



**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
**Autarquia associada à Universidade de São Paulo**

**DESENVOLVIMENTO DE DOSÍMETROS COM DIODOS DE Si  
RESISTENTES À RADIAÇÃO PARA DOSIMETRIA DE ALTAS DOSES**

**FÁBIO DE CAMARGO**

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Doutor em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Aplicações.

Orientadora:

**Profa. Dra. Carmen Cecília Bueno Tobias**

São Paulo  
2009

*Dedico este trabalho à minha noiva e  
companheira Paula, à minha família,  
em especial aos meus pais e sogros,  
aos meus amigos e a Deus.*

## AGRADECIMENTOS

Em nossa jornada existem muitas pessoas que contribuem de modo direto ou indireto, ajudando-nos na construção do nosso ínfimo conhecimento, a todas deixo o meu mais singelo, eterno e cordial agradecimento. Entretanto, existem aquelas, que de modo peculiar, merecem ser destacadas e agradecidas em especial.

À **Profa. Dra. Carmen Cecília Bueno Tobias** (IPEN-CNEN/SP e PUC/SP) pela confiança depositada e por fazer parte da minha história, orientando-me com sabedoria e inteligência em cada momento do desenvolvimento desta tese, sem medir esforços, sempre com carinho, amizade, compreensão e paciência. Não existem palavras que consigam traduzir minha imensa gratidão.

À **Profa. Dra. Josemary Angélica Correia Gonçalves** (IPEN-CNEN/SP e PUC/SP) que com seu jeito meigo, sempre me direcionou, proferindo palavras de sabedoria ao longo de minha trajetória acadêmica que contribuíram muito nas discussões e melhorias deste trabalho.

Ao **Prof. Dr. Marcello Damy de Souza Santos** (IPEN-CNEN/SP) pelo fato de me ensinar na prática os significados das palavras humildade e educação. Com ele tive a oportunidade de descobrir que um grande mestre jamais precisa impor-se pelas suas conquistas, pois o reconhecimento aflora naturalmente.

Ao **PhD. Jaakko Härkönen** e a toda sua equipe do Instituto de Física de Helsinki (HIP) por ter me cedido os diodos empregados neste estudo e pela valiosa colaboração.

À **Profa. Dra. Helen Jamil Khoury** por disponibilizar seu laboratório na Universidade Federal de Pernambuco, me ensinando técnicas de dosimetria com semicondutores, que foram as bases para o desenvolvimento desta tese.

Ao **PhD. Alessio Mangiarotti** do Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas (LIP) da Universidade de Coimbra pelo desenvolvimento de uma macro para análise das fotocorrentes e pelo incentivo durante todo o trabalho.

Ao **Eng. Jair S. do Nascimento** da Semikron Elektronik GmbH pelas valiosas discussões e pelo projeto e construção do sistema de caracterização IV e CV dos dispositivos semicondutores.

Ao **Laboratório de Microeletrônica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LME/POLI-USP)**, em nome do **Prof. Dr. José Kleber da Cunha Pinto** e do **Tec. Jair Pereira de Souza**, pela confecção das bases de cerâmicas banhadas a ouro e montagem das amostras, imprescindível ao desenvolvimento deste trabalho.

À **Divisão de Empacotamento Eletrônico do Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (DEE/CTI)**, em nome do seu coordenador **MSc. Márcio Tarozzo Biasoli** e da **Tec. Marinalva Muniz Rocha**, pela confecção das microsoldas dos diodos na base de cerâmica, fundamentais para a realização desta pesquisa.

Ao **Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)** pela concessão de bolsa nos primeiros meses deste doutorado.

À **Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP)** por acreditar em meu potencial e me permitir integrar o seu quadro de bolsistas de doutorado, me dando todo o suporte financeiro (processo nº 05/00258-1).

Ao **Centro de Tecnologia das Radiações (CTR)** do **Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP)**, em nome do seu gerente, **Dr. Wilson Aparecido Parejo Calvo** e dos chefes de Divisão, **Dra. Margarida Mizue Hamada** (Pesquisa e Desenvolvimento) e **Dr. Leonardo Gondim de Andrade e Silva** (Serviços), por ter me acolhido, desde minha iniciação científica até o presente, dando o suporte necessário para a realização desta pesquisa, sem exceções.

Aos engenheiros **Elizabeth S. R. Somessari**, **Carlos Gaia da Silveira**, **Samir Luiz Somessari** e ao **Tec. Hélio Antônio Paes**, funcionários do Laboratório de Fontes Intensas de Radiação (LAFIR) do CTR, pela atenção, amizade e presteza que sempre dispensaram e fundamentalmente pelas incansáveis irradiações dos diodos.

Aos **Funcionários do CTR**, em nome do **Tec. Cláudio Botelho**, pela ajuda e inestimável colaboração.

Aos **Funcionários da Oficina Mecânica do IPEN**, em nome do **Tec. José Carlos Sabino**, que não mediram esforços na confecção das sondas de medidas e me ensinaram muito sobre mecânica de precisão.

Aos meus **Colegas de Grupo de Pesquisa**, em nome de **Kelly C. S. Pascoalino** e **Italo Soares Santos**, pelas palavras de incentivo, companheirismo e principalmente pela ajuda nos experimentos.

*“Há três métodos para ganhar sabedoria: primeiro, por reflexão, que é o mais nobre; segundo, por imitação, que é o mais fácil; e terceiro, por experiência, que é o mais amargo.”*

*“Conte-me e eu esqueço. Mostre-me e eu apenas me lembro. Envolve-me e eu compreendo.”*

**Confúcio**

*“Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável (...) para aprender a conhecer a influência libertadora da beleza do reino do espírito, para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer”*

*“Faça as coisas o mais simples possível, mas não de maneira simplória.”*

*“Quem nunca errou, jamais também experimentou algo de novo.”*

**Albert Einstein**

# DESENVOLVIMENTO DE DOSÍMETROS COM DIODOS DE Si RESISTENTES À RADIAÇÃO PARA DOSIMETRIA DE ALTAS DOSES

Fábio de Camargo

## RESUMO

Neste trabalho são apresentados os resultados obtidos com diodos resistentes a danos de radiação dos tipos fusão zonal padrão (FZ), fusão zonal com difusão de oxigênio (DOFZ) e Czochralski magnético (MCz) em dosimetria de processamento por radiação gama. Estes dispositivos de junção  $p^+ - n - n^+$  foram manufacturados por Okmetic Oyj. (Vantaa, Finland) e processados no Centro de Microeletrônica da Universidade de Tecnologia de Helsinki no âmbito da colaboração RD50 do CERN.

As sondas dosimétricas, baseadas nos dispositivos FZ, DOFZ and MCz, foram projetadas para operar sem tensão de polarização no modo de corrente direta como dosímetros *on-line* de radiação. As irradiações foram realizadas no Centro de Tecnologia das Radiações (CTR) no IPEN-CNEN/SP usando a fonte de  $^{60}\text{Co}$  (Gammacell 220 – Nordion) com a taxa de dose de aproximadamente 2,4 kGy/h.

A resposta em corrente de cada diodo foi medida em função do tempo de exposição em intervalos de dose desde 5 kGy até 50 kGy atingindo a dose total absorvida 275 kGy. Os resultados obtidos demonstraram um significativo decréscimo da fotocorrente gerada em todos os dispositivos para doses totais absorvidas superiores a aproximadamente 25 kGy. Para reduzir este efeito, as amostras foram pré-irradiadas com raios gama do  $^{60}\text{Co}$  a uma dose de 700 kGy, para saturar a produção de armadilhas no volume sensível do diodo. Depois da pré-irradiação, apesar de serem menos sensíveis, todos os dispositivos apresentaram sinais de corrente estáveis mesmo para a dose total absorvida de 275 kGy. A fim de monitorar possíveis efeitos de danos de radiação

produzidos nos diodos, as correntes de fuga e capacitância destes dispositivos foram medidas em função da dose total absorvida.

As curvas de calibração dos dosímetros mostraram respostas quadráticas com coeficientes de correlação maiores do que 0,9999 para doses totais absorvidas de até 275 kGy. A comparação entre as respostas dosimétricas dos diodos estudados evidenciou que o melhor resultado foi obtido com o MCz que exibiu maiores sensibilidade e estabilidade do que os dispositivos FZ e DOFZ. No entanto, é importante notar que todos os diodos pré-irradiados podem ser utilizados como dosímetros em aplicações de processamento por radiação gama.

# DEVELOPMENT OF DOSIMETERS WITH RAD-HARD SILICON DIODES FOR HIGH DOSE DOSIMETRY

**Fábio de Camargo**

## ABSTRACT

In this work we report on results obtained with rad-hard Standard Float Zone (FZ), Diffusion Oxygenated Float Zone (DOFZ) and Magnetic Czochralski (MCz) silicon diodes in gamma radiation processing dosimetry. These p<sup>+</sup>-n-n<sup>+</sup> junction devices were manufactured by Okmetic Oyj. (Vantaa, Finland) and processed by the Microelectronics Center of Helsinki University of Technology in the framework of the CERN RD50 Collaboration.

The dosimetric probes, based on FZ, DOFZ and MCz devices, were designed to operate without bias voltage in the direct current mode as on-line radiation dosimeter. The irradiations were performed in the Radiation Technology Center (CTR) at IPEN-CNEN/SP using a <sup>60</sup>Co source (Gammacell 220 – Nordion) with a dose rate around of 2.4 kGy/h.

The current response of each diode was measured as a function of the exposure time in steps from 5 kGy up to 50 kGy to achieve a total absorbed dose of 275 kGy. The results obtained showed a significant decrease in the photocurrent generated in all devices for total absorbed doses higher than approximately 25 kGy. To reduce this effect, the samples were pre-irradiated with <sup>60</sup>Co gamma rays at 700 kGy in order to saturate the trap production in the diode's sensitive volume. After pre-irradiation, despite of being less sensitive, all devices exhibited more stable photocurrent signals, even for total absorbed doses of 275 kGy. To monitor possible gamma radiation damage effects produced on the diodes, their dynamic leakage current and capacitance were measured as a function of the absorbed dose.



The calibration curves of the dosimeters showed quadratic responses with correlation coefficient higher than 0.9999 for total absorbed dose up to 275 kGy. The comparison among the dosimetric response of the diodes studied evidenced that the best result was achieved with the MCz which exhibited higher sensitivity and stability than the FZ and DOFZ devices. However, it is important to note that all pre-irradiated diodes can be used as gamma dosimeters in radiation processing applications.

## SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS.....	XII
LISTA DE FIGURAS.....	XIV
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XVIII
1 INTRODUÇÃO.....	20
2 OBJETIVOS.....	25
3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	26
3.1 PROCESSAMENTO POR RADIAÇÃO.....	26
3.2 DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES.....	29
3.2.1 Classificação dos Dosímetros.....	29
3.2.2 Dose Absorvida.....	31
3.2.3 Interação de Fótons com a Matéria.....	32
3.2.4 Atenuação da Radiação Eletromagnética.....	36
3.3 SISTEMAS DOSIMÉTRICOS.....	38
3.4 DOSÍMETROS DE SILÍCIO.....	41
3.5 EFEITOS DA RADIAÇÃO.....	44
3.5.1 Mecanismos dos danos de radiação.....	45
3.5.1.1 Dano por deslocamento.....	47
3.5.1.2 Dano por ionização.....	50
3.5.2 Danos de radiação em diodos.....	51
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	55
4.1 DIODOS FZ, DOFZ E MCz.....	55
4.2 CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA.....	59
4.2.1 Curva IV.....	61
4.2.2 Curva CV.....	61
4.3 SONDA DOSIMÉTRICA.....	62
4.4 DOSIMETRIA.....	63

## Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

