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

Fabricação e caracterização de detector de Barreira de superfície a partir de substrato de silício comercial

Júlio Batista Rodrigues da Silva

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Aplicações

Fábio Eduardo da Costa

Versão original

São Paulo
2016

“O desenvolvimento humano depende fundamentalmente da invenção. Ela é o produto mais importante de seu cérebro criativo. Seu objetivo final é o completo domínio da mente sobre o mundo material e o aproveitamento das forças da natureza em favor das necessidades humanas.”

Nikola Tesla

Aos meus pais, Ana e Júlio.
Aos meus irmãos, Fábio, Cíntia e Túlio.
E a minha companheira Elisa.
Dedico em especial
à memória de meu irmão Márcio.

Agradecimentos

Ao meu orientador Dr. Fábio Eduardo da Costa, pela paciência, visão e contribuição, sem o qual este trabalho jamais seria realizado.

A Dra. Margarida Mizue Hamada pelas oportunidades concedidas, experiências divididas e apoio para realização deste trabalho.

Ao Dr. Carlos H. de Mesquita por sua contribuição intelectual.

Ao meu colega de trabalho Heitor pelo companheirismo.

Ao grupo de pesquisa de Detectores Semicondutores de Radiação.

Aos funcionários do Centro de Tecnologia das Radiações pelas inúmeras contribuições.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares pela oportunidade.

A Comissão Nacional de Energia Nuclear-CNEN pelo auxílio financeiro.

E a todos que de algum modo contribuíram com o desenvolvimento deste trabalho.

Obrigado a todos.

SUMÁRIO

Página

LISTA DE EQUAÇÕES.....8
LISTA DE FIGURAS.....9
RESUMO.....11
ABSTRACT.....12

1 INTRODUÇÃO.....13
1-1 Objetivo do trabalho.....15

2 CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS.....15
2-1 Radiação.....15
2-1-1 Detectores de radiação.....15
2-1-2 Espectro eletromagnético 16
2-1-3 Radiação Ionizante.....17
2-1-4 Radiações eletromagnéticas raio X, Gama e particuladas Alfa e Beta.....18
2-1-5 Interação da radiação X ou gama com a matéria com a matéria.....19
2-1-5-1 Efeito fotoelétrico.....19
2-1-5-1 Efeito Compton.....20
2-1-5-3 Produção de pares 21

2-2 Materiais semicondutores.....23
2-2-1 Estrutura cristalina.....23
2-2-2 Modelo de bandas de energia.....23
2-2-3 Portadores de carga.....25
2-2-4 Mobilidade.....26
2-2-5 Silício 27
2-2-6 Semicondutores extrínsecos e intrínsecos.....28
2-2-7 Dopagem.....29
2-2-8 Junção.....31
2-2-9 Junção polarizada.....33
2-3 Detectores Barreira de Superfície.....35
2-4 Tratamento químico do substrato de silício.....37
2-5 Pré-amplificadores.....37

2-5-1 Pré-amplificadores sensíveis à carga.....37
2-5-2 Pré-amplificadores sensíveis à tensão.....38
2-6 Amplificadores.....39

3 **MATERIAIS E MÉTODOS**.....40
3-1 Limpeza dos substratos.....40
3-2 Tratamento e Passivação da superfícies (*Etching*).....42
3-3 Evaporação dos contatos metálicos e produção da junção.....43
3-4 Validação dos detectores confeccionados como diodos.....46
3-5 Caracterização dos detectores de barreira de superfície como detectores de radiação para o iodo-125 e américio-241 com pré-amplificadores sensíveis à carga.....47

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....49
4-1 Validação dos detectores confeccionados como diodos.....50
4-2 Análise dos espectros de energia das amostras quando submetidas a fontes radioativas.....51

5 CONCLUSÃO.....63

6 REFERÊNCIAS.....64

7 **APÊNDICES**.....70

7.1- Dados adquiridos durante a validação com o detector da amostra 1 para uma resistência de 10 MΩ.....70
7.2- Dados adquiridos durante a validação com o detector da amostra 1 para uma resistência de 250 MΩ.....71
7.3- Dados adquiridos durante a validação com o detector da amostra 2 para uma resistência de 10 MΩ.....72
7.4- Dados adquiridos durante a validação com o detector da amostra 2 para uma resistência de 250 MΩ.....73
7.5- Dados adquiridos durante a validação com o detector da amostra 3 para uma

resistência de 10 MΩ.....74

7.6- Dados adquiridos durante a validação com o detector da amostra 3 para uma resistência de 250 MΩ.....75

7.7- Dados adquiridos durante a validação com o detector da amostra 4 para uma resistência de 10 MΩ.....76

7.8- Dados adquiridos durante a validação com o detector da amostra 4 para uma resistência de 250 MΩ.....77

7.9- Dados adquiridos durante a validação com o detector da amostra 5 para uma resistência de 250 MΩ.....78

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1- Espessura da região ativa do detector.....13
Equação 2- Relação entre energia, em Joule, e frequência.....17
Equação 3- Relação entre energia, em eletron-volt, e frequência.....17
Equação 4- Energia do elétron no efeito fotoelétrico.....19
Equação 5- Energia do fóton emergente no efeito Compton.....21
Equação 6- Relação entre mobilidade do elétron ou lacuna, campo elétrico e velocidade..26
Equação 7- Relação entre tensão de saída, carga e capacitância de um pré-amplificador sensível à carga.....38
Equação 8- Relação entre tensão de saída, carga e capacitância de um pré-amplificador sensível à tensão.....39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Espectro eletromagnético.....16
Figura 2- Modelo para interação do tipo efeito Compton.....20
Figura 3- Ilustração sobre a Produção de pares.....22
Figura 4- Predominância da ocorrência dos fenômenos de interação em função da energia do fóton incidente e do número atômico do material.....22
Figura 5- Modelo de bandas de energia para isolantes, semicondutores e condutores.....24
Figura 6- Representação da rede cristalina do silício tipo N, obtida com a introdução de átomos de arsênio.....29
Figura 7- Modelo de uma rede cristalina de silício tipo P, obtida com a introdução de átomos de índio.....30
Figura 8- Representação de uma junção PN, com a criação de uma barreira de potencial após a recombinação dos portadores de carga.....32
Figura 9- Curva típica de um diodo de silício, quando polarizado direta e reversamente.....34
Figura 10- Pré-amplificador sensível a carga em um esquema elétrico simplificado.....38
Figura 11- Pré-amplificador sensível a tensão em um esquema elétrico simplificado.....39
Figura 12- Esquema elétrico de um amplificador utilizadoem instrumentação nuclear.....40
Figura 13- Bequers contendo as soluções para *etching* dos substratos de silício, armazenados em um recipiente com água corrente para refrigeração.....43
Figura 14- Esquema de montagem do substrato de silício na placa de fibra de vidro.....44
Figura 15- Deposição dos contatos elétricos nas amostras.....45
Figura 16- Evaporadora de filmes finos que confeccionou os contatos metálicos.....46
Figura 17- Diagrama de blocos para validação dos detectores.....46
Figura 18- Diagrama de blocos do módulo eletrônico acoplado no detector.....48
Figura 19- Vista frontal dos detectores confeccionados.....49
Figura 20- Vista traseira dos detectores confeccionados.....49
Figura 21- Gráfico referente à curva corrente por tensão obtida para o detector 1.....50
Figura 22- Gráfico referente à curva corrente por tensão obtida para o detector 2.....51
Figura 23- Gráfico referente à curva corrente por tensão obtida para o detector 3.....51
Figura 24- Gráfico referente à curva corrente por tensão obtida para o detector 4.....51

Figura 25- Gráfico referente à curva corrente por tensão obtida para o detector 5.....52
Figura 26- Circuito equivalente de um detector semicondutor com junção.....55
Figura 27- Em (a) espectros de energia e BG do detector 1 para uma resistência de carga de 10 MΩ quando exposto a radiação gama de fontes de iodo-125 e amerício-241. Em (b) os espectros normalizados em contagens.....56
Figura 28- Em (a) espectros de energia e BG do detector 1 para uma resistência de carga de 250 MΩ quando exposto a radiação gama de fontes de iodo-125 e amerício-241. Em (b) os espectros normalizados em contagens.....56
Figura 29- Em (a) espectros de energia e BG do detector 2 para uma resistência de carga de 10 MΩ quando exposto a radiação gama de fontes de iodo-125 e amerício-241. Em (b) os espectros normalizados em contagens.....57
Figura 30- Em (a) espectros de energia e BG do detector 2 para uma resistência de carga de 250 MΩ quando exposto a radiação gama de fontes de iodo-125 e amerício-241. Em (b) os espectros normalizados em contagens.....57
Figura 31- Em (a) espectros de energia e BG do detector 3 para uma resistência de carga de 10 MΩ quando exposto a radiação gama de fontes de iodo-125 e amerício-241. Em (b) os espectros normalizados em contagens.....58
Figura 32- Em (a) espectros de energia e BG do detector 3 para uma resistência de carga de 250 MΩ quando exposto a radiação gama de fontes de iodo-125 e amerício-241. Em (b) os espectros normalizados em contagens.....58
Figura 33- Em (a) espectros de energia e BG do detector 4 para uma resistência de carga de 10 MΩ quando exposto a radiação gama de fontes de iodo-125 e amerício-241. Em (b) os espectros normalizados em contagens.....59
Figura 34- Em (a) espectros de energia e BG do detector 4 para uma resistência de carga de 250 MΩ quando exposto a radiação gama de fontes de iodo-125 e amerício-241. Em (b) os espectros normalizados em contagens.....59
Figura 35- Nesta Figura, as tentativas de se observar os espectros de energia e BG do detector 5 para uma resistência de carga de 10 MΩ (a) e 250 MΩ (b) quando exposto a radiação gama de fontes de iodo-125 e amerício-241.....59
Figura 36- Espectros de energia para os detectores 1 a 4 com fonte de iodo-125, 28 keV, e resistor de carga de 10 MΩ.....60
Figura 37- Espectros de energia para os detectores 1 a 4 com fonte de iodo-125, 28 keV, e resistor de carga de 250 MΩ.....61

Figura 38- Espectros de energia para os detectores 1 a 4 com fonte gama de amerício-241, 59 keV, e resistor de carga de 10 MΩ.....61
Figura 39: Espectros de energia para os detectores 1 a 4 com fonte gama de amerício-241, 59 keV, e resistor de carga de 250 MΩ.....62

FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE DETECTOR DE BARREIRA DE SUPERFÍCIE A PARTIR DE SUBSTRATO DE SILÍCIO COMERCIAL

JÚLIO BATISTA RODRIGUES DA SILVA

RESUMO

Neste trabalho foram desenvolvidos detectores de radiação Barreira de superfície de silício que fossem capazes de detectar a presença da radiação gama de baixa energia proveniente de sementes de iodo-125 utilizada em tratamentos de braquiterapia. A partir de substratos comerciais de silício foram desenvolvidos os detectores, de uma sequência que partiu de tratamentos químicos nas superfícies destes substratos com a intenção de minimizar os possíveis ruídos gerados, validação das amostras obtidas como diodos, assegurando características detectoras, e a efetiva utilização como detector para fontes radioativas de iodo-125 com energia em torno de 25 kev e amerício-251 com energia na ordem de 59 kev. Finalizou realizando a análise dos espectros de energia obtidos e assim foi possível observar a capacidade destes detectores para mensuração da energia proveniente destas sementes.

Palavras-chave: Detectores de radiação, semicondutores, Silício.

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF SURFACE BARRIER DETECTOR FROM COMMERCIAL SILICON SUBSTRATE

JÚLIO BATISTA RODRIGUES DA SILVA

ABSTRACT

In this work it was developed radiation detectors silicon surface barrier that were capable of detecting the presence of gamma radiation from a low energy of iodine-125 seeds used in brachytherapy treatments. From commercial silicon substrates detectors were developed, one sequence left of chemical treatments to the surfaces of these substrates with the intention of minimizing the possible noise generated, validation of the samples obtained as diodes, ensuring detector characteristics and effective use as detector for iodine-125 radioactive sources with energy of about 25 kev and americium-251 with energy on the order of 59 kev. Finished performing the analysis of the obtained energy spectra and so it was possible to observe the ability of these detectors to measure the energy from these seeds.

Key-words: Radiation detectors, semiconductors, silicon.

1- INTRODUÇÃO

Um detector de barreira de superfície é basicamente um diodo semicondutor de grande área constituído de um cristal de silício tipo n com uma das faces dopada com o tipo p. O inverso também apresenta características detectoras, que é a fina camada de tipo n sobre um substrato tipo p [1,2,3].

A camada de silício tipo p, é obtida pela deposição de uma fina camada de ouro, que constitui a barreira de superfície e altera as propriedades do silício nesta região, atribuindo a este, característica tipo p na região próxima à superfície [4]. Caso o silício fosse tipo p, a camada tipo n seria obtida com a deposição de alumínio sobre a superfície. A região do silício constituída entre as interfaces do silício p e n constituirá a região ativa do detector e devido a um conjunto de fatores, entre eles a pureza do silício, determinam a espessura ativa máxima do detector [5]. Devido às dificuldades no crescimento, a pureza dos substratos de silício obtidos não é a ideal e isto limita as espessuras ativas a ordem de apenas algumas centenas de μm. Isto faz com que detectores de silício sejam sempre finos e aptos à detecção de partículas, ou radiações eletromagnéticas de baixa energia [6].

Comercialmente, os substratos de silício têm espessuras da ordem de centímetros e não constituem o fator limitante já que os valores das espessuras obtidas para a região ativa do detector de barreira de superfície de silício possuem dimensões muito menores que estas [10,11].

A região ativa, definida pela junção das regiões p e n, quando submetida a um campo elétrico no sentido reverso, produz uma região praticamente livre de cargas elétricas, com espessura proporcional ao campo elétrico aplicado, mas limitada pela baixa pureza do substrato, neste caso o silício [4,5].

A espessura (W) da região ativa é dada por aproximadamente [7,8]:

$$W \approx 0{,}5.(\rho.V)^{1/2} \quad (1)$$

Em que W é dado em μm de silício, ρ a resistividade em Ω.cm e V a tensão em volts do campo elétrico aplicado sobre os contatos que formarão a junção.

A região ativa, de espessura W, é a região de depleção, onde a concentração de portadores livres de carga é muito baixa o que eleva de forma aparente a resistividade do

substrato. Este efeito é benéfico na medida em que se reduz a corrente de fuga do detector e melhora a resolução energética da radiação detectada.

A equação acima poderia levar a inferir que apesar da resistividade não tão elevada, poderia ser obtido um aumento da espessura da região ativa apenas aumentando o valor da tensão V. Infelizmente o valor de V não pode crescer indefinidamente devido às características dielétricas do silício que acaba apresentando rupturas elétricas em seu substrato devido ao campo elétrico excessivo sobre a superfície.

Paralelamente, dois fenômenos [12] podem acontecer sobre elevados campos elétricos reversos sobre a junção: o efeito avalancha e o efeito zener. O efeito avalancha é devido a portadores de carga produzidos termicamente que acelerados pelo campo elétrico produzem outros íons por colisão. O efeito zener, por sua vez, é a quebra direta de ligações covalentes para campos da ordem de $2{,}0.10^7$ V/m ou maiores.

Esta combinação de fatores somada a densidade do silício, ou mais especificamente ao seu número atômico e uma banda proibida de 1,115 eV à 300K [4], fazem dos detectores de barreira de superfície fabricados com estes cristais aptos a operarem à temperatura ambiente, terem pequenas dimensões, mas serem restritos quanto à faixa de energias detectada. Neste caso, estas energias não podem ser tão baixas que não atravessem a barreira de superfície, no exemplo a espessura de ouro depositada, nem tão elevadas que não sejam totalmente absorvidas dentro da região ativa do cristal [4].

Segundo a empresa Amptek [9], para detectores de silício com espessuras da ordem de 200 a 500 µm, valores comercialmente disponíveis, estes detectores são sensíveis a fótons de radiação eletromagnética com energias entre 400 eV e 100 keV, com uma eficiência distribuída de forma aproximadamente gaussiana nesta faixa. A sensibilidade a esta faixa de energia de radiação gama atende às necessidades de detecção das sementes de iodo, utilizadas em braquiterapia e produzidas no Centro de Tecnologia das Radiações do IPEN/CNEN-SP. Estas sementes, com iodo 125, são emissoras de radiação eletromagnética nas energias entre 28 keV e 35 keV, que são adequadas para detecção com detectores de silício, tornando o desenvolvimento deste tipo de detectores úteis para serem utilizados nos laboratórios de confecção destas sementes.

1-1 Objetivo

Este trabalho teve como objetivo desenvolver detectores de barreira de superfície de Silício para detecção de radiação gama da ordem de 28 keV oriundos de fontes de iodo-125 para servirem de referência em posicionamento de sementes de iodo utilizadas em braquiterapia. Iniciou-se com uma sequência de tratamentos químicos nas superfícies de um substrato de silício comercial, seguido da produção da junção P-N neste substrato, validação desta junção analisando suas características Volt-Ampére e aplicação deste detector de barreira de superfície para as emissões gama do Iodo-125 e do Amerício-241.

2-CONSIDERAÇÕES TEÓRICA

Neste capítulo serão analisados os principais conceitos teóricos que influenciaram a elaboração deste trabalho.

2-1 Radiação

2-1-1 Detectores de radiação

Existem diversos processos que podem evidenciar a presença da radiação, tais como produção de luz, geração de cargas elétricas, geração de calor, produção de traços em matérias, entre outros. Constitui um detector um material sensível à radiação e um sistema associado que transforme a presença de radiação em valores mensuráveis[1].

2-1-2 Espectro eletromagnético

Para a compreensão de como a radiação interage com meios semicondutores e permite sua detecção, inicialmente deve-se conhecer as várias frequências do espectro eletromagnético, Figura 1, como elas interagem com determinados meios e finalmente como acontece esta interação com os meios semicondutores [60].

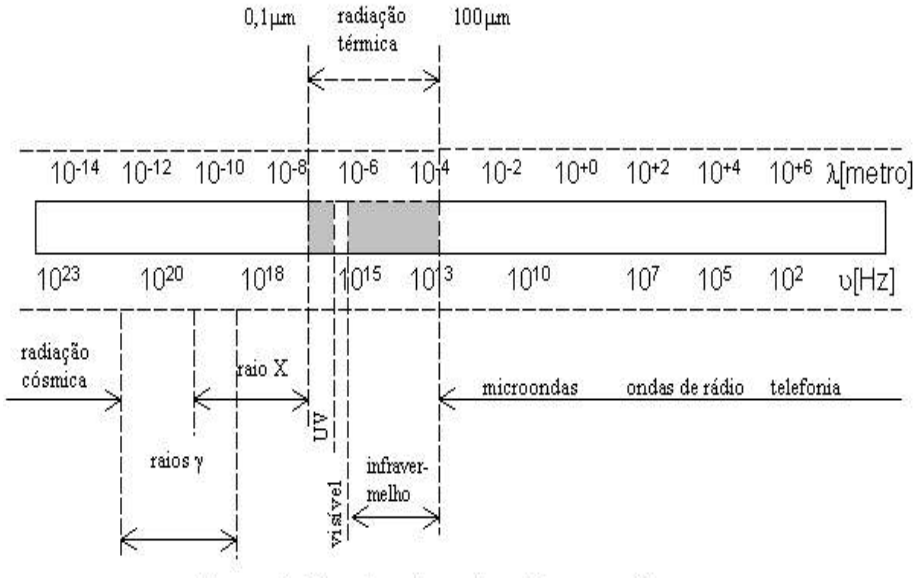

Figura 1 – Espectro eletromagnético [1].

Como pode ser visto na Figura 1, a unidade metro, para o comprimento de onda ou a frequência em Hertz, são usadas de forma a determinar um ponto no espectro eletromagnético.

Na medida em que vamos subindo a frequência, as unidades Hz e metros são usadas indiferentemente como em micro-ondas. Quando chegamos ao infravermelho, continuam a serem usados os submúltiplos de metro (μm e nm) e começam a serem usadas as unidades de energia, mais especificamente o elétron-volt.

A proporcionalidade que relaciona energia a cada frequência foi introduzida por Planck, através da constante de Planck (*h*):

$$E \text{ (energia em joules)} = h(6{,}625 \cdot 10^{-34}\ J.s) \cdot \nu(\text{frequência Hz ou } s^{-1}) \quad (2)$$

ou

$$E(eV) = h(4{,}135 \cdot 10^{-15}\ eV.s).\nu \quad (\text{frequência Hz ou } s^{-1}) \quad (3)$$

Deve ficar claro que indiferentemente a unidade utilizada, sempre estará associada a cada frequência do espectro eletromagnético uma determinada energia, e que de alguma forma esta energia pode ou não interagir com o meio em que incidiu. Quando esta energia interage e se transfere em parte ou totalmente para o meio, pode em algumas circunstâncias provocar efeitos mensuráveis.

Até a região das micro-ondas a energia é suficiente para movimentar elétrons livres e polarizar dipolos moleculares. Entretanto no infravermelho é que começamos a ter energia suficiente para quebrar ligações e mais especificamente com os materiais semicondutores é que estas energias começam a ter características ionizantes.

2-1-3 Radiações ionizantes

As radiações são classificadas como ionizantes quando são capazes de produzir íons no meio em que ocorre a interação. A ionização se deve ao fato das radiações possuírem energia suficiente para quebrar as ligações químicas ou expulsar elétrons dos átomos após colisões entre a radiação incidente e um elétron orbital [3,4].

Esta interação da radiação com a matéria ocorre quando a radiação cede parte ou toda sua energia ao meio em que ela incide [1,2,3,4].

A interação pode ser classificada de duas formas: ionização e excitação. A ionização ocorre quando há a remoção completa de elétrons da camada de valência do átomo em que a radiação incide. Na excitação os elétrons são levados a níveis de energias mais altos em seus orbitais.

Quando incidem nos semicondutores, as energias da região do infravermelho já possuem energia suficiente para provocar ionizações nas camadas mais externas dos átomos constituintes. Nestes casos, a interação se dá por efeito fotoelétrico e o fóton

incidente é totalmente absorvido, transferindo sua energia a um elétron da camada de valência removendo-o da ligação.

O efeito foto elétrico continua ocorrendo nas energias do visível e ultra-violeta. Na região do raio X, que pode ter origem em transições de elétrons entre as camadas do átomo ou em aceleradores de elétrons, quando estes são freados por algum anteparo, observam-se também os fenômenos de ionização mas com outros processos de interação.

2-1-4 Radiações eletromagnéticas raio X, Gama e partículadas Alfa e Beta.

O raio X é uma radiação eletromagnética com frequências superiores às radiações ultravioletas, ou seja, maiores que 10^{18} Hz, com alto poder de penetração. Sua ocorrência é observada em transições eletrônicas de um átomo ou por desacelerações de partículas carregadas[1,4].

A radiação gama (γ) é uma radiação emitida pelo núcleo atômico instável com excesso de energia, de modo que após sua emissão este núcleo torna-se estável [1,4].

Por não apresentarem uma partícula associada, tem alta penetrabilidade e suas energias são capazes de atravessar grandes espessuras antes de interagir com o meio[1,4]. Entre as citadas são as que possuem o menor poder de ionização.

A radiação na forma de partícula alfa (α) é uma radiação constituída de dois prótons e dois nêutrons, carga 2+, e com alta energia cinética, emitida por núcleos instáveis de elevada massa atômica. Muitos radionuclídeos naturais como, urânio, tório, bismuto, radônio apresentam decaimentos alfa, em suas transições nucleares[1,2,4]. Embora detectores semicondutores de silício se prestem muito bem como detectores de partícula alfa, este trabalho deu ênfase apenas à radiação gama de baixa energia [14,15,16].

A radiação beta (β) consiste de um elétron negativo (β-) ou positivo (β+) emitido pelo núcleo na busca de sua estabilidade, ocasionada pela desintegração de um neutrôn. Seu poder de penetração é pequeno quando comparado à radiação gama e depende de sua energia [1,2].

2-1-5 Interação da radiação X ou gama com a matéria

Os mecanismos pelos quais a radiação eletromagnética pode interagir com a matéria dependerão de sua energia e do número atômico (Z) do material em que ela incide. Apesar do grande número de processos de interação possíveis, somente três tipos têm importância prática na detecção de fótons: Absorção fotoelétrica, espalhamento Compton e produção de pares[1,2,3,4].

2-1-5-1 Absorção fotoelétrica

A absorção fotoelétrica acontece quando um fóton incide em um átomo, transferindo toda sua energia a um único elétron orbital, fazendo com que ele seja ejetado. A absorção fotoelétrica é predominante para baixas energias e para elementos de elevado número atômico (Z), sendo proporcional a Z^5. A equação que rege o comportamento tem formato idêntico ao do efeito fotoelétrico.

$$E_{elétron} = h\nu - E_{ligação} \qquad (4)$$

Onde:

$E_{elétron}$ = energia cinética do elétron liberado no meio material

$h\nu$ = energia do fóton gama incidente

$E_{ligação}$= energia de ligação do elétron no átomo (camada K ou L)

Como no efeito fotoelétrico, que acontece nos semicondutores na região do infravermelho a ultravioleta do espectro eletromagnético, o fóton incidente transfere toda sua energia para o elétron, removendo-o de sua ligação e lhe fornecendo energia cinética. A diferença é que para as energias dos raios X e acima, a absorção fotoelétrica acontece com elétrons das camadas eletrônicas mais profundas do átomo,

camadas K e L, portanto mais energéticas. Este elétron ejetado e com velocidade, vai ionizando átomos do material até ser absorvido por um algum átomo.

2-1-5-2 Efeito Compton

O efeito Compton é predominante para radiações gama de energias intermediárias e com elétrons das camadas mais externas do átomo. Neste efeito, o fóton incidente interage com elétrons da camada de valência do átomo do material, de tal modo que o elétron absorva parte da energia deste fóton gerando outro fóton de comprimento de onda maior. Este tipo de interação é inversamente proporcional à energia do fóton gama incidente e proporcional ao número atômico do meio material. A Figura 2 mostra um modelo para a interação do tipo Compton.

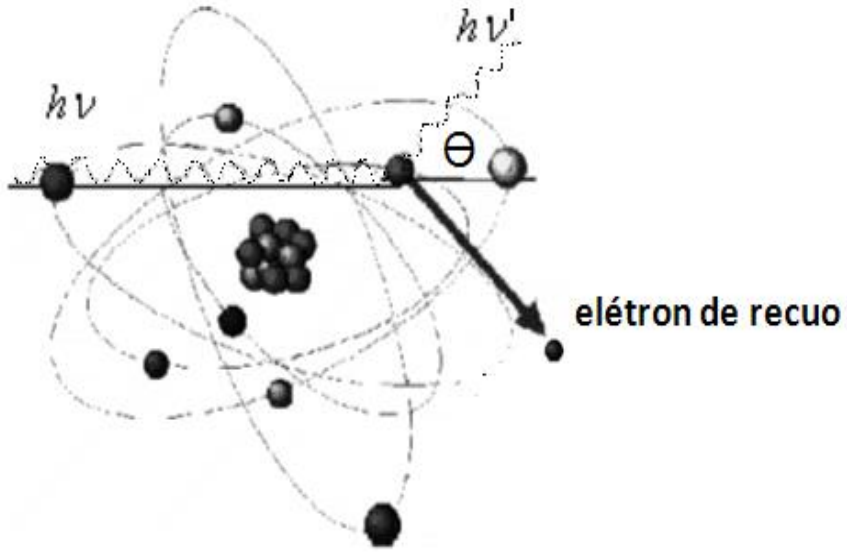

Figura (2) – Modelo para interação do tipo efeito Compton.

A energia do fóton emergente após a colisão será dada por:

Onde: $$h\nu' = h\nu \Big/ \left(1 + \frac{h\nu}{m_o c^2}(1 - \cos\theta)\right) \quad (5)$$

hv é a energia do fóton incidente

hv' é a energia do fóton emergente

$m_o c^2$ é a energia do elétron em repouso

Θ é o ângulo entre o caminho original do fóton incidente e o caminho do fóton de menor energia emergente.

2-1-5-3 Produção de pares

Se a energia do fóton excede duas vezes a energia da massa de repouso de um elétron (1,02 MeV) o processo de produção de pares é energeticamente possível. A interação acontece no campo coulombiano do núcleo, onde o fóton gama desaparece, aparecendo no seu lugar um par elétron-pósitron. Para que seja conservado o momento é necessário que haja um corpo ou partícula que absorva o momento de recuo, neste caso o núcleo de algum átomo. Desta forma a produção de pares não ocorre no vácuo.

Como o pósitron rapidamente se aniquila com um elétron do meio, esta aniquilação da origem a dois fótons de 511 keV que são emitidos exatamente opostos um do outro. A figura 6 ilustra este fenômeno.

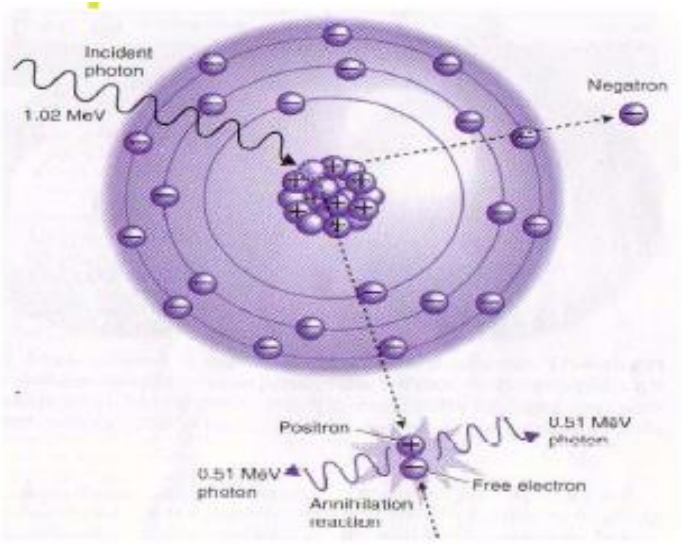

Figura 3 –Ilustração sobre a Produção de pares[2].

Do ponto de vista de probabilidades, a Figura 3 apresenta as tendências de ocorrer cada um dos efeitos citados em função da energia do fóton incidente e do número atômico do absorvedor (pode ser uma blindagem, detector ou qualquer material que esteja sob a incidência de um dado fóton eletromagnético da energia considerada).

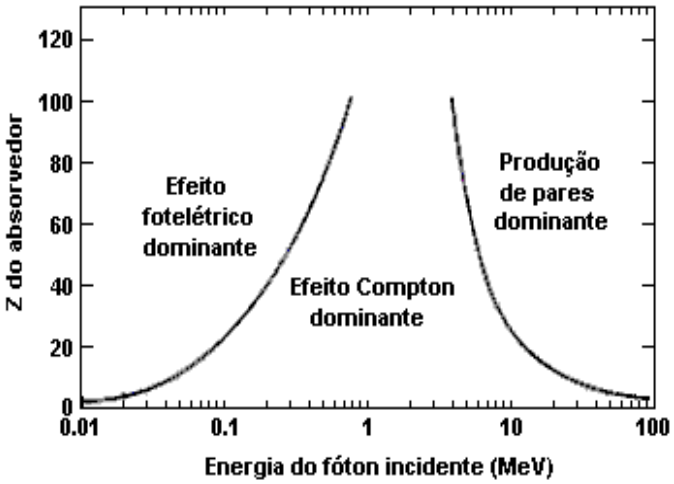

Figura 4- Predominância da ocorrência dos fenômenos de interação em função da energia do fóton incidente e do número atômico do material. Figura modificada de Knoll [1].

2-2 Materiais semicondutores

2-2-1 Estrutura cristalina

A grande maioria dos semicondutores são sólidos cristalinos, mesmo existindo outros tipos de materiais semicondutores, como sólidos amorfos e líquidos, os mais difundidos são formados por estruturas cristalinas.

Um cristal possui como unidade fundamental, a chamada célula unitária, formada por átomos ou moléculas que possuem uma dada disposição. A repetição regular em três dimensões desta célula unitária forma a base da estrutura cristalina.

Os átomos que formam um cristal são unidos por ligações covalentes entre os elétrons de suas camadas mais externas. Nestas ligações, tais elétrons são compartilhados entre os átomos dos elementos que formam o cristal.

Apesar de ligações covalentes em cristais serem as mais comuns, existem variedades de cristais iônicos atualmente em desenvolvimento para aplicações em detectores de radiação e os modelos utilizados são similares aos que apresentam ligações covalentes [17,18].

2-2-2 Modelos de bandas de energia

A Figura 5 apresenta o modelo de bandas de energia para isolantes, semicondutores e condutores. A banda de valência representa os níveis energéticos dos elétrons constituintes das ligações covalentes do material. E_G é a energia de banda proibida, ou *band gap* do material. É uma faixa de energia onde não são encontrados elétrons. Na banda de condução estão as energias possíveis para que um elétron livre possa “circular” pelo material[6].

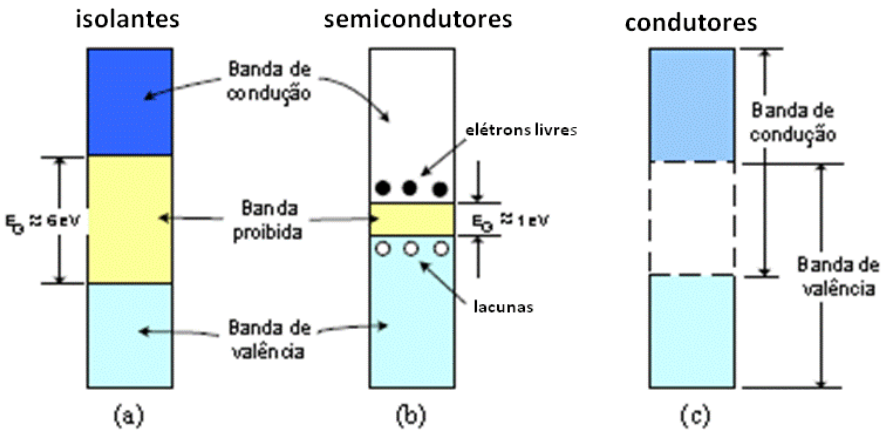

Figura 5 – Modelo de bandas de energia para isolantes, semicondutores e condutores[5].

Nos modelos apresentados na Figura 5, os isolantes (a), apresentam todos os elétrons ligados constituindo as ligações covalentes na banda de valência e não há elétrons na banda de condução, portanto não permitindo que este material apresente qualquer condutividade. A energia da banda proibida é elevada e seria necessário algo como uma descarga elétrica ou temperaturas que fundissem o material de forma a fornecer energia suficiente para que as ligações covalentes fossem rompidas.

Nos condutores (c) não apresentam a banda proibida e os elétrons estão livres para circular pelo metal.

Por sua vez, semicondutores (b) possuem uma banda proibida intermediária. Os valores de banda proibida encontrados nos semicondutores faz com que termicamente algumas ligações covalentes possam ser quebradas e os elétrons participantes destas ligações passem para a banda de condução. Esta é a razão pela qual em temperatura ambiente estes materiais tenham um comportamento intermediário. Um semicondutor puro, também chamado de intrínseco, à 0 K, é um isolante [21,22].

A banda de valência possui níveis energéticos que alcançam valores máximos em determinadas posições que por sua vez se aproximam de valores mínimos que elétrons podem estar ocupando na banda de condução. Esta diferença mínima de energia entre estes dois possíveis estados energéticos é que caracteriza o valor da banda proibida ou *band gap*.

2-2-3 Portadores de carga

O termo portadores de carga aparece em especial com os materiais semicondutores, pois ao quebrarmos uma ligação covalente, por exemplo, com aquecimento, um elétron vai para a banda de condução e uma lacuna, vacância ou buraco (todos são o mesmo ente) fica em seu lugar. Na verdade fica um estado energético que permite que um elétron venha a ocupá-lo. Em uma banda preenchida (banda de valência) a corrente não pode fluir, pois elétrons são normalmente partículas de Fermi e respeitam a lei de exclusão de Pauli[1]. Por outro lado, um estado vazio na banda de valência é chamado de lacuna e elétrons podem se mover se há um estado vazio disponível.

Quando aplicamos uma diferença de potencial sobre um material semicondutor, os elétrons, na banda de condução, tenderão a caminhar para o polo positivo e o estado energético devido que a lacuna fará trocas sucessivas (elétron-lacuna) com os átomos da rede cristalina em direção ao polo negativo. Observa-se aqui que efetivamente há o movimento de uma carga positiva, que na verdade é apenas um estado energético. Teremos, portanto, em um semicondutor um movimento de elétrons em direção ao polo positivo e de lacunas para o polo negativo, caracterizando os portadores de carga dentro de um semicondutor. Do ponto de vista do sinal elétrico os dois carregam a mesma informação, apenas com sinais opostos. Do ponto de vista do material semicondutor é desejável que ele seja cristalino, livre de imperfeições e impurezas, de forma que tanto elétrons como lacunas possam caminhar dentro da rede sem encontrar pontos onde sejam armadilhados e deixarem de contribuir para a formação do sinal elétrico correspondente a interação ocorrida.

Mesmo sem campo elétrico aplicado, os portadores estão continuamente em movimento, devido à energia térmica que recebem. Este movimento térmico é em direção randômica, de forma que, não há um movimento líquido de portadores. O movimento térmico randômico dos portadores não é do tipo linear contínuo, mas sim um movimento interrompido por colisões de vários tipos.

Após cada colisão o portador muda de direção, mas mantendo a randomicidade. Com aplicação de um campo elétrico, tem-se sobreposto ao movimento Brauniano, uma aceleração dos portadores de carga pelo campo elétrico

entre uma colisão e outra, resultando num deslocamento líquido que formará o sinal elétrico detectado[2].

2-2-4 Mobilidade

Mobilidade é a capacidade dos elétrons ou lacunas se deslocarem na rede cristalina, sem serem armadilhados em níveis energéticos mais profundos ou imperfeições da rede e podendo finalmente ser coletados. Como o comportamento de elétrons e lacunas são diferentes em uma rede cristalina, define-se mobilidade (μ_e) para elétrons e (μ_h) para lacunas. Matematicamente a mobilidade é um fator de proporcionalidade entre a velocidade média da partícula e o campo elétrico, como mostrado na equação 6, a seguir:

$$V = \mu.E \qquad (6)$$

Onde,

V, velocidade média, é dado em cm/s .
μ, mobilidade, é dado em $cm^2/V.s$.
E, campo elétrico, é dado em V/cm .

Esta propriedade depende de fatores já citados, como a pureza do cristal ou qualidade de sua estrutura cristalográfica sem deformações que acabam por propiciar uma eficiente troca dos estados energéticos dos átomos no cristal [18,19]. De um modo geral, os elétrons por serem massivos apresentam melhor mobilidade que lacunas e acabam sendo coletados com mais facilidade. As lacunas algumas vezes são armadilhadas e não acabam constituindo o sinal elétrico desejado. A coleção de cargas incompleta (elétrons e lacunas) produz um sinal que não representa verdadeiramente a interação ocorrida e compromete a qualidade do sinal desejado.

A energia para criação de um par elétron-lacuna (ε), 3,62 eV no caso do silício, seria um fator que quanto menor, maior o número de pares produzidos e portanto uma melhor estatística; mas é um fator característico do semicondutor e não pode ser manipulado. Do ponto de vista estatístico, o número de cargas produzidas são em número elevado para energias do raio X e acima, fazendo com que as diferenças sejam desprezíveis em função deste parâmetro.

Outra característica física importante em semicondutores é a resistividade. Em detecção de radiação é desejável que a resistividade seja elevada, pois os portadores de carga produzidos termicamente dão origem à condutividade de um semicondutor, embora outros fatores possam interferir como impurezas ou defeitos na rede cristalina. Como resistividade é o inverso da condutividade, um semicondutor que apresente baixo número de portadores de carga gerados termicamente apresentará alta resistividade, condição que pode ser obtida por exemplo resfriando o semicondutor.

Havendo pouco movimento de cargas produzidas termicamente, o sinal elétrico devido a interação de uma radiação pode ser melhor identificada, apresentando uma condição conhecida como uma melhor relação sinal-ruído, onde o ruído é justamente o produzido por portadores de carga gerados termicamente.

2-2-5 Silício

O silício é amplamente utilizado na industria eletrônica, o que de certa forma assegura suas qualidades. A razão disso é que o silício, bem como o germânio, já é obtido com altíssima pureza. Isto reflete em um número reduzido de centros armadilhadores que permitem maior mobilidade dos portadores de carga dentro destes semicondutores.

O valor da banda proibida, apesar de não tão elevada (1,12 eV), propicia um ruído eletrônico aceitável à temperatura ambiente para a maioria das aplicações. Esta situação já fica mais comprometida com o germânio (0,67 eV), por apresentar forte dependência das características dos componentes fabricados com este material com a variação de temperatura. O germânio, devido a sua estreita banda proibida, apresenta uma elevação grande do número de portadores de cargas livres com a elevação da temperatura.

Apenas como ilustração o germânio hiperpuro, operado à temperatura criogênicas, apresenta excelentes características como detector de radiação, produzindo pouco ruído eletrônico devido a portadores de carga livres e com excelente mobilidade de seus portadores de carga na rede cristalina.

As radiações de baixa energia, como infravermelho, luz e parte do ultravioleta apresentam pouca penetrabilidade. Como a interação é na superfície ou pouco abaixo, o número atômico não se constitui em um problema, razão pela qual células solares em sua maioria são construídas a partir de substratos finos de silício (com espessuras de μm).

2-2-6 Semicondutores extrínsecos e intrínsecos

Em um semicondutor puro, na ausência de uma radiação ionizante, todos os elétrons na banda de condução e todas as lacunas na banda de valência são produzidas por excitação térmica. Nestas condições, cada elétron deve deixar uma lacuna ao ser excitado e o número de elétrons na banda de condução deve ser o mesmo que o número de lacunas na banda de valência. Este material e chamado semicondutor intrínseco.

Na pratica é uma condição impossível de se obter, e as propriedades elétricas reais dos materiais tende a ser dominadas por níveis muito baixo de impurezas.

Uma medida do nível de impureza de um material semicondutor é a resistividade. O valor teórico para o silício intrínseco e cerca de 200.000 Ω.cm; com a mais avançada técnica de purificação disponível no momento os valores situam-se em torno de 50.000 Ω.cm à temperatura ambiente.

Esta resistividade é muito baixa para permitir seu uso diretamente como detector de radiação, pois as correntes de fuga são dezenas de vezes maiores quando comparadas a corrente produzida por uma radiação que incidisse no cristal. A técnica de produzir uma junção é o método utilizado para resolver este problema e a dopagem de um semicondutor é que torna possível alcançar este objetivo.

2-2-7 Dopagem

Ao mesmo tempo que impurezas em uma rede cristalina podem ser prejudiciais às características desejadas para um cristal semicondutor, a adição de impurezas pode ser benéfica para alcançar alguns resultados desejados.

A dopagem em um semicondutor é uma técnica que introduz átomos de impurezas num cristal de modo a aumentar de forma controlada o número de elétrons livres ou o número de lacunas. Com a dopagem, o cristal passa a se chamar semicondutor extrínseco.

Vamos considerar agora o efeito de uma pequena concentração de impurezas que podem estar presentes em um semicondutor como residuais, após o melhor processo de purificação, ou ainda uma pequena quantidade adicionada ao material para criar as condições desejadas. Se uma impureza pentavalente
(5 elétrons na última camada eletrônica) esta presente em pequena concentração, estes átomos irão substituir sítios dentro da rede cristalina, tomando, por exemplo, o lugar de um átomo de silício. Nesta situação existe um elétron extra que permanece apenas fracamente ligado ao sitio original. Portanto apenas uma pequena energia é capaz de removê-lo e coloca-lo na banda de condução.

A Figura 6 apresenta um modelo de uma rede cristalina com silício que nestas circunstâncias passa a ser chamado tipo N.

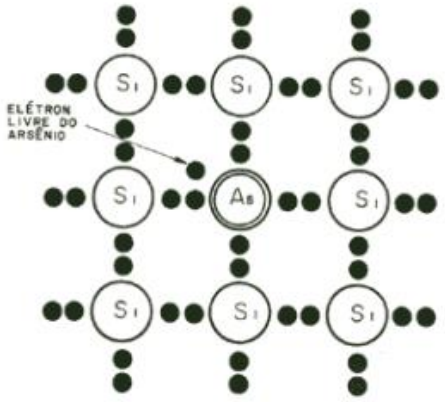

Figura 6: Representação da rede cristalina do silício tipo N, obtida com a introdução de átomos de arsênio.

Impurezas deste tipo são chamadas doadoras, porque contribuem prontamente com elétrons para a banda de condução. Estes elétrons fracamente ligados terão energia muito próxima ao topo da banda da região proibida. O efeito líquido desta impureza no cristal é fazer com que o número de elétrons para condução seja maior que o número de lacunas, diferente do material intrínseco que o número de elétrons é igual ao de lacunas.

Com o silício, à temperatura ambiente, se um doador está presente na concentração de 10^{17} átomos/cm^3, cerca de 2 partes por milhão, a densidade de elétrons na banda de condução será $10^{17}/cm^3$ e a concentração de lacunas irá ser $10^3/cm^3$. Este material portanto, com portadores de carga predominantemente sendo elétrons será chamado tipo n. Como o número total de portadores de carga é muito grande, a condutividade elétrica de um material dopado e sempre muito maior que a correspondente do material puro.

Quando impurezas trivalentes (3 elétrons na última camada eletrônica) estão presentes dentro do cristal, acabam por possuir um elétron a menos que os átomos de silício ao redor e, portanto, uma ligação covalente não estará saturada. Esta vacância representa uma lacuna similar a deixada atrás por um elétron quando excitado para a banda de condução, mas esta lacuna apresenta uma característica energética ligeiramente diferente. A Figura 7 apresenta um modelo para o silício dopado com índio, 3 elétrons na ultima camada eletrônica, tornando-se silício tipo P [23,39,41,45].

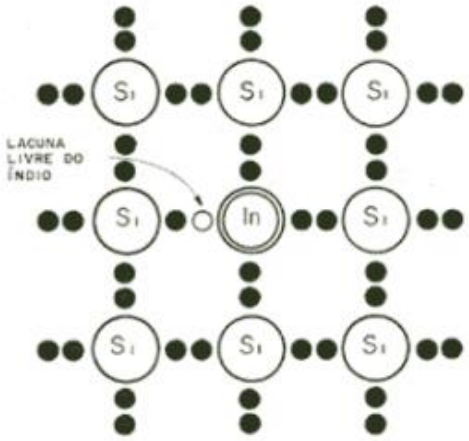

Figura 7 - Modelo de uma rede cristalina de silício tipo P, obtida com a introdução de átomos de índio.

As impurezas aceitadoras também criam sítios para elétrons na banda proibida. Neste caso, o nível aceitador está próximo a parte inferior da banda proibida, porque suas propriedades estão bem próximas aos sítios ocupados pelos elétrons de valência.

Agora o silício é chamado tipo P e as lacunas são chamados portadores de carga majoritários e os elétrons os portadores de carga minoritários. Analogamente, no silício tipo N os elétrons são os portadores majoritários de carga e as lacunas os portadores minoritários de carga.

2-2-8 Junção

Para se conseguir elevar a resistividade de semicondutores utiliza-se da técnica de produzir uma junção. Esta junção será feita a partir de um mesmo material, por exemplo o silício, mas entre um silício tipo P e o tipo N. O cristal PN resultante recebe o nome de diodo [1,20].

Simplesmente pressionando duas peças destes materiais, não seria o suficiente para se obter uma junção, pois inevitáveis separações iriam existir comparadas as dimensões atômicas da rede. Na prática, a junção e feita em um único cristal, mudando suas características de um lado, através da introdução de impurezas.

Por exemplo, um cristal tipo N que foi dopado com uma concentração uniforme de impurezas doadoras para ter esta característica, é exposto em uma das faces a um vapor de impurezas tipo P, que se difundem a alguma distância dentro do cristal [1,20].

Desta forma, irá ocorrer uma difusão de elétrons em excesso em direção da região com material aceitador, ou seja tipo P. A difusão destes elétrons forma o material tipo N. Ao mesmo tempo, este elétron de condução é capturado por uma vacância do lado P, provocando um efeito de aniquilação desta. Com a mesma argumentação, lacunas do lado P, tendem a difundir-se para o lado N, devido a baixa concentração destas neste material. Cada lacuna que é removida, deixa na região P, um elétron armadilhado que representa uma carga negativa imóvel. O efeito total é o crescimento de uma carga espacial positiva no lado do material tipo N, e uma carga espacial negativa do lado P. Este acúmulo de cargas cria um campo elétrico que diminui a tendência de novas difusões. No equilíbrio, o campo elétrico é suficiente

para impedir novas difusões através da junção e um estado estacionário de cargas é obtido. Este estado estacionário faz com que a resistividade do material cresça devido ao baixo número de portadores de carga nesta região [55,56,59].

Esta região, chamada região de depleção, exibe boas propriedades como meio detector de radiação. O campo elétrico produzido causa a qualquer elétron criado próximo ou na junção, que o mesmo seja varrido em direção ao lado N do material e de forma similar uma lacuna para o lado P. Desta forma, nesta região depletada, a concentração de elétrons e lacunas é grandemente reduzida [1,20].

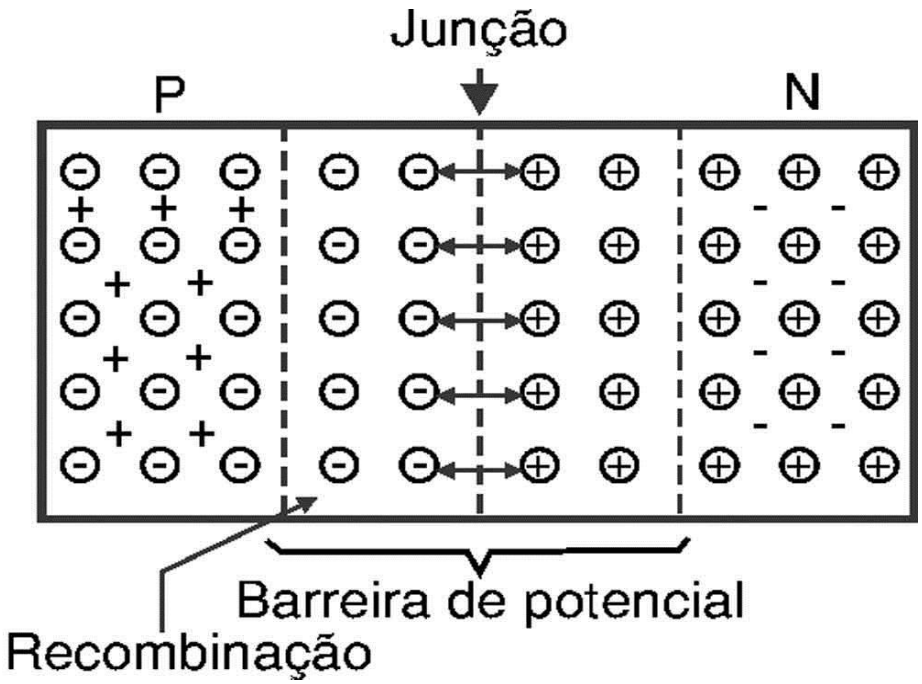

Figura 8: Representação de uma junção PN, com a criação de uma barreira de potencial após a recombinação dos portadores de carga[12].

A diferença de potencial através da camada de depleção é chamada de barreira de potencial. A junção forma o componente eletrônico conhecido como diodo. A 25ºC, esta barreira de potencial é aproximadamente igual a 0,7V para os diodos feitos com silício [1].

Em um detector de silício, a densidade de portadores de carga na região de depleção é da ordem de 100 elétrons ou lacunas por cm^3[1], agora muito baixo quando comparada a densidade de 10^{10} em um material intrínseco. Devido então a baixa concentração de portadores de carga, a corrente residual é muito baixa e cargas eventualmente produzidas por uma radiação ionizante podem agora ser discriminadas.

A junção descrita, sem aplicação de uma tensão externa, irá funcionar como detector, mas com pouca eficiência. O campo elétrico formado espontaneamente através da junção é insuficiente para fazer com que as cargas produzidas por uma radiação nesta região movam-se rapidamente e possam ser coletadas eficientemente. Nesta condição, a região de depleção será muito pequena e a capacitância desta junção muito alta. Se aplicarmos voltagem negativa no lado P da junção e positiva do lado N, a junção estará reversamente polarizada.

Nesta condição, os portadores minoritários de carga, lacunas do lado N, e elétrons do lado P, serão atraídos através da junção. Isto dará origem a corrente reversa do semicondutor, mas como suas concentrações são muito baixas, a corrente através da junção será também baixa [1,20].

2-2-9 Junção Polarizada

A junção ou o diodo pode ser caracterizada por seu comportamento quando submetido a uma polarização direta e reversa. A curva obtida nestas condições é conhecida como curva-característica de um diodo polarizado em uma curva típica e pode ser visualizada na figura 9, a seguir.

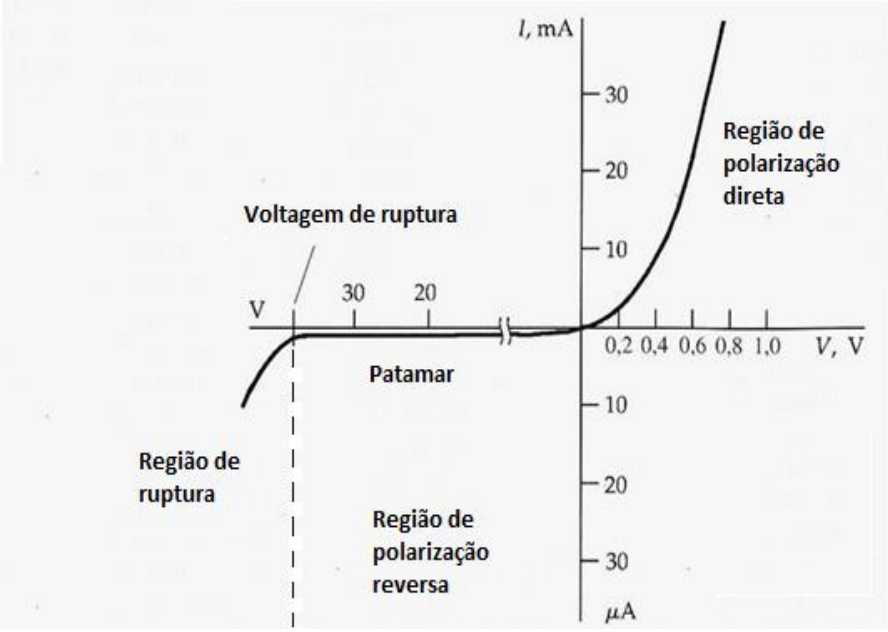

Figura 9: Curva típica de um diodo de silício, quando polarizado direta e reversamente[20].

Analisando o gráfico podemos identificar três regiões distintas: A região de polarização direta, de polarização reversa e a região de ruptura. Cada uma delas será analisada na sequência.

Na polarização direta o terminal negativo de uma fonte de tensão é ligado no lado N, enquanto o terminal positivo é ligado no lado P. A polarização direta produz uma alta corrente direta. Nesta condição, não se define mais uma região de depleção e a junção formada não apresenta características detectoras [25,26,28,29,30].

A região de polarização reversa por sua vez, força que os elétrons livres da região N se afastem da junção em direção ao terminal positivo da fonte, as lacunas da região P também se deslocam da junção para o terminal negativo. O afastamento dos elétrons e das lacunas deixam mais íons positivos e negativos próximos à junção, respectivamente. Nestas condições a camada de depleção fica mais larga. Quanto maior a polarização reversa, maior torna-se a camada de depleção, embora exista como limitante a concentração de impurezas [1,20].

No gráfico visualizamos a região de depleção como sendo o patamar da curva-característica, ou seja, onde aumenta-se a tensão de operação do diodo e a corrente gerada permanece praticamente constante. Esta característica é de extrema

importância do ponto de vista de detecção da radiação, uma vez que aumentando a região de depleção, aumenta o volume útil de detecção do detector. A eficiência do detector nestas circunstâncias aumenta pelo maior volume de detecção e pelo maior potencial de aceleração que coleta melhor os portadores de carga [31,33,34,35,36,40,46].

A corrente não fica exatamente constante, pois paralelamente aumenta a corrente de fuga superficial, que mesmo utilizando processos de passivação da superfície do detector não consegue-se evita-la totalmente [50,51,52,53,54,57,61,62,63].

A região de ruptura é a região na qual o campo elétrico aplicado exerce uma força que consegue quebrar ligações de elétrons fracamente ligados à sua ligação covalente. As correntes produzidas geralmente são de grande amplitude e se sobrepõe a um sinal produzido pela incidência de uma radiação. Como este processo só aumenta com a tensão aplicada para operar a junção como um detector de radiação é obrigatório ficar abaixo deste valor [1,20].

2-3 Detectores de Barreira de superfície

Um detector de barreira de superfície é basicamente um diodo semicondutor de grande área constituído por uma face extremamente fina de um cristal de silício dopado como tipo P sobre um cristal de silício com características de tipo N. O inverso também apresenta características detectoras, que é a fina camada de tipo N sobre um substrato tipo P [12,13,14].

A camada de silício tipo P, é obtida pela deposição de uma fina camada de ouro e sua migração sobre o substrato tipo N, altera as propriedades do silício atribuindo a este características tipo P, na região próxima à superfície [1]. A camada tipo N é obtida com a deposição de alumínio sobre a superfície. As camadas de ouro e alumínio é que constituem a Barreira de superfície e caracterizam este tipo de detector. A região do silício constituída entre as interfaces do silício P e N constituirá a região ativa do detector e devido a um conjunto de fatores, entre eles a pureza do silício, determinam a espessura ativa máxima do detector [7]. Comercialmente, devido as dificuldades no crescimento, a pureza dos substratos de silício obtidos não é a ideal e isto limita as espessuras ativas a ordem de apenas algumas centenas de μm. Isto faz

com que detectores de silício sejam de um modo geral finos e aptos à detecção de partículas, ou radiações eletromagnéticas de baixa energia [14].

Os valores reduzidos de espessuras obtidos para a região ativa, do detector de barreira de superfície de silício, não são um problema devido às dimensões do substrato de silício utilizado para construção do detector, pois comercialmente estes estão disponíveis em dimensões de até algumas dezenas de centímetros, dimensões muito maiores que a região ativa que é obtida entre as interfaces P e N. Esta região constitui a junção, e nesta junção ao aplicarmos um campo elétrico de sentido reverso produz uma região praticamente livre de cargas elétricas, com espessura proporcional ao campo elétrico aplicado, mas limitada pela baixa pureza do substrato, neste caso o silício [1,7].

A região ativa do detector, ou mais precisamente, a espessura (W) ativa do detector é dada por aproximadamente [8,9]:

$$W \approx 0{,}5.(\rho.V)^{1/2} \quad (1)$$

onde W é dado em μm de silício, ρ a resistividade em ohm.cm e V a tensão em volts do campo elétrico aplicado sobre os contatos que formarão a junção.

A equação acima poderia levar a inferir que apesar da resistividade não tão elevada, poderia ser obtido um aumento da espessura da região ativa apenas aumentando o valor da tensão V. Infelizmente o valor de V não pode crescer indefinidamente devido às características dielétricas do silício que acaba apresentando rupturas elétricas em seu substrato devido ao campo elétrico excessivo sobre a superfície .

Esta combinação de fatores somada a densidade do silício, mais especificamente ao seu número atômico, fazem dos detectores de barreira de superfície fabricados com silício aptos a operarem à temperatura ambiente, terem pequenas dimensões, mas serem restritos quanto à faixa de energias detectada. Neste caso, estas energias não podem ser tão baixas que não atravessem a barreira de superfície, a espessura de ouro ou alumínio depositadas, nem tão elevadas que não sejam totalmente absorvidas dentro da região ativa do cristal [1].

2-4 Tratamento químico do substrato de silício

Os substratos de silício utilizados para este trabalho necessitaram de um tratamento químico em suas superfícies com a finalidade de remover a rugosidade e promover uma passivação da superfícies de forma a minimizar as correntes superficiais. O método utilizado por Shiraishi et al[47,48] é descrito em detalhes na seção materiais e métodos. A produção das regiões N e P também são descritas nesta mesma seção em continuidade ao tratamento químico.

2-5 Pré-amplificadores

Os pré-amplificadores são dispositivos capazes de realizar a conversão das cargas elétricas geradas pela incidência da radiação no volume sensível do detector em tensão, permitindo sua comunicação com circuitos eletrônicos. Os sinais elétricos neles gerados deverão ainda serem elevados através de um dispositivo chamado amplificador, uma vez que eles possuem uma baixa amplitude [24].

A escolha do pré-amplificador para ser utilizado como detector de radiação deve se basear em uma série de características como baixa geração de ruído eletrônico, deste modo assegura-se uma menor perda de informação entre as cargas produzidas na detecção da radiação e o sinal elétrico gerado.

Entre as maneiras de se ajustar um circuito pré-amplicador para se trabalhar com detecção de radiação, dois modos são mais difundidos:

2-5-1 Pré-amplificador sensível à carga

Este é o modelo de pré-amplificação mais utilizado na detecção da radiação por aprestar um menor ruído e uma menor estabilidade.

A tensão de saída (V) é função da razão da carga entrada (Q) e da capacitância de realimentação do circuito (C).

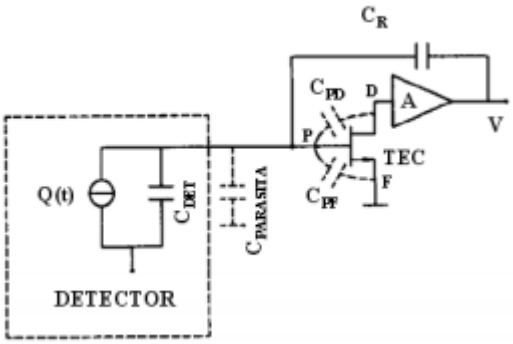

Figura 10: Pré-amplificador sensível a carga em um esquema elétrico simplificado. Figura modificada de Bertuccio [22].

A tensão de saída é fornecida pela seguinte equação:

$$V = Q/C \qquad (7)$$

2-5-2 Pré-amplificador sensível à tensão

Neste modelo o circuito pré-amplificador não passa por uma realimentação, a tensão de saída do circuito (V) é função da razão entre a carga de entrada (Q) e a somatória das capacitâncias presentes: Capacitância do detector(C_d), capacitância do sistema eletrônico associado(C_{el}) e capacitância do capacitor do circuito(C_c).

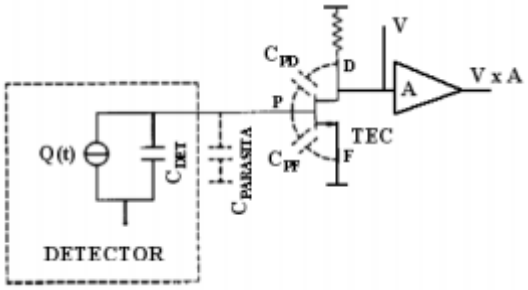

Figura 11: Pré-amplificador sensível a tensão em um esquema elétrico simplificado. Figura modificada de Bertuccio [22].

A tensão de saída é fornecida pela seguinte equação:

$$V = Q/(C_d + C_{el} + C_c) \qquad (8)$$

Quando comparado com o modelo sensível a carga, este apresenta uma menor estabilidade e uma maior geração de ruído, permitindo uma maior variação entre as cargas geradas pela detecção e a tensão informada na saída do pré-amplificador.

2-6 Amplificadores

Como descrito anteriormente, a conversão das cargas elétricas geradas na detecção da radiação em tensão pelo pré-amplificador gera sinais elétricos de baixa intensidade sendo necessária uma amplificação deste sinal [58].

Amplificadores são instrumentos capazes de elevar os valores de tensão emitidos pelos pré-amplificadores em valores mensuráveis eletronicamente, permitindo uma identificação energética da radiação incidente.

Na figura 12, abaixo, há um esquema elétrico muito difundido para o uso de amplificadores em instrumentação nuclear. Neste modelo além de se realizar a amplificação do sinal elétrico é realizado também uma filtragem do sinal, de modo a minimizar o ruído gerado no processo anterior.

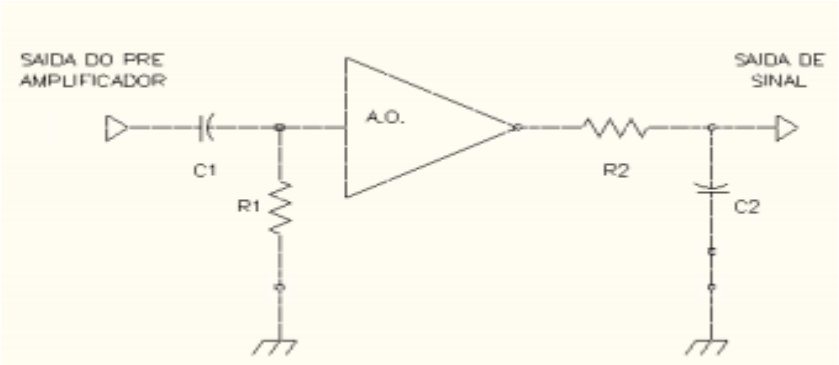

Figura 12: Esquema elétrico de um amplificador utilizado em instrumentação nuclear[1].

A filtragem citada é realizada por dois circuitos: integrador e o diferenciador.

O circuito diferenciador, composto pelo resistor R1 e o capacitor C1, trabalha como um filtro passa alta, filtrando os ruídos de baixa intensidade como os gerados no detector por cargas armadilhadas.

O circuito integrador, composto pelo resistor R2 e o capacitor C2, trabalha com um filtro passa baixa, filtrando os ruídos de alta intensidade como o gerado pela eletrônica associada. O A.O. é um amplificador operacional [25,26].

3- MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capitulo são descritas as etapas da metodologia, fornecendo também a listagem dos principais equipamento e matérias utilizados.

3-1 Limpeza dos substratos

Materiais utilizados:

-5 substratos de silício tipo N, com resistividade entre: 500-20.000 Ω.cm e 200 μm da Wacker-Chemitronic, 19 mm de diâmetro;

-Tricloroetileno [99,5%];

-Agitadora ultrassônica;

-Água deionizada;

-Ácido nítrico [1,38];

-Cetona;

-Béquers de Polietileno;

-Pinças de Polietileno;

Foi utilizado o método desenvolvido por Shiraishi et al[47,48]

É sabido que os substratos de silício foram previamente cortados na origem, a partir de um substrato maior, por uma máquina de corte ultrassônica. Para isso eles foram colados com graxa de parafina em uma placa de metálica para auxiliar o corte. Visualmente não foi possível saber se a remoção da graxa se deu por completo, diante disso um procedimento prévio de limpeza foi adotado.

Em um béquer de polietileno contendo solução de tricloroetileno, as fatias foram introduzidas de modo a ficarem separadas nesta solução e deixadas sob a ação de uma agitadora ultrassônica, de modo a remover possíveis resíduos de graxa. Uma hora foi o tempo suficiente para que a remoção da graxa ocorresse por completo.

Na sequência, com o auxílio de uma pinça de polietileno, foram retirados os substratos da solução de tricloroetileno e introduzidos em outra solução contendo cetona, para que o tricloroetileno fosse removido dos substratos, processo que levou alguns minutos.

Finalizou-se esta etapa lavando-se os substratos com água deionizada em abundância e os armazenando em ácido nítrico [1,38].

3-2 Tratamento químico e passivação das superfícies (*Etching*)

-Solução passivadora: Ácido nítrico [60%] e ácido fluorídrico [40%], em uma proporção 3:1. Essa solução deverá ter um volume total de pelo menos 100 ml;
-Água deionizada;
-Peneira de nylon;
-Béquer de polietileno;
-Filtro de papel.

Os procedimentos seguintes foram necessários para se conseguir o tratamento superficial dos substratos (remoção da rugosidade) e a passivação de suas superfícies, que consiste na produção de uma camada oxidada em torno do substrato que visa reduzir as correntes superficiais [27,28].

Inicialmente preparou-se uma mistura em um béquer de polietileno contendo ácido nítrico, HNO_3 [60%], e ácido fluorídrico, HF [40%], a uma proporção 3:1, com um volume total de 100 ml. Tal mistura foi elaborada em um recipiente resfriado com água corrente para evitar a elevação da temperatura desta solução, como pode ser visto na Figura 13.

Retirou-se as amostras que estavam em repouso na solução de ácido nítrico, e após lava-las com água deionizada em abundância, elas foram cuidadosamente inseridas na solução passivadora com o auxílio da peneira de nylon. Ao submergir as amostras nesta solução, deve ser tomada atenção para que as amostras sejam introduzidas rapidamente e mantidas no fundo da solução, sem que elas flutuem. Assim, com o auxílio da peneira, as amostras foram mantidas no fundo da solução e agitadas, proporcionando uma ação mais uniforme da solução de *etching* nas superfícies das amostras.

Foi estimado que o processo de passivação ocorre a uma velocidade de 20-30 μm/min, isso implica em um tempo aproximado de 4 minutos para que a passivação ocorre-se na amostra por completo [22, 23, 27].

O processo se encerrou com a adição, em abundância, de água deionizada na solução, onde cerca de 2 litros foi o suficiente para que fosse encerrado o processo de

etching. Durante a introdução de água na solução tomou-se extremo cuidado para não expor o substrato ao ar.

Figura 13: Bequers contendo as soluções para *etching* dos substratos de silício, armazenados em um recipiente com água corrente para refrigeração.

Após esse processo as amostras foram retiradas e novamente lavadas em água deionizada. Observa-se que neste ponto não existe mais a preocupação serem expostas ao ar. As amostras foram então secas com filtro de papel, sem que fossem pressionadas, para evitar qualquer dano a sua estrutura cristalina.

3-3 Produção da junção e dos contatos elétricos nos substratos de silício

Materiais utilizados:

-Evaporadora de filmes finos HHV;

-Fio de ouro, ϕ = 0.5 mm [99.95%];

-Fio de alumínio, ϕ = 0.5 mm, [99.999%];

-Pasta condutiva com prata;

-Fio para contato;

-Placa de fibra de vidro;

-Resina epóxi;

Finalizada a limpeza e o *etching*, os substratos já estão prontos para receber as deposições metálicas para produção das junções e dos contatos elétricos. Para isso os substratos foram colados em placas de fibra de vidro, cobreadas em ambas as faces, com dimensões de 30 x 30 mm e com um furo no centro de 17 mm de diâmetro.

Com a finalidade de minimizar a capacitância parasita formada, pela dupla face de cobre da placa de fibra de vidro, uma das faces teve o cobre quase que totalmente removido em uma solução de ácido nítrico. Deixou-se apenas um ponto para constituir o contato elétrico entre o detector e o circuito eletrônico.

Após a remoção do cobre de uma das faces, as placas foram lavadas com água deionizada e deixadas em repouso também em água deionizada por 24 horas, para remoção de algum resíduo do ácido aderido às placas.

Os substratos de silícios foram colados com resina epoxy em apenas três pontos na parte traseira do detector e em todo contorno entre o detector e a fibra de vidro na parte frontal.

A Figura 14 apresenta um esquema do arranjo final obtido com estes procedimentos onde em (a) é visto a parte frontal do detector e em (b) a parte traseira.

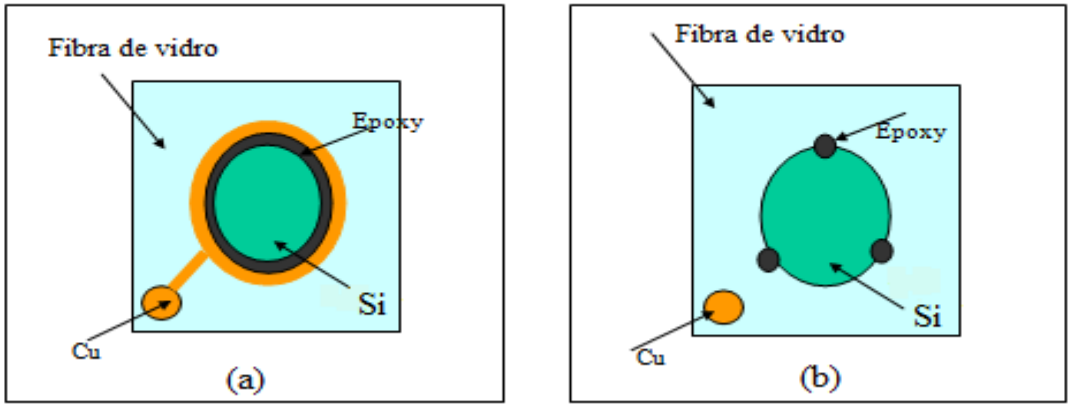

Figura 14: Esquema de montagem do substrato de silício na placa de fibra de vidro, onde em (a) é a vista frontal do detector e em (b) é a vista traseira.

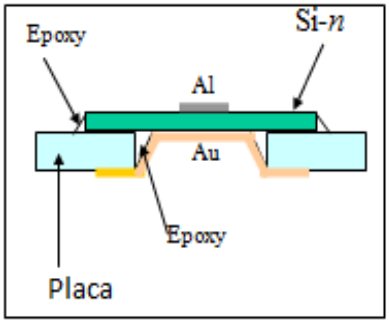

Figura 15: Deposição dos contatos elétricos nas amostras.

Um sistema de evaporação foi utilizado para que os contatos sejam depositados nas amostras, um sistema de aquecimento elaborado com fio de tungstênio foi utilizado novamente neste processo para que seja removida a camada oxida presente nas superfícies das amostras por um período de 30 segundos.

Figura 16: Evaporadora de filmes finos que confeccionou os contatos metálicos.

Primeiro evaporou-se o contato de alumínio (80 μg /cm^2), que será a janela de detecção, e na sequência a contato de ouro (40 μg /cm^2). O diâmetro da janela é de aproximadamente 6,5mm.

Na parte onde há um contato de cobre na placa foi colado com pasta de prata condutiva a ponta de um fio que se liga com a parte do contato que não for a janela, no caso a de ouro.

O fio em questão deverá ser da mesma família do material que o contato ao qual ele se ligará, no caso a do ouro. O ponto de pasta de prata utilizado para a colagem deverá ter a menor dimensão possível, para que não se aumente a espessura da barreira de superfície.

3-4 Validação dos detectores confeccionados como diodos

Nesta etapa os detectores confeccionados foram avaliados através da aplicação de uma polarização, direta e reversa, de modo que possa ser levantada sua curva volt-ampére. Foi utilizado:

-Multimetro Keittley(?);

-Fonte de alta tensão modelo 554 High Voltage Power Supply da Ortec;

-Osciloscópio com largura de banda de 1 GHz e impedância de entrada de 50 ohms modelo 784A da Tectronix;

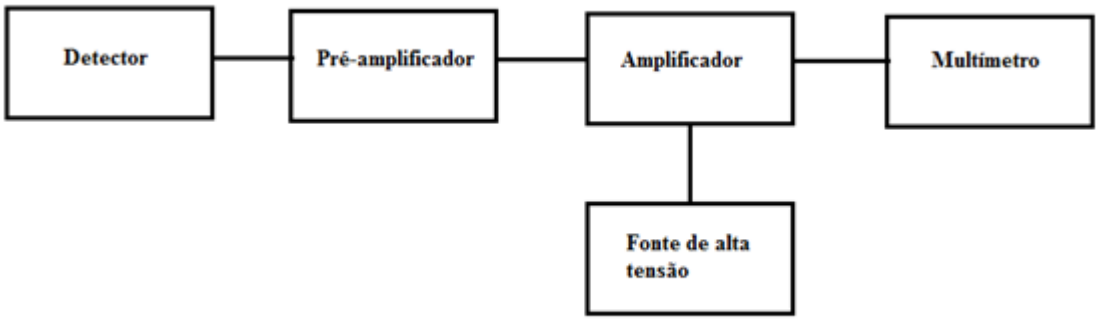

Figura 17: Diagrama de blocos para validação dos detectores.

O sistema eletrônico deverá ter sua geração de ruído analisada, utilizando dois valores funcionais, porém distintos de resistência: 250M ohms e 10M ohms.

Inicialmente para um valor de resistência de 10 M ohms gera-se tensão reversa e se registra o valor obtido de corrente através do multímetro. Com o auxílio do osciloscópio pode se verificar a geração de ruído no detector e visualizar a região onde se rompe a rigidez dielétrica do detector conforme se aumenta o valor da tensão, registra-se tal valor e volta para o valor mínimo de tensão. A partir deste ponto eleva-se o valor de tensão, ao passo de 1 V, e registra-se o valor da corrente obtida. Encerra-se quando chegar ao valor de tensão onde a rigidez dielétrica foi rompida.

Posteriormente a tensão é substituída para uma polarização direta, porém ao mesmo passo utilizado anteriormente, varia-se a tensão desde seu valor mínimo até o valor máximo utilizado na polarização reversa. Registra-se todos os valores de corrente obtidos.

Após se registrar os dados obtidos quando o detector é polarizado tanto reversamente quanto diretamente, deve-se trocar a resistência do sistema para o valor de 250M ohms e se realizar o mesmos procedimentos realizados anteriormente, porém o passo de elevação da tensão deverá ser de 5 V, registrando os valores obtidos para ambos os tipos de polarização.

Tal procedimento deverá ser realizado em todos os detectores obtidos.

Com os dados obtidos serão confeccionada as curvas-típicas de cada detector plotando-se os dados.

3-5 Caracterização dos detectores de barreira de superfície como detectores de radiação para o iodo-125 e américio-241 com pré-amplificadores sensíveis à carga

Nesta etapa foram obtidos os espectros de energia para cada um dos detectores produzidos. Foram utilizados:

-Pré-amplificador A250 da Amptek;

-Amplificador 450 EG&G da Ortec com tempo de integração e diferenciação de 10μs;

-Fontes radioativas de Iodo-125 e Amerício-241;

-Computador com placa de aquisição multicanal 918 CAD com software MAESTRO®.

Os detectores confeccionados serão acoplados ao modulo eletrônico, um de cada vez, para que seja verificada a sua eficácia como detector de radiação quando expostos a fontes radioativas. A saída será analisada por um computador com placa analisador multicanal e software Maestro, conforme o diagrama de blocos na figura 18:

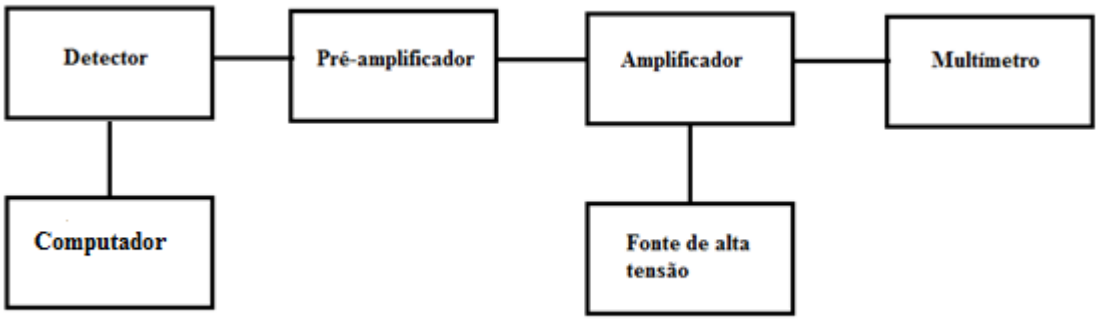

Figura 18: Diagrama de blocos dos módulos eletrônicos e o computador acoplados ao detector.

Os pré-amplificadores previamente serão ajustados ao modo sensível à carga.

Primeiro serão analisados com uma resistência do sistema de 10M ohms.

Deve ser realizado então a contagem do B.G.,ou seja, sem nenhuma fonte de radiação, por um período de 300 segundos. Salva-se o espectro o obtido.

Em seguida deve se posicionar a fonte de iodo-125 na frente da janela do detector e iniciar uma contagem de 300 s. Salva-se o espectro obtido.

Finalizando deve se trocar a fonte de radiação para o amerício-241, posiciona-la em frente a janela do detector e inicia-se uma contagem de 300 segundos. Salva-se o espectro obtido.

Troca-se então a resistência do sistema para o valor de 250M ohms e realiza-se as mesmas três contagens realizadas anteriormente, salvando todos os espectros obtidos.

Os passos descritos deverão ser realizados para todos os detectores confeccionas.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 19 pode ser observado a vista frontal dos detectores e na Figura 20 pode ser observado a vista traseira.

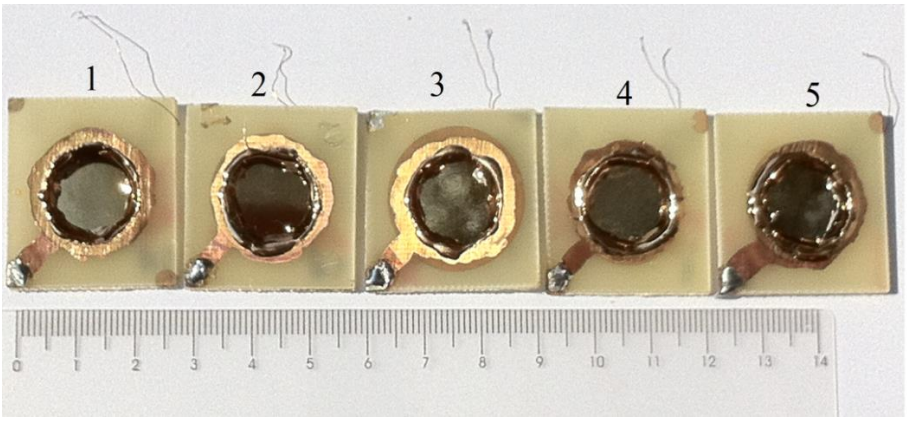

Figura 19: Vista frontal dos detectores, onde pode ser observado a região de deposição de ouro e a extensão do cobre na placa de fibra de vidro para constituir o contato elétrico desta face.

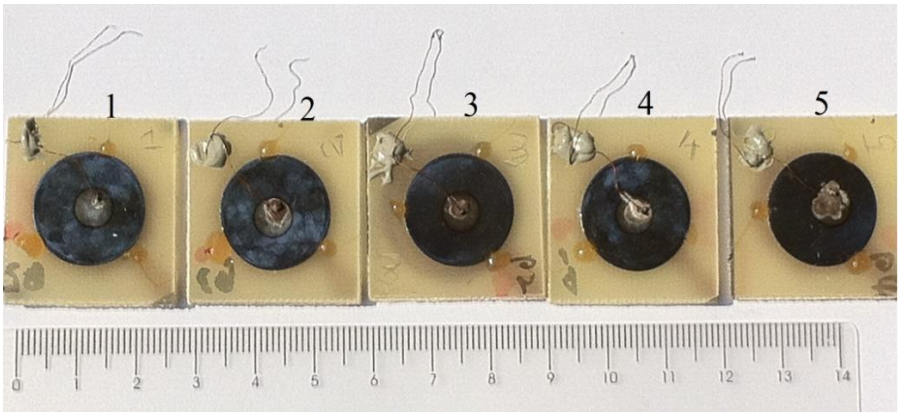

Figura 20: Vista traseira dos detectores, onde pode ser observado a região central da deposição de alumínio e o fios aderidos com tinta de prata para constituir os contatos elétricos destas faces.

4.1 Validação dos detectores como diodos

Se os detectores confeccionados apresentaram uma junção, esta apresenta características retificadoras. Estas características são o comportamento puramente resistivo no sentido direto da polarização e no sentido reverso há a presença de um patamar, onde a corrente tende a permanecer constante mesmo com o aumento da tensão aplicada. Esta constância é devido ao aumento da região de depleção, ou seja, o volume ativo de detector, que aumenta com o aumento da tensão até uma região de ruptura (joelho da curva). As Figuras 21 a 25 apresentam as respectivas curvas corrente por tensão para cada um dos detectores confeccionados utilizando os resistores de carga de 10 MΩ e 250 MΩ.

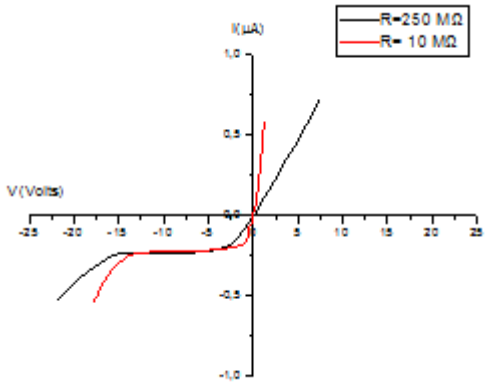

Figura 21: Gráfico referente a curva corrente por tensão obtida para o detector1.

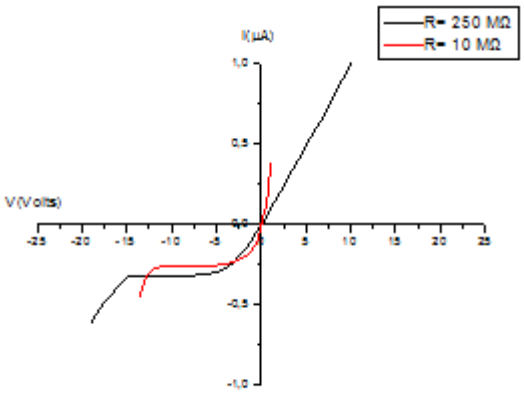

Figura 22: Gráfico referente a curva corrente por tensão obtida para o detector2.

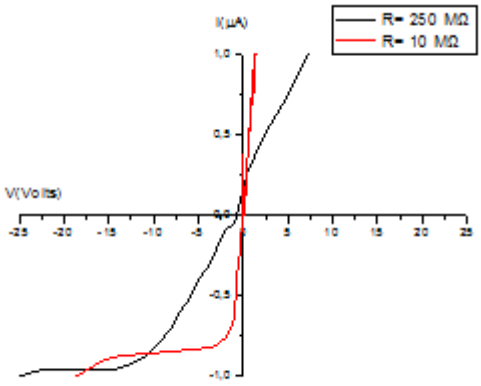

Figura 23: Gráfico referente a curva corrente por tensão obtida para o detector3.

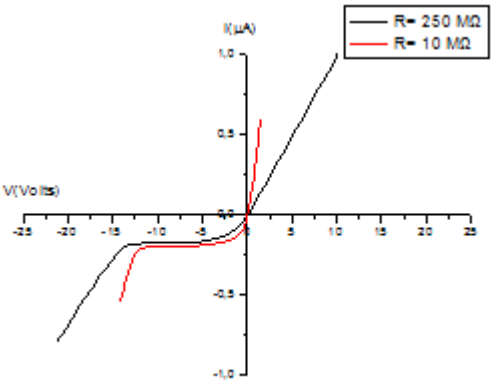

Figura 24: Gráfico referente a curva corrente por tensão obtida para o detector4.

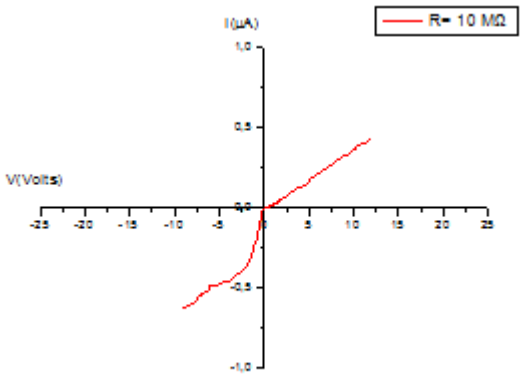

Figura 25: Gráfico referente a curva corrente por tensão obtida para o detector5.

Como pode ser observado nas Figuras 21 a 25, as amostras 1 a 4 apresentaram o comportamento de junção, com definição da região do patamar que é a região de interesse para utilização como detectores. A amostra 5, por sua vez não apresentou esta característica e também não permitiu a elaboração da curva com resistor de carga de 250 MΩ, pois as correntes estavam abaixo do limiar de sensibilidade do multímetro.

Com os detectores 1 a 4 apresentando a região de patamar, definiu-se o potencial de polarização reversa em 90% da tensão antes que os detectores atingissem a região de ruptura, avalancha ou *breakdown*.

Na Tabela 1 podem ser observados os pontos de operação escolhidos para cada detector, bem como as correntes reversas, espessuras finais de cada detector e as respectivas resistências e resistividades aparentes. É interessante observar que para as resistividades dos substratos utilizados (500 a 20.000 Ω.cm), a técnica de produzir uma junção e operá-la no sentido reverso, como esperado, elevou a resistividade de forma aparente (1,1 a 2,5 GΩ.cm) minimizando sobremaneira a corrente reversa no detector e consequentemente o ruído eletrônico produzido pelo movimento de portadores de carga gerados termicamente.

Tabela 1: Tensões reversas de operação, correntes reversas, espessuras finais, resistência e resistividade aparentes para cada um dos detectores com resistores com carga de 10 MΩ e 250MΩ.

Detector	**$V_{reversa\ de\ operação}$**	**$I_{reverso}$**	**Espessura**	**$R_{Aparente}$**	**$\rho_{Aparente}$**
	Volts	**μA**	**μm**	**MΩ**	**GΩ.cm**
1 $R_{carga\ =10\ MΩ}$	12,6	0,22	199,0	57,3	2,2
2 $R_{carga=\ 10\ MΩ}$	9,2	0,25	264,0	36,9	1,5
3 $R_{carga\ =10\ MΩ}$	11,7	0,80	135,0	14,6	1,1
4 $R_{carga\ =10\ MΩ}$	11,2	0,20	358,0	56,2	1,6
1 $R_{carga=250MΩ}$	14,4	0,22	199,0	65,5	2,5
2 $R_{carga=250MΩ}$	13,5	0,35	264,0	38,6	1,5
3 $R_{carga=250MΩ}$	22,5	0,95	135,0	23,6	1,8
4 $R_{carga=250MΩ}$	11,7	0,15	358,0	78,0	2,3

A obtenção das curvas características, bem como os espectros de energia com dois resistores de carga distintos, teve como finalidade adequar a polarização a uma possível corrente de fuga elevada nos detectores.

Na tentativa de estimar a resistividade no sentido direto de polarização, para cada substrato, foram calculadas as resistências dos detectores no sentido direto a partir dos gráficos das Figuras 21 a 25. Eram esperados baixos valores, uma vez que

no sentido direto o detector se comporta como um diodo no sentido de condução, que de um modo geral, são valores da ordem de alguns ohms. Como pode ser visto na Tabela 2, os valores de resistência direta dos detectores ficaram da ordem de 10^6 ohms, e o detector 5 que não apresentou região de patamar e permitiu apenas a obtenção da curva corrente x tensão com o resistor de carga de 10 MΩ, que apresentou a maior resistência no sentido direto.

Da Tabela 2 pode ser observado que o comportamento da resistência direta dos detectores é similar para cada resistor de carga e podem estar sendo definidas pela região de operação.

Tabela 2: Valores de resistência dos detectores desenvolvidos no sentido direto de polarização.

Detector	Resistência no sentido direto (MΩ)
1($R_{carga = 10\ M\Omega}$)	2,09
2($R_{carga = 10\ M\Omega}$)	2,59
3($R_{carga = 10\ M\Omega}$)	1,27
4($R_{carga = 10\ M\Omega}$)	2,61
5($R_{carga = 10\ M\Omega}$)	27,21
1($R_{carga = 250\ M\Omega}$)	10,40
2($R_{carga = 250\ M\Omega}$)	10,12
3($R_{carga = 250\ M\Omega}$)	8,24
4($R_{carga = 250\ M\Omega}$)	10,06

Analisando o circuito equivalente do detector a partir de um modelo da Hammatsu [42], Figura 26, encontra-se uma resistência em série que pode estar justificando este comportamento. Ainda, a partir de Millman e Halkias [49], um diodo apresenta uma resistência estática que varia muito com a tensão e corrente sobre a junção, e além disso apresenta uma resistência dinâmica ou incremental que não é uma constante, dependendo do ponto de operação do diodo. O conjunto destas contribuições e a região de operação no sentido direto

nesta aplicação, com correntes da ordem de apenas 10^{-6} A, podem justificar os elevados valores de resistência no sentido direto para os detectores desenvolvidos neste trabalho. Para o detector 5 que não apresentou a região de patamar para o resistor de carga de 10 MΩ e não possibilitou a medição dos valores de corrente x tensão com resistor de carga de 250 MΩ, pode ter este valor elevado justificado por uma deposição dos metais de forma irregular ou que não atravessou a camada de oxido até o substrato para provocar a desejada inversão de população.

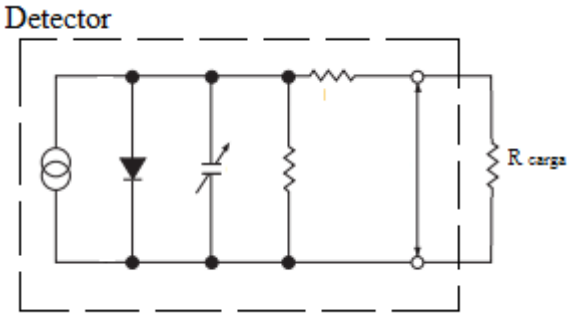

Figura 26: Circuito equivalente de um detector semicondutor com junção. Figura modificada de Hammatsu[42].

Das condições descritas, não foi possível obter o valor das resistividades individuais de cada substrato utilizado e uma possível associação desta, com os resultados obtidos para cada detector.

4-2 Análise dos espectros de energia das amostras quando submetidas a fontes radioativas

As Figuras 27 a 34 apresentam em (a) os espectros de energia para as emissões gama do iodo-125 e amerício-241 e o ruído de fundo (BG) obtidos para os detectores de número 1 a 4 com resistências de carga de 10 MΩ e 250 MΩ, e em (b) com os valores em contagens normalizados para uma melhor observação de possíveis diferenças de resolução para as duas energias da radiação gama detectadas. Na Figura 35, são apresentados os resultados da

tentativa de obtenção dos espectros de energia para os radioisótopos acima para o detector de número 5.

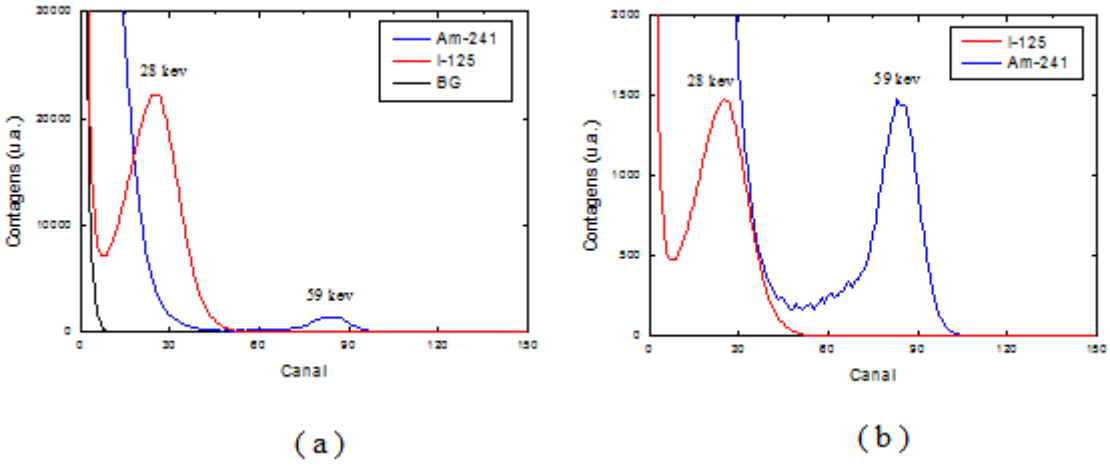

Figura 27: Em (a) espectros de energia e BG do detector 1 para uma resistência de carga de 10 MΩ quando exposto a radiação gama de fontes de iodo-125 e amerício-241. Em (b) os espectros normalizados em contagens.

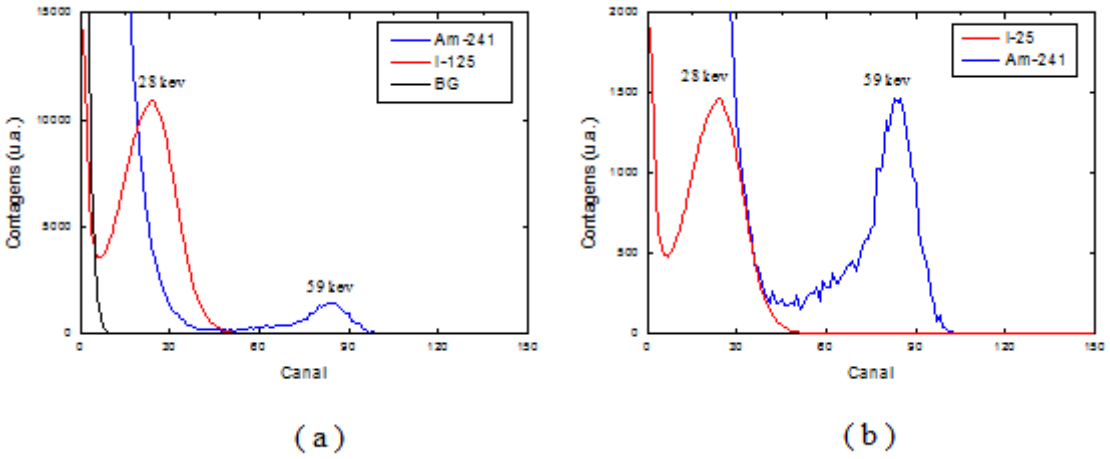

Figura 28: Em (a) espectros de energia e BG do detector 1 para uma resistência de carga de 250 MΩ quando exposto a radiação gama de fontes de iodo-125 e amerício-241. Em (b) os espectros normalizados em contagens.

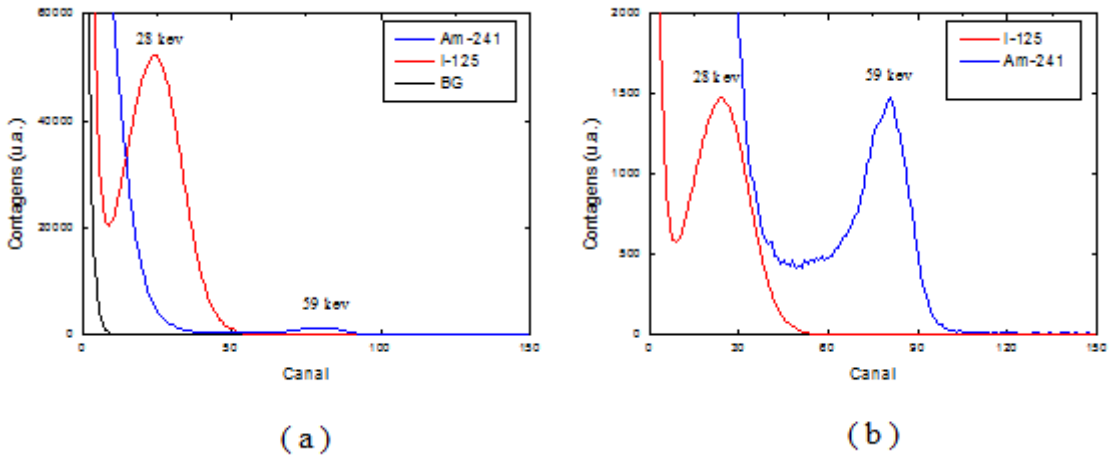

Figura 29: Em (a) espectros de energia e BG do detector 2 para uma resistência de carga de 10 MΩ quando exposto a radiação gama de fontes de iodo-125 e amerício-241. Em (b) os espectros normalizados em contagens.

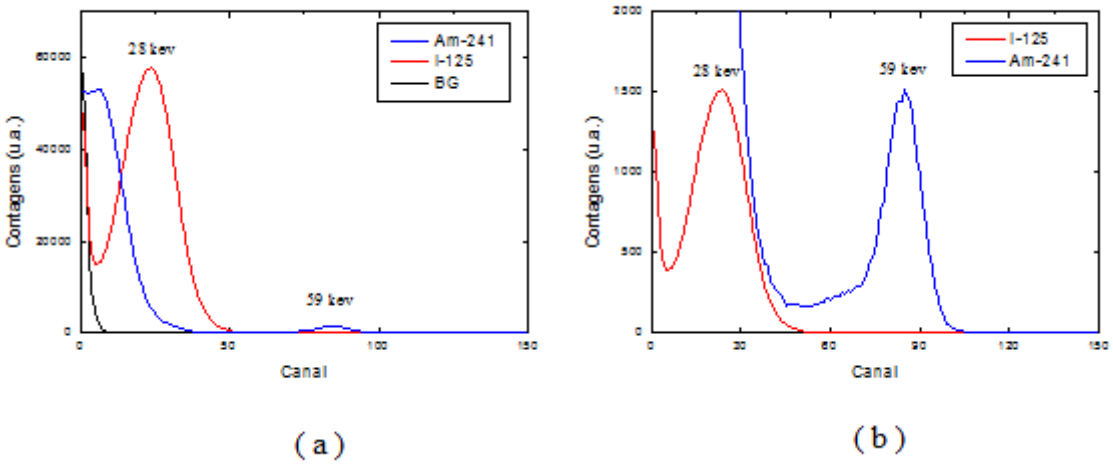

Figura 30: Em (a) espectros de energia e BG do detector 2 para uma resistência de carga de 250 MΩ quando exposto a radiação gama de fontes de iodo-125 e amerício-241. Em (b) os espectros normalizados em contagens.

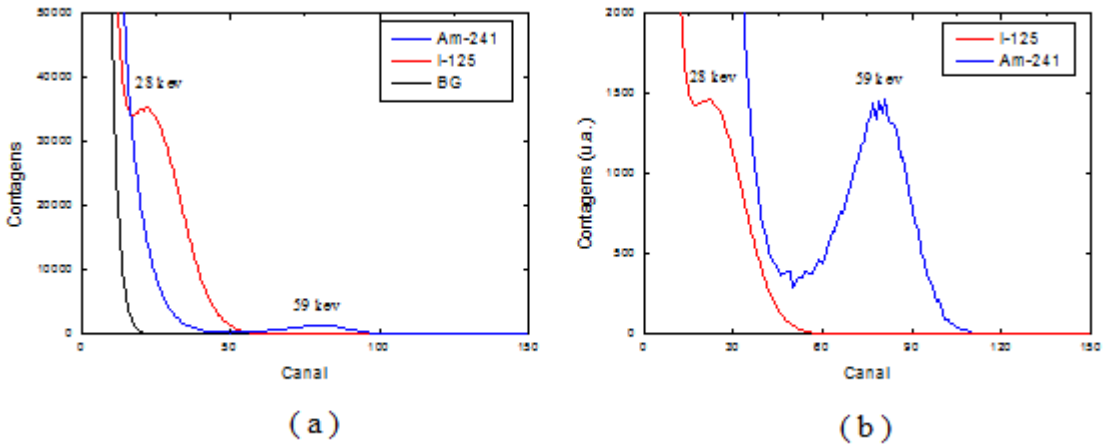

Figura 31: Em (a) espectros de energia e BG do detector 3 para uma resistência de carga de 10 MΩ quando exposto a radiação gama de fontes de iodo-125 e amerício-241. Em (b) os espectros normalizados em contagens.

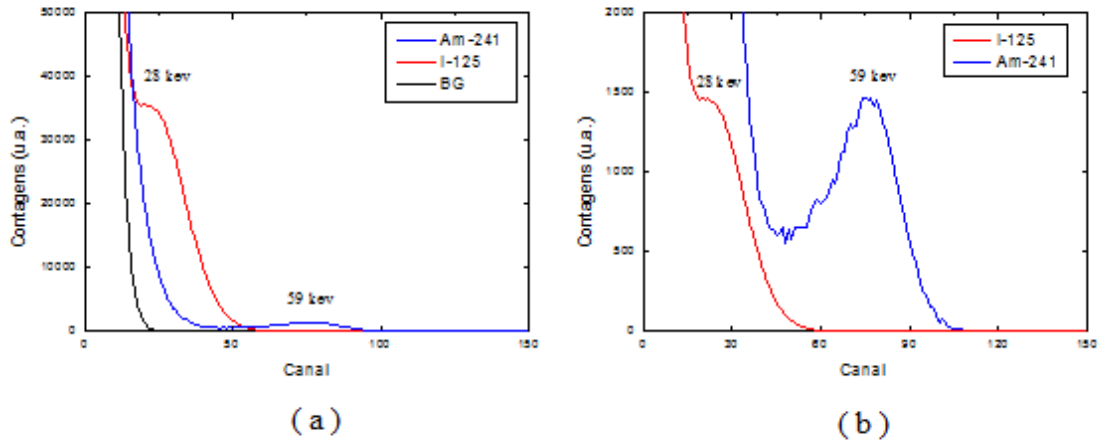

Figura 32: Em (a) espectros de energia e BG do detector 3 para uma resistência de carga de 250 MΩ quando exposto a radiação gama de fontes de iodo-125 e amerício-241. Em (b) os espectros normalizados em contagens.

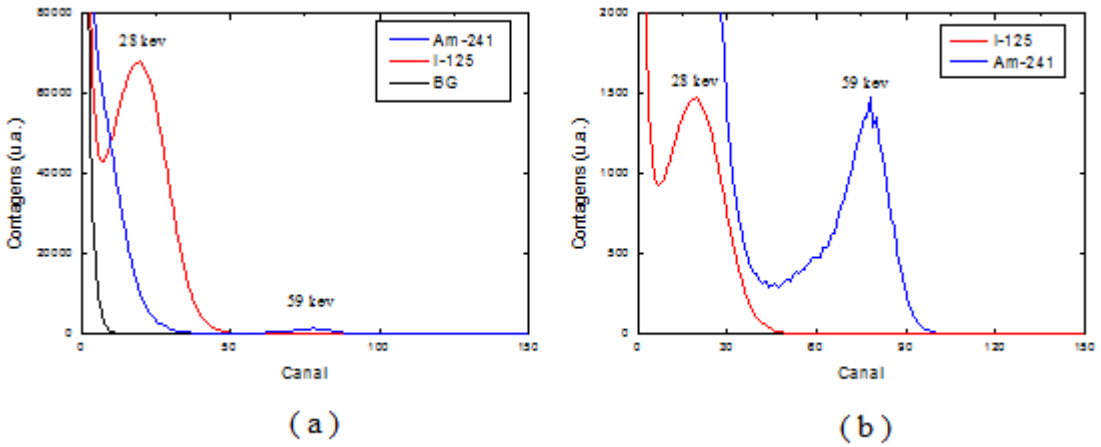

Figura 33: Em (a) espectros de energia e BG do detector 4 para uma resistência de carga de 10 MΩ quando exposto a radiação gama de fontes de iodo-125 e amerício-241. Em (b) os espectros normalizados em contagens.

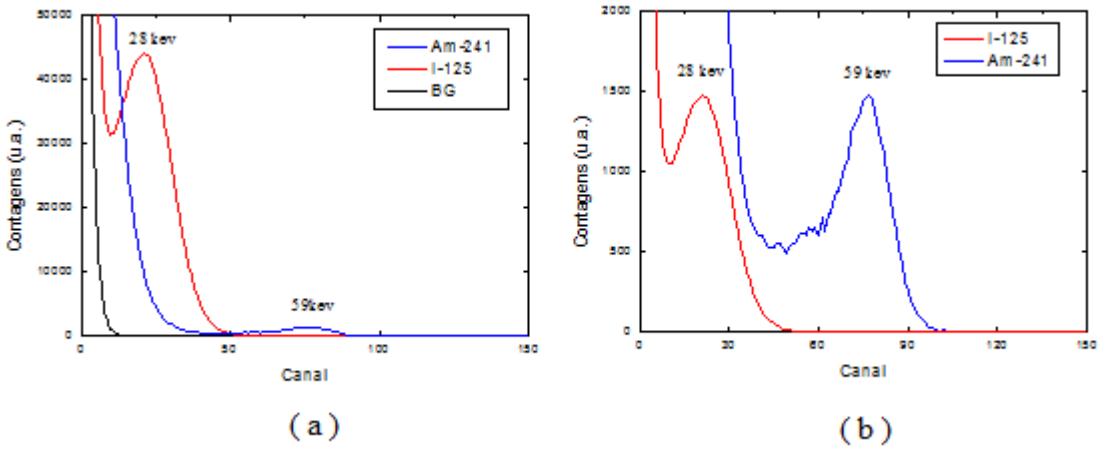

Figura 34: Em (a) espectros de energia e BG do detector 4 para uma resistência de carga de 250 MΩ quando exposto a radiação gama de fontes de iodo-125 e amerício-241. Em (b) os espectros normalizados em contagens.

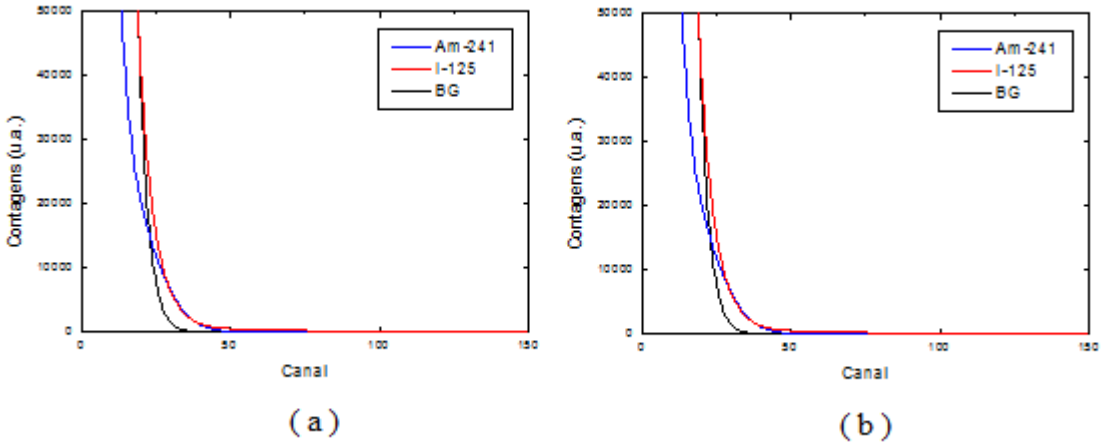

Figura 35: Nesta Figura, as tentativas de se observar os espectros de energia e BG do detector 5 para uma resistência de carga de 10 MΩ (a) e 250 MΩ (b) quando exposto a radiação gama de fontes de iodo-125 e amerício-241.

Como pode ser observado nas Figuras 27 a 34, os detectores 1 a 4 apresentaram características detectoras para os fótons gama das energias da ordem de 28 keV e 59 keV (iodo-125 e amerício-241 respectivamente). O detector 5 não apresentou características detectoras e este resultado concorda com a curva corrente x tensão, Figura 35. Este detector não apresentou a região de patamar com tensão reversa e resistor de carga de 10 MΩ, não apresentando portanto a região de depleção; também não possibilitou a obtenção da curva corrente x tensão com resistor de carga de 250 MΩ.

A Figura 36 apresenta os espectros de energia dos detectores 1 a 4 para emissão gama de 28 keV do iodo-125 com resistor de carga de 10 MΩ. Os melhores resultados podem ser observados para os detectores 1 e 2 que apresentam um fotopico mais definido quando comparados aos demais. O detector 3 apesar de detectar a energia de 28 keV, praticamente não resolveu o fotopico. O resultado deste último detector está de acordo com a curva corrente x tensão, Figura 23, que mostrou uma maior corrente reversa na região de patamar em relação aos demais detectores (1 a 4) e que também mostrou um maior ruído na região de BG, Figura 16. Este pior resultado também pode ser explicado pela menor espessura do cristal entre os demais (135 μm), que foi resultado de uma taxa de apassivação excessiva que consumiu mais este cristal em relação aos demais. Esta última consideração implica em que a taxa de apassivação para a solução utilizada foi maior que a descrita na literatura [10].

O detector 4 apresentou um resultado intermediário que pode ser justificado por uma espessura elevada em relação aos demais. O mesmo padrão de comportamento dos detectores apresentados com o resistor de carga de 10 MΩ, pode ser observado nos espectros de energia, Figura 21, com resistor de carga 250 MΩ.

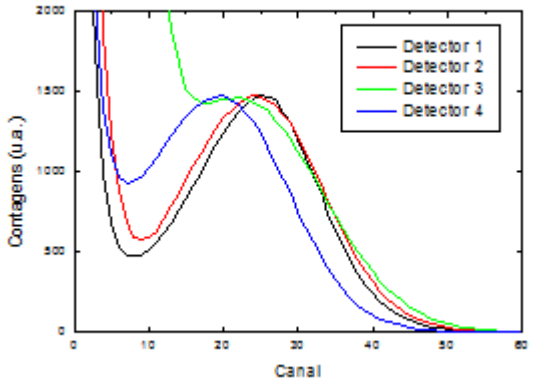

Figura 36: Espectros de energia para os detectores 1 a 4 com fonte de iodo-125, 28 keV, e resistor de carga de 10 MΩ.

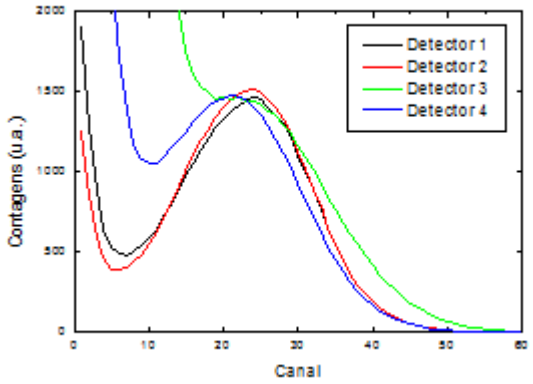

Figura 37: Espectros de energia para os detectores 1 a 4 com fonte de iodo-125, 28 keV, e resistor de carga de 250 MΩ.

A Figura 38 apresenta os resultados dos espectros de energia com a fonte gama de amerício-241, 59 keV e resistor de carga de 10 MΩ. Nesta Figura pode-se observar que as diferenças não são tão expressivas, uma vez que a energia maior detectada, distância mais o fotopico da região do ruído (BG) e com isso as diferenças observadas podem estar mais relacionadas a um posicionamento diferente em relação a fonte radioativa.

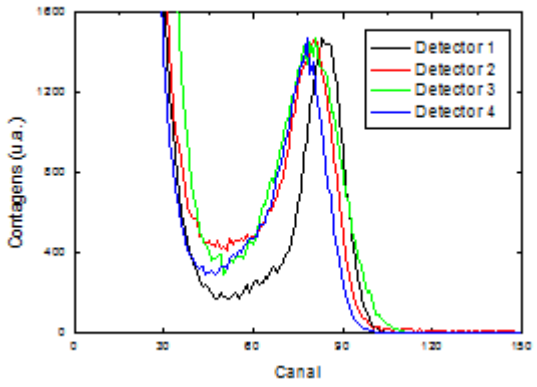

Figura 38: Espectros de energia para os detectores 1 a 4 com fonte gama de amerício-241, 59 keV, e resistor de carga de 10 MΩ.

A Figura 38 apresenta os resultados dos espectros de energia com a fonte gama de amerício-241, 59 keV e resistor de carga de 250 MΩ. Como pode ser observado, com a substituição do resistor de carga e um novo reposicionamento da fonte radioativa, os detectores 1 e 2 confirmam sua superioridade em relação aos demais.

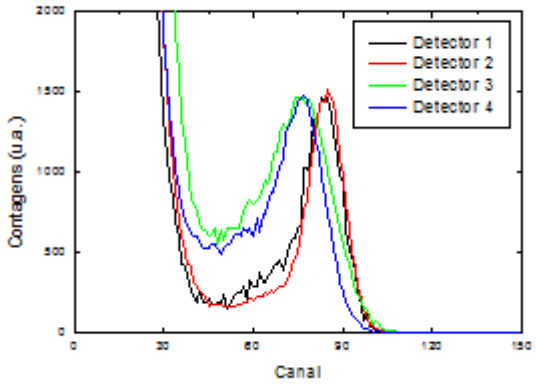

Figura 39: Espectros de energia para os detectores 1 a 4 com fonte gama de amerício-241, 59 keV, e resistor de carga de 250 MΩ.

Com a fonte de 28 keV, o posicionamento foi mais efetivo, uma vez que o detector ficava predominantemente mais sensível com a fonte radioativa exatamente sobre a região ativa do detector; o mesmo já era mais difícil com a fonte de 59 keV, que era detectada praticamente em qualquer posição sobre o detector.

5-CONCLUSÃO

O método utilizado mostrou-se satisfatório para a produção de detectores de barreira de superfície com semicondutores de silício para a aplicação proposta. Os resultados implicam em admitir que a desejada região de depleção pode estar mais próxima dos valores entre 199 e 264 µm, para a resistividade fornecidas nos substratos e que a ordem de grandeza não está em uma faixa tão larga como a indicada pelo fabricante. O tempo de apassivação deve ser melhor aferido havendo a disponibilidade de mais substratos.

6- REFERÊNCIAS

[1] Glenn F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, Second Edition (1989).

[2] P. MARMIER & E. SHELDON. Physics of nuclei and particles. v. 1, 1969.

[3] N. TSOULFANIDIS. Measurement and Detection of Radiation. v.1,1983.

[4] R. D. EVANS. The atomic Nucleous. New York, NY: Tata McGraw Hill Publishing Company LTD, 1955.

[5] MCGREGOR, D.S.; HERMON, H. Room-temperature compound semiconductor radiation detectors. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect A*, 1997.

[6] Boer, K. W., Survey of Semiconductor Physics Volume II: Barriers, Junctions, Surfaces, and Devices. 1992.

[7] E. E. Haller, Detector materials: Germanium and Silicon, IEEE Transactions on Nuclear Science, 29, 3, (1982), 1109.

[8] Raissi, F., Sheeni, N. A., Highly sensitivity near IR detectors using n-type porous Si. Sensors and Actuators A: Physical, v. 104, Issue 2, 2003.

[9] *Silicon Drift Detectors*. Disponível em*:* <*http://www.amptek.com/si_cdte.html>. Acesso em 13 de Maio de 2014*.

[10] ORTEC Manual, A Guide to the Selection and Use of ORTEC Surface Barrier Detectors, 60. Disponível em: http://www.ortec-online.com/Service-Support/Library/Manuals.aspx Acesso em: 20/08/2014.

[11] SCHLESINGER, T.E.; JAMES, R.B. *Semiconductors for room temperature nuclear detector applications, semiconductors and semimetals,* San Diego: Academic, 1995, v. 43.

[12] Stojanovic, M.; Osmakrovic P.; Boreli, F *Characteristics of large area Silicon surface barrier detectors*, Belgrade, Institute of nuclear science, 1997.

[13] Heijne, E.H.M. , Hubberling L. , Hyams B.D. *A Silicon surface barriers microstrip detector designed for high energy physics*, Geneve, Switzerland, CERN, 1980.

[14] Kim H.S., Park S.H., Ha J.H. Characteristics of Silicon surface barrier radiation detectors for alpha particles detection. Seoul, Hanyang university, 2008.

[15] Kaplan, I. Física Nuclear, 2° Edição, Ed. Guanabara, 1978.

[16] KITTEL, C. Introdução à Física do Estado Sólido. 8ª Ed. Brasil, LTC, 2006.

[17] GARCIA, A. Solidificação – fundamentos e aplicações. 1º Ed. Editora Unicamp, Brasil, 2001.

[18] BUCKLEY, H.E. Crystal Growth. 1a Ed. New York, John Willey, 1950.

[19] Progress in the Development of CdTe and CdZnTe Semiconductor Radiation Detectors for Astrophysical and Medical Applications, Stefano Del Sordo at all, Sensors 2009.

[20] Malvino, P. Eletrônica, volume 1, McGraw-Hill, São Paulo, 1986.

[21] Khanal, S. Pulsed and transient characterization of THz schottcky diodes, Aalto university, 2012.

[22] Bertuccio, G.; Fasoli, L.; Sampietro, M Stability of amplification in detectors with integrated electronics, Nucl. Inst. Met. In Physics Researchs, 1996.

[23] Cutler, P. Circuitos eletrônicos lineares. São Paulo, S.P.,1997.

[24] EG&G Ortec. Modular Pulse-Processing Eletronics and semicondutors Radiation Detectors. Tenesse, U.S.A., 1994.

[25] Spieler, H. Fast Timing for semiconductor Detector, IEEE Trasactions on Nuclear Science, 1982.

[26] Goulding, F.S.; Landis, D.A., IEEE Transactions on Nuclear Science, Signal Processing for Semiconductor Detector, 1982.

[27] Júnio, J.V.C.; Passivação Superfície do Germânio visando o uso em nano eletrônica, UFRGS, Porto Alegre, 2009.

[28] HITOMI, K. Young Scientist – Radiation Award by Radiation Science Division of the Japanese Society for Applied Physics. ***Jpn. Soc. Appl. Phys. Int.***, n. 6, P. 29-30, 2002.

[29] SCHLESINGER, T.E.; JAMES, R.B. ***Semiconductors for room temperature nuclear detector applications, semiconductors and semimetals***, San Diego: Academic, 1995, v. 43.

[30] MCGREGOR, D.S.; HERMON, H. Room-temperature compound semiconductor radiation detectors. ***Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect A***, v.395, p.101-124, 1997.

[31] SAKAI, E. Present status of room temperature semiconductor detectors. ***Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect A***, v.196, p.121-130, 1982.

[32] ERENO, D. Na mira do cristal. ***Revista Fapesp***, São Paulo, v. 116, outubro 2005, p.70.

[33] SQUILLANTE, M.R.; ENTINE, G. Novel concepts in X-ray and γ-ray detection using compound semiconductors. ***Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect A***, v.380, p.160-164, 1996.

[34] CAMARGO, F. ***Fatores que influenciam a resolução em energia na espectrometria de partículas alfa com diodos de Si***. 2005. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

[35] SELLIN, P.J. Recent advances in compound semiconductors radiation detectors. ***Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect A***, v.513, p.332-339, 2003.

[36] ZALETIN, V.M. Development of semiconductor detectors based on wide-gap materials. ***At. Energy***, v.97, n.5, p.773-780, 2004.

[37] GOSTILO, V.; GRYAZNOV, D.; LISJUTIN, I. Technological limitation and processing-generated defects at the development of pixel and strip arrays. ***Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect A***, v.487, p.13-18, 2002.

[38] ACS - American Chemical Society. ***Reagent Chemicals.*** 7. ed. Oxford: ACS, 1987.

[39] SHALIMOVA, K.V. ***Física de los semicondutores.*** Moscou: Mir. 1975.

[40] ABYZOV, A.S.; DAVYDOV, L.N.; KUTNY, V.E.; RYBKA, A.V.; ROWLAND, M.S.; SMITH, C.F. Correlation between spectrometric ability and physical properties of semiconductor detectors. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON ROOM TEMPERATURES SEMICONDUCTORS X- AND GAMMA-RAY DETECTORS AND ASSOCIATED ELECTRONICS, Oct.11-15, 1999, Vienna. ***Proceedings…***Vienna: IAEA, 1999.

[41] MADELUNG, O. ***Semiconductors: Data Handbook***. 3º Ed., Spriger, U.S.A, caps. 1, 21 e 23, 1999.

[42] **HAMAMMATSU.** Disponível em: http://hamamatsu.com. Acesso em: 20/07/2015.

[45] CUTLER, P. ***Circuitos Eletrônicos Lineares***. São Paulo, S.P., 1977.

[46] BITELLI, T. ***Dosimetria e higiene das radiações***. São Paulo, S.P.: Grêmio Politécnico, 1982.

[47] Shiraishi, F., Takami, Y., and Hosoe, M., A Large Area Solid State Detector Made Ultra High Purity P-Type Si, Nucl. Instr. and Meth. 226 (1984) 107.

[48] Shiraishi, F., Takami, Y., and Hosoe, M., A Thick Surface Barrier Detectors Made of Ultra-High Purity P-Type Si Single Crystal, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 16 (1983) 175.

[49] Milman, J., Halkias, C. Eletronic Devices and Circuits, McGraw-Hill, 2001.

[50] Dixon, R.L; Ekstrand, K.E. Silicon diode dosimetry. Int. J. Appl. Radiat. Isto. V.33,1982.

[51] Aoki, k.; Koyama, M. Measurement of diagnostic x-ray spectra using a silicone photodiode. Med. Phys. V16, 1989.

[52] Rosenfeld, A.B. Eletronic dosimetry in radiation therapy. Radiat. Meas. V.41, 2007.

[53] Moll, M. Radiation tolerant semiconductors sensors for tracking detectors. Nucl. Instrum. Method Phys. Res., sect.. A, v. 565, 2006.

[54] Santos, T.C. Dosimetria de elétrons em processos de irradiação com diodos resistentes a danos de radiação. 2012. Tese-Universidade de São Paulo.

[55] Extrinsic semiconductors. Eletronic et technologie. Disponível em: <eletronique1.blogspot.com.br/2011/classificationofsemiconductors.htmal> Acessado em: 26/09/2015.

[56] Melo, H. A.; Biasi, R. S. Introdução à Física dos semicondutores, Edgard Blucher, 1975.

[57] Leo, W. R. Techniques for nuclear and particle physics experimente, 2 ª ed.; Springer-Verlag, 1994..

[58] Rezende, S. M Materiais e dispositivos eletrônicos 2ª Ed. Editora livraria da Física, 2004.

[59] Eletrônica Básica.
Disponível.em: <Manoel.pesqueira.ifpe.edu.br/fmn/2007.1/eletronica1/cursoeletronica/cursoEN1/Aulas002.html> Acesso em: 11/11/2015.

[60] Efeitos Fotoelétrico e Compton.
Disponível em: http://efeitoeletricoecompton.webnode.com.br/efeito-compton/ Acesso em: 15/09/20015.

[61] Podgorsak, E.B. Radiation Oncology Physics: A handbook for teachers and students. International Atomic Energy Agency(IAEA) Austria, 2005.

[62] Pavel, N.A. Particle Detectors for biomedical applictions-demands and trends. Nucl.Instrum. Methods Physics. Res., Sect. A. v. 535, p,1-12, 2002.

[63] Camargo, F. Desenvolvimento de dosímetros com diodos de Si resistentes à radiação para dosimetria de altas doses. 2009. Tese-Universidade de São Paulo.

7- APÊNDICES

Este apêndice contem os dados obtidos durante a etapa de validação das amostras obtidas

7.1- Dados adquiridos durante a validação com o detector da amostra 1 para uma resistência de 10 MΩ.

Corrente (μA)	Tensão aplicada (V)	Tensão no resistor(V)	Tensão no detector(V)
-0,5226	-26,9	-5,22600	-21,67400
-0,4943	-26,16	-4,94300	-21,21700
-0,4575	-25,2	-4,57500	-20,62500
-0,4153	-24,03	-4,15300	-19,87700
-0,3869	-23,17	-3,86900	-19,30100
-0,355	-22,2	-3,55000	-18,65000
-0,3168	-20,92	-3,16800	-17,75200
-0,2931	-20,06	-2,93100	-17,12900
-0,2722	-19,2	-2,72200	-16,47800
-0,2489	-18,02	-2,48900	-15,53100
-0,2379	-17,04	-2,37900	-14,66100
-0,2342	-15,85	-2,34200	-13,50800
-0,2334	-14,99	-2,33400	-12,65600
-0,2322	-13,89	-2,32200	-11,56800
-0,2313	-12,87	-2,31300	-10,55700
-0,231	-11,94	-2,31000	-9,63000
-0,2299	-10,98	-2,29900	-8,68100
-0,2284	-9,92	-2,28400	-7,63600
-0,2268	-8,97	-2,26800	-6,70200
-0,2231	-8,13	-2,23100	-5,89900
-0,215	-6,94	-2,15000	-4,79000
-0,2085	-6,18	-2,08500	-4,09500
-0,1941	-5,016	-1,94100	-3,07500
-0,1735	-4,156	-1,73500	-2,42100
-0,1309	-2,962	-1,30900	-1,65300
-0,0853	-1,872	-0,85300	-1,01900
-0,0427	-0,923	-0,42700	-0,49600
0,0438	0,955	0,43800	0,51700
0,1122	2,41	1,12200	1,28800
0,2591	5,41	2,59100	2,81900
0,3532	7,29	3,53200	3,75800
0,4719	9,67	4,71900	4,95100
0,5624	11,51	5,62400	5,88600
0,7312	14,92	7,31200	7,60800

7.2- Dados adquiridos durante a validação com o detector da amostra 1 para uma resistência de 250 MΩ.

Corrente (μA)	Tensão aplicada (V)	Tensão no resistor(V)	Tensão no detector(V)
-0,5296	-150,2	-132,4	-17,8
-0,51	-145	-127,5	-17,5
-0,4909	-140,1	-122,725	-17,375
-0,4728	-135,5	-118,2	-17,3
-0,4515	-129,9	-112,875	-17,025
-0,434	-125,4	-108,5	-16,9
-0,4122	-119,7	-103,05	-16,65
-0,3954	-115,3	-98,85	-16,45
-0,3745	-109,8	-93,625	-16,175
-0,3539	-104,4	-88,475	-15,925
-0,3366	-99,8	-84,15	-15,65
-0,3189	-95,2	-79,725	-15,475
-0,3	-90,1	-75	-15,1
-0,28	-84,7	-70	-14,7
-0,2593	-79,1	-64,825	-14,275
-0,245	-75,1	-61,25	-13,85
-0,2279	-69,9	-56,975	-12,925
-0,2216	-65,7	-55,4	-10,3
-0,2147	-59,7	-53,675	-6,025
-0,2057	-54,8	-51,425	-3,375
-0,1929	-50,33	-48,225	-2,105
-0,177	-45,43	-44,25	-1,18
-0,1542	-39,33	-38,55	-0,78
-0,1369	-34,84	-34,225	-0,615
-0,1164	-29,58	-29,1	-0,48
-0,0966	-24,6	-24,15	-0,45
-0,0774	-19,78	-19,35	-0,43
-0,061	-15,48	-15,25	-0,23
-0,0386	-9,8	-9,65	-0,15
-0,0204	-5,195	-5,1	-0,095
-0,0037	-0,966	-0,925	-0,041
0,0039	0,992	0,975	0,017
0,0394	10,01	9,85	0,16
0,0786	19,94	19,65	0,29
0,1161	29,43	29,025	0,405
0,1628	41,21	40,7	0,51
0,1971	49,88	49,275	0,605
0,2371	59,9	59,275	0,625
0,2796	70,6	69,9	0,7

0,3145	79,4	78,625	0,775
0,3642	91,9	91,05	0,85
0,3977	100,4	99,425	0,975
0,4358	110	108,95	1,05
0,4724	119,2	118,1	1,1
0,5183	130,7	129,575	1,125
0,5531	139,5	138,275	1,225
0,5962	150,3	149,05	1,25

7.3- Dados adquiridos durante a validação com o detector da amostra 2 para uma resistência de 10 MΩ.

Corrente (μA)	Tensão aplicada (V)	Tensão no resistor(V)	Tensão no detector(V)
-0,5573	-23,9	-5,573	-18,327
-0,5247	-23,17	-5,247	-17,923
-0,4746	-22,03	-4,746	-17,284
-0,428	-20,95	-4,28	-16,67
-0,3878	-19,96	-3,878	-16,082
-0,354	-19,01	-3,54	-15,47
-0,325	-18,02	-3,25	-14,77
-0,3211	-16,89	-3,211	-13,679
-0,3211	-16,01	-3,211	-12,799
-0,3211	-15	-3,211	-11,789
-0,3211	-13,95	-3,211	-10,739
-0,3211	-13,01	-3,211	-9,799
-0,3211	-11,9	-3,211	-8,689
-0,3211	-11,02	-3,211	-7,809
-0,3132	-9,95	-3,132	-6,818
-0,3032	-8,92	-3,032	-5,888
-0,2905	-7,95	-2,905	-5,045
-0,2778	-7,16	-2,778	-4,382
-0,254	-6,13	-2,54	-3,59
-0,2268	-5,16	-2,268	-2,892
-0,1846	-4,059	-1,846	-2,213
-0,1378	-2,985	-1,378	-1,607
-0,0942	-2,024	-0,942	-1,082
-0,0496	-1,062	-0,496	-0,566
-0,0446	-0,959	-0,446	-0,513
0,0456	0,966	0,456	0,51
0,142	2,943	1,42	1,523
0,2464	5,05	2,464	2,586

0,3364	6,86	3,364	3,496
0,4449	9,04	4,449	4,591
0,543	11	5,43	5,57
0,6406	12,95	6,406	6,544
0,7346	14,83	7,346	7,484
0,8386	16,9	8,386	8,514
0,9394	18,92	9,394	9,526
1,0401	20,93	10,401	10,529

7.4- Dados adquiridos durante a validação com o detector da amostra 2 para uma resistência de 250 MΩ.

Corrente (μA)	Tensão aplicada (V)	Tensão no resistor(V)	Tensão no detector(V)
-0,427	-120,2	-106,75	-13,45
-0,4069	-115,1	-101,725	-13,375
-0,3876	-110,2	-96,9	-13,3
-0,3675	-105	-91,875	-13,125
-0,3482	-100	-87,05	-12,95
-0,3293	-95,2	-82,325	-12,875
-0,3097	-90	-77,425	-12,575
-0,291	-85,1	-72,75	-12,35
-0,2723	-80	-68,075	-11,925
-0,2566	-74,9	-64,15	-10,75
-0,2566	-69,8	-64,15	-5,65
-0,2435	-65	-60,875	-4,125
-0,2282	-60,1	-57,05	-3,05
-0,2109	-54,8	-52,725	-2,075
-0,1934	-49,94	-48,35	-1,59
-0,1756	-45,04	-43,9	-1,14
-0,1568	-40,08	-39,2	-0,88
-0,1372	-34,98	-34,3	-0,68
-0,1177	-29,88	-29,425	-0,455
-0,099	-25,15	-24,75	-0,4
-0,0782	-19,86	-19,55	-0,31
-0,0591	-15,01	-14,775	-0,235
-0,0393	-9,99	-9,825	-0,165
-0,0196	-5,016	-4,9	-0,116
0,004	0,996	1	-0,004
0,0037	0,974	0,925	0,049
0,0386	9,76	9,65	0,11
0,0788	19,95	19,7	0,25

0,118	30,03	29,5	0,53
0,157	39,88	39,25	0,63
0,1955	49,65	48,875	0,775
0,237	60,1	59,25	0,85
0,2768	70,1	69,2	0,9
0,3158	79,9	78,95	0,95
0,356	90	89	1
0,3955	99,9	98,875	1,025

7.5- Dados adquiridos durante a validação com o detector da amostra 3 para uma resistência de 10 MΩ.

Corrente (μA)	Tensão aplicada (V)	Tensão no resistor(V)	Tensão no detector(V)
-1,089	-38,07	-10,89	-27,18
-1,0458	-36,03	-10,458	-25,572
-1,0109	-34,06	-10,109	-23,951
-0,9792	-32	-9,792	-22,208
-0,9623	-29,98	-9,623	-20,357
-0,9604	-28,16	-9,604	-18,556
-0,9597	-25,98	-9,597	-16,383
-0,9584	-23,9	-9,584	-14,316
-0,9547	-21,84	-9,547	-12,293
-0,9194	-20,03	-9,194	-10,836
-0,8638	-18,03	-8,638	-9,392
-0,7979	-16,07	-7,979	-8,091
-0,7009	-13,95	-7,009	-6,941
-0,5979	-11,87	-5,979	-5,891
-0,5115	-10,14	-5,115	-5,025
-0,399	-7,9	-3,99	-3,91
-0,3143	-6,22	-3,143	-3,077
-0,2085	-4,13	-2,085	-2,045
-0,0977	-1,938	-0,977	-0,961
-0,0469	-0,93	-0,469	-0,461
0,0479	0,949	0,479	0,47
0,2498	4,94	2,498	2,442
0,5111	10,11	5,111	4,999
0,7589	15	7,589	7,411
1,0104	19,95	10,104	9,846
1,263	24,93	12,63	12,3
1,506	29,81	15,06	14,75
1,79	35,32	17,9	17,42

7.6- Dados adquiridos durante a validação com o detector da amostra 3 para uma resistência de 250 MΩ.

Corrente (μA)	Tensão aplicada (V)	Tensão no resistor(V)	Tensão no detector(V)
-1,0785	-289,9	-269,625	-20,275
-1,0381	-279,2	-259,525	-19,675
-1,0065	-270,4	-251,625	-18,775
-0,9669	-259,4	-241,725	-17,675
-0,9312	-249,4	-232,8	-16,6
-0,897	-239,6	-224,25	-15,35
-0,8636	-229,4	-215,9	-13,5
-0,8468	-219,7	-211,7	-8
-0,825	-209,7	-206,25	-3,45
-0,79	-200,2	-197,5	-2,7
-0,7514	-189,8	-187,85	-1,95
-0,7129	-179,7	-178,225	-1,475
-0,6756	-170,1	-168,9	-1,2
-0,6338	-159,5	-158,45	-1,05
-0,5943	-149,5	-148,575	-0,925
-0,5549	-139,6	-138,725	-0,875
-0,5118	-128,8	-127,95	-0,85
-0,4747	-119,5	-118,675	-0,825
-0,4374	-110,1	-109,35	-0,75
-0,3983	-100,3	-99,575	-0,725
-0,3593	-90,5	-89,825	-0,675
-0,3166	-79,7	-79,15	-0,55
-0,2771	-69,7	-69,275	-0,425
-0,2368	-59,6	-59,2	-0,4
-0,1992	-50,1	-49,8	-0,3
-0,1575	-39,62	-39,375	-0,245
-0,116	-29,2	-29	-0,2
-0,0774	-19,45	-19,35	-0,1
-0,0436	-10,94	-10,9	-0,04
-0,0038	-0,951	-0,95	-0,001
0,0039	0,977	0,975	0,002
0,0758	19,07	18,95	0,12
0,1582	39,87	39,55	0,32
0,2383	59,9	59,575	0,325
0,3166	79,6	79,15	0,45
0,3959	99,5	98,975	0,525
0,4778	120,04	119,45	0,59
0,5593	140,6	139,825	0,775

0,6384	160,5	159,6	0,9
0,7142	179,6	178,55	1,05
0,797	200,4	199,25	1,15
0,8743	219,8	218,575	1,225
0,9541	239,9	238,525	1,375
1,0336	259,8	258,4	1,4
1,1136	279,9	278,4	1,5
1,1951	300,3	298,775	1,525

7.7- Dados adquiridos durante a validação com o detector da amostra 4 para uma resistência de 10 MΩ.

Corrente (μA)	Tensão aplicada (V)	Tensão no resistor(V)	Tensão no detector(V)
-0,5226	-26,9	-5,22600	-21,67400
-0,4943	-26,16	-4,94300	-21,21700
-0,4575	-25,2	-4,57500	-20,62500
-0,4153	-24,03	-4,15300	-19,87700
-0,3869	-23,17	-3,86900	-19,30100
-0,355	-22,2	-3,55000	-18,65000
-0,3168	-20,92	-3,16800	-17,75200
-0,2931	-20,06	-2,93100	-17,12900
-0,2722	-19,2	-2,72200	-16,47800
-0,2489	-18,02	-2,48900	-15,53100
-0,2379	-17,04	-2,37900	-14,66100
-0,2342	-15,85	-2,34200	-13,50800
-0,2334	-14,99	-2,33400	-12,65600
-0,2322	-13,89	-2,32200	-11,56800
-0,2313	-12,87	-2,31300	-10,55700
-0,231	-11,94	-2,31000	-9,63000
-0,2299	-10,98	-2,29900	-8,68100
-0,2284	-9,92	-2,28400	-7,63600
-0,2268	-8,97	-2,26800	-6,70200
-0,2231	-8,13	-2,23100	-5,89900
-0,215	-6,94	-2,15000	-4,79000
-0,2085	-6,18	-2,08500	-4,09500
-0,1941	-5,016	-1,94100	-3,07500
-0,1735	-4,156	-1,73500	-2,42100
-0,1309	-2,962	-1,30900	-1,65300
-0,0853	-1,872	-0,85300	-1,01900
-0,0427	-0,923	-0,42700	-0,49600
0,0438	0,955	0,43800	0,51700

0,1122	2,41	1,12200	1,28800
0,2591	5,41	2,59100	2,81900
0,3532	7,29	3,53200	3,75800
0,4719	9,67	4,71900	4,95100
0,5624	11,51	5,62400	5,88600
0,7312	14,92	7,31200	7,60800

7.8- Dados adquiridos durante a validação com o detector da amostra 4 para uma resistência de 250 MΩ.

Corrente (μA)	Tensão aplicada (V)	Tensão no resistor(V)	Tensão no detector(V)
-0,5296	-150,2	-132,4	-17,8
-0,51	-145	-127,5	-17,5
-0,4909	-140,1	-122,725	-17,375
-0,4728	-135,5	-118,2	-17,3
-0,4515	-129,9	-112,875	-17,025
-0,434	-125,4	-108,5	-16,9
-0,4122	-119,7	-103,05	-16,65
-0,3954	-115,3	-98,85	-16,45
-0,3745	-109,8	-93,625	-16,175
-0,3539	-104,4	-88,475	-15,925
-0,3366	-99,8	-84,15	-15,65
-0,3189	-95,2	-79,725	-15,475
-0,3	-90,1	-75	-15,1
-0,28	-84,7	-70	-14,7
-0,2593	-79,1	-64,825	-14,275
-0,245	-75,1	-61,25	-13,85
-0,2279	-69,9	-56,975	-12,925
-0,2216	-65,7	-55,4	-10,3
-0,2147	-59,7	-53,675	-6,025
-0,2057	-54,8	-51,425	-3,375
-0,1929	-50,33	-48,225	-2,105
-0,177	-45,43	-44,25	-1,18
-0,1542	-39,33	-38,55	-0,78
-0,1369	-34,84	-34,225	-0,615
-0,1164	-29,58	-29,1	-0,48
-0,0966	-24,6	-24,15	-0,45
-0,0774	-19,78	-19,35	-0,43
-0,061	-15,48	-15,25	-0,23
-0,0386	-9,8	-9,65	-0,15
-0,0204	-5,195	-5,1	-0,095

-0,0037	-0,966	-0,925	-0,041
0,0039	0,992	0,975	0,017
0,0394	10,01	9,85	0,16
0,0786	19,94	19,65	0,29
0,1161	29,43	29,025	0,405
0,1628	41,21	40,7	0,51
0,1971	49,88	49,275	0,605
0,2371	59,9	59,275	0,625
0,2796	70,6	69,9	0,7
0,3145	79,4	78,625	0,775
0,3642	91,9	91,05	0,85
0,3977	100,4	99,425	0,975
0,4358	110	108,95	1,05
0,4724	119,2	118,1	1,1
0,5183	130,7	129,575	1,125
0,5531	139,5	138,275	1,225
0,5962	150,3	149,05	1,25

7.9- Dados adquiridos durante a validação com o detector da amostra 5 para uma resistência de 250 MΩ.

Corrente (μA)	Tensão aplicada (V)	Tensão no resistor(V)	Tensão no detector(V)
-0,611	-161,1	-152,75	-8,35
-0,5995	-158	-149,875	-8,125
-0,5888	-155,2	-147,2	-8
-0,5806	-152,8	-145,15	-7,65
-0,5655	-148,9	-141,375	-7,525
-0,555	-146,1	-138,75	-7,35
-0,5436	-143	-135,9	-7,1
-0,5323	-140	-133,075	-6,925
-0,522	-136,8	-130,5	-6,3
-0,511	-133,9	-127,75	-6,15
-0,5004	-131,2	-125,1	-6,1
-0,4878	-128	-121,95	-6,05
-0,4827	-125,9	-120,675	-5,225
-0,4733	-123,1	-118,325	-4,775
-0,4623	-120	-115,575	-4,425
-0,4522	-117	-113,05	-3,95
-0,442	-114,2	-110,5	-3,7
-0,4312	-111,2	-107,8	-3,4
-0,4199	-108,1	-104,975	-3,125
-0,4078	-104,8	-101,95	-2,85

-0,3975	-102	-99,375	-2,625
-0,3865	-99	-96,625	-2,375
-0,3753	-96	-93,825	-2,175
-0,3639	-93	-90,975	-2,025
-0,3539	-90,4	-88,475	-1,925
-0,3404	-86,9	-85,1	-1,8
-0,3295	-84,1	-82,375	-1,725
-0,317	-80,8	-79,25	-1,55
-0,3059	-78	-76,475	-1,525
-0,2951	-75,2	-73,775	-1,425
-0,2827	-72	-70,675	-1,325
-0,2722	-69,3	-68,05	-1,25
-0,2596	-66,1	-64,9	-1,2
-0,2474	-63	-61,85	-1,15
-0,2356	-60	-58,9	-1,1
-0,2233	-56,9	-55,825	-1,075
-0,2119	-54	-52,975	-1,025
-0,2011	-51,23	-50,275	-0,955
-0,1887	-48,03	-47,175	-0,855
-0,1763	-44,9	-44,075	-0,825
-0,1656	-42,18	-41,4	-0,78
-0,1536	-39,12	-38,4	-0,72
-0,1416	-36,07	-35,4	-0,67
-0,1298	-33,07	-32,45	-0,62
-0,118	-30,09	-29,5	-0,59
-0,1062	-27,08	-26,55	-0,53
-0,0947	-24,17	-23,675	-0,495
-0,0822	-20,99	-20,55	-0,44
-0,0701	-17,91	-17,525	-0,385
-0,0594	-15,2	-14,85	-0,35
-0,0465	-11,93	-11,625	-0,305
-0,0341	-8,77	-8,525	-0,245
-0,0233	-6,01	-5,825	-0,185
-0,0117	-3,079	-2,925	-0,154
-0,0036	-0,969	-0,9	-0,069
0,0004	0,215	0,1	0,115
0,0012	0,423	0,3	0,123
0,0018	0,599	0,45	0,149
0,0027	0,853	0,675	0,178
0,0032	0,994	0,8	0,194
0,0038	1,196	0,95	0,246
0,0045	1,385	1,125	0,26
0,0053	1,609	1,325	0,284
0,006	1,804	1,5	0,304
0,0067	2,003	1,675	0,328

0,0074	2,207	1,85	0,357
0,008	2,387	2	0,387
0,0087	2,601	2,175	0,426
0,0094	2,801	2,35	0,451
0,0102	3,015	2,55	0,465
0,0108	3,199	2,7	0,499
0,0116	3,408	2,9	0,508
0,0122	3,598	3,05	0,548
0,013	3,804	3,25	0,554
0,0137	4,014	3,425	0,589
0,0143	4,195	3,575	0,62
0,015	4,403	3,75	0,653
0,0157	4,613	3,925	0,688
0,0164	4,799	4,1	0,699
0,0172	5,035	4,3	0,735
0,0178	5,221	4,45	0,771
0,0184	5,39	4,6	0,79
0,0191	5,58	4,775	0,805
0,0199	5,8	4,975	0,825
0,0206	6	5,15	0,85
0,0213	6,21	5,325	0,885
0,022	6,4	5,5	0,9
0,0227	6,61	5,675	0,935
0,0233	6,79	5,825	0,965
0,0243	7,09	6,075	1,015
0,0247	7,22	6,175	1,045
0,0254	7,4	6,35	1,05
0,0262	7,61	6,55	1,06
0,0269	7,82	6,725	1,095
0,0276	8,01	6,9	1,11
0,0282	8,2	7,05	1,15
0,0287	8,36	7,175	1,185
0,0297	8,63	7,425	1,205
0,0304	8,81	7,6	1,21
0,031	8,99	7,75	1,24
0,0318	9,2	7,95	1,25
0,0325	9,39	8,125	1,265
0,0332	9,59	8,3	1,29
0,034	9,83	8,5	1,33
0,0345	9,98	8,625	1,355
0,0353	10,21	8,825	1,385
0,036	10,39	9	1,39
0,0368	10,6	9,2	1,4
0,0375	10,79	9,375	1,415
0,0383	11,01	9,575	1,435

0,0391	11,23	9,775	1,455
0,0397	11,4	9,925	1,475
0,0404	11,61	10,1	1,51
0,0412	11,83	10,3	1,53
0,0419	12,02	10,475	1,545
0,0425	12,19	10,625	1,565
0,0432	12,39	10,8	1,59
0,0439	12,6	10,975	1,625
0,0446	12,81	11,15	1,66
0,0453	13	11,325	1,675
0,046	13,2	11,5	1,7
0,0468	13,42	11,7	1,72
0,0475	13,61	11,875	1,735
0,0482	13,81	12,05	1,76
0,0489	14	12,225	1,775
0,0497	14,22	12,425	1,795
0,0503	14,4	12,575	1,825
0,0602	17,06	15,05	2,01
0,0711	20,09	17,775	2,315
0,0814	22,97	20,35	2,62
0,0929	26,11	23,225	2,885
0,1038	29,18	25,95	3,23
0,1142	32,04	28,55	3,49
0,125	35,03	31,25	3,78
0,1358	38,03	33,95	4,08
0,1457	41,02	36,425	4,595
0,157	44,15	39,25	4,9
0,1682	47,01	42,05	4,96
0,1798	50,12	44,95	5,17
0,1903	53	47,575	5,425
0,2052	57,1	51,3	5,8
0,2151	59,9	53,775	6,125
0,2266	63	56,65	6,35
0,2377	66,1	59,425	6,675
0,2486	69,1	62,15	6,95
0,2593	72	64,825	7,175
0,2706	75,1	67,65	7,45
0,2809	78	70,225	7,775
0,2928	81,2	73,2	8
0,3018	83,9	75,45	8,45
0,3133	87	78,325	8,675
0,3245	90,1	81,125	8,975
0,3351	93	83,775	9,225
0,3457	96	86,425	9,575
0,3568	99	89,2	9,8

0,3681	102,2	92,025	10,175
0,3786	104,9	94,65	10,25
0,3895	108	97,375	10,625
0,401	111,3	100,25	11,05
0,4105	114	102,625	11,375
0,4218	117	105,45	11,55
0,4323	119,9	108,075	11,825
0,4372	121,2	109,3	11,9