos

Sistema		Resolução (keV)		
		21 °C	8,8 °C	-30 °C
(A250)	SFH00206	2,34	2,10	-
	S2506-02	2,05	1,82	-
ORTEC	SFH00206	2,7	2,6	-
	S2506-02	2,61	2,48	-
XR100CR		-	-	0,433

De acordo com a tabela acima, os resultados obtidos com o pré-amplificador baseado no uso do circuito A250 são bem melhores que aqueles devidos ao uso do pré-amplificador 142A da ORTEC. Por outro lado, apesar da superioridade do sistema da Amptek em relação ao nosso, uma comparação criteriosa das respostas envolve a análise de outros parâmetros importantes na escolha destes sistemas de detecção:

a) A temperatura mínima de operação dos fotodiodos estudados foi de 8,8°C, apesar da célula *Peltier* atingir até -30°C. Esta limitação é consequência do encapsulamento de plástico dos diodos, que, se por um lado, não permite a redução das suas temperaturas quando colocados em contato com a face fria da célula, por outro, os tornam mais robustos mecanicamente.

b) Os fotodiodos estudados em nossa câmara não foram selecionados segundo características especiais de pureza, visto que são disponíveis no mercado como dispositivos eletrônicos convencionais enquanto que, no caso do sistema da AMPTEK, o diodo usado apresenta elevado grau de pureza (dado não fornecido pelo fabricante).

c) Apesar de ser um parâmetro de importância secundária, o custo do XR-100CR é elevado (US\$3,000.00) sendo cerca de quatro vezes maior que o do sistema desenvolvido em nosso laboratório.

CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos neste trabalho, nos permitiram concluir o que se segue:

a) Os dois fotodiodos estudados (S2506-02 e SFH00206) são adequados para a espectrometria de radiação eletromagnética de energia inferior a 60keV, sendo possível obter resoluções ligeiramente melhores para o diodo fabricado pela Hamamatsu (S2506-02).

b) O efeito da redução da temperatura de operação dos diodos na resolução em energia não é muito significativo, devido, fundamentalmente ao fato de ambos serem envolvidos por uma camada de plástico que dificulta o seu resfriamento para temperaturas abaixo de 8°C. Em sendo assim, a temperatura mínima de operação é muito superior à do detector da Amptek (-30°C).

c) O acoplamento direto dos fotodiodos ao transistor de efeito de campo, com a possibilidade de resfriamento de ambos, conduziu a uma melhora significativa nas resoluções em energia para a linha γ de 59,5keV do ^{241}Am em relação àquelas obtidas com o sistema de pré-amplificação convencional (ORTEC-142A).

d) As resoluções em energia obtidas, mesmo em temperatura ambiente, são suficientes para permitir a

construção de um sistema de espectrometria de radiações eletromagnéticas bastante compacto e barato.

AGRADECIMENTOS

Ao Eng° José Carlos Sabino pela confecção da câmara de aço-inox e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, pela concessão de bolsa de mestrado (R.R. Magalhães) durante parte da realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

[1] Miller, K.M., **An Application of the Maximum Entropy Method for Assessments of Residual Radioactivity at Contaminated Sites**, Trans. Am. Nucl. Soc., vol. 70, p. 47, 1994.

[2] Jones, A.O. et al., **Design Considerations for Preamplifiers to be Used on Fast Multiwire Gas Proportional Counter Readout System**, Nucl. Instr. and Meth., vol. A 348, p.256, 1994.

[3] Kageyama, K. et al., **Characteristic of a Single-Wire Proportional Counter with Very Thin Rectangular Cross Section**, Nucl. Instr. and Meth., vol. A 342, p. 509, 1994.

[4] Cesareo R., Gigante G. et al., **Thermoelectrically Cooled Semiconductor Detector for Non-Destructive Analysis of Works of Art by Means of Energy Dispersive X-ray Fluorescence**, Nucl. Instr. and Meth., vol. A 428, p. 171, 1999.

[5] Schweitzer J. S. and Trombka J. I., **Room Temperature Semiconductors and Scintillators for Planetary Instruments**, Nucl. Instr. and Meth., vol. A 428, p. 193, 1999.

[6] Trombka J. I., Evans L. G. et al, **Future Planetary X-ray and Gama-Ray Remote Sensing System and in Situ Requirements for Room Temperature Solid State Detectors**, Nucl. Instr. and Meth., vol. A 428, p. 199, 1999.

[7] Starr R. et al., **Radiation Effects in the Si-PIN Detector on the near Earth Asteroid Rendezvous Mission**, Nucl. Instr. and Meth., vol. A 428, p.209, 1999.

[8] Karar A., Musienko Y. et al, **Characterisation of Avalanche Photodiode for Calorimetry Applications.**,Nucl. Instr. and Meth., vol. A 428, p. 413, 1999.

- [9] Traczyk, M.; Slapa, M., **Commercially Manufactured Photodiodes in Detection of Low Energy X- and γ - Ray Radiation**, Nukleonika, vol. 40(1), p. 51, 1995.
- [10] Kollwe, D., **Performance of 10x10 mm² PIN Silicon Photocells Used as High Resolution Charged Particle Detectors**, Nucl. Instr. and Meth., vol. A 254, p. 637, 1987.
- [11] Gooda, P.H. and Gilboy, W.B., **High Resolution Alpha Spectroscopy with Low Cost Photodiodes**, Nucl. Instr. and Meth., vol. A 255, p. 222, 1987.
- [12] Sueva, D. et al., **Silicon Detectors for Charged Particles Manufactured by Conventional Planar Technology**, IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. NS-40(3), p. 257, 1993.
- [13] Steinbauer, E. et al., **Energy Resolution of Silicon Detectors: Approaching the Physical Limit**, Nucl. Instr. and Meth., vol. B85, p. 642, 1994.
- [14] Hall, C. and Lewis, R., **Recent Development in X-Ray Detectors for Synchrotron Radiation Experiments**, Nucl. Instr. and Meth., vol. A 348, p. 627, 1994.
- [15] Ladna, B. and Birbaun, H. K., **Proceedings on Evolution of Surface and Thin Film Microstructure Symposium**, Pittsburgh, Pa. USA (1993) 160.
- [16] Bueno, C.C.; Gonçalves, J.A. C. and Santos, M. D. S., **The Performance of Low Cost Commercial Photodiodes for Charged Particle and X-Ray Spectrometry**, Nucl. Instr. and Meth., vol. A 371, p. 464, 1996.

ABSTRACT

This work envisages the development of a high resolution electromagnetic radiation spectrometry system, based on the use of low cost commercial silicon photodiodes (Siemens SFH00206 and Hamamatsu S2506-02). In order to improve the performance of these photodiodes for high resolution X-ray spectrometry, a cooling system using Peltier cells was developed to decrease the temperature of both photodiode and preamplifier's FET. The best values of the resolution for the 59,5 keV ²⁴¹Am γ -ray line, at 9°C, were found to be 2,10 keV and 1,82 keV for the Siemens SFH00206 and Hamamatsu S2506-02 photodiodes respectively.