

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
PROTEN - DEN / UFPE



Nº 98
DISSERTAÇÃO DE
MESTRADO

**ESPECTROMETRIA DE RAIOS X
E GAMA DE BAIXA ENERGIA
UTILIZANDO FOTODIODOS DE
SILÍCIO**

AUTOR: IRAN JOSÉ OLIVEIRA DA SILVA

RECIFE - PERNAMBUCO - BRASIL
AGOSTO - 2000

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR

Av. Prof. Luiz Freire, 1000 - Cidade Universitária
CEP 50740-540 - Recife - PE - Brasil

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS
ENERGÉTICAS E NUCLEARES

ESPECTROMETRIA DE RAIOS X E GAMA DE BAIXA ENERGIA
UTILIZANDO FOTODIODOS DE SILÍCIO

IRAN JOSÉ OLIVEIRA DA SILVA

Recife – Pernambuco – Brasil

Agosto – 2000

**ESPECTROMETRIA DE RAIOS X E GAMA DE BAIXA ENERGIA
UTILIZANDO FOTODIODOS DE SILÍCIO**

IRAN JOSÉ OLIVEIRA DA SILVA

**ESPECTROMETRIA DE RAIOS X E GAMA DE BAIXA ENERGIA
UTILIZANDO FOTODIODOS DE SILÍCIO**

Dissertação submetida ao
Programa de Pós-Graduação em
Tecnologias Energéticas e
Nucleares, do Departamento de
Energia Nuclear da Universidade
Federal de Pernambuco, para
obtenção do título de Mestre em
Tecnologias Energéticas e
Nucleares, área de concentração:
Dosimetria e Instrumentação.

ORIENTADORA: Dra. Helen Jamil Khoury

RECIFE – PERNAMBUCO – BRASIL

AGOSTO – 2000

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Prof^o Hervásio de Carvalho, DEN, UFPE

539.722 2
S586e

Silva, Iran José Oliveira.

Espectrometria de raios-x e gama utilizando fotodiodos de silício / Iran José oliveira da Silva. – Recife, 2000.

xv, 42 p. : il. – (Dissertação de Mestrado – DEN, 98).

Orientador : Helen Jamil Khoury.

Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Centro de Tecnologia e Geociências – CTG. Energia Nuclear, 2000.

1. Espectrometria de raios-x - teses. 2. Espectrometria de raios gama - teses. 3. Fotodiodos de silício – teses. 4. Detector semiconductor - teses. 5. Raios-x – fluorescência - teses. I. khoury, Helen Jamil. II. Título. III. Série.

CDD 539.722 2 (21.ed.)

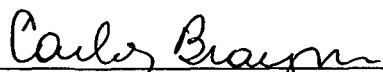
ESPECTROMETRIA DE RAIOS X E GAMA DE BAIXA ENERGIA UTILIZANDO FOTODIODOS DE Si

Iran José Oliveira da Silva

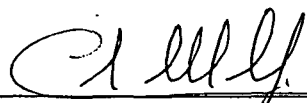
APROVADO EM: 18.08.00

ORIENTADORA: Profa. Dra. Helen Jamil Khoury

COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira - DEN/UFPE



Prof. Dr. Clóvis Abrahão Hazin - DEN/UFPE



Prof. Dr. Zieli Dutra Thome Filho - DF/UFRN

Visto e permitida a impressão



Coordenador do PROTEN/DEN/UFPE

*Aos meus pais José Antônio da Silva e
Mirian Oliveira da Silva, pelo carinho.*

À minha esposa Sylwoneth Patrícia, pelo carinho e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, a oportunidade.

Aos Departamentos de Física e de Geologia da Universidade Federal de Pernambuco, a colaboração.

À Dra. Helen Jamil Khoury, a orientação, o estímulo e a amizade.

A todos os professores do DEN, em especial aos professores Clovis Hazin, Carlos Brayner, Valderez, Ademir Amaral, Fernando A. Lima e Clemente Carneiro, as valiosas sugestões, a colaboração e a amizade.

Aos professores Joaquim Martins, Zieli Dutra e Eronídes F. da Silva, as valiosas sugestões e a atenção.

SUMÁRIO

CAPÍTULO	Página
I – INTRODUÇÃO	1
II – REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 – Espectrometria utilizando detectores semicondutores	3
2.2 – Princípio de funcionamento de detectores semicondutores	6
2.2.1 – Características operacionais de detectores semicondutores..	7
2.2.1.a – Modos de operação	7
2.2.1.b – Corrente reversa	10
2.2.1.c – Tempo de subida do pulso	11
2.2.1.d – Capacitância do detector	12
2.2.1.e – Resolução em energia	15
2.2.1.f – Eficiência	22
2.2.1.g – Danos pela radiação	27
III – MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 – Fotodiodos.....	29
3.2 – Estudo das curvas características dos fotodiodos	31
3.3 – Arranjo experimental.....	32
3.4 – Estudo da resolução do detector x tensão de polarização.....	36

3.5 – Espectrometria de raios-X e gama.....	36
3.6 – Medidas do espectro de raios-X de amostras de Ag e Pb utilizando o fotodiodo BPW-34	37
IV – RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1 – Estudo das curvas características dos fotodiodos	40
4.2 – Estudo da Resolução do Detector x constante de formação do pulso.....	43
4.3 – Estudo da resolução do detector x tensão de polarização.....	44
4.4 – Espectrometria de raios-X e gama	47
4.5 – Curvas de calibração em energia.....	53
4.6 – Eficiência	54
4.7 – Medidas do espectro de raios-X de amostras de Ag e Pb utilizando o fotodiodo BPW 34	56
V – CONCLUSÕES	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
ANEXO I	65
ANEXO II	73

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1: Esquema de um detector semicondutor	6
Figura 2: Detector usado no modo fotovoltaico	8
Figura 3: Detector usado no modo fotocondutividade	8
Figura 4: Variação da corrente de escuro em função da tensão de polarização para o fotodiodo SFH-206 à temperatura de 20 °C e -30 °C	11
Figura 5: (a) junção-PN reversamente polarizada. (b) Densidade de cargas. (c) Intensidade de campo elétrico. (d) Variação do potencial em função da distância x	13
Figura 6: Variação da capacitância da junção em função da tensão reversa para os diodos de silício 1N914 e 1N916	14
Figura 7: Espectro produzido por um feixe monoenergético de radiação	16
Figura 8: Efeito que uma boa resolução tem em identificar um pequeno pico superposto a uma faixa de efeitos estatisticamente incertos.	17
Figura 9: Comparação do espectro de raios-X da série K (Ag) registrado por três diferentes tipos de detectores. As energias K_{α} e K_{β} são de aproximadamente 21 e 25 keV	18
Figura 10: Esquema de um sistema constituído de detector e pré-amplificador para a avaliação do ruído	20

Figura 11: Resolução em função da constante de tempo de formação do pulso para um fotodiodo S-1723/06, de 10 x 10 mm ² de área	22
Figura 12: Métodos para a obtenção da área de pico de um espectro multicanal	23
Figura 13: Dependência da eficiência de pico relativa com a tensão de polarização para os fotodiodos HP5082-4207, BPX65, BPX66 e BPW34 para fótons de 22,1 keV de uma fonte de ¹⁰⁹ Cd	24
Figura 14: Eficiência de pico (Teórica e experimental) em função da energia dos fótons de fontes de ¹⁰⁹ Cd, ¹³³ Ba e ¹⁵² Eu para o fotodiodo SFH206	25
Figura 15: Espectro de uma fonte de ²⁴¹ Am medido com o fotodiodo SFH-206	26
Figura 16: Espectro de uma fonte de ²⁴¹ Am medido com o fotodiodo SFH-206 e posteriormente corrigido	27
Figura 17: Efeito da dose na corrente de escuro do fotodiodo BPW-34	28
Figura 18: Fotodiodos SFH-206, SFH-205, BPW-34 e XRA-50	30
Figura 19: Diagrama de blocos do arranjo experimental	32
Figura 20: Arranjo experimental constituído de pré-amplificador, analisador multicanal e microcomputador	33
Figura 21: Arranjo utilizado no estudo da variação da resolução em função da tensão reversa aplicada ao fotodiodo e em função da constante de tempo de formação do pulso	35
Figura 22: Esquema do arranjo experimental utilizado para medida do espectro de raios-X característicos	39
Figura 23: Curva característica I x V com os fotodiodos em ausência de luz (escuro)	41
Figura 24: Resposta dos fotodiodos irradiados com luz de uma lâmpada de 60 W	42
Figura 25: Espectros da fonte de ²⁴¹ Am medidos com o fotodiodo BPW-34 para $\tau_p = 4 \mu s$ (a) e para $\tau_p = 1 \mu s$ (b)	44
Figura 26: Variação da resolução em função da tensão reversa	46

Figura 27: Efeito produzido no espectro pela variação da resolução com a tensão de polarização do fotodiodo BPW-34	47
Figura 28: Espectros da fonte de ^{241}Am medidos com os fotodiodos XRA-50, SFH-206, SFH-205 e BPW-34	48
Figura 29: Espectros da fonte de ^{133}Ba medidos com os fotodiodos XRA-50, SFH-206, SFH-205 e BPW-34	50
Figura 30: Espectros da fonte de ^{109}Cd medidos com os fotodiodos XRA-50, SFH-206, SFH-205 e BPW-34	51
Figura 31: Espectros da fonte de ^{57}Co medidos com os fotodiodos XRA-50, SFH-206, SFH-205 e BPW-34	52
Figura 32: Retas de calibração canal-energia para cada fotodiod	54
Figura 33: Eficiência de fotopico em função da energia da radiação para cada fotodiodo	55
Figura 34: Fluorescência de raios-X da amostra de Ag	57
Figura 35: Fluorescência de raios-X da amostra de Pb	57
Figura 36: Fluorescência de raios-X da amostra de Ag + Pb	58
Figura 37: Estrutura de bandas de energia em um semicondutor puro (intrínseco)	66
Figura 38: Elétrons livres produzidos pela dopagem do Si com átomos de P (a); estrutura de bandas de energia em um semicondutor dopado Tipo-N (b)	67
Figura 39: lacunas produzidas pela dopagem do Si com átomos de Al (a); estrutura de bandas de energia em um semicondutor dopado Tipo-P (b)	68
Figura 40: Esquema de uma junção-PN	70
Figura 41: Polarização da junção-PN: (a) Polarização reversa; (b) Polarização Direta	70
Figura 42: Característica Tensão x Corrente de um diodo de junção-PN	71
Figura 43: Simbologia do diodo semicondutor	72
Figura 44: Esquema de um fotodiodo tipo PIN	72

- Figura 45:** Fotodiodo SFH-206: (a) Esquema com as dimensões e tipo de encapsulamento; (b) Dependência da capacitância em função da tensão reversa 73
- Figura 46:** Fotodiodo SFH-205: (a) Esquema com as dimensões e tipo de encapsulamento; (b) Dependência da capacitância em função da tensão reversa 74
- Figura 47:** Fotodiodo BPW-34: (a) Esquema com as dimensões e tipo de encapsulamento; (b) Dependência da capacitância em função da tensão reversa 75
- Figura 48:** Fotodiodo XRA-50: (a) Esquema com as dimensões e tipo de encapsulamento; (b) Dependência da capacitância em função da tensão reversa 76

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1: Resolução obtida para fótons de 22,0 keV	4
Tabela 2: Resolução obtida para fótons de 59,54 keV	4
Tabela 3: Variação da resposta do fotodiodo S-3590/05 para fótons de 59,5 keV em função da temperatura e do ruído eletrônico	21
Tabela 4: Resumo das características dos fotodiodos BPW-34, SFH-205 e SFH-206: tensão reversa máxima (V_R), corrente de escuro I_R ($V_R = 10V$ e $25^\circ C$), capacitância nominal C ($V_R = 0V$ e $25^\circ C$), área da região ativa e faixa de resposta, λ_R	30
Tabela 5: Resumo das características do fotodiodo XRA-50: corrente de escuro I_R ($V_R = 50V$ e $25^\circ C$), capacitância nominal C ($V_R = 30V$ e $25^\circ C$), tensão reversa máxima (V_R) e área da região ativa	31
Tabela 6: Energias de radiação γ e X, e probabilidade de emissão das fontes de Amerício-241, Bário-133, Cádmi-109 e Cobalto-57	34
Tabela 7: Linhas de raios-X característicos de Ag e Pb	38
Tabela 8: Resposta dos fotodiodos (corrente reversa / unidade de área ativa) irradiados com luz de uma lâmpada de 60 W para uma tensão reversa de 4 V	42
Tabela 9: Variação da resolução (keV) do fotopico correspondente a fótons de 59,54 keV da fonte de ^{241}Am em função da constante de tempo de formação do pulso para cada fotodiodo	43

Tabela 10: Resolução (keV) obtida com os fotodiodos para diferentes tensões de polarização	45
Tabela 11: Resolução (keV) dos picos dos espectros da fonte de ^{241}Am , obtida com os fotodiodos BPW-34, SFH-206, SFH-205 e XRA-50	49
Tabela 12: Resolução (keV) dos picos dos espectros da fonte de ^{133}Ba , obtida com os fotodiodos BPW-34, SFH-206, SFH-205 e XRA-50	50
Tabela 13: Resolução (keV) dos picos dos espectros das fontes de ^{109}Cd e ^{57}Co obtida com os fotodiodos BPW-34, SFH-206, SFH-205 e XRA-50.	52
Tabela 14: Eficiência de fotopico ($\times 10^{-4}$) dos fotodiodos em função da energia da radiação	55

ESPECTROMETRIA DE RAIOS X E GAMA DE BAIXA ENERGIA UTILIZANDO FOTODIODOS DE SILÍCIO

Autor: Iran José Oliveira da Silva

Orientadora: Dra Helen Jamil Khoury

RESUMO

O uso de detectores semicondutores para detecção de radiação tem crescido nos últimos anos devido às vantagens que eles apresentam em relação aos outros tipos de detectores. Como o princípio de funcionamento de fotodiodos comerciais é semelhante aos detectores semicondutores, este estudo foi realizado para avaliar o uso de fotodiodos de Si para espectrometria de raios X e gama de baixa energia. Foram analisados os fotodiodos SFH-205, SFH-206, BPW-34 e XRA-50, cujas características são as seguintes: a) área ativa de $0,07 \text{ cm}^2$ e $0,25 \text{ cm}^2$; b) largura de região de depleção variando entre 100 e 200 μm e c) capacitância de junção de 14 pF.

O fotodiodo foi polarizado com uma tensão de polarização reversa e conectado a um pré-amplificador sensível a carga, seguido por um amplificador e um analisador de pulso multicanal. As fontes padrões utilizadas neste estudo foram: ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{57}Co e ^{133}Ba . A fluorescência de raios-X de Pb e Ag também foi medida através das linhas K e L. Todas as medidas foram realizadas com o fotodiodo à temperatura ambiente.

Os resultados mostraram que a resposta dos fotodiodos é linear com a energia dos raios-X e que a resolução em energia, em FWHM, variou entre 1,9 e 4,4 keV para os fotopicos correspondentes a energias entre 11,9 e 59 keV. O fotodiodo BPW-34 apresentou a melhor resolução em energia e a menor corrente reversa. A eficiência de fotopico foi também determinada, sendo observado que ela diminui rapidamente para energias superiores a 50 keV. A resolução e a eficiência encontradas são similares aos valores obtidos com outros detectores semicondutores, evidenciando que os fotodiodos em estudo podem ser utilizados com um bom desempenho para espectrometria de raios X e gama de baixa energia.

LOW-ENERGY X-RAY AND GAMMA SPECTROMETRY USING SILICON PHOTODIODES

Author: Iran José Oliveira da Silva

Adviser: Dra Helen Jamil Khoury

ABSTRACT

The use of semiconductor detectors for radiation detection has increased in recent years due to the advantages they present in comparison to other types of detectors. As the working principle of commercially available photodiodes is similar to the semiconductor detectors, this study was carried out to evaluate the use of Si photodiodes for low energy x-ray and gamma spectrometry. The photodiodes investigated were SFH-205, SFH-206, BPW-34 and XRA-50 which have the following characteristics: a) active area of 0,07 cm² and 0,25 cm², b) thickness of the depletion ranging from 100 to 200 μm and c) junction capacitance of 72 pF.

The photodiode was polarized with a reverse bias and connected to a charge sensitive pre-amplifier, followed by an amplifier and multichannel pulse analyzer. Standard radiation sources used in this experiment were ²⁴¹Am, ¹⁰⁹Cd, ⁵⁷Co and ¹³³Ba. The x-ray fluorescence of lead and silver were also measured through K- and L-lines. All the measurements were made with the photodiodes at room temperature.

The results show that the responses of the photodiodes very linear by the x-ray energy and that the energy resolution in FWHM varied between 1.9 keV and 4.4 keV for peaks corresponding to 11.9 keV to 59 keV. The BPW-34 showed the best energy resolution and the lower dark current. The full-energy peak efficiency was also determined and it was observed that the peak efficiency decreases rapidly above 50 keV. The resolution and efficiency are similar to the values obtained with other semiconductor detectors, evidencing that the photodiodes used in that study can be used as a good performance detector for low energy x-ray and gamma spectrometry.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A espectrometria de raios-X tem aplicações nos mais diferentes setores da ciência e da tecnologia, razão pela qual diversos estudos têm sido desenvolvidos no sentido do aperfeiçoamento e da avaliação de detectores utilizados nestas medidas.

O princípio de funcionamento de um sistema de espectrometria baseia-se na proporcionalidade que existe entre a amplitude do pulso produzido na saída do detector e a energia da radiação incidente. Basicamente, este sistema consiste de um detector acoplado a um sistema eletrônico composto de um pré-amplificador, amplificador e um analisador multicanal.

Como detectores, os cintiladores sólidos foram os primeiros a serem utilizados nos sistemas de espectrometria de raios-X. Atualmente estes detectores estão sendo substituídos pelos semicondutores, que apresentam melhor resolução em energia.

Os detectores semicondutores, além de apresentarem excelente resolução, possuem curto tempo de resposta devido à rápida subida do pulso. O volume sensível destes detectores corresponde à região de depleção, formada pela junção de um semicondutor do Tipo-N com um do Tipo-P. As cargas produzidas pela

junção de um semicondutor do Tipo-N com um do Tipo-P. As cargas produzidas pela interação da radiação incidente na região de depleção são coletadas pela ação do campo elétrico aplicado na junção. Como consequência, é produzido na saída do detector um pulso elétrico, cuja amplitude é proporcional à energia da radiação depositada no volume sensível do detector.

Como os fotodiodos possuem princípio de funcionamento idêntico aos dos detectores semicondutores e são de baixo custo, trabalhos vêm sendo realizados no DEN/UFPE a fim de utilizar esses dispositivos para espectrometria e dosimetria das radiações ionizantes.

O objetivo deste trabalho consiste, portanto, em dar continuidade a estas pesquisas, procurando estudar a * resposta de fotodiodos de silício, normalmente utilizados em circuitos eletrônicos, visando o seu emprego em espectrometria de raios-X e gama.

* A resposta do fotodiodo considerada neste trabalho é o número do canal correspondente ao fotopico do espectro de distribuição de energias.

CAPÍTULO II

REVISÃO DE LITERATURA

2.1 – Espectrometria de Raios-X Utilizando Detectores Semicondutores

O primeiro uso expressivo de detectores de junção em pesquisa nuclear foi realizado em 1958 por Walter e colaboradores⁽¹⁾. Nesses experimentos, foram utilizadas junções em germânio para medir, a baixas temperaturas, a emissão de partículas alfa e produtos de fissão. Em 1959, diversos grupos se engajaram no desenvolvimento de detectores de radiação nuclear utilizando semicondutores. A utilidade desses detectores para o estudo da espectrometria nuclear, bem como a viabilidade da utilização, à temperatura ambiente, dos detectores semicondutores construídos em silício foi demonstrada por McKenzie e Bromley⁽²⁾. Apesar dos detectores construídos à base de Ge apresentarem maior eficiência de detecção⁽³⁾, com o desenvolvimento dos materiais semicondutores a partir dos anos 60, o emprego dos detectores semicondutores à base de silício cresceu principalmente devido às vantagens práticas que eles oferecem sobre os de germânio, tais como

necessidade de pequena tensão de polarização e possibilidade de operação à temperatura ambiente⁽⁴⁾.

Uma vez que fotodiodos de silício possuem simplicidade de operação e mesmo princípio de funcionamento de detectores semicondutores tradicionais, pesquisas têm sido realizadas por diversos autores visando averiguar a viabilidade do uso desses dispositivos tanto para dosimetria^(5, 6) quanto para espectrometria⁽⁷⁻¹⁸⁾ das radiações ionizantes. Investigando o comportamento de fotodiodos de estrutura PIN em espectrometria de raios X e γ , Nowtny e Reiter⁽⁷⁾ empregaram o fotodiodo HP-5082/4207, à temperatura ambiente, para a medida de espectros de fontes de ^{109}Cd e de ^{241}Am . Eles obtiveram uma resolução em energia de 1,9 e 2,1 keV para fótons de 22,0 e 59,54 keV, respectivamente, e concluíram ser possível a espectrometria de raios-X e γ com fotodiodos PIN. A resposta de fotodiodos de diferentes tipos e diferentes dimensões de volume ativo também foi avaliada por outros pesquisadores pela medida de espectros de fontes de ^{109}Cd e ^{241}Am . Os resultados obtidos para a resolução de fótons de 22,0 e 59,54 keV estão apresentados respectivamente nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1: Resolução obtida para fótons de 22,0 keV.

Fotodiodo	Resolução (keV)	Referência
BPW-34	2,6	8
SFH-206	3,9	9

Tabela 2: Resolução obtida para fótons de 59,54 keV.

Fotodiodo	Resolução (keV)	Referência
SD-447	2,0	10
SFH-206	4,0	11
SFH-206	2,5	12
S-1722	4,2	13

Pesquisando a dependência da variação da resolução em função da temperatura do fotodiodo e do pré-amplificador, Markevich e colaboradores⁽¹⁴⁾, utilizando o fotodiodo S-1722N para espectrometria de raios X e gama, mostraram que, para uma variação de temperatura de 30 °C a -40 °C, a resolução variou de 1,55 keV para 1,04 keV. Bueno e colaboradores⁽¹²⁾, também observaram uma melhora na resolução dos fotodiodos testados com a diminuição da temperatura e constataram que este fato era consequência da diminuição da corrente de fuga dos fotodiodos.

A dependência da variação da eficiência de pico em função da variação da tensão de polarização dos fotodiodos foi estudada por Nowotny e Reiter⁽⁸⁾. Eles observaram que, para os fotodiodos HP-5082/4207, BPX-65, BPX-66 e BPW-34, a eficiência de pico aumentava com o aumento da tensão reversa do fotodiodo. Aoki e Koyama⁽¹⁰⁾, pesquisando a resposta do fotodiodo SD-4478 para espectrometria de raios-X, estudaram a dependência da eficiência de pico com o ângulo de incidência dos fótons e constataram que para fótons de 59,5 keV a resposta em termos de eficiência era isotrópica, enquanto que para fótons de 17,8 keV, ela era isotrópica até ângulos de 60°, acima dos quais era observada uma diminuição de 8% da resposta.

A linearidade da resposta do fotodiodo SFH-206 com a energia dos fótons incidentes foi averiguada por Terini e colaboradores⁽¹⁵⁾, constatando uma reta de calibração ajustada para as medidas com um coeficiente de determinação de 0,999. O mesmo comportamento linear foi também foi verificado por Bueno e colaboradores⁽¹²⁾ para os fotodiodos SFH-206, S-6036 e S-3590/06.

A viabilidade de utilização de fotodiodos para a medida de espectros contínuos de raios-X tem sido investigada por Terini e colaboradores⁽⁹⁾ e Aoki e Koyama⁽¹⁰⁾. Aoki e Koyama verificaram que o espectro obtido, utilizando-se um fotodiodo SD-4478 sem o uso de colimadores nem de sistemas de refrigeração, após sofrer as devidas correções, possuía uma excelente concordância com o obtido com um detector de germânio (após correção) exceto por apresentar raios-X característicos provenientes dos componentes metálicos do fotodiodo.

2.2 – Princípio de funcionamento de detectores semicondutores

Nos detectores semicondutores, o volume sensível corresponde à região de depleção formada pela junção de um semicondutor do Tipo-N com um do Tipo-P cujas características estão no Anexo I. Essa região oferece condições ideais para a detecção de radiação por ser efetivamente desprovida de portadores de cargas livres.

Quando a radiação interage no volume sensível do detector, a energia depositada se distribui entre os átomos da estrutura. Se um elétron da banda de valência absorver uma quantidade de energia maior do que a diferença de energia entre as bandas de condução e de valência, passará para a banda de condução, acarretando o aparecimento de uma lacuna na banda de valência. Os portadores de carga assim criados (elétrons e lacunas) serão acelerados em direção à barreira de potencial da junção, onde serão coletados (Figura 1). Portadores gerados fora da

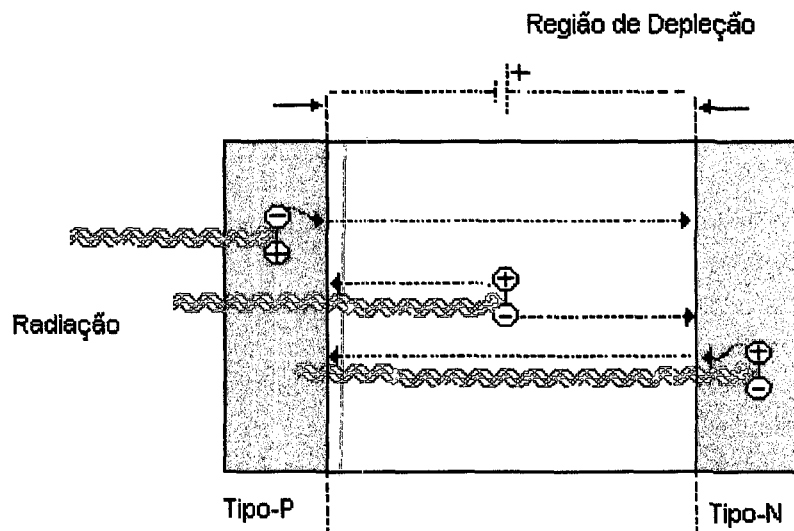


Figura 1: Esquema de um detector semicondutor.

região de depleção migrarão por difusão, mas não contribuirão para o aumento da corrente, a não ser que se difundam para dentro da região de depleção, onde os pares elétrons-lacunas serão separados e coletados. Como existe uma relação de proporcionalidade entre a quantidade dos portadores gerados e a energia depositada pela radiação, a resposta na saída do detector será um pulso elétrico de altura também proporcional a essa energia^(12, 17, 18).

2.2.1 – Características operacionais de detectores semicondutores

a) Modos de operação

Um detector semicondutor pode ser utilizado em dois modos de operação: modo fotovoltaico ou modo fotocondutividade.

No **Modo Fotovoltaico**⁽¹⁹⁾, cujo esquema é mostrado na Figura 2, nenhuma tensão é aplicada nos terminais do detector, de forma que os portadores de cargas criados pela radiação são coletados pela ação da barreira de potencial da junção (força eletromotriz). O detector funciona como uma fonte de corrente, de modo que a densidade de corrente J_R induzida pela radiação é dada pela expressão

$$J_R = eR (L_p + L_n + d) \quad (1)$$

onde: L_p e L_n são as distâncias de difusão das cargas nas regiões P e N, respectivamente; e é a carga elementar, d é a espessura da região de depleção e R é o número de portadores de carga produzidos por cm^3 , por segundo. Esse modo de operação oferece algumas desvantagens, tais como, o baixo campo elétrico gerado pela barreira de potencial, que não é suficientemente intenso para coletar os portadores de cargas sem que haja grandes perdas por recombinação; e a impossibilidade de se melhorar a eficiência de detecção pelo aumento da região de

depleção. Por outro lado, devido à baixa corrente reversa do detector, esse modo de operação é muito adequado em aplicações que envolvem medidas de baixas taxas de dose⁽⁵⁾.

Já no **Modo Fotocondutividade**⁽¹⁹⁾, cujo esquema é mostrado na Figura 3, uma tensão de polarização reversa é aplicada externamente ao detector, provocando não só o aumento da intensidade do campo elétrico na junção mas também o alargamento da região de depleção. Por esta razão, variações na tensão reversa influenciam significativamente a eficiência do detector.

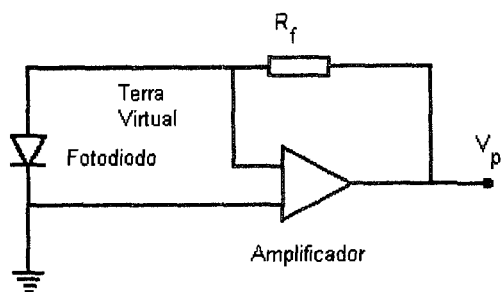


Figura 2: Detector usado no modo fotovoltaico⁽¹⁹⁾.

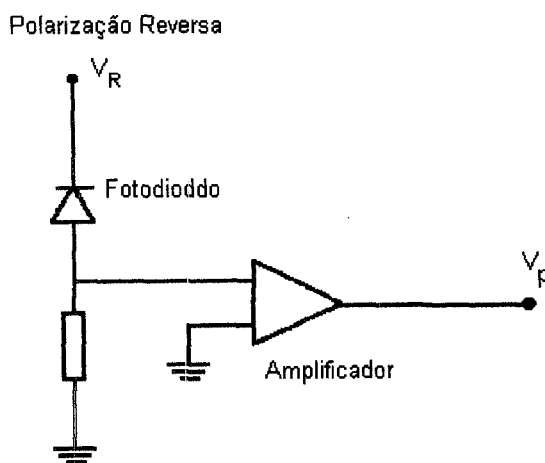


Figura 3: Detector usado no modo fotocondutividade⁽¹⁹⁾.

A relação entre a espessura da região de depleção d e a tensão reversa V_R aplicada numa junção-PN, na qual a densidade de impurezas aceitadoras é muito maior do que a concentração de doadoras, é dada pela expressão²⁰

$$d \cong (2\epsilon V_R / eN)^\alpha \quad (2)$$

onde ϵ é a permissividade elétrica do material semiconductor, e é a carga elementar, N representa a concentração das impurezas doadoras e α é um coeficiente que varia entre 1/2 e 1/3, segundo as discontinuidades nas junções sejam mais ou menos abruptas, o que é determinado pelo processo de fabricação.

No modo fotocondutividade, uma vez que os portadores gerados pela radiação são acelerados pela ação do campo elétrico e são rapidamente coletados, evita-se grandes perdas por recombinação. Como consequência, um maior número de portadores de cargas irá contribuir para a formação do pulso elétrico na saída do detector, o que contribui para a melhoria da resolução. Por este motivo, este modo de operação é mais utilizado em aplicações que envolvem espectrometria das radiações ionizantes.

Quando o semiconductor é utilizado como detector de radiação, independente de estar conectado no modo fotovoltaico ou modo fotocondutividade, o sistema eletrônico ao qual ele é acoplado pode fornecer como resposta sinais tanto na forma de **pulsos** de tensão como na forma de **corrente**.

Quando se deseja medir eventos individuais, permitindo dessa forma uma avaliação da intensidade e da energia da radiação incidente, a resposta é obtida na forma de pulsos de tensão. Este tipo de resposta é muito importante para as medidas de espectro da radiação, uma vez que cada pulso produzido corresponde ao somatório dos efeitos produzidos pela incidência de uma partícula ou de um fóton no detector.

Já quando se deseja medir a soma dos efeitos produzidos pela radiação incidente durante um dado período, a resposta é obtida na forma de uma corrente

contínua, cuja intensidade corresponde à média das intensidades das correntes produzidas no detector por todos os eventos individuais, naquele intervalo de tempo. Esta corrente tende a variar com a intensidade da radiação, razão pela qual este tipo de resposta é importante em aplicações dosimétricas.

b) Corrente de fuga (corrente de escuro)

O nível de ruído do detector é um fator muito importante na detecção de radiação de baixa energia, uma vez que uma boa relação sinal-ruído é necessária. A maior fonte de ruído do detector é a flutuação proveniente da corrente de fuga do dispositivo. A corrente de fuga, também denominada de corrente de escuro ou corrente reversa, é a corrente que se obtém quando o detector não está exposto à radiação, isto é, o dispositivo está no escuro. Esta corrente consiste de duas componentes: uma que flui através da parte interna do detector, e outra que flui pela sua superfície. A corrente através do volume do detector corresponde à corrente de saturação reversa decorrente da geração térmica dos portadores minoritários, uma vez que a barreira de potencial permite apenas a passagem dos portadores minoritários pela junção, enquanto os portadores majoritários são impedidos de fazê-lo pela mesma barreira (Anexo I). A corrente de fuga que flui pela superfície do detector é produzida por impurezas da superfície, as quais criam trajetos de menor resistência que permitem o fluxo da corrente.

A corrente de fuga é citada nas folhas de dados informativos sobre diodos como corrente reversa I_R e sua intensidade, além de depender do tipo do detector, depende da temperatura, da geometria da região de depleção e da tensão de polarização reversa. Estudos realizados por Bueno e colaboradores⁽¹¹⁾ revelaram que, para o fotodiodo SFH-206, apesar da corrente reversa aumentar com o aumento da tensão reversa, ela diminuía quando a temperatura do fotodiodo era reduzida de 20 °C para -30 °C (Figura 4). Em outra investigação⁽¹²⁾, estes autores estudaram a resposta

dos fotodiodos SFH-206, S-3590/06 e S-6036 como função da tensão reversa e da temperatura e observaram que, mesmo na situação mais desfavorável, ou seja, temperatura ambiente e tensão reversa de 30V, a corrente reversa não excedia 6nA, para os fotodiodos estudados.

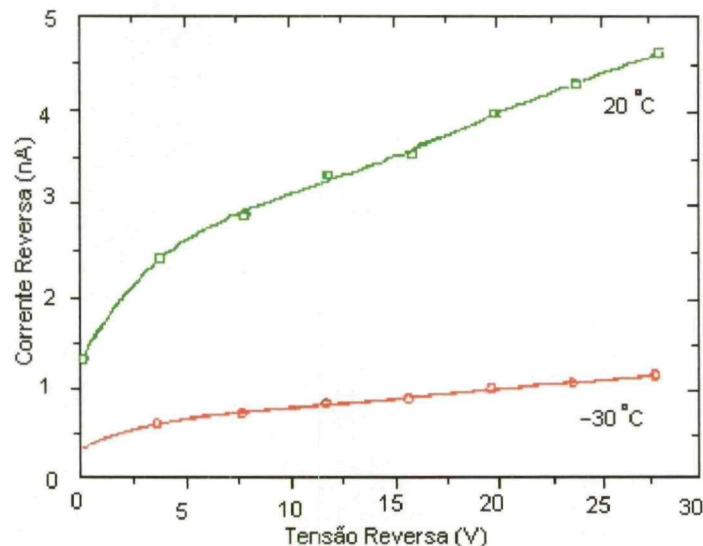


Figura 4: Variação da corrente reversa em função da tensão de polarização para o fotodiodo SFH-206 para temperaturas de 20 °C e -30 °C⁽¹¹⁾.

c) Tempo de subida do pulso

O tempo de subida do pulso corresponde ao tempo necessário para que os elétrons e as lacunas criados pela incidência da radiação sejam coletados pela ação do campo elétrico aplicado externamente ao detector. Portanto, o tempo de subida do pulso, além de depender da mobilidade dos portadores gerados, depende tanto da

espessura da região de depleção quanto da tensão de polarização aplicada. Para um detector semiconductor submetido a uma tensão de polarização reversa V_R , o tempo de coleta dos portadores t_c pode ser dado pela relação⁽²⁾

$$t_c = d / \mu V_R \quad (3)$$

onde μ é a mobilidade dos portadores de cargas e d é a espessura da região de depleção.

A grande mobilidade de elétrons e lacunas no material semiconductor, associada ao pequeno volume sensível do detector, proporciona uma rápida coleta dos portadores gerados pela radiação, de modo que uma alta velocidade de resposta é obtida, permitindo um tempo de subida do pulso da ordem de nanosegundos.

d) Capacitância do detector

Para que haja uma rápida coleta dos portadores de carga, evitando-se grandes perdas por recombinação, é aplicada ao detector uma tensão de polarização reversa. À medida que esta tensão vai aumentando, mais cargas vão se formando na junção, num efeito semelhante ao que acontece em um capacitor de placas paralelas. A Figura 5 mostra a densidade de cargas, a intensidade do campo elétrico e a variação do potencial em função da distância, em uma junção-PN, na qual a densidade de impurezas aceitadoras é muito maior do que a concentração de doadoras⁽²¹⁾.

Pode-se calcular o valor da capacitância da junção pela expressão⁽²²⁾

$$C = \epsilon(A / d) \quad (4)$$

onde ϵ é a permissividade elétrica do material semiconductor, A é a área ativa do detector e d é a espessura da região de depleção. Esta relação é a mesma relação usada para um capacitor de placas paralelas, de área A e de distância d entre as placas e pode ser utilizada para estimar a espessura da região de depleção, conhecendo-se a capacitância e a área ativa do detector. A espessura da região de depleção de um fotodiodo Hamamatsu S-1722/01, por exemplo, pode ser estimada em $100 \mu\text{m}^{(17)}$.

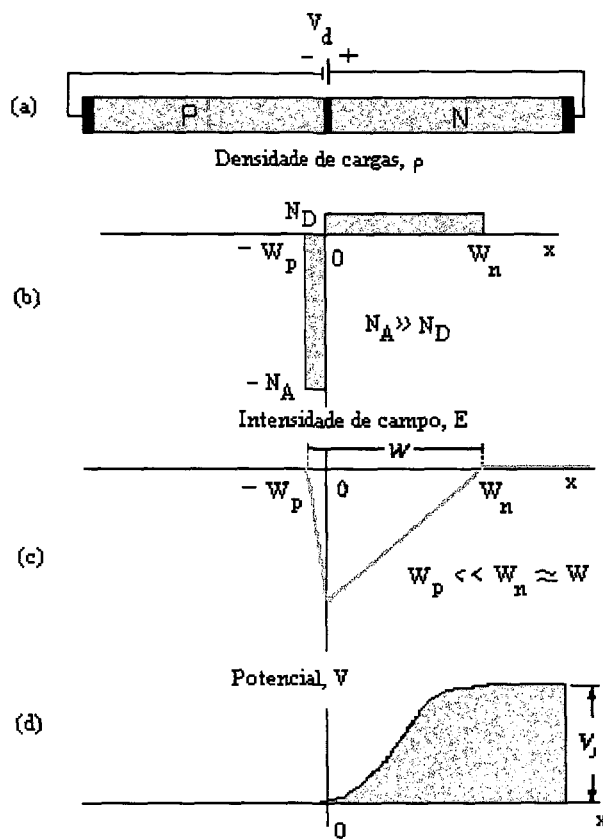


Figura 5: (a) junção-PN reversamente polarizada. (b) Densidade de cargas. (c) Intensidade de campo elétrico. (d) Variação do potencial em função da distância $x^{(21)}$.

Substituindo-se d da eq. (4) pelo da eq. (2) e tomando-se α igual a $1/2$, obtém-se a seguinte expressão:

$$C \cong A (e \epsilon N / 2V_R)^{1/2} \quad (5)$$

Esta relação mostra que a capacitância da região de depleção diminui com o aumento da tensão reversa aplicada à junção semicondutora. A variação da capacitância em função da tensão reversa é ilustrada na Figura 6 para os diodos 1N914 e 1N916⁽²¹⁾.

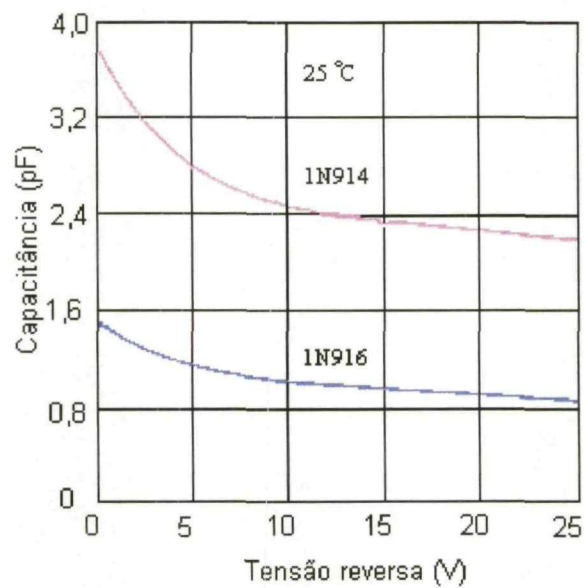


Figura 6: Variação da capacitância da junção em função da tensão reversa para os diodos de silício 1N914 e 1N916⁽²¹⁾.

e) Resolução em energia

Uma vez que existe uma proporcionalidade entre a resposta do detector e a energia da radiação incidente, a altura de cada pulso na saída do sistema de detecção será proporcional à energia da radiação. Assim, quando um feixe de radiação interage no detector, o espectro de energias da radiação é transformado em um espectro de pulsos, os quais são registrados pelo sistema eletrônico composto de pré-amplificador, amplificador e analisador multicanal.

Por outro lado, na saída do detector, uma pequena flutuação na altura dos pulsos pode ocorrer devido basicamente a dois fatores: a flutuação estatística do número de portadores de cargas criados pela radiação, e a influência do ruído dos componentes eletrônicos do sistema de detecção (detector, pré-amplificador, filtros, etc.). Portanto, quando um feixe monoenergético de radiação interage no detector, o espectro obtido apresenta uma forma aproximadamente gaussiana, conforme mostra a Figura 7. Na linha espectral, a espessura na metade da altura máxima da linha (FWHM, na abreviatura inglesa de “Full Width at Half Maximum”) é definida como sendo a resolução em energia do sistema de detecção. Outra maneira de se expressar a resolução R é pela seguinte relação:

$$R (\%) = (FWHM / E_0) \cdot 100 \quad (6)$$

onde E_0 é a energia ou o canal do fotopico, dependendo se a FWHM for medida em unidades de energia ou de canais. Quando a resolução em energia de um detector é muito pequena, diz-se que ele possui um ótimo poder de resolução, ou seja, é capaz de separar radiações com energias muito próximas, permitindo, portanto, a sua identificação, mesmo quando o pico aparece superposto a uma ampla faixa de efeitos estatisticamente incertos⁽²³⁾, como mostrado na Figura 8. Nesta figura, a variação entre os espectros é apenas o poder de resolução do detector; contudo,

apesar de possuir a mesma área nos três casos, o pico só fica perfeitamente identificado quando a resolução é de 1,75 keV.

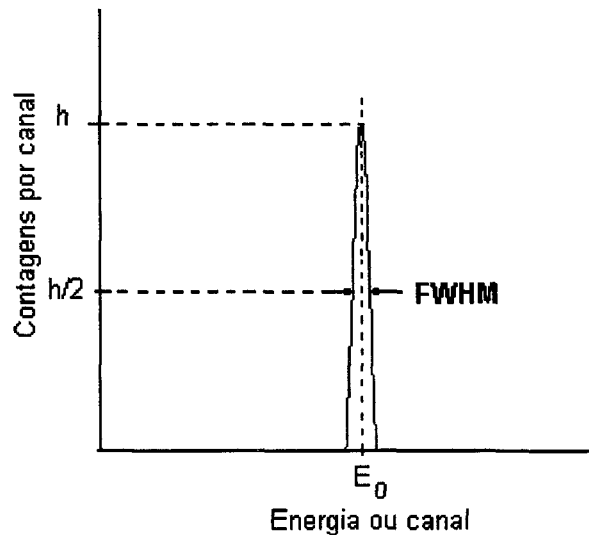


Figura 7: Espectro produzido por um feixe monoenergético de radiação.

O efeito da flutuação estatística do número de portadores de cargas criados pela radiação pode ser estimado, com boa aproximação, assumindo-se o fenômeno de geração de cargas como um processo estatístico de Poisson, no qual a variância é igual à média dos eventos. Portanto, se o número médio de pares produzidos pela radiação for N , o desvio padrão será $N^{1/2}$, de modo que, quanto maior o valor de N menor será o valor da relação $(N^{1/2} / N)$ e, por conseguinte, melhor a resolução em energia.

Como a radiação incidente no detector semicondutor produz um número muito grande de portadores de carga por interação (no detector semicondutor a energia média necessária para produzir um par elétron-lacuna é de aproximadamente 3,6 eV, enquanto que nos detectores gasosos e cintiladores necessita-se de 10 e 100 vezes mais energia, respectivamente), a flutuação estatística do número de portadores é menor, razão pela qual se obtém pulsos mais definidos. A comparação da

resolução em energia obtida utilizando-se três tipos diferentes de detectores (cintilador, proporcional e semiconductor), submetidos à mesma fonte de raios-X⁽²³⁾, é mostrada graficamente na Figura 9. O maior poder de resolução do detector semiconductor de Si(Li) faz com que nestes detectores haja uma melhor separação das componentes de energia. Contudo, o fato de detectores de Si(Li) necessitarem de baixa temperatura de operação⁽²³⁾ torna o seu emprego muito limitado.

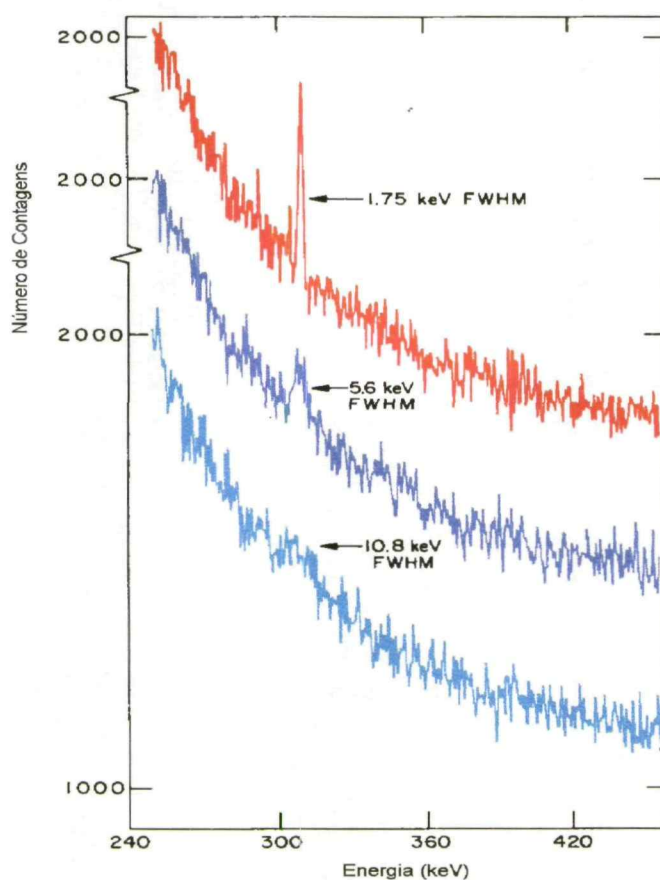


Figura 8: Efeito que uma boa resolução tem em identificar um pequeno pico superposto a uma faixa de efeitos estatisticamente incertos⁽²³⁾.

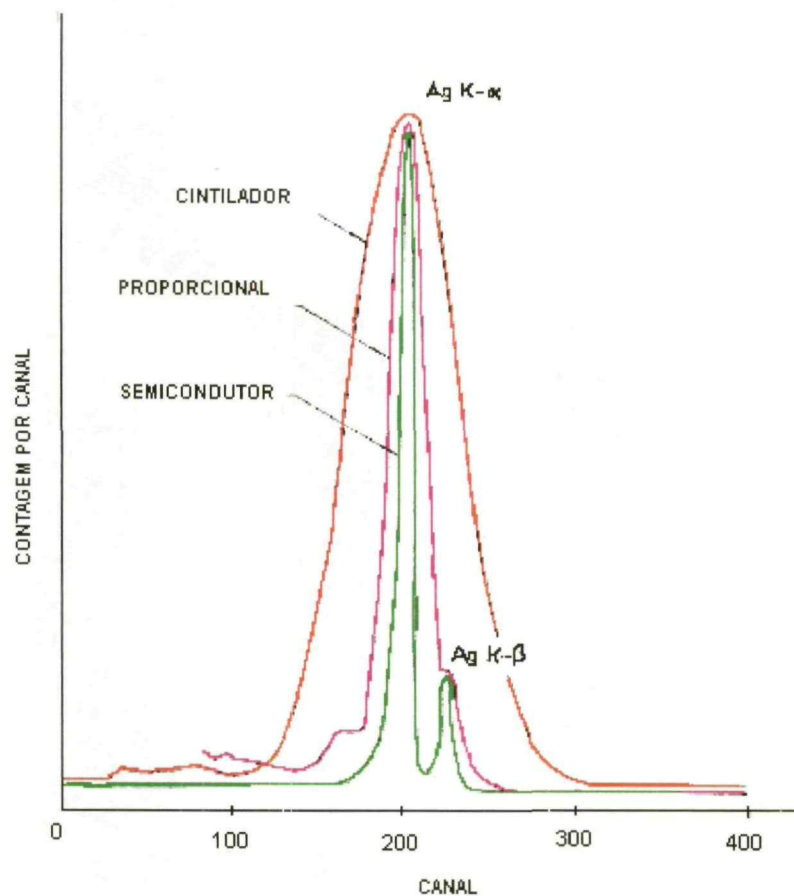


Figura 9: Comparação do espectro de raios-X da série K (Ag) registrado por três diferentes tipos de detectores. As energias K_{α} e K_{β} são de aproximadamente 21 e 25 keV⁽²³⁾.

Em geral, a contribuição do ruído eletrônico é expresso em termos de “cargas equivalente ao ruído” (ENC, na abreviatura inglesa de Equivalent Noise Charge),

o qual é definido como sendo a quantidade de carga que, ao ser aplicada como um pulso- δ de corrente no detector, fornece na saída do sistema de medida um sinal igual ao valor eficaz da saída de sinal devido apenas ao ruído⁽²⁴⁾. A avaliação do ruído do sistema de detecção pode ser feita a partir do esquema da Figura 10, onde a capacitância C_d inclui não só a capacitância do detector mas também a capacitância parasita dos cabos e conectores situados entre o detector e o pré-amplificador; C_{gs} é a capacitância de entrada do transistor de efeito de campo (FET, na abreviatura inglesa de Field Effect Transistor); R_s , R_{sh} são as resistências série e paralela do fotodiodo e I_d é a corrente reversa do fotodiodo. Tais considerações foram amplamente discutidas por Gramsch e colaboradores⁽¹⁶⁾ e Castoldi e Fiorini⁽²⁴⁾, os quais mostram que a variância do ruído total ENC^2 em função das variâncias do ruído série e do ruído paralelo é dada pela expressão

$$ENC^2 = ENC_{\text{série}}^2 + ENC_{\text{paralelo}}^2 \quad (7)$$

onde:

$$ENC_{\text{série}}^2 = [(4k_B R_s C_{gs} T / \tau_p) + 2A_{1/f} C_{gs}] [(C_d / C_{gs})^{1/2} + (C_{gs} / C_d)^{1/2}]^2 C_d \quad e \quad (8)$$

$$ENC_{\text{paralelo}}^2 = [(2eI_d / 3) + (4k_B T / 3R_f)] \tau_p \quad (9)$$

Sendo:

T – temperatura (K);

k_B – constante de Boltzmann ($J.K^{-1}$);

R_f – resistor da malha de realimentação do pré-amplificador (Ω);

τ_p – constante de tempo de formação do pulso (s);

$A_{1/f}$ – constante que determina para cada FET a dependência do ruído com a frequência ($J.F^{-1}$);

e – carga elementar.

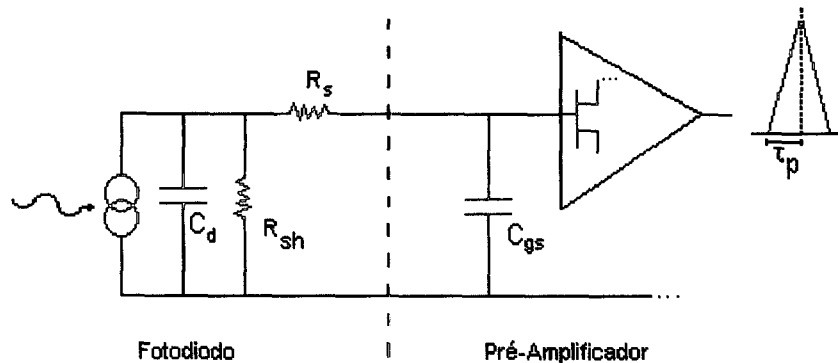


Figura 10: Esquema de um sistema constituído de detector e pré-amplificador para a avaliação do ruído.

A partir da análise das Equações 8 e 9 pode-se concluir que os pré-requisitos para a obtenção de uma boa resolução são:

- O fotodiodo deve ter um baixa corrente reversa, já que esta se constitui em uma fonte de ruído paralelo. Isto pode ser possível pela escolha criteriosa do fotodiodo, ou atuando-se em parâmetros operacionais, tais como tensão de polarização reversa ou temperatura do fotodiodo.
- Tanto o fotodiodo como o FET de entrada devem ser utilizados em baixa temperatura de operação, uma vez que esta influencia ambas as formas de ruído: série e paralelo. Os resultados mostrados na Tabela 3 ilustram como a variação da temperatura do fotodiodo S-3590/05 afeta o ruído e, conseqüentemente, a resolução do sistema de detecção;
- A capacitância C_d deve ser a menor possível e deverá ser casada com a capacitância de entrada do FET ($C_d \approx C_{gs}$), uma vez que estas condições

permitem minimizar o ruído série. Para que a capacitância C_d seja baixa é necessário que a conexão do detector ao FET seja feita utilizando-se conectores especiais e cabos curtos.

- Uma vez que parte do ruído série é inversamente proporcional à constante de tempo de formação do pulso, enquanto que o ruído paralelo é diretamente proporcional a esta, é necessário utilizar uma constante de tempo de formação do pulso adequada para cada aplicação. A escolha da constante de tempo de formação do pulso pode ser feita geralmente por uma opção acessível no bloco amplificador do sistema de detecção. O gráfico da Figura 11 mostra a resolução (expressa em % de FWHM) como função da constante de tempo de formação do pulso para o fotodiodo S-1723/06 (Hamamatsu), de $10 \times 10 \text{ mm}^2$ de área⁽¹⁶⁾. Neste caso, a relação entre os diversos parâmetros das equações (8) e (9) é tal que o valor de τ_p que proporcionou ao detector menor ruído e portanto maior poder de resolução foi de 4μ .

Tabela 3: Variação da resposta do fotodiodo S-3590/05 para fótons de 59,5 keV em função da temperatura e do ruído eletrônico⁽¹⁶⁾.

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	ENC	FWHM (%)
25	434	6,2
20	333	4,7
0	261	3,7
-10	224	3,2

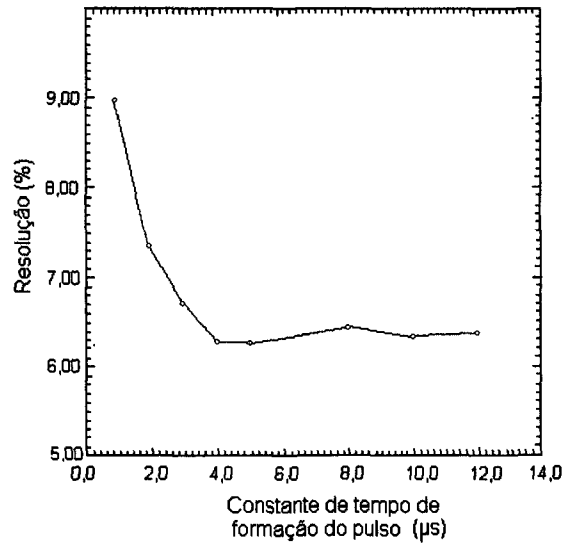


Figura 11: Resolução em função da constante de tempo de formação do pulso para um fotodiodo S1723-06, de $10 \times 10 \text{ mm}^2$ de área⁽¹⁶⁾.

f) Eficiência

Pode-se classificar a eficiência de detecção basicamente em absoluta e intrínseca. A eficiência absoluta é definida como sendo a relação entre o número de pulsos registrados pelo detector e o número de fótons emitidos pela fonte de radiação, sendo portanto, fortemente influenciada pela geometria fonte-detector (distância fonte-detector, área do detector, etc.). Já a eficiência intrínseca é a relação entre o número de pulsos registrados pelo detector e o número de fótons incidentes nele, o que a torna mais dependente das características próprias do detector. Os pulsos registrados na saída do detector podem ter diferentes amplitudes dependendo do processo de interação da radiação com o detector (efeito fotoelétrico, espalhamento Compton, retroespalhamento, etc.), razão pela qual é comum o uso do

conceito de eficiência de pico ou eficiência para absorção da energia total, que leva em consideração apenas os pulsos registrados que são consequência de interações onde as energias dos fótons incidentes são totalmente depositadas. O número desses eventos de máxima absorção de energia pode ser determinado, no espectro de distribuição de energias, a partir da área sob o pico (Figura 12-a). Todavia, o cálculo desta área não é simples, uma vez que além da radiação de fundo (“background”) os picos estão quase sempre superpostos ao “Compton contínuo” causado pela interação da radiação com o detector sem que haja absorção total de sua energia. Neste caso, algumas contagens são adicionadas ao processo e devem ser subtraídas conforme mostra a Figura 12-b.

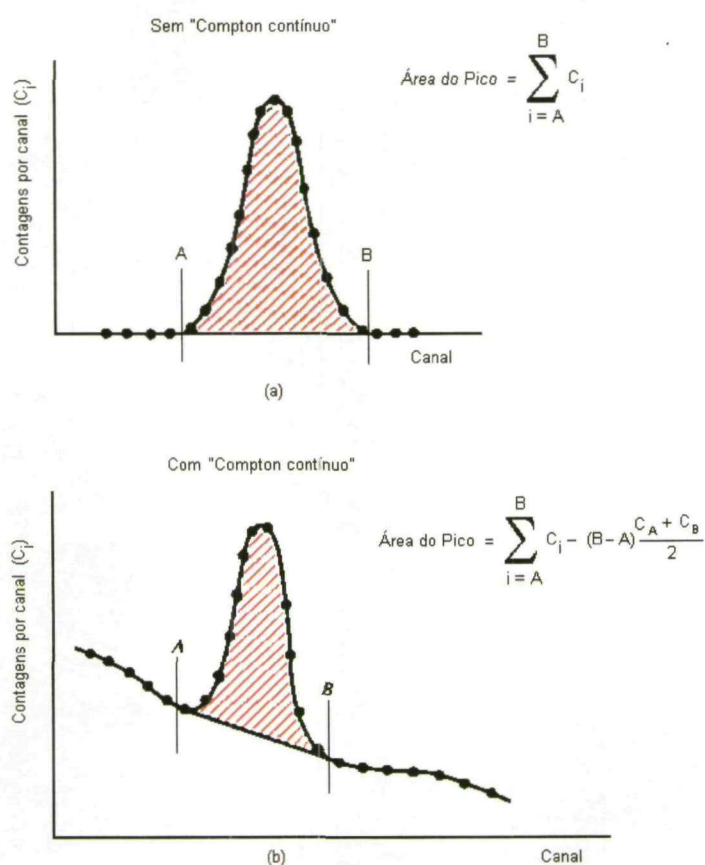


Figura 12: Métodos para a obtenção da área de pico de um espectro obtido em um multicanal⁽²³⁾.

No detector semicondutor o volume sensível à radiação é a região de transição de um material do Tipo-P para um do Tipo-N. A eq. (2) mostra que a espessura dessa região de transição d depende da tensão de polarização reversa V_R aplicada na junção; logo, variações dessa tensão irão afetar sensivelmente a eficiência do detector. A dependência da eficiência de pico com a tensão de polarização para os fotodiodos HP-5082/4207, BPX-65, BPX-66 e BPW-34 pode ser observada nos gráficos apresentados na Figura 13. Esses resultados foram obtidos para fótons de 22,1 keV de energia de uma fonte de ^{109}Cd e mostram que, para cada fotodiodo, não só a eficiência de pico aumenta com o aumento da tensão de polarização reversa mas também que, para dois deles (BPW-34 e HP-5082/4207), a eficiência não sofre mais aumentos significativos a partir de 5V e 30V, respectivamente.

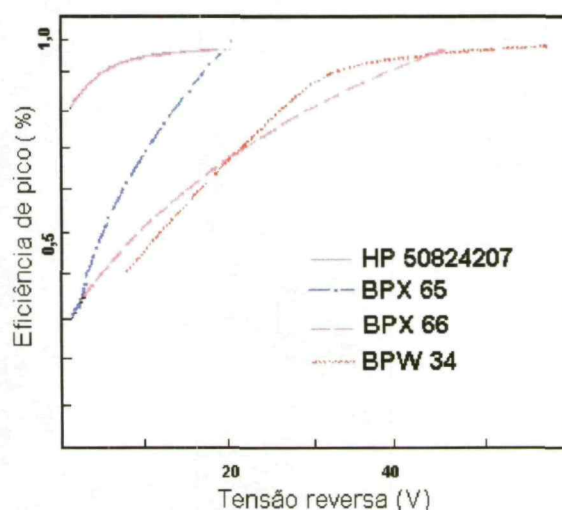


Figura 13: Dependência da eficiência de pico com a tensão de polarização para os fotodiodos HP5082-4207, BPX-65, BPX-66 e BPW-34 para fótons de 22,1 keV de uma fonte de ^{109}Cd (⁸).

O cálculo da eficiência de fotodiodos é feito com base no modelo descrito por Aoki e Koyama⁽¹⁰⁾, no qual supõe-se que os fótons interajam no volume sensível unicamente por efeito fotoelétrico ou espalhamento Compton, desprezando-se as interações múltiplas, cujas probabilidades de ocorrência são menores que 1% devido à pequena espessura da região de depleção. Contudo, leva-se em consideração não só o escape de fotoelétrons da região de depleção (elétrons de 100 keV têm um alcance superior a 58 μm no Si, o que é muito próximo de valores típicos de espessura de região de depleção) mas também a atenuação da radiação nos materiais existentes entre a fonte e o volume sensível do detector. Os valores teóricos e experimentais da eficiência de pico, encontrados por Terini e colaboradores⁽⁹⁾ para o fotodiodo SFH-206, em função da energia de fótons emitidos por fontes de ^{109}Cd , ^{133}Ba e ^{152}Eu são mostrados no gráfico da Figura 14. A forte dependência da eficiência com a energia é consequência da fina espessura da região de depleção do fotodiodo, que é de aproximadamente 88 μm .

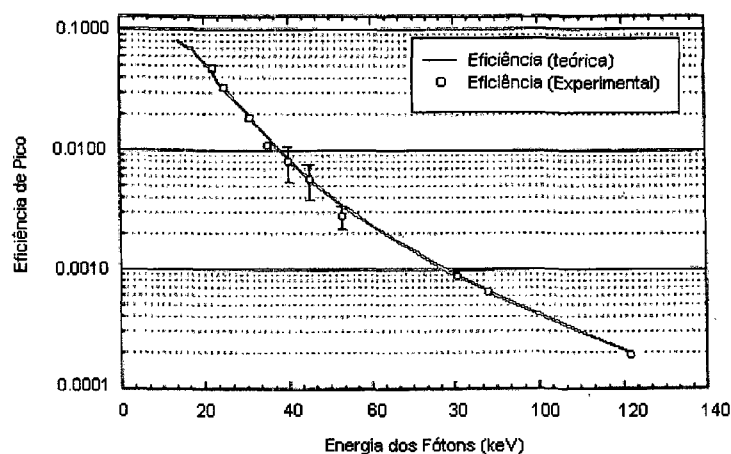


Figura 14: Eficiência de pico (teórica e experimental) em função da energia dos fótons de fontes de ^{109}Cd , ^{133}Ba e ^{152}Eu para o fotodiodo SFH-206⁽⁹⁾.

Com base ainda no modelo descrito por Aoki e Koyama é feita a correção do espectro experimental para a obtenção do espectro original, utilizado-se um programa de computador⁽⁹⁾. A Figura 15 mostra o espectro de ^{241}Am medido com um fotodiodo SFH-206 e a Figura 16 mostra o espectro de ^{241}Am após a aplicação das correções segundo o modelo de Aoki e Koyama. Vale salientar que a correção do espectro inclui também a correção devido aos raios-X característicos, produzidos pela absorção da radiação no contato metálico onde o fotodiodo é fixado.

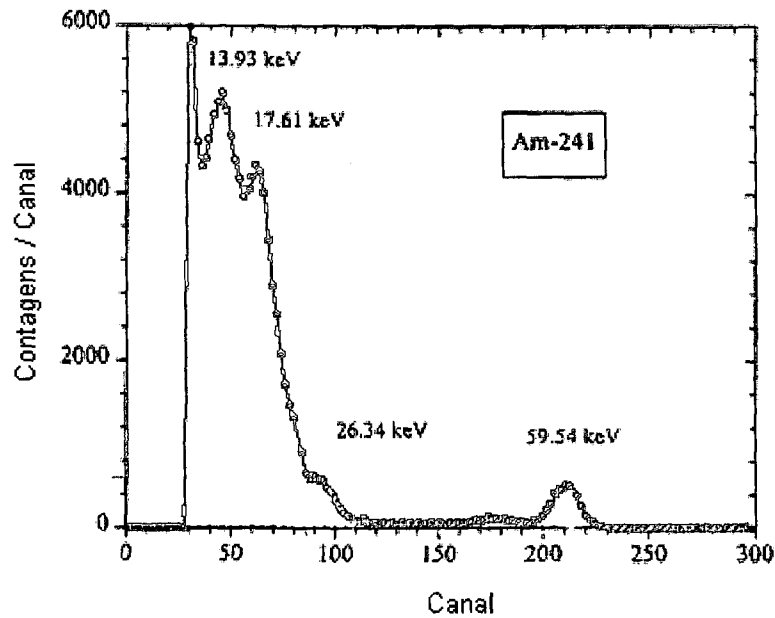


Figura 15: Espectro de uma fonte de ^{241}Am medido com o fotodiodo SFH-206⁽⁹⁾.

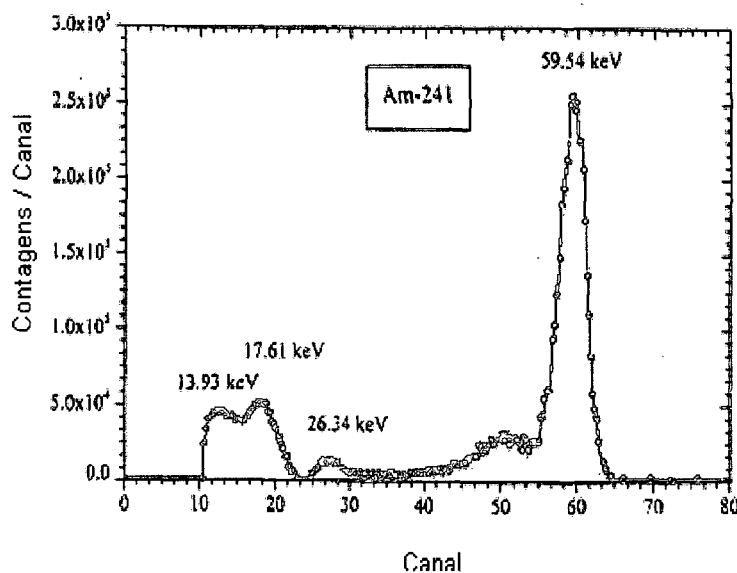


Figura 16: Espectro de uma fonte de ²⁴¹Am medido com o fotodiodo SFH-206 e posteriormente corrigido⁽⁹⁾.

g) Danos pela radiação

Com o uso intensivo do detector, alguns danos podem ocorrer no cristal devido aos efeitos da radiação. De fato, a radiação pode provocar mudanças no retículo cristalino, sendo que uma delas é conhecida como efeito Frenkel. Este efeito consiste no deslocamento de átomos da rede cristalina, ocupando espaços intermoleculares e constituindo-se em armadilhas para os elétrons. Essas mudanças na estrutura do material provocam alterações nas propriedades do detector, incluindo diminuição de sua resposta e do seu poder de resolução. A gravidade do dano depende do tipo de radiação e de sua energia, de modo que para partículas pesadas o dano é mais expressivo do que para elétrons e radiação gama. Por exemplo, o número de defeitos Frenkel produzidos por fragmentos de fissão é em torno de 100 a 1000 vezes maior do que o produzido por partículas alfa. Estudos realizados por Wittenburg⁽²⁵⁾ com o objetivo de verificar os danos causados pela radiação em fotodiodos do tipo PIN revelaram que esses detectores podem ser submetidos a

doses de até 5×10^3 Gy com poucas alterações de suas características, exceto um pequeno aumento da corrente de escuro. A Figura 17 mostra a alteração observada na corrente de escuro do fotodiodo BPW-34 quando submetido a doses de 1Gy, 740 Gy e 5×10^3 Gy.

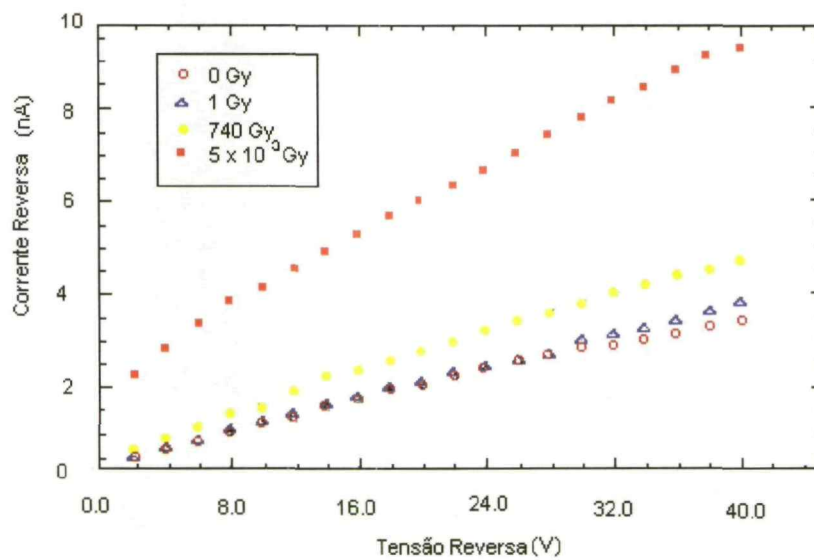


Figura 17: Efeito da dose na corrente de escuro do fotodiodo BPW-34⁽²⁵⁾.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – Fotodiodos

Neste trabalho, foram analisadas as respostas dos seguintes fotodiodos de silício de estrutura tipo PIN: SFH-206, SFH-205 e BPW-34, da Siemens⁽²⁶⁾, e XRA-50, da Detection Technology⁽²⁷⁾, conforme mostrado na Figura 18. As Tabelas 4 e 5 mostram as principais características destes fotodiodos e no Anexo II são apresentados os seus esquemas com as dimensões e os tipos de encapsulamentos. A partir dos dados observa-se que todos os fotodiodos da Siemens têm a mesma capacitância e a mesma área ativa. O fotodiodo SFH-205 diferencia-se dos demais por possuir um filtro de luz (“Daylight filter”) que o torna indicado para aplicações de 950 nm de comprimento de onda.

O fotodiodo XRA-50, segundo informações obtidas no catálogo do fabricante, é especialmente indicado para medida de fluorescência de raios-X, possuindo uma capacitância menor do que a dos demais fotodiodos, uma área ativa maior e não apresentando nenhuma camada protetora sobre a região ativa. Portanto,

a janela de entrada tem espessura desprezível. Vale ressaltar que este fotodiodo já havia sido usado em trabalhos anteriores realizados no DEN para detecção de partículas alfa⁽²⁸⁾.

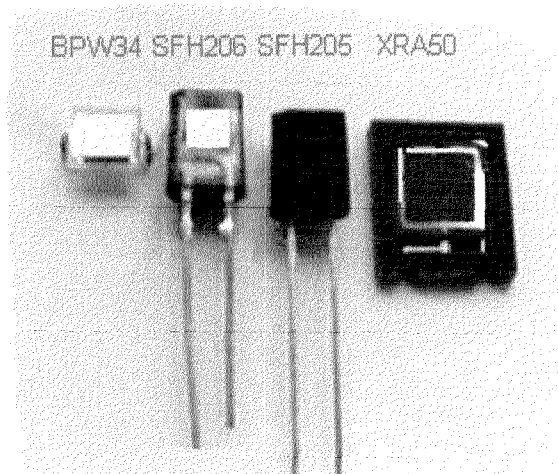


Figura 18: Fotodiodos SFH-206, SFH-205, BPW-34 e XRA-50.

Tabela 4: Resumo das características dos fotodiodos BPW-34, SFH-205 e SFH-206: tensão reversa máxima (V_R), corrente de escuro I_R ($V_R = 10V$ e $25\ ^\circ C$), capacitância nominal C ($V_R = 0V$ e $25\ ^\circ C$), área da região ativa e faixa de resposta, λ_R ⁽²⁶⁾.

Tipo	V_R (V)	I_R (nA)	C (pF)	Área ativa (mm ²)	λ_R (nm)
SFH-206	32	2	72	7,0	400-1100
SFH-205	32	2	72	7,0	900
BPW-34	32	2	72	7,0	400-1100

Tabela 5: Resumo das características do fotodiodo XRA-50: corrente de escuro I_R ($V_R = 50V$ e $25\text{ }^\circ C$), capacitância nominal C ($V_R = 30V$ e 25°), tensão reversa máxima (V_R) e área da região ativa⁽²⁷⁾.

Tipo	I_R (nA)	C (pF)	V_R (V)	Área ativa (mm ²)
XRA-50	0,3	14	100	25,0

3.2 – Estudo das Curvas Características dos Fotodiodos

Inicialmente foi efetuada a caracterização elétrica de cada fotodiodo com o objetivo não só de confirmar as informações dadas pelos fabricantes mas também de avaliar posteriormente os possíveis danos causados radiação ionizante. Essa etapa foi realizada no Laboratório de Microeletrônica do Departamento de Física da UFPE utilizando-se um Analisador de Parâmetros de Semicondutores HP 4155A para fazer o levantamento da curva de variação da corrente em função da tensão de polarização (Curva Característica $I \times V$). Esse equipamento permite variar a tensão nos terminais do fotodiodo, de tal maneira que, partindo-se de uma tensão de polarização direta, é possível reduzi-la passo a passo, passar pela tensão zero, até atingir uma tensão reversa próxima da tensão de ruptura do dispositivo. Durante este processo, a corrente através da junção é registrada.

As curvas características foram levantadas não só com fotodiodos no escuro mas também na presença de luz. Para os fotodiodos no escuro, a tensão aplicada variou de 1V a -20V. Enquanto que para os fotodiodos na presença de luz, a tensão variou de 1V a -5V. A fonte de iluminação utilizada foi uma lâmpada de 60 W, colocada à distância de 20 cm do fotodiodo. Todas as medidas foram feitas à temperatura de aproximadamente $23\text{ }^\circ C$.

3.3 - Arranjo Experimental

Para a realização das medidas do espectro de raios-X e radiação γ de baixa energia, cada fotodiodo foi encapsulado com uma capa de alumínio de espessura $3,2 \text{ mg/cm}^2$. Este invólucro foi colocado com a finalidade evitar a incidência de luz ambiente no fotodiodo, bem como reduzir o efeito do ruído eletrônico decorrente da interferência elétrica de outros equipamentos existentes no laboratório.

O fotodiodo foi conectado no modo pulso à entrada do pré-amplificador sensível a carga (Canberra, modelo 2004), o qual foi conectado à entrada de um amplificador e um analisador multicanal (Canberra, modelo INSP 14). As Figuras 19 e 20 mostram, respectivamente, o diagrama de blocos e o arranjo experimental utilizado. O espectro obtido foi analisado pelo programa InInspector Spectroscopy System, fornecido pela Canberra.

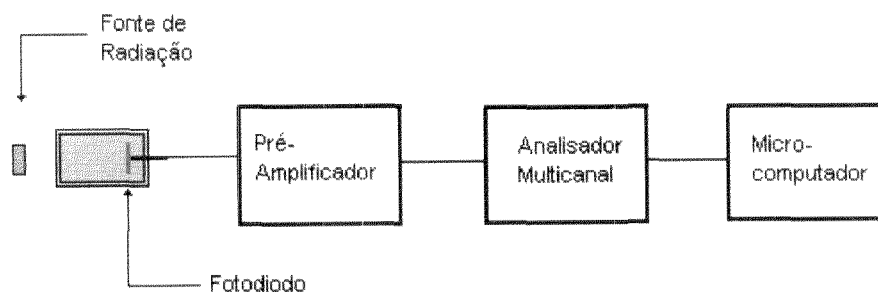


Figura 19: Diagrama de blocos do arranjo experimental.

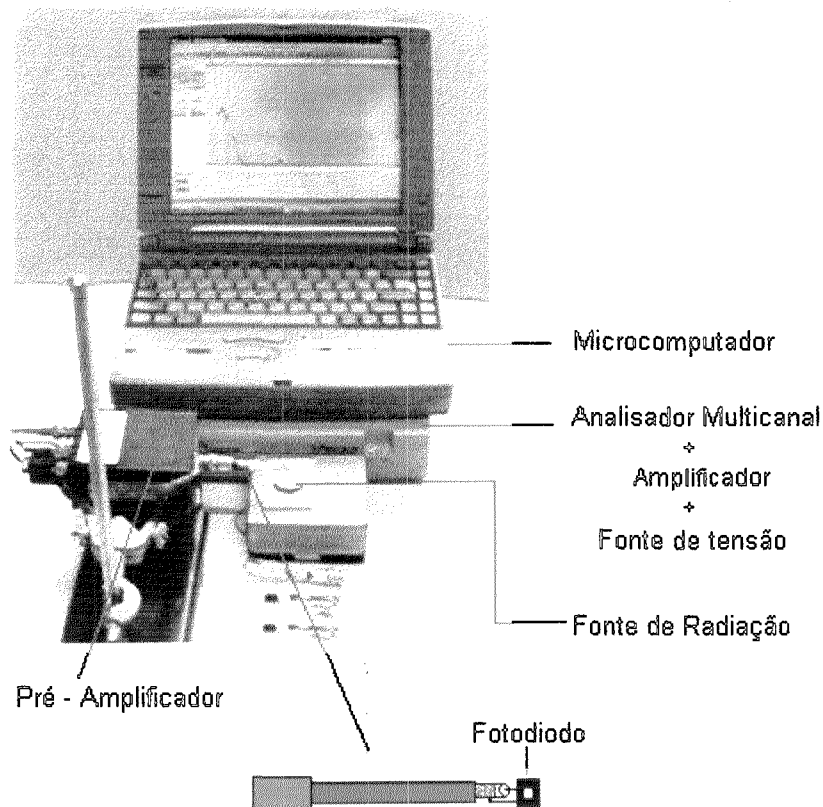


Figura 20: Arranjo experimental constituído de pré-amplificador, analisador multicanal e microcomputador.

Para realização das medidas, foram utilizadas as seguintes fontes emissoras de raios X e γ , cujas características se encontram na Tabela 6: ^{241}Am ($19,75 \times 10^4$ Bq), ^{133}Ba ($3,24 \times 10^4$ Bq), ^{109}Cd ($1,26 \times 10^4$ Bq) e ^{57}Co ($0,59 \times 10^4$ Bq), todas elas da marca Spectrum Techniques, modelo RSS-8. As energias de radiação X e γ , bem como as probabilidades de emissão foram obtidas do catálogo do Laboratoire de Metrologie des Rayonnements Ionisants (LMRI-CEA-1987). Além dessas fontes, foi utilizada também uma outra fonte de ^{241}Am com uma atividade de $3,7 \times 10^7$ Bq.

Tabela 6: Energias de radiação γ e X, e probabilidade de emissão das fontes de Amerício-241, Bário-133, Cádmi-109 e Cobalto-57.

Fonte	Energia (KeV)	Tipo de radiação	Probabilidade, Γ (%)
Amerício-241	11,9	X	0,8
	13,9	X	12,5
	17,8	X	18,0
	20,8	X	4,7
	26,35	γ	2,4
	59,54	γ	35,9
Bário-133	34,6	X	34,4
	30,9	X	64,2
	34,9	X	18,9
	35,8	X	4,3
	53,16	γ	2,2
	79,62	γ	2,6
	80,99	γ	34,1
Cádmi-109	22,0	X	82,6
	24,9	X	14,7
	25,5	X	2,7
	88,03	γ	3,7
Cobalto-57	14,41	γ	9,1
	122,06	γ	85,7
	136,47	γ	10,7

Para o estudo da variação da resolução em função da tensão reversa aplicada ao fotodiodo e em função da constante de tempo de formação do pulso foi utilizado o arranjo da Figura 21. Neste arranjo, o fotodiodo foi posicionado a 3 cm da fonte de ^{241}Am de $3,7 \times 10^7$ Bq de atividade, localizada no centro de uma blindagem de chumbo de 7 cm x 7 cm por 4 cm de altura com um orifício central de 2 mm de diâmetro.

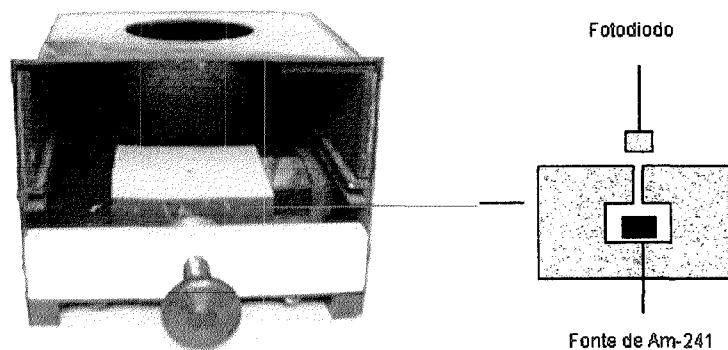


Figura 21: Arranjo utilizado no estudo da variação da resolução em função da tensão reversa aplicada ao fotodiodo e em função da constante de tempo de formação do pulso.

Esta fonte foi utilizada por ter uma atividade elevada, o que permitia efetuar a coleta dos dados em menos tempo.

Como o multicanal permitia efetuar a análise do espectro variando o “shaping time” do pulso, isto é, a constante de tempo de formação do pulso, foram realizadas medidas do espectro com os valores do shaping time de 1μ e 4μ . Para tanto, foi utilizado o arranjo da Figura 21 e uma tensão reversa de 20V foi aplicada ao

fotodiodo. Este valor foi usado para todos os fotodiodos da Siemens enquanto que para o fotodiodo XRA-50 foi usada uma tensão reversa de 50V.

Mantendo o fotodiodo fixo na frente da fonte colimada de ^{241}Am ($3,7 \times 10^7$ Bq) foi registrado o espectro da radiação γ de 59,54 keV, nas duas condições de shaping time. A partir do fotopico, a resolução foi obtida do programa InSpector Spectroscopy System do analisador multicanal segundo a definição dada no item 2.2.1-e. Com base nestes dados foi determinada, para cada fotodiodo, a constante de tempo que fornece a melhor resolução.

3.4 – Estudo da Resolução do Detector em Função da Tensão de Polarização

Para este estudo, foi utilizado o arranjo da Figura 21, e o shaping time foi de $1\mu\text{s}$. Os espectros foram medidos com a tensão de polarização do fotodiodo variando de 0 a 28V (com intervalos de 4V) para os fotodiodos BPW-34, SFH-205 e SFH-206 e, variando de 20 a 90V (com intervalos de 10V), para o fotodiodo XRA-50.

A partir dos espectros foi determinada a resolução e traçado o gráfico da resolução em função da tensão de polarização. Com este estudo foi possível obter a tensão de polarização para a qual cada fotodiodo apresentava a melhor resolução.

A partir da determinação deste valor foi possível efetuar o estudo da espectrometria de raios-X e γ .

3.5 – Espectrometria de Raios-X e γ

Para o estudo da espectrometria de raios-X e γ de baixa energia foram utilizadas as fontes da Spectrum Techniques e os fotodiodos SFH-206, SFH-205 e BPW-34 foram polarizados com 28 V, que foi a tensão que possibilitou melhor resolução. No caso do fotodiodo XRA-50, as medidas foram efetuadas com a tensão

de polarização de 60 V. A constante de tempo de formação do pulso foi de 1µs. A partir da medida do espectro foi possível traçar a reta de calibração para cada fotodiodo, a qual relaciona o canal do fotopico com a energia da radiação incidente.

A partir do espectro foi também possível determinar a eficiência de fotopico dos fotodiodos em estudo. Para tanto, foi delimitada a região do fotopico e, a partir do valor da área fornecida pelo InSpector Spectroscopy System (do multicanal), foi possível determinar a eficiência pela relação

$$\xi = C / (t \cdot A \cdot \Gamma) \quad (10)$$

onde C é a área do fotopico obtida no tempo de contagem t segundos, A é a atividade da fonte e Γ é probabilidade de emissão da radiação cuja energia corresponde à energia do fotopico.

A partir dos valores da eficiência, determinada para cada fonte, foi possível traçar a curva da eficiência em função da energia da radiação incidente.

3.6 – Determinação do Espectro de Raios-X Característicos de Amostras de Ag e Pb Utilizando o Fotodiodo BPW-34

Com o sistema previamente calibrado em energia, foram feitas medidas do espectro de raios-X característicos de amostras de Ag (2,0 x 3,0 x 0,3 mm) e Pb (2,0 x 3,0 x 1,0mm), cujas linhas de emissão são dadas na Tabela 7. Para tanto, alinhou-se a amostra com o anodo do tubo, conforme esquematizado na Figura 22. Foi utilizado um tubo de raios-X Rörrix, modelo DR124-30-40, com uma tensão de 65 kV e corrente de 50 mA durante um tempo de 1s.

Ainda com o mesmo arranjo experimental da Figura 22, foi feita a medida do espectro de uma amostra composta de 50 % de Ag e 50 % de Pb.

Tabela 7: Linhas de raios-X característicos de Ag e Pb⁽²⁹⁾.

Elemento	Linha	Energia (keV)
Ag	K α_2 KL ₂	21,99
	K α_1 KL ₃	22,16
	K β_3 KM ₂	24,91
	K β_1 KM ₃	24,94
	L η L ₂ M ₁	2,81
	L β L ₂ M ₄	3,15
	L ι L ₃ M ₁	2,63
	L α_2 L ₃ M ₄	2,97
	L α_1 L ₃ M ₅	2,98
	L $\beta_{2,1,5}$ L ₃ N _{4,5}	3,35
	Pb	K α_2 KL ₂
K α_1 KL ₃		74,97
K β_3 KM ₂		84,45
K β_1 KM ₃		84,93
L η L ₂ M ₁		11,35
L β_1 L ₂ M ₄		12,61
L ι L ₃ M ₁		9,18
L α_2 L ₃ M ₄		10,45
L α_1 L ₃ M ₅		10,55
L $\beta_{1,5}$ L ₃ N ₄		12,60
L β_2 L ₃ N ₅		12,62
M β M ₄ N ₆		2,44
M α_2 M ₅ N ₆		2,34
M α_1 M ₅ N ₇		2,35

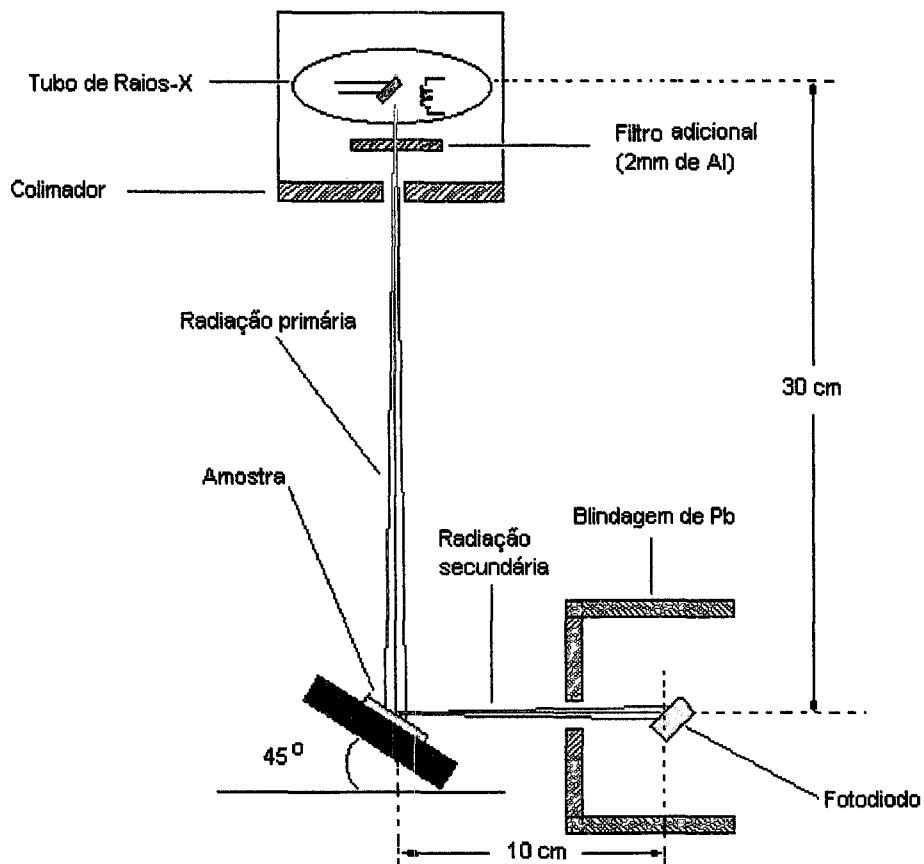


Figura 22: Esquema do arranjo experimental utilizado para medida do espectro de raios-X característicos.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Estudo das Curvas Características dos Fotodiodos

Na Figura 23 são apresentados os resultados da corrente medida com os fotodiodos em ausência de luz (escuro). Não são apresentados os valores da corrente em função da polarização direta, uma vez que esta não tem interesse do ponto de vista do uso dos fotodiodos como detectores de radiação nuclear. Os resultados mostram não só que todos os fotodiodos em estudo apresentam correntes reversas da ordem de nA, aumentando com o aumento da tensão de polarização, mas também que para uma tensão reversa de 10 V, os valores das correntes reversas de todos os fotodiodos (exceto o XRA-50) são, em geral, muito próximos dos descritos pelo fabricante.

O fotodiodo BPW-34 é o que apresenta a menor variação e o menor valor de corrente reversa. O valor da corrente reversa encontrado para o fotodiodo XRA-50, além de ser muito maior do que o valor relatado pelo fabricante, que é de 0,3 nA, é também superior a 1,5 nA, que foi o valor obtido na caracterização feita por Ferreira Filho⁽²⁸⁾, antes da realização das medidas com radiação alfa. Portanto, o aumento na

corrente reversa do fotodiodo XRA-50 deve-se provavelmente a danos ocorridos devido ao seu uso anterior como detector de radiação alfa, devendo provavelmente contribuir para o aumento do ruído e, portanto, para a deterioração da resolução deste fotodiodo.

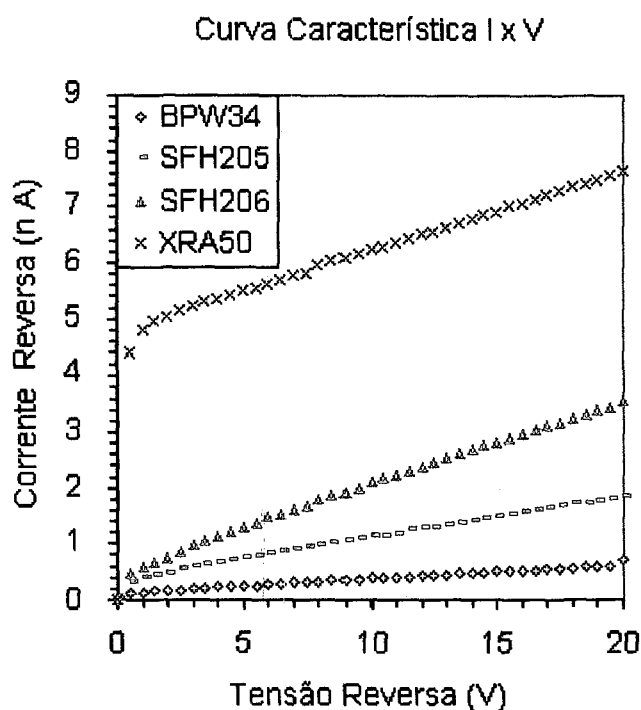


Figura 23: Curva característica I x V com os fotodiodos em ausência de luz (escuro).

Os resultados com os fotodiodos irradiados com luz de uma lâmpada de 60 W, conforme mostrado na Figura 24, demonstram que o fotodiodo XRA-50, de maior área, apresentou a maior corrente reversa. Por outro lado, o fotodiodo SFH-205, que apresenta um filtro de luz sobre a região ativa, demonstrou menor sensibilidade à luz, quando comparado com os demais fotodiodos de mesma área. Isto se deve ao fato

do fotodiodo SFH-205 possuir uma sensibilidade à luz limitada a comprimentos de onda de 950 nm, enquanto que a resposta dos outros fotodiodos da Siemens abrange praticamente todo o espectro de luz visível (390 a 750 nm).

A Tabela 8 mostra a corrente reversa por unidade de área ativa para uma tensão reversa de 4 V. Estes dados revelam que os fotodiodos BPW-34, SFH-206 e XRA-50 possuem praticamente a mesma sensibilidade por mm² de área ativa e, portanto, pode-se considerar que a maior sensibilidade do fotodiodo XRA-50 obtida nos resultados da Figura 24 é consequência basicamente de sua maior área ativa.

Resposta dos Fotodiodos Irradiados com Luz

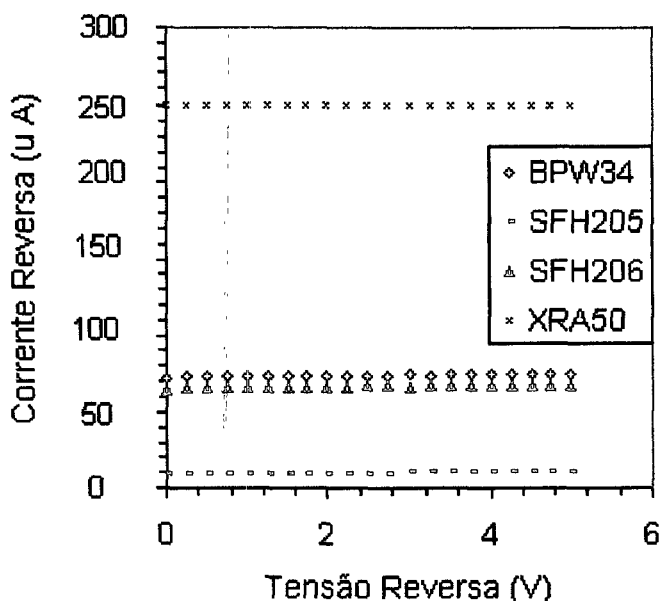


Figura 24: Resposta dos fotodiodos irradiados com luz de uma lâmpada de 60 W.

Tabela 8: Resposta dos fotodiodos (corrente reversa / unidade de área ativa) irradiados com luz de uma lâmpada de 60 w para uma tensão reversa de 4 V.

Fotodiodo	BPW-34	SFH-206	XRA-50	SFH-205
Resposta à luz em A/ mm ²	1,06 x 10 ⁻⁵	0,95 x 10 ⁻⁵	1,00 x 10 ⁻⁵	1,3 x 10 ⁻⁶

4.2 – Estudo da Resolução do Detector em Função da Constante de Tempo de Formação do Pulso

A variação da resolução do fotopico correspondente a fótons de 59,54 keV da fonte de ^{241}Am em função da constante de tempo de formação do pulso (τ_p) é mostrada na Tabela 9, para cada fotodiodo. Observa-se que para todos os fotodiodos o melhor resultado foi obtido utilizando-se um “shaping time” de 1 μs . Na Figura 25 é apresentado o espectro de ^{241}Am medido com o fotodiodo BPW-34 para $\tau_p = 4 \mu\text{s}$ (a) e para $\tau_p = 1 \mu\text{s}$ (b). Pode-se notar a partir destes resultados que utilizando-se um tempo de formação do pulso de 1 μs não só é obtida uma melhor resolução para o fotopico de 59,54 keV como também é possível a separação do fotopico de 17,8 keV.

Como parte do ruído série é inversamente proporcional à constante de tempo de formação do pulso, enquanto que o ruído paralelo é diretamente proporcional a esta, dependendo dos demais parâmetros utilizados nas Equações 8 e 9, haverá apenas um valor de τ_p que produzirá o menor ruído (série e paralelo), para cada fotodiodo. Portanto neste estudo o melhor valor encontrado foi $\tau_p = 1 \mu\text{s}$ para todos os fotodiodos.

Tabela 9: Variação da resolução (keV) do fotopico correspondente a fótons de 59,54 keV da fonte de ^{241}Am em função da constante de tempo de formação do pulso para cada fotodiodo.

τ_p (μs)	BPW-34	SFH-205	SFH-206	XRA-50
1	3,33	3,30	3,70	5,57
4	3,56	3,60	4,20	5,90

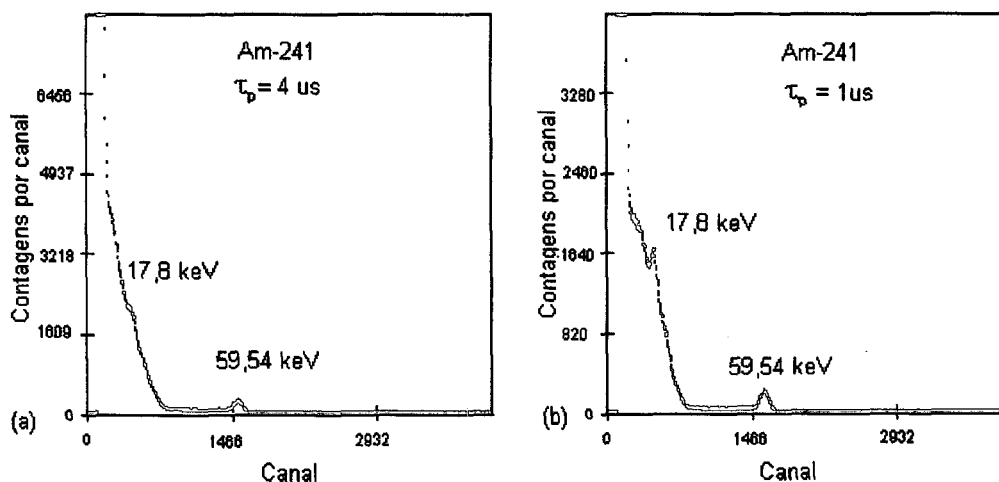


Figura 25: Espectros da fonte de ^{241}Am medidos com o fotodiodo BPW-34 para $\tau_p = 4 \mu\text{s}$ (a) e para $\tau_p = 1 \mu\text{s}$ (b).

4.3 – Estudo da Resolução do Detector em Função da Tensão de Polarização:

A Tabela 10 apresenta a resolução para diversos valores de tensão reversa do fotodiodo. Estes resultados mostram que, de modo geral, para todos os fotodiodos estudados, exceto o XRA-50, a resolução variou entre 3,23 e 4,0 keV para valores de tensão entre 4V e 28V. No caso do fotodiodo XRA-50, que tem maior corrente reversa, a resolução variou entre 4,35 e 5,57 keV para valores de tensão entre 20V e 90V. Vale ressaltar que o fotodiodo SFH-205, apesar de apresentar menor sensibilidade à luz visível, não apresentou diferenças significativas na resolução em comparação aos fotodiodos sem filtro e de mesmas dimensões. Este resultado mostra que a presença do filtro não interfere na resposta deste fotodiodo como detector de radiação gama ou raios-X. O melhor resultado em termos de resolução (3,22 keV), foi obtido com o fotodiodo BPW-34 que, vale ressaltar, possui a menor corrente reversa no escuro.

Tabela 10: Resolução (keV) obtida com os fotodiodos para diferentes tensões de polarização.

Tensão (V)	BPW-34	SFH-205	SFH-206	XRA-50
0	3,70	3,70	4,00	-
4	3,57	3,60	3,80	-
8	3,53	3,43	3,72	-
12	3,35	3,32	3,70	-
16	3,33	3,30	3,71	-
20	3,33	3,30	3,70	5,57
24	3,30	3,32	3,72	-
28	3,23	3,30	3,68	-
30	-	-	-	4,65
40	-	-	-	4,43
50	-	-	-	4,40
60	-	-	-	4,35
70	-	-	-	4,45
80	-	-	-	4,70
90	-	-	-	5,00

A Figura 26 mostra a variação da resolução em função da tensão reversa. Em todos os casos, observa-se que a resolução inicialmente é alta e vai diminuindo, à proporção que a tensão aumenta até atingir um mínimo, a partir do qual duas situações acontecem: ou ela volta a crescer (como aconteceu com o fotodiodo XRA-50) ou se mantém praticamente inalterada.

O motivo pelo qual a resolução tem esse comportamento se deve ao fato de que, à medida que a tensão aumenta, não só a capacitância da região de depleção diminui, diminuindo o ruído do detector, como também mais cargas são coletadas, devido à diminuição das perdas por recombinação, minimizando o efeito da flutuação estatística do número de portadores de cargas.

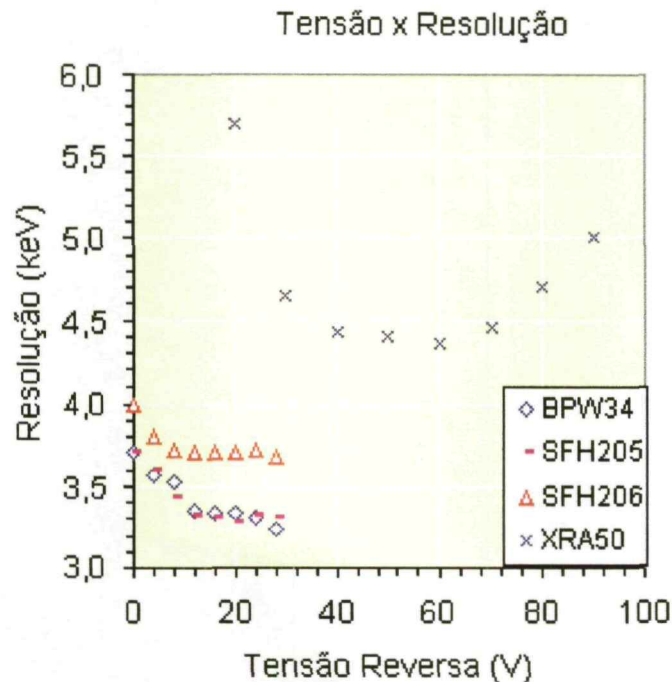


Figura 26: Variação da resolução em função da tensão reversa.

Por outro lado, o fotodiodo XRA-50 apresenta uma melhora da resolução à medida que a tensão reversa aumenta de 20 até 60 V e a partir deste valor há uma deterioração da resolução. Esta deterioração da resolução pode ser explicada pelo fato que, com aumento excessivo da tensão de polarização, pode ocorrer no detector semiconductor um processo semelhante ao que acontece nos detectores gasosos, isto é, portadores de cargas gerados pela radiação, ao serem acelerados pelo campo elétrico, podem promover geração de cargas secundárias (pré-avalanche), piorando a resolução. Este comportamento deveria ser observado somente para valores de tensão reversa muito próximos da tensão de ruptura, que no caso do XRA-50 é de 100V. Portanto o fato de estar sendo observado com uma tensão de 60V reforça os

dados já obtidos com a análise da curva característica deste fotodiodo que indica alteração das suas características devido ao seu uso como detector de radiação α e, portanto, possíveis danos da radiação.

O efeito da variação da resolução com a tensão de polarização pode ser observado na Figura 27 (a e b), onde é apresentado o espectro de raios-X e gama de uma fonte de ^{241}Am medido com o fotodiodo BPW-34 polarizado com uma tensão reversa de 10 V (a) e com uma tensão reversa de 28 V (b). No espectro da Figura 27 (b), pode-se observar que quando a tensão reversa é de 28 V é possível separar os fotopicos de 13,9 e 17,9 keV.

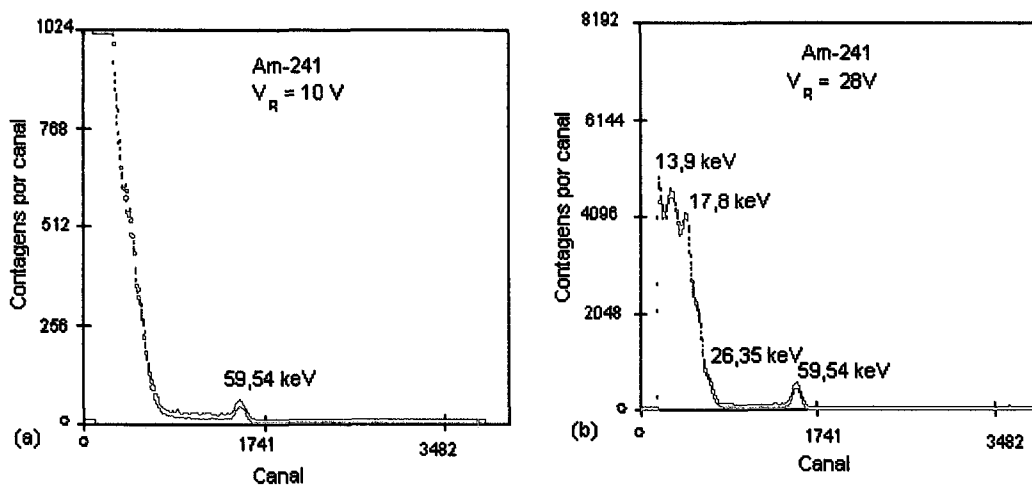


Figura 27: Efeito produzido no espectro pela variação da resolução com a tensão de polarização do fotodiodo BPW-34.

4.4 – Espectrometria de Raios-X e γ

A Figura 28 mostra o espectro de ^{241}Am medido com os fotodiodos XRA-50, SFH-206, SFH-205 e BPW-34. A resolução obtida com estes fotodiodos é apresentada na Tabela 11.

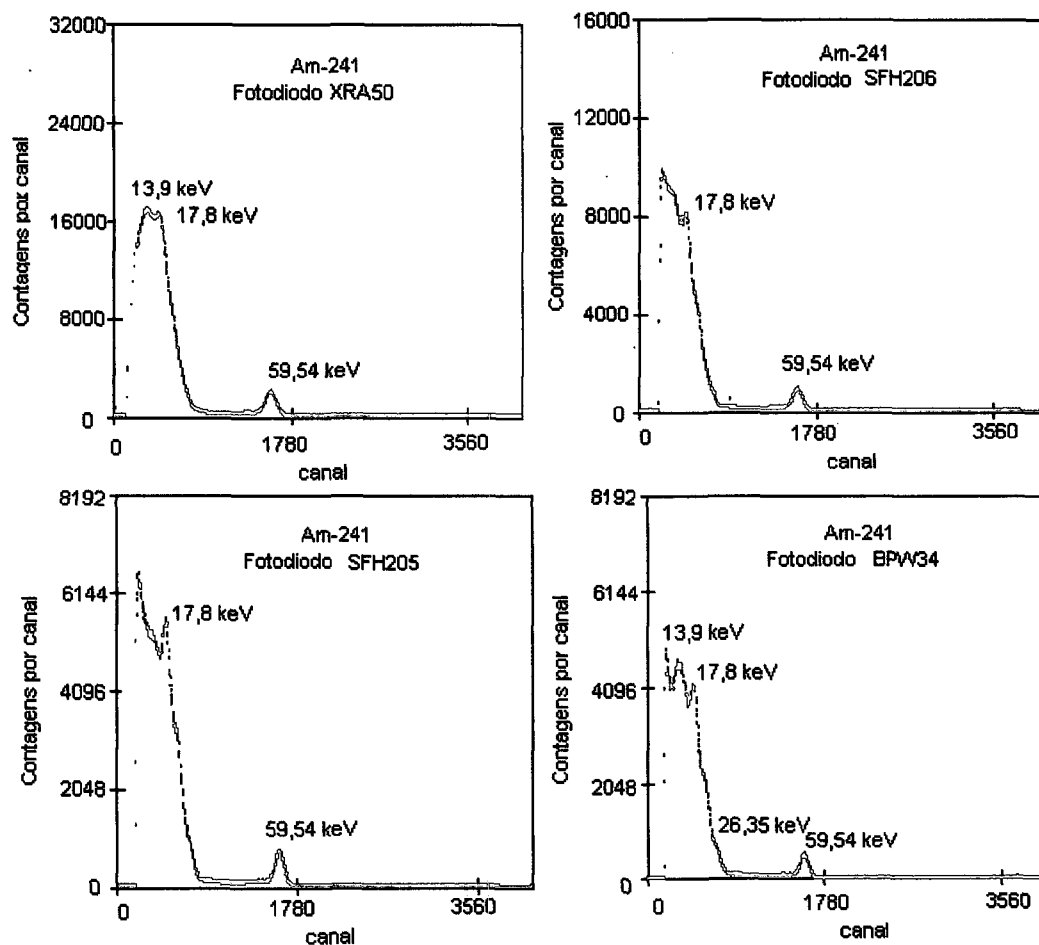


Figura 28: Espectros da fonte de ^{241}Am medidos com os fotodiodos XRA-50, SFH-206, SFH-205 e BPW-34.

Tabela 11: Resolução (keV) dos picos dos espectros da fonte de ^{241}Am , obtida com os fotodiodos BPW-34, SFH-206, SFH-205 e XRA-50.

Energia do pico (keV)	BPW-34	SFH-206	SFH-205	XRA-50
11,9 / 13,9	1,90	-	-	-
17,8	2,20	2,7	2,57	-
59,54	3,11	3,53	3,42	4,43

Os resultados mostram que só é possível observar o pico de 11,9 / 13,9 keV com o fotodiodo BPW-34, pois este apresenta o menor ruído e a melhor resolução. Com o fotodiodo XRA-50, apesar da sua grande área, o seu elevado ruído, comparado aos demais fotodiodos, não permitiu separar no espectro os picos de 11,9/13,9 keV e 17,8 keV.

O espectro de ^{133}Ba obtido com os mesmos fotodiodos é mostrado na Figura 29 e a resolução dos fotopicos é apresentada na Tabela 12. Pode-se observar que, para todos os fotodetectores, foi possível a separação dos fotopicos correspondentes às energias de 30,9/34,6 keV, 53,16 keV e 79,62/80,99 keV.

Observa-se também que nos espectros obtidos com os fotodiodos SFH-205, SFH-206 e BPW-34 aparece um pico antes do fotopico correspondente a 30,9 keV. Este pico corresponde provavelmente à radiação emitida pelo material que suporta a junção semicondutora (Figura 44, Anexo I). A determinação da energia correspondente a este fotopico será efetuada a partir da curva de calibração e discutida no próximo item.

As Figuras 30 e 31 mostram os resultados obtidos para os espectros de ^{109}Cd e ^{57}Co e a Tabela 13 apresenta o resultado em termos de resolução dos fotopicos. A análise dos espectros mostra que não houve praticamente diferença da resposta obtida com cada fotodiodo, exceto uma melhor separação dos fotopicos correspondentes às energias 88,03 e 136,47 keV no espectro medido com o fotodiodo XRA-50.

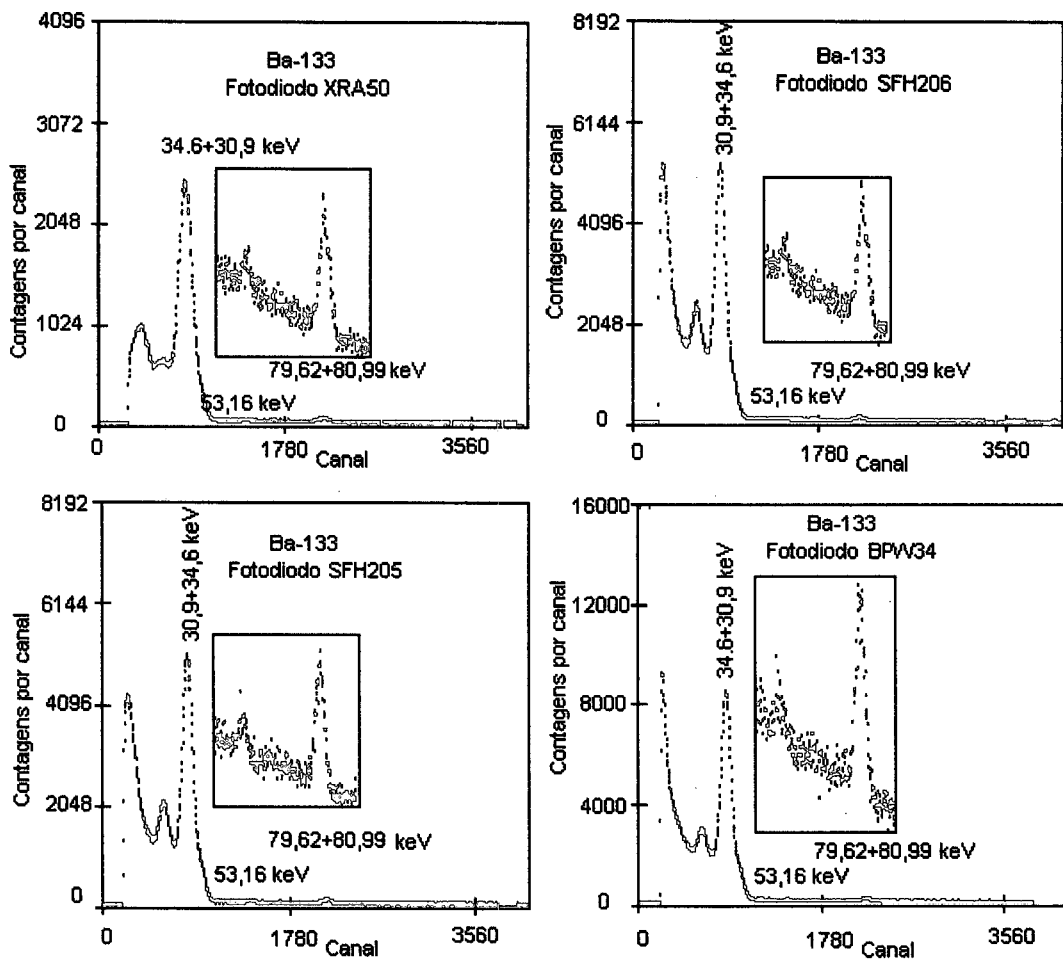


Figura 29: Espectros da fonte de ^{133}Ba medidos com os fotodiodos XRA-50, SFH-206, SFH-205 e BPW-34.

Tabela 12: Resolução (keV) dos picos dos espectros da fonte de ^{133}Ba , obtida com os fotodiodos BPW-34, SFH-206, SFH-205 e XRA-50.

Energia do pico (keV)	BPW-34	SFH-206	SFH-205	XRA-50
30,9 / 34,6 / 34,9	3,7	3,84	3,84	4,75
79,62 / 80,99	4,0	5,0	4,3	4,7

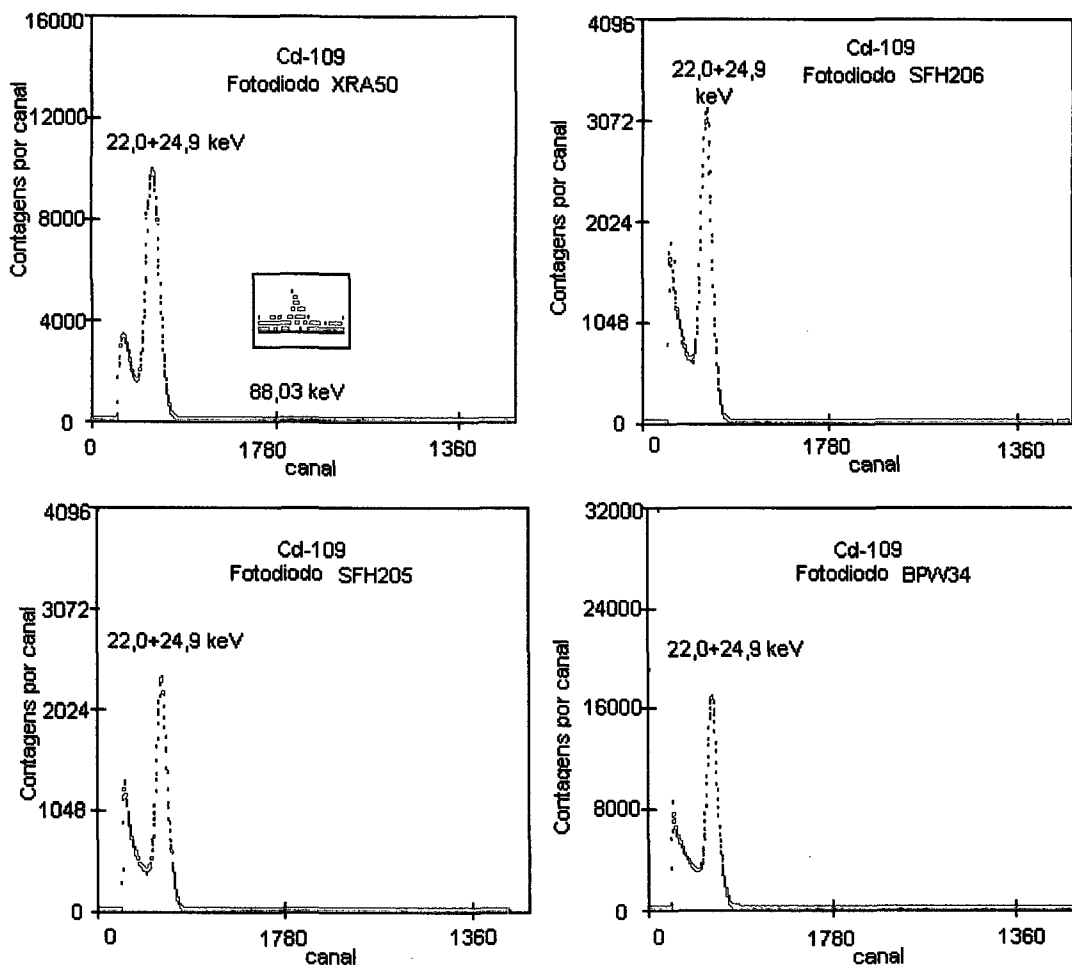


Figura 30: Espectros da fonte de ^{109}Cd medidos com os fotodiodos XRA-50, SFH-206, SFH-205 e BPW-34.

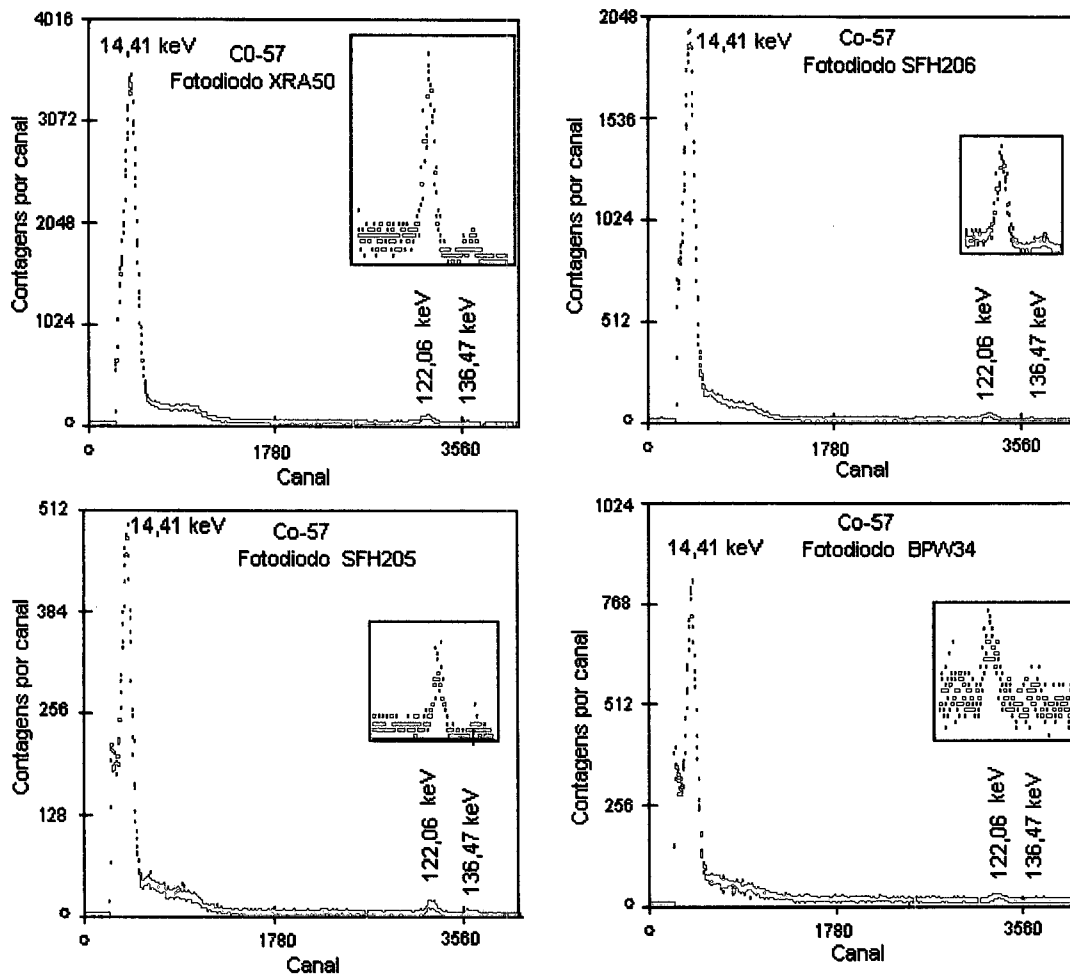


Figura 31: Espectros da fonte de ^{57}Co medidos com os fotodiodos XRA-50, SFH-206, SFH-205 e BPW-34.

Tabela 13: Resolução (keV) dos picos dos espectros das fontes de ^{109}Cd e ^{57}Co obtida com os fotodiodos BPW-34, SFH-206, SFH-205 e XRA-50.

Fonte	Energia (keV)	BPW-34	SFH-206	SFH-205	XRA-50
Cádmio-109	22,0 / 24,9	2,6	4,05	4,01	4,82
	14,41	2,6	3,28	3,0	3,68
Cobalto-57	122,06	-	-	-	2,90

4.5 – Curvas de Calibração em Energia

A partir dos dados dos espectros foi possível obter as curvas de calibração que relacionam o canal do fotopico com a energia da radiação. A Figura 32 mostra a reta de calibração canal-energia ajustada para a resposta de cada fotodiodo. Nesta figura também são apresentados o coeficiente de determinação (R^2) e a equação da reta, dada por $E = aC + b$, onde E é a energia da radiação em keV e C é o canal de localização do fotopico. A análise desses resultados revela que cada fotodiodo em estudo apresenta uma forte relação linear entre a energia da radiação incidente e a sua resposta, uma vez que, para todos eles, o valor do coeficiente de determinação encontrado foi praticamente igual a 1.

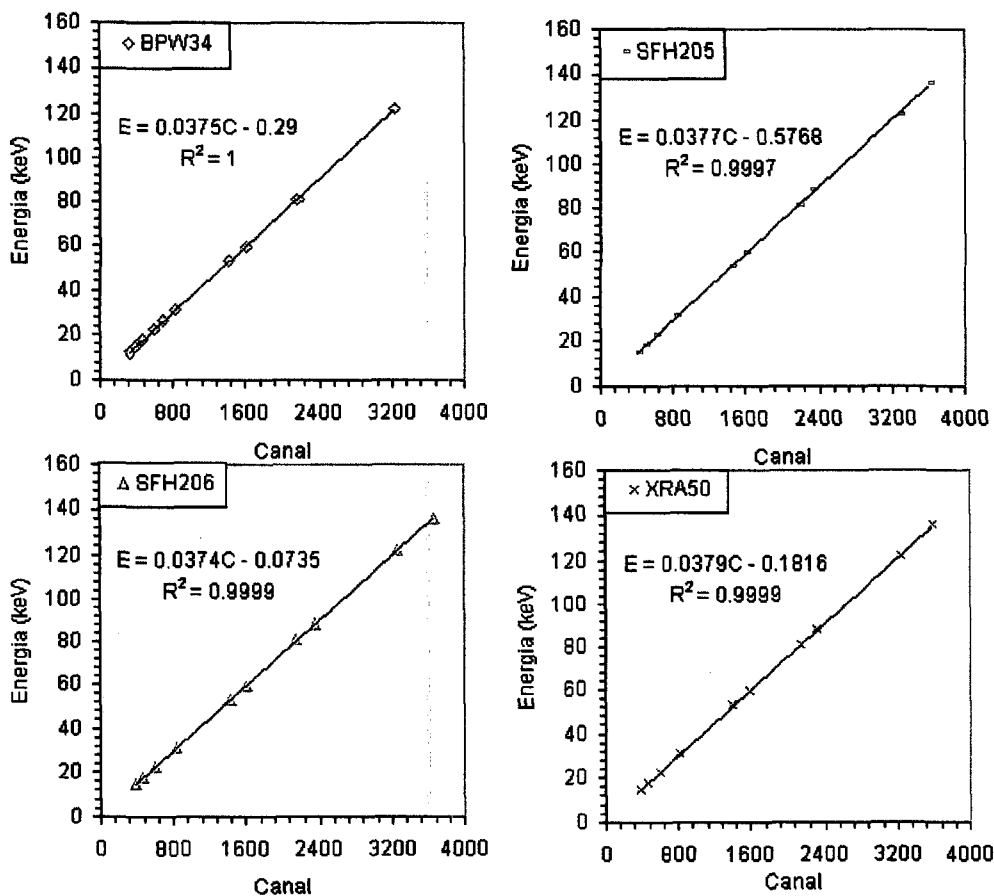


Figura 32: Retas de calibração canal-energia para cada fotodiodo.

Além disso, o fato de as retas de calibração possuírem praticamente as mesmas inclinações, significa que os fotodiodos em estudo produzem praticamente as mesmas respostas (canal do fotopico) quando submetidos às radiações X e γ .

Com base nas curvas de calibração determinou-se a energia da radiação correspondente ao fotopico encontrado no espectro de ^{133}Ba . O valor encontrado foi de 22,3 keV que corresponde à série K de fluorescência da prata, conforme Tabela 7. Esta radiação surge da interação da radiação incidente com os contatos de prata da junção.

Por outro lado, o não aparecimento do fotopico de raios-X característicos no espectro de ^{133}Ba medido com o fotodiodo XRA-50 pode ser explicado pelo fato de que, segundo o catálogo do fabricante, este detector é fixado em um contato de alumínio, o qual apresenta linhas de radiação característica de 1,47 e 1,55 keV, estando, portanto, fora da faixa de resposta observada para este fotodiodo.

O fato do fotopico de fluorescência da Ag não aparecer nos espectros de ^{241}Am , ^{109}Cd e ^{57}Co medidos com os fotodiodos da Siemens pode ser justificado analisando-se cada caso separadamente. No caso do espectro de ^{241}Am , o que acontece é que a radiação característica é mascarada pela radiação de 17,8 keV proveniente da fonte. No espectro de ^{109}Cd , a radiação emitida pela fonte, com exceção dos fótons de 88,03 keV, tem praticamente as mesmas energias da radiação característica da série K (Ag), acarretando, portanto um único fotopico no espectro. No espectro de ^{57}Co , como os fótons de 122,06 e 136,47 keV possuem uma taxa de absorção muito baixa no volume sensível do detector, a geração de fluorescência de raios-X da série K (Ag) não é significativa.

4.6 – Eficiência

A Tabela 14 mostra a eficiência de detecção dos fotodiodos para diversas energias da radiação incidente e a Figura 33 apresenta graficamente a dependência

da eficiência de fotopico com a energia da radiação. Os resultados mostram de modo geral que o fotodiodo XRA-50, que possui maior área, apresenta maior eficiência quando comparado aos demais fotodiodos.

Tabela 14: Eficiência de fotopico ($\times 10^{-4}$) dos fotodiodos em função da energia da radiação.

Energia (keV)	BPW-34	SFH-206	SFH-205	XRA-50
14,41	19,73	15,20	10,12	53,27
59,54	0,49	0,51	0,44	2,13
79,6 / 80,1	0,16	0,10	0,11	0,63
122,06	0,04	0,02	0,02	0,21

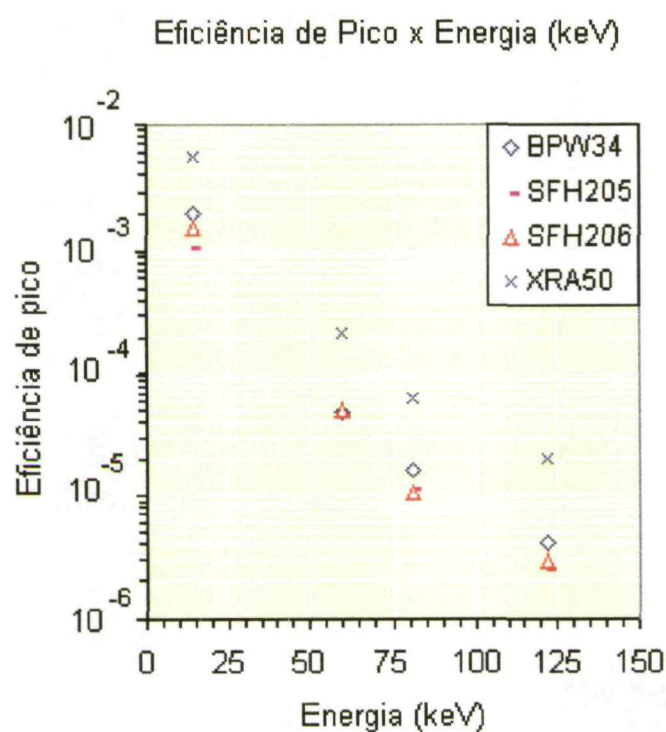


Figura 33: Eficiência de fotopico em função da energia da radiação para cada fotodiodo.

Pode-se observar também que, para todos os fotodiodos da Siemens, a eficiência obtida para a energia de 122,06 keV é de cerca de 0,2 % da eficiência obtida para a energia de 14,41 keV, enquanto que em relação ao fotodiodo da Detection Technology, é de aproximadamente 0,4 %. Isto mostra, portanto, não só uma forte dependência da eficiência de fotopico dos fotodiodos com a energia da radiação incidente, mas também que o fotodiodo XRA-50 possui uma menor variação da sua eficiência com a energia da radiação, quando comparado aos demais. A explicação para este fato é que este fotodiodo possui uma espessura de região de depleção, calculada pela eq. 4, de cerca de 176 μm , enquanto que os fotodiodos BPW-34, SFH-206 e SFH-205 possuem uma espessura de região de depleção de aproximadamente 74 μm , ficando portanto evidente que a probabilidade de absorção dos fótons de maior energia é maior para o fotodiodo XRA-50. Isto também explica o melhor desempenho do fotodiodo XRA-50 para as energias de 88,03 e 136,47 keV observado nos espectros das Figuras 30 e 31.

4.7 – Determinação do Espectro de Raios-X Característicos de Amostras de Ag e Pb Utilizando o Fotodiodo BPW-34

As Figuras 34, 35 e 36 mostram, respectivamente, os espectros de raios-X característicos de amostras de Ag, Pb e Ag+Pb medidos com o fotodiodo BPW-34. A partir destes resultados pode-se observar que o fotopico no espectro de Ag corresponde às energias da série K (Tabela 7), não sendo possível a separação das energias da série L pelo fato destas se encontrarem dentro da faixa de ruído do detector. O fotopico no espectro de Pb, por outro lado, corresponde às energias da série L. As energias da série M não foram separadas no espectro por estarem dentro da faixa de ruído do detector.

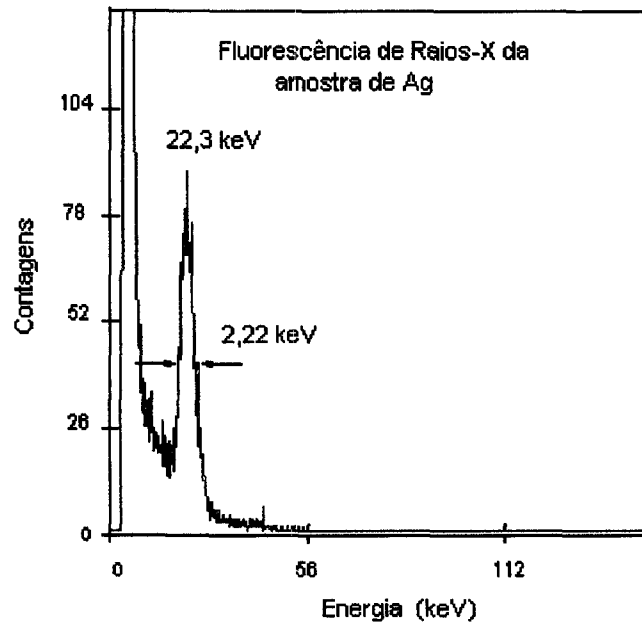


Figura 34: Fluorescência de Raios-X da amostra de Ag.

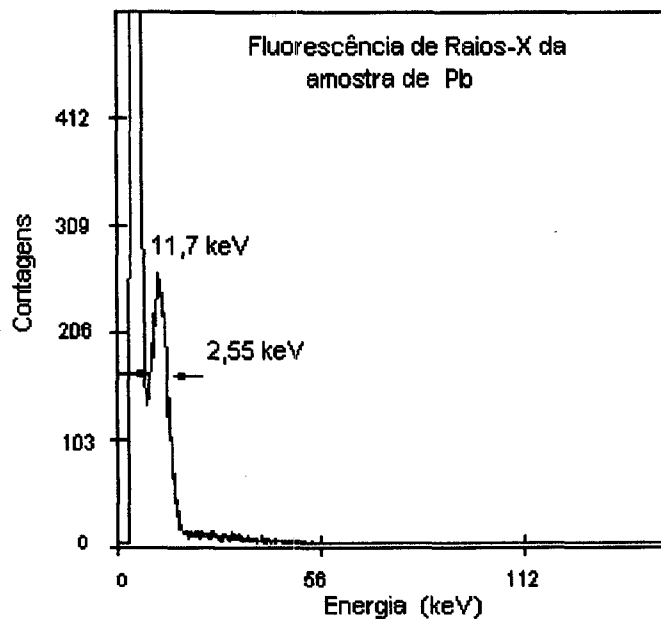


Figura 35: Fluorescência de raios-X da amostra de Pb.

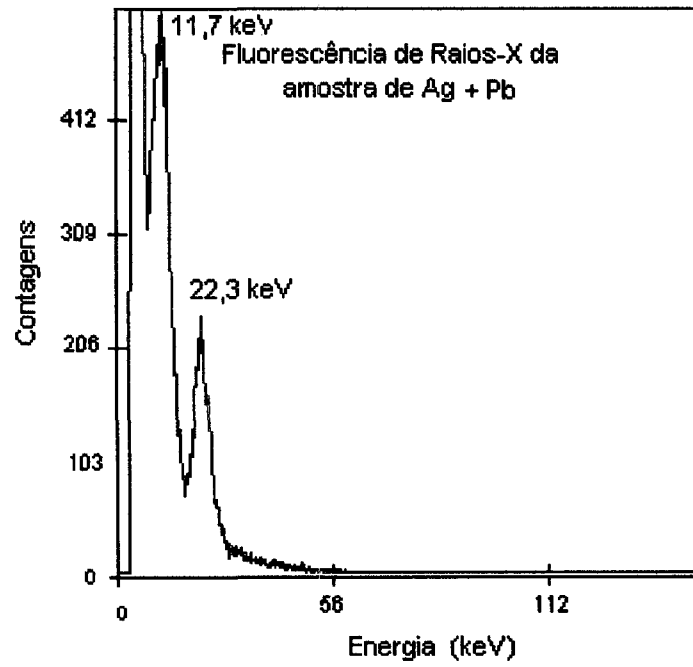


Figura 36: Fluorescência de raios-X da amostra de Ag + Pb.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que os fotodiodos analisados podem ser utilizados para espectrometria de raios X e γ de baixa energia com um desempenho, em termos de resolução, comparável ao dos detectores semicondutores tradicionais. As resoluções em energia encontradas variaram entre 2,2 e 4,8 keV, para energias entre 10 e 140 keV. Esta resolução é comparável à obtida com detectores de barreira de superfície, podendo ainda ser diminuída pela utilização de um pré-amplificador de menor ruído ou pelo resfriamento do detector e do FET de entrada do pré-amplificador. A separação dos fotopicos correspondentes às energias dos raios-X característicos de Ag e Pb indica que fotodiodos são uma alternativa de baixo custo para medidas de fluorescência de raios-X em substituição aos detectores tradicionais que são utilizados nestas medidas. Contudo, a probabilidade da ocorrência de produção de fluorescência de raios-X nos contatos metálicos dos fotodiodos exige certos cuidados na interpretação dos espectros determinados.

A eficiência de fotopico variou entre 0,0002 % e 0,53 %. Esta eficiência é baixa em decorrência das pequenas dimensões dos fotodiodos, uma vez que, quando

tomada por unidade de volume, pode ser comparada à eficiência obtida com um detector de Ge(Li)⁽²³⁾.

Com base nos resultados obtidos sugere-se a continuidade dos trabalhos com o desenvolvimento de um sistema portátil de espectrometria a ser utilizado em aplicações tais como no estudo da fluorescência de raios-X de materiais tanto na Geologia como em processos industriais e na avaliação de campos de radiação espalhada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Walter, F. J.; Dabbs, J. W. T.; Roberts, L. D. *Atomic Energy Commission, Document ORNL Rept. Cf 58-11-99*, 1958.
- [2] Price, W. J., *Nuclear Radiation Detection*. 2. Ed., New York, 1964, 214, 254.
- [3] Drexler, G. and Perzl, F. *Spectrometry of Low-Energy γ - and X-Rays with Ge(Li) Detectors*. Nucl. Instrum. Meth. (48): 332-334, 1967.
- [4] Pani, R. and Laitano, R. F. *Diagnostic X-Rays Spectra Measurements Using a Silicon Surface Barrier Detector*. Phys. Med. Biol. **32** (9): 1135-1149, 1987.
- [5] Melo, F. A. *Desenvolvimento de um Dosímetro para Radiação Gama Utilizando Fotodiodo*, 1988. (Mestrado, DEN – UFPE).
- [6] Amaral, A. J. *Estudo da Resposta de Fotodiodos Comerciais para Dosimetria Beta*, 1993. (Mestrado, DEN – UFPE).

- [7] Nowotny, R. and Reiter, W. L. *The Use of Silicon PIN-Photodiodes as a Low Energy Photo Spectrometer*, Nucl. Instrum. Meth. (147): 477-480, 1977.
- [8] Nowotny, R. and Reiter, W. L. *A Comparison of Commercial PIN Photodiodes for X-Ray Spectrometry*, Nucl. Instrum. Meth. (153): 597-598, 1978.
- [9] Terini, R. A.; Costa, P. R.; Furquim, T. A. C.; Herdade, S. B. *Measurements of Discret and Continuous X-Ray Spectra at Room Temperature*, Applied Radiation and Isotopes (50): 343-353, 1999.
- [10] Aoki, K. and Koyama, M. *Measurement of Diagnostic X-Ray Spectra Using a Silicon Photodiode*, Med. Phys. **16** (4): 529-536, 1989.
- [11] Bueno, C. C.; Santos, M. D.; Gonçalves, J. C. e Magalhães, R. R. *The Performance of Low-cost Commercial Photodiodes for Charged Particle and X-Ray*, Nucl. Instrum. Meth. A (371): 460-464, 1996.
- [12] Bueno, Carmen C.; Santos, M. Damy; Gonçalves, Josemary C. e Magalhães, R. R. *Uso de Fotodiodos de Si na Detecção de Raios-X*, Anais do II Congresso Brasileiro de Físicos em Medicina, S. Paulo, 1987, 82-85.
- [13] Eisen, Y.; Olsher, R. H.; Littlejohn, G. J.; Brake, R. J.; Meddles, A. *A Portable X-Ray Spectrometer / Dosimeter Based on a Silicon Diode*. Radiat. Prot. Dosim. **32**: 105 – 112, 1990.
- [14] Markevich, N.; Gertner, I.; Felsteiner, J. *Low Energy X-Ray and γ Spectroscopy Using Silicon PIN Photodiodes*, Nucl. Instrum. Meth. A (269): 219-221, 1988.
- [15] Terini, R. A.; Tavolaro, C. R. C. e Herdade, S. B. *Detecção de Fótons e Elétrons com Fotodiodos PIN, Isolados ou Acolplados a Cintiladores na Região keV de Energia*, III ENAN, 7-11 de Agosto de 1995, Águas De Lindóia, S. Paulo, Vol. II, 643-648.
- [16] Gramsch, E.; Lynn, K. G.; Weber, M.; Dechillo, B.; Mc Williams, J. R. *Silicon PIN Photodetectors in High Resolution Nuclear Spectroscopy*, Nucl. Instrum. Meth. A (311): 529-538, 1992.

- [17] Yamamoto, H.; Hatakeyama, S.; Norimura, T.; Tsinchiya, T. *Low Energy Nuclear Radiation Detection with a Silicon Photodiode*, Nucl. Instrum. Meth. A (281): 128-132, 1989.
- [18] Khoury, H. J.; Melo, F. de A.; Lira, C. A. B. de O. *Utilização de Fotodiodos como Detectores de Radiação Ionizante*. Anais do Congresso Geral de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, 1986, ABEN, 1986, 66-69.
- [19] Andonovic, I., *Principles of Modern Optical Systems*, Artech House, 1989, 125.
- [20] Tanarro, S. A. *Instrumentación Nuclear*. Servicio de Publicaciones de la Junta de Energia Nuclear, Madrid, 1970, 223.
- [21] Millman, *Eletrônica: Dispositivos e Circuitos*. 2. Ed. São Paulo, 1981, 61, 63.
- [22] Malley, J. *Análise de Circuitos*. 2. Ed., Mc Graw Hill, 1983, 113.
- [23] Knoll, G. F. *Radiation Detection and Measurement*, 2. Ed. New York, 1989, 323, 410, 435, 445, 456.
- [24] Castoldi, A. and Fiorini, C. *Silicon Devices for Low-Energy X-Ray Detection: Comparison Between the Charge-Coupled Device and the Semiconductor Drift Chamber*, Nucl. Instrum. Meth. A (397): 332-342, 1997.
- [25] Wittenburg, K. *Radiation Damage in PIN-Photodiodes*. Nucl. Instrum. Meth. A (270): 56-61, 1988.
- [26] Siemens, Silicon Photodetectors, 1986.
- [27] Detection Technology, X-Ray Diode Series.

- [28] Ferreira Filho, A. L. *Estudo da Resposta de Fotodiodos Comerciais para a Espectrometria Alfa*, 1998. (Mestrado, DEN – UFPE).
- [29] Robinson, J. W. *Handbook of Spectroscopy*. 2. Ed. , 1979, Vol. 1,11.
- [30] Sparkes, J. J. *Semiconductor Devices*. 2. Ed., 1994, 49.

ANEXO I

1.1 – Física dos semicondutores (conceitos fundamentais)

As propriedades elétricas dos semicondutores são determinadas pelo nível de energia ou estrutura de bandas do material e como essas bandas são ocupadas pelos elétrons.

Um semicondutor puro (*intrínseco*) é um cristal sem defeitos, isto é, sem impurezas, que apresenta uma estrutura de níveis de energia que consiste de uma banda de valência (correspondente aos elétrons presos à rede cristalina) e uma banda de condução (correspondente a elétrons livres), separadas por uma faixa intermediária de energia, chamada de banda proibida, na qual não é permitida a presença de elétrons (Figura 37). A banda proibida tem uma espessura em torno de 1 eV, dependendo do tipo do semicondutor e da temperatura.

A zero absoluto a banda de valência está completamente cheia de elétrons e a banda de condução está vazia. Nesta situação, não há condução. A temperaturas mais elevadas, os átomos na estrutura cristalina apresentam uma certa energia térmica, de modo que um elétron pode ter, ocasionalmente, energia suficiente para quebrar uma ligação e escapar do átomo original deslocando-se, através de estados intermediários de energia, da banda de valência para a banda de condução e

deixando em seu lugar um “buraco” ou lacuna. Este fenômeno é conhecido como geração térmica de pares elétrons-lacunas. Os elétrons gerados podem se recombinar com as lacunas, tal que um equilíbrio é estabelecido, tornando a concentração de lacunas igual à concentração de elétrons.

Estrutura de bandas de energia em semicondutor puro (intrínseco)

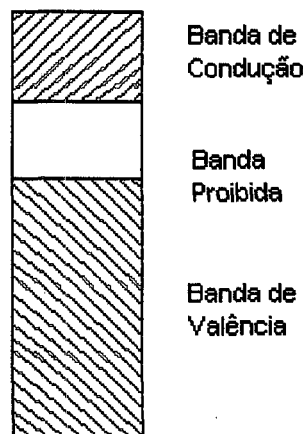


Figura 37: Estrutura de bandas de energia em um semicondutor puro, ou seja, intrínseco⁽³⁰⁾.

A condutividade de um semicondutor pode ser aumentada pelo aumento do número de portadores de cargas, isto é elétrons na banda de condução e lacunas na banda de valência. Isto pode ser obtido facilmente pela substituição de átomos da rede cristalina por átomos de impurezas selecionadas num processo conhecido como dopagem. O semicondutor dopado é, então, denominado *extrínseco*.

O efeito das impurezas em semicondutores pode ser evidenciado pela análise do semicondutor de silício. Silício é um elemento do Grupo IV, e como tal, possui quatro elétrons de valência; cada qual, na rede cristalina, participa com uma ligação covalente, formando um par com o elétron de um átomo adjacente.

Quando o silício é dopado com um elemento do Grupo V (tal como, fósforo, arsênio ou antimônio), os quais possuem cinco elétrons na camada de valência,

quatro elétrons são usados para a ligação covalente, e o quinto fica fracamente ligado (Figura 38-a), introduzindo um nível discreto de energia abaixo da banda de condução, conforme Figura 38-b. Como cada nível discreto pode facilmente doar seus elétrons para a banda de condução por excitação térmica, essas impurezas são chamadas de *doadoras* e tais materiais são assim chamados do Tipo-N (pois os portadores em maioria são elétrons).

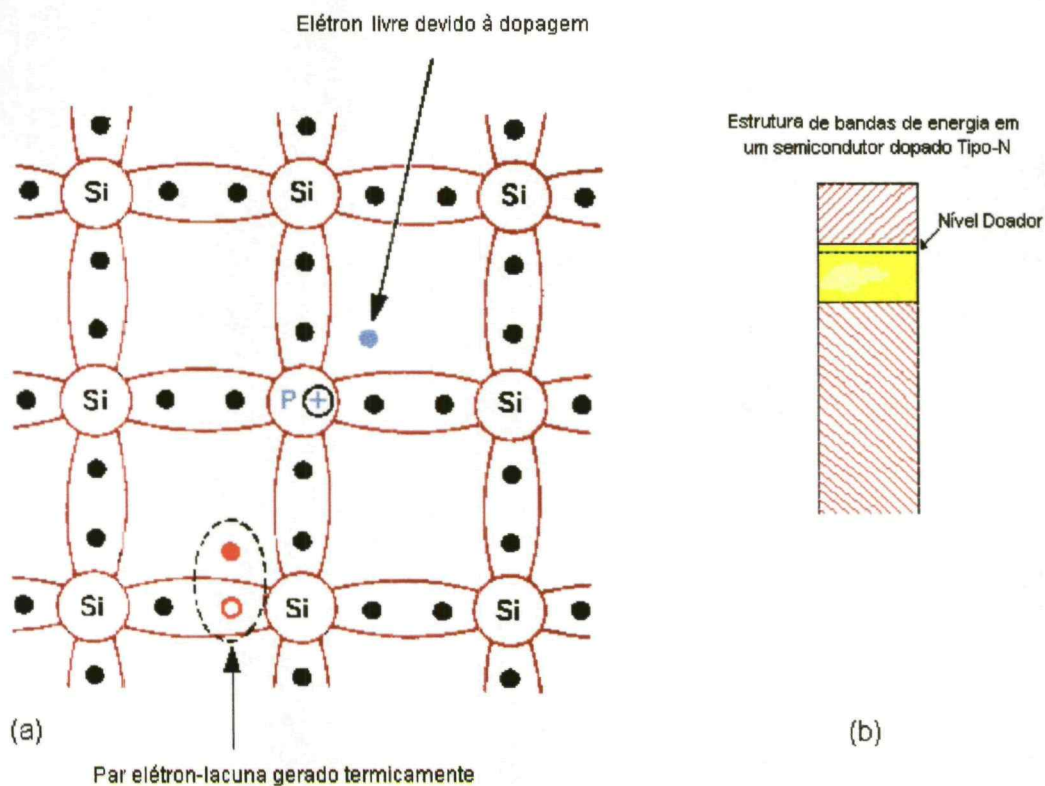


Figura 38: (a) Elétrons livres produzidos pela dopagem do Si com átomos de P; (b) Estrutura de bandas de energia em um semicondutor dopado Tipo-N⁽³⁰⁾.

A condução pode também ser aumentada pela dopagem do silício com elementos do Grupo III (tais como alumínio, boro ou índio), os quais têm apenas três elétrons de valência, todos participando em ligações covalentes. Para cada impureza adicionada, haverá uma ligação não completada em um átomo do material, conforme mostrado na Figura 39-a. Isto produz um nível de energia não ocupado acima da banda de valência (Figura 39-b). Tais níveis podem prontamente aceitar elétrons da banda de valência, razão pela qual essas impurezas são chamadas de aceitadoras, sendo o material denominado do Tipo-P (pois os portadores em maioria são lacunas).

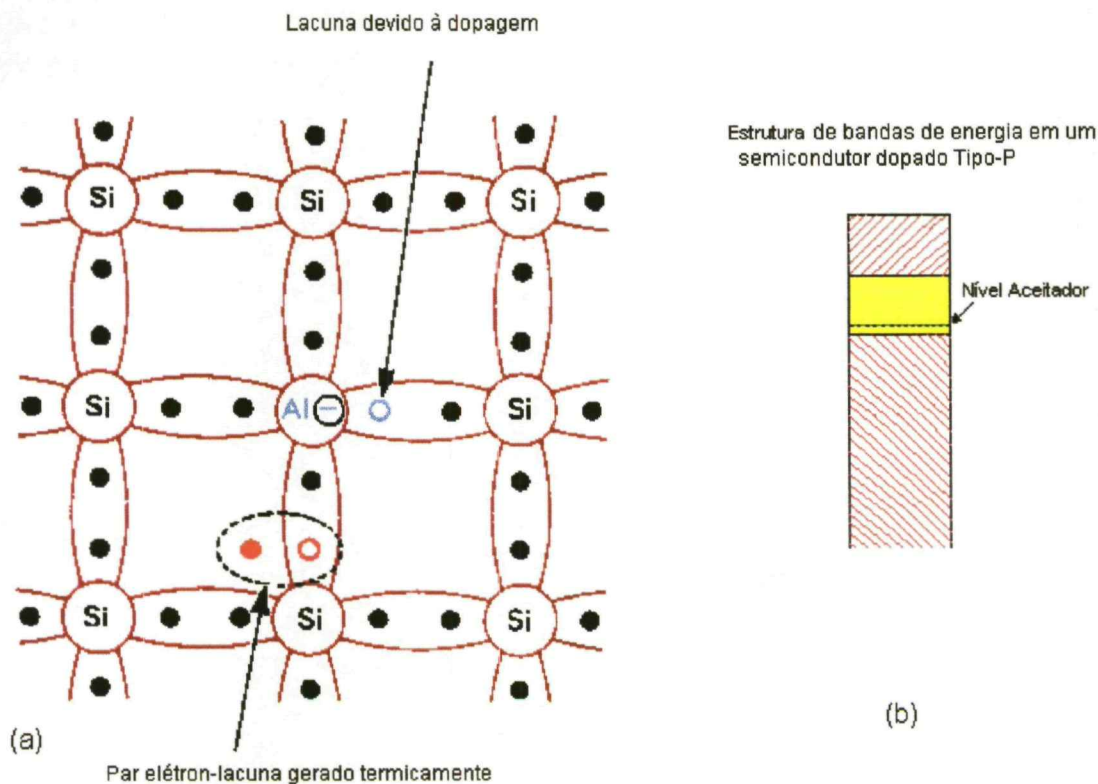


Figura 39: (a) Lacunas produzidas pela dopagem do Si com átomos de Al (a); (b) Estrutura de bandas de energia em um semicondutor dopado Tipo-P⁽³⁰⁾.

Quando um cristal é tratado de modo a ter uma região formada por um material Tipo-P e uma região adjacente formada por um material Tipo-N, então a interface entre essas regiões é chamada de junção-PN. Tão logo a junção é formada, as lacunas (cargas majoritárias no material Tipo-P) se difundem para o material Tipo-N, enquanto os elétrons (cargas majoritárias no material Tipo-N) se difundem no sentido contrário. Inicialmente, ambos os tipos de materiais são eletricamente neutros, mas como a região-P perde lacunas e ganha elétrons, ela adquire uma carga negativa. Similarmente, a região-N perde elétrons e ganha lacunas, adquirindo uma carga positiva. Quando suficientes portadores têm atravessado a junção, a carga negativa da região-P evita que mais elétrons a atravessem, enquanto a carga positiva da região-N faz o mesmo com as lacunas. Sendo assim, é formada uma região de carga espacial que cria uma barreira de potencial interna através da junção, cuja intensidade é da ordem de 0,7 V, no caso do silício. Portanto, é criada uma camada em torno da junção, onde há poucos portadores de carga livres. Tal camada recebe o nome de camada de depleção ou região de depleção (Figura 40). Ela forma, efetivamente, uma região isolante entre as duas regiões condutoras P e N, como se fosse um capacitor de placas paralelas.

Quando uma fonte de tensão externa é conectada a uma junção-PN de modo que o terminal positivo seja ligado à região-N, como mostrado na Figura 41-a, a junção fica polarizada reversamente, e a tensão externa é acrescentada à barreira de potencial, ou seja, a camada de depleção é alargada. Embora os portadores minoritários (elétrons no lado P, e lacunas no lado N) sejam capazes de atravessar a junção mais facilmente, o pequeno número desses portadores produz apenas um pequeno aumento da corrente de saturação reversa que flui através da junção. Com o aumento da tensão reversa aplicada a junção, há um pequeno aumento da corrente reversa até que ocorra o rompimento do isolamento (*breakdown*), fluindo uma corrente elevada e, portanto, possivelmente destruidora.

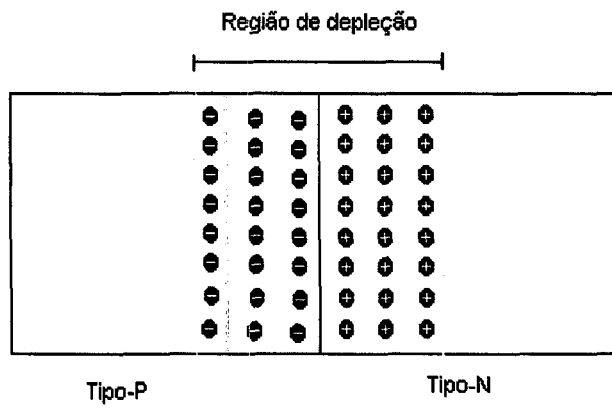


Figura 40: Esquema de uma junção-PN.

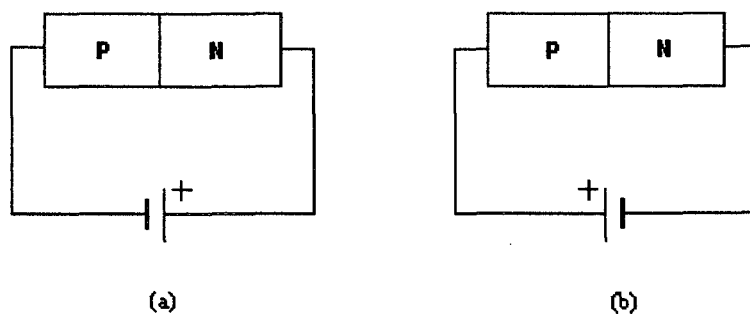


Figura 41: Polarização da junção-PN: (a) Polarização reversa; (b) Polarização direta.

Caso a fonte de tensão externa seja conectada de modo que o terminal positivo seja ligado à região-P (Figura 41-b), a junção fica polarizada diretamente, e a tensão externa opõe-se à barreira de potencial. Se a tensão externa for maior do que a barreira de potencial, fluirá através da junção uma corrente de portadores majoritários que aumenta significativamente com pequenos acréscimos de tensão.

O fluxo assimétrico de corrente através de uma junção-PN é mostrado pela curva característica Tensão x Corrente da Figura 42. O dispositivo com estas características é conhecido como diodo semiconductor, cujo símbolo é apresentado na Figura 43, onde o anodo e o catodo correspondem aos lados P e N da junção-PN, respectivamente.

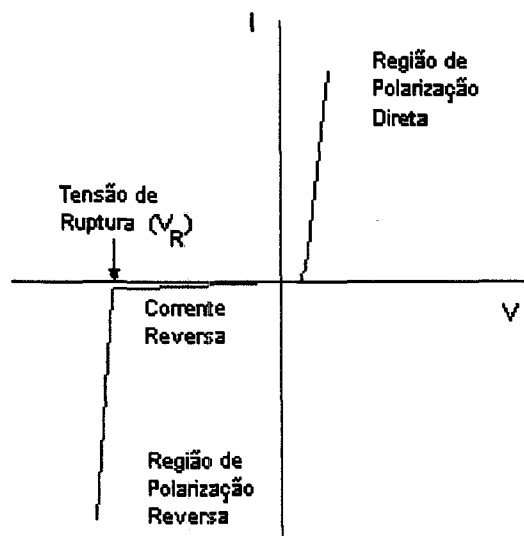


Figura 42: Característica Tensão x Corrente de um diodo de junção-PN;

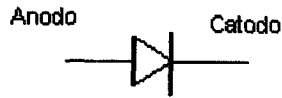


Figura 43: Simbologia do diodo semicondutor.

Quando um diodo é produzido especialmente para a detecção de luz (neste caso, a região de depleção não apresenta nenhuma camada protetora), ele é denominado de fotodiodo. Os fotodiodos de estrutura tipo PIN funcionam da mesma forma que os diodos sendo que utilizam como volume sensível à radiação uma região intermediária “I” quase não dopada (região intrínseca entre as regiões P e N, que neste caso são denominadas de P^+ e N^+), conforme mostrado na Figura 44. Vale ressaltar que esses dispositivos são fixados em um contato metálico cujo tipo de material utilizado depende de cada fabricante do fotodiodo.

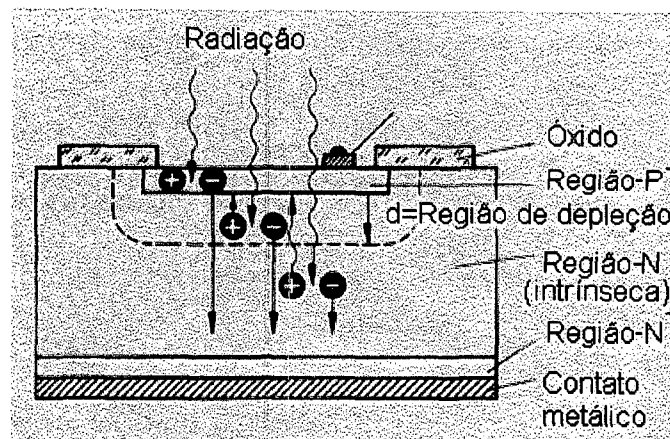
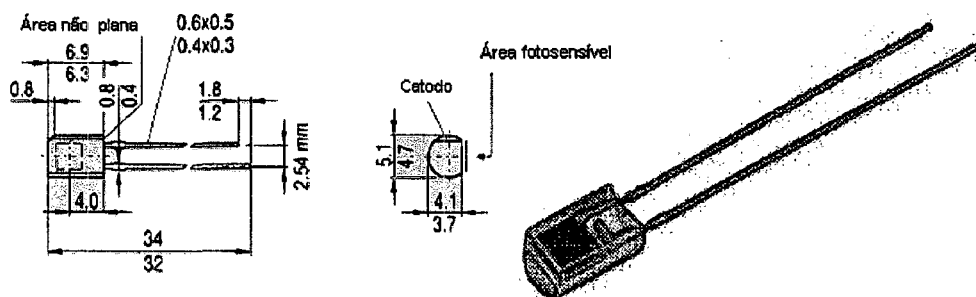


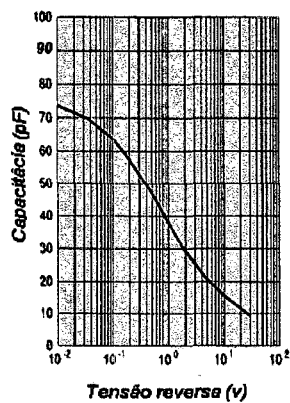
Figura 44: Esquema de um fotodiodo tipo PIN.

ANEXO II



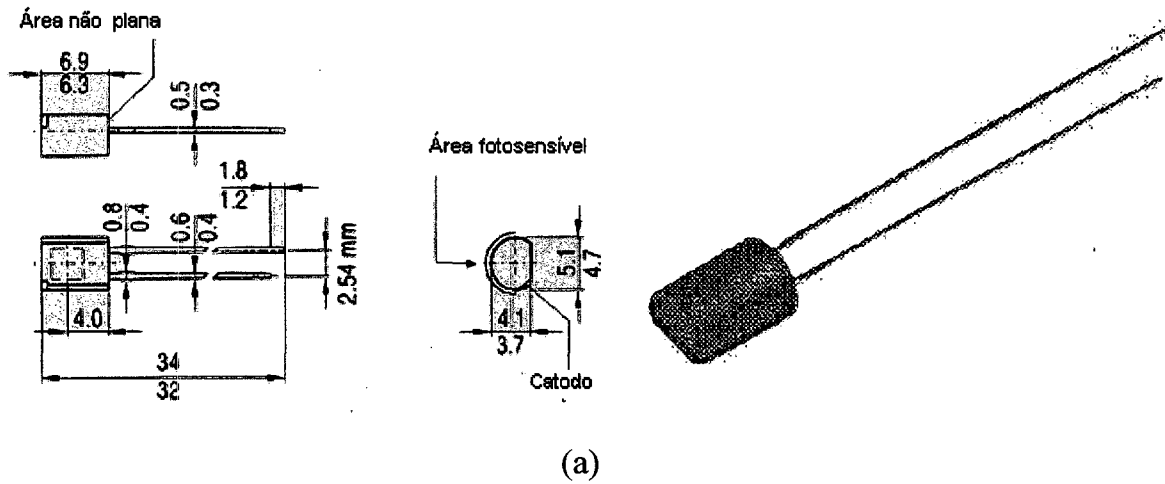
(a)

Capacitância x Tensão reverse (v)

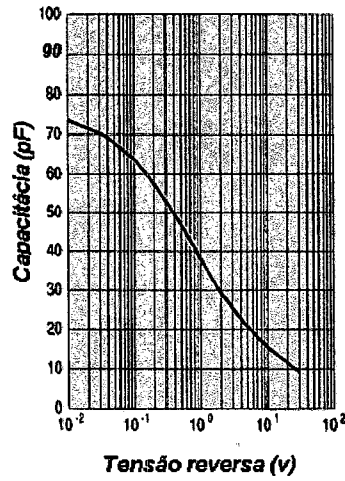


(b)

Figura 45: Fotodiodo SFH-206: (a) Esquema com as dimensões e tipo de encapsulamento; (b) Dependência da capacitância em função da tensão reverse⁽²⁶⁾.

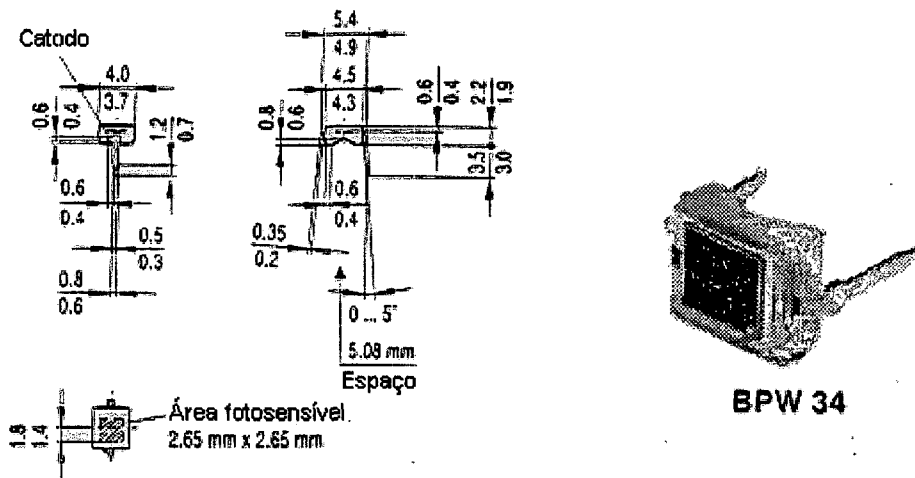


Capacitância x Tensão reversa (v)



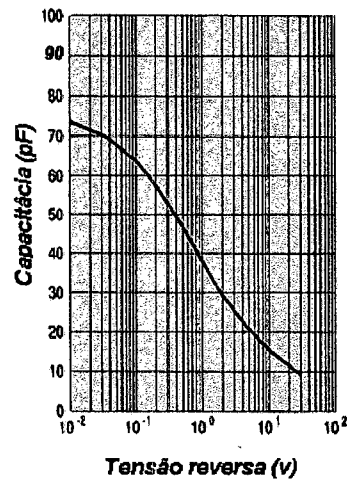
(b)

Figura 46: Fotodiodo SFH-205: (a) Esquema com as dimensões e tipo de encapsulamento; (b) Dependência da capacitância em função da tensão reversa⁽²⁶⁾.



(a)

Capacitância x Tensão reversa (v)



(b)

Figura 47: Fotodiodo BPW-34: (a) Esquema com as dimensões e tipo de encapsulamento; (b) Dependência da capacitância em função da tensão reversa⁽²⁶⁾.

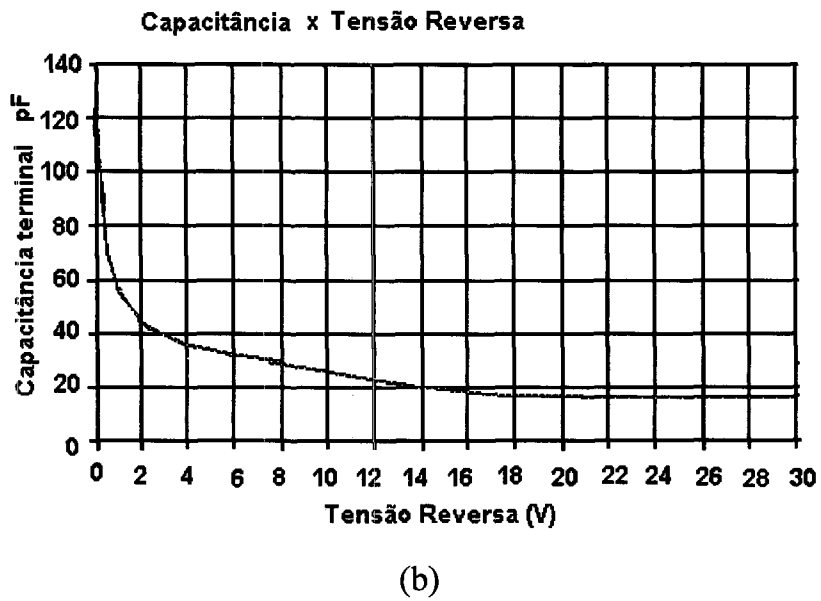
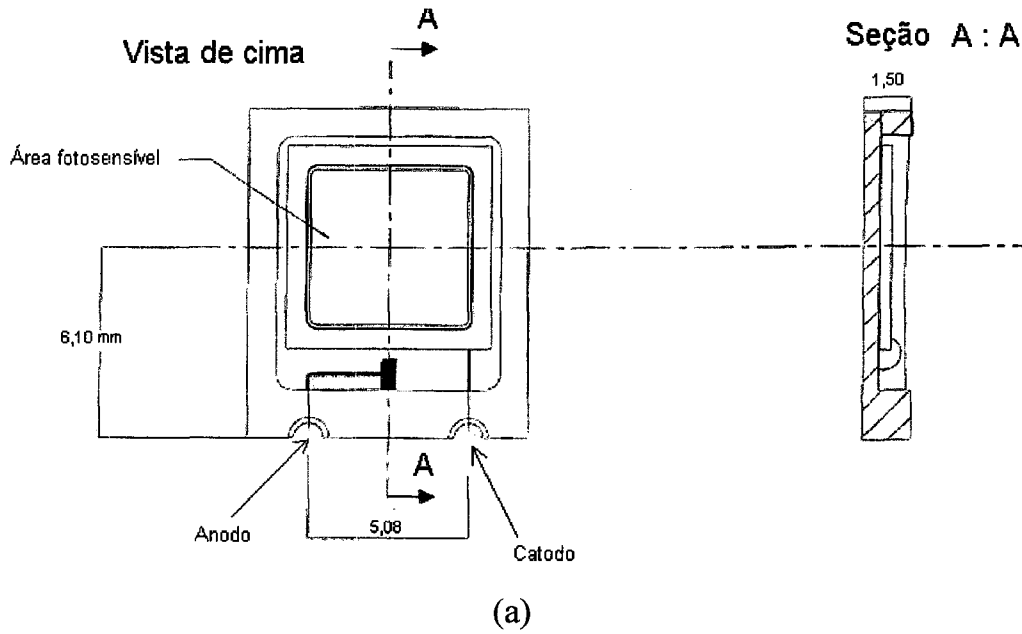


Figura 48: Fotodiodo XRA-50: (a) Esquema com as dimensões e tipo de encapsulamento; (b) Dependência da capacitância em função da tensão reversa⁽²⁷⁾.