

Análise do Acoplamento de Modos Plasmônicos de Superfície em um Guia de Ondas Anisotrópico

Gerllyson M. A. Santos, Sebastião F. B. Neto, Maria Clara B. Monteiro, João Vitor A. Farias, Nilson H. O. Cunha, José Patrocínio da Silva.

Resumo— Este trabalho investiga o acoplamento de plasmons de superfície em um guia de ondas com núcleo anisotrópico, em específico na interação entre modos guiados e plasmônicos. A presença de anisotropia no núcleo modifica as condições de contorno e as constantes de propagação, permitindo direção e seleção de polarizações. A modelagem baseia-se nas equações de Maxwell em meios anisotrópicos, incorporando a resposta material por meio do tensor de permissividade dielétrica. Os resultados indicam que a anisotropia pode intensificar e otimizar a transferência de energia entre modos, ampliando o desempenho de dispositivos em nanofotônica, sensoriamento óptico e integração fotônica em escala submicrométrica.

Palavras-Chave— Acoplamento óptico, Guia anisotrópico, Modos plasmônicos.

Abstract— This work investigates the coupling of surface plasmons in a waveguide with an anisotropic core, specifically focusing on the interaction between guided and plasmonic modes. The presence of anisotropy in the core modifies the boundary conditions and propagation constants, enabling directionality and polarization selection. The modeling is based on Maxwell's equations in anisotropic media, incorporating the material response through the dielectric permittivity tensor. The results indicate that anisotropy can enhance and optimize energy transfer between modes, improving the performance of devices in nanophotonics, optical sensing, and photonic integration at the submicrometric scale.

Keywords— Anisotropic waveguide, Optical coupling, Plasmonic modes.

I. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o estudo das propriedades ópticas dos plasmons de superfície tem sido um propulsor de tecnologias inovadoras, como biossensores, células fotovoltaicas, armazenamento de dados, dentre outras aplicações [1]. Isso se deve às características intrínsecas desse modelo de quase partícula, que quando submetida a interações com materiais, pode confinar e propagar ondas eletromagnéticas em escalas nanométricas [2], abrindo novas possibilidades para aplicações em transporte de dados e sensores, por exemplo.

Em contrapartida, essa tecnologia ainda enfrenta desafios, o que abre espaço para uso de novos modelos de estruturas, projetadas a partir de otimizações específicas. Essas limitações, são comumente detectadas em sistemas eletrônicos, devido as perdas ôhmicas. Esses sistemas, por outro lado, têm como objetivo a transmissão rápida e segura de dados, exigindo uma propagação estável [3]. Dessa forma, os plasmons de superfície

podem ser manipulados, contudo, sua duração depende, em parte, da interface metal-dielétrico na qual são formados.

Nesse contexto, o estudo de materiais ópticos para transmissão em alta frequência são fundamentais para determinar as propriedades dos plasmons. Uma escolha inadequada do material plasmônico, bem como a ausência de uma análise detalhada de acoplamento, pode interferir na transmissão do sinal óptico guiado devido a um aumento nas perdas por confinamento. Isso ocorre uma vez que a eficiência de acoplamento entre os fótons no dielétrico e os elétrons livres no metal está diretamente relacionada a esses parâmetros. Em adição, ainda são relativamente escassos os trabalhos na literatura que investigam a tecnologia de ressonância de plasmons de superfície (SPR – *do inglês, Surface Plasmon Resonance*) em guias de onda ópticos com núcleo anisotrópico [4],[5]. Dessa forma, a investigação de estruturas que utilizam materiais anisotrópicos, apresenta uma demanda atual por estudos nessa direção, uma vez que materiais anisotrópicos apresentam propriedades ópticas dependentes da direção, que podem alterar significativamente as condições de confinamento, dispersão e acoplamento dos plasmons[6].

Dessa forma, a anisotropia do material, pode ser explorada para otimizar o controle da propagação e reduzir perdas, ampliando o desempenho de aplicações em dispositivos plasmônicos. Assim, é relevante investigar a formação e o comportamento dos plasmons em guias anisotrópicos, bem como avaliar o impacto de diferentes materiais, como metais nobres e materiais bidimensionais, como o grafeno, nas propriedades do acoplamento e na eficiência do sistema.

Este trabalho investiga o acoplamento plasmônico em um guia de onda anisotrópico. Foram feitas simulações em um guia do tipo RIB anisotrópico com SPR, comparando resultados com ouro e grafeno como elementos plasmônicos [7].

A Seção II apresenta os materiais e métodos aplicado no projeto da estrutura proposta, bem como a metodologia empregada nas simulações. Na Seção III, são discutidos os resultados obtidos por meio das análises numéricas. A Seção IV apresentada as considerações finais deste trabalho.

II. MÉTODOS E MATERIAIS

O modelo de guia de ondas empregado foi o guia tipo RIB, que é uma estrutura amplamente usada no desenvolvimento de dispositivos aplicados em óptica integrada, caracterizados por uma elevação central sobre uma camada plana. Esses tipos de guias de ondas são apropriados para confinar a luz e obtenção de modos ópticos, sendo amplamente utilizados para integração com tecnologias *Lab-on-chip* [3],[8].

A. Estrutura do Guia tipo RIB

A estrutura da Figura 1, é composta por um substrato de sílica fundida ($n_{Si} \cong 1,45$), com largura $W_2 = 6,0 \mu m$ e altura $H_2 = 3,5 \mu m$. O núcleo da estrutura é constituído por um

Gerllyson Santos, e-mail: gerllysonsantos@gmail.com; Sebastião Neto, e-mail: seseneto15@gmail.com; Maria Clara Monteiro, e-mail: clarabarbalho1@gmail.com; João Vitor Farias, e-mail: vitorjoaovitoralbanofarias@gmail.com; Nilson Cunha, e-mail: nilson.ce@gmail.com; José Patrocínio da Silva, e-mail: jose.patrocinio@ufm.br. Departamento de Engenharia Elétrica (DEE), Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal-RN. Este trabalho foi parcialmente financiado por PIBIC-UFRN (PIG22248-2024).

material anisotrópico, com largura $W_1 = 2,7 \mu\text{m}$, altura $H_1 = 1,5 \mu\text{m}$ e uma camada plana com espessura $t_2 = 0,1 \mu\text{m}$. Sobre o núcleo é depositada uma lâmina de grafeno com espessura $t_1 = 35 \text{ nm}$ para provocar excitação plasmônica.

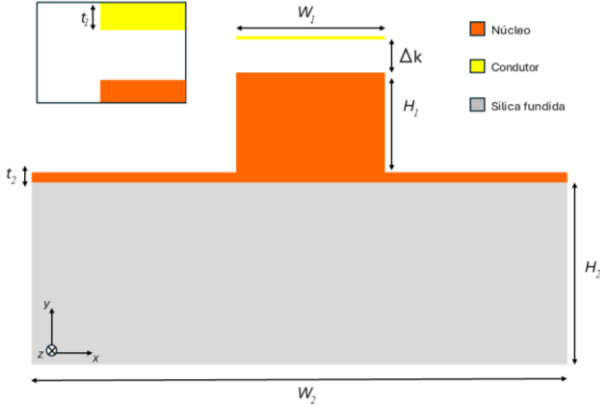


Fig. 1. Esquema da estrutura proposta.

B. Modelagem numérica

Para o desenvolvimento das simulações, foi empregado um algoritmo computacional de código próprio, implementado com base no método dos elementos finitos (FEM – do inglês, *Finite Element Method*) com camadas perfeitamente casadas (PML – do inglês, *Perfectly Matched Layer*) retangulares [9]. O método foi aplicado para a obtenção da análise modal da estrutura, a partir da solução numérica das equações de Maxwell para obtenção da equação de onda, permitindo determinar os modos eletromagnéticos propagantes, bem como caracterizar a distribuição espacial dos campos e seus respectivos parâmetros modais. Após a aplicação de uma aproximação não para-axial, a equação da matriz global foi derivada, como mostrado na Equação (1), em que $[A]$ e $[B]$ são matrizes esparsas e complexas e $\{\Phi\}$ é o autovetor, que contém os coeficientes de expansão de campo nos nós da malha.

$$[A]\{\Phi\} = n_{\text{eff}}^2[B]\{\Phi\} \quad (1)$$

Com base em (1) é possível se obter o índice de refração efetivo (n_{eff}), que caracteriza as propriedades de confinamento modal e perdas de propagação [6]. A partir disso, foram realizadas diversas análises numéricas, considerando diferentes posições da lâmina de grafeno (Δk) sobre a crista do núcleo (eixo y), de forma a se verificar o efeito dessa proximidade no acoplamento do plasmons de superfície.

A motivação desse estudo é investigar o efeito do acoplamento entre o modo guiado e os plasmons de superfície quando existe uma separação física entre o núcleo do guia óptico e o material plasmônico. Para valores de $\Delta k > 0$, é considerado que a região entre ambos é preenchida por ar, simulando uma situação em que o material plasmônico não está depositado diretamente sobre o guia dielétrico.

Essa configuração representa um cenário experimental em que uma *tag* metálica contendo o material plasmônico é posicionada próxima ao guia óptico, permitindo o sensoriamento por meio do acoplamento evanescente. Essa abordagem elimina a necessidade de deposição direta do material plasmônico sobre o guia, dispensando, por exemplo,

camadas adesivas, além de reduzir a complexidade do processo de fabricação, dependendo da geometria empregada.

A simulação foi realizada com uma janela computacional de $12 \times 11 \mu\text{m}$, discretizada por 5.824 elementos triangulares lineares e adaptativos. A PML utilizada foi implementada com espessura de $1 \mu\text{m}$. O guia foi projetado para operar no comprimento de onda de $\lambda = 632,9 \text{ nm}$, referente à um feixe de laser He-Ne, que possui alta estabilidade, baixo custo e baixa dispersão em vários materiais ópticos.

O tensor de permissividade é descrito de acordo com as Equações 2, 3, 4 e 5 [9].

$$\epsilon_{xx} = n_0^2 \sin^2 \alpha + n_e^2 \cos^2 \alpha \quad (2)$$

$$\epsilon_{yy} = n_e^2 \sin^2 \alpha + n_0^2 \cos^2 \alpha \quad (3)$$

$$\epsilon_{zz} = n_0^2 \quad (4)$$

$$\epsilon_{xy} = \epsilon_{yx} = (n_e^2 - n_0^2) \sin \alpha \cos \alpha \quad (5)$$

As componentes ϵ_{xx} , ϵ_{xy} , ϵ_{yx} e ϵ_{yy} são os elementos do tensor de permissividade de ordem 2, com anisotropia longitudinal e transversal, α representa o ângulo de rotação dos eixos principais do tensor em relação as direções x e y do sistema de coordenadas do guia e n_0 e n_e representam os índices ordinário e extraordinário, respectivamente. Para obtenção dos resultados obtidos neste trabalho, foram realizadas as seguintes considerações: $\alpha = 0^\circ$, $n_0 = 1,52$ e $n_e = 1,48$ [9], o que permite determinar os valores das componentes de permissividade e montar o tensor dielétrico, caracterizando a anisotropia. Para a modelagem do grafeno foram utilizando técnicas de elipsometria espectroscópica [10].

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas simulações, a formulação utilizada obteve n_{eff} . Esse algoritmo é implementado em linguagem FORTRAN e os resultados são exportados para uma plataforma externa para gerar os gráficos. Dessa forma, o primeiro estudo a ser realizado foi a análise modal. Esta etapa é essencial, pois é a partir dela que se identifica os modos fundamental e plasmônico.

A Figura 2 mostra a distribuição bidimensional do campo elétrico, mostrando o acoplamento entre os modos fundamental e plasmônico.

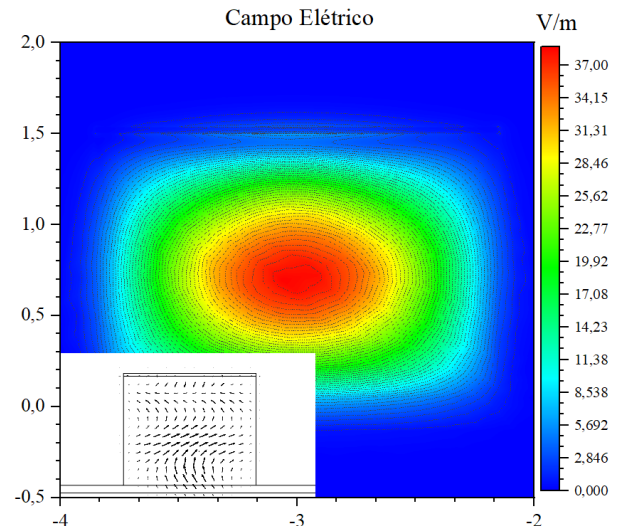


Fig. 2. Distribuição de campo Elétrico na seção transversal do guia.

O detalhe inserido no canto inferior esquerdo da Figura 2 apresenta a distribuição vetorial do campo E associada ao modo fundamental propagante, demonstrando o comportamento anisotrópico do modo fundamental.

A Figura 3 mostra a distribuição 1D do campo E ao longo do elemento plasmônico para Δk variando de $0\mu m$ a $0,5\mu m$. Observa-se que, para a condição de acoplamento ideal ($\Delta k = 0$), o campo elétrico atinge seu valor máximo de $2,9617 V/m$.

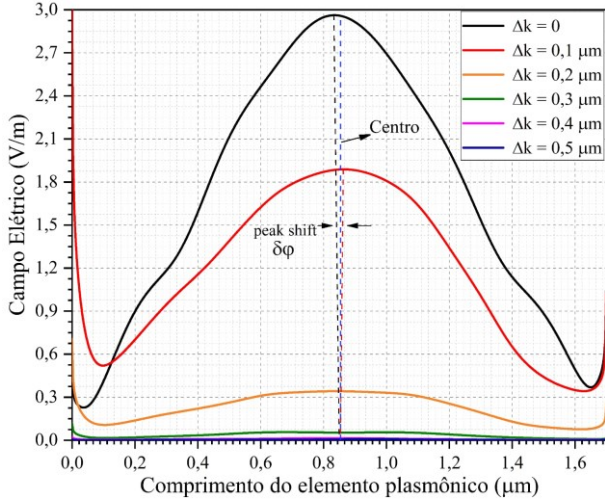


Fig. 3 Campo Elétrico Unidimensional ao longo do comprimento do grafeno.

Observa-se que o aumento de Δk provoca uma redução significativa na amplitude máxima do campo elétrico, além de um deslocamento da posição de pico ($\delta\phi$) em relação ao centro geométrico da estrutura, indicando alteração nas condições de confinamento modal. Isso ocorre devido a interação metal-dielétrico possuir uma caracterização anisotrópica, de forma que os plasmons formados sofrem pequenas variações, caracterizando-os como modos plasmônicos híbridos.

Por fim, na Figura 4 é realizada uma comparação do campo E máximo em função da distância de acoplamento (Δk) entre ouro e grafeno. Observa-se o decaimento quase exponencial do campo com o aumento de Δk , expondo a redução do acoplamento evanescente entre o modo guiado e o plasmônico.

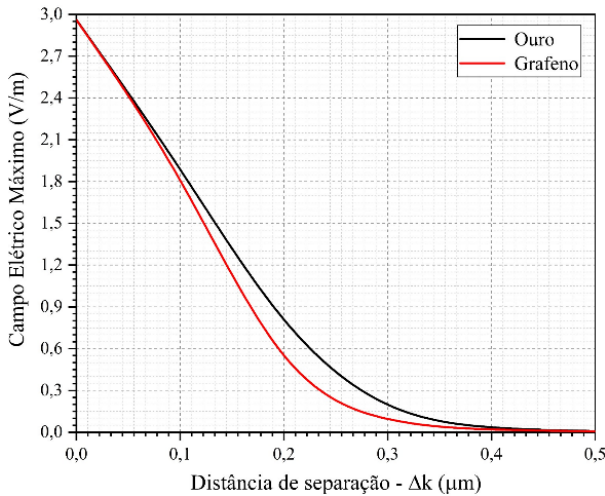


Fig. 4. Comparação do campo E máximo para grafeno e ouro.

Na Figura 4, percebe-se que a estrutura com ouro apresenta valores de campo ligeiramente superiores aos obtidos com grafeno em quase toda a faixa analisada, indicando um

acoplamento plasmônico mais intenso para a geometria adotada. Em contrapartida, o grafeno exibe um decaimento mais acentuado da amplitude máxima do campo com o aumento de Δk , evidenciando maior sensibilidade à distância de separação. Esse comportamento decorre das diferenças intrínsecas entre os materiais, como sua condutividade superficial e propriedades eletrônicas. Para Δk superiores a aproximadamente $0,35\mu m$, ambas as curvas convergem rapidamente para valores próximos de zero, indicando que o acoplamento modal se torna desprezível e estabelecendo um limite superior de separação para o funcionamento eficaz do sensor.

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho realizou a análise numérica de um guia de onda tipo RIB com núcleo anisotrópico, considerando grafeno e ouro para a excitação de plasmons de superfície. Os resultados mostram que a distância de separação Δk entre o núcleo e o elemento plasmônico influencia diretamente o campo elétrico e a eficiência de acoplamento, comportamento esperado devido ao caráter evanescente dos plasmons. O guia anisotrópico gerou modos plasmônicos híbridos, evidenciados pelo peak-shift $\delta\phi$. De forma geral, ambos os materiais apresentaram resultados similares, o ouro teve desempenho ligeiramente superior no acoplamento, enquanto o grafeno foi mais sensível à variação de Δk . Foi demonstrado que a anisotropia causou o peak-shift, intensificando o acoplamento, resultando em campos de maior intensidade. Conclui-se, portanto, que otimizar Δk é essencial para maximizar o confinamento e a eficiência, indicando potencial propriedade como sensor de ressonância plasmônica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN – PPGEED e a PIBIC-UFRN por financiar em partes esta pesquisa, código de financiamento – PIG22248-2024.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Homola, "Surface Plasmon Resonance Sensors for Detection of Chemical and Biological Species," *Chem. Rev.*, vol. 108, n. 2, pp. 462-493, 2008.
- [2] C. E. Rúbio-Mercedes, N. H. O. Cunha e J. P. da Silva, "Numerical Analysis of Plasmonic Couplers based on Metallic Lens," *J. Microw. Optoelectron. Electromagn. Appl.*, vol. 22, pp. 346-359, 2023.
- [3] D. Almeida, J. Costa, A. Fantoni e M. Vieira, "Rib Waveguide Plasmonic Sensor for Lab-on-Chip Technology," *Proc. 13th Doctoral Conf. Comput., Elect. Ind. Syst.*, Caparica, Portugal, 2022, pp. 187-196.
- [4] Z. Zhang et al., "Plasmonic sensors based on graphene and graphene hybrid materials," *Nano Conver.*, vol. 9, n. 28, pp. 1-25, 2022.
- [5] D. T. Nurrohman e N.-F. Chiu, "A Review of Graphene-Based Surface Plasmon Resonance and Surface-Enhanced Raman Scattering Biosensors: Current Status and Future Prospects," *Nanomaterials*, vol. 11, 2021.
- [6] N. H. O. Cunha e J. P. da Silva, "High Sensitivity Surface Plasmon Resonance Sensor Based on a Ge-Doped Defect and D-Shaped Microstructured Optical Fiber," *Sensors*, vol. 22, n. 10, pp. 1-17, 2022.
- [7] S. Ogawa, S. Fukushima, e M. Shimatani, "Graphene Plasmonics in Sensor Applications: A Review," *Sensors*, vol. 20, n. 3563, 2020.
- [8] M. M. de Araújo e J. P. da Silva, "The Design of a Glycerol Concentration Sensor Based on an LRSPP Hybrid Photonic Biosensor," *Sensors*, vol. 23, p. 2010, 2023.
- [9] J. P. da Silva, "Simulação por elementos finitos da propagação de feixes ópticos em estruturas fotônicas," *Tese de Doutorado*, UNICAMP, Brasil, 2003.
- [10] J. W. Weber, V. E. Calado, M. C. M. van de Sanden, "Optical constants of graphene measured by spectroscopic ellipsometry," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97, pp. 091904, 2010.