

Intensificação de Efeitos Magneto-Ópticos em Estruturas Multicamadas

Ezequiel Burkarter, Marlio J. C. Bonfim

UFPR

ezequiel@fisica.ufpr.br

Resumo

Com o objetivo de investigar a intensificação do efeito Kerr, neste trabalho temos desenvolvido simulações computacionais com vistas à determinação da rotação do ângulo de polarização da luz linearmente polarizada incidente sobre uma estrutura de multicamadas, com direção de magnetização arbitrária. Em nossos estudos temos aplicado o formalismo macroscópico a essas estruturas para determinação das matrizes projeção e de propagação, sendo os valores do parâmetro magneto-óptico (Q) e dos índices de refração (n) obtidos da literatura. Nosso trabalho tem se voltado, num primeiro momento, para uma multicamada ferro/alumina (Fe/Al_2O_3). Simulações com essa estrutura apontam para um ganho substancial no valor da rotação por efeito Kerr. Tomando uma espessura de 2nm para o ferro e 100nm para a alumina, obteve-se rotações da ordem de 10° . Numa segunda etapa nossas simulações se voltam para uma estrutura com SiO_2 , que tem propriedades termodinâmicas e de interdifusão semelhantes às da alumina.

Introdução

Os efeitos magneto-ópticos (MO) têm sido alvo de muitos estudos científicos nos últimos anos, motivados principalmente pelo alto potencial de utilização desses efeitos em sistemas de gravação, por exemplo. Nesse contexto, o efeito Kerr tem recebido especial atenção, por manifestar-se com uma pequena dimensão do meio, por não causar grandes perturbações e pela sua sensibilidade para detecção em superfícies de materiais magnéticos. Apesar do efeito Kerr em superfícies magnéticas já ter sido amplamente estudado, poucos estudos se dirigem à manifestação deste efeito em estruturas multicamadas [1], sendo portanto um nicho com grande potencial de investigação.

A utilização do efeito Kerr no desenvolvimento de sondas locais para medição de campos magnéticos e corrente elétrica sofre limitações devido ao problema das baixas intensidades do sinal quando é usada luz visível. Técnicas de intensificação do efeito Kerr podem ser aplicadas de modo a possibilitar um aumento da sensibilidade da sonda e conseqüentemente uma melhoria na relação sinal/ruído. Dentre estas técnicas destaca-se o uso de estruturas multicamadas que são o alvo de estudo teórico neste trabalho. O formalismo para a determinação da rotação por efeito Kerr usado nesse trabalho e em concordância com a literatura [2,3,4], baseia-se no uso de matrizes para o cálculo da propagação de uma onda eletromagnética na multicamada. Esse formalismo é aplicado a uma estrutura de Fe/Al_2O_3 , que é uma multicamada envolvendo um material magnético homogêneo e contínuo, e um dielétrico.

Metodologia

Para obtermos o valor da rotação por efeito Kerr utilizando este formalismo, precisamos calcular a matriz de reflexão $\{R\}$ para a multicamada, afim de relacionar a onda incidente à onda refletida, além dos coeficientes de Fresnel que aparecem em $\{R\}$ [2,3,4,5]. Um método bastante conveniente para determinação da matriz $\{R\}$, é baseado na construção de duas outras matrizes [2], a matriz de projeção $\{A\}$ e a matriz de propagação $\{D\}$. A matriz $\{A\}$ obtida diretamente de literatura [2,3,4,5] e a matriz $\{D\}$, também obtida da literatura [2,3,4,5], aparecem a seguir, nas equações 1 e 2 respectivamente. Aplicando-se as condições de contorno em cada interface do m -ésimo filme através das matrizes $\{A\}$ e $\{D\}$, podemos então relacionar o campo elétrico da onda incidente no meio inicial $E_i(0)$, no caso o ar, ao campo elétrico que sai do meio final $E_f(d)$, o substrato (no caso o silício). Isso é feito através da matriz $\{T\}$ que aparece na equação 3. O meio final é considerado como semi-infinito, e portanto não há onda refletida por ele.

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{i}{2} w_y^2 \left[\frac{\gamma_i}{w_z} - 2 \frac{\sigma_i}{w_y} \right] Q & (w_z - i a w_y Q) & -\frac{i}{2} w_y^2 \left[\frac{\gamma_r}{w_z} + 2 \frac{\sigma_r}{w_y} \right] Q & -(w_z + i a w_y Q) \\ -\frac{i}{2} \gamma_i \tilde{n}_0 Q & -\tilde{n}_0 & \frac{i}{2} \gamma_r \tilde{n}_0 Q & -\tilde{n}_0 \\ \tilde{n}_0 w_z & -\frac{i}{2} \frac{\gamma_i}{w_z} \tilde{n}_0 Q & -\tilde{n}_0 w_z & \frac{i}{2} \frac{\gamma_r}{w_z} \tilde{n}_0 Q \end{bmatrix} \quad (1)$$

Na equação 1, $\gamma_{ir} = w_y b \pm w_z c = \mathbf{w}_{ir} \bullet \mathbf{u}$; $\sigma_{ir} = -(w_y c \pm w_z b) = (\mathbf{w}_{ir} \times \mathbf{u}) \bullet \mathbf{x}$.

Na matriz {A} podemos definir a=b=0 e c=1 para o efeito Kerr polar, e a=c=0 e b=1 para o efeito Kerr longitudinal.

$$[D] = \begin{bmatrix} C_i \cdot e^{i\phi} & S_i \cdot e^{i\phi} & 0 & 0 \\ -S_i \cdot e^{i\phi} & C_i \cdot e^{i\phi} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_r \cdot e^{-i\phi} & -S_r \cdot e^{-i\phi} \\ 0 & 0 & S_r \cdot e^{-i\phi} & C_r \cdot e^{-i\phi} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

Onde: $C_{ir} = \cos(\Omega_{ir})$; $S_{ir} = \sin(\Omega_{ir})$; $\Omega_{ir} = (n_0 \pi \gamma_{ir} Q d) / w_z \lambda$; $\phi = (n_0 2 \pi w_z d) / \lambda$; d é a espessura da camada.

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_I(0) &= [A_I^{-1}] \left(\prod_m [A_m] [D_m] [A_m^{-1}] \right) [A_F] \mathbf{E}_F(d) \\ &= [T] \mathbf{E}_F(d). \end{aligned} \quad (3)$$

Na equação 4, a matriz {T} é representada de outra forma, composta de 4 matrizes (2X2):

$$T \equiv \begin{pmatrix} G & H \\ I & J \end{pmatrix}, \quad (4)$$

A matriz {R} pode ser obtida através do produto de duas matrizes (2X2) que compõem a matriz {T}, são elas, a matriz {G} e a matriz {I} da equação 4 [4,5]. A obtenção dos coeficientes de Fresnel é feita então pela equação 5 [5].

$$IG^{-1} = \begin{pmatrix} r_{ss} r_{sp} \\ r_{ps} r_{pp} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Para uma luz incidente com polarização s, pode-se deduzir que a rotação por efeito Kerr é

aproximada como sendo função dos coeficientes de Fresnel, pela parte real da equação 6 [4,5]. Para a luz com polarização p, substituímos r_{ps}/r_{ss} por r_{sp}/r_{pp} .

$$\Theta = \theta + \varepsilon \approx r_{ps}/r_{ss} \quad (6)$$

Este formalismo tem a vantagem de poder ser aplicado a meio não magnéticos, caso em que $Q=0$. Para o tratamento com essas matrizes foi utilizado o programa MAPLE®

No que diz respeito à obtenção das constantes ópticas e magneto-ópticas, recorreremos diretamente à literatura. O valor do índice de refração para a alumina foi calculado na referência 4, e aparece na equação 7. Além disso, da mesma referência obtivemos o índice de refração (n_0), e o valor da constante magneto-óptica (Q) para o ferro, equações 8. Para a alumina, tomamos o valor de Q como zero.

$$n_A = 1.63 + (0,26 \times 10^6)/\lambda^2 \quad (7)$$

Onde λ deve estar em angstroms.

$$\begin{aligned} n_0 &= 2.32 + i3.13 \\ Q &= 0.0284 - i0.0038 \end{aligned} \quad (8)$$

Resultados

O uso da estrutura ferro/alumina se deve ao fato de já haverem estudos sobre essa estrutura. Lenoble *et al.* [5,9] apontam para sua baixa interdifusão e para o fato de ser termodinamicamente estável para temperaturas acima de 500 °C. Além disso, é conveniente ressaltar que a camada de ferro é a primeira camada para que atue como uma cavidade óptica.

Em nossas simulações preliminares, para uma espessura de 2nm para o ferro e 100nm para a alumina, objetivou-se rotações da ordem de 10°, como já prevê a literatura [5]. Entretanto restam ainda algumas dificuldades operacionais, no que diz respeito ao uso do MAPLE® nas simulações e a adaptação de constantes às possíveis condições experimentais. Parte desses ajustes referem-se ao uso de óxido de silício SiO_2 na estrutura, ao invés da alumina. Isto se deve ao fato de o óxido de silício ser um material extensivamente estudado sob a forma de filme fino, e de ter uma maior facilidade de deposição, além de um maior controle morfológico e estequiométrico em relação à alumina. Este trabalho ainda está em andamento, mas os resultados preliminares são encorajadores.

Conclusão

Neste trabalho estudamos a intensificação do sinal do efeito Kerr visando sua aplicação no desenvolvimento de sondas locais para medição de campos magnéticos e corrente elétrica. Nossas pesquisas apontam para o uso de estruturas multicamadas como forma mais adequada de obter ganhos significativos na rotação Kerr. Através de simulações computacionais envolvendo o cálculo das matrizes de projeção e de propagação de uma onda eletromagnética na multicada, obtivemos que para uma estrutura ferro/alumina ($\text{Fe}/\text{Al}_2\text{O}_3$) pode-se chegar a um ganho um ganho da ordem de 500X na rotação Kerr quando comparada à rotação obtida numa superfície única de ferro.

Ainda existem detalhes do programa a serem implementados, bem como detalhes da aplicação do formalismo de multicamadas para o uso de outros tipos de estrutura, como por o exemplo, o uso SiO_2 no lugar da alumina.

Agradecimentos

Os autores agradecem a colaboração dos funcionários da biblioteca do setor de exatas da UFPR, bem como o suporte dos professores Dr. Edilson Silveira e Dr. Dante Homero Mosca Junior do departamento de física da UFPR.

Bibliografia

- [1] S. Visnovski, M. Nyvlt, V. Prosser, R. Lopusnik, R. Urban, J. Ferre, G. Penissard, D. Renard and R. Krishnan, Phys. Rev. B 52, 1090 (1995).
- [2] J. Zak, E. R. Moog, C. Liu, and S. D. Bader, J. Magn. Magn. Mater. 89, 107 (1990).
- [3] J. Zak, E. R. Moog, C. Liu, and S. D. Bader, Phys. Rev. B 43 6423 (1994).
- [4] A. Bourzami, O. Lenoble, J. F. Bobo, and M. Piecuch, Phys Rev. B 59 11489 (1999).
- [5] Z. Q. Qiu and S. D. Bader, Rev. Sci. Instrum. 71 (2000).
- [6] G. Metzger, D. Pluinage and R. Torguet, Ann. De Phys. 10 (1965) 5.