

Dependência da resolução em energia em função da temperatura de uma fotomultiplicadora de silício acoplada a um cristal cintilador

Solano Rigotti Caiano¹, **Vanderlei Cruz**¹, **Márcio Bottaro**⁴, **Marco Aurélio Lisboa Leite**², **Hélio Massaharu Murata**¹, **Daniel Alexandre Baptista Bonifácio**^{1,3}

¹ Instituto de Radiação e Dosimetria – IRD, Rio de Janeiro – Brasil; ² Instituto de Física da Universidade de São Paulo - IFUSP, São Paulo – Brasil; ³ Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN, São Paulo – Brasil; ⁴ Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo – IEE, São Paulo – Brasil

E-mail: solanorigotti@hotmail.com

Resumo: A fotomultiplicadora de silício (SiPM – “Silicon Photomultiplier”) tornou-se um dispositivo importante capaz de detectar a radiação X e gama. Uma desvantagem dessa tecnologia é a dependência de temperatura que o material semiconductor possui. A caracterização em energia da SiPM, possibilita mensurar parâmetros importantes sobre o detector. A SiPM acoplada ao cristal cintilador, compõe o aparato experimental e as medidas são realizadas através de um osciloscópio. Os resultados apresentados demonstram o comportamento esperado da SiPM sem a influência do cristal cintilador. Com a análise dos espectros em energia, é possível desenvolver um método de controle capaz de minimizar a influência da dependência da temperatura.

Palavras-chave: SiPM; resolução em energia; dependência da temperatura; cristal cintilador

Abstract: The silicon photomultiplier (SiPM) has become an important device capable of detecting X and gamma radiation. A disadvantage of this technology is the temperature dependence of the semiconductor material. The energy characterization of a SiPM, makes it possible to measure important parameters about the detector. The SiPM coupled to the scintillator crystal makes up the experimental apparatus and measurements are performed using an oscilloscope. The results presented demonstrate the expected behavior of SiPM without the influence of the scintillating crystal. With the analysis of spectra in relation to energy, it is possible to develop a control method capable of minimizing the influence of temperature dependence.

Keywords: SiPM; energy resolution; temperature dependence; scintillator crystal

1. INTRODUÇÃO

Desde que a radioatividade foi descoberta, sempre foi um desafio o desenvolvimento de dispositivos capazes de realizar sua detecção, sobretudo as radiações X e gama. Isso se deve à amplitude do sinal gerado pela interação de fótons: por ser muito baixa, sistemas complexos de amplificação são necessários para transformá-lo em um sinal mensurável [1].

Uma forma viável de detecção é a conversão de uma fração da energia depositada pela radiação ionizante em fótons de luz por meio de um cristal cintilador. Já os dispositivos fotodetectores, são responsáveis por transformar os fótons de luz em corrente elétrica [2,3].

Inicialmente foram introduzidos os fotodiodos do tipo PIN, que através da sua implementação e amadurecimento, foram substituídos pelo fotodiodo de avalanche (APD – “Avalanche Photo Diode”), dispositivos que utilizam o processo de avalanche como mecanismo de ganho interno [4].

A caracterização do material semiconductor utilizado para compor o APD permitiu evoluir essa tecnologia e propor o seu sucessor, chamado de fotodiodo de avalanche em modo geiger (GAPD – “Geiger-mode APD”). Este avanço proporcionou melhorias significativas em relação ao tempo de resposta, resolução em energia e diminuição da dependência da temperatura [4,5].

A fotomultiplicadora de silício (SiPM – “Silicon Photomultiplier”), é uma matriz composta por múltiplos GAPD [6–8], cada um conectado em série com um resistor de descarga. A ligação entre esses dois componentes forma o menor elemento sensível da SiPM, chamado de microcélula. Cada microcélula possui um sinal de saída analógico independente [4,9]. A SiPM é um dispositivo capaz de detectar fótons na região do infravermelho, luz visível e próxima ao

ultravioleta. Se acoplada a um cristal cintilador, é possível utilizá-la como detector de radiação ionizante [4,10].

O rápido tempo de resposta (na ordem de centenas de ps) [9,11] e a capacidade de contar fótons [12], são características interessantes que as SiPM proporcionam a metrologia, ciência que está preocupada com a calibração confiável de detectores, que sejam bem detalhadas em relação à sua rastreabilidade. O conceito de rastreabilidade, inclusive, é definido como: “propriedade de um resultado de medição”, pela qual este resultado deve ser relacionado a padrões de referência. Isto é realizado através de uma cadeia contínua de comparações, todas com incertezas bem declaradas [13].

Segundo Acerbi e Gundacker (2019), a SiPM já está estabelecida como fotodetector em diversas áreas da pesquisa científica, no entanto, ainda é um dispositivo com amplo espaço para desenvolvimentos. Há um grande interesse em evoluir a SiPM ao ponto de atingir um tempo de resposta menor que 100 ps. Este avanço temporal possibilita aperfeiçoar a modalidade de tempo de voo (ToF - “Time-of-flight”) na tomografia por emissão de pósitrons (PET – “Positron Emission Tomography”) [4,14–18].

Este trabalho tem como objetivo analisar a resolução em energia de um conjunto detector formado por uma SiPM acoplada a um cristal cintilador em função da temperatura, possibilitando mensurar parâmetros de construção do semiconductor e relacionar a parâmetros de operação da SiPM. Este estudo possibilita a obtenção de espectros em energia mais bem resolvidos. Para a metrologia, isto é um fator interessante, já que é possível minimizar a dependência da temperatura como fontes de incerteza ao introduzir métodos de controle [4,19,20].

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Fotomultiplicadora de Silício

Segundo Künsken (2012), o que define se um material é isolante, condutor ou semiconductor são suas propriedades elétricas, mais especificamente a largura em energia da banda proibida (“band gap”), localizada entre a banda de valência e a banda de condução. A dopagem do silício é responsável por introduzir níveis adicionais de energia na banda gap do material, perto da banda de valência do material dopado p e na banda de condução do material dopado n.

2.2.1. Junção p-n

Quando se unem esses dois materiais dopados (p-n), os elétrons e as lacunas se recombinam dentro de um certo intervalo da junção, o que cria entre os materiais dopados uma região chamada zona de depleção. A distância entre as bandas de energia do silício dopado é tão baixa, na ordem de 1,15 eV, que excitações de elétrons causados pela condução térmica ocorrem de forma espontânea. Essa corrente “falsa” que aparece como uma taxa de contagem de fundo tem relação direta com a temperatura.

2.2.2. Fotodiodo de avalanche (APD)

O APD é o elemento-chave quando o objetivo é entender o funcionamento da SiPM, pois é em sua camada sensível (camada de depleção) onde ocorre o princípio básico de detecção. Basicamente, o APD é um diodo de junção p-n em regime de polarização reversa, aplicada pela tensão de operação (V_{op}) aos terminais da SiPM e responsável por induzir o efeito de campo elétrico na estrutura interna do material. Quanto maior for V_{op} , maior seu campo elétrico e suas grandezas relacionadas até um máximo (ponto em que ocorre a ruptura da camada sensível e o material passa a conduzir portadores livremente).

Os primeiros estudos utilizando o APD apresentaram diversos conceitos e muitos sistemas foram construídos com o sucesso dessa tecnologia. No entanto, desvantagens como seu

baixo ganho intrínseco, tipicamente de 10 a 1.000 vezes, alta dependência da temperatura ($\sim 3,5\% K^{-1}$) e o baixo sinal de carga resultante ($10^{-15} C$) continuavam sendo características negativas [21].

2.2.3. Fotodiodo de avalanche em modo geiger (GAPD)

Com a ampliação de estudos em relação à caracterização do material semiconductor, a possibilidade de operar o fotodiodo em modo Geiger foi descoberta. Os chamados GAPD já não emitem um sinal proporcional à radiação incidente, pois a corrente formada pelas interações primárias de fótons únicos é multiplicada. Este sinal é utilizado com objetivo de gerar contagens binárias, o que permite determinar o número de fótons incidentes através do sinal de saída da SiPM, representando o número de microcélulas disparadas. Nesse modo “geiger”, é necessário levar em consideração parâmetros relacionados a essas caracterizações, como a tensão de ruptura (V_{rp}) do material, variável que depende diretamente da temperatura [22].

Operar o APD em modo geiger significa trabalhar com o valor de V_{op} alguns volts acima da tensão de ruptura ($\sim 10 - 15\%$) [23]. Esse modo de operação permite um melhor desempenho principalmente em relação ao seu ganho interno ($\sim 10^6$) [9,24], resolução do tempo de resposta, resolução em energia e dependência da temperatura ($5\% a 10\% / ^\circ C$) [5-7,11,25-27].

2.3. Processo de funcionamento de um GAPD

O funcionamento de um GAPD é explicado por [2,4,28] e foi simplificado nesse artigo em quatro etapas. É importante salientar que a formação dos portadores primários ocorre na camada de depleção e o processo de avalanche ocorre na região não dopada, como demonstrado pela figura 1.

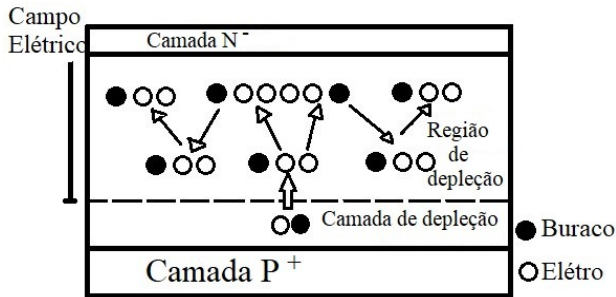


Figura 1: Representa a formação do par elétron-lacuna primário, formados pela interação de um fóton luminoso, que por influência do campo elétrico, sofrem colisões e são multiplicados.

a) Fase de detecção;

Quando um fóton de luz convertido pelo cristal cintilador incide na camada de depleção do dispositivo de junção p-n, pelo efeito fotoelétrico, sua energia é transferida, liberando um par primário de portadores de cargas (elétron-lacuna) que se deslocam para a região de avalanche.

b) Fase de avalanche;

Por influência do campo elétrico, os portadores primários são acelerados a ponto de gerar múltiplas colisões na região de avalanche, liberando mais pares elétrons-lacuna, o que gera correntes muito mais intensas que as obtidas por diodos comuns.

c) Fase de descarga;

Como o GAPD é especificamente projetado para ser polarizado acima da tensão de ruptura, um único fóton injetado na camada de depleção pode fornecer energia suficiente para desencadear o processo de avalanche autossustentável, onde a corrente aumenta rapidamente.

d) Fase de recuperação do fotodiodo;

A corrente teoricamente continuaria a fluir até que o processo de avalanche fosse extinto. Isso ocorre através do “resistor de extinção”, responsável por realizar a queda da tensão de polarização nos terminais do fotodiodo para abaixo do limite de funcionamento, de maneira que a tensão de polarização seja restaurada,

voltando o dispositivo para o modo de detecção (fase de reinicialização).

2.4. Principais fontes de ruído térmico

Como se está avaliando a possibilidade de utilização da SiPM como um instrumento de contagem de fótons, é importante garantir, para a metrologia, a rastreabilidade do detector. Um ponto que merece atenção, por esse viés, é o fato de que a temperatura é uma grandeza muito volátil, principalmente quando seus valores são comparados em diferentes regiões do mundo.

Os conceitos apresentados a seguir têm relação direta com a dependência da temperatura que a SiPM possui, vínculo que foi apresentado como uma das maiores desvantagens dessa tecnologia. Com isso, a necessidade de implementar sistemas capazes de estabilizar efeitos gerados pela variação dessa grandeza se fazem necessários, com objetivo de manter uma proporcionalidade entre o número de fótons incidentes e o de contados pela SiPM [6], [18].

2.4.1. Taxa de contagem de fundo

Como a distância gap entre as bandas de energia do Si altamente dopado é muito baixa, portadores de cargas gerados pela condução térmica são capazes de induzir uma ruptura na camada sensível dos fotodiodos, e conseqüentemente o efeito de avalanche, gerando pulsos sem que haja a incidência de um fóton, como uma contagem falsa. Dessa forma, quanto maior for a temperatura ambiente, maior a taxa dessa contagem de fundo [4].

2.4.2. Pulsos em atrasos

Devido às altas temperaturas geradas pelo processo de ruptura seguido pela avalanche do fotodiodo, uma parte dos portadores de cargas sobre o efeito de multiplicação possui certa probabilidade de ser aprisionada em armadilhas e liberada em atraso. Esses podem induzir avalanches secundárias em uma mesma microcélula, como uma contagem falsa [3,4].

Esse tipo de ruído depende do número efetivo de armadilhas dispostas ao logo do material e do tempo de liberação de cargas comparado com o tempo de recuperação da célula [4].

2.4.3. “Crosstalk” Óptico

Em uma única microcélula, o processo de avalanche é responsável por liberar uma quantidade estimada de fótons secundários (3×10^{15}). Estes fótons possuem energia suficiente para interagir com a camada sensível de fotodiodos vizinhos e, assim, gerar avalanches secundárias como contagens adicionais [4].

2.5. Resolução em tempo

O estudo visando melhorar o tempo de resposta da SiPM se tornou uma linha importante para o desenvolvimento da tecnologia atual. A modalidade TOF é responsável por refinar as informações sobre a localização exata do ponto de emissão do pósitron e assim contribuir com a rejeição de contagens de fundo fora da zona de interesse [18]. A implementação dessa modalidade para a metrologia surge como uma alternativa à rejeição do ruído gerado pela dependência da temperatura.

Ao analisar o tempo de resposta de uma SiPM, a resolução do tempo de coincidência (CTR – “Coincidence Time Resolution”) é um parâmetro que deve ser conhecido. Conhecer a CTR permite melhorar a precisão do dispositivo em determinar o tempo de chegada de fótons únicos (SPTR – “Single-Photon Time Resolution”). O SPTR desempenha um papel importante nos detectores de TOF empregados em aplicações com baixa contagem de fótons, como detectores Cherenkov para identificação de partículas [29].

Segundo Gundacker et al. (2013), uma melhoria da CTR para $\cong 100$ ps forneceria uma determinação ainda mais precisa do ponto de emissão. Assim, é interessante estudar como um aprimoramento de toda a cadeia de detectores composta pelo cristal cintilador, pelo fotodetector

e pela eletrônica contribui para atingir esse objetivo.

A CTR pode ser medida através da comparação entre dois detectores em configuração de coincidência, cada um compondo um SiPM acoplado a um cristal cintilador, semelhante à técnica utilizada por Gundacker et al., (2013). No trabalho em questão, demonstrou-se que os cristais cintiladores LYSO acoplados a SiPM são capazes de alcançar uma CTR desejada para sistemas TOF, próxima aos 100 ps FWHM (largura a meia altura).

Outro trabalho importante para o entendimento do tempo de resposta da SiPM, é o de Nemallapudi et al. (2016), no qual faz uma comparação entre os valores de SPTR dos principais modelos de SiPM disponíveis no mercado com valores reportados de SPTR entre 175 a 330 ps FWHM.

2.4. Resolução em energia

A seguir, serão apresentados os parâmetros necessários para a realização das análises da resolução em energia da SiPM acoplada ao cristal cintilador, parâmetros geralmente associados às propriedades de construção e de operação dos fotodiodos. Segundo Kuznetsov (2018), é possível minimizar as incertezas relacionadas à dependência da temperatura pelo controle de V_{op} , método que resulta em efeitos de ganho interno, gerando eficiência e proporcionalidade de sinal quando um valor de sobretensão (V_{st}) mais adequado é aplicado.

2.4.1. Tensão de ruptura

Segundo Lérias (2008), V_{rp} é a tensão mínima responsável por proporcionar um campo elétrico – que deve ser forte o suficiente nas estruturas internas do material semiconductor – capaz de sustentar o processo de avalanche como estrutura de ganho interno. É importante determinar a tensão de ruptura do detector para cada valor de temperatura de interesse, já que o modo de

operação do fotodiodo depende diretamente dessa grandeza, representada na figura 2.

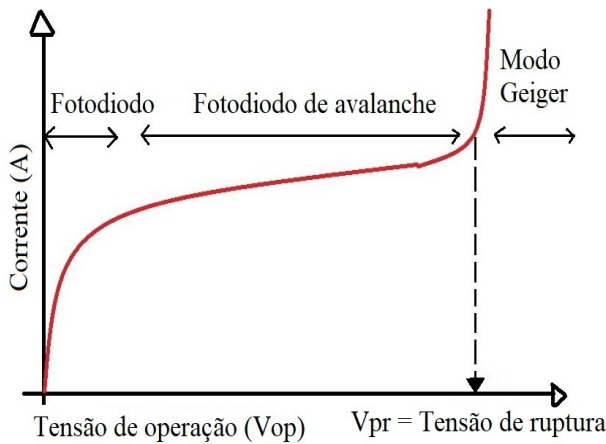


Figura 2: Representa os diferentes modos de operação para detectores de silício: Fotodíodo (linear, sem ganho), Avalanche (linear, ganho de 10-200) e modo geiger (contagem de fótons).

2.4.2. Sobre-tensão

Uma grandeza útil frequentemente utilizada é a sobre-tensão da SiPM, definida como:

$$V_{st} = V_{op} - V_{rp} \quad (1)$$

V_{st} é definida pela diferença entre a tensão de operação com a tensão de ruptura do material, e possui influência direta no ganho interno, na eficiência de detecção e na taxa de ruído da SiPM [11].

Segundo a fabricante do modelo KETEK, a sobre-tensão aplicada possui uma relação com o comportamento da eficiência de detecção de fótons [30], que pode ser representada pela figura 3.

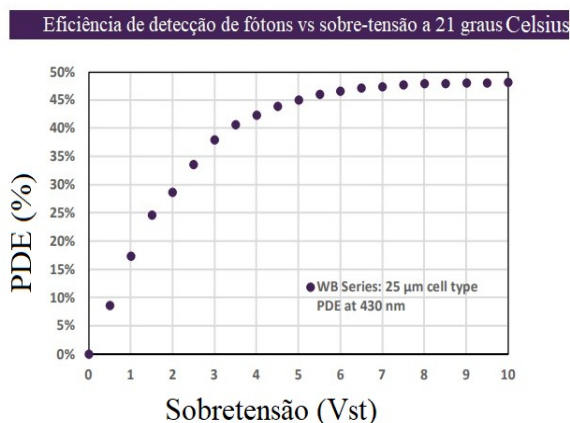


Figura 3: Representa a eficiência de detecção de fótons sobre influência da sobre-tensão aplicada.

2.4.3. Ganho

O ganho de uma SiPM é definido como a quantidade de carga Q induzida por um único fotoelétron (ou seja, fóton detectado), e pode ser expresso como:

$$Ganho = \frac{Q}{e} = \frac{C_{\mu cell} \cdot V_{st}}{e} \quad (2)$$

e corresponde à carga de um elétron, Q é a carga liberada na avalanche, $C_{\mu cell}$ é a capacitância da microcélula e V_{st} é a sobre-tensão. Essa tensão é intrínseca para uma mesma temperatura, pois a variação da temperatura altera o ganho, o ganho cresce aumentando V_{st} .

Uma boa definição do ganho prevê o fóton no GAPD com uma boa capacidade de resolução numérica e energia do fóton, que podem ser estimadas pela amplitude do espectro, sendo integrado ao longo do tempo, um ganho bem definido garante que a altura do pulso esconde o ruído [4,31].

2.4.4 Eficiência de detecção de fóton

Um parâmetro importante da SiPM que deve ser definido é a eficiência de detecção de fótons (PDE – “Photon Detections Efficiency”), representada pela equação (3).

$$PDE = QE \times GF \times P_{avalanche} \quad (3)$$

A Eficiência Quântica (QE – “Quantum Efficiency”) é definida como o número médio de pares elétron-lacuna que são gerados na conversão da energia do fóton incidente. O fator geométrico (GF – “Geometrical Factor”) diz respeito à razão entre a área total do detector e a área sensível, já que um determinado espaço do sensor é reservado ao sistema de extinção da corrente e é considerado como espaço morto no material. Por último, a $P_{avalanche}$ é a probabilidade de um elétron ou lacuna do par gerado pelo fóton incidente desencadear o processo de avalanche [3,32].

Segundo as especificações da fabricante, a maior taxa de eficiência de detecção de fótons da SiPM escolhida é de 45% e se concentra entre os comprimentos de ondas de fótons da faixa de 430 nm [30], representado pela fig 4.

Resposta espectral

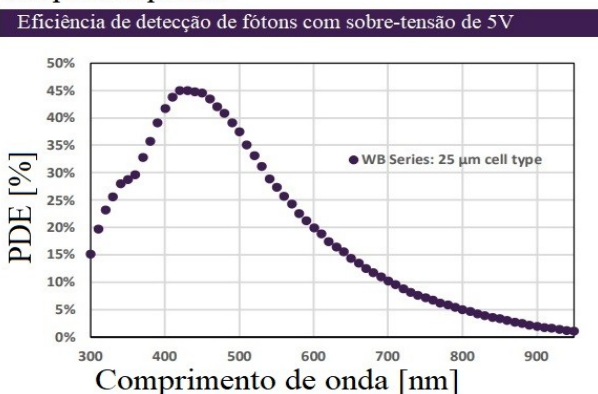


Figura 4: Representa o comportamento de eficiência de detecção para fótons com comprimento de ondas entre 300 a 800 nm.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o modelo experimental, seguiremos procedimentos semelhantes ao de Gundacker et al. (2013), em que se utiliza uma fonte de Na-22 com valores recorrentes de atividade, rastreabilidade e geometria. Como o comportamento de decaimento é conhecido, torna-se fácil determinar o número de fótons gerados pelos processos de aniquilações de pósitrons que estão ocorrendo ao longo do tempo. Essas aniquilações são eventos responsáveis por gerar dois fótons gamas de 511 KeV, que viajam em direções opostas entre si e incidem no cristal cintilador como radiações ionizantes.

O cristal cintilador é responsável por converter essa radiação incidente em fótons de luz com comprimento de onda em torno de 430 nm, ou seja, vai gerar uma carga luminosa que pode ser estimada já que as propriedades e geometria do cristal são bem conhecidas. Estes fótons convertidos serão responsáveis por interagir com os elementos sensíveis da SiPM acoplada.

Cada microcélula disparada manda um sinal de corrente amplificado, que representa a interação de um fóton em sua camada sensível. Estes sinais serão condicionados pelo conjunto amplificador e demais eletrônicos, então somados, representando o número de células disparadas em relação ao tempo.

A primeira etapa é montar o bloco detector, composto pela SiPM do modelo “PM3325-WB-D0” da marca KETEK acoplada ao cristal cintilador LYSO do fabricante Hilger Crystals, circuitos eletrônicos de pré-amplificação, filtragem e “shaping” do sinal. A fonte de alimentação utilizada é da Gaugit, modelo “GPWR6BIAS6A”, responsável por impor as configurações de operação da SiPM.

O bloco detector será montado dentro de uma câmara climática da marca Weisstechnik LabEvent, instrumento responsável por impor a temperatura para um valor desejado. O osciloscópio utilizado é da marca Tektronix e modelo DPO7104, para medir o sinal de saída da SiPM em relação a diversos parâmetros, como pela frequência, amplitude e tempo.

3.1. Tensão de ruptura

A caracterização do bloco detector em relação à sua energia é realizada através de um levantamento dos valores da tensão de ruptura (V_{rp}) para cada temperatura de interesse. Isso pode ser realizado com a manipulação do valor da tensão de operação (V_{op}), até o ponto em que passa pela indicação da corrente. Assim, o fotodiodo passa a operar em modo geiger, representado na figura 2. Ou seja, para cada temperatura setada na câmara climatizadora, temos um valor de V_{rp} e V_{op} correspondentes.

O coeficiente de temperatura da tensão de ruptura pode ser calculado através da equação de onda obtida pelos valores de V_{rp} em cada temperatura determinada; o comportamento esperado é o de aumento do valor de tensão de ruptura do material semiconductor de forma linear à medida que se aumenta a temperatura.

3.2. Sobretensão (V_{st})

Como V_{rp} e V_{op} são conhecidos, através da equação (2) é possível determinar os valores de sobretensão da SiPM para cada temperatura escolhida. Segundo a fabricante, é possível relacionar a eficiência de detecção com a sobretensão aplicada ao terminal da SiPM, possibilitando estimar, através do rendimento conhecido do cristal, o número de fótons contados com o número de fótons convertidos e incidentes a SiPM.

3.3. Ganho interno e eficiência de detecção de fóton

Os parâmetros de construção da SiPM utilizada pelo nosso grupo de pesquisa são apresentados pela fabricante em [30] e representado pela figura 5.

General Parameters and Order Information

SiPM Type	Active Area [mm ²]	Microcell Size [μm]	No. of Microcells	Dimensions [mm ³]
PM3325-WB	3.0 x 3.0	25	13920	3.315 x 3.315 x 0.595

Main Characteristics

Parameter	Typ.	Unit
Breakdown Voltage (V_{br}) at 21°C	min. 24.0, max. 25.0	V
Breakdown Voltage Variation per Reel	±0.125	V
Recommended Overvoltage (V_{ov})	2.0 – 5.0 (max. 6.0)	V
Temperature Dependency of V_{br}	22.0	mV/K
Temperature Dependency of Gain	0.3% @ 5.0 V_{ov}	1/K
Operating Temperature Range	-40 to +60	°C
Reliability Classification	MSL1	
Index of Refraction of Glass Entrance Window	1.52 @ 430 nm	

Figura 5. Representa os parâmetros relacionados a SiPM utilizada.

Com os valores de sobretensão previamente determinados e parâmetros de construção apresentados, é possível substituir as variáveis e resolver a equações (2) e (3), vinculando o ganho interno e a eficiência de detecção do dispositivo com parâmetros de operação (V_{op} e V_{st}) para cada temperatura em estudo. Conforme aumentamos V_{op} , é esperado que o ganho aumente de forma linear, já que pela equação (3), são grandezas diretamente proporcionais e as demais variáveis são constantes.

5. RESULTADOS

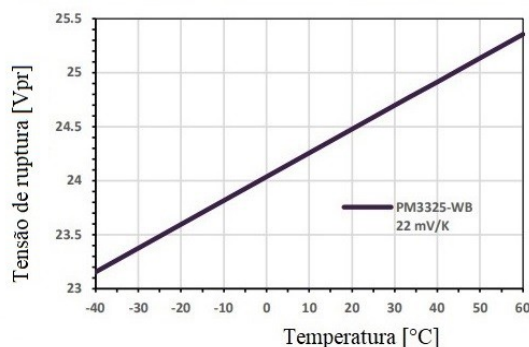
A caracterização em energia nos permite medir parâmetros associados à dependência da

temperatura, como representada pela figura 6 (a), e relacioná-las com grandezas de operação da SiPM.

Através dessa relação, é possível manter uma proporcionalidade entre a ordem do sinal de saída e o número de fótons incidentes. Isso é realizado pela manipulação do valor da sobretensão, resultando em um ganho desejado, conforme representado pela figura 6 (b).

Características típicas de desempenho

(a) Coeficiente de temperatura da tensão de ruptura



(b) Ganho do SiPM (série WB)

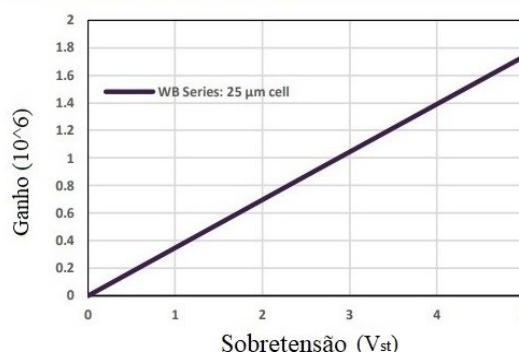


Figura 6: (a) e (b) representam as características típicas de desempenho da SiPM, ao determinar V_{pr} em função da temperatura, é possível manter uma relação linear entre o ganho e a V_{st} .

Estes gráficos representam o comportamento esperado pela SiPM e podem ser utilizados a fim de comparação com os resultados obtidos pelo procedimento experimental, possibilitando verificar a influência do cristal cintilador e demais eletrônicos que compõem o detector.

Nosso grupo de pesquisa, além de publicar trabalhos relacionados [33–35], tem interesse na

caracterização desse dispositivo, com objetivo de desenvolver um método de controle que seja capaz de diminuir a influência da temperatura em futuras medições.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho é uma proposta inicial para a metrologia, no sentido de caracterizar o bloco detector em estudo. Tal análise nos permite mensurar parâmetros de construção (V_{rp}) do material semiconductor e relacionar com parâmetros de operação (V_{op}) da SiPM.

Através da variação de V_{op} , a sobretensão mais adequada pode ser aplicada aos terminais da

SiPM, gerando o efeito de ganho de sinal. O resultado obtido através deste controle é de proporcionalidade entre o número real de fótons incidentes e o número de fótons contados pela SiPM.

O ganho interno também é responsável por minimizar a influência do ruído térmico, gerado pela dependência da temperatura. Ou seja, através da caracterização do material semiconductor na resolução em energia, é possível desenvolver um método de controle da dependência da temperatura para o detector de interesse.

7. REFERÊNCIAS

1. Otte N, Dolgoshein B, Hose J, Klemin S, Lorenz E, Mirzoyan R, et al. The SiPM — A new Photon Detector for PET. Nucl Phys B - Proc Suppl. 2006;150: 417–420. doi:10.1016/j.nuclphysbps.2004.08.048
2. Künsken A. Measurements of silicon photomultipliers at different operating points and simulation with GEANT4. Dissertação de Mestrado em Física, RWTH Aachen University. 2012. Available: https://web.physik.rwth-aachen.de/~hebbeker/theses/kuensken_master.pdf
3. Musienko Y. Advances in multipixel Geiger-mode avalanche photodiodes (silicon photomultipliers). Nucl Instrum Methods Phys Res Sect Accel Spectrometers Detect Assoc Equip. 2009;598: 213–216. doi:10.1016/j.nima.2008.08.031
4. Acerbi F, Gundacker S. Understanding and simulating SiPMs. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect Accel Spectrometers Detect Assoc Equip. 2019;926: 16–35. doi:10.1016/j.nima.2018.11.118
5. Du J, Yang Y, Bai X, Judenhofer MS, Berg E, Di K, et al. Characterization of Large-Area SiPM Array for PET Applications. IEEE Trans Nucl Sci. 2016;63: 8–16. doi:10.1109/TNS.2015.2499726
6. Ko GB, Yoon HS, Kim KY, Lee MS, Yang BY, Jeong JM, et al. Simultaneous Multiparametric PET/MRI with Silicon Photomultiplier PET and Ultra-High-Field MRI for Small-Animal Imaging. J Nucl Med. 2016;57: 1309–1315. doi:10.2967/jnumed.115.170019
7. Yoon HS, Ko GB, Kwon SI, Lee CM, Ito M, Chan Song I, et al. Initial Results of Simultaneous PET/MRI Experiments with an MRI-Compatible Silicon Photomultiplier PET Scanner. J Nucl Med. 2012;53: 608–614. doi:10.2967/jnumed.111.097501
8. Wagatsuma K, Sakata M, Ishibashi K, Hirayama A, Kawakami H, Miwa K, et al. Direct comparison of brain [18F]FDG images acquired by SiPM-based and PMT-based PET/CT: phantom and clinical studies. EJNMMI Phys. 2020;7. doi:10.1186/s40658-020-00337-4

9. Buzhan P, Dolgoshein B, Ilyin A, Kantserov V, Kaplin V, Karakash A, et al. The advanced study of silicon photomultiplier. *Advanced Technology and Particle Physics. WORLD SCIENTIFIC*; 2002. pp. 717–728. doi:10.1142/9789812776464_0101
10. Regazzoni V, Acerbi F, Cozzi G, Ferri A, Fiorini C, Paternoster G, et al. Characterization of high density SiPM non-linearity and energy resolution for prompt gamma imaging applications. *J Instrum*. 2017;12: P07001–P07001. doi:10.1088/1748-0221/12/07/P07001
11. Shukla R, Rakshe P, Lokhandwala S, Dugad S, Khandekar P, Garde C, et al. A Survey of Power Supply Techniques for Silicon Photo-Multiplier Biasing. 2014;2: 5.
12. Regazzoni V, Acerbi F, Cozzi G, Ferri A, Fiorini C, Paternoster G, et al. Characterization of high density SiPM non-linearity and energy resolution for prompt gamma imaging applications. 2017. doi:10.1088/1748-0221/12/07/P07001
13. Chunnillall CJ, Degiovanni IP, Kück S, Müller I, Sinclair AG. Metrology of single-photon sources and detectors: a review. *Opt Eng*. 2014;53: 081910. doi:10.1117/1.OE.53.8.081910
14. Dolenc R, Korpar S, Križan P, Pestotnik R. Cherenkov TOF PET with silicon photomultipliers. 2015. doi:10.1016/J.NIMA.2015.09.059
15. Gundacker S, Turtos RM, Auffray E, Paganoni M, Lecoq P. High-frequency SiPM readout advances measured coincidence time resolution limits in TOF-PET. *Phys Med Biol*. 2019;64: 055012. doi:10.1088/1361-6560/aafd52
16. Moses WW. Time of flight in PET revisited. *IEEE Trans Nucl Sci*. 2003;50: 1325–1330. doi:10.1109/TNS.2003.817319
17. Powolny F, Auffray E, Brunner S, Garutti E, Göttlich M, Hillemanns H, et al. Time-Based Readout of a Silicon Photomultiplier (SiPM) for Time of Flight Positron Emission Tomography (TOF-PET). *Nucl Sci IEEE Trans On*. 2011;58: 597–604. doi:10.1109/TNS.2011.2119493
18. Gundacker S, Auffray E, Frisch B, Jarron P, Knapitsch A, Meyer T, et al. Time of flight positron emission tomography towards 100ps resolution with L(Y)SO: An experimental and theoretical analysis. 2013. doi:10.1088/1748-0221/8/07/P07014
19. Grodzicka M, Moszyński M, Szcześniak T, Kapusta M, Szawłowski M, Wolski D. Energy resolution of scintillation detectors with SiPM light readout. *IEEE Nuclear Science Symposium Medical Imaging Conference*. 2010. pp. 1940–1948. doi:10.1109/NSSMIC.2010.5874113
20. Kuznetsov E. Temperature-compensated silicon photomultiplier. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect Accel Spectrometers Detect Assoc Equip*. 2018;912: 226–230. doi:10.1016/j.nima.2017.11.060
21. Düppenbecker PM, Weissler B, Gebhardt P, Schug D, Wehner J, Marsden PK, et al. Development of an MRI-compatible digital SiPM detector stack for simultaneous PET/MRI. *Biomed Phys Eng Express*. 2016;2. doi:10.1088/2057-1976/2/1/015010
22. Lérias S dos SO. Seleção e implementação de sensores ópticos para detecção em biossensores. Mestrado em Engenharia Física, Universidade de Lisboa. 2008. Available: https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/1274/1/19130_ulfc091307_tm_Dissertacao.pdf

23. Barbosa F, Somov A, Somov S, Tolstukhin I. Time characteristics of detectors based on silicon photomultipliers for the GlueX experiment. 2017. doi:10.1134/S0020441217030022
24. Spanoudaki VC, Mann AB, Otte AN, Konorov I, Torres-Espallardo I, Paul S, et al. Use of single photon counting detector arrays in combined PET/MR: Characterization of LYSO-SiPM detector modules and comparison with a LSO-APD detector. *J Instrum.* 2007;2: P12002–P12002. doi:10.1088/1748-0221/2/12/P12002
25. Shukla RA, Dugad SR, Garde CS, Gopal AV, Gupta SK, Prabhu SS. A micron resolution optical scanner for characterization of silicon detectors. *Rev Sci Instrum.* 2014;85: 023301. doi:10.1063/1.4863880
26. van Sluis J, Boellaard R, Somasundaram A, van Snick PH, Borra RJH, Dierckx RAJO, et al. Image Quality and Semiquantitative Measurements on the Biograph Vision PET/CT System: Initial Experiences and Comparison with the Biograph mCT. *J Nucl Med Off Publ Soc Nucl Med.* 2020;61: 129–135. doi:10.2967/jnumed.119.227801
27. Acerbi F, Ferri A, Gola A, Cazzanelli M, Pavesi L, Zorzi N, et al. Characterization of Single-Photon Time Resolution: From Single SPAD to Silicon Photomultiplier. *IEEE Trans Nucl Sci.* 2014. doi:10.1109/TNS.2014.2347131
28. Schumacher J. Front-end Electronics for Silicon Photomultipliers. : 92.
29. Nemallapudi MV, Gundacker S, Lecoq P, Auffray E. Single photon time resolution of state of the art SiPMs. 2016. doi:10.1088/1748-0221/11/10/P10016
30. KETEK. SiPM – Silicon Photomultiplier (PM3325-WB-D0). KETEK GmbH; 2020. Available: <https://www.ketek.net/wp-content/uploads/2018/12/KETEK-PM3325-WB-D0-Datasheet.pdf>
31. Buzhan P, Dolgoshein B, Ilyin A, Kantserov V, Kaplin V, Karakash A, et al. AN ADVANCED STUDY OF SILICON PHOTOMULTIPLIER. : 14.
32. Otte AN, Garcia D, Nguyen T, Purushotham D. Characterization of Three High Efficiency and Blue Sensitive Silicon Photomultipliers. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect Accel Spectrometers Detect Assoc Equip.* 2017;846: 106–125. doi:10.1016/j.nima.2016.09.053
33. Murata HM, Morales M, Bonifácio DAB. Evaluation of digital methods for energy calculation and timing pick-off in positron emission tomography. *J Instrum.* 2018;13: P09024–P09024. doi:10.1088/1748-0221/13/09/p09024
34. Jorge LS, Bonifacio DAB, DeWitt D, Miyaoka RS. Experimental validation of improved 3D SBP positioning algorithm in PET applications using UW Phase II Board. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect Accel Spectrometers Detect Assoc Equip.* 2016;838: 103–108. doi:10.1016/j.nima.2016.09.029
35. Bonifacio DAB, Gros-Daillon E, Verger L. Microscale mapping of SPAD photon detection probability. *J Instrum.* 2017;12: P05010–P05010. doi:10.1088/1748-0221/12/05/p05010