

Estudo Paramétrico do Coeficiente de Reflexão em uma Célula Fotovoltaica de Filme Fino

Miquéias C. de Sousa e Karlo Q. da Costa

Resumo— Este artigo apresenta uma análise do coeficiente de reflexão de um exemplo de célula fotovoltaica de filme fino. O problema consiste de uma estrutura multicamadas, onde foram utilizadas as equações de Maxwell no domínio da frequência para a obtenção do coeficiente de reflexão total. São apresentados resultados de simulações variando a espessura de cada uma das camadas, assim como o ângulo de incidência da onda plana, e analisando os resultados do coeficiente de reflexão total.

Palavras-Chave— Células fotovoltaicas de filme fino, estruturas multicamadas, reflexão de ondas.

Abstract— This article presents an analysis of the reflection coefficient of a thin-film photovoltaic cells. We used the Maxwell's equations in the frequency domain to obtain the mathematical model for the multilayer structure. We present some simulations varying the thickness of each layer, as well as the angle of incidence of the incident plane wave, and evaluate the results of the total reflection coefficient.

Keywords— Thin-film photovoltaic cells, multilayer structures, reflection of waves.

I. INTRODUÇÃO

As células fotovoltaicas, responsáveis por converter a energia solar em eletricidade, é uma tecnologia promissora com potencial de ampliar a capacidade de geração de energia elétrica de forma sustentável, contrapondo-se com as tecnologias de combustíveis fósseis [1].

O maior problema da energia fotovoltaica é a sua competitividade de preço quanto à energia proveniente de combustíveis fósseis. O principal responsável para o aumento dos custos da célula fotovoltaica é a sua baixa eficiência e a quantidade do material semiconductor utilizado, o qual possui alto custo de processamento [2].

Portanto como modo de solucionar este problema, aumentou-se o interesse por células solares de filme fino, onde a quantidade do material semiconductor utilizado é na ordem de $1\mu\text{m} - 2\mu\text{m}$ de espessura (sendo esta espessura $180\mu\text{m} - 300\mu\text{m}$ para células fotovoltaicas tradicionais) [1]. Para compensar a menor eficiência das células de filme fino, atualmente os estudos estão focados na inserção de nanopartículas metálicas com o intuito de aprisionar a luz por dispersão, aumentando o comprimento do percurso óptico da célula e sua eficiência [1].

Neste trabalho será analisado o modelo da Fig. 1 (b) [3], com o objetivo de verificar o comportamento do coeficiente de reflexão total ao variar as espessuras das camadas e o ângulo de incidência da onda plana.

II. DESCRIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

O problema consiste de uma estrutura multicamada da Fig. 1 (a) com M camadas onde a onda plana incidente possui um ângulo θ_i com o eixo x . Traçando-se os vetores da propagação da onda, observa-se que a onda que se propaga na região M depende da onda transmitida pelo meio ar (região $M+1$) mais a onda refletida na interface x_M . A 1ª camada da estrutura é composta pelo Au, seguido de GaAs-AlGaAs e por fim o SiO_2 , conforme Fig.1(b).

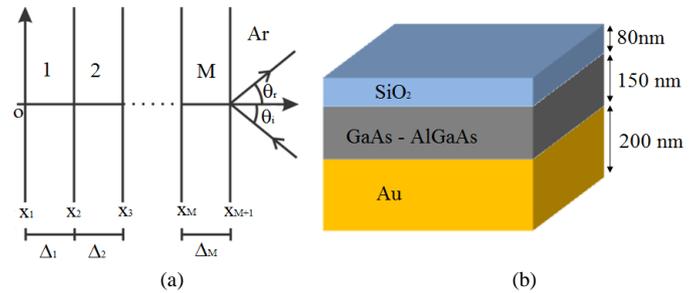


Fig. 1. Geometria da estrutura multicamada analisada.

A partir das equações de Maxwell no domínio da frequência, deduzem-se as equações que expressam os coeficientes de reflexão de Fresnel para o campo elétrico (1) e para o campo magnético (2). O termo k_{x_m} é calculado conforme em (3) e por similaridade obtêm-se $k_{x_{m+1}}$ substituindo o subíndice m de (3) por $m+1$.

$$\eta_{m+1,m}^E = \frac{k_{x_{m+1}} \cdot \mu_{r_m} - k_{x_m} \cdot \mu_{r_{m+1}}}{k_{x_{m+1}} \cdot \mu_{r_m} + k_{x_m} \cdot \mu_{r_{m+1}}} \quad (1)$$

$$\eta_{m+1,m}^H = \frac{k_{x_{m+1}} \cdot \varepsilon_{r_m} - k_{x_m} \cdot \varepsilon_{r_{m+1}}}{k_{x_{m+1}} \cdot \varepsilon_{r_m} + k_{x_m} \cdot \varepsilon_{r_{m+1}}} \quad (2)$$

$$k_{x_m} = \omega_0 \cdot \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \cdot \sqrt{\mu_{r_m} \varepsilon_{r_m} - \text{sen}^2(\theta_i)} \quad (3)$$

O coeficiente de reflexão para o campo elétrico e o campo magnético é expresso conforme em (4), onde para o cálculo da primeira iteração ($m=0$) considera-se $R_m^{E/H}$ igual à zero, sendo então equivalente a $\eta_{m+1,m}^{E/H}$. Para a obtenção dos coeficientes seguintes basta fazer a variação do parâmetro m , onde: $m=1, 2, \dots, M$. Conforme apresentado na Fig. 1(b), há três camadas no problema analisado ($M=3$), onde para a frequência de 600THz os valores das permissividades de cada

camada são: $\epsilon_{r(SiO_2)}=2,2-j0,01$, $\epsilon_{r(GaAs-AlGaAs)}=8-j0,1$ [3] e $\epsilon_{r(Au)}=-2,41-j3,42$. A permissividade do ouro é obtida conforme o modelo de Lorentz-Drude ($\lambda > 500nm$) [4], enquanto as permissividades do SiO_2 e $GaAs-AlGaAs$ foram consideradas constantes.

$$R_{m+1}^{E/H} = \frac{\eta_{m+1,m}^{E/H} + R_m^{E/H} \cdot e^{-2jk_m \cdot \Delta m}}{1 + \eta_{m+1,m}^{E/H} \cdot R_m^{E/H} \cdot e^{-2jk_m \cdot \Delta m}} \quad (4)$$

III. RESULTADOS

Com base na teoria apresentada acima foi desenvolvido um programa computacional no *software* MatLab para calcular o coeficiente de reflexão total para o campo elétrico (R^E) e campo magnético (R^H) para a polarização do campo elétrico e do campo magnético em uma faixa de frequência de 100 a 1000THz (faixa típica de absorção solar). Foram feitas simulações variando a espessura de cada camada e fixando as demais em relação a sua configuração original da Fig.1(b), sendo os resultados mostrados nas Figs. 2(a), (b) e (c) onde consideramos uma incidência normal da onda plana ($\theta_i=0^\circ$).

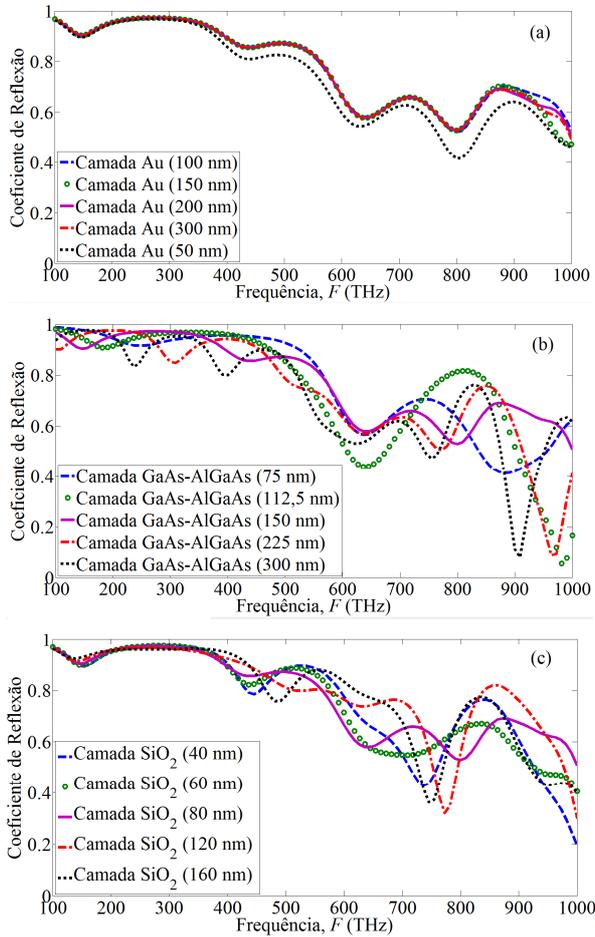


Fig. 2. Variação do coeficiente de reflexão em função da espessura das camadas. (a) camada Au . (b) camada $GaAs-AlGaAs$. (c) camada SiO_2 .

A Fig. 2(a) apresenta os valores de R^E ao variar a espessura da camada de ouro. Nota-se que a variação da espessura desta camada não alterou o perfil da resposta até uma frequência próxima de 900THz, com exceção da camada com espessura de 50nm, a qual representa o melhor resultado por ter menor custo com material. Já na Fig. 2(b), à medida que se aumentou a espessura da camada $GaAs-AlGaAs$ obteve-se o comportamento esperado de reduzir o coeficiente de reflexão, estando fora do padrão a curva de espessura de 112,5nm. Nota-

se ainda, o efeito de deslocamento para esquerda dos múltiplos da frequência ressonante ao aumentar a espessura das camadas, pois ao fazê-lo haverá aumento do comprimento de onda e consequente redução da frequência. Por fim, a Fig. 2(c), em que a variação da espessura da camada do SiO_2 constatou melhor resultado para a espessura de 40nm.

A Fig. 3 mostra a análise da influência da inclinação da onda plana incidente para a polarização do campo elétrico e do campo magnético. Nota-se em ambos os casos que para $\theta_i=80^\circ$ as curvas possuem variações abruptas com intervalos de frequência onde o coeficiente de reflexão é elevado. Tal comportamento é esperado, visto que quando $\theta_i=90^\circ$ a onda plana está em paralelo com a estrutura multicamada, havendo reflexão total. Em geral, a curva para $\theta_i=20^\circ$ foi a que apresentou melhor resultado.

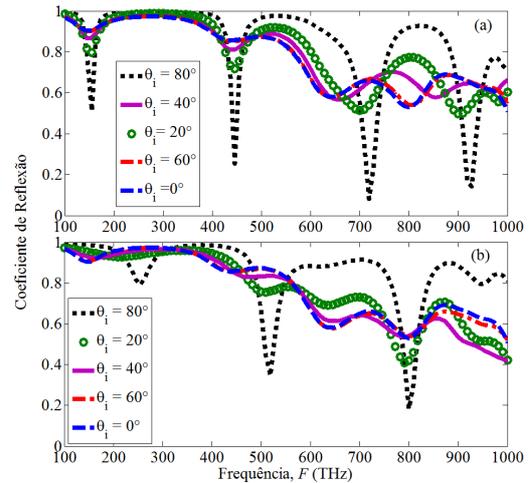


Fig. 3. Variação do coeficiente de reflexão em função da variação do ângulo de incidência da onda plana. (a) Coeficiente de reflexão para a polarização do campo elétrico. (b) Coeficiente de reflexão para a polarização do campo magnético.

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho analisou o coeficiente de reflexão total de uma célula fotovoltaica de filme fino ao alterar a espessura de cada camada e posteriormente o ângulo de incidência da onda plana incidente. Nos resultados apresentados, verificou-se que a espessura da camada Au da estrutura original pode ser reduzida, enquanto que para o semicondutor o aumento de sua espessura melhorou o resultado. Quanto à variação do ângulo de incidência da onda plana notou-se melhor resultado para $\theta_i=20^\circ$. Deve-se salientar que não foi considerado um modelo da permissividade para os materiais $GaAs-AlGaAs$ e SiO_2 , sendo considerado seu valor de permissividade para uma frequência de 600THz. Além disso, o modelo de permissividade adotado para o ouro tem confiabilidade para frequências até 600THz. Portanto, como trabalho futuro será considerado a análise do mesmo problema, mas utilizando outros modelos para as propriedades dos materiais.

REFERÊNCIAS

- [1] H. A. Atwater, and A. Polman, "Plasmonics for improved photovoltaic devices", *Nature Materials*, vol. 9, March 2010.
- [2] P. Bharadwaj, B. Deutsch, and L. Novotny, "Optical Antennas", *Advances in Optics and Photonics*, Vol. 1, Issue 3, pp. 438-483, 2009.
- [3] M. M. Tajdini, "Characterization of large array of plasmonic nanoparticles on layered substrate: dipole mode analysis integrates with complex image method", *Optics Express*, Vol. 19, No.S2, 2011.
- [4] L. Novotny, and B. Hecht, *Principles of Nano-Optics*, New York: Cambridge, 2006.