

# MEDIÇÃO DE EFICIÊNCIA QUÂNTICA E SENSIBILIDADE RADIANTE EM DISPOSITIVOS OPTOELETRÔNICOS

*Pedro Paulo Levi Mateus Canazio\**  
*Antônio Carneiro de Mesquita Filho\*\**

## INTRODUÇÃO

A *eficiência quântica* é um parâmetro físico frequentemente utilizado para caracterizar detectores de radiação eletromagnética, principalmente nas formas de luz visível, infravermelha e ultravioleta. Tais transdutores podem ser fotodiodos, células fotoelétricas, cintiladores, válvulas fotomultiplicadoras, entre outros. Alguns tipos de transdutores podem também ser utilizados para a detecção direta ou indireta de algumas formas de radiação ionizante como partículas alfa, beta e fótons de radiação X e gama. Até mesmo dispositivos emissores, de radiação luminosa, tais como diodos emissores de luz e lâmpadas podem ter a eles associada uma eficiência quântica.

Nos transdutores utilizados como sensores, principalmente no caso dos chamados dispositivos fotovoltaicos,<sup>1</sup> a radiação eletromagnética é convertida em tensões ou correntes elétricas proporcionais à intensidade ou à energia do feixe incidente. No caso dos dispositivos emissores, a conversão se processa no sentido inverso. Em todos estes casos, a eficiência quântica é uma medida da eficiência do processo de conversão em um dispositivo específico, sendo de maior interesse na caracterização física dos dispositivos optoeletrônicos.

Outro parâmetro, este de interesse na caracterização funcional de dispositivos optoeletrônicos e, portanto, de aplicação mais direta no projeto de sistemas optoeletrônicos, é a *sensibilidade radiante*. A relação entre a sensibilidade radiante e a eficiência quântica será discutida em detalhes neste trabalho.

\* Doutor em Ciências, professor do Departamento de Engenharia Elétrica – IME.

\*\* Doutor D'État, professor do Programa de Engenharia Elétrica da COPPE/UFRJ.

Procedimentos experimentais para medida de eficiência quântica não são facilmente encontrados na literatura, sendo esta a motivação principal deste trabalho.

O procedimento experimental apresentado se aplica aos dispositivos do tipo fotovoltaico, que são os mais utilizados nos sistemas militares, de comunicações ópticas<sup>2</sup> e de detecção indireta de radiação com o uso de cintiladores.

No caso de detectores de radiação por cintilação, por exemplo, a caracterização espectral dos fotodetectores permite determinar, juntamente com outras considerações, qual o cintilador mais apropriado para uso em conjunto com eles, sendo o melhor caso aquele em que o espectro de emissão do cintilador é coincidente com a característica de resposta espectral do fotodetector. No caso de comunicações ópticas, permite determinar o fotodiodo mais adequado para ser usado com fibras ópticas, sendo o melhor caso aquele em que o pico da resposta espectral do fotodiodo coincide com a janela de transmissão da fibra óptica.

## EFICIÊNCIA QUÂNTICA E SENSIBILIDADE RADIANTE

### Eficiência Quântica

A eficiência quântica é a relação entre a quantidade de fótons incidentes em um detector e a quantidade de portadores de carga gerados. Para um transdutor genérico, a eficiência quântica  $\eta$  é dada por:<sup>3</sup>

$$\eta = \frac{N_e}{N_f} \quad (1)$$

onde:

$N_e$  é o número de elétrons gerados por unidade de tempo e

$N_f$  é o número de fótons incidentes por unidade de tempo.

Como consequência, a eficiência quântica é um número adimensional e pode ser considerada como a probabilidade de um fóton gerar um elétron ao incidir sobre o detector. Note-se que a definição acima não leva em consideração a dependência da eficiência quântica em relação ao comprimento de onda,  $\lambda$ , da radiação incidente como ocorre com todos os dispositivos optoeletrônicos reais. Mais adiante a eficiência quântica será definida em função de  $\lambda$ .

### Sensibilidade Radiante

A eficiência quântica descreve diretamente uma característica física intrínseca do dispositivo, sendo, por isso, pouco utilizada como parâmetro na sua descrição funcional. Em projetos optoeletrônicos o parâmetro mais comumente utilizado é a “*responsividade espectral*” ou

“*sensibilidade radiante*” do dispositivo.<sup>4</sup> Ela permite uma comparação direta com dispositivos comerciais diferentes e/ou baseados em outras tecnologias. Para isto, basta conhecer os valores da sensibilidade radiante,  $S_R(\lambda)$ , do dispositivo, parâmetro este normalmente fornecido pelo fabricante.

A sensibilidade radiante mede o ganho de conversão do fotodiodo, ou seja, a corrente resultante da incidência sobre o dispositivo de uma determinada potência óptica de comprimento de onda  $\lambda$ , sendo definida por:

$$S_R(\lambda) = \frac{I_p}{P(\lambda)} \quad (2)$$

Onde:

$S_R(\lambda)$  – é a sensibilidade radiante do fotodiodo para o comprimento de onda  $\lambda$

$I_p$  – é a fotocorrente no diodo

$P(\lambda)$  – é a potência óptica, de comprimento de onda  $\lambda$ , incidente no fotodiodo.

A sensibilidade radiante e a eficiência quântica são relacionadas pela equação:<sup>5</sup>

$$\eta(\lambda) = \frac{S_R(\lambda)}{\lambda} \cdot \frac{h.c}{q} \quad (3)$$

Deve-se notar, na equação anterior, que um dispositivo ideal, do ponto de vista da eficiência quântica, teria sua característica  $\eta(\lambda) \times \lambda$  plana. Isto implica que a sensibilidade radiante deverá ter uma característica crescente com o aumento de  $\lambda$ . Reciprocamente, um dispositivo ideal do ponto de vista da sensibilidade radiante deverá ter uma eficiência quântica decrescente com o aumento de  $\lambda$ .

## SISTEMA DE MEDIDA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### Considerações Gerais

A medida da eficiência quântica é feita de forma indireta. Pelas equações anteriores verifica-se que, do ponto de vista prático, é mais fácil medir a sensibilidade radiante e calcular a eficiência quântica a partir dela.

O procedimento experimental consiste em fazer incidir sobre o dispositivo sob teste um feixe uniforme de radiação luminosa, podendo variar do infravermelho ao ultravioleta, cuja potência óptica e comprimento de onda são determinados através do detector piroelétrico e de um monocromador, respectivamente. A resposta de um dispositivo optoeletrônico fotovoltaico à incidência de radiação luminosa é uma corrente, denominada *fotocorrente*. A relação entre esta corrente e a potência óptica incidente fornece a sensibilidade radiante do dispositivo para o comprimento de onda considerado.

Quando tanto o detector piroelétrico quanto o dispositivo sob teste têm áreas iguais, a eficiência quântica é dada por:<sup>5</sup>

$$\eta(\lambda) = \frac{I_{ph}}{\lambda \cdot P(\lambda)} \cdot \frac{h \cdot c}{q} \quad (4)$$

Onde:

$\eta(\lambda)$  – é a eficiência quântica do dispositivo no comprimento de onda  $\lambda$  em (e<sup>-</sup>/fóton)

$P(\lambda)$  – é a potência óptica de comprimento de onda  $\lambda$  incidente no diodo

$I_{ph}$  – é a fotocorrente resultante

$q$  – é a carga do elétron ( $1,602 \times 10^{-19}$  C)

$h$  – é a constante de Plank ( $6,626 \times 10^{-34}$  J.s)

$c$  – é a velocidade da luz no vácuo ( $2,998 \times 10^8$  m / s)

Quando a área do detector de referência e do dispositivo sob teste forem diferentes, a equação 4 deverá ser modificada para:<sup>5</sup>

$$\eta(\lambda) = \frac{I_{ph}}{\lambda P(\lambda)} \cdot \frac{hc}{q} \cdot \frac{A_{ref}}{A_{dst}} \quad (5)$$

Onde:

$A_{ref}$  – é a área sensível do detector de referência

$A_{dst}$  – é a área sensível do dispositivo sob teste

## Arranjo Experimental

Na figura 1 são indicados os principais componentes utilizados para a determinação experimental da sensibilidade radiante.

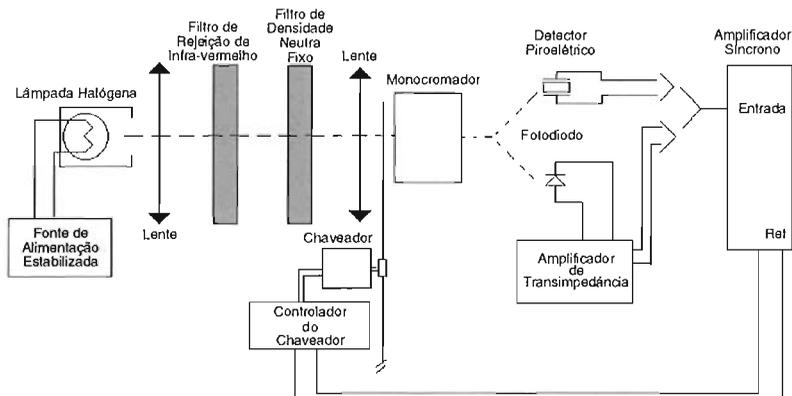


Figura 1: Arranjo experimental para medição da eficiência quântica de fotodiodos

O arranjo experimental é composto dos seguintes elementos:

- *Lâmpada halogênea com fonte de alimentação estabilizada.* Esta lâmpada deve ter um espectro de emissão que cubra toda a faixa de interesse. A fonte de alimentação estabilizada é necessária para evitar que pequenas flutuações na tensão de alimentação alterem a potência luminosa emitida durante a realização do experimento.

- *Filtro absorvedor de infravermelho.* Este filtro tem por finalidade evitar o aquecimento dos elementos subseqüentes do arranjo experimental, caso as lâmpadas utilizadas como fontes luminosas apresentem emissão considerável na faixa do infravermelho.

- *Filtro de densidade neutra.* Este elemento tem por finalidade permitir, quando necessário, o ajuste adequado da intensidade luminosa incidente sobre o dispositivo sob teste sem que seja necessário alterar a tensão da fonte de alimentação da lâmpada, o que poderia alterar seu espectro de emissão.

- *Monocromador.* É um sistema de redes de difração que permite selecionar o comprimento de onda incidente sobre o dispositivo sob teste.

- *Detector piroelétrico de referência.* É o elemento sensor padrão responsável pela calibração da medida, conforme discutido anteriormente. A saída deste tipo de detector é uma tensão proporcional à potência óptica incidente. Isto se deve ao fato de possuir um pequeno amplificador condicionador de sinal integrado a ele.

- *Amplificador de transimpedância.* Tem por finalidade amplificar e converter a fotocorrente do dispositivo sob teste em uma tensão que será comparada com a tensão fornecida pelo detector piroelétrico.

- *Amplificador lock-in:* É um voltímetro seletivo para medir, com níveis de ruído extremamente baixos, as tensões fornecidas pelos detectores.

- *Chaveador (chopper) e controlador.* Executa a modulação do feixe incidente sobre os detectores e fornece o sinal de sincronismo para o amplificador *lock-in*.

- *Lentes.* Têm por finalidade evitar a dispersão do feixe e uniformizar a iluminação da área sensível dos detectores.

Como pode ser notado, o arranjo experimental envolve a utilização de um amplificador *lock-in*.<sup>6</sup> Este equipamento não é essencial ao procedimento de medida podendo ser substituído por um voltímetro. Sua utilização, entretanto, permite uma redução considerável nos níveis de ruído da medida, devido ao fato de que o *lock-in* é extremamente seletivo, amplificando apenas os sinais elétricos que estiverem em sincronismo de fase com seu sinal de referência. Para tanto, o estímulo luminoso incidente sobre os dispositivos é modulado em amplitude por um obturador ou chaveador mecânico (*chopper*), consistindo em um disco perfurado que gira interrompendo periodicamente o feixe. A frequência com que o feixe de luz é interrompido é dada pelo produto do número de perfurações no disco pela sua frequência de rotação em rotações por segundo (rps). Um optoacoplador apropriadamente posicionado fornecerá uma amostra da frequência de modulação do feixe. Esta amostra será o sinal de referência do *lock-in*.

Normalmente, os fabricantes destes equipamentos fornecem os *choppers* com seus respectivos controladores.<sup>7</sup> Naturalmente, se não for utilizado o amplificador *lock-in*, não haverá necessidade de se utilizar o *chopper*.

## Procedimento Experimental

O procedimento de medida consiste em medir inicialmente a potência óptica fornecida pela fonte de radiação em cada comprimento de onda, na posição em que estará o dispositivo sob teste, usando um detector de referência. A seguir, o detector de referência é substituído pelo dispositivo sob teste e a fotocorrente produzida neste é medida.

A medida deve ser feita de maneira extremamente cuidadosa, observando-se os seguintes detalhes:

- Uniformidade de iluminação de toda a superfície sensível dos dispositivos.
- Colocação do detector piroelétrico e do dispositivo sob teste rigorosamente na mesma posição em relação à fonte luminosa.
- Medição cuidadosa da área sensível total do dispositivo sob teste. A área sensível do detector piroelétrico é fornecida pelo fabricante.

O procedimento experimental consiste em duas etapas principais: calibração e medição.

Na calibração é utilizado o detector piroelétrico, que irá medir os valores da potência óptica,  $P(\lambda_i)$ , para cada valor de comprimento de onda  $\lambda_i$ . O comprimento de onda é determinado através do ajuste do monocromador. Com isso fica medida a distribuição espectral de potência do feixe incidente.

Na etapa de medição, o detector piroelétrico é substituído pelo detector sob teste. Novamente devem ser selecionados no monocromador os mesmos comprimentos de onda  $\lambda_i$  da etapa de calibração. Para cada  $\lambda_i$  deverá ser registrada a correspondente fotocorrente,  $I_{ph}(\lambda_i)$ , fornecida pelo dispositivo sob teste.

Uma vez obtidos os conjuntos de valores  $P(\lambda_i)$ ,  $I_{ph}(\lambda_i)$  e  $\lambda_i$ , as equações 4 ou 5 fornecerão os valores da eficiência quântica,  $\eta(\lambda_i)$ . A equação 2 fornece os valores da sensibilidade radiante,  $S_R(\lambda_i)$ .

## EXEMPLO DE APLICAÇÃO

O sistema descrito anteriormente foi utilizado para a caracterização de diodos p-i-n de silício amorfo hidrogenado (a-Si:H). A potência óptica é medida por um detector piroelétrico fabricado pela ELTEC, modelo 404 VM.<sup>8</sup> Este detector piroelétrico tem resposta espectral plana para a faixa de comprimentos de onda de 0,2  $\mu\text{m}$  a 20  $\mu\text{m}$  e uma responsividade de tensão de 500 V / W.

Como conversor corrente-tensão foi utilizado o amplificador sensível a corrente fabricado pela PARC, modelo 148,<sup>9</sup> cujas características de ganho, largura de banda e impedância de entrada são conhecidas com precisão. O monocromador utilizado é da marca PTI, modelo 01-001.

Na figura 2 é apresentado o gráfico com os valores de sensibilidade radiante,  $S_R(\lambda)$ , correspondentes a um fotodiodo p-i-n de a-Si:H típico com espessura da camada intrínseca de 1,3  $\mu\text{m}$ . Além disso, o experimento foi conduzido com polarização reversa nula aplicada ao diodo ( $V_r = 0$  V). Os valores da curva foram calculados através da equação 2. Na figura 3 são mostrados os valores da eficiência quântica, calculados através da equação 6.

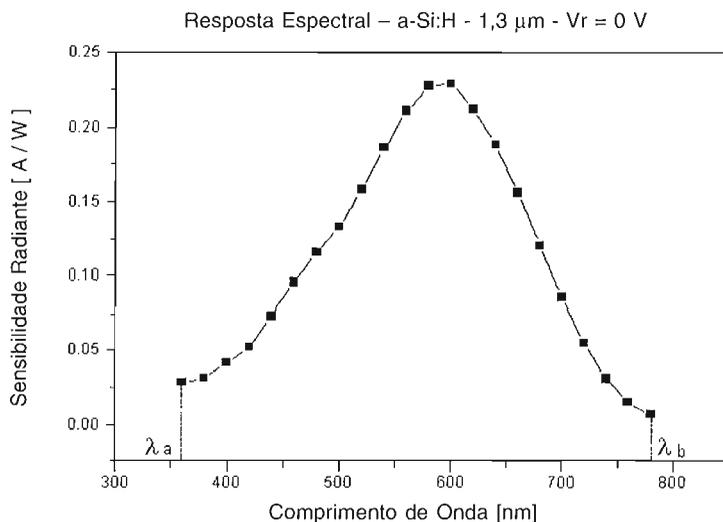


Figura 2: Sensibilidade Radiante do Fotodiodo de a-Si:H

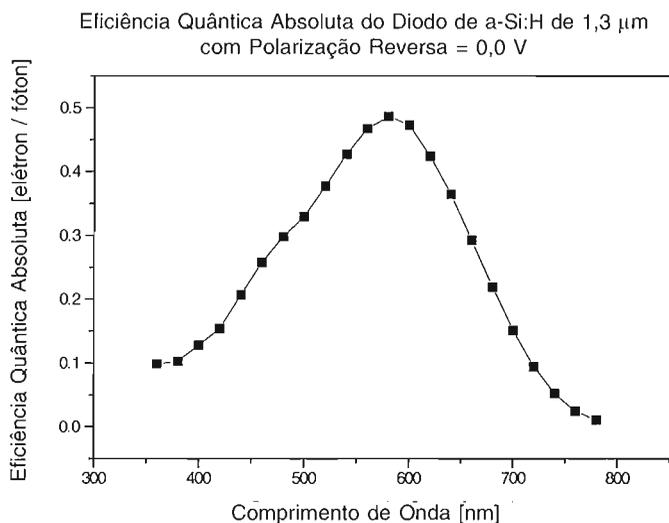


Figura 3: Eficiência quântica absoluta do fotodiodo de a-Si:H

## CONCLUSÕES

O procedimento apresentado no presente artigo foi empregado com sucesso na determinação de características de eficiência quântica e sensibilidade radiante de alguns fotodiodos comerciais e não comerciais. No caso dos dispositivos comerciais, os resultados obtidos foram semelhantes aos apresentados pelos fabricantes, validando o procedimento experimental. CAT

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 – REGALSKI, Antoni. *Infrared Photon Detectors*. SPIE Optical Engineering Press, 1995.
- 2 – PEREIRA, W. N. A. *Equipamentos para Auxílio à Visão em Ambientes Pouco Iluminados: Emprego em Operações na Região Amazônica*. Monografia – ECEME - 1994.
- 3 – VINCENT, J. D. *Fundamentals of Infrared Detector Operation & Testing* – Willey Interscience. 1996.
- 4 – GOWAR, J. *Optical Communication Systems*. Prentice Hall International, 1984.
- 5 – CANAZIO, P. P. L. M. *Detectores de Radiação Baseados em Filmes Finos de Silício Amorfo Hidrogenado* – Tese de Doutorado – COPPE/UFRJ – 1996.
- 6 – Meade, J. M. *Lock-in Amplifiers: principles and applications*. Peter Peregrinus Ltd., London, 1989.
- 7 – Stanford Research Systems, Lock-in Amplifier Model SR-530, User's Manual.
- 8 – ELTEC - (1989) Pyroelectric IR Detector Model 404-VM Manufacturer's Data Sheet.
- 9 – EGG-PARC – Transconductance Amplifier Model 148 – User's Manual.



Faça agora o seu pedido de assinatura e receba em seu endereço os três números anuais da *Revista Militar de Ciência e Tecnologia* para 2000

**Valor da Assinatura Anual: R\$ 20,00**

Envie vale postal ou cheque dos correios, nominal à "*Biblioteca do Exército*" para efetuar sua assinatura.

### DADOS CADASTRAIS

|          |                                |                                  |           |            |             |
|----------|--------------------------------|----------------------------------|-----------|------------|-------------|
| Nome     |                                |                                  | Profissão |            |             |
| Militar  | <input type="checkbox"/> Ativa | <input type="checkbox"/> Reserva | OM        | Posto/Grad | Prec-CP     |
| Endereço |                                |                                  | Nº        |            | Complemento |
| Rua      |                                |                                  |           |            |             |
| Cidade   |                                |                                  | UF        | CEP        |             |
| Tel      |                                | Fax                              |           | E-mail     |             |

### BIBLIOTECA DO EXÉRCITO

Palácio Duque de Caxias – Praça Duque de Caxias, 25 – Ala Marcílio Dias – 3º andar  
CEP 20221-260 – Rio de Janeiro-RJ

Assinaturas: 0800 238365 (grátis) ou (0XX-21) 519-5715 Fax: (0XX-21) 519-5569

Home Page: <http://www.bibliex.eb.br> — E-mail: [bibliex@ism.com.br](mailto:bibliex@ism.com.br)