



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

Autorizada pelo Decreto Federal nº 77.496 de 27/04/76
Recredenciamento pelo Decreto nº 17.228 de 25/11/2016



PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
COORDENAÇÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

XXVII SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UEFS SEMANA NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA - 2023

ESTUDO DE ONDAS EVANESCENTES EM SISTEMAS ÓPTICOS E NANO-ÓPTICOS

Osly Agostinho Junior¹; A. V. Andrade-Neto²;

1. Bolsista PIBIC/CNPq, Graduando em Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: oslyuefs@gmail.com
2. Orientador, Departamento de Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: aneto@uefs.br

PALAVRAS-CHAVE: Coeficientes de Fresnel, ondas evanescentes; reflexão total frustrada.

INTRODUÇÃO

Quando um feixe de luz incide sobre uma interface que separa dois meios homogêneos, parte da luz incidente é refletida, gerando um feixe refletido, e parte é refratada (ou transmitida) para o segundo meio, originando o feixe refratado. A energia da onda incidente se reparte entre as ondas refletida e transmitida e a teoria eletromagnética permite calcular a refletividade (fração da potência incidente que é refletida) e a transmissividade (fração da potência incidente que é transmitida). Se o índice de refração do meio incidente for maior que o índice de refração do meio transmitido e o ângulo de incidência excede um ângulo crítico, ocorre o fenômeno da reflexão total. Contudo, ainda assim a onda eletromagnética penetra no segundo meio na forma de uma onda evanescente.

O comportamento dessas ondas na interface é notavelmente diferente das ondas de propagação periódicas. Nas ondas evanescentes, a amplitude da onda diminui exponencialmente à medida que se afasta da interface, resultando em uma rápida atenuação. Isso significa que a energia da onda evanescente está confinada a uma região muito próxima à interface, não se propagando significativamente no segundo meio. Portanto, as ondas evanescentes não se propagam a grandes distâncias, permanecendo limitadas a uma camada fina adjacente à interface.

Essa característica de solução limitada faz com que as ondas evanescentes sejam importantes em situações onde a interação precisa ocorrer em uma região localizada próxima à interface. Essa propriedade é amplamente explorada em diversas aplicações, como na microscopia de campo próximo, onde as ondas evanescentes permitem alcançar resoluções além dos limites da difração, e na óptica de superfície, para estudar propriedades ópticas de camadas finas e interfaces (MIRANDA, 2017).

As ondas evanescentes também têm a capacidade de interagir com objetos ou substâncias presentes na região próxima à interface. Essa interação pode ser explorada em sensoriamento, onde pequenas variações na proximidade de objetos ou substâncias na interface podem ser bloqueadas com base nas alterações nas características das ondas evanescentes.

METODOLOGIA

Para compreender as consequências das ondas evanescentes, adotamos uma abordagem que combina princípios da teoria das ondas, como reflexão e refração das ondas eletromagnéticas e equações de Fresnel, vetor de Poynting e condições de contorno em interfaces entre meios diferentes obtidas através das equações de Maxwell. Além disso, examinamos detalhadamente as características notáveis das ondas evanescentes, incluindo sua atenuação exponencial; esse declínio exponencial implica que a energia da onda é dissipada na medida em que a onda penetra no meio adjacente.

A taxa de atenuação das ondas evanescentes é determinada pela diferença nos índices de refração dos meios envolvidos e pela frequência da onda incidente. Quanto maior a diferença nos índices de refração, maior será a taxa de atenuação das ondas evanescentes.

RESULTADOS E/OU DISCUSSÃO (ou Análise e discussão dos resultados)

A energia associada às ondas evanescentes se localiza próxima da interface e não se propaga para o meio adjacente, quando a luz atinge a superfície de um objeto metálico, as ondas evanescentes geradas não transferem sua energia para o ar circundante. Em vez disso, a energia das ondas evanescentes está confinada na proximidade da interface metálica.

Embora não transportem energia a grandes distâncias, as ondas evanescentes têm a capacidade de interagir com objetos próximos à interface, como partículas, moléculas ou superfícies. Considere um experimento em que partículas microscópicas estão suspensas em um líquido próximo a uma interface de vidro. As ondas evanescentes geradas na interface de vidro podem interagir com essas partículas e permitir a observação de efeitos como a dispersão de luz, que revela informações sobre as partículas próximas à interface. A amplitude e a fase das ondas evanescentes podem ser controladas por meio da escolha de materiais e condições de contorno personalizados, ao projetar um dispositivo óptico, como um sensor de superfície baseado em plásmos de superfície, é possível controlar a amplitude e a fase das ondas evanescentes ajustando-se os materiais utilizados e as condições de contorno da interface.

Quando $\theta_1 > \theta_c$ temos a chamada reflexão interna total, porém devido as condições de contorno das equações de Maxwell, o campo eletromagnético não pode ser identicamente nulo no meio menos refringente, mesmo para $\theta_1 > \theta_c$.

A função de onda do campo eletromagnético no meio 2, a onda transmitida, pode ser escrita como:

$$\mathbf{E}_t(r, t) = \mathbf{E}_{0t} e^{(k_t \cdot r - \omega t)} \quad (1)$$

A equação acima pode ser reescrita como:

$$\mathbf{E}_t(r, t) = E_0 e^{-\gamma y} \exp \left[i \left(k_t \frac{n_1}{n_2} \text{sen} \theta_1 x - \omega t \right) \right] \quad (2)$$

onde,

$$\gamma = k_t \sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \text{sen}^2 \theta - 1} \quad (3)$$

A equação (2) representa uma onda que se propaga na direção do eixo x e decai exponencialmente na direção y. i.e., à medida que penetra no meio menos refringente, tornando-se desprezível a uma distância de apenas alguns comprimentos de onda

Para a investigação do fluxo de energia média no meio 2, devemos calcular a densidade de corrente de energia que é dada pelo valor médio temporal do vetor de Poynting definido como

$$\langle S \rangle = \frac{1}{2} \text{Re}(E_2 \times H_2^*)$$

Em termos de componentes temos

$$\langle S \rangle_x = \frac{1}{2} \text{Re}(E_y H_z^* - E_z H_y^*) \quad (4)$$

$$\langle S \rangle_y = \frac{1}{2} \text{Re}(E_z H_x^* - E_x H_z^*) \quad (5)$$

$$\langle S \rangle_z = \frac{1}{2} \text{Re}(E_x H_y^* - E_y H_x^*) \quad (6)$$

Após alguns cálculos é possível mostrar que

$$\langle S \rangle_y = \langle S \rangle_z = 0 \quad (7)$$

e

$$\langle S \rangle_x = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_2 \mu_2}{\epsilon_1 \mu_1}} \text{sen} \theta_1 \left(|t^s|^2 |E_1^{(s)}|^2 + |t^p|^2 |E_1^{(p)}|^2 \right) e^{-2\gamma y} \quad (8)$$

onde $\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_2 \mu_2}{\epsilon_1 \mu_1}}$ representa um fator de escala que leva em consideração as propriedades dos dois meios envolvidos. ϵ_1 e μ_1 são a permissividade e a permeabilidade do primeiro meio, enquanto ϵ_2 e μ_2 são a permissividade e a permeabilidade do segundo meio. A raiz quadrada da razão dessas propriedades é usada para ajustar a densidade de fluxo de potência à medida que a luz passa de um meio para outro e

$$\left(|t^s|^2 |E_1^{(s)}|^2 + |t^p|^2 |E_1^{(p)}|^2 \right)$$

representa a soma das intensidades das ondas transmitidas nas polarizações s (polarização tangencial) e p (polarização perpendicular). $|t^s|^2$ e $|t^p|^2$ são os coeficientes de transmissão para essas polarizações, que indicam a fração da intensidade da onda incidente que é transmitida através da interface. $|E_1^{(s)}|^2$ e $|E_1^{(p)}|^2$ representam as intensidades dos componentes das ondas das transmitidas nas polarizações s e p. O fator $e^{-2\gamma y}$ representa a atenuação exponencial da onda evanescente à medida que se afasta da interface na direção x (paralela à interface).

Da equação (7) vemos que nas direções y e z a energia penetra e sai do meio 2 mas, em média, não há transporte de energia para dentro do meio.

CONCLUSÃO

Em resumo, as ondas evanescentes representam um aspecto fascinante na física das ondas, com amplas aplicações práticas. Elas são utilizadas em campos como a microscopia de campo próxima, que permite a observação de estruturas menores do que o limite de difração, bem como na óptica de superfície, para estudar as propriedades ópticas de interfaces e superfícies. Além disso, as ondas evanescentes desempenham um papel importante na comunicação óptica e na eletrônica, oferecendo oportunidades para melhorar a eficiência e a sensibilidade dos dispositivos. A reflexão total frustrada, um assunto relacionado, também encontra aplicações úteis em tecnologias como fibras ópticas e microscopia de fluorescência. Sua analogia com o tunelamento quântico destaca a rica interconexão entre a física clássica e a física quântica, enriquecendo nossa compreensão das complexidades da propagação de ondas em interfaces e barreiras de potencial. Portanto, as ondas evanescentes e a reflexão total frustrada são conceitos fundamentais que desempenham um papel crucial em muitas áreas da ciência e da tecnologia moderna.

REFERÊNCIAS

- [1] Lukas Novotny and Bert Hecht, Principles of Nano-Optics. (Cambridge University Press, 2006).
- [2] Stefan Alexander Maier, Plasmonics: fundamentals and applications. (Springer, 2007).
- [3] M. Dragoman and D. Dragoman. Plasmonics: Applications to nanoscale terahertz and optical device, Progress in Quantum Electronic, 32, 1 (2008).
- [4] A. V. Andrade-Neto, Aroldo Ribeiro Neto e Ado Jorio. Relação de dispersão para os plásmon-polaritons de superfície em uma interface plana metal/dielétrico. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 39, no.3, e3310 (2017).
- [5] A. V. Andrade-Neto e Davy Dias Andrade. Lei da reflexão, lei de Snell e efeito Goos-Hänchen: abordagem via modelo corpuscular. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 43, no.3, e20200350 (2021).
- [6] A. V. Andrade-Neto, B. P. Carneiro, J. C. Rios and P. V. P. Andrade Analogies between optical physics and quantum mechanics. European Journal of Physics, 42, 055402 (2021).
- [7] Vörös, Z. e Johnsen, R. A simple demonstration of frustrated total internal reflection. American Journal of Physics, vol. 76(8) (2008). DOI: 10.1119/1.2904473.
- [8] Miranda, Manoel Messias Pereira de. Atividade óptica de DNA na presença de plasmons polaritons de superfície. Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2018.