

Espectroscopia de Fotocorrente Aplicada a Fotodetectores Infravermelhos a Poços Quânticos

L. F. M. Nohra^a, J. Amorim Filho^b, F. D. P. Alves^a, Luis R. Ramos^c

^a Instituto Tecnológico e Aeronáutica, Dep. Eng. Eletrônica, São José dos Campos, SP, Brazil.

^b Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol, Campinas, SP, Brazil.

^c Instituto de Aeronáutica e Espaço, Div. Sistemas de Defesa., São José dos Campos, SP, Brazil.

e-mail: nohra@ita.br, jayr.amorim@bioetanol.org.br, durante@ita.br e luisramos@iae.cta.br

Resumo — Este artigo apresenta uma configuração experimental para medidas de fotocorrente em fotodetectores que operem na faixa do infravermelho, em temperaturas inferiores a 70 K, sendo alimentado por diferentes tensões de polarização. Foram realizadas medidas em fotodetector a poços quânticos (QWIP) capaz de detectar comprimentos de onda nas faixas do infravermelho próximo (NIR) e médio (MWIR). Os resultados obtidos indicam o grande potencial da técnica que pode ser adaptada para quaisquer faixas do espectro infravermelho e diferentes tipos de fotodetectores.

Palavras chaves – Fotodetectores, Fotocorrente, Poço Quântico.

I. INTRODUÇÃO

O fotodetector infravermelho é um dispositivo eletrônico que converte a radiação eletromagnética na faixa do infravermelho (comprimentos de onda entre $0,75\mu\text{m}$ e $1.000\mu\text{m}$) em um sinal elétrico útil. Os fotodetectores infravermelhos a poços quânticos (QWIP, retirado do inglês *Quantum Well Infrared Photodetector*) são sensores que realizam a detecção na faixa do infravermelho, através da absorção de fótons em poços quânticos de material semiconductor [1].

Os QWIPs são detectores fotocondutivos que operam a partir de uma tensão de polarização. A detecção ocorre a partir da fotoexcitação dos elétrons ou buracos no estado fundamental ou nos estados excitados nas bandas de condução ou valência [1].

As maiores vantagens do QWIP são a possibilidade de se operar em mais de uma banda no mesmo dispositivo eletrônico e a alta repetitividade, que permite a fabricação de câmeras de milhões de pixels.

Os dispositivos a poços quânticos utilizando GaAs / $\text{Al}_z\text{Ga}_{z-1}\text{As}$ apresentam inúmeras vantagens, entre elas: a maturidade das tecnologias de crescimento e os processos de fabricação em GaAs, baixo custo de produção, elevado rendimento e boa estabilidade térmica.

O desempenho de um sensor na faixa do infravermelho é medido por suas características, denominadas figura de mérito, tais como: responsividade, corrente de escuro, detectividade, ganho, eficiência quântica, tempo de resposta, entre outros [2].

As principais para o projeto de fotodetectores são corrente de escuro e responsividade. Esse artigo relata uma técnica para medir a responsividade em QWIPs em toda faixa de sensibilidade, através de espectroscopia de fotocorrente.

II. RESPONSABILIDADE EM QWIPS

A fotocorrente, I_p , é gerada pela incidência de radiação na faixa do infravermelho. Quando iluminado, o dispositivo absorve os fótons incidentes, através das transições de portadores entre os níveis de energia dos poços quânticos, que pode ser interbanda ou intersubbanda. A fotocorrente varia com o campo elétrico aplicado, F , a temperatura do dispositivo, os níveis de dopagem e características dos poços quânticos (número de poços, distância e largura) e pode ser matematicamente descrita por [3]:

$$I_p(F) = \sum_{n=1}^N \frac{q \Phi_0}{h\omega} (e^{-\alpha n L_w} + e^{-\alpha(2N-n)L_w}) \alpha L_w e^{-\frac{nL}{v(F)\tau}}, \quad (1)$$

onde α é o coeficiente de absorção, Φ_0 a potência do fluxo de fótons incidente, L é o período de múltiplos poços quânticos, L_w representa a largura do poço, N é o número de poços, n representa o n -ésimo poço na estrutura, $v(F)$ a velocidade de deriva em função do campo elétrico externo aplicado (F) e τ é o tempo de vida do elétron no poço. Para fotodetectores a poços quânticos, onde $\alpha L_w \ll 1$, que corresponde à grande maioria dos casos práticos, pode-se simplificar a expressão obtendo-se:

$$I_p(F) \cong 2 \alpha L_w \frac{q \Phi_0}{h\omega} \sum_{n=1}^N e^{-\frac{nL}{v(F)\tau}}. \quad (2)$$

A responsividade, R , é definida pela razão entre a fotocorrente produzida e a potência de radiação incidente, Φ_0 , (fluxo de fótons), para cada comprimento de onda [4]:

$$R(\lambda) = \frac{I_p(\lambda)}{\Phi_0(\lambda)}. \quad (3)$$

Combinando (2) e (3) obtém-se:

$$R(\lambda) = 2 \alpha L_w \frac{q v(F)\tau}{h\omega L}. \quad (4)$$

A estimativa teórica de responsividade depende fundamentalmente do coeficiente de absorção, da velocidade de deriva dos portadores no material multicamada e do tempo de vida do elétron no nível excitado.

Esses parâmetros são difíceis de serem obtidos por modelos teóricos embora alguns trabalhos tenham demonstrado bons resultados [4].

III. MEDIDA DE RESPONSABILIDADE

A responsividade não pode ser medida diretamente, entretanto, é possível realizar a medida de fotocorrente de um detector devido a uma tensão de polarização aplicada. Em seguida é preciso obter a potência da radiação incidente no QWIP.

Isso pode ser feito medindo-se a fotocorrente gerada por um fotodetector com responsividade conhecida, submetido à mesma radiação incidente no detector de prova (QWIP). Assim,

$$\Phi_0 = \frac{I_{medida}}{R_{conhecida}} \quad (5)$$

A medida simultânea dos parâmetros necessários para a obtenção da responsividade do QWIP pode ser realizada por intermédio do arranjo experimental descrito na Fig. 1, mostra o diagrama de blocos do arranjo experimental de espectroscopia de fotocorrente.

Duas fontes de radiação na faixa do infravermelho, uma lâmpada de halogênio-tungstênio e uma barra de Carbetto de Silício, geram um sinal contínuo que é inserido no monocromador.

Essas duas fontes permitem cobrir faixas que vão do visível até dezenas de micrometros (faixa de interesse de 0,7 a 15 μm). O monocromador, utilizando dois espelhos parabólicos e um conjunto de grades de difração, é responsável por deixar sair apenas o comprimento de onda desejado, respeitando-se as limitações de resolução impostas pelas grades e pelos *slits* de entrada e saída.

Para bloquear a passagem de comprimentos de onda oriundos de difrações de ordem superior, é introduzido um conjunto de filtros. O sinal monocromático é então modulado por um *chopper* mecânico cuja frequência pode ser controlada e devidamente sincronizada com amplificadores do tipo *Lock-in*, responsáveis pela leitura da corrente.

O sinal modulado é direcionado a um divisor de feixes que permite que metade da potência incidente seja direcionada para o QWIP a ser testado, através de um espelho parabólico e a outra metade, direcionada da mesma maneira para o fotodetector de referência (responsividade conhecida R_{ref}). A fotocorrente do detector referência é medida em um *Lock-in* e a razão da potência incidente pela área do detector pode ser obtida. Assim,

$$\frac{\Phi_0}{A_{ref}} = \frac{I_{ref}}{R_{ref} \cdot A_{ref}} \quad (6)$$

O feixe que incide no QWIP passa pela janela do dedo frio onde o detector em teste é mantido a baixas temperaturas. Essa janela, representa a única diferença entre os caminhos ópticos dos dois detectores e sua transmitância T_w deve ser levada em consideração.

Assim, o fluxo de fótons incidente nos detectores em teste pode ser estimado através de:

$$\Phi_{QWIP}(\lambda) = \Phi_{ref}(\lambda) \frac{A_{QWIP}}{A_{Ref}} T_w(\lambda) \quad (7)$$

As características da amostra em teste influenciam significativamente o fluxo de fótons incidente nos QWIPs. Assim, detalhes como ângulo de acoplamento de radiação incidente e efeitos do substrato da amostra devem, também, ser levados em consideração.

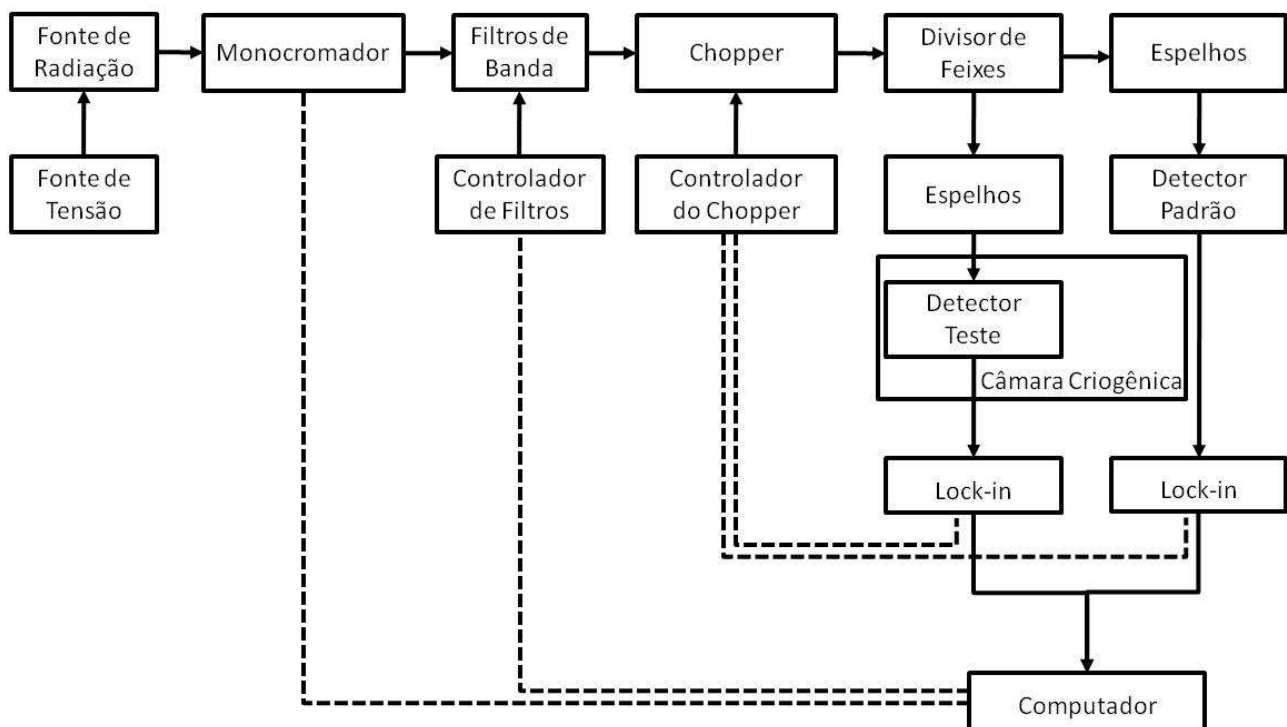


Fig. 1 – Configuração experimental para medida de fotocorrente em QWIP.

Neste trabalho os QWIPs testados têm acoplamento óptico à 45° para garantir a interação fóton-elétron. Assim, a área efetiva de detecção passa a ser $A_{QWIP} \cos 45^\circ$. A Transmitância do substrato de GaAs, T_s , foi considerada 0,68, resultado obtido em trabalhos anteriores [3]. Finalmente, considerando todos os fatores, a responsividade do QWIP pode ser obtida da seguinte forma:

$$R_{QWIP}(\lambda) = \frac{I_{QWIP} \cdot R_{ref} \cdot A_{ref.}}{A_{QWIP} \cdot I_{Ref.} \cdot \cos 45 \cdot T_W(\lambda) \cdot T_s(\lambda)}, \quad (8)$$

onde todos os parâmetros são conhecidos.

A Fig. 2 mostra o arranjo experimental utilizado.

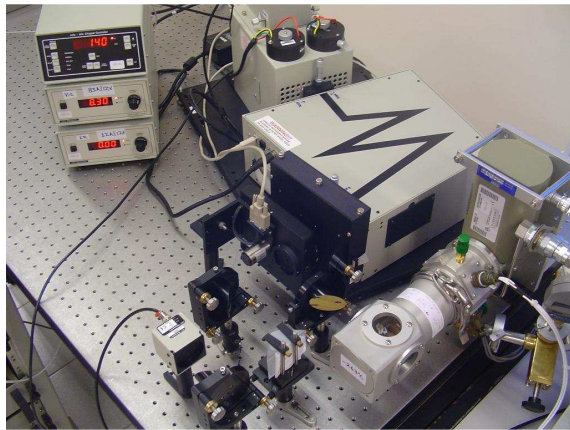


Fig. 2 – Foto da configuração experimental

O sistema criostático é composto por um compressor de Hélio e uma bomba mecânica de vácuo que permite baixar a pressão para 10^{-3} torr. Este sistema opera em temperaturas próximas a 10 K, com uma precisão de 0,05 K. O suporte para o fotodetector permite a fixação de diferentes sensores, com até 10 terminais de conexão elétrica. Neste experimento serão utilizados apenas 2 terminais.

IV. RESULTADOS

Foram realizadas medidas em 2 diferentes QWPs, sensíveis na faixa do NIR e do MWIR, cujas características são : NIR (transições interbanda) 20 repetições não dopadas de GaAs (300 Å) / In_{0,25}Ga_{0,75}As (40 Å) / In_{0,10}Ga_{0,90}As (43 Å) / GaAs (300 Å) sobre substrato de GaAs; MWIR (transições intersubbandas) 20 repetições de Al_{0,40}Ga_{0,60}As (300 Å) / GaAs (13 Å) / In_{0,15}Ga_{0,85}As (14 Å) / GaAs (13 Å) / Al_{0,40} Ga_{0,60}As (300 Å) sobre substrato de GaAs, onde as três camadas internas são dopadas com 2.10^{18} /cm³ de Si.

Os parâmetros utilizados para obtenção da responsividade foram listados na Tabela I.

TABELA I - PARÂMETROS DOS SENSORES

Detector referência	
$A_{ref.}$	0.071 cm ²
QWIP	
A_{NIR}	0.4 mm ²
A_{MWIR}	0.8 mm ²
T_s	0.68
T_W (ZnSe)	0.7

Inicialmente foram medidos valores de fotocorrente gerado pelo QWIP no NIR, entre 800 nm e 1.000 nm, com uma resolução de 1 nm por medida. A tensão foi mantida fixa em 1,5V e a temperatura, dentro da câmara criostática, foi medidas nos valores de 17, 30, 40, 50 e 60 K. As curvas de responsividade são mostradas na Fig. 3.

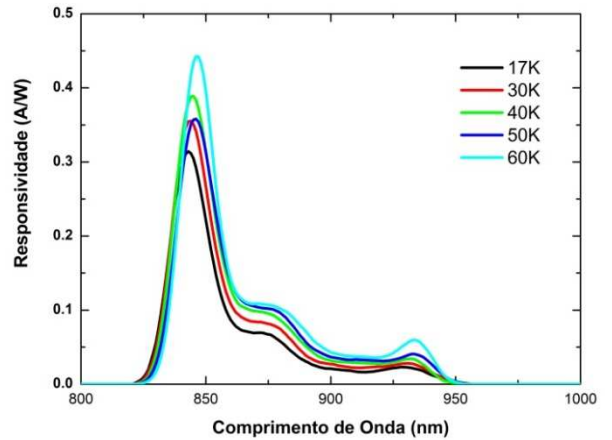


Fig. 3 – Responsividade do QWIP no NIR, com tensão de 1.5V.

É possível observar na Fig. 3 uma resposta estreita com picos em aproximadamente 850 e 940 nm, como seria esperado para as transições interbanda desse dispositivo.

Também foi medida a dependência da responsividade em relação à tensão de polarização (*bias*), mantendo a temperatura fixa em 17 K e variando a tensão aplicada ao detector, nos valores de 0,50, 0,75, 1,00 1,25 e 1,50 V. As curvas são mostradas na Fig. 4.

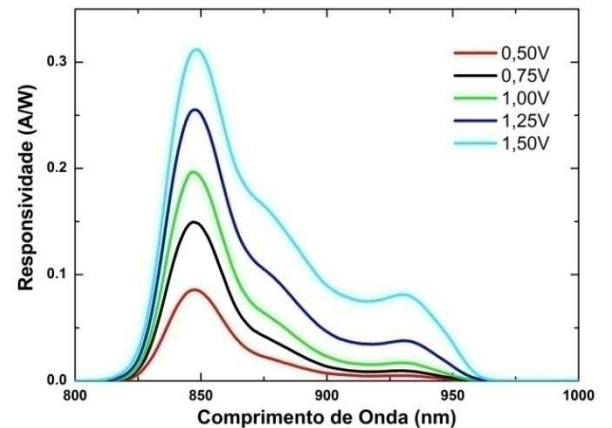


Fig. 4 - Responsividade do QWIP no NIR, com temperatura de 17 K.

Observa-se que o aumento de tensão de polarização aproxima o valor de responsividade dos dois picos, característica desejável em muitos casos. A análise dos fenômenos quânticos responsáveis por essa resposta pode ser encontrada em [5].

Em seguida, foram realizadas mesmas medidas no QWIP sensível ao MWIR, entre 4.000 nm e 6.000 nm, com uma resolução de 1 nm por medida, mantendo a tensão de polarização (*bias*) fixa em 3,5 V e variando a temperatura, dentro da câmara criostática, nos valores de 17, 30, 40, 50 e 60 K. As curvas são mostradas na Fig. 5.

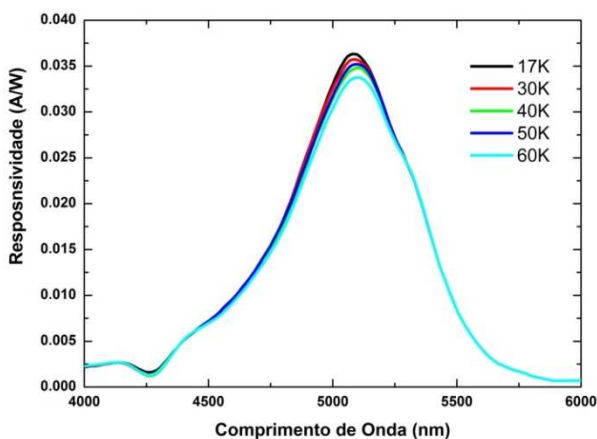


Fig. 5 – Responsividade do QWIP no MWIR, com tensão de 3.5 V.

É possível observar, na Fig. 5, que a responsividade do QWIP no MWIR é muito pouco influenciada pela variação de temperatura. A variação da responsividade com a temperatura está relacionada principalmente a distância entre os níveis quantizados, quanto menor a energia entre os níveis maior a passagem de elétrons termicamente excitados (efeito termoiônico).

A dependência da responsividade com a tensão de polarização também foi observada. Mantendo a temperatura fixa em 17 K e variando a tensão aplicada ao detector, nos valores de 0,5, 1,5, 2,5 e 3,5 V, foram obtidas as curvas mostradas na Fig. 6.

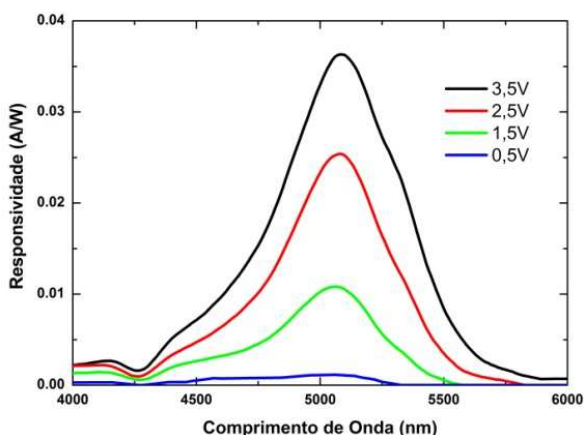


Fig. 6 - Responsividade do QWIP no MWIR, com 17K.

Observa-se, na Fig. 6, que com aumento da tensão de polarização a responsividade aumenta consideravelmente. Também se observa um leve aumento no comprimento de onda de pico, à medida que a tensão de polarização aumenta. Isso se deve ao efeito *Stark* em poços quânticos simétricos, discutido em [3].

V. CONCLUSÃO

Por intermédio da medida da fotocorrente em diretores de prova (QWIPs) e de referência (responsividade conhecida), submetidos à mesma potência incidente, demonstrou-se a possibilidade de levantar as curvas responsividade de QWIPs em várias temperaturas,

submetidos a diferentes tensões de polarização. A técnica, conhecida como espectroscopia de fotocorrente, é uma poderosa ferramenta para análise de desempenho e extremamente útil durante o projeto desses dispositivos.

Foram realizadas medidas em QWIP, expostos a radiação na faixa do NIR e MWIR, nos intervalos de comprimento de onda de 800 a 1.000 nm e 4.000 a 6.000 nm, com uma resolução de 1 nm.

Os resultados obtidos nas medidas de responsividade por comprimento de onda, variando a tensão aplicada e a temperatura, demonstram precisão e alta resolução da configuração experimental empregada. Este sistema pode ser adaptado para medida de diferentes dispositivos fotodetectores, em várias faixas do infravermelho. Esse fato é extremamente interessante para a Força Aérea, que poderá se utilizar dessa técnica para caracterizar diretores de vários dispositivos operacionais.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] SCHNEIDER H., “Quantum Well Infrared Photodetectors, Physics and Applications”, Springer-Verlag, Berlim, 2007.
- [2] HANSON N.A., “Characterization and Analysis of a Multicolor Quantum Well Infrared Photodetector”, Tese de Mestrado, Naval Postgraduate School, Monterey, 2006.
- [3] ALVES F. D. P., “Three-band quantum well infrared photodetector using interband and intersubband transitions”, Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2008.
- [4] SANTOS, R. A. T.; et al, “QWIP responsivity prediction using the transfer matrix method”, Infrared Technology and application XXXVI, Proceeding SPIE v.7660, 2010.
- [5] ALVES, F. D. P., et al, “Tunable NIR Quantum Well Infrared Photodetector Using Interband Transitions”. In: International Microwave and Optoelectronics Conference -IMOC, Belém, 2009.
- [6] HUDSON R. D., “Infrared System Engineering”, John Wiley & Sons Inc., New York, 1969.