

Análise comparativa das propriedades elétricas de camadas e multicamadas de VO_x depositadas por pulverização catódica para aplicação em bolômetros

Comparative analysis of electrical properties of single and multilayers of VO_x deposited by RF magnetron sputtering for bolometers application

Rodrigo Amaral de Medeiros¹, Marcelo Silva Bortolini de Castro²,
Leila Rosa de Oliveira Cruz¹, Carlos Luiz Ferreira¹

¹ Laboratório de Filmes Finos – LFF, IME, CEP: 22290-270, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

² Laboratório de Optrônica e Sensores - LOS – CTEEx – 23020-470, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
e-mail: digfisc@ime.eb.br, leilacruz@ime.eb.br, ceferreira@ime.eb.br, marcelobortolini@uol.com.br

RESUMO

Filmes finos de VO_x (camada e multicamadas) foram fabricados por pulverização catódica com rádio-frequência assistida por campo magnético constante para aplicação em detectores de radiação infravermelha do tipo bolômetro. As amostras foram fabricadas sem quebra de vácuo a partir de três alvos: V₂O₃, VO₂ e V₂O₅. Um sistema de pulverização catódica com três catodos foi construído para a realização deste trabalho. Os resultados mostraram que ambas as configurações, camadas e multicamadas, apresentaram TCR semelhantes, da ordem de 2 %/K, e resistência de folha inferior a 20 kΩ/quad, sendo ambas recomendadas para emprego em bolômetros.

Palavras-chave: VO_x, pulverização catódica, bolômetros.

ABSTRACT

VO_x thin films (single and multilayers) were fabricated by RF magnetron sputtering for application in bolometers. The samples were deposited without vacuum break from three targets: V₂O₃, VO₂ and V₂O₅. A RF magnetron sputtering system with three cathodes was built to carry out the depositions. The results showed that both configurations, single layers and multilayers, presented similar values of TCR, roughly 2%/K, and sheet resistance less than 20 kΩ/sq, being recommended for application in bolometers.

Keywords: VO_x, RF magnetron sputtering, bolometric detectors.

1. INTRODUÇÃO

Detectores térmicos de radiação infravermelha com alto desempenho, tais como bolômetros, vêm sendo desenvolvidos a partir de materiais semicondutores como silício amorfo, óxido de cobre-ítrio-bário e óxidos de vanádio [1]. Tais realizações se devem às pesquisas básicas de desenvolvimento de materiais sensíveis ao infravermelho, ao aprimoramento das técnicas de fabricação e ao surgimento de novos métodos ou processos de obtenção desses materiais. Dentre os materiais sensíveis atualmente empregados na fabricação de detectores de infravermelho não refrigerados, os óxidos de vanádio (VO_x) são os mais utilizados devido ao elevado coeficiente de variação da resistência com a temperatura (TCR), propriedade que justifica a sua aplicação comercial [1-3].

Um bolômetro deve ter alto valor de TCR, de forma a maximizar sua sensibilidade, e baixo valor de resistência de folha (Rs), de forma a minimizar o ruído térmico [4]. Segundo a literatura, valores de TCR acima de 2 %/K e resistência de folha abaixo de 20 kΩ/quad já são considerados adequados para aplicação

em bolômetros [5,6]. Nos óxidos de vanádio, os valores de TCR e R_s dependem fortemente da estequiometria e das fases presentes no filme, podendo ser otimizados a partir da formação de filmes multifásicos. A presença de uma mistura controlada de fases contribui para maximizar a razão TCR/ R_s , uma vez que diferentes óxidos possuem diferentes propriedades. O VO_2 , por exemplo, possui excelentes propriedades, mas sofre uma transição de fase de 1ª ordem em temperaturas próximas da ambiente, em torno de 67°C [7], o que não é desejável em aplicações práticas. O V_2O_3 também apresenta mudança de fase, mas em uma temperatura bem inferior, da ordem de -123 °C. A literatura ressalta que a presença de V_2O_3 nos filmes de VO_x contribui para diminuir a resistência do filme [5,8]. O V_2O_5 é o óxido de vanádio mais estável, apresentando também mudança de fase na temperatura de 250 °C e valores altos de TCR (em torno de 2,5%/K). Porém, ele possui uma alta resistência ($10^6 \Omega/\text{quad}$) [8]. Assim, a presença de V_2O_5 em filmes de VO_x contribui para aumentar o TCR, mas também aumenta o ruído térmico.

A vantagem da configuração com multicamadas sobre a de uma única camada é um melhor controle da mistura das fases constituintes do filme de VO_x . Han e colaboradores [8] caracterizaram uma mistura de fases, obtida através da difusão de O_2 por recozimento em atmosfera reativa de um sanduiche ($V_2O_5/V/V_2O_5$), e obtiveram TCR acima de 2 %/K e R_s menor que 10 k Ω/quad .

Neste trabalho foram fabricados filmes finos de VO_x , com configurações de uma camada e multicamadas, pela técnica de pulverização catódica RF assistida por campo magnético constante, a partir de três alvos com estequiometrias V_2O_3 , VO_2 e V_2O_5 . O objetivo do trabalho foi comparar os valores de TCR e R_s dos filmes nas duas configurações, em face à rota de processamento e aos parâmetros de fabricação, em especial, a temperatura do substrato. Para a realização deste trabalho foi construído um sistema de pulverização catódica com rádio frequência (RF) com três catodos, capaz depositar multicamadas de filmes finos sem quebra de vácuo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Construção do sistema de pulverização catódica

Um sistema de pulverização catódica com RF e magnetos, dotado de três catodos, foi projetado e montado no Laboratório de Filmes Finos do Instituto Militar de Engenharia, com o objetivo de depositar multicamadas de filmes finos. Neste sistema, cada catodo utiliza um alvo, e assim é possível depositar sequencialmente até três materiais diferentes sem quebra de vácuo.

Os catodos foram fabricados pela Meivac, possuem 3 polegadas de diâmetro e eixos articulados para direcionar seus focos ao suporte do substrato (Figura 1). Nesta configuração, o crescimento de filmes com espessura uniforme foi obtido com um movimento de rotação dos substratos, realizado pelo suporte de substrato modelo SHQ-15A da AJA International. Esse suporte, além de controlar a rotação, possui aquecimento por lâmpadas halógenas com monitoramento de temperatura por termopar tipo K e regulagem de altura da amostra.

A câmara de vácuo foi construída em aço inox 304 e o projeto pode ser visto em detalhes na Figura 1. O formato cúbico possibilitou ter tampas removíveis com vedação por anéis de Viton® em todas as faces. As tampas laterais têm tamanho ISO 250 e passantes de vácuo para conectar medidores de pressão, entradas de gases, válvulas de ventilação etc. Na tampa da face superior foi adicionado um anel alongador para permitir a instalação dos três catodos e na tampa da face inferior foi instalado o suporte de substrato. O formato cúbico e as tampas removíveis deram mais versatilidade e acessibilidade à campânula para integração de acessórios e operações de manutenção. O sistema de vácuo é composto por uma bomba mecânica seca tipo Scroll modelo XDS 10 e uma bomba turbomolecular modelo EDX 200.

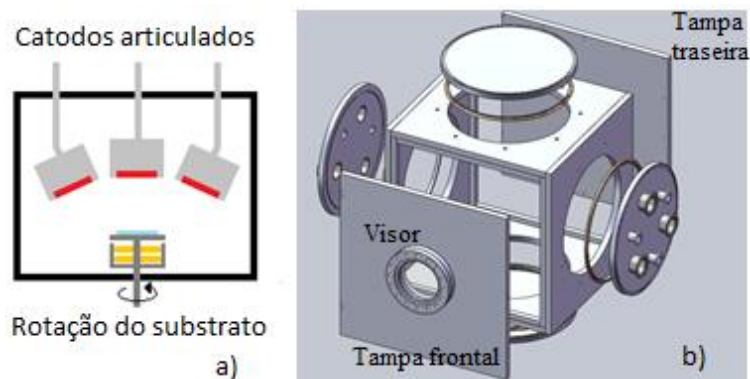


Figura 1: Desenho esquemático do sistema de pulverização catódica construído; a) catodos com eixos articulados mantendo o foco sobre o suporte do substrato; b) projeto da câmara de vácuo.

Para obter maior controle na deposição dos filmes foi incorporado um oscilador de cristal de quartzo, modelo STM-100 desenvolvido pela Sycon Instruments, que permite monitorar “in-situ” a taxa de deposição e a espessura dos filmes. Na deposição de multicamadas, o monitor de espessura tem um papel fundamental no controle do processo, pois permite crescer cada camada com a espessura desejada.

O sistema foi montado sobre um rack que abriga diversos acessórios, dentre eles: sistema de admissão de gases da MKS composto por controladores de fluxo de massa para argônio e oxigênio, unidade de potência modelo 247D, acionador de válvulas modelo 250E, medidor de pressão tipo Baratron® modelo 626A, controlador do suporte do substrato, fonte de RF modelo RFX 600 e casador de impedância modelo ATX.

2.2 Fabricação e caracterização dos filmes de VO_x

Inicialmente foram fabricados filmes finos a partir dos alvos com estequiometria V₂O₃, VO₂ e V₂O₅. Esta etapa teve como finalidade determinar os parâmetros de deposição para cada alvo que permitissem a obtenção de filmes com alto TCR e baixa Rs, na menor temperatura possível do substrato (T_{SUB}). A partir destes resultados, foram então selecionadas as temperaturas de 60, 105 e 110 °C para as deposições a partir dos alvos de V₂O₃, VO₂ e V₂O₅, respectivamente.

Em seguida foram fabricadas estruturas de multicamadas de filmes finos de óxidos de vanádio, sem quebra de vácuo, usando os parâmetros de deposição selecionados anteriormente. Foram produzidas 6 (seis) estruturas de empilhamento do tipo Vidro/Óxido 1/Óxido 2/Óxido 3, permutando as camadas dos óxidos a partir dos alvos de V₂O₃, VO₂ e V₂O₅. Cada camada de óxido foi depositada com aproximadamente 330 Å, resultando numa estrutura de três camadas com 1000 Å de espessura total.

As amostras de multicamadas foram caracterizadas por difração de raios X (DRX), em um difratômetro Bruker com anodo de cobre (comprimento de onda de 1,54060 Å). O TCR e a resistência de folha de todas as amostras foram medidos em um sistema de quatro pontas construído especialmente para esta finalidade. O TCR foi obtido pela equação de Arrhenius [2,9].

3. RESULTADOS

3.1 TCR e resistência de folha das camadas de VO_x

O TCR, dado pela Equação 1, é o parâmetro que mede a variação da resistência elétrica (R) do material como função da sua temperatura (T).

$$TCR = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} \quad (1)$$

A equação de Arrhenius (Equação 2) pode ser utilizada para ajustar as curvas de resistência elétrica em função da temperatura e obter a energia de ativação e o TCR do material.

$$R = R_0 \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) \quad (2)$$

Na Equação 2, R_0 é uma constante pré-exponencial, E_a é a energia de ativação, k é a constante de Boltzmann e T é a temperatura absoluta.

Derivando-se a Equação 2 e, em seguida, substituindo o resultado na Equação 1, obtém-se a expressão para o cálculo do TCR dos filmes (Equação 3). O termo (E_a/k) pode ser identificado como o coeficiente angular da reta que ajusta o gráfico de $\ln(R) \times T^{-1}$.

$$TCR = \frac{E_a}{k} T^{-2} \quad (3)$$

3.1.1 TCR e resistência de folha das camadas de VO_x

A Tabela 1 apresenta os parâmetros de deposição, o TCR e a resistência de folha de camadas de VO_x. Observa-se que as amostras S3, S6 e S10, fabricadas a partir dos alvos de V₂O₃, VO₂ e V₂O₅, respectivamente, apresentaram o melhor compromisso entre alto TCR, baixa Rs e baixa T_{SUB}. Por isso, estas amostras foram selecionadas para fabricar as multicamadas e estabelecer a análise comparativa.

A Figura 2 mostra o gráfico de $\ln(R) \times T^{-1}$ para as amostras S3, S6 e S10. Não são observadas variações abruptas da resistência de folha ao longo da faixa de temperatura analisada, 15 a 75 °C, o que indica que não houve transições de fase. Transições de fase não são esperadas em filmes de V₂O₃ e V₂O₅, nesta faixa de temperatura, uma vez que nestas fases as transições ocorrem nas temperaturas de -123°C [10] e 250°C [11], respectivamente. No entanto, para filmes de VO₂ é esperada uma transição em 67°C, acompanhada de uma drástica mudança em sua resistência de folha [12]. A ausência desta alteração abrupta na Figura 2 sugere que os filmes obtidos a partir do alvo de VO₂ não sejam nem estequiométricos nem monofásicos, mas possivelmente uma mistura de fases (VO_x). A linearidade das curvas e a ausência de transições abruptas indicam que as camadas individuais seriam, por si só, candidatas ao emprego em bolômetros.

Tabela 1: Parâmetros de deposição e propriedades de camadas de VO_x.

AMOSTRA	ALVO	POTÊNCIA (W)	TAXA (Å/s)	T _{SUB} (°C)	Rs (kΩ/quad)	TCR (%/K)
S1	V ₂ O ₃	120	0,26	35	55,8	-2,04
S2	V ₂ O ₃	120	0,26	45	6,2	-2,18
S3	V ₂ O ₃	120	0,26	60	3,7	-2,19
S4	VO ₂	120	0,23	90	1100,0	-3,77
S5	VO ₂	120	0,29	100	485,9	-3,18
S6	VO ₂	120	0,24	105	11,7	-2,06
S7	VO ₂	120	0,30	110	31,0	-1,95
S8	VO ₂	120	0,21	120	0,2	-0,74
S9	V ₂ O ₅	150	0,27	100	704,7	-3,62
S10	V ₂ O ₅	150	0,27	110	581,8	-4,41
S11	V ₂ O ₅	150	0,26	120	189,2	-1,51
S12	V ₂ O ₅	150	0,27	140	68,7	-1,08

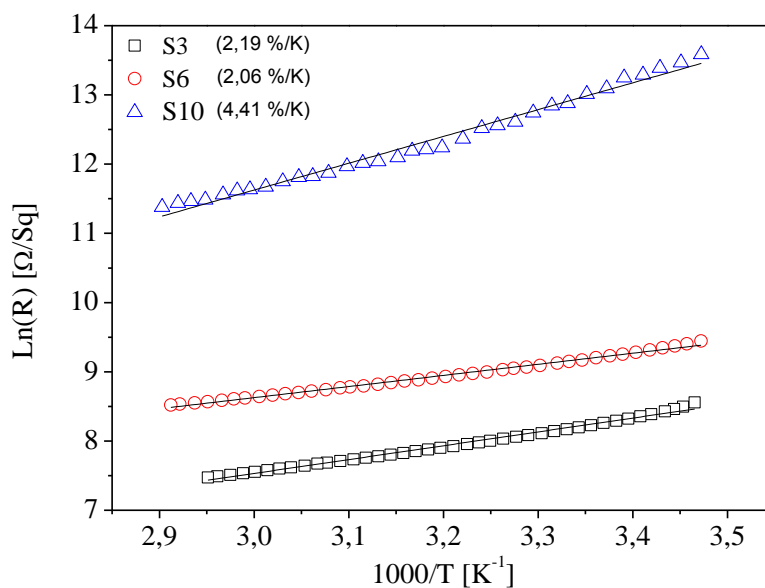


Figura 2: Gráfico de Arrhenius para as camadas selecionadas da Tabela 1.

3.1.2 TCR e resistência de folha das multicamadas de VOx

A Tabela 2 apresenta a ordem de deposição das camadas, a espessura total, o TCR e a resistência de folha para as seis estruturas de multicamadas produzidas. A Figura 3 mostra as curvas de $\text{Ln}(R) \times T^{-1}$ para as multicamadas. As seis amostras da Tabela 2 apresentaram TCR próximos ao valor de $-2\%/K$, com resistência de folha à temperatura ambiente entre $5,6$ e $17 \text{ k}\Omega/\text{quad}$. As amostras M3 e M1 foram os extremos inferior e superior, em relação ao TCR e à resistência de folha. A primeira apresentou os menores valores de TCR e resistência de folha, $-1,70 \text{ %/K}$ e $5,6 \text{ k}\Omega/\text{quad}$, respectivamente. Já a segunda, ocupou o outro extremo com os maiores valores de TCR e resistência de folha, $-2,36 \text{ %/K}$ e $17,0 \text{ k}\Omega/\text{quad}$, respectivamente. Estes valores estão próximos aos obtidos para as camadas individuais, selecionadas da Tabela 1 e depositadas a partir dos alvos de V_2O_3 e VO_2 , mas são inferiores ao obtido para a camada depositada a partir do alvo de V_2O_5 .

Tabela 2: Parâmetros de deposição e propriedades das multicamadas de filmes finos de VO_x .

AMOSTRA	ORDEM DE EMPILHAMENTO (Vidro/Óxido1/Óxido2/Óxido3)	ESPESSURA (Å)	R_s ($\text{k}\Omega/\text{quad}$)	TCR (%/K)
M1	$\text{V}_2\text{O}_3/\text{VO}_2/\text{V}_2\text{O}_5$	981 ± 30	17,0	-2,36
M2	$\text{V}_2\text{O}_3/\text{V}_2\text{O}_5/\text{VO}_2$	1049 ± 14	11,3	-2,05
M3	$\text{VO}_2/\text{V}_2\text{O}_3/\text{V}_2\text{O}_5$	1040 ± 10	5,6	-1,70
M4	$\text{VO}_2/\text{V}_2\text{O}_5/\text{V}_2\text{O}_3$	1022 ± 17	8,8	-2,12
M5	$\text{V}_2\text{O}_5/\text{V}_2\text{O}_3/\text{VO}_2$	1047 ± 21	6,3	-2,01
M6	$\text{V}_2\text{O}_5/\text{VO}_2/\text{V}_2\text{O}_3$	1062 ± 14	9,3	-2,16

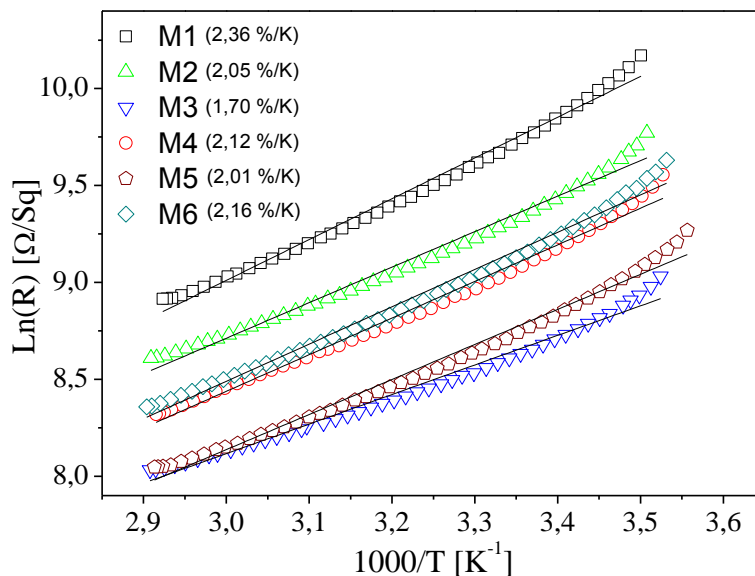


Figura 3: Gráfico de Arrhenius para as multicamadas da Tabela 2.

Assim como ocorreu com as camadas individuais, também não foram observadas transições de fase nas multicamadas, conforme indicam as curvas apresentadas na Figura 3. Esse resultado era esperado, uma vez que as multicamadas são oriundas dos filmes de camadas individuais, exceto se alguma nova fase tivesse sido formada nas interfaces.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 2, verificou-se que os valores de R_s e TCR de todas as multicamadas estavam bem próximos, ou seja, dentro de faixas estreitas que vão de 5,6 a 17,0 $k\Omega/\text{quad}$ e de 1,70 a 2,36 $\%/K$, respectivamente, valores comumente encontrados em camadas de VO_x para emprego em dispositivos do tipo bolômetro [2, 13, 14]. A relação entre o TCR das amostras de multicamadas e suas respectivas resistências de folha pode ser observada na Figura 4.

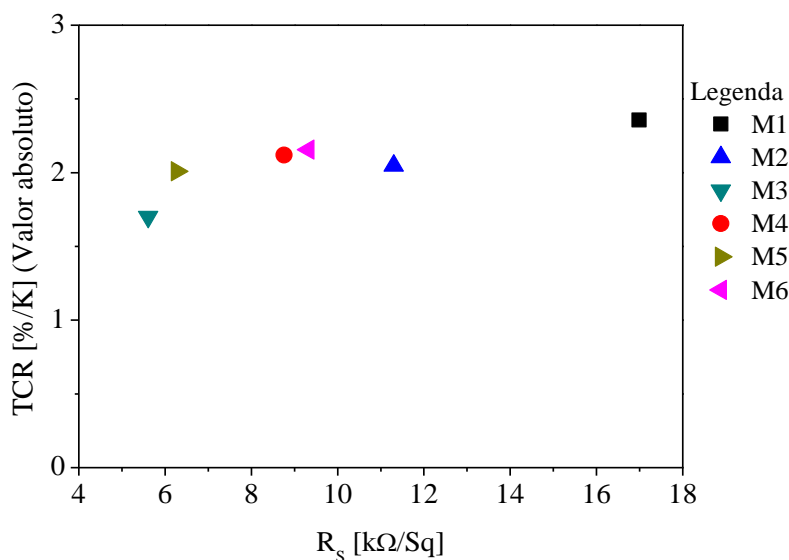


Figura 4: Relação entre TCR e R_s das multicamadas de VO_x .

3.2 Análise das fases presentes nas multicamadas de VO_x

A Figura 5 apresenta os difratogramas de raios X das amostras de multicamadas de VO_x . Todos os picos pertencem aos óxidos de vanádio identificados na legenda, a partir dos cartões JCPDS n°. 03-065-7960, 03-065-2896, 01-071-0040 e 01-084-0318. As principais fases cristalinas identificadas foram o VO_2 e o VO. Os picos 1 e 2 foram identificados, respectivamente, como os planos (002) e (111) da fase VO_2 de estrutura mono-

clínica. Cabe ressaltar que o pico 2, difratado em $30,30^\circ$, poderia ser identificado como a fase V_6O_{11} (106) de estrutura triclínica ocorrendo junto à fase VO_2 (111). O V_6O_{11} é uma fase Magneli (V_nO_{2n-1} com $n > 5$) presente no diagrama de fases do sistema vanádio-oxigênio [15] com estequiometria próxima do VO_2 , mas que apresenta uma pequena perda de oxigênio. Os picos 3 e 4 apresentaram as maiores intensidades e foram identificados respectivamente como os planos (111) e (200) da fase VO de estrutura cúbica. Próximo ao plano (200) da fase VO, identificada como pico 4, poderia coexistir o plano (003) da fase VO_2 de estrutura monoclínica.

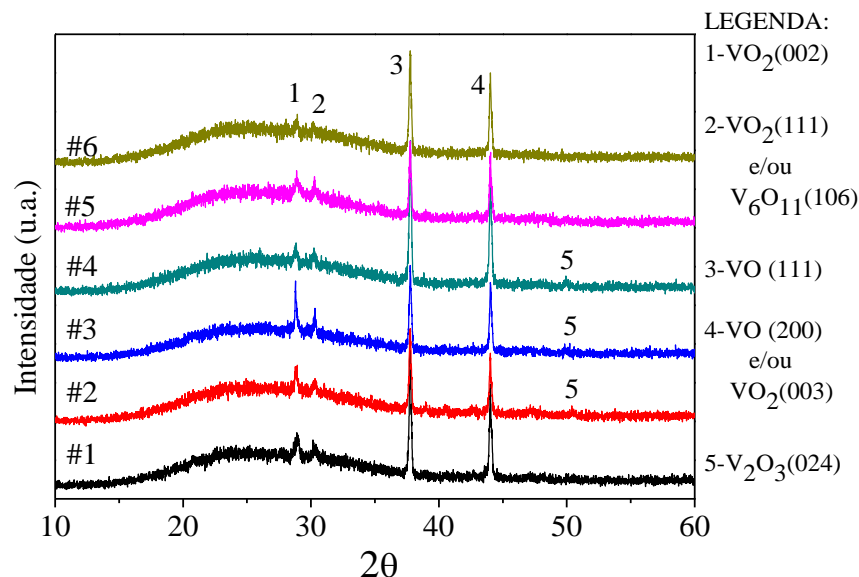


Figura 5: Difratogramas de raios X das multicamadas de VO_x .

A porção amorfa situada entre 20° e 35° foi devido em maior parte ao substrato de vidro usado como suporte aos filmes finos de VO_x . Não se pode descartar a presença de fases nanocristalinas, visto que todas as deposições foram realizadas com temperaturas de substrato relativamente baixas e através da técnica de pulverização catódica, condições essas que comumente ocasionam amostras com grãos bastante pequenos ou nanoestruturados [16].

Dado que todas as amostras apresentaram difratogramas quase idênticos, pode-se inferir que todas as multicamadas possuem as mesmas fases cristalinas. Isto significa que a ordem de deposição das camadas, a qual poderia implicar em filmes com diferentes propriedades, não promoveu qualquer diferença apreciável do ponto de vista microestrutural nas amostras.

4. DISCUSSÃO

Primeiramente, cabe questionar se o contato elétrico aplicado na camada superior das multicamadas possibilitaria as linhas de corrente elétrica chegarem à camada inferior depositada sobre o substrato. A condição mais severa para esta hipótese é quando a camada superior é originada da deposição a partir do alvo de V_2O_5 , pois se verificou nas deposições das camadas simples que o filme produzido por este material apresentou a maior resistência de folha ($581,8 \text{ k}\Omega/\text{quad}$). Se, em função do elevado valor de R_s , a corrente elétrica não chegasse à camada inferior, as estruturas $V_2O_3/VO_2/V_2O_5$ e $VO_2/V_2O_3/V_2O_5$ deveriam apresentar as maiores resistências de folha entre todos os empilhamentos, o que não foi o caso, pois as estruturas apresentaram valores de resistência iguais a $17,0$ e $5,6 \text{ k}\Omega/\text{Sq}$, respectivamente. Portanto, os resultados experimentais indicam que as linhas de corrente elétrica atravessam a camada superior de V_2O_5 , alcançando as camadas inferiores.

A segunda análise a ser considerada é se realmente os sistemas de empilhamento das camadas se comportam como três resistores em paralelo. Sabe-se que quando resistores elétricos são ligados em paralelo o valor da resistência equivalente é menor que o menor valor de resistência do sistema. Considerando então o empilhamento como três resistores em paralelo, a resistência equivalente seria da ordem de $2,8 \text{ k}\Omega/\text{quad}$. Entretanto, a menor resistência de folha encontrada entre todos os empilhamentos foi de $5,6 \text{ k}\Omega/\text{quad}$. Portanto, os resultados sugerem que os empilhamentos não se comportam como um sistema de três resistores em

paralelo; ao contrário, o sistema de multicamadas comporta-se eletricamente como uma camada simples.

Em terceiro, cabe analisar os resultados gerais das multicamadas produzidas. A Figura 6 mostra que o valor médio do TCR das multicamadas e sua respectiva resistência de folha estão próximos de 2,06 %/K e 9,7 kΩ/quad. Em termos de sensibilidade e ruído térmico de um bolômetro, a variação observada nos valores da Tabela 2 é pouco relevante. Portanto, conclui-se que a ordem dos empilhamentos das camadas não influenciou significativamente os resultados obtidos. Este resultado está coerente com a análise de DRX, onde foi verificado que os difratogramas eram idênticos, independentemente da ordem das camadas.

Por último, cabe comparar os resultados obtidos para as camadas individuais com os das multicamadas. As camadas individuais que melhor atendem à condição de alto TCR e baixa resistência de folha, fabricadas na menor temperatura de substrato, foram o V_2O_3 e o VO_2 , as quais apresentaram TCR e R_s respectivamente iguais a 2,19 %/K e 3,7 kΩ/quad (V_2O_3) e 2,06 %/K e 11,7 kΩ/quad (VO_2). A amostra obtida com o alvo de V_2O_5 , apesar do alto TCR (4,41 %/K), possui um elevado valor de R_s (581,2 kΩ/quad), não atendendo as exigências para emprego em bolômetros. Os valores de TCR e R_s das camadas de V_2O_3 e VO_2 são comparáveis aos valores médios obtidos para as multicamadas de 2,06 %/K e 9,7 kΩ/quad.

5. CONCLUSÕES

As camadas e multicamadas de filmes finos de VO_x produzidas neste trabalho possuem propriedades semelhantes. As melhores camadas individuais foram obtidas com os alvos de V_2O_3 e VO_2 , apresentando TCR e resistência de folha respectivamente iguais a 2,19 %/K e 3,7 kΩ/quad e 2,06 %/K e 11,7 kΩ/quad. Estes valores são recomendados para emprego em bolômetros. As multicamadas de VO_x são misturas das fases VO , V_2O_3 e VO_2 . Existe a possibilidade da fase Magnéli V_6O_{11} fazer parte da composição estrutural das multicamadas. Também não se pode descartar a existência de óxidos de vanádio amorfos ou nanocristalinos, com estequiometrias próximas do V_2O_5 . Independentemente da ordem de empilhamento, as multicamadas se comportaram como uma única camada de VO_x de aproximadamente 1000 Å de espessura, apresentando TCR e resistência de folha que alcançaram valores máximos de 2,35 %/K e 17 kΩ/quad.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem os suportes financeiros providos pela FINEP, FAPERJ e CAPES para o desenvolvimento do trabalho.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] ROGALSKI, A., "Infrared detectors: status and trends", *Progress in Quantum Electronics*, v. 27, pp. 59-210, Maio 2003.
- [2] DAI, J., WANG, X., HE, S., *et al.*, "Low temperature fabrication of VO_x thin films for uncooled IR detectors by direct current reactive magnetron sputtering method", *Infrared Physics & Technology*, v. 51, pp. 287-291, Dez. 2007.
- [3] ROGALSKI, A., "Recent progress in infrared detector Technologies", *Infrared Physics & Technology*, v. 54, pp. 136-154, Dez. 2010.
- [4] EMINOGLU, S., TEZCAN, D.S., TANRIKULU, M.Y., *et al.*, "Low-cost uncooled infrared detectors in CMOS process", *Sensors and Actuators*, v. 109, pp. 102-113, Dez. 2003.
- [5] WANG, S. B., ZHOU, S.B., HUANG, G., *et al.*, " VO_x thin films obtained by ion beam sputtering and oxidation process", *Surface & Coatings Technology*, v. 191, pp. 330-334, 2005.
- [6] WOOD, R. A., "Uncooled thermal imaging with monolithic silicon focal planes", *Proc. SPIE 2020, Infrared Technology XIX*, v. 322, Nov. 1993, doi:10.1117/12.160553.
- [7] MORIN, F. J., "Oxides which show a metal-to-insulator transition at the neel temperature", *Physical Review Letters*, v. 3, pp. 34-36, 1959.
- [8] HAN, Y-H., CHOI, I.H., KANG, H.K., *et al.*, "Fabrication of vanadium oxide thin film with high-temperature coefficient of resistance using $V_2O_5/V/V_2O_5$ multi-layers for uncooled microbolometers", *Thin Solid Films*, v. 425, pp. 260-264, 2003.
- [9] RAJENDRA KUMAR, R. T., KARUNAGARAN, B., MANGALARAJ, D., *et al.*, "Study of a pulsed laser deposited vanadium oxide based microbolometer array", *Smart Materials and Structures*, v. 12, pp. 188-192, Fev. 2003.

- [10] JIN, P., TAZAWA, M., YOSHIMURA, K., *et al.*, “Epitaxial growth of W-doped VO₂/V₂O₃ multilayer on α -Al₂O₃(110) by reactive magnetron sputtering”, *Thin Solid Films*, v. 375, pp. 128-131, 2000.
- [11] YOON, M. H., “Electrical characteristics of V₂O₅ thin films formed on p-Si by sputter-deposition and rapid thermal annealing”, *Applied Surface Science*, v. 244, pp. 444-448, Jan. 2005.
- [12] MORIN, F.J., “Oxides which show a metal-to-insulator transition at the neel temperature”, *Physical Review Letters*, v. 3, pp. 34-36, Jul. 1959.
- [13] WANG, H., “IR microbolometer with self-supporting structure operating at room temperature”, *Infrared Physics & Technology*, v. 45, pp. 53–57, 2004.
- [14] SMITH, E. M., “Linear bolometer array using a high TCR VO_x-Au film”, *Infrared Technology and Applications XL*, v. 9070, pp. 1-8, Jun 2014.
- [15] GRIFFITHS, C. H., EASTWOOD, H.K., *et al.*, “Influence of stoichiometry on the metal - semiconductor transition in vanadium dioxide”, *J. Appl. Phys.*, v. 45, 1974.
- [16] MARVEL, R. E., HARL, R.R., CRACIUN, V., *et al.*, “Influence of deposition process and substrate on the phase transition of vanadium dioxide thin films”, *Acta Materialia*, v. 91, pp. 217-226, Mar. 2015.

ORCID

Leila Cruz	https://orcid.org/0000-0003-2277-0471
Carlos Luiz Ferreira	https://orcid.org/0000-0002-5790-724X
Rodrigo Amaral de Medeiro	https://orcid.org/0000-0002-0214-5209
Marcelo Silva Bortolini de Castro	https://orcid.org/0000-0002-0354-667X