

Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética baseados em Filmes finos

V.L.Soethe^{1*}, E.L.Nohara², L.C.Fontana³, M.C.Rezende⁴

¹ ITA - Instituto Tecnológico de Aeronáutica - Praça Marechal do Ar Eduardo Gomes, nº 50, Vila das Acácias, 12228-900, São José dos Campos, SP, Brasil.

² Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Daniel Danelli, s/n, 12060-040, Taubaté, SP, Brasil.

³ Universidade do Estado de Santa Catarina, Departamento de Física, Campus Universitário Professor Avelino Marcante, s/n, 89223-100, Joinville, SC, Brasil.

⁴ Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial, Instituto de Aeronáutica e Espaço, Divisão de Materiais, Pça. Mal. Eduardo Gomes, nº 50, Vila das Acácias, 12228-900 - São José dos Campos, SP, Brasil.

Resumo — Filmes finos metálicos com espessuras da ordem de centenas de nanômetros foram depositados sobre substrato de politereftalato de etileno por meio da técnica de Triodo Magnetron Sputtering (TMS), com o objetivo de avaliar sua eficiência quanto à atenuação da energia da onda eletromagnética incidente. Verificou-se que a atenuação apresentada por estes recobrimentos está diretamente relacionada com a espessura e com o material que constitui o recobrimento. A amplitude e a frequência de máxima atenuação destes recobrimentos varia de acordo com a espessura e material do filme, atingindo valores de até 90% em frequências específicas.

Palavras-chaves — filmes finos, Triodo Magnetron Sputtering, MARE

I. INTRODUÇÃO

Materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) possuem a capacidade de transformar, por meio de mecanismos internos, a energia da onda eletromagnética em calor [1,2]. A grande utilização de radiação eletromagnética na faixa de frequências de microondas tem provocado a necessidade da criação de mecanismos capazes de minimizar os efeitos da incidência desta radiação em seres humanos, por exemplo. Além disso, a ampliação da utilização desta faixa de frequências no setor militar, como em sistemas de radar de busca e detecção, faz com que seja necessário o desenvolvimento de materiais capazes de reduzir, por exemplo, a assinatura radar de equipamentos. Outras aplicações deste tipo de material podem ser observadas no setor civil, principalmente na utilização como blindagem eletromagnética de equipamentos das indústrias automotivas e de eletro-eletrônicos, bem como em sistemas de comunicação *wireless* [3-10]. Dentre os materiais absorvedores conhecidos, pode-se citar os baseados em ferritas, negro de fumo, polímeros condutores e, mais recentemente, os baseados em filmes finos metálicos. Os

MARE tradicionais, à base de ferritas e negro de fumo, por exemplo, apresentam espessuras da ordem de centímetros e gramatura da ordem de 1 a 20 kg/m² [3-5,11,12], ao passo que MARE baseados em filmes finos apresentam espessuras da ordem de 30 a 100 µm e gramatura da ordem de 0,040 a 0,100 kg/m². A significativa redução de peso e volume consiste na principal vantagem dos filmes finos absorvedores sobre os absorvedores convencionais, sendo esta a principal motivação do presente estudo. O processo de atenuação da energia da onda eletromagnética em filmes finos está relacionado com o fenômeno do *skin depth*. Este efeito é bem conhecido para condutores de modo geral e, pode ser estendido para a compreensão dos mecanismos de absorção em filmes finos. Basicamente, uma onda eletromagnética incidindo sobre uma dada superfície, promove a polarização das cargas presentes nesta superfície. A interação do campo elétrico da onda eletromagnética com a estrutura do material do filme promove a criação de dipolos elétricos que, por sua vez, se alinham gerando uma corrente elétrica na superfície do recobrimento. Desta forma, a energia da onda eletromagnética incidente é transformada em calor, por meio de efeito Joule [1-2]. A espessura do recobrimento para que este efeito ocorra deve ser tal que a corrente elétrica fique confinada nesta superfície, ampliando o processo de transformação da energia da onda em calor. Sendo assim, uma menor quantidade de energia é refletida da superfície do material. Esta espessura é conhecida como camada pelicular, ou *skin depth* (δ) e está relacionada com a profundidade de penetração da onda eletromagnética na estrutura do filme, sendo dependente do material utilizado como recobrimento, bem como do comprimento da onda incidente [14]. Por meio de (1) é possível calcular o valor de δ para diferentes materiais [13]:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1)$$

onde: σ é a condutividade do material que constitui o filme, f a frequência da onda eletromagnética incidente e $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m, a permeabilidade magnética do ar [14-15]. Observando a Equação 1, é possível verificar que o valor de *skin depth* varia em função da condutividade do material. Da literatura tem-se que a condutividade de um filme fino é função da espessura do mesmo, sendo que quanto maior a espessura do recobrimento, maior é a sua condutividade

* V.L.Soethe, vivianes@ita.br, Tel: +55-12-39476471, FAX: +55-12-39476405, E.L.Nohara, evandro@unitau.br, Tel: +55-12-39264100, L.C.Fontana, dfi2lcf@joinville.udesc.br, Tel: +55-47-40097855, M.C.Rezende, mirabel@iea.cta.br, Tel. +55-12-39476420. Este trabalho é financiado pela FAPESP (Processo n. 05-01258-05), FINEP (Processo n.1757-03) e CNPQ (Processos n. 301583/2006-3 e 311396/2006-2).

[13,16]. Correlacionando-se estas duas informações pode-se afirmar que a espessura ótima, na qual o recobrimento apresenta valores de atenuação mais pronunciados, são obtidos para um dado valor de condutividade. Valor esse onde a espessura do recobrimento seja a mais próxima possível do valor do *skin depth* do material do filme, numa dada frequência.

No presente trabalho, filmes finos de diferentes materiais e espessuras da ordem de nanômetros foram depositados sobre substratos poliméricos. O comportamento destes foi avaliado quanto à atenuação da energia da onda eletromagnética na banda X. A avaliação das propriedades morfológicas dos recobrimentos foi também realizada a fim de se verificar a relação das mesmas com as propriedades de atenuação.

II. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Filmes finos de Al, Ti e Cu foram depositados sobre substratos de poli(terefatalato de etileno) utilizando um equipamento do tipo *Triodo Magnetron Sputtering*. A Fig. 1 mostra o esquema do aparato experimental utilizado.

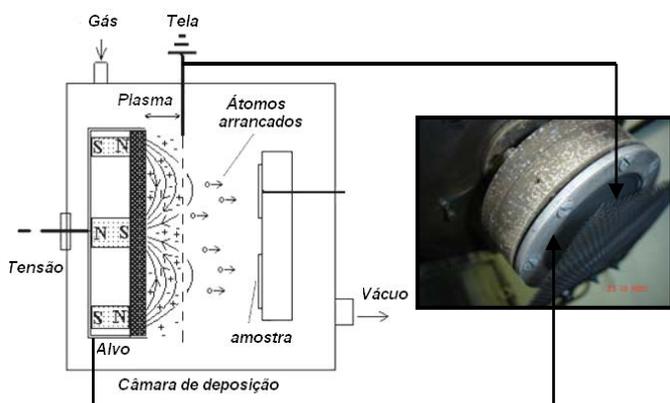


Fig. 1. Esquema experimental utilizado para a realização das deposições.

A atenuação da energia da onda eletromagnética foi medida utilizando-se um equipamento de guia de ondas [2,17]. O aparato utilizado para a realização das análises pode ser esquematicamente observado na Fig.2.

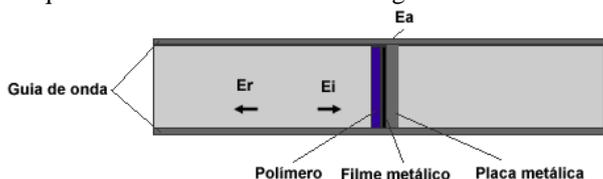


Fig. 2. Esquema do aparato utilizado nas medidas em guia de ondas (a) medida de atenuação com placa metálica; (b) medida de atenuação intrínseca.

No aparato demonstrado na Fig.2, a medida da atenuação é realizada utilizando-se uma placa refletora atrás do material a ser caracterizado. Desta forma, é feita uma avaliação da capacidade que o material possui de atenuar a energia refletida por esta placa. A energia atenuada pelo material (E_a) é a diferença entre a energia incidente (E_i) e a energia refletida (E_r). Esta medida simula um material absorvedor ancorado sobre uma dada superfície refletora, sendo mais próximo de uma situação real, onde o material é colocado sobre a superfície de um artefato aeronáutico refletor, por exemplo. A análise da topografia de alguns dos

recobrimentos foi realizada por meio de equipamento de microscopia de força atômica (AFM).

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Fig.3 mostra as curvas de atenuação dos filmes de Al obtidas nas medidas em guia de ondas com placa metálica.

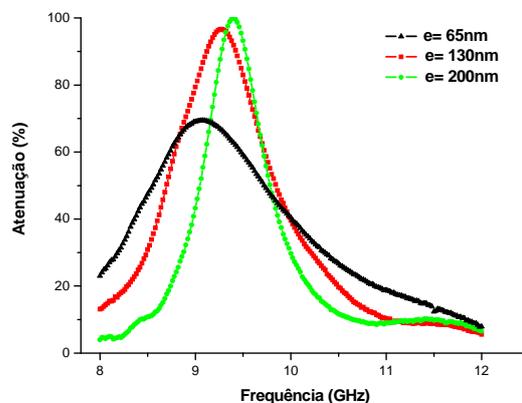


Fig. 3. Curvas de atenuação dos filmes de Al, obtidas em guia de ondas com placa metálica.

A Fig.4 e 5 são relativas à análise da atenuação em guia de ondas, com placa metálica, dos filmes de Ti e Cu, respectivamente. Pode-se observar na figura os diferentes tempos de deposição dos filmes, que estão diretamente relacionados com as espessuras dos respectivos filmes.

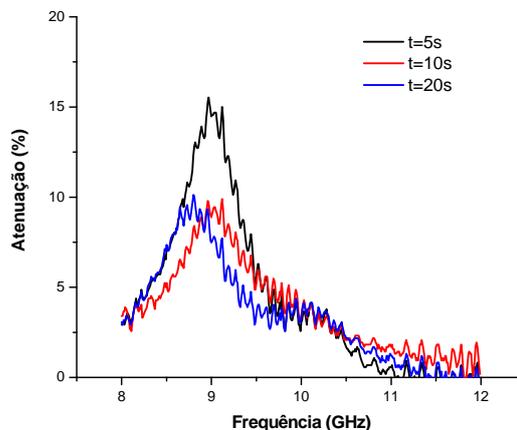


Fig. 4. Curvas de atenuação dos filmes de Ti, com diferentes espessuras, obtidas em guia de ondas com placa metálica.

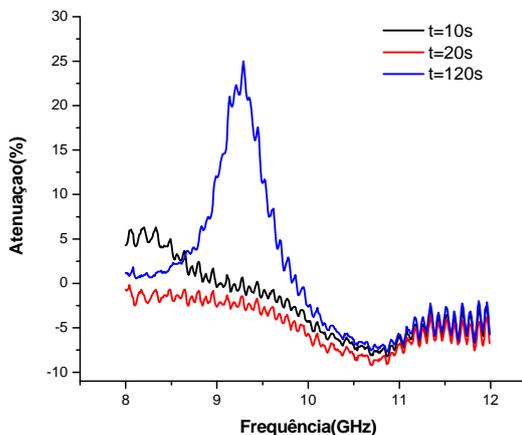


Fig. 5. Curvas de atenuação dos filmes de Cu, com diferentes espessuras, obtidas em guia de onda com placa metálica.

De acordo com estas figuras é possível observar que a atenuação apresentada pelos recobrimentos é dependente da espessura dos mesmos. Pode-se verificar ainda que dependendo do valor da espessura, ocorre o deslocamento da frequência de máxima atenuação, bem como da amplitude desta atenuação e da largura a meia altura do pico. Pela Fig.3 é possível observar que os filmes de Al apresentam expressivos valores de atenuação, de 70 a 99,9%, na faixa de frequências de 8,0 a 9,4 GHz. Além disso, a Fig.4 mostra que os filmes de Ti apresentam valores de atenuação de até 15%, também dependente da espessura do recobrimento. O mesmo efeito pode ser observado para os filmes de Cu, apresentados na Fig.5, onde a máxima atenuação é da ordem de 25% para o filme mais espesso, depositado durante 120 s. Comparando-se estes resultados, pode-se verificar que os filmes de Al apresentam resultados de atenuação superiores aos observados para os filmes de Ti e Cu, em termos de intensidade de atenuação. Estes resultados são característicos de MARE convencionais, com típico comportamento ressonante (faixa estreita de frequências), onde o mecanismo de atenuação preponderante está relacionado com a interferência destrutiva entre as ondas incidente e refletida (cancelamento de fases) para um dado comprimento de onda. No caso de MARE convencionais, para que este fenômeno ocorra, a espessura do material absorvedor deve ser da ordem de $1/4\lambda$. Para frequências entre 8,0 e 12,0 GHz, o comprimento de onda é da ordem de centímetros. Desta forma, considerando-se que o substrato polimérico apresenta espessura da ordem de centenas de micrometros e que o recobrimento metálico apresenta espessura da ordem de centenas de nanômetros, a espessura do conjunto filme/substrato é inferior $1/4\lambda$. Logo, pode-se afirmar que o fenômeno de cancelamento de fases das ondas incidente e refletida não é o principal mecanismo responsável pela atenuação da energia da onda eletromagnética apresentada pelos filmes finos de alumínio.

Uma possível explicação para a atenuação observada para os filmes de Al pode estar associada à rugosidade do recobrimento. Para verificar esta suposição, análises utilizando equipamento de AFM foram realizadas. A Fig.6 mostra as micrografias obtidas para os filmes de alumínio, com espessuras de 130 e 200 nm, respectivamente. De acordo com a micrografia, é possível observar que o recobrimento apresenta baixa rugosidade, da ordem de dezenas de nanômetros. O perfil de superfície, representado pela barra lateral, colocada à direita da micrografia, mostra que a altura desta rugosidade não contribui de forma significativa para o espalhamento da radiação eletromagnética incidente, em função de sua ordem de grandeza ser muito menor que o comprimento de onda da radiação incidente. Na banda X (de 8 a 12 GHz), os comprimentos de onda variam de 3,75 a 2,5 cm). Desta forma, a onda eletromagnética incidente não sofre desvio, pois seu comprimento é muito superior à rugosidade apresentada pelo filme [18]. Este resultado indica que o processo de atenuação dos filmes não é influenciado pela rugosidade da superfície. Fazendo-se uma análise relativa ao *skin depth* dos filmes de Al, pode-se verificar que para a frequência de 9,0 GHz, δ é da ordem 800 nm. Os filmes de alumínio analisados neste trabalho têm espessuras entre 65 e 200 nm. Uma vez que, esses filmes possuem espessuras da mesma ordem de grandeza do *skin depth* para o alumínio puro, o fenômeno de atenuação da energia da onda eletromagnética pode estar associado ao efeito de camada

pelicular. Neste caso, o confinamento da corrente elétrica na superfície do recobrimento, gerada a partir da polarização das cargas elétricas presentes na estrutura do filme metálico, promove a transformação da energia da onda eletromagnética incidente em calor, por efeito Joule [12].

Em resumo, é possível relacionar o fenômeno de atenuação da onda eletromagnética apresentada por esses filmes de alumínio com o efeito de *skin depth*.

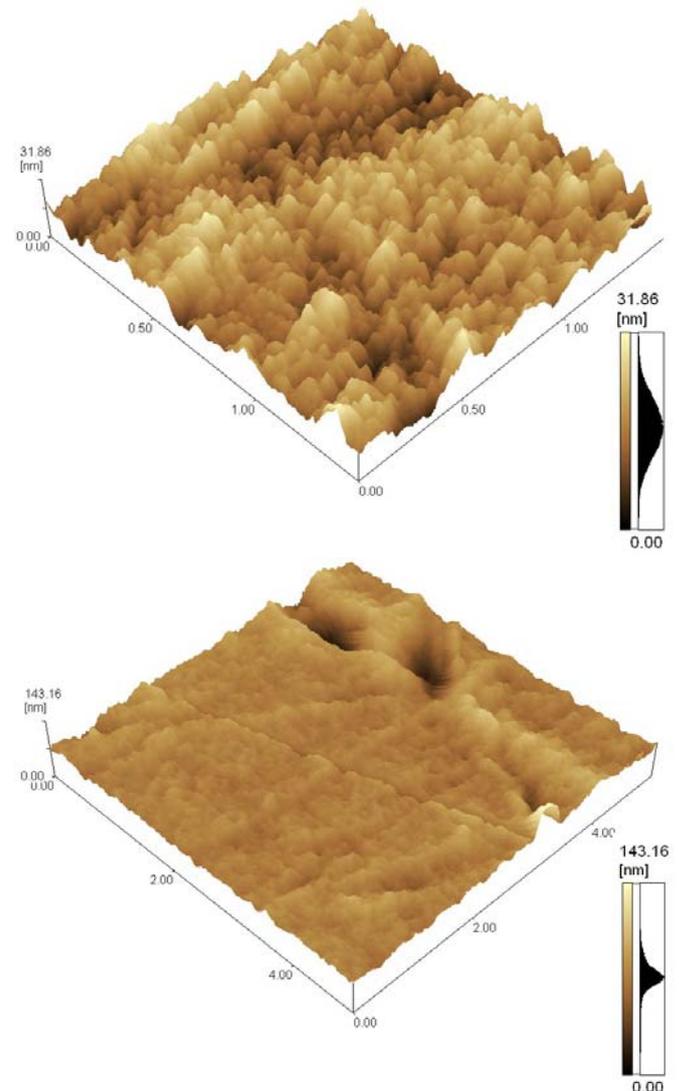


Fig. 6. Análises de AFM para os filmes de Al com 130 e 200 nm, respectivamente.

Ao se analisar as curvas de refletividade verifica-se que os picos de ressonância apresentados possuem um comportamento similar e se aproximam de uma distribuição de Lorentz. As curvas dos filmes de Al, Ti e Cu, com atenuação mais pronunciada, juntamente com a curva de aproximação, podem ser observadas na Fig 7(a,b,c). Esta aproximação permite verificar que as atenuações apresentadas pelas curvas de ressonância obedecem a mesma lei matemática que, por sua vez, possuem semelhança com a lei física que descreve o fenômeno da ressonância de dipolos. Esta observação permite relacionar o processo de atenuação dos filmes com o fenômeno observado na literatura, da polarização de dipolos elétricos. Além disso, a amplitude desta atenuação é devida aos mecanismos internos distintos para cada tipo de material que compõe o filme, bem como

com a espessura deste recobrimento, que deve ser da ordem da *skin depth* do mesmo, na faixa de frequências de interesse.

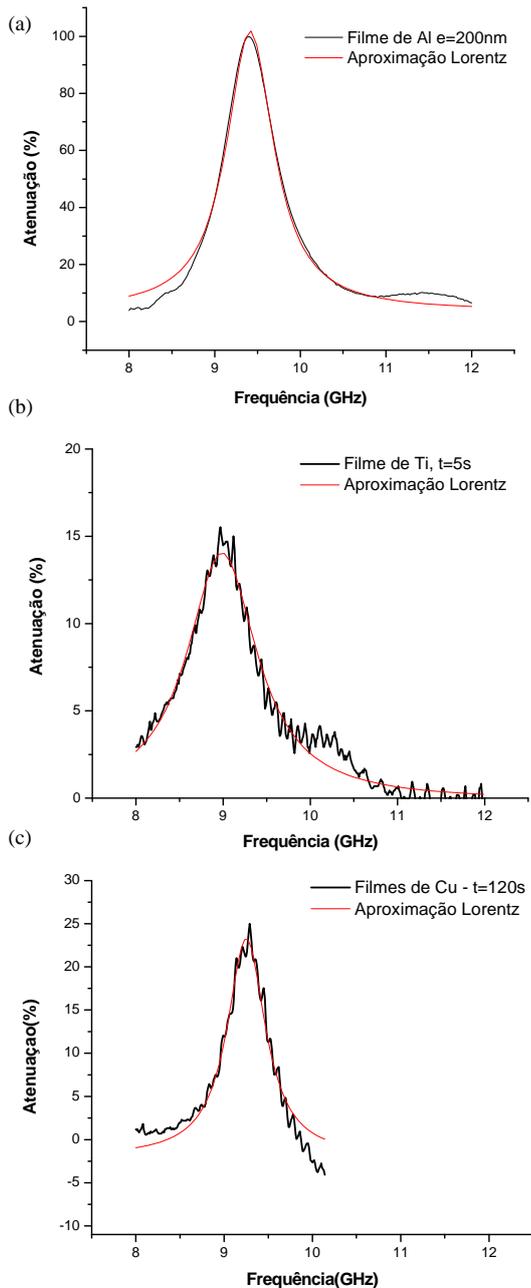


Fig. 7. Curvas de atenuação e aproximação por distribuição de Lorentz para os filmes de (a) Al, (b) Ti e (c) Ni.

Uma observação interessante a ser feita, analisando-se os resultados, é a de que independente do material do filme, os mesmos apresentam atenuação. Entretanto, devido aos valores de condutividade apresentados pelos mesmos nas suas respectivas espessuras, a atenuação é mais ou menos significativa na faixa de frequências analisada.

IV. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados apresentados no presente trabalho, pode-se concluir que filmes finos metálicos de Al, apresentam-se promissores para utilização como MARE. Pode-se observar também que todos os materiais estudados

apresentam atenuações dependentes da espessura do recobrimento. A amplitude da atenuação está relacionada com propriedades específicas de cada material, sendo que para a faixa de frequências de interesse (8-12GHz), os filmes de Al apresentam atenuações mais significativas. A atenuação dos recobrimentos pode estar relacionada ao efeito da camada pelicular, sendo que espessuras da ordem de grandeza desta camada, apresentam atenuações mais acentuadas. A rugosidade da superfície não influencia na atenuação dos filmes finos, uma vez que devido à baixa rugosidade, a radiação eletromagnética incidente, com comprimento de onda da ordem de centímetros, não sofre desvio devido às imperfeições da superfície do filme. Além disso, por meio de uma aproximação por distribuição de Lorentz, pode-se verificar que a ressonância representada pelos picos de atenuação possui a mesma forma para todos os materiais. Por meio desta aproximação, é possível obter a lei matemática que rege o fenômeno, e por sua vez, correlacionar este resultado com o efeito físico de ressonância de dipolos elétricos.

REFERÊNCIAS

- [1] L. C. Folgueras, M. C. Rezende, SBMO/IEEE MTT-S *International Microwave & Optoelectronics Conference*, Brazil, 2007, 483-487.
- [2] E.L.Nohara. *Materiais Absorvedores De Radiação (8-12 GHz) Obtidos pela Combinação de Compósitos Avançados Dielétricos e Revestimentos Magnéticos*, Tese de Doutorado (2003), Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP.
- [3] S.M. Lee, *International Encyclopedia of Composites*. vol.6, VHC Publishers, New York, 1991.
- [4] R.N. Johnson, *The International Countermeasure Handbook*. 11th edition.
- [5] W.H. Emerson, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 21 (4), (1973), 383-388.
- [6] Y. Nie, H.H. He, R.Z. Gong, X.C. Zhang, *Journal of Magnetism and magnetic materials*, 310, (2007), 13-16.
- [7] V.B.Bregar, *IEEE Transactions on Magnetics*, 40 (3), (2004), 1679-1684
- [8] M.C. Rezende, F.S. Silva, I.M. Martin, *Spectrum*, (2005).
- [9] W.J. Sleming, *Technical Reference from Plessey Materials*.
- [10] E.A. Hashish, *Journal of Electromagnetic waves and Appl*, 16 (2), (2002), 227-241.
- [11] L. K. Mikhailovsky, *VIII International Conference on Spin Electronics – Section of International Conference on Gyromagnetic Electronics and Electrodynamics*, Moscow, Rússia, 1999.
- [12] D. Balageas; P. Levesque, *Rev. Gén. Therm*, 37,(1998)
- [13] K. S. Bhat; S. K. Datta, C.Suresh, *Thin Solid Film*, 332 (1998), 220-224.
- [14] KAISER, K.L., *Electromagnetic Compatibility Handbook*, CRC Press, 2004, p. 21-23.
- [15] Word wide web: http://www.ndtd.org/GeneralResources/MaterialProperties/ET/Conductivity_Al.pdf access in 07/05/2008.
- [16] M. Ohring, *The Materials Science of Thin Films*, Stevens Institute of Technology, Department of Materials Science and Engineering, Hoboken, New Jersey, Academic Press, San Diego, 1991, p. 577.
- [17] A.M. Nicholson, G. Ross. *IEEE Trans Instrum Measure*. v. 19, p. 377, 1970.
- [18] V.A.Shubin, A.K.Sarychev, J.P.Clerc, V.M.Shalaev, *Physical Review B*. 62 (16), (2000), 230.