

**, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA POLITÉCNICA**

**MARCELO LUIZ FREITAS DA CONCEIÇÃO**

Caracterização elétrica de diodos PIN e MOS operando como  
sensores de raios X

São Paulo  
2023

MARCELO LUIZ FREITAS DA CONCEIÇÃO

**Caracterização elétrica de diodos PIN e MOS operando  
como sensores de raios X**

**Versão Corrigida**

Dissertação apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo (EPUSP) como parte dos  
requisitos para obtenção do título de  
Mestre em Ciências

Orientador: Prof. Dr. Sebastião  
Gomes dos Santos Filho

SÃO PAULO

2023

MARCELO LUIZ FREITAS DA CONCEIÇÃO

**Caracterização elétrica de diodos PIN e MOS operando  
como sensores de raios X**

**Versão Corrigida**

Dissertação apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo (EPUSP) como parte dos  
requisitos para obtenção do título de  
Mestre em Ciências

Orientador: Prof. Dr. Sebastião  
Gomes dos Santos Filho

SÃO PAULO

2023

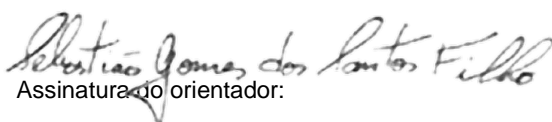
Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 29 de Setembro de 2023



Assinatura do autor:



Assinatura do orientador:

#### Catálogo-na-publicação

Freitas da Conceição, Marcelo Luiz  
CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DE DIODOS PIN E MOS OPERANDO COMO  
SENSORES DE RAIOS X / M. L. Freitas da Conceição, S. G. dos Santos Filho –  
São Paulo, 2023.  
76 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1. Raios X 2. Sensores 3. Diodo PIN 4. Diodo MOS I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.III dos Santos Filho, Sebastião Gomes

## **Dedicatória**

À minha esposa Patricia, com amor, admiração e gratidão por sua compreensão, carinho, presença e incansável apoio ao longo do período de elaboração deste trabalho.

## **Agradecimentos**

Ao Prof. Dr. Sebastião Gomes dos Santos Filho, que nos anos de convivência e orientação, muito me ensinou, contribuindo para meu crescimento científico e intelectual, além de ter demonstrado enorme compreensão e apoio diante das dificuldades enfrentadas durante o curso de mestrado.

Ao colega doutorando Marcos Norio Watanabe, pelo companheirismo, parceria e conhecimento, que muito contribuíram na elaboração deste trabalho.

À Escola Politécnica da USP, Campus Butantã, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

## Epígrafe

*“O conhecimento torna a alma jovem e diminui a amargura da velhice.  
Colhe, pois, a sabedoria. Armazena suavidade para o amanhã.”*

Leonardo da Vinci

## Resumo

Neste trabalho, diodos do tipo PIN e do tipo MOS foram caracterizados eletricamente como detectores de raios X, visando novas aplicações para proteção radiológica e como *pixel* para radiografia digital direta. Um sistema de medidas isolado foi construído para proteger contra a radiação de raios X e extrair as características elétricas destes diodos, com o auxílio de um equipamento National 4155. Um tubo de raios X em miniatura (modelo Mini X da Amptek) foi usado para iluminar os diodos a 2 cm de distância. Como resultado, as respostas elétricas de corrente e tensão dos diodos, em função da tensão de polarização do tubo de emissão de raios X foram extraídas para fluxo de radiação típico na faixa de 0 a ~500 mSv/h. Foi observado que a resposta de corrente do diodo PIN, para polarização reversa de -5V, aumentou proporcionalmente de 0 a 40 nA, para a tensão de polarização do tubo de raios X, variando na faixa de 0 a 45 kV e correntes de filamento de até 100  $\mu$ A. Já no caso dos diodos MOS, não houve resposta elétrica apreciável de corrente além do ruído de fundo para polarização reversa de tensão na faixa de 0 a -5V. Por outro lado, para polarização por corrente constante de 200 nA, a resposta elétrica de tensão do diodo MOS aumentou proporcionalmente, de 0 a 0,5 mV, para a tensão de polarização do tubo de raios X variando na faixa de 0 a 45 kV e correntes elétricas de filamento de até 100  $\mu$ A. Foi mostrado que a operação no modo de corrente constante de polarização do diodo MOS, desenvolvido no presente trabalho, é um procedimento novo e alternativo, quando comparado com os procedimentos discutidos na literatura e a modelagem demonstrativa proposta mostra que a tensão elétrica média extraída como resposta no diodo MOS é uma medida proporcional à corrente elétrica média gerada durante a iluminação do dispositivo por raios X.

*Palavras-chave: raios X, Diodo PIN, Diodo MOS, sensor, Modo de operação por corrente constante para detecção de raios X.*



## Abstract

In this work, PIN-type and MOS-type diodes were electrically characterized as X-ray detectors, aiming at new applications for radiological protection and as pixels for direct digital radiography. An isolated measurement system was constructed to protect against X-ray radiation and to extract the electrical characteristics of the PIN and MOS diodes with the aid of a National 4155 equipment. A miniature X-ray tube (Amptek Mini X model) was used to light the diodes 2 cm away. As a result, the electrical responses of the current and voltage of the diodes as a function of the X-ray tube bias voltage were extracted for typical X-ray flux in the range of 0 to ~500 mSv/h. It was observed that the electrical response of the PIN diode for -5V reverse bias increased proportionally from 0 to 40 nA for X-ray tube bias voltage ranging from 0 to 45 kV and filament currents up to 100  $\mu$ A. In the case of the MOS diodes, there was no appreciable of electrical response of current beyond the background noise for voltage reverse bias in the range of 0 to -5V. On the other hand, for constant current bias of 200 nA, the voltage response of the MOS diode increased proportionally from 0 to 0.5 mV for the X-ray tube bias voltage ranging from 0 to 45 kV and filament currents up to 100  $\mu$ A. It was shown that the operation in the voltage mode of the MOS diodes is a new and alternative procedure compared with the procedures discussed in the literature and it was the proposed a new modeling to show that the average electrical voltage extracted as voltage response in the MOS diode is a measure proportional to the average electrical current generated during the illumination of the device by X-rays.

*Key-words: X rays, PIN diode, MOS diode, sensor, Constant current mode for X ray detection.*

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> – Sistema analógico de obtenção de imagens por raios X. Fonte: <a href="https://helioprint.com.br/blog/radiologia-digital/">https://helioprint.com.br/blog/radiologia-digital/</a> .....	21
<b>Figura 1.2</b> – Sistemas que reproduzem imagens digitais a partir de raios X Fonte: O próprio autor.....	22
<b>Figura 1.3</b> – Sistema Computadorizado de captura de imagens. Fonte: Adaptado de NDT – Fuji.....	23
<b>Figura 1.4</b> – Esquema de detecção indireta de raios X. Fonte: O próprio Autor....	23
<b>Figura 1.5</b> – (a) Sistema de chapa RADREX da Canon® para aquisição de imagens de raios X em alta resolução (b) Imagem de raios X de alta resolução obtida através de leitura direta empregando o sistema de chapa RADREX.....	25
<b>Figura 2.1</b> – Circuito equivalente de um dado Detector Semicondutor onde $I(t)$ é um gerador de corrente; $C_D$ é a capacitância da região de depleção; $R_D$ é a resistência da região de depleção e $Z_c$ é a impedância em série que leva em consideração os contatos. Fonte: Adaptação da referencia [9]. .....	32
<b>Figura 2.2</b> – Exemplo de um circuito pré-amplificador integrador sensível á carga. Fonte: Adaptado da referência [9]. .....	33
<b>Figura 2.3</b> – Esboço da corrente em função do tempo onde $t_c$ representa o tempo de coleta da carga $Q$ de cada evento. Fonte: Adaptado da referencia [9]. .....	36
<b>Figura 2.4</b> – Pulsos de corrente independentes representando interações individuais supondo a taxa de geração suficientemente baixa. Fonte: Adaptado da referência [9]. .....	36
<b>Figura 2.5</b> – Corrente temporal dada pela soma da componente média $I_0$ mais a componente aleatória $\sigma_i(t)$ . Fonte: Adaptado da referência [9]. .....	38
<b>Figura 2.6</b> – Circuito para monitoramento da variância $\overline{\sigma_i^2(t)}$ ou valor quadrático médio. Em particular, no circuito apresentado, a saída é uma tensão quadrática média que está sendo monitorado. Fonte: Adaptado da referencia [9]. .....	39
<b>Figura 2.7</b> – Ilustração do processo de geração de pares elétrons-lacuna em uma junção PN iluminada por radiação ionizante. Fonte: Adaptado da referência [13].....	41
<b>Figura 2.8</b> – Representação simplificada da estrutura interna de um diodo PIN. Adaptado da referência [20] .....	42
<b>Figura 2.9</b> – Símbolo esquemático do diodo PIN. Fonte: Adaptado da referencia [20]. .....	43
<b>Figura 2.10</b> – Foto do do diodo PIN BPW34 (a) Dimensões em mm (b) Fonte: Adaptado da referencia [20]. .....	44
<b>Figura 2.11</b> – (a) Diodo MOS com a estrutura do capacitor MOS com dielétrico de porta ultrafino através do qual a corrente tunela. Na situação de inversão fraca e $V_G < 0$ , os elétrons podem tunelar através do dielétrico. No detalhe, estão também indicadas a carga de interface $Q_i$ e a carga de depleção $Q_D$ . (b) Sistema de medidas dentro de uma caixa preta metálica de blindagem. Fonte: Adaptado da referencia [21]. .....	46

<b>Figura 2.12</b> – Curva I-V típica de um diodo MOS onde $V_G < 0$ corresponde ao sentido direto de polarização para a estrutura mostrada na Figura 2.13(a). Fonte: O próprio autor.....	47
<b>Figura 3.1</b> – Etapas de fabricação dos diodos MOS. Fonte: Dissertação de mestrado de Marcos Watanabe [22].....	48
<b>Figura 3.2</b> – Ilustrações do diodo MOS vista de topo (a), de perfil (b) e a vista de topo da máscara (c). Fonte: Tese de doutorado de Verônica Christiano Abê [21]...	49
<b>Figura 3.3</b> – Montagem experimental empregada para a extração das medidas elétricas nos diodos MOS. Fonte: Adaptado da referência [22].....	50
<b>Figura 3.4</b> – Montagem experimental mostrando o detalhe da placa de circuito impresso sobre a qual foram montados diodos MOS para serem expostos aos raios X dentro da Câmara de alumínio. Fonte: o próprio autor. ....	51
<b>Figura 3.5</b> – Placa de circuito impresso (PCB) sobre a qual foi feita colagem de lâmina de silício cortada na dimensão de 5 cm x 5cm onde é possível observar quatro diodos MOS de mesma área com dimensão lateral de 2 cm cada. Fonte: O próprio Autor. ....	51
<b>Figura 3.6</b> – Detalhe do diodo PIN BPW34 montado dentro da câmara de alumínio para extração das curvas I-V. Fonte: O próprio autor. ....	52
<b>Figura 3.7</b> – Foto da DAC da National, modelo NI PXIe – 1073 empregada nas medidas elétricas. Fonte: O próprio autor. ....	53
<b>Figura 3.8</b> – Detalhe do sistema de raios X miniatura (modelo Mini X da Amptek) conectado na câmara de alumínio. O módulo SDD de espectroscopia mostrado do lado esquerdo não foi empregado. Fonte: O próprio autor. ....	54
<b>Figura 3.9</b> – Interface gráfica do software de controle do tubo de raios X. Fonte: o próprio autor. ....	55
<b>Figura 4.1</b> – Evolução no tempo da corrente através do diodo PIN (b) para uma tensão reversa aplicada de 5V (a) considerando o tubo de raios X operando na corrente de 50 $\mu$ A e tensão entre anodo e filamento de 10kV. Fonte: O próprio autor. ....	57
<b>Figura 4.2</b> – Resposta de corrente $I_0$ do diodo PIN operando no modo de corrente, onde o tubo de raios X foi ligado em 40 kV no instante $t = 200$ s para uma corrente de filamento de 100 $\mu$ A (~ 500 mSv/h). Fonte: o próprio autor. ....	57
<b>Figura 4.3</b> – Resposta de corrente $I_0$ do diodo PIN operando no modo de corrente em função da tensão do tubo de raios X para uma corrente de filamento de 50 $\mu$ A. Fonte: O próprio Autor. ....	58
<b>Figura 4.4</b> – Resposta de corrente $I_0$ do diodo PIN operando no modo de corrente em função da tensão do tubo de raios X para uma corrente de filamento de 100 $\mu$ A. Fonte: O próprio autor. ....	60
<b>Figura 4.5</b> – Resposta de corrente $I_0$ para tensão constante de -1 V para o tubo de raios X polarizado em 40 kV com corrente de filamento de 100 $\mu$ A (~ 500 mSv/h). Fonte: O próprio autor. ....	62
<b>Figura 4.6</b> – Degrau de tensão $V_0$ no diodo MOS com corrente constante de 200 nA quando é ligada a fonte de raios X em 40KV x 100 $\mu$ A. Fonte: O próprio autor. ....	63

<b>Figura 4.7</b> – Componentes de geração em um diodo MOS polarizado reversamente. Fonte: O próprio autor. ....	64
<b>Figura 4.8</b> – Evolução no tempo da tensão medida no diodo MOS (a) para uma corrente aplicada de 200 nA (b) considerando o tubo de raios X operando na corrente de 100 $\mu$ A e tensão entre anodo e filamento de 40kV. Fonte: O próprio autor. ....	67
<b>Figura 4.9</b> – Resposta de tensão do diodo MOS no modo de corrente constante (200 nA) em função da tensão do tubo de raios X para corrente de filamento de 50 $\mu$ A. Fonte: O próprio autor. ....	68
<b>Figura 4.10</b> – Resposta de tensão do diodo MOS no modo de corrente constante (200 nA) em função da tensão do tubo de raios X para corrente de filamento de 100 $\mu$ A. Fonte: o próprio autor. ....	69

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Limites de dose anuais estabelecidos pela Norma CNEN NN 3.01 Set/2011 e alterados pela resolução 114/2011.....	28
--	----

## LISTA DE SÍMBOLOS

$Ag$	Símbolo do element químico prata
$A_G$	Área de porta
$A_S$	Area superficial lateral da região de depleção
aSe	Selênio amorfo
$\alpha$	Coeficiente de absorção do feixe de raios X
$C_D$	Capacitância da região de depleção
$D_n$	Constante de difusão dos portadores minoritários
$\Delta E_s$	Resolução em energia
$E$	Energia do feixe de raios X medido em eV
$E_1$	Energia de ligação do elétron
$E_D$	Energia média depositada por evento
$E_m$	Energia média necessária para produzir uma par elétron-lacuna (3,62 eV para o Si na temperatura ambiente e 2,95 eV para o germânio em 80K)
$E_P$	Energia média necessária para gerar pares elétron-lacuna
$E_\tau$	Energia de ativação da armadilha
$F$	Parâmetro “Fano” introduzido na distribuição de Poisson para descrever a perda de energia liberada para a rede cristalina na forma de fonons
FWHM	Full Width at Half Maximum (largura a meia altura)
Ge	Símbolo do elemento químico germânio
$h\nu$	Energia do fóton
$I_o$	Resposta de corrente para detector polarizado com tensão constante
$I_R$	Corrente reversa no diodo MOS
$I_{Rx}$	Corrente reversa no diodo MOS que engloba também a componente de geração devido à incidência de raios X
$K$	Constante de Boltzmann
$L_n$	Comprimento de difusão dos portadores minoritários.
$N$	Número de fotons remanescentes após o feixe atravessar uma dada distância “x” em um dado material
$N_A$	Dopagem do substrato
$n_i$	Concentração intrínseca de portadores
$\nu$	Freqüência do feixe de raios X
$N_o$	Número de fotons em um feixe colimado de raios X

$N_t$	Densidade de centros de armadilhamento
$P$	Seção de choque para produção de pares elétron-pósitron
$\Psi_s$	Potencial de Superfície
$Q_D$	Carga de depleção no diodo MOS
$Q_i$	Carga de interface
$r$	Taxa de eventos
$R_D$	Resistência da região de depleção
$S$	Velocidade de geração na superfície sob a porta,
$S_o$	Velocidade de geração na porção lateral da região de depleção
$Si$	Símbolo do elemento químico silício
$\sigma$	Área da seção de captura
$\sigma_i(t)$	Componente flutuante no tempo sobreposta à que fica sobreposta à corrente média gerada
$\overline{\sigma_I(t)}$	Desvio padrão da corrente medida no período T
$\overline{\sigma_I^2(t)}$	Média quadrática temporal da diferença entre a corrente flutuante $I(t)$ e a corrente média $I_o$ .
$T$	Temperatura absoluta.
$T_R$	Tempo de coleta das cargas no detector
$T_S$	Tempo de subida do pulso gerado por um detector semiconductor
$t_c$	Tempo de coleta de cada quantum de carga
$\tau_D$	tempo médio de permanência na armadilha
$\tau_g$	Tempo de geração de portadores minoritários
$\tau^+$	Tempo de deriva livre médio
$V_G$	Tensão aplicada na porta do diodo MOS
$V_o$	Resposta de tensão do detector para operação com corrente constante.
$V_{th}$	Velocidade térmica.
$W_D$	Largura da região de depleção de não equilíbrio
$Z$	Número atômico
$Z_c$	Resistência ou combinação resistência-capacitância em série devido aos contatos em detectores semicondutores

## LISTA DE SIGLAS

CCD	Charge-coupled device (dispositivo de carga acoplada)
CMOS	Complementar MOS (MOS Complementar)
DAC	Digital-Analog Converter (Conversor Digital-Analógico)
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
GSIDE	Grupo de Superfícies, Interfaces e Deposição Eletroquímica
LSI/EPUSP	Laboratório de Sistemas Integrados/Escola Politécnica da USP
MOS	Metal-Oxido-Semicondutor
PIN	Estrutura obtida por difusão formada por materiais semicondutores P, Intrínseco e N.
RTP	Processamento Térmico Rápido
USB	Universal Serial Bus (Barramento Serial Universal)



## Sumário

Resumo.....	08
Abstract.....	09
Lista de Figuras.....	10
Lista de Tabelas.....	13
Lista de Símbolos.....	14
Lista de Siglas.....	16
1 Introdução.....	19
1.1 Objetivos.....	20
1.2 Motivação.....	20
1.3 Organização do trabalho.....	25
2 Revisão Bibliográfica .....	27
2.1 Os raios X .....	27
2.1.1 Produção de raios X.....	27
2.2 Detectores semicondutores de radiação .....	29
2.3 Propriedades gerais dos detectores de radiação .....	35
2.3.1 Modos de operação dos detectores de radiação .....	36
2.4 O Diodo PIN.....	40
2.4.1 Polarização direta.....	43
2.4.2 Polarização reversa.....	43
2.4.3 O diodo BPW34.....	44
2.4.4 O diodo MOS.....	45
3. Metodologia .....	47
3.1 Processo construtivo dos diodos MOS .....	47
3.2 Caracterizações I-V .....	49
3.3 Equipamentos Utilizados .....	56
4. Resultados e Discussão.....	55
4.1 Detecção de raios X utilizando o diodo PIN.....	55
4.2 Detecção de raios X utilizando o diodo MOS.....	61
5. Conclusões e Perspectivas Futuras.....	71

6. Lista de trabalhos publicados.....	73
7. Referências .....	74

## 1 Introdução

O uso de equipamentos de geração de imagens por emissão de raios X é amplamente disseminado tanto na medicina quanto na indústria, já que tais equipamentos permitem a formação de imagens bem claras e detalhadas das partes internas do corpo humano bem como de partes internas de máquinas e equipamentos industriais.

O processo de formação destas imagens depende, basicamente, do uso de sensores que permitam, de maneira direta ou indireta, a conversão de fótons de raios X em imagem, seja na forma de revelação de foto-negativo por processo químico, seja através da conversão de radiação em sinais elétricos.

Nos detectores de raios X que operam por processo direto, a energia transportada pela radiação é convertida em cargas elétricas que são reconhecidas eletronicamente. Os diodos PIN e MOS, que são exemplos de dispositivos de conversão direta de fótons de raios X em sinal elétrico, produzidos através de técnicas de fabricação convencional de semicondutores, fornecem medições de baixo custo para detecção de todas as formas de radiação ionizante, incluindo UV extremo, raios X suaves (soft X rays) e raios X rígidos (hard X rays) [1, 2].

Os diodos PIN e MOS operam via fotoionização, um processo em que a radiação ionizante atinge os átomos do semicondutor e liberam pares elétron-lacuna que, mais tarde, são coletados proporcionalmente com a intensidade dos raios X [3].

Os diodos PIN e MOS podem ser empregados como *pixels* para radiografia digital direta, que é uma aplicação emergente que usa detectores de raios X para transferir imagens diretamente para os computadores. O tamanho do mercado de radiografia digital em 2019 era de US\$ 2,01 bilhões e deve atingir um patamar de US\$ 2,82 bilhões até 2025 [2, 3].

Vale ressaltar que o diodo MOS (metal-oxide-semiconductor) é um possível candidato para aplicações em detectores digitais diretos, pois possui várias características importantes como [4]: I) pode ser usado no mesmo substrato de silício empregado para os circuitos integrados atuais com nível de dopagem em torno de  $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ , II) é uma tecnologia de baixo custo, III) seu processo de fabricação é muito simples como veremos a seguir, IV) sua característica  $I \times V$  (corrente x tensão) é

reprodutível e V) pode ser empregada em conjunto com materiais cintiladores para conversão de raios X em luz visível e melhorar a sensibilidade [2].

Na detecção de raios X, o ruído elétrico, apresentado pelos diodos MOS e PIN, se origina da natureza discreta da carga elétrica e, com a amplificação e blindagem eletrônica comuns, o “ruído de disparo” (shot noise) domina outras fontes de ruído para fotocorrentes superiores a 5pA [5, 6].

## 1.1 Objetivos

O objetivo geral do presente trabalho foi o de caracterizar eletricamente diodos PIN e diodos MOS para a detecção de radiação de raios X. O diodo PIN está disponível comercialmente e o diodo MOS foi desenvolvido no grupo GSIDE do LSI/EPUSP. Os objetivos específicos foram: (a) Introduzir o diodo PIN, demonstrando que este pode ser empregado no modo tensão constante para detecção de raios X; (b) Propor um novo procedimento para utilização do diodo MOS na detecção de raios X, no modo corrente constante e (c) Propor uma modelagem para o diodo MOS operando no modo corrente constante na detecção de raios X.

Dentro da gama de diodos PIN disponíveis atualmente, optou-se, pelo diodo PIN código BPW34, que tem propriedades interessantes relativas à sua sensibilidade e ao seu comportamento, sob condições de exposição aos raios X, tendo sido utilizado em outras experiências ligadas a este tipo de aplicação [7], o que, portanto, proporciona um lastro de informações bastante amplo para basearmos nosso trabalho e análise de desempenho comparativo com o diodo MOS fabricado. no grupo GSIDE do LSI/EPUSP.

## 1.2 Motivação

A aquisição e o tratamento de imagens são áreas de importância fundamental, tanto na ciência quanto na indústria, e as aplicações vão desde a região visível do espectro de frequência até a de radiações infravermelho, raios X e além [1,2].

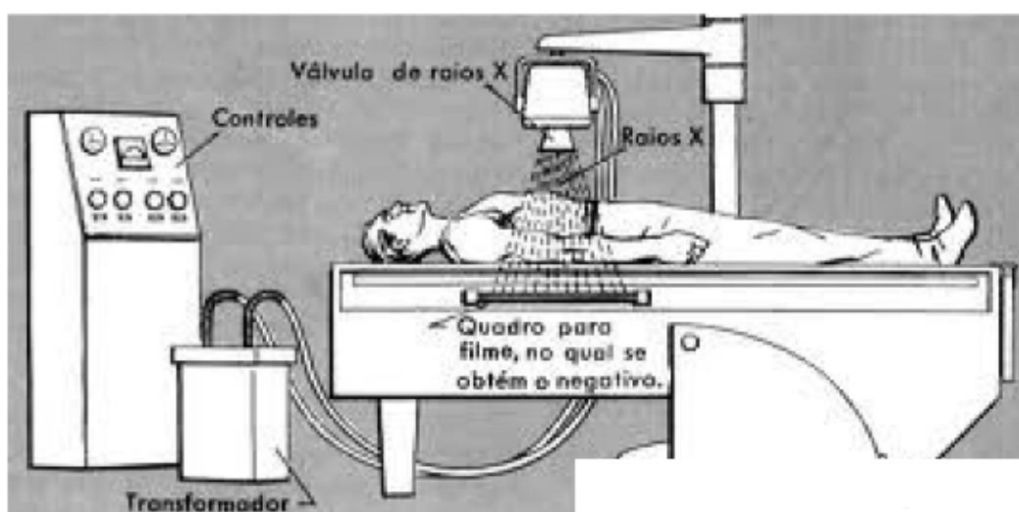
A questão dos sistemas de raios X é um caso à parte: sua utilização é de muita importância para a medicina, no entanto, sua tecnologia ainda é de difícil acesso e os

dispositivos digitais de obtenção de imagem ainda são caros (porque são na sua maioria todos são importados), o que encarece toda a cadeia de serviços de diagnósticos por imagem. Isto é de tal forma verdadeiro que existem centros de diagnósticos por imagem, que visam otimizar os custos de obtenção deste tipo de diagnóstico.

Esses altos custos se devem, basicamente, ao processo de obtenção e tratamento digital de imagens por raios X, que envolvem tecnologias conhecidas, mas não fabricadas no Brasil, equipamentos protegidos e grandes cuidados de operação, além de envolver altos custos de manutenção.

Diante deste quadro, o presente trabalho busca a obtenção de um dispositivo de sensoriamento de imagens de raios X que seja tecnicamente viável de ser produzido no país, eliminando os custos de importação e com tecnologia de alto valor agregado. Desta forma, podemos desenvolver processos de obtenção das imagens geradas pelos contrastes provocados pela radiação X. Hoje, existem duas formas de obtermos estas imagens:

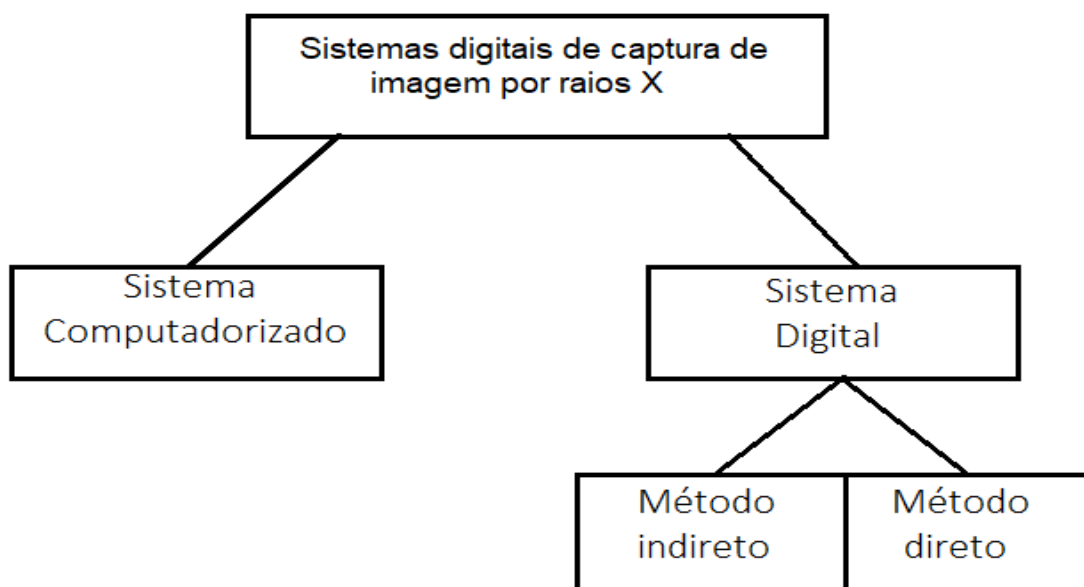
- 1) Analogicamente, através da sensibilização de elemento fotosensível, uma espécie de negativo de fotografia, que é revelado posteriormente, através de um processo químico. Este processo é eficiente, mas impede a intervenção na leitura das imagens, tais como a aplicação de técnicas de ampliação, armazenamento e remessa eletrônica das imagens produzidas. Tal processo é demonstrado na Figura 1.1



**Figura 1.1** Sistema analógico de obtenção de imagens por raios X  
Fonte: <https://helioprint.com.br/blog/radiologia-digital/>

- 2) Digitalmente, através da utilização de um sensor de imagem por sensoriamento direto em semicondutor ou aqueles baseado nas propriedades de cintilação de um material sensível à radiação produzida, convertendo em fótons, no comprimento de onda visível, esta radiação e, posteriormente, transformando em sinal elétrico proveniente de dispositivos sensíveis à luz visível.

A seguir iremos detalhar os sistemas de aquisição digital que serviram de motivação para o presente trabalho. Estes podem ser divididos em dois grandes grupos, conforme a Figura 1.2 [8, 12]:

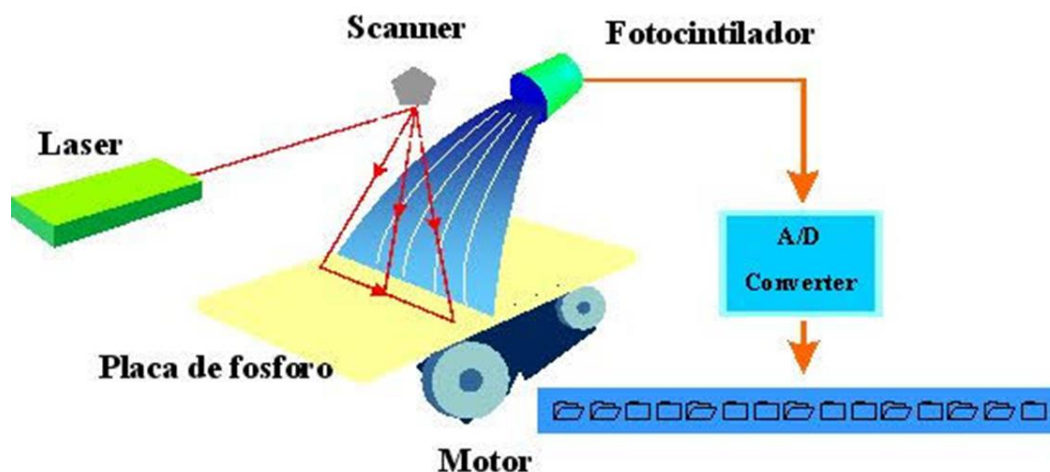


**Figura 1.2** – Sistemas que reproduzem imagens digitais a partir de raios X  
Fonte: O próprio autor

O sistema computadorizado se baseia no uso de um sistema de detecção de raios X semelhante aos analógicos, mas com um dispositivo de armazenamento temporário de imagens, através de um sensor foto-estimulável construído através de placas, por exemplo, feitas com haletos de flúor-bário dopados com európio [2]. Estas placas, ao receberem a irradiação do corpo analisado por raios X, são escaneadas

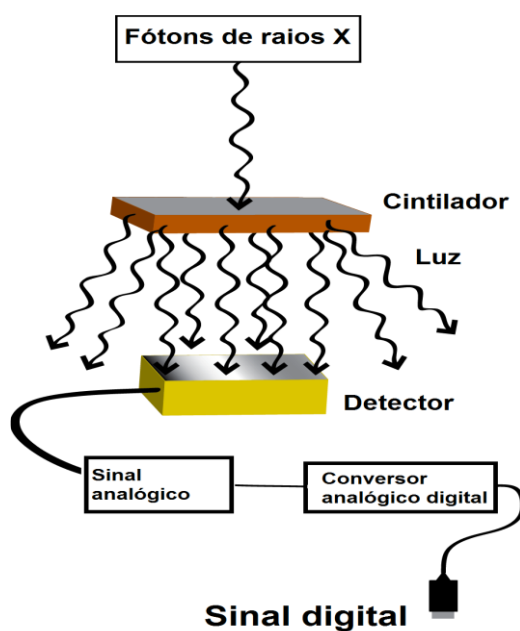
por um leitor que, genericamente falando, convertem as imagens gravadas pelos raios X em sinais elétricos que são tratados e armazenados por computador [8, 12].

Este sistema é mostrado, de maneira simplificada na Figura 1.3.



**Figura 1.3** – Sistema Computadorizado de captura de imagens. Fonte: Adaptado de NDT – Fuji

No método indireto mencionado na Figura 1.2, é utilizada uma substância cintiladora que converte os ftons de raios X incidentes em luz antes que sejam convertidas em cargas elétricas [8, 12], conforme mostrado na Figura 1.4:



**Figura 1.4** Esquema de detecção indireta de raios X. Fonte: O próprio Autor.

Este sistema pode usar como detector uma célula CCD (charge-coupled device) ou fotodiodos CMOS com transistores de filme fino [8, 12]. Neste processo, a produção de imagem começa com a incidência de fótons de raios X (provenientes do paciente, por exemplo) sobre uma superfície onde exista uma substância cintiladora depositada, que libera luz com intensidade proporcional à incidência destes raios X [14-17].

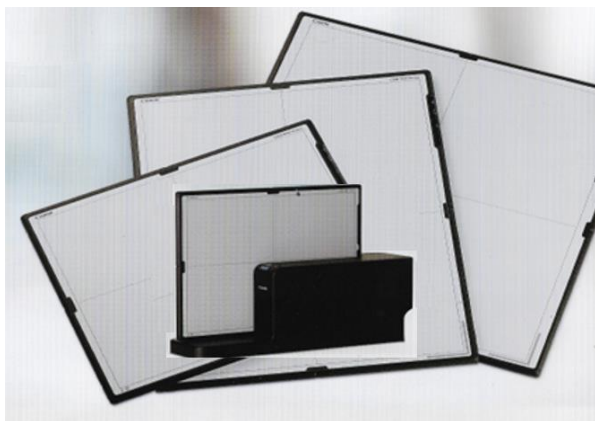
Por outro lado, no método direto é utilizada uma célula que converte diretamente os fótons de raios X em cargas elétricas, que são posteriormente coletadas, armazenadas e convertidas da forma analógica para a forma digital, sendo transformadas em imagens por um sistema computadorizado.

Este processo de conversão direta tem sido objeto de diversas pesquisas através do emprego de materiais sensíveis aos raios X de fácil manuseio e que permitam: a) a redução no tamanho dos equipamentos e b) a diminuição no tempo de exposição do paciente aos raios X. Atualmente, o material mais comumente empregado é o selênio amorfo (a-Se), que é bastante estável, porém tem a característica indesejável de requerer altas tensões para a liberação de cargas elétricas quando irradiados com raios X [2].

A figura 1.5a ilustra o sistema de chapa RADREX da Canon® para aquisição de imagens de raios X em alta resolução de forma autônoma com bateria independente ou através de aquisição *online* conforme mostrado na Figura 1.5b. Os dados quando armazenados de forma autônoma utilizam uma base multifuncional para transferir remotamente as imagens para um banco de dados. Esse método de escaneamento direto de imagens tem uma característica modular que permite utilização nos equipamentos analógicos antigos como uma chapa de fotossensibilização química convencional.

No método direto de aquisição de imagem ilustrado na Figura 1.5, o diodo MOS é um candidato possível como sensor de radiação para obtenção de imagens de alta resolução dada a sua simplicidade de construção, baixo custo e a compatibilidade de integração com os processos e pós-processamentos em circuitos integrados [4] o que serve de motivação e justificativa para o objetivo apresentado sobre um procedimento inédito para utilização do diodo MOS desenvolvido no LSI-EPUSP para a detecção de raios X.





(a)



(b)

**Figura 1.5** – (a) Sistema de chapa RADREX da Canon® para aquisição de imagens de raios X em alta resolução (b) Imagem de raios X de alta resolução obtida através de leitura direta empregando o sistema de chapa RADREX.

### 1.3 Organização do trabalho

No presente capítulo 1 foi feita uma breve introdução sobre o tema do trabalho contextualizando em relação ao estado da arte, foram apresentados os objetivos e a motivação para realização do trabalho. Os capítulos seguintes estão organizados como segue:

- No capítulo 2 são feitas revisões sobre raios X e a forma de produzi-lo, conceitos gerais sobre detectores semicondutores de radiação e suas propriedades mais relevantes;
- No capítulo 3 é apresentada a metodologia empregada nas caracterizações elétricas de diodos PIN e MOS submetidos aos raios X, os equipamentos empregados e os procedimentos de medida no modo corrente e no modo tensão;
- No capítulo 4 são apresentados os resultados e discussão sobre a aplicação de diodos PIN e MOS na detecção direta de raios X nos modos de corrente e de tensão e, também, é proposto um novo procedimento alternativo de operação do diodo MOS no modo de tensão que permite obter a corrente média gerada pelas diversas intensidades de raios X.

- No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e perspectivas futuras para este trabalho.

## **2 Revisão Bibliográfica**

### **2.1 Os raios X**

Os raios X foram descobertos em 1895 pelo físico alemão Wilhelm Conrad Roentgen, que recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1901 pela descoberta. Por definição, os raios X são um tipo de radiação eletromagnética que apresenta frequências superiores a  $10^{18}$  Hz e que apresentam a propriedade de serem absorvidas por materiais de maior densidade (como os ossos, por exemplo) e atravessarem materiais de menor densidade (como os músculos), o que cria condições para formação de imagens de partes internas de maior densidade do corpo humano, bem como de materiais e equipamentos na indústria [2, 8].

#### **2.1.1 Produção de raios X**

Os tubos de emissão de raios X são projetados de maneira a produzirem elétrons, que são acelerados ao ponto de atingirem uma energia cinética muito elevada, chocando-se, posteriormente, contra alvos sólidos, desalojando elétrons das órbitas inferiores destes alvos e produzindo radiação na faixa de frequência dos raios X. Os elétrons que atingem o alvo (o anodo) sofrem uma desaceleração brusca e transferem suas energias cinéticas para os átomos do material. Nessa situação, a energia cinética dos elétrons é convertida tanto em energia térmica quanto em energia eletromagnética após a desaceleração desses elétrons sobre o anodo, ou seja, ocorre a emissão de radiação de raios X de fundo, fenômeno esse justificado pelo princípio de conservação de energia.

Além disso, os elétrons, desalojados da camada de valência dos átomos do anodo, produzem raios X em comprimento de onda específico após o seu decaimento das posições desalojadas. Essa banda ou raia principal, que está associada ao material específico empregado no anodo e usualmente é muito fina e fica sobreposta à radiação de fundo [2].

Quanto às unidades de medida de radiação ionizante, o Sievert tem a mesma unidade que o Gray, que é uma unidade que reflete a dose absorvida, sendo

estabelecida, no SI, em joule por quilograma (J/kg). A Tabela 1 ilustra os limites anuais de exposição do corpo humano e algumas de suas partes à radiação ionizante conforme a norma CNEN NN 3.01 de setembro de 2011 que foi alterada pela resolução 114/2011. É possível observar que os limites apresentados são dados em Sievert, o que justifica sua escolha como unidade padrão de dosagem aplicada pelo dispositivo de emissão de raios X utilizado neste trabalho.

**Tabela 1 - Limites de dose anuais estabelecidos pela Norma CNEN NN 3.01 Set/2011 e alterados pela resolução 114/2011**

Limites de Dose Anuais <sup>[a]</sup>			
Grandeza	Órgão	Indivíduo Ocupacionalmente Exposto (IOE)	Indivíduo do Público
Dose Efetiva	Corpo inteiro	20 mSv <sup>[b]</sup>	1 mSv <sup>[c]</sup>
	Corpo inteiro (Mulheres grávidas-feto)	1 mSv	
Dose Equivalente	Cristalino	20 mSv <sup>[b]</sup> Alterado pela Resolução 114/2011	15 mSv
	Pele <sup>[d]</sup>	500 mSv	50 mSv
	Mãos e pés	500 mSv	-----

[a] Para fins de Controle Administrativo, o termo dose anual é avaliado de janeiro a dezembro de cada ano.

[b] Média aritmética em 5 anos consecutivos, desde que não exceda 50 mSv em qualquer ano (alterado pela Resolução 114/2011 da CNEN).

[c] Em circunstâncias especiais a CNEN poderá autorizar até 5 mSv em um ano, desde que a dose média em 5 anos consecutivos seja menor que 1 mSv/ano.

[d] Valor médio em 1 cm<sup>2</sup> de área, na região mais irradiada

Dose Efetiva= Dose Efetiva Externa (exposições) +Dose Efetiva comprometida (incorporações)

Na tabela acima estão informados os limites anuais de radiação permitidos para exposição de partes do corpo – inclusive olhos - à radiação. Percebemos que estes limites são dados em Sievert, o que justifica sua escolha como unidade padrão de dosagem aplicada pelo dispositivo de emissão de raios X utilizado neste trabalho.

## 2.2 Detectores semicondutores de radiação

Os detectores semicondutores são projetados como câmaras de ionização de estado sólido através de camadas com campo elétrico elevado e baixa corrente de trabalho para detecção e espectroscopia de radiação ionizante. Dadas as suas características cristalinas, os semicondutores tem sido estudados a fim de se obter características adequadas para coleção de cargas nos centros de armadilhamento na sua banda proibida. Historicamente, os dispositivos mais empregados foram as junções retificadoras PN ou PIN fabricadas em silício ou germânio operando no modo de polarização reversa [9, 10, 11].

Os processos de absorção de radiação ionizante que comumente podem ocorrer são devidos ao efeito fotoelétrico, ao efeito Compton ou ao efeito de produção de pares elétron-pósitron nas interações nucleares com partículas pesadas.

Na interação fotoelétrica, o foton pode transferir toda a sua energia  $h\nu$  para um dado elétron e ejetá-lo do átomo. A energia do elétron ejetado será  $h\nu - E_1$ , onde  $E_1$  é a energia de ligação do elétron. O átomo que foi excitado, por sua vez, libera a energia  $E_1$  via decaimento para seu estado fundamental. Nesse processo, o átomo libera um ou mais fótons e, possivelmente, elétrons Auger sendo que a seção de choque aumenta com o número atômico  $Z$  e diminui com o aumento da energia.

O efeito Compton é essencialmente uma colisão elástica entre um foton e um elétron; durante a interação, o foton fornece uma fração de sua energia para os elétrons, e a frequência  $\nu$  como resultado diminui.

No efeito de produção de pares elétron-pósitron, um foton altamente energético próximo ao núcleo atômico gera pares elétron-pósitron após transferir toda a sua energia. Essa energia contabiliza a energia da massa em repouso junto com a energia cinética dos pares elétron-pósitron. A energia mínima necessária de 1,022 MeV para que esse efeito ocorra é obtida através de considerações relativísticas e que corresponde aproximadamente às massas de repouso de dois elétrons.

A seção de choque  $P$  para esse tipo de efeito aumenta com a energia. Em particular, a relação  $P/Z$  permanece constante com a energia até 10 MeV. Em energias

maiores, a seção de choque começa a diminuir a medida que aumenta o número atômico  $Z$  [9].

A interação dos raios X com a matéria ocorre de forma diferente, comparado com os processos de perda de energia nas interações nucleares de partículas pesadas e dos fenômenos de canalização que promovem perda de ionização dentro dos materiais. No caso dos raios X, o processo de perda de energia pode ser descrito a partir da abordagem corpuscular padrão da radiação eletromagnética onde, por exemplo, cada foton de um feixe colimado de  $N_0$  fotons sofre perda de energia em cada interação [9]. A atenuação de um dado feixe de fótons pode ser descrita através de uma lei exponencial simples dada por [9]:

$$N = N_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (1)$$

onde  $N$  é o número de fotons remanescentes após o feixe atravessar uma dada distância “ $x$ ” no material e  $\alpha$  é o coeficiente de absorção.

O processo de perda de energia pelos raios X resulta na criação de pares elétron-lacuna, sendo que seu detalhamento teórico ainda não é bem conhecido, mas a energia média  $E_m$  necessária para produzir um par elétron-lacuna em uma dada temperatura é independente da energia da radiação empregada.

Os valores de  $E_m$  são 3,62 eV para o silício na temperatura ambiente, 3,72 eV no silício em 80K e 2,95 eV para o germânio em 80K. Dado que a largura da banda proibida é 1,115 eV para o silício, na temperatura ambiente, e é de 0,73 eV para o germânio em 80K, fica claro que nem toda a energia da radiação ionizante de raios X é gasta na quebra das ligações covalentes, mas parte dela acaba sendo liberada para a rede cristalina na forma de fonons.

Em particular, a medida que o feixe de raios X perde energia dentro do material semiconductor, uma grande população de elétrons energéticos (quentes) é criada a ponto de, após um grande número de interações com a radiação, os elétrons quentes acabam adquirindo a energia necessária para criar pares elétron-lacuna.

Além disso, podem existir vários mecanismos possíveis relativos às perdas de energia dentro do material semiconductor. O parâmetro “Fano” ( $F$ ) pode ser introduzido na distribuição de Poisson para descrever essa perda de energia sendo que a equação da variância pode ser escrita como [9]:

$$\langle n_o \rangle^2 = F \cdot \langle n \rangle = F \cdot n \quad (2)$$

Uma vez que a energia necessária para criar os pares elétron-lacuna nos detectores de semicondutor é muito menor que do que a energia da radiação, verifica-se que  $F$  fica próximo de zero. O valor verdadeiro de  $F$ , para silício e germânio, ainda é desconhecido e existem muitas teorias conflitantes, mas se assumirmos um valor de 0,1 para  $F$ , em geral, a modelagem proposta na equação (2) concorda de forma satisfatória com os resultados experimentais.

Assumindo um valor de 0,1 para o parâmetro  $F$ , pode-se descrever a resolução em energia  $\Delta E$  de detectores de germânio operando em nitrogênio líquido (77K) como sendo [9]:

$$\Delta E = 1,27 \cdot \sqrt{E} \quad (3)$$

com  $E$  (energia do feixe) medido em eV.

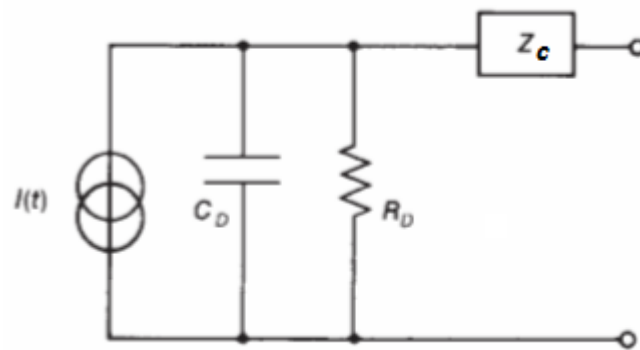
A influência do ruído  $\Delta N$  do tipo FWHM em keV deve ser contabilizado junto com  $\Delta E$  para obtenção da resolução em energia geral  $\Delta E_s$ [9]:

$$\Delta E_s = \sqrt{(\Delta E)^2 + (\Delta N)^2} \quad (4)$$

O valor do parâmetro  $F$  para silício na temperatura ambiente tem sido de pouco interesse, dado que outros fatores além da estatística fundamental de Poisson, dominam a resolução em energia [9].

O equacionamento simples mostrado pelas equações (1), (2), (3) e (4) representa a melhor estatística quando a resolução em energia é dominada pela contribuição do detector onde os detectores de germânio acabam sendo mais vantajosos que os detectores de silício [9, 10].

O circuito equivalente do detector de semicondutor operando como espectrômetro está mostrado na Figura 2.1. Na maioria dos casos práticos, o efeito de alta resistência da junção reversamente polarizada é desprezível. A impedância  $Z_c$  mostrada em série representa resistência ou combinação resistência-capacitância em série devido aos contatos.



**Figura 2.1** – Circuito equivalente de um dado Detector Semicondutor onde  $I(t)$  é um gerador de corrente;  $C_D$  é a capacitância da região de depleção;  $R_D$  é a resistência da região de depleção e  $Z_c$  é a impedância em série que leva em consideração os contatos. Fonte: Adaptado da referencia [9].

Quando utilizados como espectrômetros de energia, os detectores semicondutores costumam ser conectados em pré-amplificadores integradores com alta capacitância dinâmica de entrada, sensíveis à carga (Figura 2.2).

Esses pré-amplificadores integram o sinal de corrente fornecido pelo detector, tendo como saída um sinal de tensão que é enviado para um amplificador principal de filtragem. O comportamento temporal do sinal de corrente na saída irá depender da forma do sinal de corrente na entrada e do efeito do circuito equivalente mostrado na Figura 2.1, o qual costuma ter influência desprezível ou pode ser prevista através de cálculos simplificados.

Já a obtenção da corrente gerada  $I(t)$  irá demandar considerações detalhadas sobre o processo de coleta das cargas durante a incidência da radiação ionizante que pode ser, por exemplo, na forma de raios X. O problema fundamental na obtenção de  $I(t)$  é a forma de como se calcula o movimento dos portadores de carga sob influência de campo elétrico na região de depleção do detector semicondutor a partir de considerações eletrostáticas.

Os portadores de carga, criados pela radiação ionizante na forma de raios X, deslocam-se para os contatos de polaridade oposta seguindo as linhas de campo elétrico estabelecido através da tensão aplicada no detector.

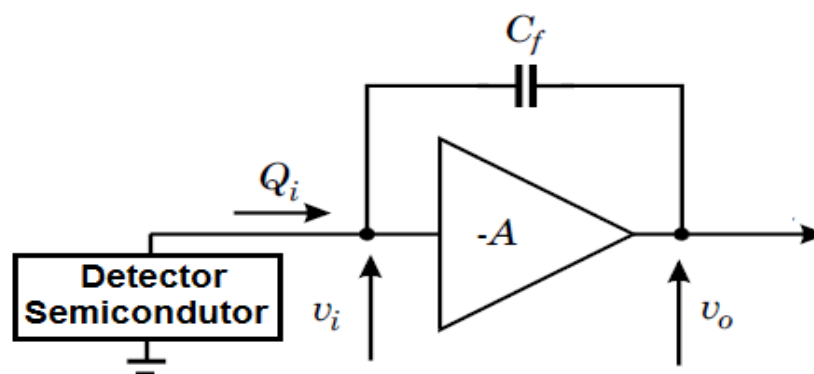
A velocidade de deriva dos elétrons é função do campo elétrico (para campos moderados, é proporcional ao valor do campo elétrico) e a carga induzida por um dado portador com carga  $q$  que se moveu uma distância  $\Delta x$  na direção do campo é  $\Delta q = q \cdot$



$\Delta x/W_D$ ) corresponde à sua contribuição individual de cada portador na corrente total  $I(t)$ .  $W_D$  é o comprimento total da região de depleção para um detector semiconductor planar, região na qual o campo elétrico está distribuído. Para detectores de germânio coaxiais,  $W_D$  será o raio do cilindro fabricado [9].

O tempo de subida  $T_S$  do pulso gerado por um detector semiconductor pode ser medido na saída do pré-amplificador sensível à carga, ilustrado na Figura 2.2. Se o pré-amplificador for suficientemente rápido, o tempo de subida será determinado pelos seguintes fatores: i) o tempo de coleta das cargas no detector  $T_R$ , ii) o tempo de subida do circuito equivalente ilustrado no circuito da Figura 2.1 e iii) tempo de manutenção de plasma dentro do material quando o bombardeamento por radiação ionizante é realizada por íons pesados.

Estes podem criar uma nuvem muito densa de pares elétron-lacunas (não ocorre para partículas leves, radiação gamma e raios X). Na maioria dos casos práticos, o tempo de coleta das cargas  $T_R$  costuma ser a componente dominante e embora o seu cálculo preciso seja muito complexo, a sua ordem de grandeza pode ser estimada por  $T_R = W_D \times 10^{-7}$  s para detectores de silício na temperatura ambiente e  $T_R = W_D \times 10^{-8}$  s para detectores de germânio operando na temperatura do nitrogênio líquido [9].



**Figura 2.2** – Exemplo de um circuito pré-amplificador integrador sensível à carga. Fonte: Adaptado da referencia [9].

Um outro parâmetro importante associado aos detectores semicondutores é o armadilhamento de cargas dentro do semiconductor que pode ocorrer quando o portador de carga (elétron ou lacuna) é capturado por uma impureza ou um centro de

captura que pode ser criado pela radiação ionizante. Define-se o tempo de deriva livre médio  $\tau^+$  por [9]:

$$\tau^+ = (N_t \cdot \sigma \cdot V_{th})^{-1} \quad (5)$$

Onde  $N_t$  é a densidade de centros de armadilhamento,  $\sigma$  é a área da seção de captura e  $V_{th}$  é a velocidade térmica.

Dentro da região de depleção dos detectores semicondutores, as armadilhas estão normalmente vazias, sendo que as cargas armadilhadas são constantemente reemitidas dentro da banda proibida e fazem parte do processo de transporte de carga. O tempo médio em que um dado portador permanece na armadilha é chamado de tempo médio de permanência na armadilha  $\tau_D$  e é fortemente dependente da temperatura [9]:

$$\tau_D = C \cdot \exp\left(\frac{-E_\tau}{KT}\right) \quad (6)$$

Onde  $C$  é uma constante,  $E_\tau$  é a energia de ativação da armadilha,  $K$  é a constante de Boltzmann e  $T$  é a temperatura absoluta.

Se o tempo médio de permanência nas armadilhas é da mesma ordem de grandeza ou maior que o tempo de deriva livre médio, os portadores de carga na região de depleção são perdidos na sua maioria durante o processo de coleta das cargas o que significa eficiência reduzida. Nesse caso, o resultado da resolução em energia será pobre.

Por outro lado, se o tempo de permanência nas armadilhas for ordens de grandeza menor do que o tempo de coleção de cargas, então o efeito das armadilhas passa a ser desprezível. Por isso, os dopantes mais empregados são o Li, P, B e Ga, porque apresentam características doadoras ou aceitadoras rasas dentro da banda proibida e não atuam como armadilhas efetivas [9].

Uma aproximação de primeira ordem normalmente empregada para estimar a eficiência de coleção de carga sujeita à influência das armadilhas com tempo de deriva livre médio  $\tau^+$  é dada por [9]:

$$\eta = 1 - \left(\frac{T_R}{2\tau^+}\right) \quad (7)$$

Onde  $\eta$  é a fração coletada das cargas que são induzidas dentro da região de depleção.

Nos espectrômetros modernos de raios gama que utilizam detectores de germânio, a eficiência de coleta é da ordem de 0,999 com  $T_R$  da ordem de  $10^{-7}$ s o que significa na equação (7) que  $\tau_+$  é da ordem de  $10^{-4}$ s. Como os valores típicos de  $V_{th}$  e  $\sigma$  são  $10^7$  cm/s e  $10^{-13}$ cm<sup>2</sup>, respectivamente, a concentração máxima de centros de armadilhamento no detector é da ordem de  $10^{10}$ cm<sup>-3</sup>, correspondendo à aproximadamente 1 armadilha para cada  $10^{12}$  átomos nos detectores de germânio.

### 2.3 Propriedades gerais dos detectores de radiação

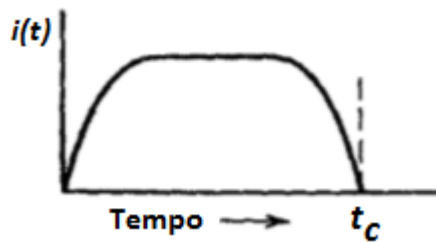
Neste item apresentaremos algumas definições básicas relacionados às propriedades dos detectores de raios X tais como eficiência e resolução em energia, discutiremos alguns modos de operação comumente empregados e também mostraremos alguns métodos de aquisição de dados.

De forma geral, a deposição de energia de uma dada partícula alfa ou um dado foton, por exemplo, de raios gamma nos detectores semicondutores pode ser considerada quase instantânea. Conforme vimos no item anterior, o resultado da interação da radiação com o volume ativo do detector é o aparecimento de carga elétrica nesse volume que mais tarde é coletada em um bloco pré-amplificador integrador sensível à carga como ilustrado na Figura 2.2 que irá formar um sinal elétrico na sua saída sendo que o tempo de detecção em detectores semicondutores costuma ser de alguns nanossegundos e depende da mobilidade dos portadores de carga dentro do volume ativo de depleção do detector semiconductor e do comprimento dessa região de depleção que deve ser percorrida pelos portadores de carga [9, 10].

Para o caso de uma única partícula ou um quantum de radiação  $Q$ , irá fluir uma corrente durante o tempo de coleta da carga  $t_c$  [9]:

$$Q = \int_0^{t_c} i(t). dt \quad (8)$$

A Figura 2.3, a seguir, ilustra a corrente  $i(t)$  durante o tempo de coleta  $t_c$ .



**Figura 2.3** – Esboço da corrente em função do tempo onde  $t_c$  representa o tempo de coleta da carga  $Q$  de cada evento. Fonte: Adaptado da referencia [9].

É importante destacar que em algumas situações, muitos *quanta* de radiação poderão interagir na região ativa do detector em um mesmo intervalo de tempo. Dessa forma, a corrente poderá acabar sendo uma composição de mais que uma interação para cada instante analisado.

Inicialmente vamos supor que a taxa de geração de cargas devido aos *quanta* de energia seja suficientemente baixa. Também é preciso considerar que a magnitude e duração de cada pulso de corrente poderão variar dependendo do tipo de interação e, nesse caso, a Figura 2.4 ilustra a situação em que cada interação é identificada através de pulsos independentes de corrente com diferentes amplitudes [9, 10].



**Figura 2.4** – Pulsos de corrente independentes representando interações individuais supondo a taxa de geração suficientemente baixa. Fonte: Adaptado da referencia [9].

### 2.3.1 Modos de operação dos detectores de radiação

Existem três modos de operação clássicos comumente empregados para os detectores de radiação: i) modo pulsado, ii) modo de corrente e iii) modo de tensão quadrática média (Mean Square Voltage, MSV) [9].

O modo pulsado é o mais amplamente empregado enquanto que os outros dois são utilizados em algumas aplicações específicas. Embora esses três modos de

operação estejam relacionados através da dependência comum da seqüência de pulsos de corrente associados cargas coletadas em cada interação radiação/detector.

No modo pulsado, a instrumentação para aquisição de dados é projetada para gravar cada *quantum* individual de radiação que interage com o detector. Nesse caso, a integral temporal de cada pulso de corrente ou a carga total  $Q$  de cada interação é gravada e permite dessa forma uma espectroscopia detalhada de radiação.

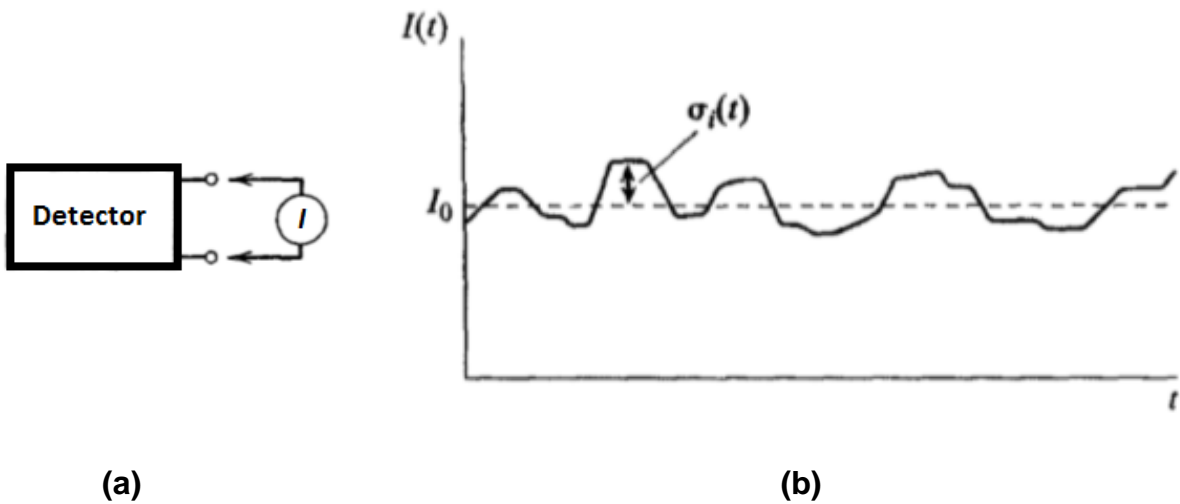
Na situação em que a intensidade da radiação é o parâmetro de interesse em lugar da informação da distribuição em energia da radiação incidente, pode-se fazer uma simples contagem de pulsos, por exemplo, através do registro do número de pulsos acima de um determinado valor de limiar. Em situações em que a taxa de eventos é muito alta, o modo pulsado torna-se impraticável para uma análise adequada dos cargas individuais  $Q$ , especialmente quando os pulsos de corrente passam ficar sobrepostos no tempo.

Nesse caso, será necessário empregar modos de operação que respondam à média no tempo de muitos eventos individuais. A operação no modo de corrente e no modo de tensão quadrática média são adequados para essa situação [9].

A Figura 2.5a mostra um dispositivo de medida de corrente conectado na saída do detector de radiação e a Figura 2.5b ilustra a corrente média medida. É esperado que ocorram flutuações aleatórias para os diversos instantes em que são feitas as medidas de corrente média  $I_o$ . Essa corrente média é dada pelo produto da taxa média de eventos e a carga produzida por evento [9]:

$$I_o = r \cdot Q = r \cdot \frac{E}{E_P} \cdot q \quad (9)$$

Onde  $r$  é a taxa de eventos,  $Q = E \cdot q / E_P$  é a carga produzida para cada evento,  $E$  é a energia média depositada por evento,  $E_P$  é a energia média necessária para gerar pares elétron-lacuna e  $q$  é a carga elementar ( $1,6 \times 10^{-19}$  C).



**Figura 2.5** – Corrente temporal dada pela soma da componente média  $I_0$  mais a componente aleatória  $\sigma_i(t)$ . Fonte: Adaptado da referencia [9].

Na condição de irradiação em regime estacionário no detector, a corrente temporal pode ser escrita como a soma de uma corrente média  $I_0$  mais a componente flutuante no tempo  $\sigma_i(t)$  como mostrado na Figura 2.5b.

Uma medida estatística representativa da componente aleatória é a variância ou valor quadrático médio  $\overline{\sigma_i^2(t)}$ , definido como a média quadrática temporal da diferença entre a corrente flutuante  $I(t)$  e a corrente média  $I_0$ . Esse valor quadrático médio é dado por [9]:

$$\overline{\sigma_i^2(t)} = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t [I(t') - I_0]^2 \cdot dt' = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \sigma_i^2(t') \cdot dt' \quad (10)$$

e o desvio padrão  $\overline{\sigma_i(t)}$  é dado por:

$$\overline{\sigma_i(t)} = \sqrt{\overline{\sigma_i^2(t)}} \quad (11)$$

Da estatística de Poisson, sabe-se que o desvio padrão está relacionado com o número de eventos  $n$  dentro de um dado periodo de observação o qual, por sua vez, é dado pelo produto da taxa de ocorrência  $r$  pelo tempo de medida  $T$  ( $n = r \cdot T$ ) [9]:

$$\sigma_n = \sqrt{r \cdot T} \quad (12),$$

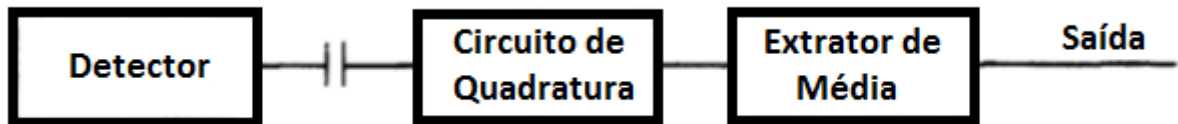
Se assumirmos que cada pulso associado a cada evento contribui com a mesma carga  $Q$ , a relação entre o desvio padrão e a corrente média no periodo de medida  $T$  é dado por:

$$\frac{\overline{\sigma_I(t)}}{I_o} = \frac{\sigma_n}{n} = \frac{1}{\sqrt{rT}} \quad (13)$$

Onde  $\overline{\sigma_I(t)}$  é o desvio padrão medio da corrente medida no periodo  $T$  e  $I_o$  é a corrente média. Esse resultado é muito útil no sentido de estimar a a incerteza associada à medida no modo corrente.

Também é importante destacar que na Equação 13, a carga produzida em cada evento ( $Q$ ) foi assumida constante, o que significa que são levados em consideração somente as flutuações aleatorias nos pulsos de corrente de cada evento, mas não as flutuações na amplitude desses pulsos individuais. Entretanto, em algumas aplicações, a segunda fonte de variância no sinal é pequena comparado com a primeira [9].

Será descrito a seguir de forma detalhada a operação no modo de tensão quadrática média (Mean Square Voltage, MSV) como parâmetro medido ao invés de corrente como descrito anteriormente. Uma forma de monitorar a tensão quadrática média está ilustrada na Figura 2.6.



**Figura 2.6** – Circuito para monitoramento da variância  $\overline{\sigma_I^2(t)}$  ou valor quadrático médio. Em particular, no circuito apresentado, a saída é uma tensão quadrática média que está sendo monitorado. Fonte: Adaptado da referencia [9].

O resultado na saída do circuito da Figura 2.6 corresponde à quantidade  $\overline{\sigma_I^2(t)}$  definida previamente na Equação 10. Combinando as equações 9 e 12 temos [9]:

$$\frac{\overline{\sigma_I^2(t)}}{I_o^2} = \frac{1}{rT} \Rightarrow \overline{\sigma_I^2(t)} = \frac{rQ^2}{T} = \frac{rC^2v_I^2}{T} \quad (14)$$

Onde  $C$  é a capacitância onde a carga  $Q$  é armazenada e  $v_I^2$  corresponde ao valor quadrático médio da flutuação de tensão na saída supondo que a carga produzida ( $Q$ ) em cada evento no detector seja aproximadamente constante.

O modo de operação por tensão quadrática média (MSV) é muito útil quando fazemos medidas em ambientes com diferentes tipos de radiação onde a carga produzida por um determinado tipo de radiação é muito diferente, por exemplo, de um segundo tipo.

No modo de operação de corrente, a medida do parâmetro corrente varia linearmente com as contribuições das cargas de cada tipo.

Já no modo de operação por tensão quadrática média, o sinal é proporcional ao quadrado da carga por evento. Esse modo de operação MSV dará, portanto, um maior peso à resposta do detector para radiação com maior carga  $Q$  por evento. Uma situação prática importante refere-se à instrumentação de reatores visando o enriquecimento do sinal de neutrons comparado com a resposta devida aos eventos de pequena amplitude associados, por exemplo, aos raios gamma [9].

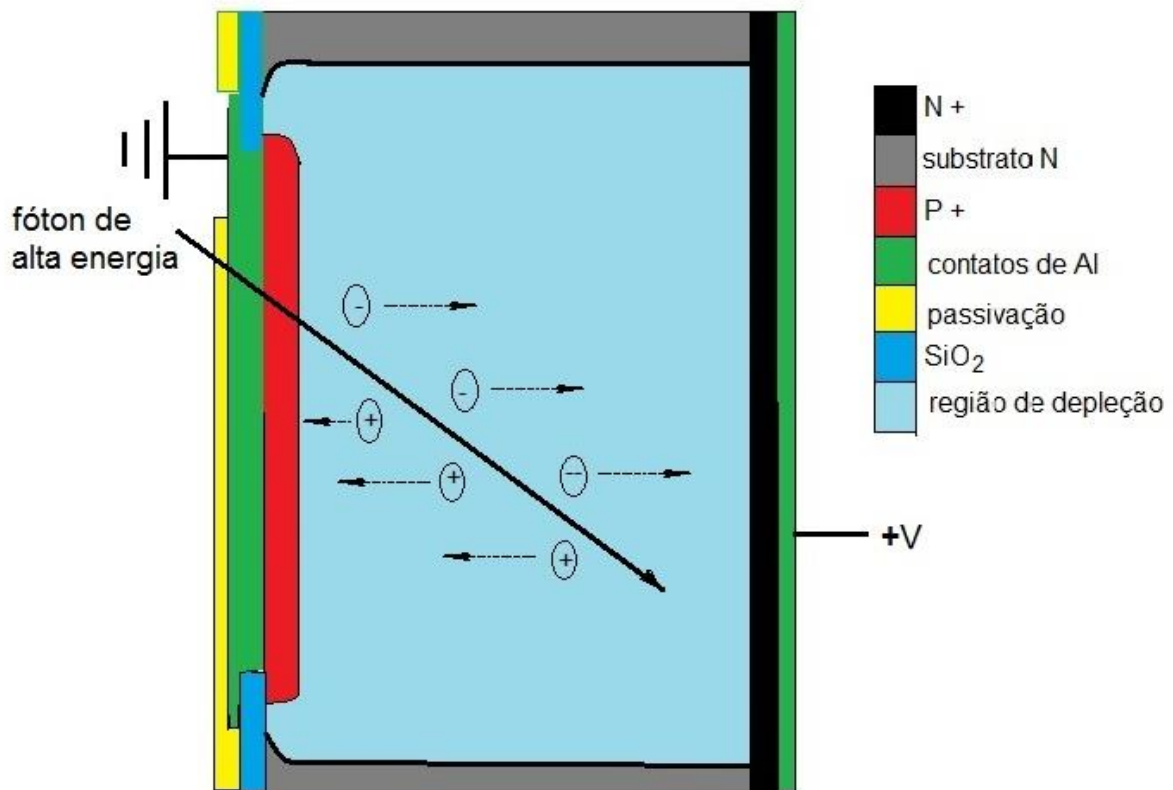
#### **2.4. O Diodo PIN**

A literatura traz como um importante elemento de detecção de fótons, tanto de raios X como de raios gama, o diodo PIN [13], sendo seu comportamento como detector muito interessante, visto que, em comparação com detectores convencionais, não necessita de refrigeração e pode ser construídos com técnicas conhecidas e relativamente baratas. [13]

Além disso, de maneira geral, detectores de radiação de silício apresentam baixa tensão de trabalho, alta sensibilidade, vida útil prolongada e robustez de operação [13], características que, obviamente, se aplicam ao Diodo PIN.

Nos diodos semicondutores comuns, a junção P-N acaba formando uma região isenta de portadores, a camada de depleção. Esta camada de depleção terá sua área ampliada quando for aplicada uma tensão reversa nos terminais do diodo. A fótons da radiação de raio X (ou outros tipos de radiação) atingem esta região, provocando o surgimento de pares elétrons-lacuna, gerando um incremento de corrente reversa diretamente proporcional a quantidade de fótons que atinge a camada de depleção (Figura 2.7).





**Figura 2.7** – Ilustração do processo de geração de pares elétrons-lacuna em uma junção PN iluminada com radiação ionizante. Fonte: Adaptado da referência [13].

Se na junção P-N for implantada uma região com silício de alta resistividade, a aplicação de tensões reversas da ordem de 50 V – ou mesmo 100V – podem criar regiões de depleção com dimensões de 300  $\mu\text{m}$  (ou mais), o que facilitará muito a geração de pares elétrons-lacuna com a incidência de radiação ionizante (como o raio X), tornando este dispositivo bastante adequado a detecção deste tipo de radiação. E é esta a principal característica construtiva do diodo PIN [13].

Os diodos PIN tem uma estrutura semelhante a um diodo retificador comum, com a diferença de que os semicondutores extrínsecos tipo P e N são separados por uma camada de semicondutor intrínseco (normalmente silício), ou seja, não-dopado ou levemente dopado.

Como a barreira de potencial é formada exatamente na junção PN, a presença do semicondutor intrínseco, que é um mau condutor, acaba aumentando a distância entre os semicondutores P e N, fazendo com que a região de depleção e a barreira

de potencial fiquem substancialmente maiores [7]. A estrutura interna simplificada e a sua representação simbólica são demonstradas nas Figuras 2.10 e 2.11



**Figura 2.8** – Representação simplificada da estrutura interna de um diodo PIN  
Fonte: Adaptado da referencia [20].

A explicação desta condição de importância da camada intrínseca existente no diodo PIN pode ser dada através de um exemplo prático, descrito na literatura: se cortarmos uma pedaço de silício de 1mm de espessura e com área de 1 cm<sup>2</sup>, teremos uma resistência, entre as duas faces, de cerca de 50 KΩ/cm. Nesta condição, se aplicarmos uma tensão de 500V, teremos uma corrente elétrica de 100 mA, através do silício.

Entretanto, apenas de fizermos incidir sobre este pedaço de silício uma radiação ionizante de 100 KeV, sem polarização, teremos uma corrente da ordem de 1μA [XX], o que dá bem a medida da influência do incremento das dimensões da região de depleção, provocado pela inserção da camada de silício intrínseco entre os cristais P e N.

Tal qual um diodo comum, quando é feita a implantação do cristal N sobre o cristal intrínseco, ocorre a difusão de portadores dentro da região isolante os quais, como em um diodo comum, irão alimentar a camada de depleção. Agora, vamos delinear o funcionamento do diodo em polarização direta e em polarização reversa.



**Símbolo do diodo PIN**

**Figura 2.9** – Símbolo esquemático do diodo PIN. Fonte: Adaptado da referencia [20].

#### **2.4.1 Polarização direta**

Em polarização direta, existe a difusão de portadores, tanto do cristal N quanto do cristal P, para dentro da região isolante, alterando as características de resistividade desta região. Sendo assim, o diodo passa a se comportar como um resistor variável por tensão, já que, quanto maior a tensão aplicada a seus terminais, menor fica a camada de depleção dentro da região isolante, maior fica a região populada de portadores e mais cargas são difundidas através delas, diminuindo sua resistência.

No entanto, devido a presença do material isolante, as tensões necessárias para forçar a condução através do diodo são maiores, o que o torna adequado para atuar como retificador para altas tensões [7, 20].

#### **2.4.2 Polarização reversa**

Na polarização reversa, a camada de depleção aumenta de largura com o aumento da tensão reversa aplicada. A presença da camada intrínseca faz com que o diodo PIN, nestas condições, se comporte como um capacitor variável com capacitância modulada pelo largura das camadas de depleção das camadas P, I e N, sendo que a camada isolante I em geral fica inteiramente depletada no regime de polarização reversa, devido à sua característica intrínseca com dopagem muito baixa ou sem dopagem.

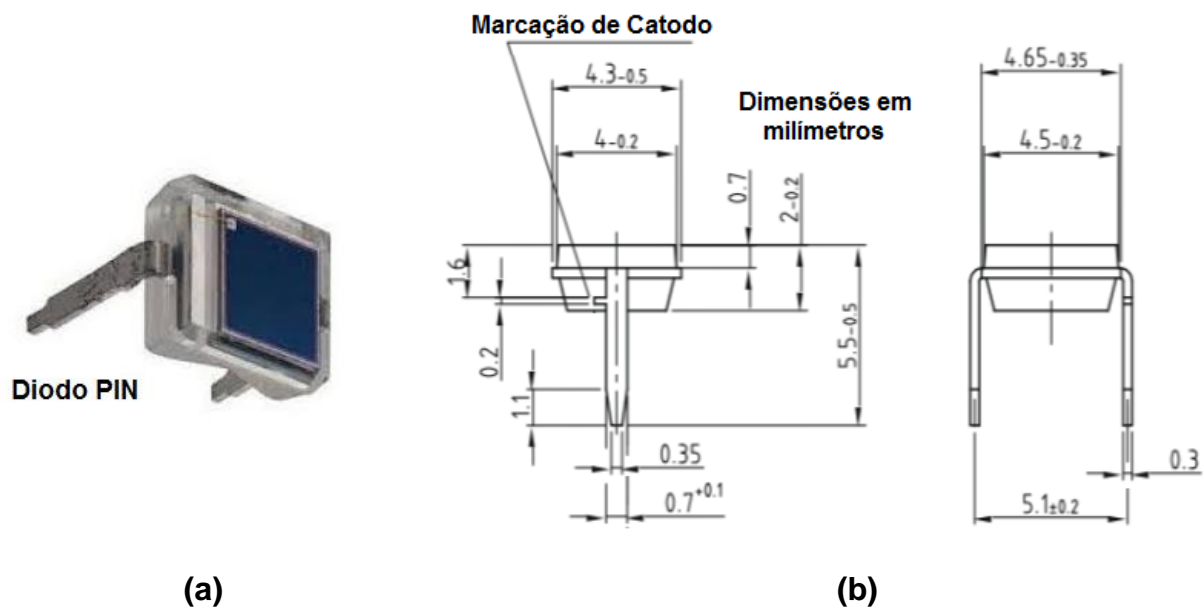
A camada intrínseca no diodo PIN inteiramente depletada permite alta sensibilidade à radiação luminosa devido à um largo volume ativo para geração de

pares elétrons-lacunas. O campo elétrico presente na camada intrínseca acelera os elétrons e lacunas em sentidos opostos, mas que corresponde à soma de correntes de deriva de elétrons e lacunas proporcionais à incidência de fótons, fazendo com que o diodo atue como um sensor eficiente tanto para luz como também para raios X [7, 20].

### 2.4.3. O diodo BPW34

O diodo BPW34, (da Vishay Semiconductors) é um diodo do tipo PIN que tem características de funcionamento e construção que o tornam adequados à utilização como sensor, dentro do projeto proposto, características estas que são a alta velocidade e alta sensibilidade a radiação, tendo um tamanho físico bastante reduzido e encapsulamento que auxilia na coleção de luz.

A Figura 2.10 mostra uma foto do diodo BPW34 e as dimensões fornecidas pelo fabricante. Dependendo do fabricante e do modelo, temos tensão reversa máxima suportada pelo dispositivo de até 60 V, com corrente reversa na faixa de 50  $\mu$ A [20];



**Figura 2.10** – Foto do do diodo PIN BPW34 (a) Dimensões em mm (b).  
Fonte: Adaptado da referencia [20].

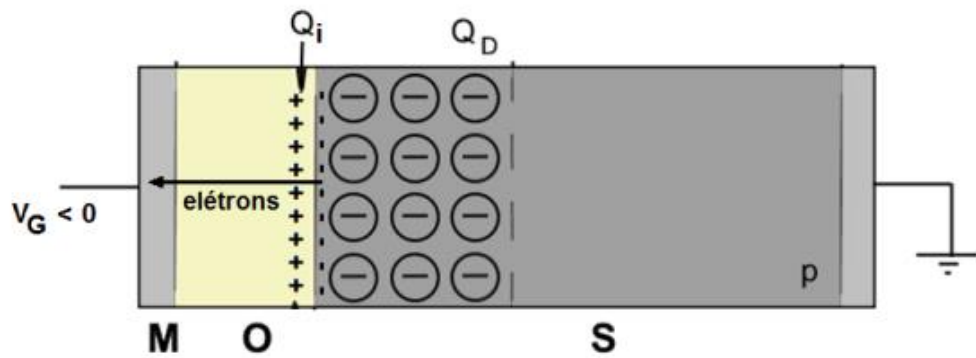
Estes diodos têm grande área sensível radiante ( $A = 7,5 \text{ mm}^2$ ), ângulo de cone amplo de  $\phi = \pm 65^\circ$ , largura da camada intrínseca de  $\sim 10 \text{ }\mu\text{m}$ , tempos de resposta rápidos ( $\sim 100 \text{ ns}$ ) e pequena capacitância de junção (10-60 pF) o que o torna um dispositivo adequado para a detecção de raios X como reportado na literatura [7, 24].

#### **2.4.4 O Diodo MOS**

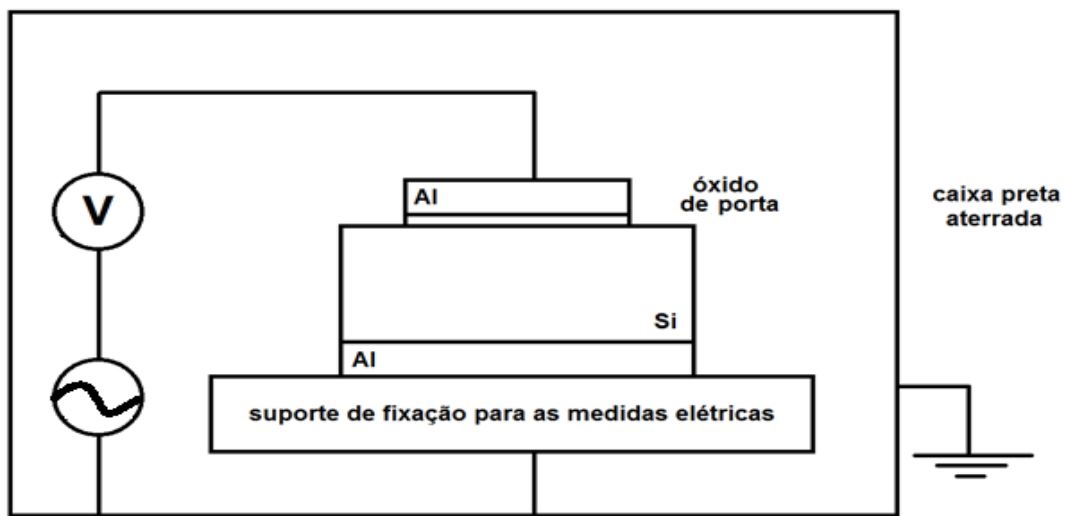
O Diodo MOS tem a estrutura do capacitor MOS, com dielétrico de porta ultrafino, através do qual a corrente tunela. A estrutura simplificada do diodo MOS está ilustrada na Figura 2.11(a).

Na situação de inversão com  $V_G < 0$ , os elétrons podem tunelar através do dielétrico com espessura inferior a cerca de 2nm. No detalhe da Figura 2.11(a), estão também indicadas a carga de interface  $Q_i$  e a carga de depleção  $Q_D$  [21]. A Figura 2.11(b) mostra o sistema de medidas empregado utilizando uma caixa preta metálica de blindagem para extração das características elétricas dos diodos MOS [21].

No diodo MOS, a porta de metal é o “catodo” e a substrato de silício atua como “anodo” do diodo. Com base na tese de doutorado de Abê [21], observa-se corrente intensa na condição de polarização direta e o aparecimento concomitante de uma camada de depleção no diodo MOS para  $V_G < 0$ . A característica I-V do diodo MOS, mostrada na Figura 2.12, apresenta uma região de operação direta e uma região de operação inversa, assim como um diodo de junção PN convencional [21].

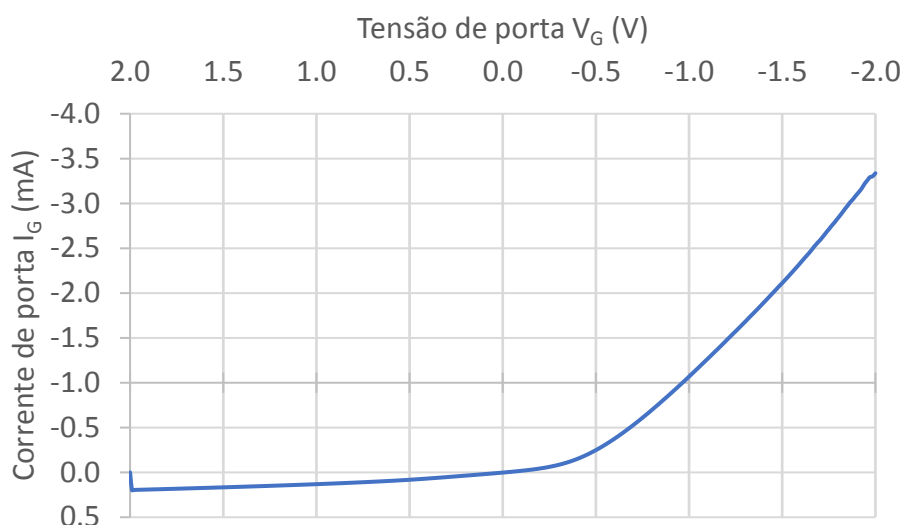


(a)



(b)

**Figura 2.11** – (a) Diodo MOS com a estrutura do capacitor MOS com dielétrico de porta ultrafino através do qual a corrente tunela. Na situação de inversão fraca e  $V_G < 0$ , os elétrons podem tunelar através do dielétrico. No detalhe, estão também indicadas a carga de interface  $Q_i$  e a carga de depleção  $Q_D$ . (b) Sistema de medidas dentro de uma caixa preta metálica de blindagem. Fonte: Adaptado da referencia [21].



**Figura 2.12** – Curva I-V típica de um diodo MOS onde  $V_G < 0$  corresponde ao sentido direto de polarização para a estrutura mostrada na Figura 2.13(a). Fonte: O próprio Autor.

### 3 Metodologia

#### 3.1 Processo construtivo dos diodos MOS

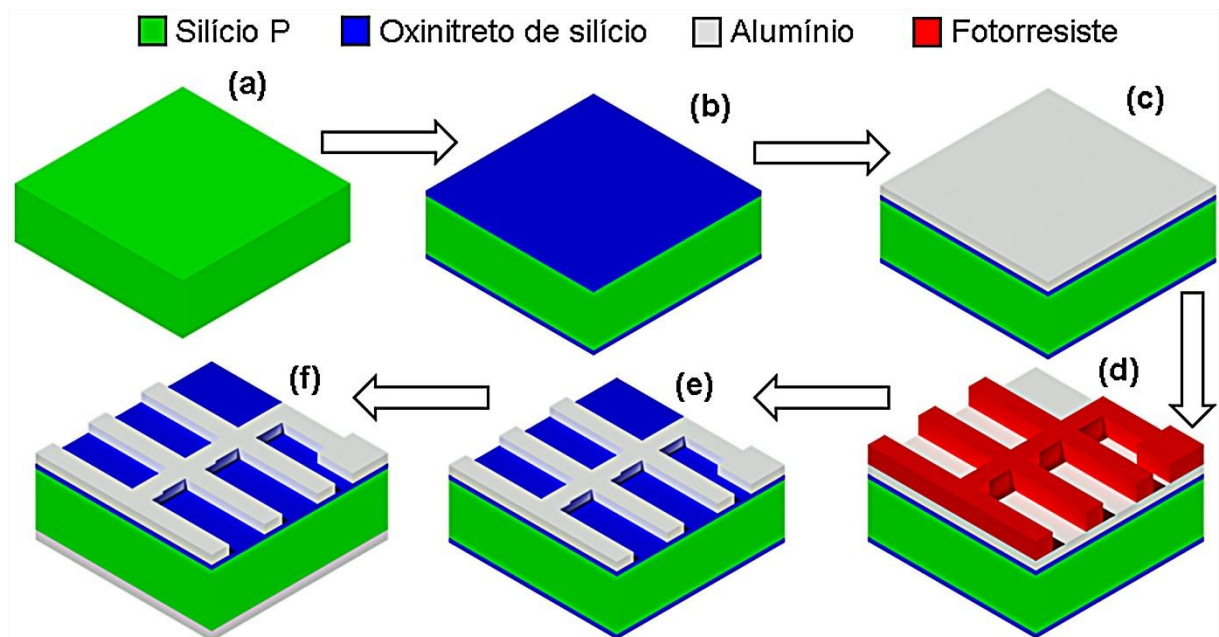
O processo de fabricação dos diodos MOS com porta de alumínio foi desenvolvido no grupo GSIDE (Grupo de Superfícies, Interfaces e Deposição Eletroquímica) do LSI/EPUSP. Foram utilizados substratos do tipo P (100) de 3 polegadas com espessura de aproximadamente 380  $\mu\text{m}$  e resistividade de (1 - 10)  $\Omega\cdot\text{cm}$ . A Figura 3.1 mostra o detalhamento do processo de fabricação do diodo MOS, iniciando pela limpeza química na etapa (a) e os diversos perfis nas diversas etapas posteriores.

O próximo passo após a limpeza química foi o crescimento do dielétrico de porta, pelo processo RTP, em 850  $^{\circ}\text{C}$  por 100 s, crescidos com espessura de 2,20 nm (etapa b).

Na sequência, depositou-se cerca de 200 nm de alumínio pelo processo PVD (etapa c) e depois utilizou-se a litografia óptica (exposição de fotorresiste positivo por luz UV) para definir as dimensões das células solares MOS (etapa d). Posteriormente,

foi realizada a corrosão do alumínio em solução com  $175 \text{ H}_3\text{PO}_4 + 70 \text{ H}_2\text{O} + 15 \text{ HNO}_3$  na temperatura de  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  (etapa e) e a remoção do fotorresiste.

O dielétrico crescido nas costas foi removido em solução diluída de HF ( $20 \text{ H}_2\text{O}: 1 \text{ HF}$ ) por meio de aplicação mecânica, com o uso de cotonete embebido na solução descrita, e, por fim, alumínio (200 nm) foi depositado nas costas (etapa f).



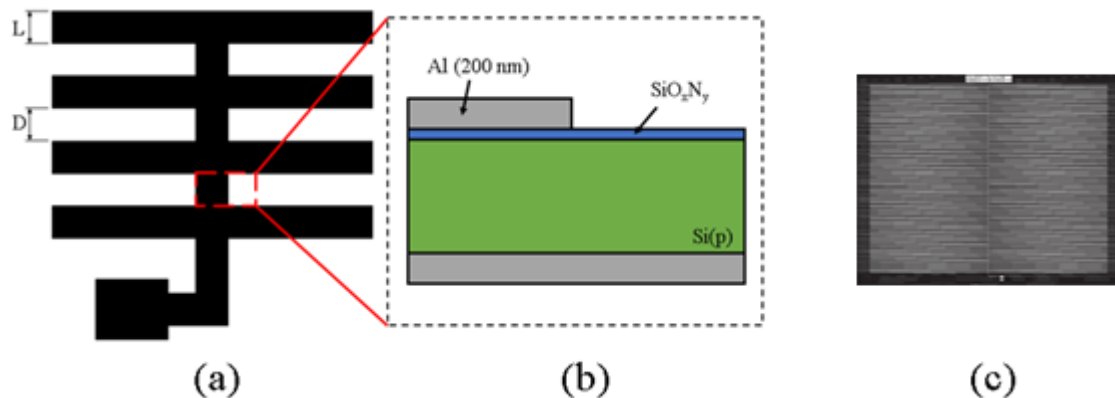
**Figura 3.1** – Estruturas obtidas durante a fabricação de diodos MOS. Fonte: Dissertação de mestrado de Marcos Watanabe [22].

No processo de fabricação dos diodos MOS (Figura 3.1), foi utilizada uma geometria com porta de alumínio de dedos múltiplos ou tipo “espinha de peixe” com largura ( $L$ ) de  $50 \mu\text{m}$  e distâncias ( $D$ ) entre linhas também de  $50 \mu\text{m}$ . A área total ( $A_T$ ) foi de  $3,24 \text{ cm}^2$  considerando o quadrado sobre o qual foi definido o reticulado de alumínio.

É importante destacar que a área que fica coberta pelo alumínio foi feita fina o suficiente (espessura de 200 nm) para deixar passar inteiramente raios X conforme reportado na literatura [7].

A Figura 3.2 mostra o diodo MOS em vista de topo (Figura 3.2a), em vista de perfil (Figura 3.2b) e a vista de topo da máscara empregada na fabricação (Figura 3.2c).



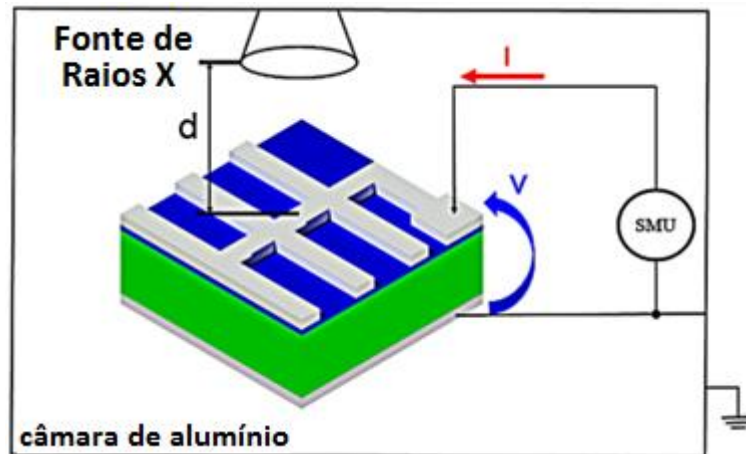


**Figura 3.2** – Ilustrações do diodo MOS vista de topo (a), de perfil (b) e a vista de topo da máscara (c). Fonte: Tese de doutorado de Verônica Christiano Abê [21].

A metodologia empregada nas caracterizações elétricas de diodos PIN e MOS, submetidos aos raios X, é descrita a seguir:

### 3.2 Caracterizações I-V

A montagem experimental empregada para a extração das curvas I-V (corrente-tensão) pode ser vista na Figura 3.3. As medidas elétricas foram realizadas com a ajuda de um Dispositivo de Aquisição de dados – Data Acquisition Console (DAC) National, modelo NI PXIe – 1073, dentro de uma caixa de alumínio para evitar problemas de interferência externa da luz e vazamento de raios X. A Figura 3.3 mostra o detalhe do diodo MOS sendo medido. A mesma montagem foi também empregada para realizar as medidas elétricas nos diodos PIN.



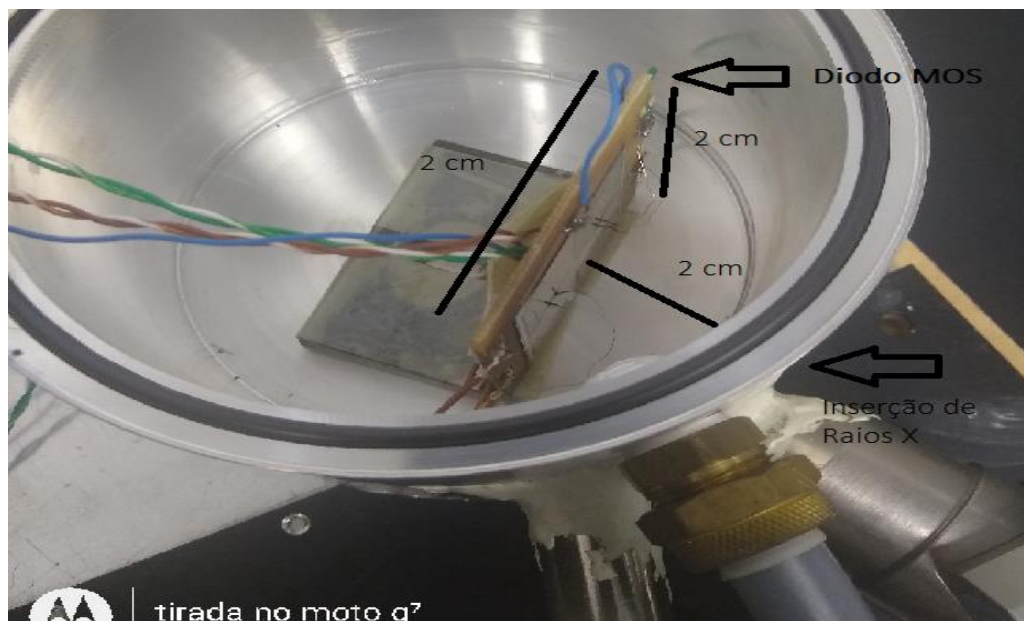
**Figura 3.3** – Montagem experimental empregada para a extração das medidas elétricas nos diodos MOS. Fonte: Adaptado da referência [22].

### 3.3 Equipamentos utilizados

Para a realização das medidas elétricas, foi feita uma montagem onde os diodos – tanto o PIN quanto o MOS – foram acomodados em uma câmara de alumínio isolada, isto com o objetivo de evitar escape de raios X, além de concentrar sua incidência dos mesmos sobre os diodos em estudo.

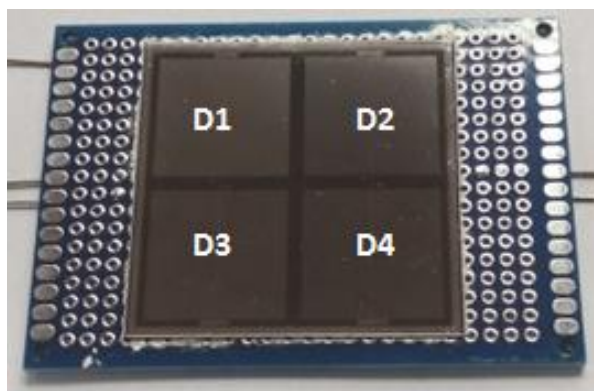
Lembramos que o alumínio, apesar de permitir que os raios X o atravessem para espessuras muito finas ( $< 1\text{mm}$ ), ele também bloqueia inteiramente a radiação na faixa da luz visível (desde espessuras muito finas,  $< 1\text{mm}$ ). Para a espessura da parede de alumínio na faixa do centímetro empregada na fabricação da câmara de medidas experimental, conseguimos uma proteção radiológica efetiva para o operador e ao mesmo tempo não houve escape apreciável para o ambiente (abaixo do limite de detecção de um contator Geiger).

A Figura 3.4 mostra uma foto da câmara de alumínio fabricada e os diodos MOS montados sobre uma placa de circuito impresso dentro da câmara isolada.



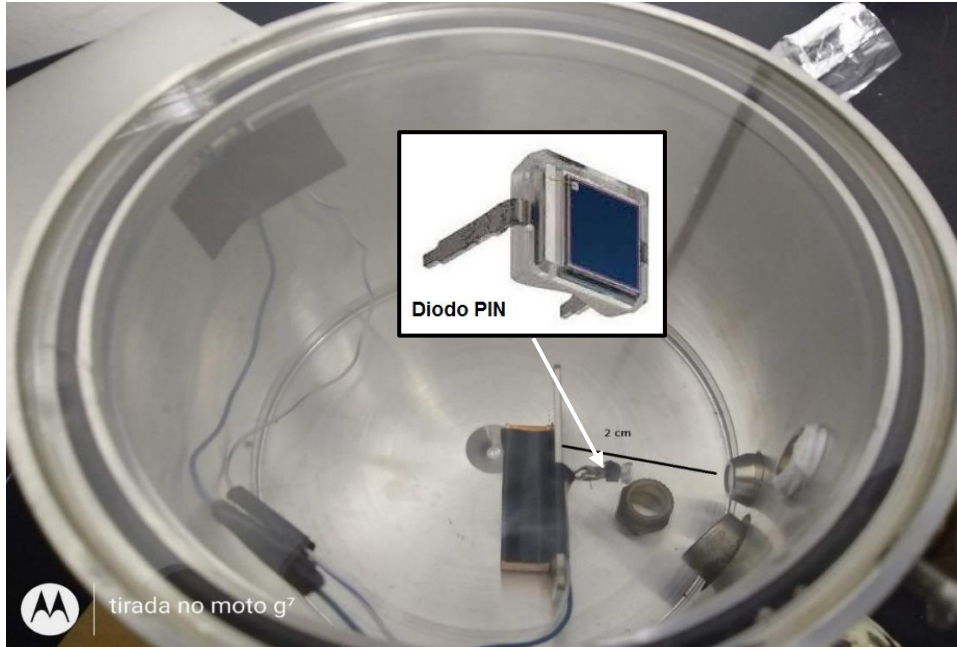
**Figura 3.4** – Montagem experimental mostrando o detalhe da placa de circuito impresso sobre a qual foram montados diodos MOS para serem expostos aos raios X dentro da Câmara de alumínio. Fonte: o próprio autor

A Figura 3.5 ilustra a placa de circuito impresso (PCB) sobre a qual foi feita colagem de lâmina de silício cortada na dimensão de 5 cm x 5cm, onde é possível observar quatro diodos MOS com dimensão lateral de 2 cm cada, sendo a área efetiva de absorção de fótons de raios X da ordem de  $3,24 \text{ cm}^2$ . O contato das costas aluminizadas da lâmina de silício foi feito através de cola de prata sobre a matriz de contatos do PCB. Os “pads frontais” de cada diodo (contatos de alumínio de  $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ ) foram soldados através da técnica “wiring bonding” utilizando fios de alumínio com  $50 \mu\text{m}$  de diâmetro. (Prof. Luis solicitou citar a figura depois)



**Figura 3.5** – Placa de circuito impresso (PCB) sobre a qual foi feita colagem de lâmina de silício cortada na dimensão de 5 cm x 5cm onde é possível observar quatro diodos MOS de mesma área com dimensão lateral de 2 cm cada. Fonte: O próprio Autor.

A figura 3.6 mostra o detalhe do diodo PIN comercial BPW34 montado dentro da câmara de alumínio.



**Figura 3.6** – Detalhe do diodo PIN BPW34 montado dentro da câmara de alumínio para extração das curvas I-V. Fonte: o próprio autor.

A DAC da National (Figura 3.7) empregada no presente trabalho tem a função de alimentar os dispositivos (diodos MOS e PIN) com uma tensão e/ou corrente conhecidas e realizar a leitura da corrente e/ou tensão geradas devido à incidência dos raios X.



**Figura 3.7** – Foto da DAC da National, modelo NI PXIe – 1073 empregada nas medidas elétricas. Fonte: o próprio autor

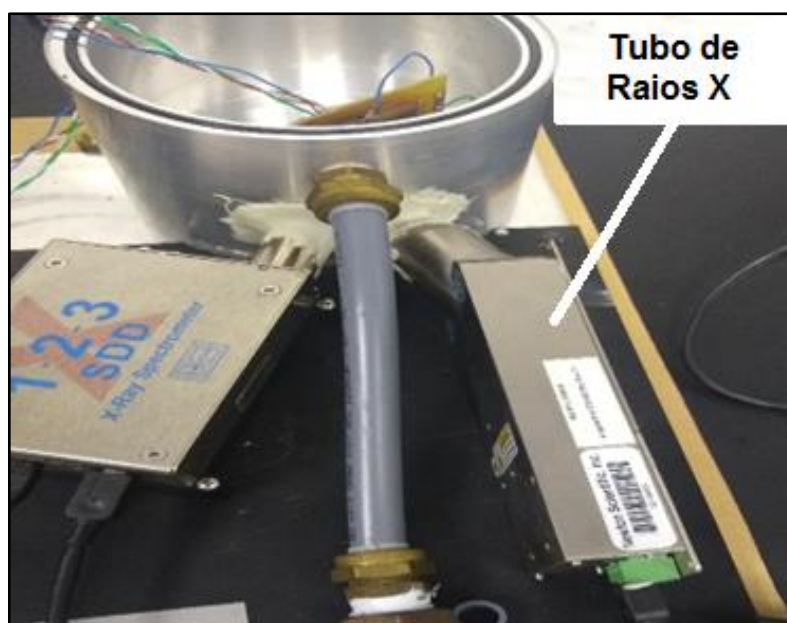
Polarizações de tensão reversa constante, na faixa de 0 a 5V, e de corrente reversa constante, na faixa de 0 a 200 nA, foram aplicadas aos diodos MOS e PIN, através do DAC da National, para extrair a resposta de corrente para polarização com tensão constante, conhecida como **operação no modo de tensão constante** como mostrado no item 2.3.1, e uma nova proposta alternativa, introduzida no presente trabalho, para o diodo MOS, que é baseada na resposta de tensão para polarização por corrente constante a qual vamos chamar de **operação no modo de corrente constante**.

Em ambos os casos, os diodos PIN e MOS foram submetidos a diferentes intensidades de iluminação de raios X dentro da câmara de alumínio aterrada, conforme mostrado nas Figuras 3.4 e 3.6. As curvas IxV também foram extraídas para diversas intensidades de iluminação de raios X e para dois comprimentos de onda distintos. O DAC National (modelo NI PXIe – 1073 com 4 canais,  $\pm 6$  V, 500 mA) foi programado para aplicar tensão, nos diodos PIN e MOS, de 1 V a -1 V e de 0 a 5 V, respectivamente, ambos com passo de tensão de 0,1 V para medida das características I-V nos 4 diodos que foram montados na câmara de alumínio (Figuras 3.4 e 3.5).

Um sistema de raios X miniatura (modelo Mini X da Amptek) [23] foi utilizado para iluminar os diodos, localizados a 2 cm de distância, com fluxo de aproximadamente 500 mSv/h, para tensão e corrente do tubo de raios X de 40 KV e 100  $\mu$ A, respectivamente, em um ângulo de cone de 120°. O sistema de raios X inclui um tubo de raios X de Ag ( $E = 22,1$  keV,  $\lambda = 0,00893$  nm), uma janela de berílio, um plugue de segurança de latão, a fonte de alimentação, a eletrônica de controle e as comunicações USB para o computador.

A fonte de alimentação de alta tensão variando de 10 a 40 kV produz uma tensão de polarização entre o alvo Ag (que é aterrado) e o filamento para corrente na faixa de 5 a 100  $\mu$ A.

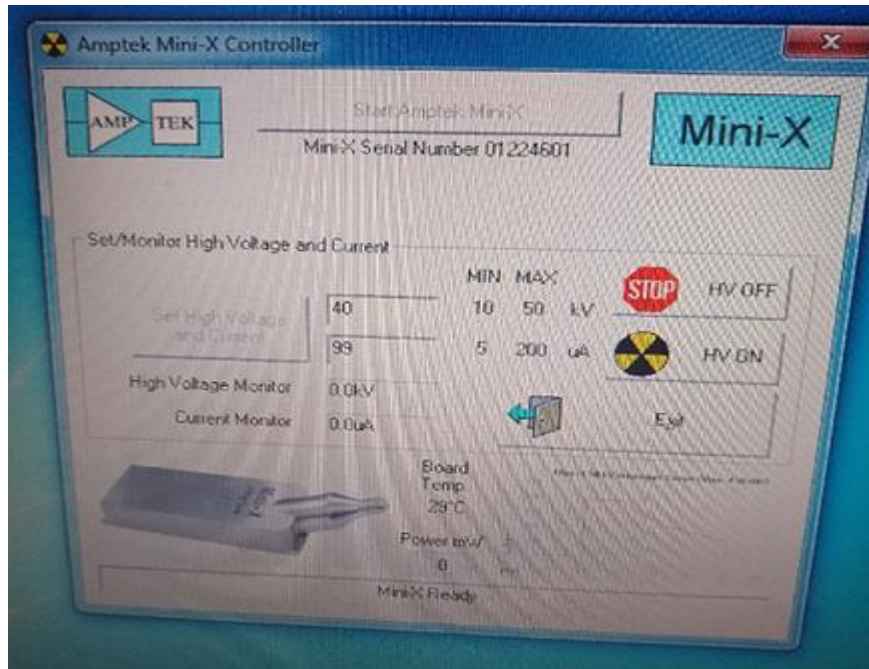
A Figura 3.8 a seguir ilustra o dispositivo de raios X conectado na câmara de medição.



**Figura 3.8** – Detalhe do sistema de raios X miniatura (modelo Mini X da Amptek) conectado na câmara de alumínio. O módulo SDD de espectroscopia mostrado do lado esquerdo não foi empregado. Fonte: O próprio autor.

O tubo de raios X é controlado por um *software* (módulo Amptek Mini-X Controller) para especificação da tensão e corrente de incidência dos raios X nas faixas de 10 a 40 KV e de 5 a 100  $\mu$ A, respectivamente. A Figura 3.9 ilustra a interface gráfica do *software* de controle do tubo de raios X.





**Figura 3.9** – Interface gráfica do software de controle do tubo de raios X.  
Fonte: O próprio autor

## 4 Resultados e Discussão

Será apresentado a seguir os resultados e discussão sobre a aplicação de diodos PIN e MOS na detecção direta de raios X nos modos de corrente e de tensão. Será também mostrado que a operação no modo de tensão para o diodo MOS é um procedimento novo e alternativo.

### 4.1 Detecção de raios X utilizando o diodo PIN

Após posicionar o diodo PIN BPW34 a uma distância de 2 cm do tubo de raios X de Ag, como mostrado na Figura 3.4, foram aplicadas tensões reversas constantes na faixa de 0 a -5V, para operação no modo de corrente constante e, também, correntes reversas constantes na faixa de 0 a 200 nA, com a alta tensão do tubo de raios X variando de 10 a 40 kV, com correntes de filamento variando de 50  $\mu$ A e 100  $\mu$ A.

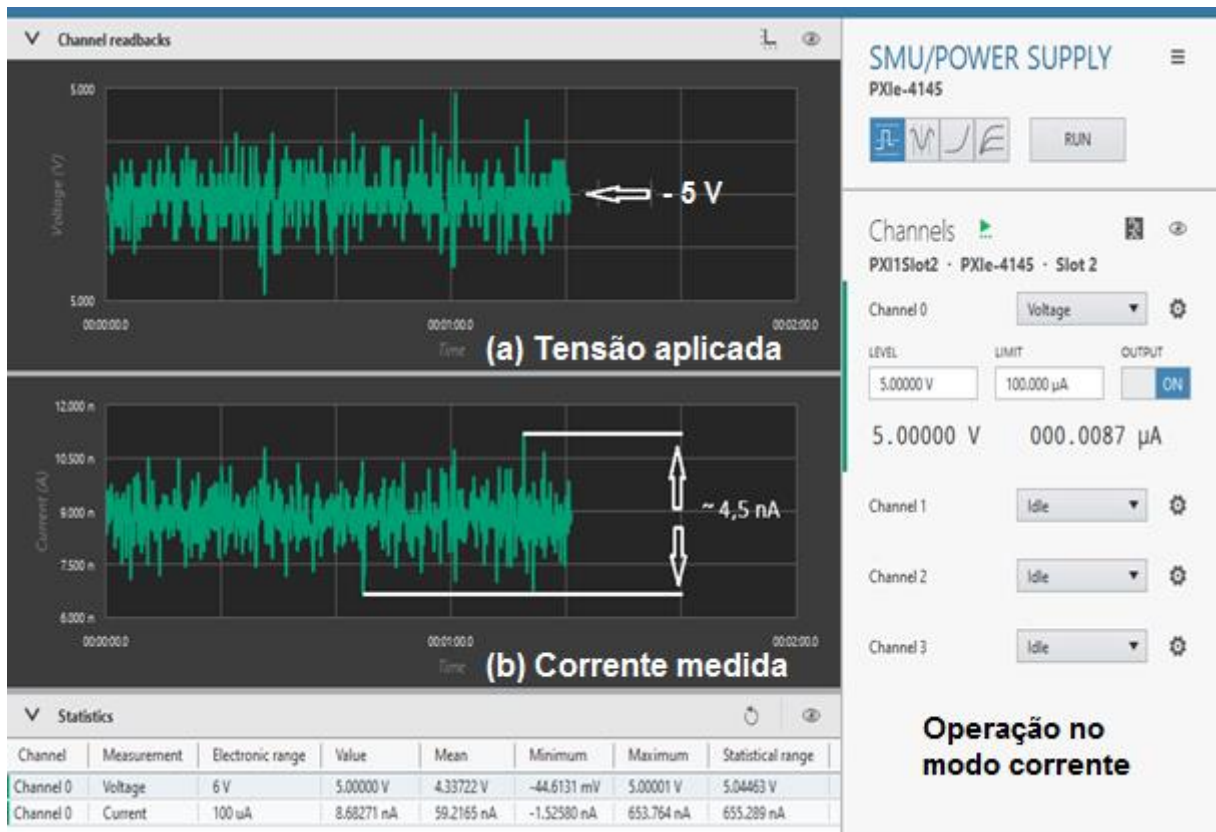
A Figura 4.1b a seguir ilustra a evolução no tempo da corrente através do diodo PIN, para uma tensão reversa aplicada de -5V, considerando o tubo de raios X operando com alta tensão de 10 KV e corrente de filamento de 50  $\mu$ A.

É importante observar a componente flutuante sobreposta ao valor de corrente medida pelo DAC, destacado na figura com 4,5 nA de amplitude, atribuída a flutuações aleatórias  $\sigma_i(t)$  como mostrado na Figura 2.5b e às flutuações na tensão reversa constante de -5V aplicada ao dispositivo como mostrado na Figura 4.1a. Essa situação corresponde a um valor relativo percentual da flutuação em relação à corrente medida (8,7 nA) de  $\sigma_i(t)/I = (5,2 \pm 0,8)\%$ .

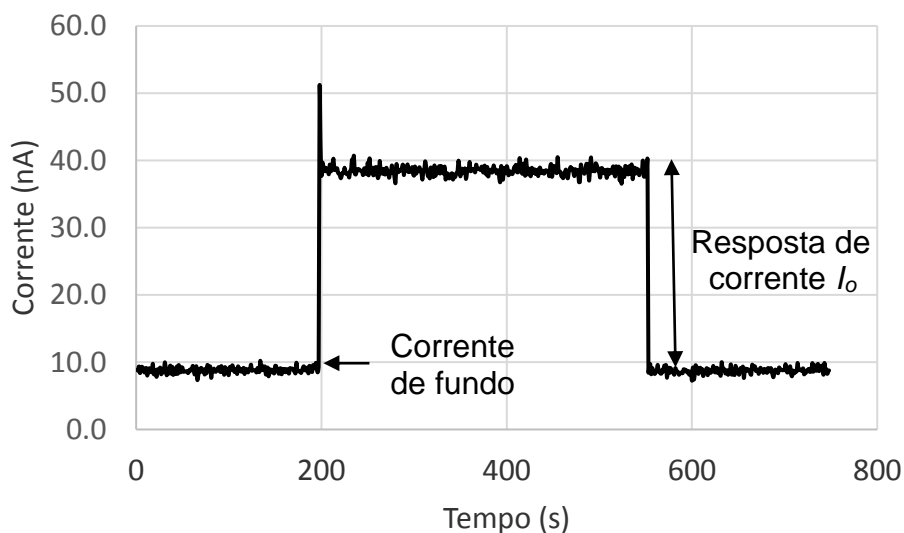
A Figura 4.2 mostra a resposta de corrente do diodo PIN, ao ligar o tubo de raios X com uma alta tensão de 40 KV, no instante  $t = 200$  s, para uma corrente de filamento de 100  $\mu$ A. Comparado com a Figura 4.1, o aumento da alta tensão e da corrente de filamento resultou em um valor relativo percentual da flutuação de corrente em relação à corrente medida semelhante com  $\sigma_i(t)/I$  de  $(5,1 \pm 0,6)\%$  (no patamar superior de corrente).

Se considerarmos apenas a resposta de corrente sem a corrente de fundo (corrente através do diodo sem a iluminação por raios X), o valor relativo percentual da flutuação de corrente resulta  $\sigma_i(t)/I_o = (6,5 \pm 0,7)\%$  e significa que a exatidão da medida de  $I_o$  não é influenciada substancialmente pela flutuação aleatória na operação no modo corrente.





**Figura 4.1** – Evolução no tempo da corrente através do diodo PIN (b) para uma tensão reversa aplicada de 5V (a) considerando o tubo de raios X operando na corrente de 50 µA e tensão entre anodo e filamento de 10KV. Fonte: O próprio autor

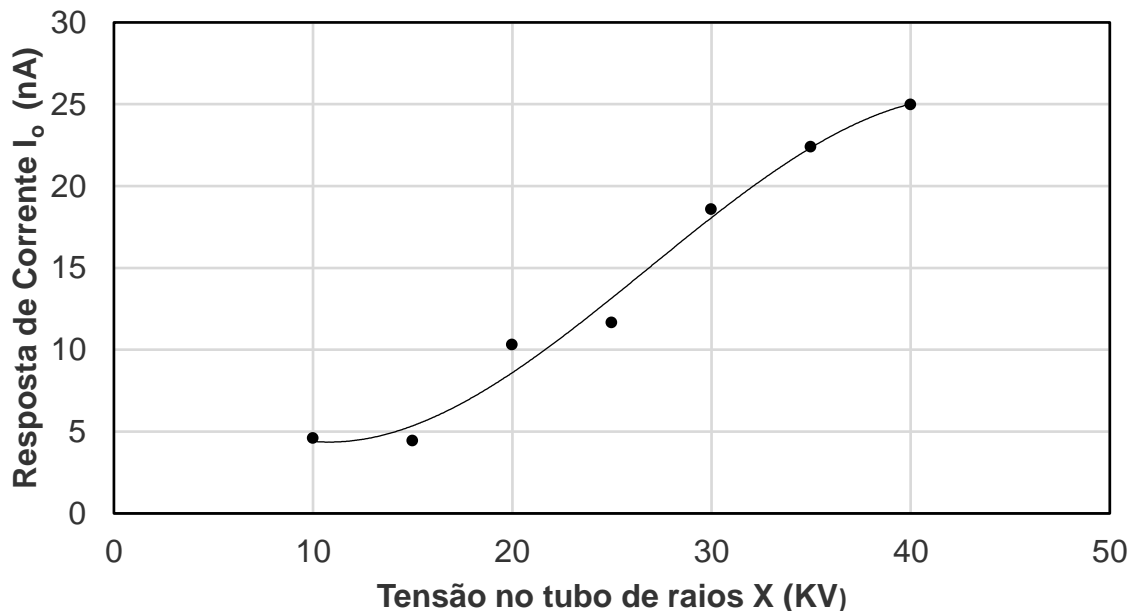


**Figura 4.2** – Resposta de corrente  $I_o$  do diodo PIN operando no modo de corrente, onde o tubo de raios X foi ligado em 40 KV no instante  $t = 200$  s para uma corrente de filamento de 100 µA (~ 500 mSv/h). Fonte: O próprio autor.

Ao polarizar o diodo PIN com corrente reversa constante, ocorreram flutuações aleatórias nos valores de tensão medida, onde os valores relativos, com relação à tensão média, ficaram acima de 80%, para uma ampla faixa de correntes constantes aplicada desde 0 até 30  $\mu\text{A}$ . A razão para este insucesso foi atribuída à dificuldade de manter constante simultaneamente as larguras das regiões de depleção dos materiais P, I e N no regime de corrente constante, antes e depois da iluminação com raios X, provocando com isso as grandes flutuações aleatórias na tensão medida.

A Figura 4.3 mostra a resposta de corrente  $I_o$  do diodo PIN, em função da tensão de polarização do tubo de raios X, para corrente de filamento de 50  $\mu\text{A}$ . Vale ressaltar que a resposta da corrente  $I_o$  aumenta com a tensão de polarização do tubo de raios X, com a tendência de apresentar saturação (curva com concavidade para baixo) para tensões acima de 30 kV.

Isso se deve, possivelmente, a uma menor taxa de geração de portadores na região de depleção, provocada por uma menor porcentagem de fótons energéticos para tensões acima de 30 KV com corrente de filamento de 50  $\mu\text{A}$ , ou seja, possivelmente a intensidade do tubo de raios X não apresenta linearidade com a tensão aplicada acima de 30 KV.



**Figura 4.3** – Resposta de corrente  $I_o$  do diodo PIN operando no modo de corrente em função da tensão do tubo de raios X para uma corrente de filamento de 50  $\mu\text{A}$ . Fonte: O próprio Autor

Diante dos dados coletados para 50  $\mu\text{A}$ , pudemos observar outros comportamentos. Também observamos que há uma potência mínima em que o diodo começa a responder ao realizar a aplicação do feixe de raios X.

Assim, quando é aplicada uma potência de 0,5W (50  $\mu\text{A}$  x 10KV), observa-se que o dispositivo apresenta saturação na resposta de corrente detectada, ficando praticamente a mesma até cerca de 15 KV, possivelmente porque a intensidade de raios X gerada não é proporcional à tensão de polarização do tubo de raios X nessa faixa [9].

Quando aplicamos uma potência um pouco maior – 0,75W, a resposta de corrente do diodo PIN passa a ser aproximadamente proporcional à tensão aplicada do tubo de raios X, até cerca de 30 KV. É importante também destacar o tempo de resposta do tipo “degrau”, na faixa de 0,8 a 1,0 s, logo que são aplicadas as altas tensões no tubo de raios X, na faixa de 10 a 50 KV. Essa resposta do tipo degrau na corrente medida pode ser apreciado retomando a Figura 4.2.

Acima de 30 KV, apesar da tendência de saturação o tempo de subida da corrente continua na faixa de 0,8 a 1,0 s para o diodo PIN, sendo que esse tempo depende da capacitância do cabo conectado entre a DAC e o dispositivo estimada como sendo da ordem de 500 pF.

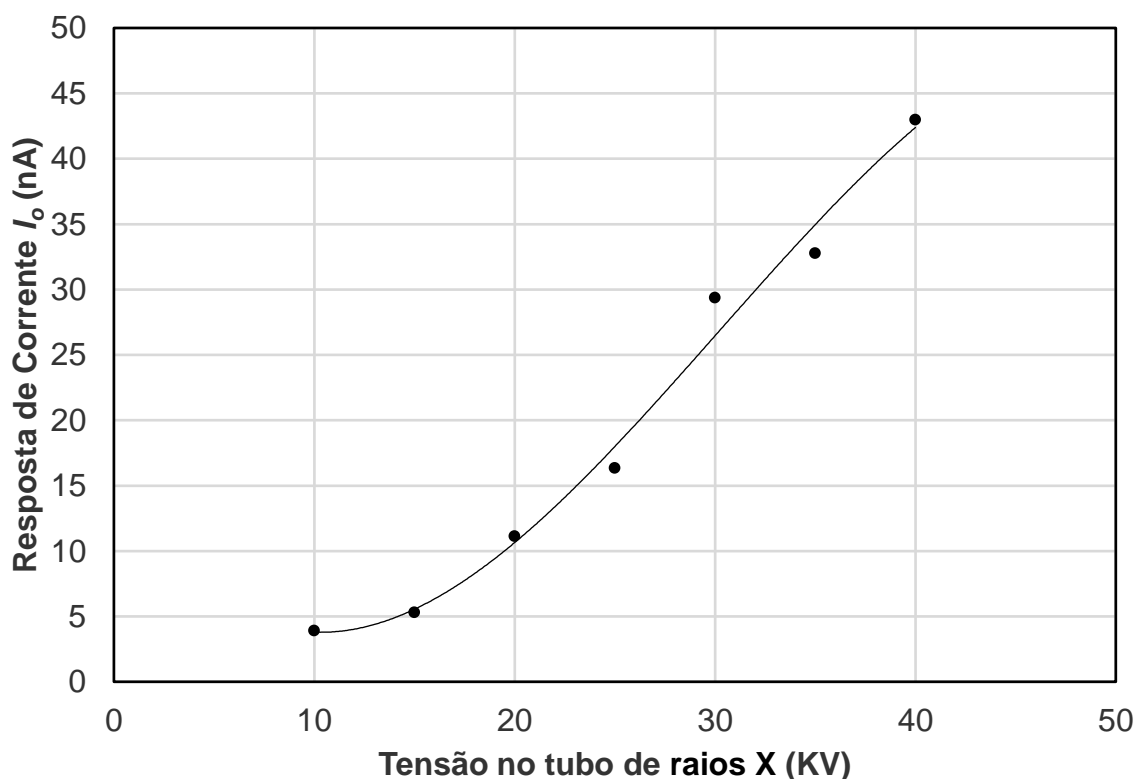
A presença de uma sobrecorrente (“spike”) chegando até cerca de 50 nA quando o feixe de raios X é ligado (Figura 4.3) corrobora o valor estimado da capacitância do cabo conforme reportado em [7]. levando a corrente reversa a valores instantâneos bem mais elevados que os valores de “platô” existentes nos “degraus”. Por exemplo, para a potência de 1,75W temos uma corrente e “platô” ficando em torno de 22 a 23 nA, mas com o “spike” chegando a quase 30 nA.

A Figura 4.4 mostra o gráfico da resposta de corrente  $I_o$  em função da alta tensão do tubo de raios X, para uma corrente do filamento de 100  $\mu\text{A}$ . Nesta Figura observamos que a tendência de saturação desaparece (curva com concavidade para baixo) comparado com a Figura 4.3 levantada com corrente de filamento de 50  $\mu\text{A}$ . No caso da Figura 4.4, a resposta da corrente  $I_o$  varia de forma aproximadamente linear com a tensão de polarização na faixa de ~15 KV e 40 KV.

Por outro lado, para tensões na faixa de 10 KV a ~ 15 KV, foi observado, assim como no caso da Figura 4.3, uma tendência de saturação na resposta de corrente detectada, porém com uma pequena tendência de crescimento até cerca de 15 KV, também possivelmente porque a intensidade de raios X gerada não é proporcional à tensão de polarização do tubo de raios X nessa faixa [9].

Também no caso da corrente de filamento de 100  $\mu\text{A}$ , é importante destacar que o tempo de subida da resposta do tipo “degrau” ficou na faixa de 0,8 a 1,0 s logo que são ligadas as altas tensões no tubo de raios X na faixa de 10 a 50 KV sobre o dispositivo.

Essa resposta do tipo degrau na corrente medida pode ser apreciado retomando a Figura 4.2. Acima de 30 KV, apesar da tendencia de saturação o tempo de subida da corrente continua, na faixa de 0,8 a 1,0 s, para o diodo PIN BPW34, sendo que esse tempo é função da capacitância do cabo conectado entre a DAC e o dispositivo, estimada como sendo da ordem de 500 pF, como já mencionado anteriormente.



**Figura 4.4** – Resposta de corrente  $I_o$  do diodo PIN operando no modo de corrente em função da tensão do tubo de raios X para uma corrente de filamento de 100  $\mu\text{A}$ . Fonte: O próprio autor

## 4.2 Detecção de raios X utilizando o diodo MOS

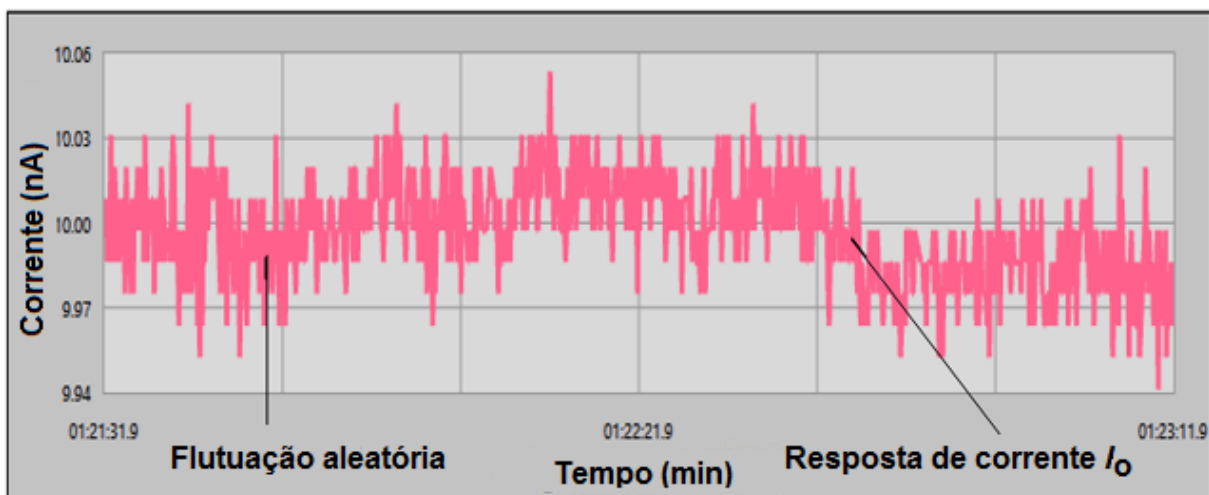
Tomando como base o estudo das características do diodo MOS, desenvolvido no grupo GSIDE do LSI/EPUSP [21], realizamos caracterizações elétricas semelhantes às que já foram apresentadas no item anterior para o diodo PIN.

Será mostrado que a operação no modo de tensão do diodo MOS, desenvolvido no LSI/PSI/EPUSP, é um procedimento novo e alternativo, comparado com os procedimentos discutidos no item 2.3.1 da revisão bibliográfica.

Assim como foi feito nas medidas realizadas nos diodos PIN, o fluxo de raios X nos diodos MOS irradiados foi variado na faixa de 0 a ~ 500 mSv/h. A porcentagem de energia do elétron que é transformada em raios X aumenta proporcionalmente ao aumento da alta tensão entre o alvo Ag (que está aterrado) e o filamento. Quando aumentamos a corrente do filamento, há um aumento da temperatura do catodo, liberando um número maior de elétrons.

Desta forma, mais elétrons serão acelerados em direção ao ânodo e haverá um aumento na intensidade da radiação gerada, sem implicar em um aumento na qualidade desta mesma radiação. Ou seja, conseguimos aumentar a intensidade sem aumentar a energia dos fótons irradiados.

Após posicionar o diodo a 2 cm do tubo de raios X de Ag, conforme mostrado na Figura 3.2, a tensão reversa constante na faixa de 0 a -5V e corrente reversa constante na faixa de 0 a 200 nA foram aplicadas aos diodos MOS mostrados na Figura 3.3, com a alta tensão de raios X variando de 10 a 40KV e correntes de filamento de 50 e 100  $\mu$ A. A detecção de raios X no modo de corrente constante foi inviável devido à dois fatores: (a) valor muito baixo da resposta de corrente  $I_o$  e (b) alta flutuação aleatória  $\sigma_i(t)$  sobreposta a corrente média  $I_o$  como mostrado na Figura 4.5.



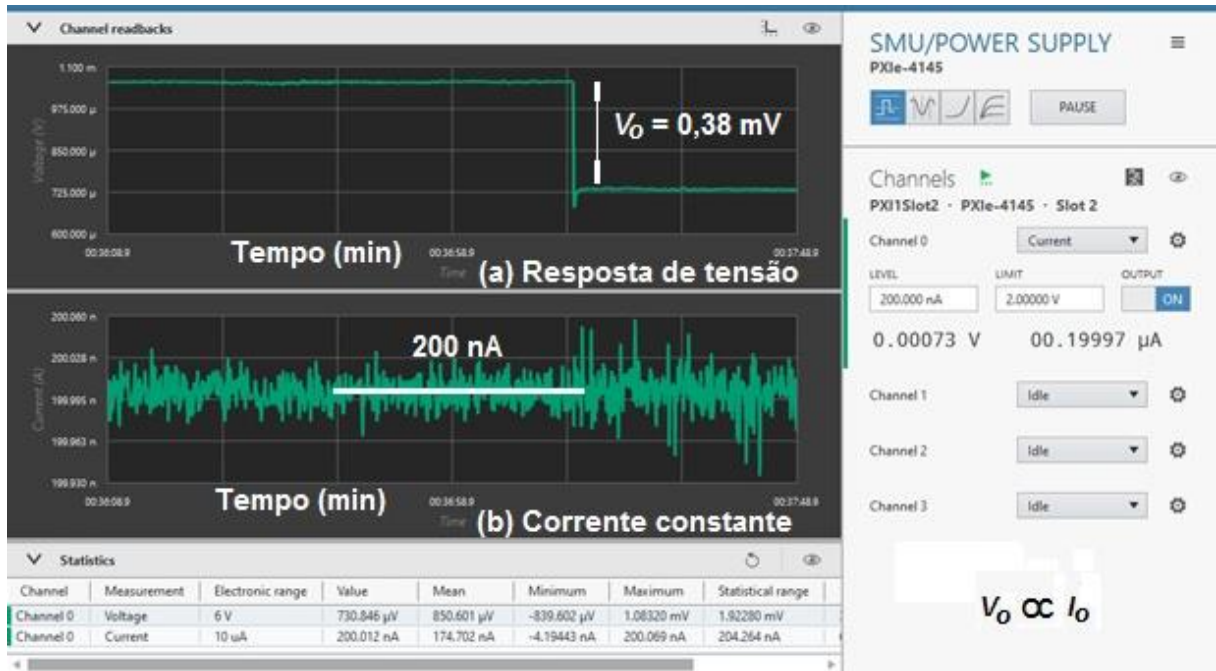
**Figura 4.5** – Resposta de corrente  $I_o$  para tensão constante de -1 V para o tubo de raios X polarizado em 40 KV com corrente de filamento de 100  $\mu$ A (~ 500 mSv/h).  
 Fonte: O próprio autor

A resposta de corrente  $I_o$  muito pobre apresentada na Figura 4.5 para o diodo MOS pode ser atribuído a uma rápida acomodação da largura da região de depleção aos pares elétron-lacuna gerados pelo fluxo ionizante de raios X na faixa de 0 a 500 mSv/h. Isto quer dizer que a rápida acomodação da largura da região de depleção acaba suprimindo uma corrente contrária àquela que é gerada fazendo que a resposta de corrente seja muito baixa.

Por outro lado, observou-se que a resposta de tensão para corrente aplicada constante é substancialmente melhor o que nos motivou a pesquisar o mecanismo pelo qual esse fenômeno ocorria. A Figura 4.6 ilustra o degrau de tensão  $V_o$  no diodo MOS quando o tubo de raios X é ligado em 40KV com corrente de filamento de 100  $\mu$ A.

É importante destacar ,na Figura 4.6, o tempo de resposta (subida e descida) do tipo “degrau”n a faixa de 0,8 a 1,0 s, logo que são aplicadas ou desligadas as altas tensões no tubo de raios X na faixa de 10 a 50 KV.

Assim como no caso do diodo PIN BPW34, esse tempo de resposta depende da capacitância do cabo conectado entre a DAC e o dispositivo estimada como sendo da ordem de 500 pF. A presença de sobretensão (“spike”) quando o feixe de raios X é ligado ou desligado (Figura 4.6) corrobora o valor estimado da capacitância do cabo conforme reportado em [7].



**Figura 4.6** – Degrau de tensão  $V_0$  no diodo MOS com corrente constante de 200 nA quando é ligada a fonte de raios X em 40KV x 100 μA. Fonte: O próprio autor.

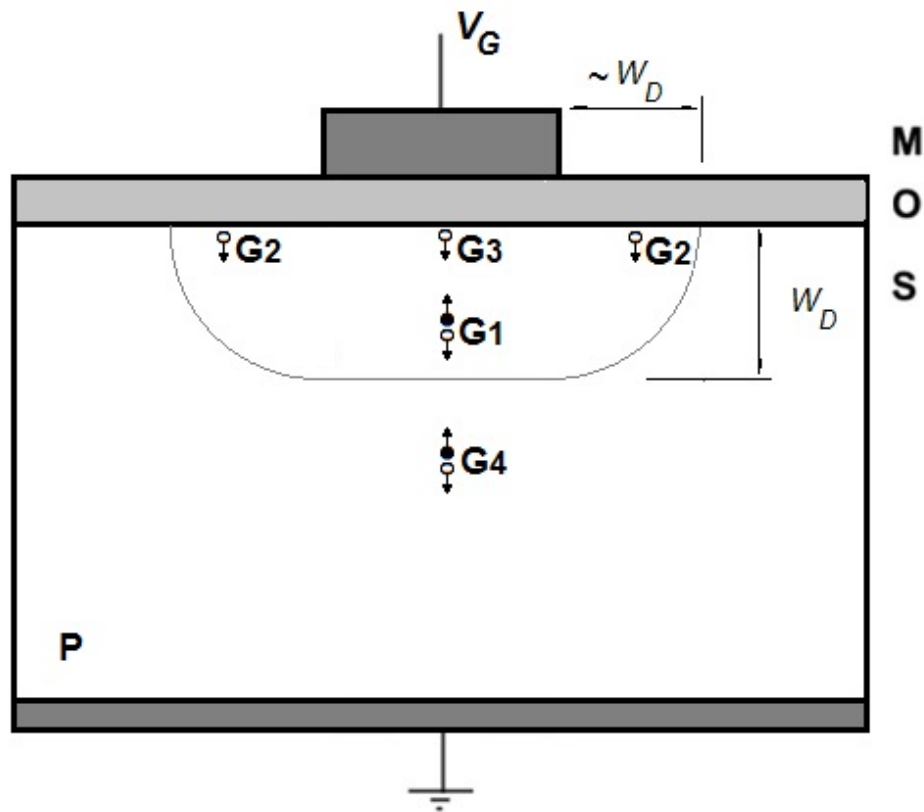
Vamos mostrar, a seguir, que o diodo MOS permite extrair o degrau de tensão  $V_0$ , indicado na Figura 4.6<sup>a</sup>, que corresponde à corrente média  $I_0$  gerada introduzida no item 2.3.1 quando polarizado com corrente constante (200 nA no caso da Figura 4.6). Vamos demonstrar que  $V_0$  é proporcional à corrente média  $I_0$  gerada pela radiação de raios X incidente em condições de medida específicas.

A corrente reversa transitória através de um diodo MOS ou a corrente transitória através de um capacitor MOS pulsado, da região de acumulação para a região de inversão, apresenta as componentes mostradas na Figura 4.7, a saber [24, 25]: 1) geração térmica na região de depleção ( $G_1$ ), 2) geração térmica na superfície da região adjacente à zona de depleção ( $G_2$ ), 3) geração na superfície semicondutora sob a porta ( $G_3$ ), 4) geração no corpo do semicondutor a uma distância menor ou igual a um comprimento de difusão das bordas da região de depleção ( $G_4$ ) [24, 25].

A Equação (15) a seguir indica a contribuição de cada uma das componentes de geração apresentadas na Figura 4.7 na corrente total  $I_R$  que passa através de um diodo MOS reversamente polarizado.

$$I_R = qn_i \cdot \frac{A_G \cdot W_D}{\tau_g} + qn_i \cdot A_S \cdot S_o + qn_i \cdot A_G \cdot S + \frac{qn_i^2 \cdot D_n}{N_A \cdot L_n} \quad (15)$$

onde  $q$  é a carga elementar,  $n_i$  é a concentração intrínseca de portadores,  $W_D$  é a largura da região de depleção de não equilíbrio,  $\tau_g$  é o tempo de geração de portadores minoritários,  $S_o$  é a velocidade de geração na porção lateral da região de depleção,  $S$  é a velocidade de geração na superfície sob a porta,  $A_G$  é a área de porta,  $A_S$  é a área superficial lateral da região de depleção,  $N_A$  é a dopagem do substrato,  $D_n$  é a constante de difusão dos portadores minoritários e  $L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n}$  é o comprimento de difusão dos portadores minoritários.



**Figura 4.7** – . Componentes de geração em um diodo MOS polarizado reversamente. Fonte: O próprio autor.

Para a situação de regime estacionário com corrente constante através do diodo MOS, podemos considerar, em primeira aproximação, cada um dos termos da Equação 15 como sendo constantes.

O último termo da Equação 15 é a componente gerada no corpo do semicondutor (componente  $G_4$  na Figura 4.7), conhecida como componente de saturação, sendo idêntica àquela que é definida para junções PN operando em regime de baixa injeção [25].



Ainda, em primeira aproximação, a área da superfície lateral da região de depleção mostrada na Figura 4.7 relativa à componente  $G_3$  pode ser escrita como :

$$A_S = P_G \cdot W_D \quad (16)$$

onde  $P_G$  é o perímetro da porta. Portanto, os dois primeiros termos na Equação 15 dependem diretamente da largura da região de depleção  $W_D$  enquanto que as outras duas componentes são independentes dela.

No regime de depleção, o potencial de superfície pode ser aproximado por [24]:

$$\Psi_S = \frac{qN_A \cdot W_D^2}{2\varepsilon_{Si}} \quad (17)$$

Isolando  $W_D$  na Equação 17 e substituindo na Equação 15, temos que a corrente reversa  $I_R$  no diodo MOS é dada por:

$$I_R = qn_i \cdot \frac{A_G}{\tau_g} \sqrt{\frac{2\varepsilon_{Si} \cdot \Psi_S}{qN_A}} + qn_i \cdot P_G \cdot S_o \sqrt{\frac{2\varepsilon_{Si} \cdot \Psi_S}{qN_A}} + qn_i \cdot A_G \cdot S + \frac{qn_i^2 \cdot D_n}{N_A \cdot L_n} \quad (18)$$

Supondo que o Diodo MOS esteja operando em regime estacionário com corrente constante e que um feixe de raios X passe a incidir no dispositivo provocando uma componente adicional de geração na região de depleção e também supondo que os dois últimos termos na Equação 18, que são independentes de  $W_D$ , não variem substancialmente para pequenos incrementos  $V_o$  no potencial de superfície  $\Psi_S$  devido à componente adicional de geração na região de depleção, podemos escrever que:

$$I_{Rx} = qn_i \cdot \frac{A_G}{\tau_g} \sqrt{\frac{2\varepsilon_{Si}(\Psi_S + V_o)}{qN_A}} + qn_i \cdot P_G \cdot S_o \sqrt{\frac{2\varepsilon_{Si}(\Psi_S + V_o)}{qN_A}} + qn_i \cdot A_G \cdot S + \frac{qn_i^2 \cdot D_n}{N_A \cdot L_n} \quad (18)$$

onde  $I_{Rx}$  engloba também a componente de geração devido à incidência de raios X através do incremento de tensão  $V_o$  no potencial de superfície.

Subtraindo  $I_R$  de  $I_{Rx}$  temos:

$$I_o = I_{Rx} - I_R = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{Si}qn_i^2}{N_A}} \left( \frac{A_G}{\tau_g} + P_G \cdot S_o \right) \left( \sqrt{\Psi_S + V_o} - \sqrt{\Psi_S} \right) \quad (19)$$

onde  $I_o$  é a corrente média gerada devido à incidência de raios X.

Se  $V_o \ll \Psi_s$ , a expressão  $\sqrt{\Psi_s + V_o}$  pode ser aproximada pelos dois primeiros termos da sua expansão em série de Taylor:  $\sqrt{\Psi_s}(1 + V_o/2\Psi_s)$ . Substituindo esses dois termos na Equação 19 temos:

$$I_0 = I_{Rx} - I_R = \sqrt{\frac{\epsilon_{Si} q n_i^2}{2N_A \Psi_s}} \left( \frac{A_G}{\tau_g} + P_G \cdot S_o \right) V_o \quad (20)$$

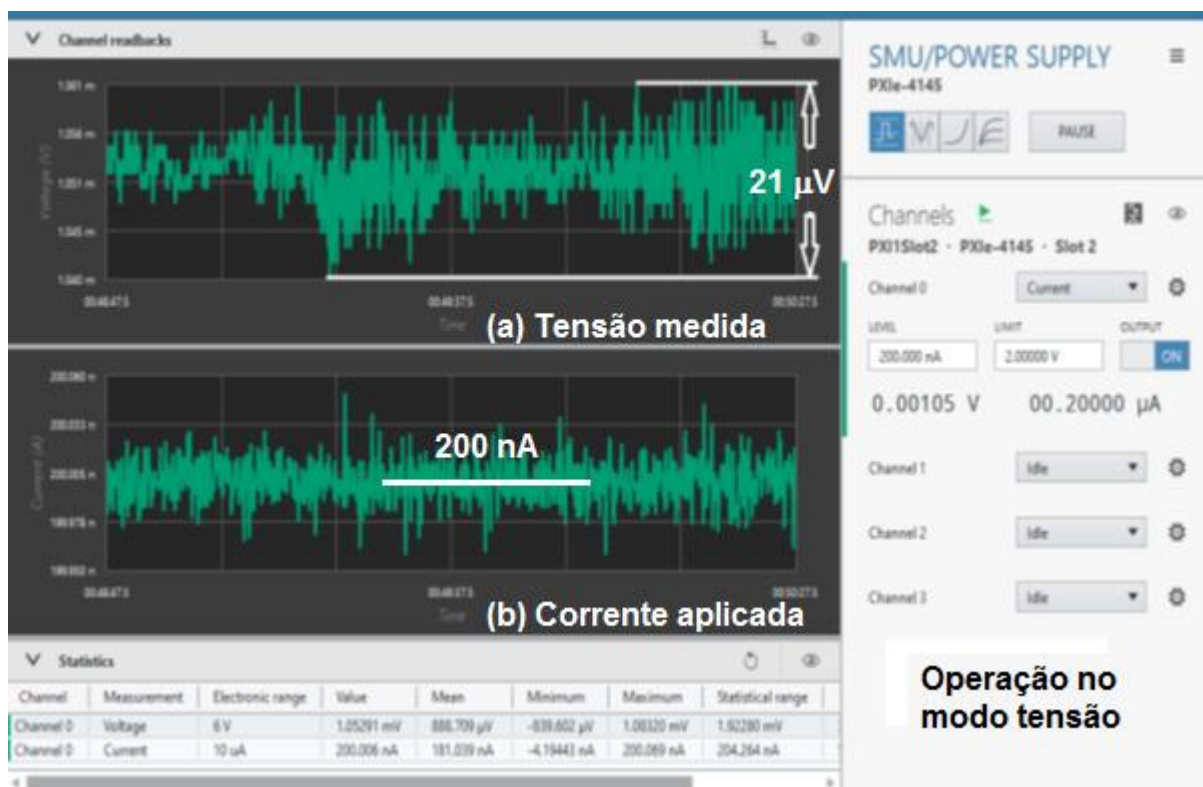
Portanto, o incremento  $V_o$  é diretamente proporcional à corrente média  $I_o$  gerada pela incidência de raios X se tivermos  $V_o \ll \Psi_s$ . Retomando a Figura 4.6, podemos observar que o degrau de tensão é de 0,38 mV o qual é cerca de duas ordens de grandeza menor do que o potencial de superfície  $\Psi_s$  cujo valor está na faixa de fração de volts na condição de medida empregada. Portanto,  $V_o$  é proporcional a  $I_o$ .

Por outro lado, é importante destacar, na Figura 4.6, que a corrente constante de 200 nA aplicada através do diodo é capaz de acomodar a corrente média  $I_o$ , cujo valor é muito baixo e se confunde com a flutuação aleatória observada (Figura 4.6b). Já o valor de  $V_o$  (Figura 4.6a) é nitidamente muito maior que o máximo valor de pico a pico da flutuação aleatória de tensão.

A Figura 4.8a ilustra a flutuação aleatória de tensão para uma corrente constante aplicada de 200 nA, com o tubo de raios X polarizado em 40 KV e corrente de filamento de 100  $\mu$ A. A máxima flutuação aleatória de pico a pico encontrada na Figura 4.8a foi de 21  $\mu$ V.

Com base nesse resultado, o valor relativo percentual da flutuação de tensão foi  $\sigma_i(t)/V_o = (5,5 \pm 0,6)\%$  e significa que a exatidão da medida de  $V_o$  não é influenciada substancialmente pela flutuação aleatória durante a operação no modo tensão. Os valores percentuais de flutuação aleatória de tensão nesse caso resultaram semelhantes aos valores percentuais de flutuação aleatória de corrente obtidos para o diodo PIN (compare o valor típico de  $\sigma_i(t)/V_o$  com o valor típico de  $\sigma_i(t)/I_o$  apresentado no item anterior).

Essa semelhança era esperada dado que em ambos os casos estamos extraindo a corrente média utilizando dispositivos e procedimentos diferentes.



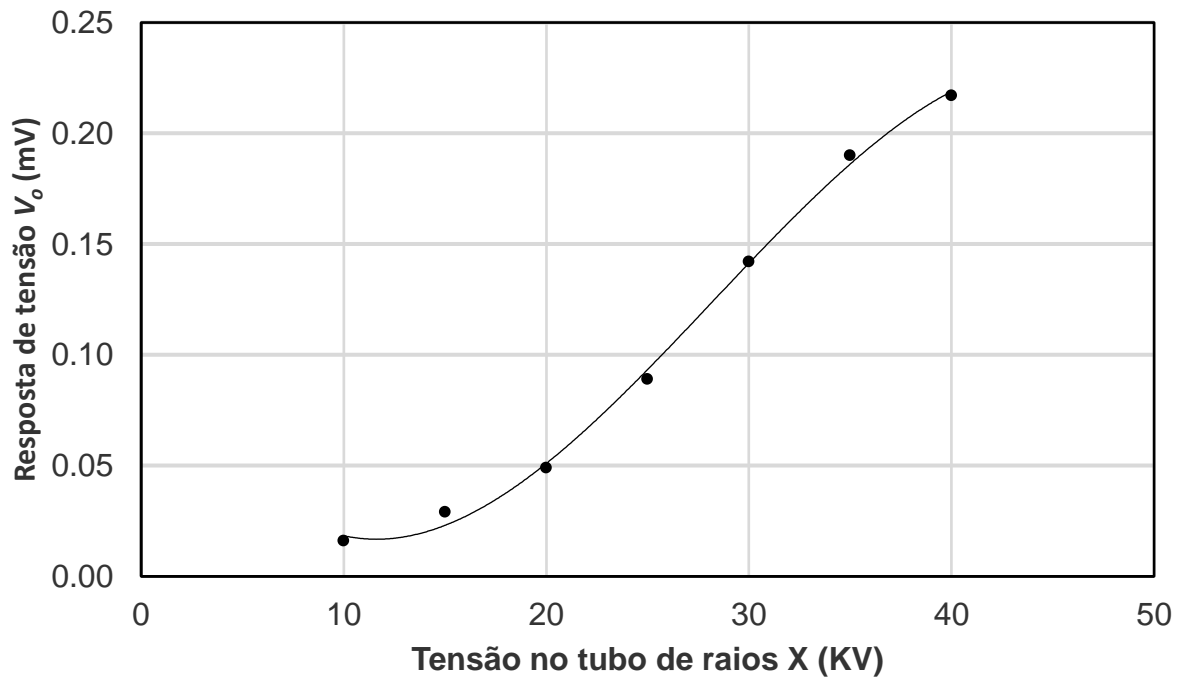
**Figura 4.8** – Evolução no tempo da tensão medida no diodo MOS (a) para uma corrente aplicada de 200 nA (b) considerando o tubo de raios X operando na corrente de 100 µA e tensão entre anodo e filamento de 40KV. Fonte: O próprio autor

A Figura 4.9 mostra a resposta de tensão  $V_o$  do diodo MOS em função da tensão de polarização do tubo de raios X para corrente de filamento de 50 µA. Vale ressaltar que a resposta de tensão aumenta proporcionalmente com a tensão de polarização maior que ~ 15 KV. Isso se deve ao aumento da porcentagem de elétrons que irão promover a geração de raios X à medida que a tensão de polarização aumenta.

Neste caso de operação no modo tensão, onde a corrente reversa é mantida constante, a largura da região de depleção do diodo MOS permanece quase constante e a resposta de tensão  $V_o$ , conforme já mostrado anteriormente, é consequência do pequeno incremento da queda de tensão na região de depleção devido à geração de pares elétron-lacuna (Equações 18, 19 e 20).

Por outro lado, para tensões na faixa de 10 KV a ~ 15 KV, foi observado uma tendência de saturação na resposta de tensão detectada, possivelmente porque a intensidade de raios X gerada não é proporcional à tensão de polarização do tubo de

raios X nessa faixa [9]. Esse comportamento já havia sido observado anteriormente para a resposta de corrente nos diodos PIN e corrobora a mesma hipótese.



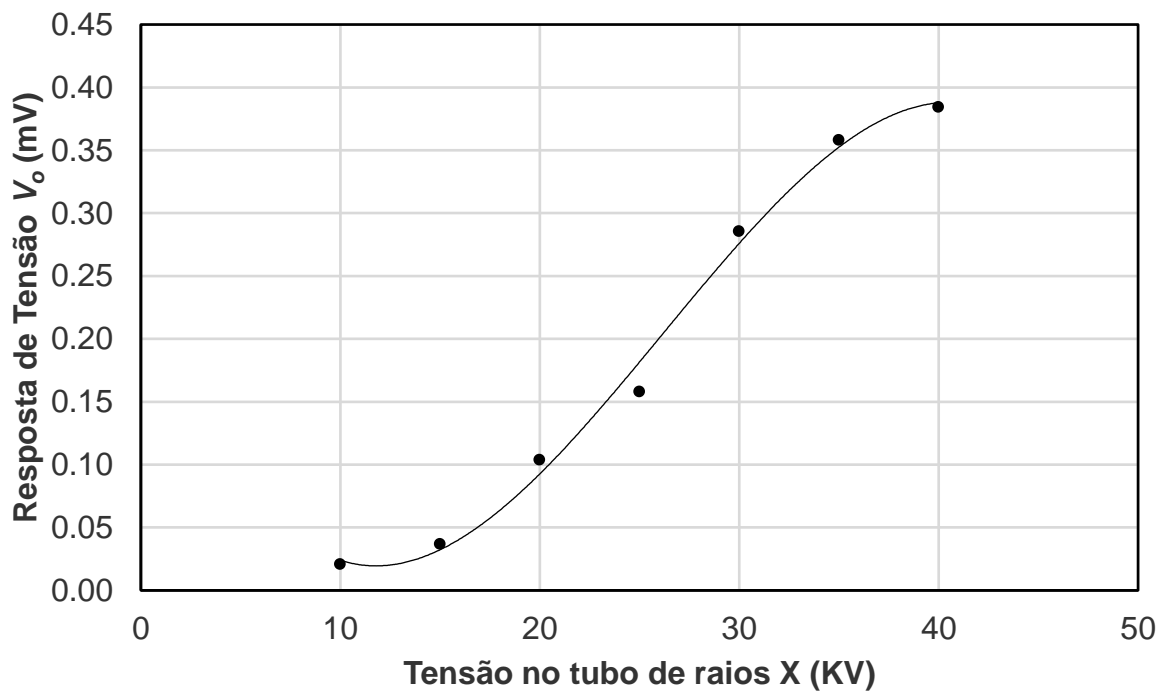
**Figura 4.9** – Resposta de tensão do diodo MOS no modo de corrente constante (200 nA) em função da tensão do tubo de raios X para corrente de filamento de 50  $\mu$ A. Fonte: O próprio autor

A Figura 4.10 mostra a resposta de tensão  $V_o$  do diodo MOS em função da tensão de polarização do tubo de raios X para corrente de filamento de 100  $\mu$ A. É importante destacar que a resposta da tensão  $V_o$  aumenta com a tensão de polarização do tubo de raios X, com a tendência de apresentar saturação (curva com concavidade para baixo) para tensões acima de 30 KV.

Isso está associado ao aumento da intensidade do feixe de raios X, com o aumento da corrente de filamento, o que significa um maior número de fótons com energia bem superior a largura da banda proibida, o que pode resultar em menor eficiência de geração de pares elétron-lacunas (menor parâmetro “Fano” na Equação 2) na região de depleção do diodo MOS, cuja largura é de  $\sim 1 \mu\text{m}$  ( $N_A \sim 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ).

Sob o ponto de vista comparativo, a largura da camada intrínseca do diodo PIN ( $\sim 10 \mu\text{m}$ ) é cerca de dez vezes maior e não apresentou esse efeito de degradação de eficiência. Além disso, a literatura também reporta que o menor volume da camada

ativa de depleção pode influir diretamente na degradação do parâmetro “Fano” que tipicamente é da ordem de 0,1 [9].



**Figura 4.10** – Resposta de tensão do diodo MOS no modo de corrente constante (200 nA) em função da tensão do tubo de raios X para corrente de filamento de 100  $\mu$ A. Fonte: O próprio autor

Sob o ponto de vista comparativo, a largura da camada intrínseca do diodo PIN (~ 10  $\mu$ m) é cerca de dez vezes maior e não apresentou esse efeito de degradação de eficiência. Além disso, a literatura também reporta que o menor volume da camada ativa de depleção pode influir diretamente na degradação do parâmetro “Fano” que tipicamente é da ordem de 0,1 [9].

Os diodos MOS e PIN são sensíveis à detecção de raios X com fluxo de até 500 mSv/h, faixa que engloba os limites máximos relatados para alguns casos de aplicações em radioterapia e de diagnóstico médico estão na faixa de mSv/h, conforme recomendado pela Comissão Nacional de Energia Nuclear do Brasil [26]. (Prof. Luis sugeriu criar outro tópico)

A operação do diodo PIN no modo corrente e a operação do diodo MOS no modo tensão, ambas são regidas pela carga gerada na região de depleção, caracterizada por muitos eventos individuais sobrepostos no tempo, o que torna possível obter a resposta de corrente média devido à carga gerada no tempo [9] ou à

tensão média proporcional à corrente média através de uma região de depleção estacionária do diodo MOS conforme proposto neste trabalho. Assim, a razão entre a resposta de corrente do PIN e a resposta de tensão do MOS é aproximadamente constante por unidade de área para cada intensidade em uma determinada energia de raios X. Como resultado, os diodos MOS ou PIN podem ser usados para detecção de raios X com sensibilidades semelhantes para aproximadamente a mesma faixa de flutuação aleatória.

## 5 Conclusões e Perspectivas Futuras

Foi mostrado a detecção de raios X utilizando diodos MOS e PIN operando nos modos de corrente constante e de tensão constante, respectivamente.

Os diodos MOS apresentaram resposta elétrica apenas no modo de corrente constante em função da tensão de polarização do tubo de raios X para fluxo variando de 0 a cerca de 500 mSv/h. A resposta de tensão aumentou de 0 a 0,40 mV para a tensão de polarização de raios X variando de 0 a 40 KV e corrente de filamento de até 100  $\mu$ A. Foi mostrado que a operação no modo de corrente constante do diodo MOS desenvolvido no presente trabalho é um procedimento novo e alternativo comparado com os procedimentos discutidos na literatura.

Por outro lado, ao contrário do diodo MOS, o melhor desempenho do PIN foi no modo de tensão constante onde a resposta elétrica de corrente  $I_o$  aumenta proporcionalmente com a tensão de polarização do tubo de raios X, para corrente de filamento de até 100  $\mu$ A. Isso foi interpretado como o aumento no número de elétrons incidentes dentro do tubo de raios X que subsequentemente promovem maior intensidade de raios X gerado à medida que a tensão de polarização do tubo aumenta.

Além disso, foi feita uma modelagem que explica a operação no modo de corrente constante do diodo MOS operando com uma largura de depleção estacionária em uma corrente constante que provou ser sensível ao fluxo de radiação de raios X na faixa de 0 a ~500 mSv/h, como no caso do diodo PIN operando no modo de tensão constante.

Os testes realizados e os resultados obtidos nos levam a crer que a utilização dos diodos PIN e MOS como detectores de raios X é tecnicamente viável, apresentando bons resultados de sensibilidade. Foi observado que ocorreu variação, tanto de tensão no diodo MOS quanto de corrente no diodo PIN, crescentes com o aumento da intensidade de raios X sobre os dispositivos, apontando para uma condição de reprodutibilidade e confiabilidade adequadas.

Como continuação do presente trabalho, propomos os seguintes tópicos de estudo no futuro:

- a) Estudo do ruído elétrico em diodos MOS: - A literatura aponta que, dada a natureza discreta da carga, uma questão de estudo muito importante é o ruído

de tipo “shot” na corrente média extraída dos diodos PIN e MOS, quando iluminados com radiação de raios X.

- b) Estudo da seletividade em energia dos diodos MOS: no presente trabalho foi empregado Tubo de raios X operando com energia de 22,1 KeV (Ag), variando tão somente a intensidade sobre os diodos PIN e MOS. Para completar o estudo, propõe-se variar a energia na faixa de 5 a 120 keV (soft X rays).
- c) Filtragem dos sinais: melhoria da qualidade possível dos sinais detectados de tensão e corrente nos diodos MOS e PIN, respectivamente, quanto à relação sinal/ruído, inclusive otimizando a operação do diodo MOS no modo de corrente constante para níveis de intensidade ainda menores dos raios X incidentes.
- d) Amplificação dos sinais: os sinais obtidos, embora garantam a sensibilidade e reprodutibilidade, são de intensidade baixa para o aproveitamento em um sistema de formação de imagens de raios X, sendo necessário em uma próxima etapa associar a amplificação ao processo de filtragem de ruídos.
- e) Protótipo de sistema de captura de imagem: Desenvolver scanners de raios X utilizando como elemento sensor o diodo MOS em uma matriz de “*pixels*” com áreas substancialmente menores na faixa de micrômetros.



## **6 Lista de trabalhos publicados e submetidos**

**[1]** M.L. da Conceição, S.G. dos Santos Filho. “ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF PIN DIODES AS X-RAY DETECTORS”. SEMINATEC 2022, FEI, 2022.

**[2]** M.L. da Conceição, S.G. dos Santos Filho. “X-ray detection using MOS and PIN diodes biased in the constant reverse current or voltage modes” (submetido no International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers – INSCIT 2022).

## 7 Referências

1. DATTA, A., ZHONG, Z. & MOTAKEF, S. A new generation of direct X-ray detectors for medical and synchrotron imaging applications. **Sci Rep.** v.10, p.20097, 2020.
2. HOHEISEL, M. Review of medical imaging with emphasis on X-ray detectors. **Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.** v. A563, p. 215-224, 2006.
3. RAMÍREZ-JIMÉNEZ, F.J. **X-Ray Spectroscopy with PIN diodes**, AIP Conference Proceedings, v. 857, p. 121, 2006.
4. WATANABE, M.N.; CHIAPPIM JUNIOR, W.; CHRISTIANO, V; IZUMI, F.; DOS SANTOS FILHO, S.G. **MOS solar cells for indoor LED energy harvesting**. IEEE 34th Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro), 2019 (doi:10.1109/SBMicro.2019.8919375).
5. SPEAR, J.D. Shot noise in x-ray measurements with *p-i-n* diodes, **Review of Scientific Instruments**, v. 76, p. 076101, 2005.
6. VAN DER ZIEL, A. **Noise in solid state devices and circuits**. Wiley-Interscience, 1a. edição, 1986.
7. SCARPIN, J.A. **Detector de raios X baseado no diodo PIN**. Dissertação apresentada à UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, 2016.
8. AUDET, S. A.; SCHOONEVELD, E. M. AND MIDDELHOEK, S. **High-purity silicon sensor array for imaging soft X-Ray and infrared radiation**. International Electron Devices Meeting 1989. Technical Digest, p. 177-180, 1989.
9. KNOLL, G.F. **Radiation Detection and Measurement**, John Willey and Sons, New York, 2a. edição, 1989.
10. BERTOLINI, G.; COCHE, A. **Semiconductor Detectors**. North Holland Publishing Co., 1968.
11. GOULDING, F.S.; PEHL, R.H. **Semiconductor Detectors**, Section IIIA, Nuclear Spectroscopy and Reactions, Academic Press, 1974.

12. FOSSUM, E. R. CMOS active pixel image sensors. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**, v. 395, p. 291-297, 1997.
13. Srivastava, S; Henry R; Topka, Anita F. Characterization Of Pin Diode Silicon Radiation Detector, **Journal on Intelligent Electronic Systems**, Vol.1, No.1, November 2007, p 47.
14. KLEIMAN, P.; et. al. An X-ray imaging pixel detector based on scintillator filled pores in a silicon matrix, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**, v. 460, p. 15-19, 2001.
15. ROCHA, J. G. AND CORREA, J. H. A high-performance scintillator-silicon-well X-ray microdetector based on DRIE techniques. **Sensors and Actuators A**, v. 92, p. 203-207, 2001.
16. RODNYI, P. A. Progress in fast scintillators. **Radiation Measurements**, v. 33, p. 605-614, 2001.
17. WEBER, M. J., et. al.; Measurements of ultrafast scintillation rise times: evidence of energy transfer mechanisms. **Journal of Luminescence**, v. 87-89, p. 830-832, 2000.
18. STREET, R.A.; READY, S.E.; VAN SCHUYLENBERGH, K.; HO, J.; BOYCE, J. B.; NYLENB, P.; SHAH, K.; MELEKHOV, L.; HERMON. H. Comparison of PbI<sub>2</sub> and HgI<sub>2</sub> for direct detection active matrix x-ray image sensors. **Journal of Applied Physics**, v. 91, n. 5, 2002.
19. CONDELES J. F., **Filmes finos de iodeto de chumbo como detector de raios-X para imagens médicas**. Tese de doutorado apresentada à Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto da USP, 2003.
20. **DOCUMENTO ELETRÔNICO DE REFERÊNCIA (DATASHEET)**, Fabricante Vishay Telefunken, publicado em 23/08/2011.
21. ABÊ, V. C. **Fabricação de células solares MOS utilizando oxinitretos de silício obtidos por processamento térmico rápido (RTP)**. Tese de doutorado apresentada à Escola Politécnica da USP, 2017.
22. WATANABE, M. N. **Fabricação, caracterização e modelagem elétrica de células solares MOS para aplicação em energy harvesting**, Dissertação de mestrado apresentada à Escola Politécnica da USP, 2019.
23. AMPTEK Inc, available in the web site: <http://www.amptek.com/>

- 24. THE PIN diode circuit designers' handbook.** Watertown: Microsemi Corporation, 1998.
- 25. NICOLLIAN, E.H.; BREWS, J.R. MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology,** John Wiley & Sons, Inc., 1982.
- 26. Sze, S.M. Physics of semiconductor devices,** John Wiley & Sons, 1981.
- 27. Norma CNEN NN 3.01. Resolução 164/14. Março / 2014. DIRETRIZES BÁSICAS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA.** Resolução CNEN 27/04
- 28. KLEIMAN, P.; et. al. An X-ray imaging pixel detector based on scintillating guides screen,** **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 47, n. 4, p. 1483-1486, 2000.