

ÓPTICA GEOMÉTRICA EM MEIOS NÃO LINEARES BIDIMENSIONAIS

Elliton Otávio Silva Brandão¹ (IC), Eduardo Henrique Silva Bittencourt (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá.

Palavras-chave: Eletromagnetismo em dimensões reduzidas. Fenômenos Ópticos. Formalismo Tensorial. Modelos Análogos.

Introdução

Materiais estruturados em uma única camada de espessura atômica, quando excitados por campos eletromagnéticos externos, apresentam uma resposta óptica característica que foi observada desde os primeiros estudos com grafeno (NOVOSELOV et al., 2004), material pioneiro nessa direção. A partir de então, muitos outros materiais com essa estrutura de monocamada foram descobertos (fósforo negro (WANG et al., 2016), perovskitas (RICHTER et al., 2017) e o seleneto de gálio (KARVONEN et al., 2015), por exemplo) e, junto a essas descobertas, seguiu-se o aprofundamento de aplicações envolvendo esses meios, dentre as quais pode-se citar limitadores ópticos de potência (ZHAN; CHEN, 2010), geradores de onda THz (ZHAO et al., 2016), e moduladores eletro-ópticos (SEYLER et al., 2017). Devido a certas vantagens, como alta estabilidade química e mecânica e baixo custo de fabricação, essa classe de meios materiais cria uma categoria promissora de dispositivos ópticos, justificando a relevância na compreensão da propagação da luz nesses meios. O trabalho apresentado, portanto, objetiva o estudo dos aspectos teóricos da propagação de luz em meios 2D não lineares no limite da óptica geométrica, assunto ainda pouco explorado na literatura, além de estudar as expressões gerais das velocidades de fase e grupo, as condições de birrefringência e a polarização da onda. Outrossim, também se busca, como será abordado, determinar as métricas ópticas e algumas de suas propriedades, para as quais os raios de luz se propagam como geodésicas nulas em um fundo efetivo de forma a permitir a construção de modelos análogos de gravitação para o caso bidimensional.

Metodologia

O desenvolvimento do trabalho se deu pelo emprego do formalismo tensorial para a descrição do eletromagnetismo em duas dimensões. Para a descrição da teoria de Maxwell em dimensões reduzidas, por sua

vez, empregou-se o método chamado “Hadamard descent” (HADAMARD, 1923), e, devido à redução dimensional, algumas modificações foram realizadas na teoria clássica de modo a incorporar a invariância planar dos meios em questão. Além do mais, como a onda é caracterizada por campos de baixa magnitude e de fase descontínua, torna-se possível aplicar o Teorema de Hadamard (HADAMARD, 1903) e reduzir as equações diferenciais parciais de Maxwell à um problema algébrico de autovalor. A matriz generalizada de Fresnel, que define este problema de autovalor, por sua vez, carrega informações acerca dos parâmetros dielétricos do meio, a forma como esses parâmetros variam com respeito aos campos externos, além da direção e velocidade de propagação da onda. As soluções não triviais para o problema podem ser expressas por uma equação do segundo grau para a velocidade de fase, a partir da qual se derivam as análises das condições de birrefringência e polarização.

Além do mais, com o desenvolvimento da teoria de Maxwell em dimensões reduzidas, torna-se possível determinar as métricas ópticas e algumas de suas propriedades, para as quais os raios de luz se propagam como geodésicas nulas em um fundo efetivo. Para isso, parte-se da equação de segundo grau para a velocidade de fase e, expondo o vetor de onda em evidência, torna-se possível construir o objeto geométrico que representará a métrica óptica efetiva de interesse.

Resultados e discussão

Como a velocidade de fase é dada por uma equação do segundo grau, existe a possibilidade desta assumir dois valores sob uma mesma direção de propagação. Dessa forma, pode-se determinar as condições para que o meio bidimensional apresente o fenômeno de birrefringência. Além disso, segue-se que, para cada um dos valores de velocidade, existe uma polarização da onda característica, o que leva a uma propriedade interessante desses meios materiais: a velocidade de propagação pode depender da forma como

a onda é polarizada.

Ademais, a solução para a equação de segunda ordem é específica para cada direção de incidência da onda no meio. Dessa forma, em um mesmo material, dependendo da forma como a onda incide, sua velocidade de propagação pode variar, ou até mesmo ser imaginária, caracterizando meios opacos. Além disso, pode-se verificar que, para certos parâmetros e sob determinados valores de excitação com os campos externos, ocorre o fenômeno conhecido como propagação unidirecional, no qual a onda se propaga apenas em uma direção no meio. Isto é análogo à uma onda em um rio, cujas velocidades são inferiores àquela da correnteza. A impossibilidade da onda se propagar na direção oposta, impede a sua reflexão, e a ausência de reflexão está associada com a total transmissão das informações enviadas.

Na Figura 01 a seguir, que relaciona a velocidade de propagação da onda com a direção de incidência desta no meio, é possível observar um exemplo de um material que, em determinadas condições, apresenta birrefringência (duas velocidades de fase para uma mesma direção de propagação), opacidade, visto que há uma janela na qual não há propagação, e propagação unidirecional, uma vez que, ao inverter o ângulo de incidência ($\pm 180^\circ$), muda-se também o sinal da velocidade, ou seja, ela permanece na mesma direção anterior. A figura em questão foi obtida analisando um caso particular de um meio magneto-elétrico, na qual os campos externos normalizados foram fixados em $E/E_0 = 0,5$, $B/B_0 = 2,5$ e $r = \chi_y/\chi_x = 0,5$.

Ainda analisando-se o mesmo caso em questão, pôde-se determinar a métrica óptica efetiva associada à essa propagação. Além disso, por se tratar de um espaço-tempo de dimensões reduzidas, torna-se possível expressar a equação da métrica e plotar uma superfície bem definida associada à essa equação. Desse modo, a Figura 02, apresentada em sequência, apresenta o cone de luz associado à métrica associada a esse caso. Observa-se que o cone se encontra inclinado em relação ao eixo temporal, o que justifica a ocorrência da propagação unidirecional, uma vez que as duas velocidades de propagação, ambas positivas, serão as duas inclinações que o cone contém com relação ao plano espacial. Ademais, como o cone se encontra inclinado com respeito ao eixo temporal, a projeção, no plano espacial, da curva associada a um valor de tempo constante não circunda o eixo t, justificando a existência de janelas de opacidade no meio material, ou seja, nem todas as direções há uma propagação de luz bem definida.

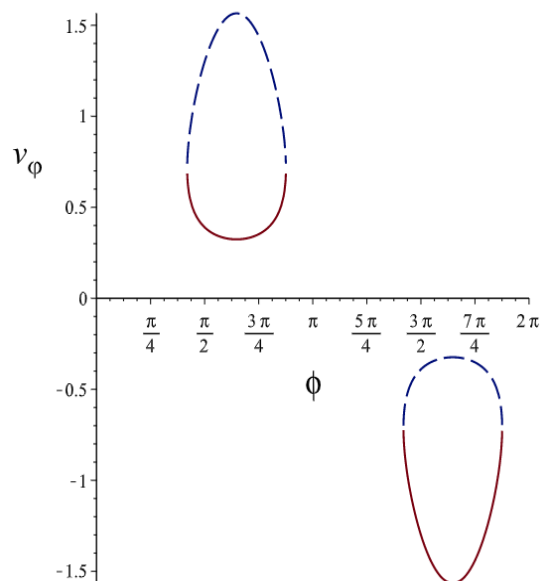


Figura 01 – Velocidade de fase em função da direção de propagação no meio sob as condições $E/E_0 = 0,5$, $B/B_0 = 2,5$, e $r = \chi_y/\chi_x = 0,5$.

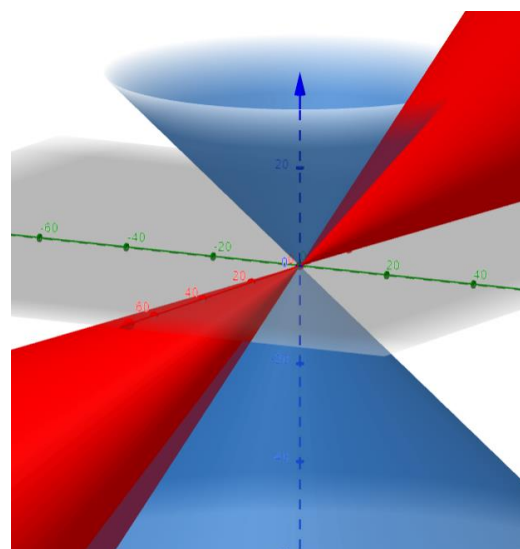


Figura 02 – Cone de Luz para o Caso Magneto-Elétrico Analisado ($E/E_0 = 0,5$, $B/B_0 = 2,5$, e $r = \chi_y/\chi_x = 0,5$).

Conclusões

A construção da teoria do eletromagnetismo em 2+1 dimensões e a análise da propagação da luz em materiais bidimensionais não lineares pela óptica geométrica permitem a construção explícita das expressões para a velocidade de fase e de grupo para o caso mais geral possível. Contrariamente ao caso 3+1, a análise das condições de birrefringência, opacidade, propagação unidirecional etc., é possível sem a necessidade de simplificações. Visto o crescente número de materiais de monocamadas descobertos recentemente, a teoria eletromagnética em 2 dimensões espaciais pode ser de grande interesse nas áreas de engenharia, em aplicações envolvendo esses meios, principalmente pela possibilidade de reproduzir fenômenos conhecidos em meios materiais tridimensionais, usando agora meios “mais simples” do ponto de vista geométrico, experimentalmente estáveis, de baixo custo, pouco dispersivos e com grandes promessas tecnológicas.

Ademais, a redução dimensional e dos graus de liberdades das equações de análise, permitiu a construção teórica da forma como a métrica efetiva óptica se comportará dependendo das constantes dielétricas do meio para o caso mais geral possível. Dessa forma, a teoria prevê a possibilidade de estudar modelos análogos de gravitação também para esses materiais bidimensionais, de modo que pode ser investigada a relação entre a ocorrência dos fenômenos ópticos de interesse já citados com o comportamento dos espaço-tempos representados pelas métricas construídas.

Agradecimento

Agradece-se ao colaborador e amigo Érico Goulart e os participantes “*Seminário GIFT*”, especialmente Vitorio De Lorenci, pelas muitas discussões que ajudaram o desenvolvimento do trabalho. Além do mais, Elliton Otávio Silva Brandão agradece ao CNPq pelo apoio financeiro (Bolsa nº 134395/2021-2).

Referências

FENG M.; ZHAN H.; CHEN Y. Applied Physics Letters 96, 033107 (2010).

HADAMARD J. Leçons sur la propagation des ondes et les équations de hydrodynamique (Hermann, 1903).

HADAMARD J. Lectures on Cauchy’s problem in linear partial differential equations (Yale University Press, 1923).

KARVONEN L.; SÄYNÄTJOKI A.; MEHRAVAR S.; RODRIGUEZ R. D.; HARTMANN S.; ZAHN D. R. T.; HONKANEN S.; NORWOOD R. A.; PEYGHAMBARIAN N.; KIEU K.; LIPSANEN H.; RIIKONEN J. Scientific Reports 5, 10334 (2015).

NOVOSELOV, K. S.; GEIM, A. K.; MOROZOV, S. V.; JIANG, D.; ZHANG, Y.; DUBONOS, S. V.; FIRSOV, A. A., Science 306, 666 (2004).

RICHTER J. M.; BRANCHI, F.; CAMARGO V. A. F.; ZHAO, B.; FRIEND, R. H.; CERULLO G.; DESCHLER F.; Nature Communications 8, 376 (2017).

SEYLER K. L.; SCHAIBLEY J. R.; GONG P.; RIVERA P.; JONES A. M.; WU S.; YAN J.; MANDRUS D. G.; YAO W.; XU X. Nature Nanotechnology 10, 407 (2015).

WANG, Y.; LI, J.; HAN, L.; LU, R.; HU, Y.; LI, Z.; LIU, Y.; Laser Physics 26, 065104 (2016).

ZHAO T.; HU M.; ZHONG R.; GONG S.; ZHANG C.; LIU S. 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz) (2017) pp.1–2.