

Análise Segundo Modelo F-S e Experimental da Resistividade de Filmes Finos de Alumínio Obtidos por Evaporação Resistiva por Feixe de Elétrons.

Samuel Machado Leal da Silva^{1,2} e Carlos Luiz Ferreira²
Centro Tecnológico do Exército (CTEx), Av. das Américas, 28705, Guaratiba, Rio de Janeiro – RJ¹
Instituto Militar de Engenharia (IME), Pr Gen. Tiburcio, 80, Urca, Rio de Janeiro – RJ²

Resumo — A resistividade de filmes finos de Alumínio foi simulada para diferentes coeficientes de especularidade, segundo modelo de Fucks-Sondheimer (modelo F-S). A simulação foi realizada para espessuras de 250 a 3000Å, coeficiente de efeito de tamanho (K) maior do que um e resistividade volumétrica $2,65 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$. Filmes de alumínio foram depositados por evaporação resistiva por feixe de elétrons com taxas de 0,5Å/s e 5Å/s e espessuras dentro da faixa simulada. As curvas experimental e teórica da resistividade em função da espessura foram comparadas, com resultados satisfatórios. Os filmes obtidos com taxa de 0,5Å/s apresentaram maior resistividade do que os filmes depositados com 5Å/s.

Palavras-chaves — Filmes Finos, Evaporação Resistiva, Resistividade, Modelo Fucks-Sondheimer.

I. INTRODUÇÃO

Alguns materiais tornaram-se clássicos para aplicações tecnológicas da área eletrônica, tais como o cobre, o alumínio, a prata e o ouro. De custo mais baixo, o alumínio tem sido utilizado em sensores, junções ou contatos elétricos. O estudo das suas propriedades elétricas em escala nanométrica pode prover conhecimentos interessantes para outras áreas de aplicação.

Na área de defesa, o domínio sobre as propriedades elétricas e magnéticas de filmes finos condutores no controle de emissões indesejadas e reflexões de ondas eletromagnéticas, ainda está restrito às nações geradoras de tecnologias [1]-[2].

No meio acadêmico há várias propostas de modelos que tentam explicar, com certo nível de precisão, o comportamento elétrico de filmes finos.

Predizer a resistividade elétrica de um filme é uma tarefa que envolve alguns fatores de processamento que estão inter-relacionados. A associação de modelos teóricos com o controle sobre algumas variáveis de processo deverá proporcionar um determinado nível de confiança no resultado final, ainda que haja, conforme discutido por alguns autores, a influência mútua de algumas características e propriedades microestruturais, que proporcionarão mecanismos de razoável influência na resistividade do material [3].

A espessura de um filme é, talvez, o fator primário na determinação do comportamento elétrico de um filme fino condutor. Já nas décadas de 30 e 50, Fucks e Sondheimer apresentaram propostas que levaram a um modelo

denominado F-S, no qual se propõe um meio isotrópico e homogêneo, onde são considerados os espalhamentos dos elétrons submetidos a um determinado potencial. O modelo admite que estes espalhamentos ocorram apenas por meio de interações com as superfícies limitrofes, que determinam a espessura, de tal forma que este fenômeno possa contribuir positivamente ou negativamente para o incremento da resistividade do material.

O modelo F-S é uma proposta semiclássica, pois apesar de se tratar de partículas subatômicas, considera os seus deslocamentos independentes e em um meio cujas distâncias no interior do retículo são muito maiores do que o elétron, podendo desta forma se valer do modelo clássico da equação de transporte de Boltzmann [3]-[4]-[5].

Neste modelo os espalhamentos foram classificados como difusos ou especulares e são representados por um fator “P”, tal que no caso completamente difuso $P=0$ e no caso totalmente especular $P=1$.

Segundo Fucks-Sondheimer, a resistividade do filme (ρ), apresentada em (1), é dependente da resistividade volumétrica do material (ρ_0) e dos fatores K e P.

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left[1 - \frac{3(1-P)}{2K} \int_1^{\infty} \left(\frac{1}{t^3} - \frac{1}{t^5} \right) \left(\frac{1-e^{-Kt}}{1-Pe^{-Kt}} \right) dt \right]^{-1}, \quad (1)$$

onde K é o fator que representa o efeito de tamanho e P é o coeficiente de reflexão dos elétrons na superfície do filme.

Define-se K como:

$$K = \frac{t''}{\lambda_0}, \quad (2)$$

onde t'' é a espessura do filme e λ_0 é o livre caminho médio volumétrico.

Considerando-se a hipótese de $K \gg 1$ e adotando-se as aproximações convenientes pode-se obter (3) [3]-[4]-[5]:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = 1 + \frac{3}{8K}(1 - P). \quad (3)$$

Materiais bons condutores apresentam, em geral, livres caminhos médios em torno de 15 a 40nm [2]-[5]-[6].

Filmes finos, durante o processo de formação da camada, passam pelas etapas de nucleação, crescimento, coalescência e a formação dos grãos. Em geral, até 10nm inicia-se a fase de coalescência, ou seja, é quando o filme começa a se tornar um meio contínuo [3].

No caso de meios descontínuos, o processo de condução das cargas teria necessariamente que considerar efeitos quânticos, devido às grandes barreiras de potencial que se apresentariam. Como o modelo em questão é semiclássico, torna-se interessante restringir as espessuras tratadas para o caso de filmes contínuos, ou seja, espessuras maiores que 10 ou 20nm.

Substratos de vidro comum apresentam, em geral, rugosidades de até 10nm, significando na prática que para filmes contínuos depositados sobre estes materiais devam ter espessuras maiores do que esse valor.

A partir destas informações, a hipótese de $K \gg 1$ parece ser bastante pertinente quando se considera a deposição de filmes finos de material condutor sobre substrato de vidro sodalime.

Para a análise e validação das propostas de modelos como o modelo F-S, geralmente são realizadas medidas de resistividade e resistência superficial (R_s). É comum realizar medidas de resistência superficial em filmes finos, uma vez que isso possibilita caracterizar os filmes retirando-lhes as influências da espessura. O método de Van der Pauw, muito utilizado para este fim, devido às pesquisas na área de semicondutores, tem a vantagem de tratar a influência das resistências parasitas e de contato. Obtém-se R_s por meio da solução numérica de (4) [7].

$$e^{-\frac{\pi R_A}{R_s}} + e^{-\frac{\pi R_B}{R_s}} = 1, \quad (4)$$

onde R_A e R_B são as resistências características do método que são definidas conforme a Fig. 1 [7]-[8].

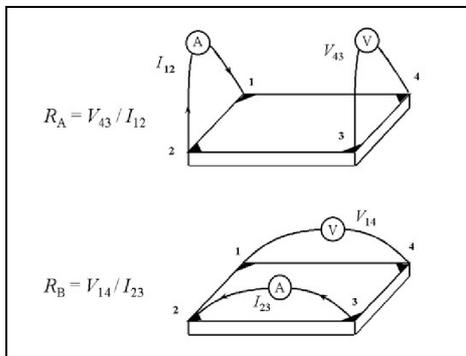


Fig. 1 – Esquemas de determinação de R_A e R_B .

Assim, este trabalho se propõe a analisar a resistividade de filmes finos de um material condutor, segundo o modelo F-S e alguma das variáveis de processo, visando avaliar a utilidade do modelo na predição do comportamento elétrico dos filmes depositados e corroborar o comportamento esperado através de curvas experimentais. Simulações foram realizadas utilizando o modelo F-S e filmes foram depositados em substrato de vidro, para posteriores comparações e análises do modelo e dos resultados experimentais.

II. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Considerando o alumínio cuja resistividade volumétrica é igual a $2,65 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ realizaram-se simulações no MATLAB 7.5 para coeficientes de especularidade iguais à zero, cinco décimos e nove décimos, dentro de uma faixa de espessuras 250Å a 3000Å. As curvas ρ versus t'' simuladas conforme o modelo F-S, estão ilustradas na Fig. 2.

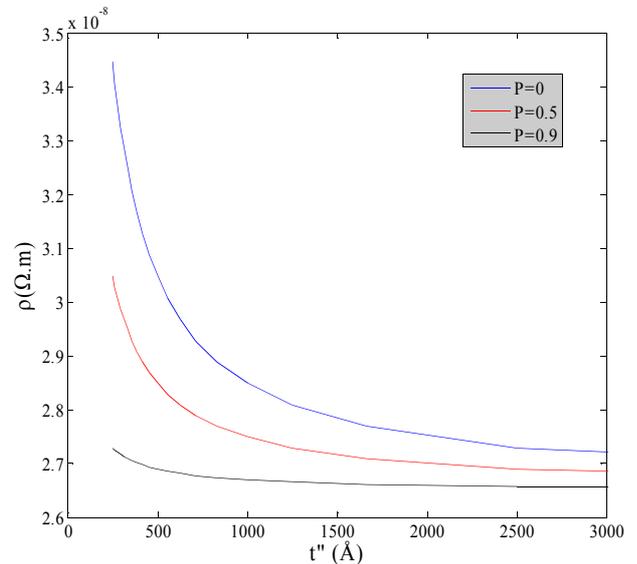


Fig. 2 – Resistividade teórica dos filmes de alumínio.

Foram depositados por meio da técnica de evaporação por feixe elétrons, filmes finos de alumínio com espessuras entre 700Å e 2200Å. O material evaporante utilizado tinha pureza de 99,99% e foi fornecido pela Kurt J. Lesker. Durante a deposição os substratos de vidro sodalime foram mantidos a temperatura ambiente e o sistema de deposição a uma pressão base de 2×10^{-6} Torr. Duas séries de filmes foram depositadas com taxas de deposição de 0,5Å/s e 5Å/s. As taxas de deposições e espessuras foram acompanhadas durante o processo através de um monitor com cristal de quartzo.

Após as deposições, as espessuras dos filmes foram medidas em um perfilômetro Dektak 150 fabricado pela Veeco. Os filmes foram caracterizados quanto às suas resistividades (ρ) e resistência superficial (R_s) pelo método Van der Pauw, utilizando um sistema Hall da BIO-RAD, modelo HL5500.

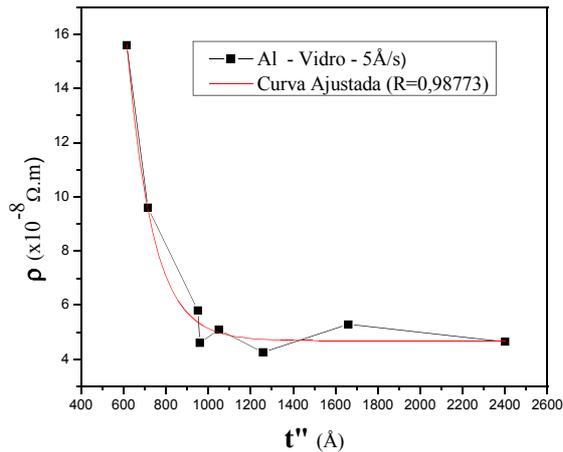


Fig. 3 – Resistividade experimental dos filmes de alumínio, 5,0Å/s.

Os dados de espessura e resistividade dos filmes foram utilizados na construção das curvas ρ versus t'' , cada qual segundo a taxa deposição empregada, conforme ilustradas nas Fig. 3 e 4.

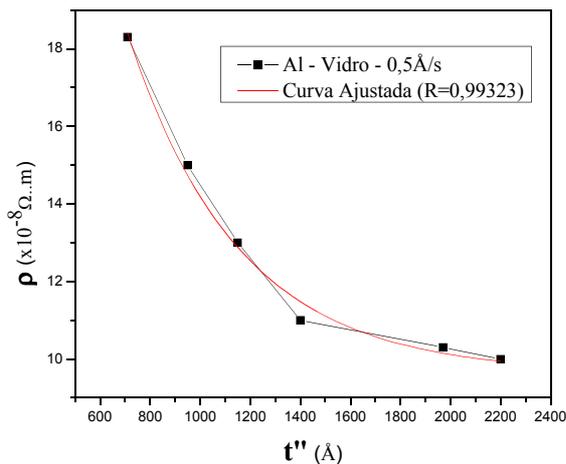


Fig.4 – Resistividade experimental dos filmes de alumínio, 0,5Å/s.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como pode ser observado na curva simulada da Fig. 2, os filmes têm uma resistividade da ordem de $10^{-8} \Omega.m$ com uma inflexão positiva após 500Å. Naturalmente, para o coeficiente especular igual a zero a resistividade é mais elevada do que para os demais coeficientes apresentados em função das reflexões difusas dos elétrons nas superfícies limítrofes do material. Nesta situação, considerada mais crítica, observa-se que para um filme de 700Å a resistividade correspondente seria da ordem de $2,9 \times 10^{-8} \Omega.m$. Nas medidas realizadas nos filmes pode-se constatar que as curvas, apresentadas nas Fig. 3 e 4, exibiram o comportamento

conforme previsto pelas simulações, e os valores de resistividade permaneceram na ordem de $10^{-8} \Omega.m$. Entretanto, os valores encontrados são superiores aos valores simulados. Isso se deve a alguns mecanismos (defeitos e impurezas) que contribuem para a resistividade total do filme, mas que não foram considerados na simulação [1]-[3]-[9]. Observando a Fig.3, por exemplo, verifica-se que para um filme de 710Å a resistividade correspondente é aproximadamente igual a $9,5 \times 10^{-8} \Omega.m$. Na Fig.4 um filme com espessura de 715Å apresentou resistividade maior que $18,0 \times 10^{-8} \Omega.m$. Estas comparações indicam que o modelo fornece uma idéia aproximada da resistividade dos filmes, ainda que seja necessário considerar majorações de valores.

O alumínio utilizado para as deposições apresenta elevado grau de pureza, o que reduz o efeito das impurezas no filme depositado. Entretanto, os filmes foram crescidos com taxas de deposição diferentes em uma ordem de grandeza. Observa-se que os filmes depositados com taxa de 0,5Å/s apresentaram maior resistividade do que os filmes de 5Å/s.

Quando átomos incidem em uma superfície pouco energética e com baixa taxa de colisão dá origem à formação de filmes finos com pequenos tamanhos de grão. Assim, a diferença de resistividade observada entre os dois conjuntos de filmes decorre deste fato. Comportamento semelhante foi encontrado por Qui, Hong et al. em deposições de filmes finos de alumínio [1].

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados experimentais mostram que o modelo F-S, apesar de simples, possibilita prever a variação da resistividade de filmes finos em função de sua espessura com boa aproximação.

A diferença observada entre os valores das resistividades obtidas através da simulação e as obtidas experimentalmente deve ter como origem o fato de que o modelo F-S não leva em consideração os efeitos da taxa de deposição nas propriedades microestruturais do filme.

REFERÊNCIAS

- [1] Qui, Hong et al, "Effect of Deposition Rate on Structural and Electrical Properties of Al Films Deposited on Glass by Electron Beam Evaporation", *Thin Solid Films*, vol. 414, pp. 150-153, Abril 2002.
- [2] Cesnek, J., Dobiás, J., Housová, J., Sedláček, J., "Properties of Thin Films for Microwave Susceptor", vol.21, pp.34-40, 1 (2003).
- [3] Maissel, L. I., Glang, R., "Electrical Properties of Metallic Thin Films". Handbook of Thin Film Technology, San Francisco:McGraw-Hill, 1970.
- [4] Wu, W., Maex, K., "Studies on Size Effect of Copper Interconnect Lines", *IEEE*, pp. 416-418, 2001.
- [5] Vancea, J., Reiss, G., Hoffmann, H., "Mean-free-path Concept in Polycrystalline", *Physical Review B*, vol.35, pp.6435-6437, Abril 1987.
- [6] Cattani, M. et al, "Influence of Electron Scattering From Morphological Granularity and Surface Roughness on Thin Film Electrical Resistivity". *Surface Review and Letters*, vol.14, pp.87-91, 1 (2007).
- [7] Heaney, M. B., "Electrical Conductivity and Resistivity", LLC, 1999.
- [8] KEITHLEY. Low Level Measurements – Precision DC Current, Voltage and Resistance Measurements. 5ª Ed. Keithley Instruments. Ohio. 1998.
- [9] Shivaprasad, S.M., Angadi, M.A., "The Effect of Deposition Rate on The Electrical Resistivity of Thin Manganese Films". *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol.13, pp.157-159, 198