

Diodos P-I-N de Silício Amorfo Hidrogenado Aplicados à Detecção de Radiação

*Pedro Paulo Levi Mateus Canazio**
*Herval Ramos Paes Junior***
*Antônio Carneiro de Mesquita Filho****
*Zieli Dutra Thomé Filho*****

INTRODUÇÃO

As técnicas nucleares têm sido de grande valia na área médica para diagnósticos e terapias. Na área de diagnósticos, a grande maioria das técnicas empregadas visa à obtenção de uma imagem construída direta ou indiretamente através da detecção de radiação gama. Neste tipo de aplicação os detectores baseados em semicondutores têm merecido atenção cada vez maior.^{1,2}

* Capitão QEM, possui os cursos de graduação em Engenharia Eletrônica e Formação de Oficiais Engenheiros Militares e mestrado em Engenharia Nuclear em 1992 (pelo IME).

** Doutor, possui os cursos de graduação em Engenharia Eletrônica, mestrado em Engenharia Elétrica e doutorado em Engenharia Metalúrgica.

*** Professor, possui os cursos de graduação em Engenharia Eletrônica, mestrado em Engenharia Elétrica e Docteur D'Etat.

**** Professor titular do Programa de Engenharia Nuclear.

Os detectores de radiação empregando tecnologia de semicondutores, normalmente, são diodos com diversos tipos de estruturas. Estes dispositivos podem detectar radiação de forma direta ou indireta.^{1,3} Na detecção direta, a radiação incidente provoca ionização diretamente na estrutura do fotodiodo gerando uma fotocorrente I_{ph} , proporcional ao número de pares elétron-lacuna gerados. Para ter alguma eficiência, este tipo de detector precisa ser bastante espesso devido ao baixo número atômico do silício. Na detecção indireta, a radiação incide sobre um material cintilador que irá gerar luz, ou sobre um material conversor, normalmente de alto número atômico, que irá produzir partículas secundárias (elétrons, principalmente), que irão sensibilizar o fotodiodo.

O presente trabalho tem como objetivo discutir as propriedades de diodos detectores baseados na tecnologia do silício amorfo hidrogenado (a-Si:H), visando principalmente aplicações na área médica e/ou na área de ensaios não destrutivos.

MODOS DE OPERAÇÃO DE DETECTORES

Os sistemas que empregam detectores eletrônicos, normalmente operam em modo pulsado, acumulando contagens ou carga. Esta acumulação é feita durante um certo intervalo de tempo, que deve assegurar uma boa estatística, no caso de contagens, ou uma boa relação sinal/ruído no caso da carga.^{1,4} Este tempo dependerá da intensidade do feixe de radiação incidente e do tipo de corpo a ser examinado. Isto posto, fica evidente que, para reduzir a dose de radiação a que um paciente é submetido, reduzindo a intensidade do feixe de radiação e/ou o tempo de exposição, mantendo-se a qualidade da imagem, torna-se necessário o uso de detectores mais eficientes e/ou de menor ruído intrínseco.

Quando operando em modo corrente, um detector não fornece informações de energia ou de ocorrência temporal de eventos nucleares e sim uma média (ao longo do tempo) da taxa de ocorrência ou da energia destes eventos.

Em sistemas de tomografia computadorizada a informação de maior interesse é a intensidade do feixe transmitido através do corpo sob análise. Assim, a operação em modo corrente destes detectores é uma alternativa viável, pois a corrente resultante, pode ser medida quase que instantaneamente. Esta corrente é diretamente proporcional à taxa de ocorrência de eventos e depende do coeficiente de atenuação linear, μ , do meio percorrido pelo feixe. O ganho de tempo obtido, por si só, já é interessante para o caso de ensaios não destrutivos, nos quais a dose de radiação absorvida pela amostra tem importância secundária e o tempo é um fator economicamente importante.

O DETECTOR DE a-Si:H

O detector proposto neste trabalho é constituído por um fotodiodo em a-Si:H acoplado a um

cintilador como é mostrado na figura 1. Como cintilador foi usado um cristal de iodeto de cério dopado com tálio CsI(Tl) de 3,0 x 30,0 x 20,0 mm. Este material foi escolhido porque seu espectro de luz emitida apresenta o ponto de máximo coincidente com o pico da eficiência quântica do fotodiodo de a-Si:H.

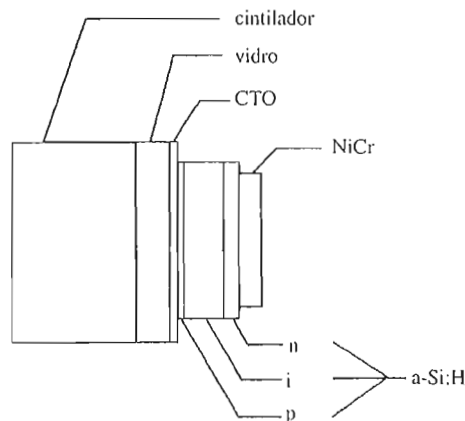


FIGURA 1: Estrutura do detector

O fotodiodo é uma estrutura do tipo p-i-n de a-Si:H depositada em forma de filme fino sobre um substrato de vidro recoberto por uma camada de óxido condutor transparente CTO (óxido de índio-estanho — ITO, ou dióxido de estanho — SnO_2). As camadas **p**, **i** e **n** são obtidas através do processo de deposição de vapor químico enriquecido por plasma (PECVD). Para a deposição da camada **p** é usada a decomposição dos gases silano (SiH_4) + diborano (B_2H_6). A camada intrínseca (**i**) é formada pela decomposição do gás silano puro e, finalmente, a decomposição da mistura silano + fosfina (PH_3) é usada na deposição da camada **n**.⁵ Os fotodiodos foram produzidos no reator de PECVD do Laboratório de Estudos de Materiais e Interfaces (LEMI) do PEMM/COPPE/UFRJ. O contato metálico da camada **n** foi obtido por evaporação por feixe de elétrons de uma liga de níquel-cromo (NiCr). Os fotodiodos produzidos têm área de 60 mm^2 e as espessuras de suas camadas são:

Camada **p** = 150 Å
 Camada **n** = 350 Å
 Camada **i** = 0,75 μm e 1,3 μm
 filme de NiCr = 2000 Å

Na sua maior dimensão o cintilador propicia uma contenção em torno de 68% de um feixe de radiação de 662 keV (de uma fonte isotópica de ^{137}Cs). O fotodiodo foi acoplado mecanicamente à face de 3,0 x 20,0 mm do cintilador.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O detector foi caracterizado com uma fonte isotópica de radiação gama de ^{241}Am , com energia principal dos fótons de 59 keV e com uma atividade de 100 mCi. Essa redução na energia do fóton acarreta um aumento da contenção do feixe incidente no cintilador para, praticamente, 100%. O objetivo dos testes é avaliar o funcionamento do detector em energias próximas às de uma tomografia médica. Em uma etapa posterior o detector será avaliado em um tomógrafo não médico, que emprega um feixe de 662 keV. Por outro lado a fonte utilizada, de ^{241}Am com 100 mCi de atividade, fornece intensidades de feixe no detector bem inferiores às encontradas em tomógrafos médicos, o que permite avaliar o detector em seu limite inferior de sensibilidade. Também foram estudados os efeitos da polarização reversa na resposta dos detectores a campos de radiação de baixa intensidade. O procedimento experimental consistiu, basicamente, na medição da fotocorrente gerada pelo detector com a fonte situada a distâncias variando de 10,0 a 120,0 cm. Para isto, o arranjo experimental foi montado em um banco ótico graduado no qual foram fixados os suportes para a fonte e o detector, sendo que este último possui uma caixa para bloqueio da luz ambiente. Além disso, as medidas foram realizadas em uma sala escura. A fotocorrente foi

medida com um eletrômetro *Keythley* modelo 617 (medida DC) e com um amplificador *lock-in Stanford* modelo SR-530 (medida AC). Os contatos com os eletrodos dos fotodiodos foram feitos com fios de ouro e cola de prata de alta condutividade. Foram ensaiadas amostras de fotodiodos de 1,3 μm de espessura da camada **i** com óxidos condutores transparentes de ITO e SnO_2 e de 0,75 μm em ITO para determinação da influência da espessura da camada intrínseca na fotocorrente. Foi ensaiado, também, um fotodiodo comercial de silício cristalino (c-Si) modelo S2551 fabricado pela Hamamatsu para comparação de desempenho e determinação da eficiência relativa do detector com fotodiodo de a-Si:H em relação a este. Todos os valores medidos para o fotodiodo de c-Si foram corrigidos para os valores correspondentes à área de 60 mm² dos fotodiodos de a-Si:H.

A calibração do banco ótico foi feita a partir dos dados fornecidos pelo fabricante da fonte radioativa (AMERSHAM Int., Mod. AMC.36). O número total de fótons **N**, incidentes no detector para cada valor da distância fonte-detector **d**, é apresentado na tabela 1. Estes valores levam em consideração a área sensível do detector de 6,0cm² (correspondente à face de 20,0 x 30,0 mm do cintilador).

d[cm]	N
10	17,67e6
20	4,41e6
30	1,96e6
40	1,10e6
50	706,62e3
60	490,68e3
70	360,48e3
80	276,00e3
90	218,10e3
100	176,64e3
110	145,98e3
120	122,64e3

TABELA 1: Equivalência entre distância fonte/detector e o número de fótons incidentes no detector.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Considerações Iniciais

Inicialmente, foram avaliados dois processos de medida da fotocorrente, o AC (síncrono) e o DC. Nas medidas DC efetuadas ao longo do trabalho, a fotocorrente é calculada da seguinte forma:

$$I_{ph} = I_m - I_d \quad (1)$$

onde

I_m = corrente total medida sob irradiação

I_{ph} = parcela de I_m correspondente à fotocorrente

I_d = parcela de I_m correspondente à corrente no escuro.

Em dispositivos de alto desempenho e sem polarização reversa as correntes no escuro I_d , são, em geral, muito menores que a corrente total medida I_m . Neste caso a expressão (1) pode ser simplificada para:

$$I_{ph} \approx I_m \quad (2)$$

Portanto, a fotocorrente passa a ser uma medida direta e não o resultado de um cálculo indireto.

O processo AC foi considerado porque permite a detecção de fotocorrentes de valores inferiores aos da corrente no escuro. Isto foi constatado em caracterizações óticas efetuadas anteriormente com fotodiodos de área pequena e com polarização reversa aplicada. Neste processo, a fotocorrente é obtida diretamente do amplificador *lock-in*. O valor fornecido pelo instrumento é o valor RMS da fotocorrente, dado por:

$$(I_{ph})_{AC} = I_{ph}/(2.\sqrt{2}) \quad (3)$$

onde

$(I_{ph})_{AC}$ = fotocorrente AC

I_{ph} = fotocorrente DC

Em fotodiodos sem polarização reversa, na presença de feixes de radiação de baixa intensidade, a fotocorrente é da mesma ordem da corrente no escuro. Este fato contribui para aumentar a incerteza da medida. Isto também ocorre na medida DC, porém de forma bem menos acentuada. Isto se deve ao fato do *chopper* reduzir o valor da fotocorrente para $I_{ph}/(2.\sqrt{2})$ degradando a relação sinal/ruído da medida. Deve ser notado que esta condição de medida está próxima do limiar de detecção do dispositivo (definido pelo seu ruído intrínseco). Por esta razão, foi adotado o processo de medida DC que, além de ser mais facilmente implementado, apresenta melhores resultados.

Caracterização dos Fotodiodos p-i-n em a-Si:H

Medidas sem Polarização

a) Dependência da Fotocorrente com a Distância Fonte/Detector

Na figura 2 é apresentada a dependência da fotocorrente em relação à distância fonte/detector para diodos p-i-n com espessura de camada intrínseca t_i igual a $1,3 \mu\text{m}$. Deve ser notado que o número de fótons incidentes no detector N varia com esta distância de acordo com a tabela 1. Como era esperado, observa-se que a fotocorrente decai com o inverso do quadrado da distância. Esta figura inclui curvas para diodos depositados sobre ITO e SnO_2 . Observa-se que as amostras depositadas sobre SnO_2 apresentam desempenho ligeiramente superior.

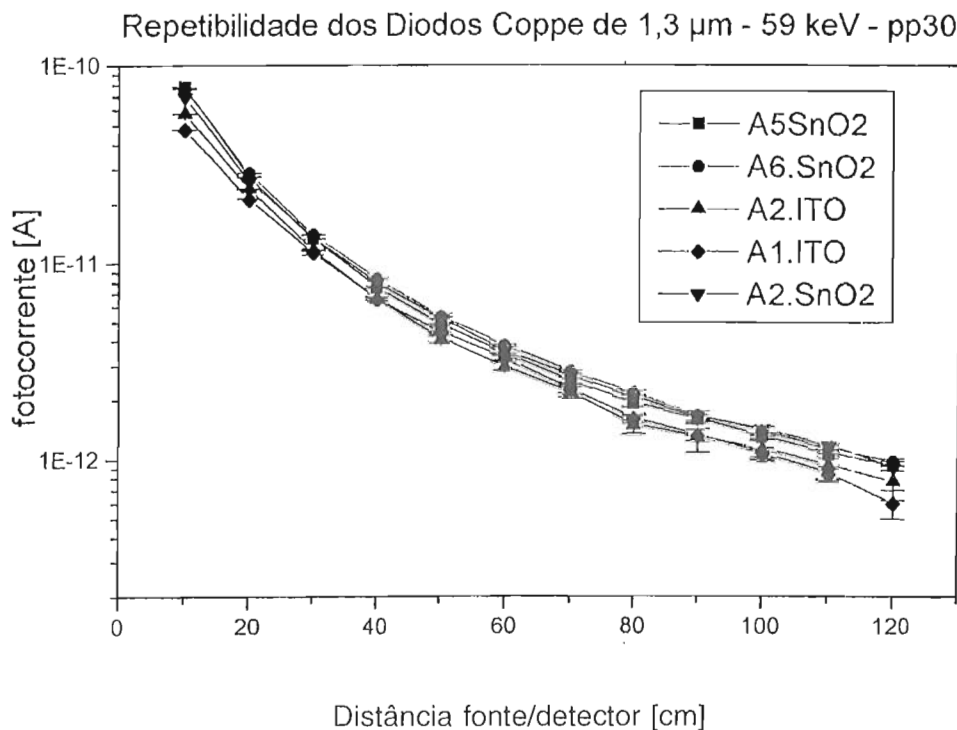


FIGURA 2: Fotocorrente x Distância fonte/detector para diodos com espessura $t_i = 1,3 \mu\text{m}$

É possível constatar a boa repetibilidade das amostras e a homogeneidade dos filmes depositados, comprovando a confiabilidade do processo de fabricação.

b) Influência da Espessura da Camada Intrínseca (t_i) na Fotocorrente

Na figura 3 é mostrada a influência da espessura t_i na curva da fotocorrente em função da distância fonte/detector para as espessuras $t_i = 0,75$ e $1,30 \mu\text{m}$.

Observa-se que o diodo de $1,3 \mu\text{m}$ apresenta maior eficiência de detecção que o diodo de $0,75 \mu\text{m}$. Isto não implica que a eficiência aumenta indefinidamente com a espessura da camada intrínseca. Efetivamente, é fato conhecido e relatado na literatura que para diodos com espessura

t_i maior que $1,5 \mu\text{m}$ ocorre uma redução na eficiência de coleta devido à depleção parcial da camada ativa do dispositivo, formando uma região quase neutra.

Efeitos da polarização reversa

Foi observado que os fotodiodos com área grande ($60,0 \text{ mm}^2$) apresentam ruptura com campos elétricos bastante inferiores àqueles suportados por diodos de a-Si:H com áreas menores ($\approx 1,0 \text{ mm}^2$). Nestes diodos o campo é da ordem de $4 \times 10^5 \text{ V/cm}$, o que significaria, por exemplo, algum limite de ruptura da ordem de 52 V em polarização reversa para diodos de $1,3 \mu\text{m}$ de espessura. No caso dos fotodiodos produzidos durante a execução deste trabalho, observou-se

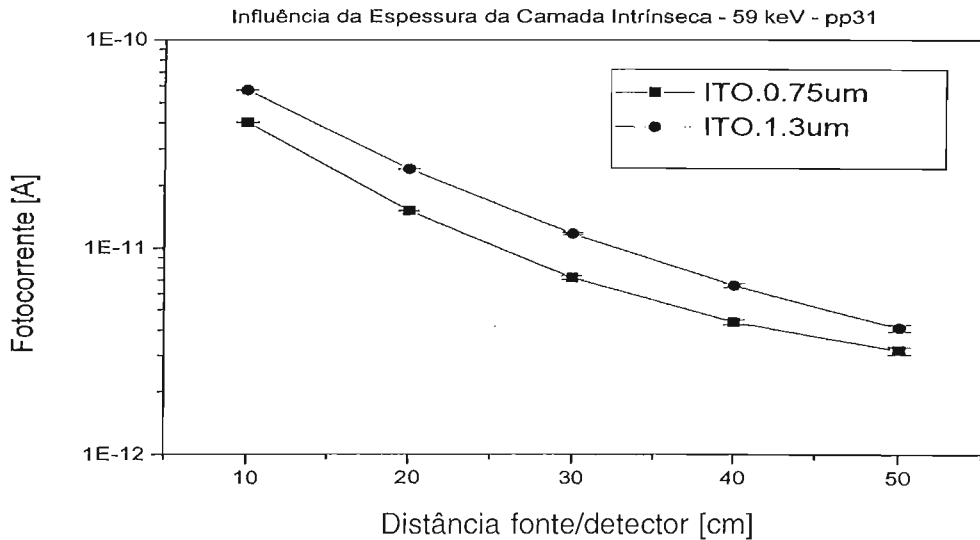


FIGURA 3: Influência da espessura da camada intrínseca sobre a fotocorrente

rupturas ocorrendo com tensões reversas da ordem de 3,3 V. Isto foi atribuído à maior probabilidade do diodo com área grande conter anomalias do tipo *pin-hole* não completamente formadas. Por isso, optou-se, por medida de precaução, não aplicar tensões reversas superiores a 0,5 V.

a) Dependência da Fotocorrente com a Distância Fonte/Detector e com Tensão Reversa Aplicada

Na figura 4 é apresentada esta dependência para um diodo com espessura $t_i = 1,3 \mu\text{m}$ polarizado reversamente com uma tensão de 0,5 V. Os valores medidos sem polarização foram incluídos para efeito de comparação. Nesta figura pode-se constatar que a dependência da fotocorrente com a distância não se altera significativamente em presença deste nível de polarização. Observa-se, porém, uma forte elevação no valor da corrente no escuro para tensões reversas não nulas. Deve ser notado que para as intensidades de radiação utilizadas, a magnitude da fotocorrente é inferior à da corrente no escuro. Para os níveis

de fotocorrente comparáveis à flutuação estatística da corrente no escuro ($\pm 1,16 \text{ pA}$), a incerteza associada (barras de erro) à fotocorrente aumenta muito.

Também foi estudada a variação da fotocorrente para uma distância fonte/detector fixa em função da tensão reversa aplicada. Para tensões reversas na faixa de 0,0 a 0,5 V não foi observada nenhuma variação significativa no valor da fotocorrente.

Caracterização do Fotodiodo p-i-n em c-Si

Medidas sem Polarização

Dependência da Fotocorrente com Distância Fonte/Detector

Na figura 5 é apresentada a dependência da fotocorrente em relação à distância fonte/detector para um diodo p-i-n comercial de c-Si. Nesta figura também está incluída uma curva típica para

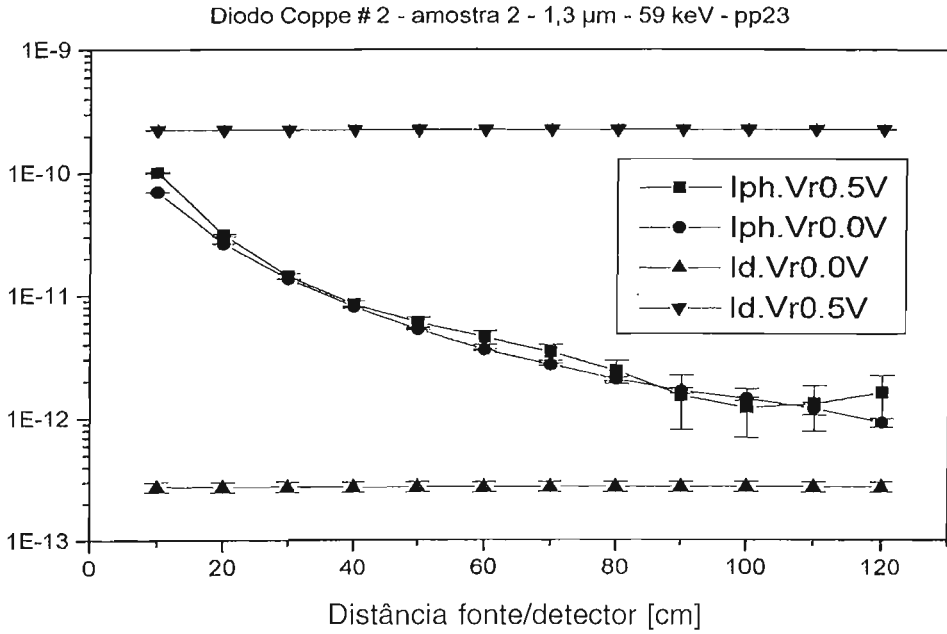


FIGURA 4: Efeito da polarização reversa sobre a dependência fotocorrente x distância

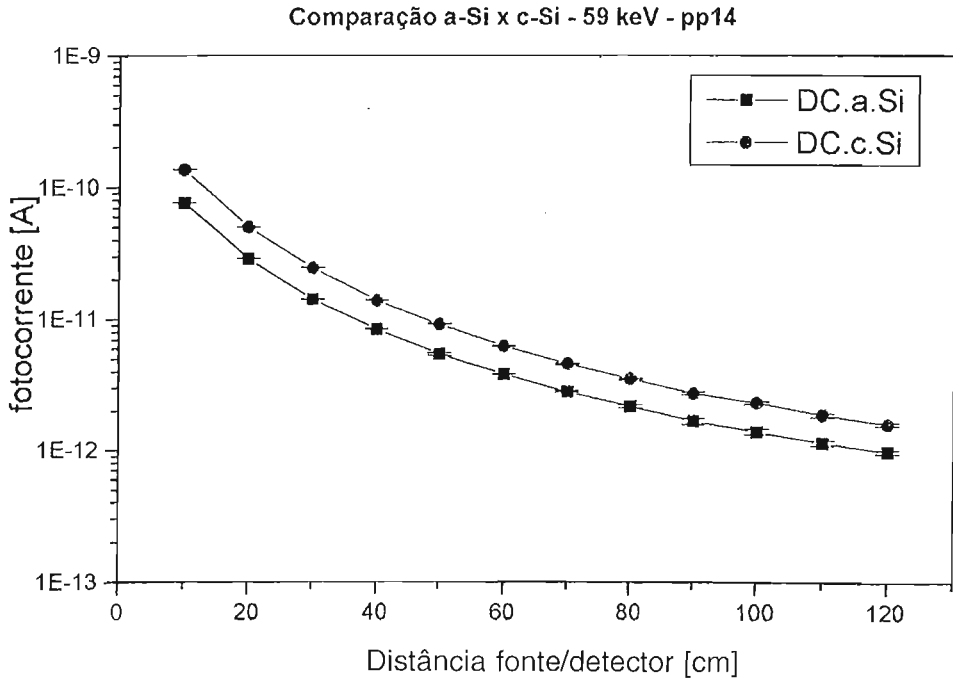


FIGURA 5: Dependência da Fotocorrente com Distância Fonte/Detector para um diodo de c-Si

um diodo de a-Si:H com espessura da t_i igual a $1,3 \mu\text{m}$. Nota-se uma dependência semelhante em ambos os dispositivos.

Definindo a eficiência relativa do detector de a-Si:H com relação ao detector de c-Si como sendo a razão entre as respectivas fotocorrentes, obtém-se um valor aproximadamente constante em torno de 60% ($59,9 \pm 1,9\%$) para todos os valores de fluxo utilizados.

Efeitos da Polarização Reversa

Dependência da Fotocorrente com a Distância Fonte/Detector com Polarização Reversa.

Os resultados obtidos para a fotocorrente com valores de tensão reversa de 0,0 , 0,5 e 1,0 V são apresentados na figura 6.

Observa-se um comportamento análogo aos diodos de a-Si:H, com o aumento acentuado

da corrente no escuro e da incerteza da fotocorrente com o aumento da tensão reversa.

Comparação entre os Detectores Empregando Diodos de a-Si:H e c-Si

Relação sinal/ruído

A relação sinal/ruído foi definida como a razão entre a fotocorrente e a corrente no escuro. Na figura 7 esta relação é apresentada em função da tensão reversa aplicada para uma distância fonte/detector fixa.

Observa-se que, para $V_r = 0,0\text{V}$ o c-Si tem relação sinal/ruído melhor que o a-Si:H; porém, para V_r diferente de 0,0 V a situação é inversa. Isto se deve ao menor valor da corrente no escuro para tensões reversas não nulas no caso do a-Si: H.

Fotocorrente em Função da Tensão Reversa - c-Si - 59 keV - pp19

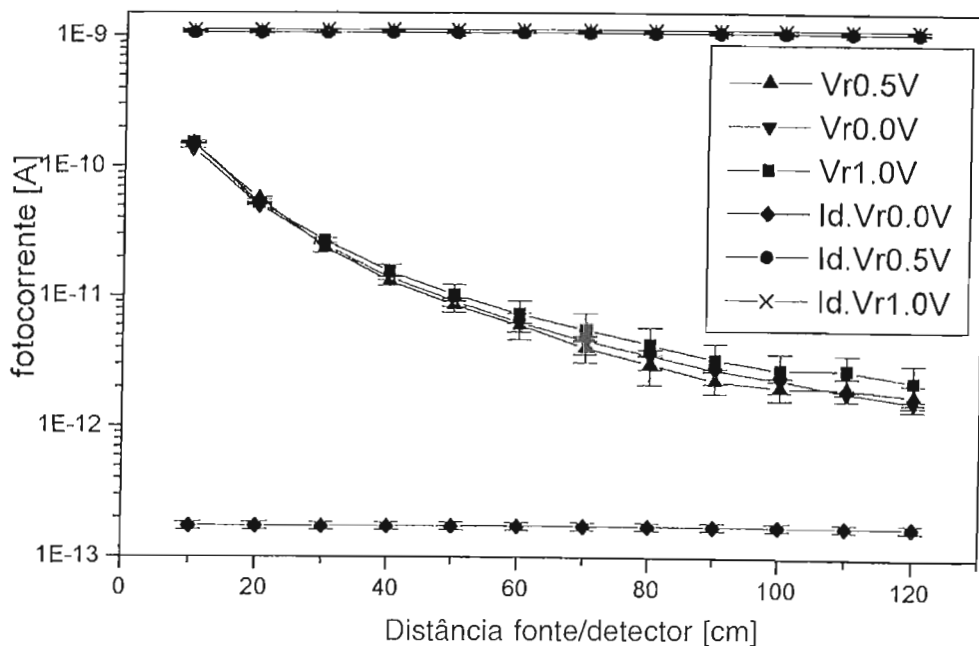


FIGURA 6: Efeitos da polarização reversa no diodo de c-Si

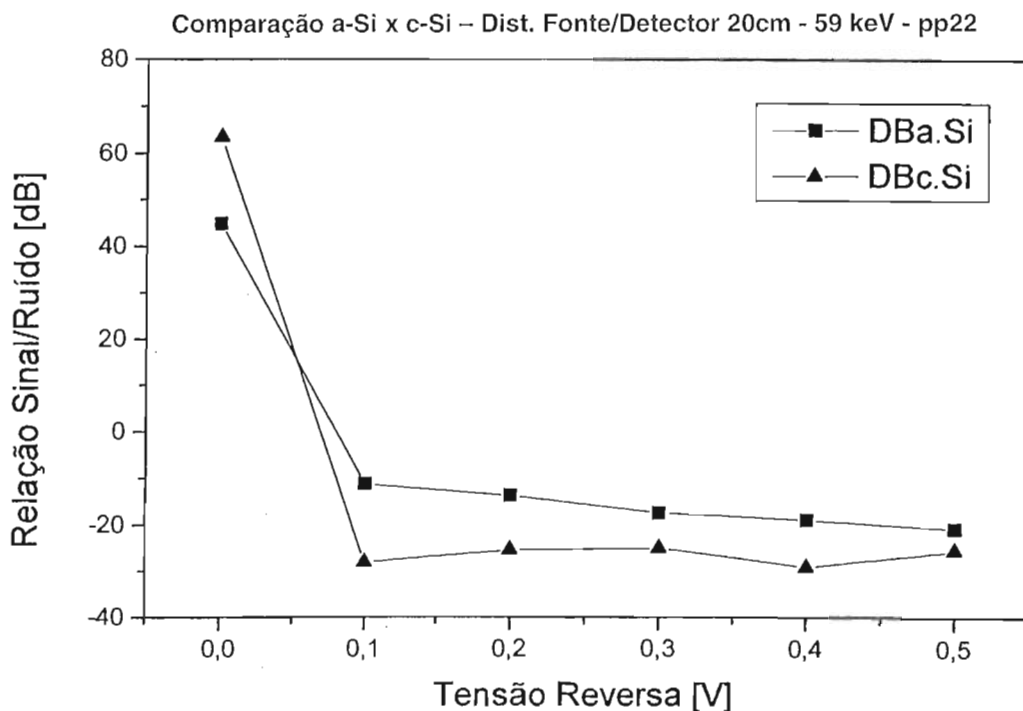


FIGURA 7: Relação Sinal/Ruído

Linearidade

A linearidade foi definida como sendo a relação entre a fotocorrente e o número de fótons incidentes no detector N . Esta relação é apresentada na figura 8 para os diodos de a-Si:H de $1,3 \mu\text{m}$ e c-Si.

Nota-se que as características de ambos os tipos detectores são iguais a menos da eficiência relativa.

CONCLUSÕES

O presente trabalho demonstra a viabilidade de serem inteiramente fabricados no Brasil os fotodiodos e o detector completo para aplicações nas áreas de medicina e ensaios não destrutivos.

Os dispositivos em a-Si:H fabricados na COPPE/UF RJ têm eficiência de $\approx 60\%$ em relação aos equivalentes comerciais de c-Si sem polarização reversa aplicada. A aplicação de tensão reversa, entretanto, é um ponto importante a ser examinado em maior profundidade pois existem evidências de que a eficiência relativa dos diodos pode ser otimizada, aproximando-se de 100%.

Os diodos fabricados na COPPE/UF RJ, quando submetidos à polarização reversa apresentaram desempenho melhor no que se refere à corrente no escuro — menos da metade do valor apresentado pelo diodo de c-Si — resultando em melhores condições de relação sinal/ruído. Esta característica fornece indícios de que o desempenho dos diodos de a-Si:H, em presença de polarização reversa e campos de radiação sufi-

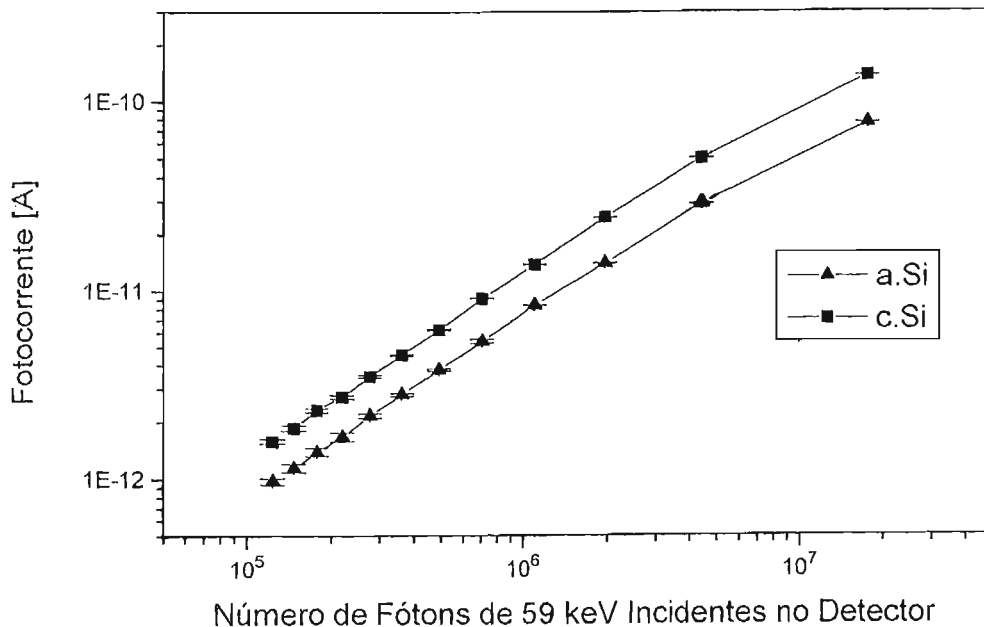
Linearidade dos Diodos c-Si e a-Si (1,3 μm) - 59 keV - Vr = 0,0 V - pp28

FIGURA 8: Comparação da linearidade dos diodos de a-So:H e c-Si

cientemente intensos para gerar fotocorrentes maiores que a corrente no escuro, pode ser superior aos diodos de silício cristalino.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração e apoio prestado pelo Prof. Ricardo Tadeu Lopes, do Programa de Engenharia Nuclear da COPPE/UFRJ. As discussões, sugestões e apoio material do Prof. Ricardo foram imprescindíveis para a realização deste trabalho. □

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- KNOLL, G. *Radiation Detection and Measurements* — John Wiley and Sons (1989),
 ANTONUK, L. et alii - IEEE Transactions on Nuclear Science - vol. 38, nº.2, abril de 1991, pp. 636-640.
 CANAZIO, P. *Exame de Qualificação ao Doutorado* - Programa de Energia Nuclear COPPE/UFRJ, maio de 1995.
 NICHOLSON, P. *Nuclear Electronics* - John Wiley and Sons (1974).
 PAES, H. *Tese de Doutorado* - Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais COPPE/UFRJ - maio de 1994.