

Estudo de Nanoantenas Cornetas Plasmônicas para Aplicações em Banda Ultra Larga

Larissa da Silva Brito, Raquel Aline Araújo Rodrigues Felix e Hélder Alves Pereira

Resumo—As nanoantenas ópticas têm obtido considerável destaque em diversos trabalhos devido ao seu ótimo desempenho para aplicações em nanofotônica de banda larga. Nesta pesquisa, foram propostas duas nanoantenas plasmônicas cornetas, no formato piramidal projetadas para irradiar nos três comprimentos de onda das comunicações ópticas: 850 nm (352,9 THz), 1310 nm (229 THz) e 1550 nm (193,5 THz). A modelagem das nanoantenas foi realizada utilizando o COMSOL *Multiphysics*. As nanoantenas propostas apresentaram bom desempenho em termos de coeficiente de reflexão e ganho e, por conseguinte, adequadas para aplicações em nanoenlaces ópticos.

Palavras-Chave—Nanoantena Corneta Piramidal; Estudo Paramétrico; Simulação Computacional.

Abstract—Optical nanoantennas have gained considerable prominence in several works due to their optimal performance for broadband nanophotonics applications. In this research, two plasmonic horned, pyramidal-shaped nanoantennas designed to radiate at the three wavelengths of optical communications: 850 nm (352.9 THz), 1310 nm (229 THz), and 1550 nm (193.5 THz) were proposed. Modeling of the nanoantennas were performed using COMSOL *Multiphysics*. The proposed nanoantennas showed good performance in terms of directivity, reflection coefficient and gain and hence suitable for applications in optical nanoenlaces.

Keywords—Pyramidal Horn Nanoantenna; Parametric Study; Computational Simulation.

I. INTRODUÇÃO

A demanda da sociedade moderna em estabelecer comunicações aceleradas, integradas e de baixo custo, faz com que haja um crescimento em pesquisas científicas com foco em desenvolvimento de dispositivos cada vez mais modernos. Nesse contexto, a trajetória da nanofotônica surge como um conceito revolucionário na ciência e na tecnologia, permitindo estabelecer propriedades peculiares da luz e a interação entre a luz e os materiais em escala nanométrica [1].

As propriedades eletromagnéticas dos materiais permitiram o acesso a domínios ópticos complexos, mas que apresentam novidades nas telecomunicações, para o desenvolvimento de dispositivos capazes de confinar campos eletromagnéticos acima ou abaixo do comprimento de onda operante [2]. É por meio das propriedades eletromagnéticas das antenas ópticas, como o comprimento de onda efetivo menor do que o comprimento de onda da luz incidente, que é possível o confinamento de campos ópticos, e assim diversas aplicações envolvendo nanoescala também são desenvolvidas [3]. Algumas destas

nanotecnologias podem ser empregadas em coletor de energia óptico para alimentar sensores IoT sem fio, lasers plasmônicos, biossensores, circuitos ópticos, destruição de tecidos tumorais para tratamento de câncer, fibras ópticas e ou nanoenlace óptico sem fio [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11].

Em [6] são analisados nanoenlaces ópticos sem fio, formados por nanoantenas dipolo, transmissora e receptora. No trabalho também é investigado o casamento de impedância entre as antenas, e os autores concluem que um bom casamento de impedância não corresponde, necessariamente, a uma boa eficiência de irradiação. Uma vez que a eficiência total da antena depende da eficiência da antena e do casamento entre a mesma a linha de transmissão [12]. A eficiência total de uma antena pode ser obtida por:

$$\epsilon_0 = \epsilon_r \epsilon_c \epsilon_d. \quad (1)$$

Em que ϵ_r representa a eficiência total da antena, ϵ_r é a eficiência da adaptação e ϵ_c trata-se da eficiência do condutor.

Os trabalhos [10], [11], possuem em comum o estudo de nanoantenas cornetas para aplicações em alta frequência. Os autores de [10] analisaram uma nanoantena corneta plasmônica elipsoidal capaz de ser usada em aplicações nanofotônicas de banda larga e habilitada para operar na faixa de 160–400 THz. Por sua vez, o trabalho de [11] se concentrou na análise de nanoenlaces ópticos sem fio, utilizando nanoantena corneta de alto desempenho e visando aplicações 6G em 474 THz. Nesses trabalhos citados, observa-se a falta de um estudo paramétrico definido, e portanto, uma análise das diferentes variáveis dos modelos simulados, para efetivamente propor um modelo superior e otimizado na literatura.

Por conseguinte, neste trabalho, foi realizado um estudo paramétrico de nanoantena plasmônica corneta, modelada em duas geometrias (corneta piramidal e corneta chanfrada), com dois metais condutores (ouro [Au] e prata [Ag]), nas três frequências distintas do espectro óptico (193,5 THz, 229,0 THz e 352,5 THz). As simulações foram realizadas em uma plataforma computacional comercial e os resultados foram analisados em termos de ganho e coeficiente de reflexão. Na seção II é apresentada a estrutura da nanoantena simulada. Na Seção III é descrito o cenário e os parâmetros utilizados nas simulações. Na Seção IV, os resultados são mostrados e discutidos e, por fim, na Seção V são apresentadas as conclusões.

II. PROJETO DE NANOANTENA CORNETA PIRAMIDAL

As nanoantenas escolhidas para este trabalho possuem formato piramidal e têm dimensões 800 nm x 1100 nm [10]. Em

ambas as geometrias, foram preservadas as configurações da estrutura plasmônica híbrida, na qual o revestimento fino de dióxido de silício (SiO_2) é envolvido por cima pela camada condutiva metálica e por baixo pela camada de silício (Si). Na Figura 1 é possível visualizar as dimensões das nanoantenas abordadas neste trabalho, considerando as vistas: (a) e (c) 3D; (b) e (d) superior e (e) corte transversal mostrando as camadas.

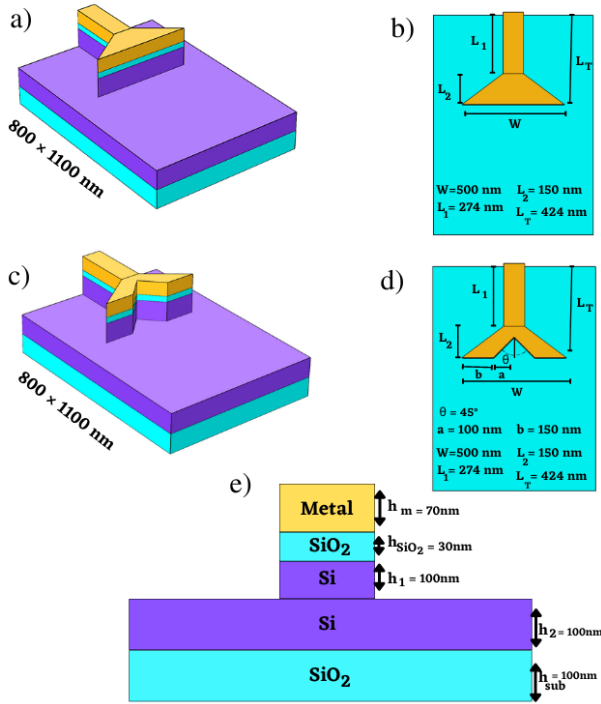


Fig. 1. Dimensões das nanoantenas utilizadas neste trabalho, corneta piramidal e corneta chanfrada, considerando as vistas: (a) e (c) 3D; (b) e (d) superior das nanoantenas e (e) transversal.

Em se tratando dos parâmetros simulados, as espessuras e larguras dos elementos irradiantes foram fixados em $w = 500$ nm, $L_1 = 274$ nm, $L_2 = 150$ nm e $L_T = 424$ nm, para a corneta piramidal; e feita uma abertura de 45° na nanoantena, embora mantendo o valor de $w = 500$ nm, ou seja de $a = 100$ nm e $b = 150$ nm, para a corneta piramidal chanfrada. Por se tratar de um estudo comparativo, manteve-se as espessuras de cada camada da nanoantena ($h_m = 70$ nm, $h_{\text{SiO}_2} = 30$ nm, $h_1 = 100$ nm, $h_2 = 100$ nm e $h_{\text{sub}} = 100$ nm) fixas para qualquer variação da geometria ou do material metálico (ouro ou prata).

III. CONFIGURAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

A modelagem das nanoantenas propostas neste trabalho foi realizada utilizando o método dos elementos finitos (MEF), técnica que vem se mostrando bastante útil na modelagem de nanoantenas ópticas pela fácil implementação e discretização dos parâmetros em ambiente computacional. Para uso dessa técnica, foi utilizado o COMSOL *Multiphysics*. O módulo de simulação trabalhado no ambiente de simulação foi o RF (*radio frequency*), módulo que atende aos projetos que fazem uso de propagação de ondas eletromagnéticas e efeitos de ressonância em aplicações de alta frequência [13]. Além disso,

o módulo permite o uso de técnicas para eficiência computacional, como o algoritmo AWE (Asymptotic Waveform Expansion), utilizado para reduzir o gasto computacional no cálculo dos parâmetros S [14].

As permissividades relativas do SiO_2 , Si, Au e Ag empregadas no estudo foram obtidas nas referências [15] e [16]. Os valores referentes às constantes dielétricas dos metais foram utilizados de acordo com a biblioteca de materiais do próprio COMSOL *Multiphysics*.

Foi realizado um estudo paramétrico de nanoantenas plasmônicas cornetas piramidais modeladas, variando o material da camada condutiva com dois metais (ouro e prata) nas três frequências do espectro óptico das comunicações 193,5 THz (1550 nm), 229 THz (1310 nm) e 352 THz (850 nm). Dessa forma, a escolha da metodologia deste trabalho possui foco na obtenção de parâmetros das nanoantenas como: coeficiente de reflexão, ganho e diagramas de irradiação 2D e 3D.

Após a construção da geometria em 3D no COMSOL e definição das constantes físicas dos materiais, foram implementadas as condições de contorno usando o *Frequency Domain* para estudos eletromagnéticos no domínio da frequência. Por meio do método numérico, foram realizados os cálculos da impedância de entrada e parâmetros S com o recurso *Numeric TEM Ports*, bem como os diagramas de irradiação com o recurso *Far-Field Domain* [17].

O procedimento básico do MEF consiste em modelar a geometria complexa, reduzindo a região em pequenas áreas, denominadas de elementos, para então solucionar o problema geral a partir das equações que governam os diversos elementos. Esses elementos compõem a malha que, por sua vez, pode assumir as formas triangulares, quadriláteras, tetraédricas ou hexagonais. Por meio da opção *User-controlled mesh* é possível definir o tamanho que deseja para a malha em cada região do domínio de solução, podendo assim refinar mais a malha em uma área específica de interesse, enquanto as demais regiões, que não apresentem grandes interesses na solução do problema, possam ter uma malha menos refinada [18].

IV. RESULTADOS

Na Figura 2 são ilustradas as malhas discretizadas no domínio da solução para as cornetas (a) piramidal e (b) chanfrada. A malha gerada, para modelos 3D, possui elementos tetraédricos. Foram gerados para o modelo (a) um total de 63678 elementos tetraédricos e para o modelo (b) 63882 elementos. A opção da malha executada foi escolhida a mais refinada possível nas superfícies de maior interesse - alimentação e dielétrico - e com isso se reduziu o custo computacional efetivamente para a solução do modelo.

A. Nanoantena Corneta Piramidal

Durante a execução do trabalho, foram obtidas as seguintes análises quantitativas de diagrama de irradiação 2D e 3D, ilustradas nas Figuras 3 e 4, das diferentes configurações da nanoantena piramidal, variando o material da camada condutiva e as frequências das comunicações ópticas.

Na Tabela I, observam-se os resultados dos parâmetros: coeficiente de reflexão e ganho da nanoantena.

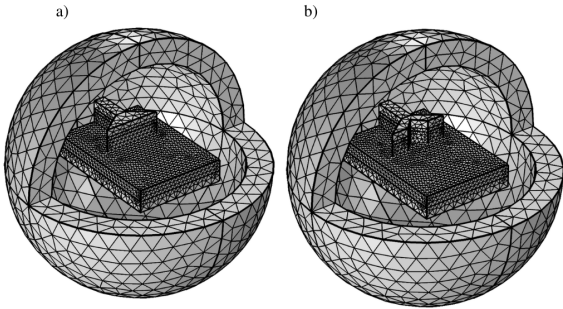


Fig. 2. Resultados da discretização da malha para os modelos: (a) corneta piramidal e (b) corneta chanfrada.

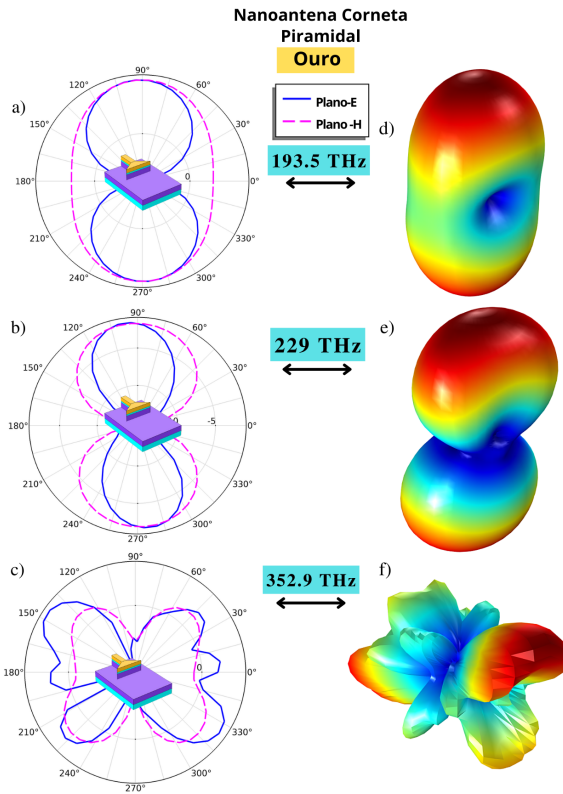


Fig. 3. Diagramas de irradiação da corneta piramidal em ouro: em 2D (a), (b) e (c); e em 3D (d), (e) e (f).

TABELA I

RESULTADOS DE S_{11} E GANHO DA NANOANTENA PIRAMIDAL, EM DB.

Metal	Parâmetros (dB)	193.5 THz	229.0 THz	352.9 THz
Au	S_{11}	-11,44	-11,46	-8,53
	Ganho	9,38	-1,54	11,60
Ag	S_{11}	-17,14	-17,31	-13,69
	Ganho	10,90	-1,98	13,29

Na Figura 5, são apresentados os resultados dos coeficientes de reflexão (S_{11}), em função da frequência, para a nanoantena simulada com elemento irradiante em ouro (Au) e em prata (Ag). Os resultados de S_{11} e ganho da nanoantena, em dB, estão especificados na Tabela I. No gráfico da Figura 5, o coeficiente de reflexão é comparado ao valor mínimo de

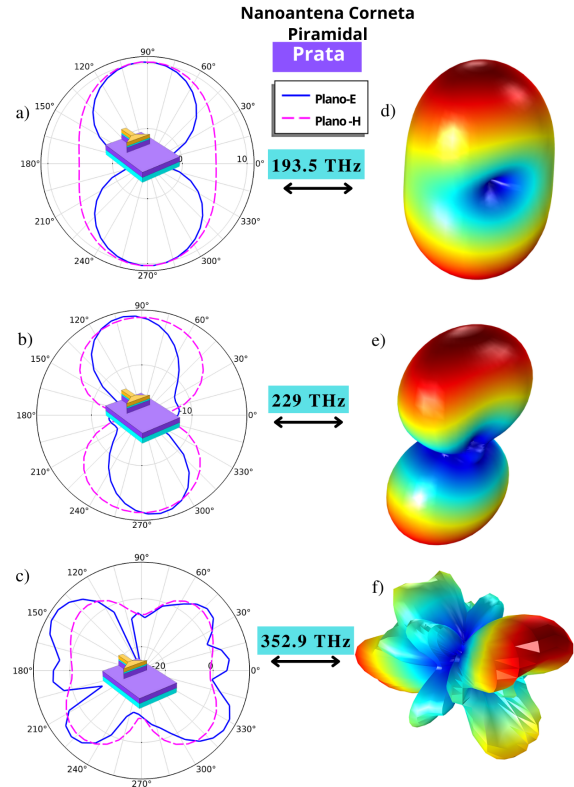


Fig. 4. Diagramas de irradiação da corneta piramidal em prata: em 2D (a), (b) e (c); e em 3D (d), (e) e (f).

-10 dB indicado pela linha tracejada em rosa. Nitidamente, percebe-se que a corneta piramidal com material condutivo em prata apresentou resultados mais satisfatórios de (S_{11}) em relação a mesma antena com metal condutivo em ouro.

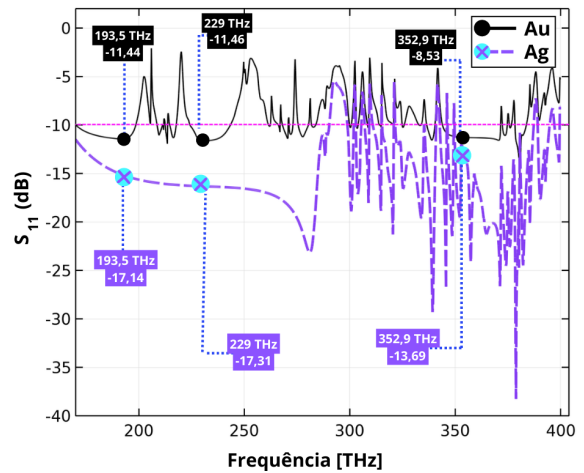


Fig. 5. Resultados dos coeficientes de reflexão (S_{11}) em função da frequência para a nanoantena simulada com elemento irradiante em ouro (Au) e em prata (Ag).

B. Nanoantena Corneta Chanfrada

Para a nanoantena piramidal chanfrada, os resultados de diagrama 2D e 3D estão ilustrados nas Figuras 6 e 7. Na

Tabela II, são descritos os valores obtidos de coeficiente de reflexão e ganho da piramidal chanfrada.

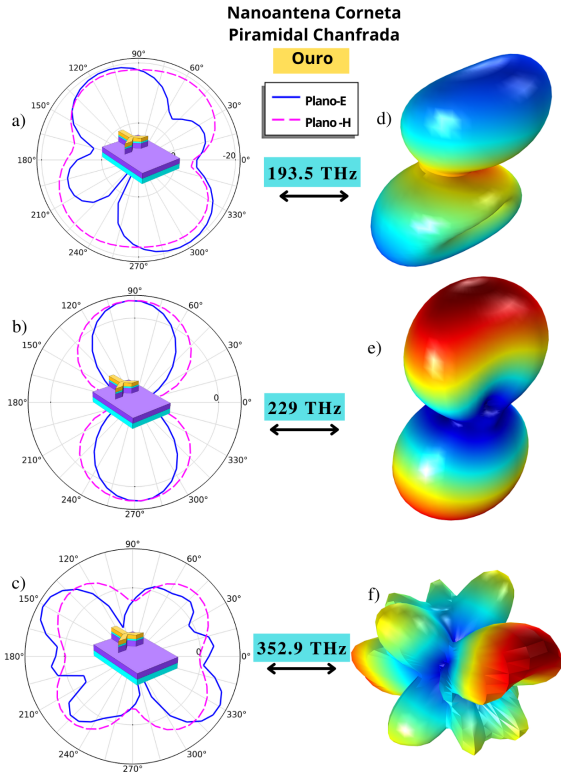


Fig. 6. Resultados dos coeficientes de reflexão (S_{11}), em função da frequência, para a nanoantena simulada com elemento irradiante em ouro (Au).

TABELA II
RESULTADOS DE S_{11} E GANHO DA NANOANTENA PIRAMIDAL CHANFRADA, EM DB.

Metal	Parâmetros (dB)	193.5 THz	229.0 THz	352.9 THz
Au	S_{11}	-25,49	-11,83	-5,08
	Ganho	10,34	2,63	7,38
Ag	S_{11}	-17,08	-11,95	-31,12
	Ganho	11,81	3,24	8,25

Na Figura 8 são apresentados os resultados dos coeficientes de reflexão (S_{11}), em função da frequência, para a nanoantena piramidal chanfrada com metais variando em ouro (Au) e em prata (Ag). Os resultados obtidos na Tabela II condizem com os encontrados pelo gráfico de S_{11} e ganho da nanoantena, em dB. Semelhantemente ao resultado da Figura 5, o resultado de coeficiente de reflexão (S_{11}) mostrado na Figura 8 para a corneta chanfrada foi mais satisfatório com o elemento irradiante em prata do que o mesmo em ouro.

Portanto, nas Figuras 3, 4, 6 e 7 observa-se para a frequência de 352,9 THz, que a presença de lobos laterais nos diagramas de irradiação 2D não causou a perda de diretividade e ganho da corneta. Os diagramas obtidos são satisfatórios para as frequências ópticas elevadas, garantindo a correta operação nas demais frequências. Além disso, para a corneta piramidal e corneta chanfrada, os diagramas de irradiação 3D em 193,5

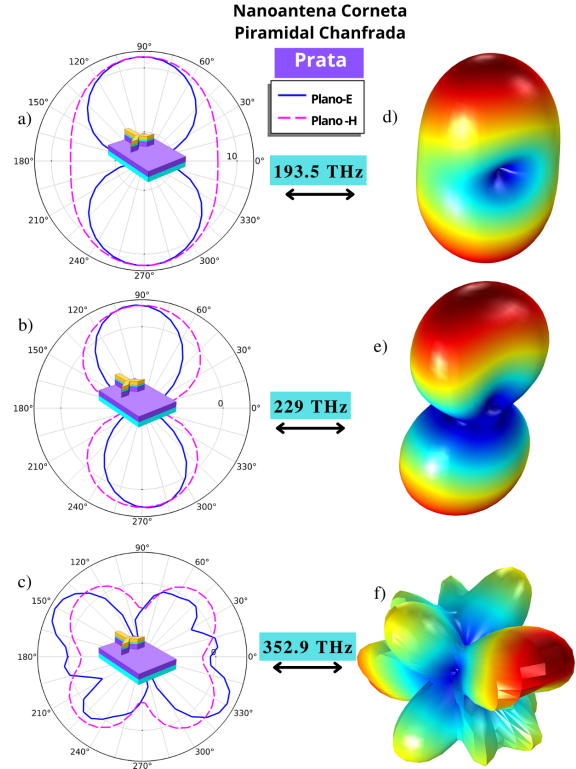


Fig. 7. Diagramas de irradiação 2D em (a), (b) e (c) e 3D em (d), (e) e (f) para a nanoantena piramidal chanfrada, com metal prata (Ag) na camada condutiva.

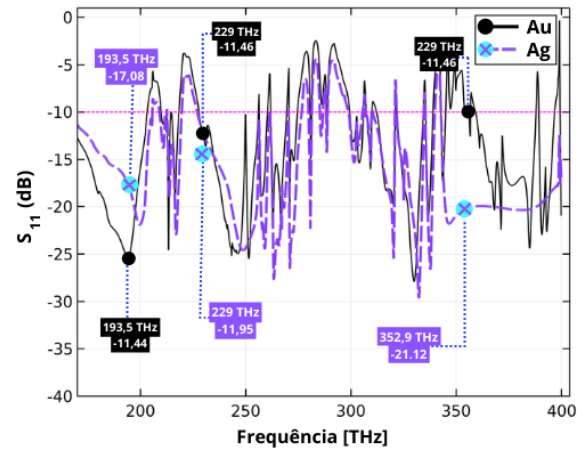


Fig. 8. Resultados dos coeficientes de reflexão (S_{11}) em função da frequência para a nanoantena simulada com elemento irradiante em ouro (Au) e em prata (Ag).

THz e 229 THz apresentam lóbulo central bem definido. Enquanto que na frequência de 352,9 THz, o lobulo principal dividiu-se. Esse tipo de comportamento ocorre independente do material condutivo empregado, apenas com a diminuição do comprimento de onda.

Com base nas considerações anteriores, apesar de ambas as nanoantenas apresentarem ótimos valores de ganho, corneta chanfrada em prata apresentou resultados mais satisfatórios em relação ao ganho, com destaque na frequência de 352,9 THz com valor de 13,29 dB. O coeficiente de reflexão S_{11} foi

satisfatório nas três frequências para ambas as cornetas com material condutivo de prata.

V. CONCLUSÕES

Nota-se que as nanoantenas simuladas, corneta piramidal e corneta chanfrada apresentam resultados satisfatórios nas três frequências do espectro óptico, sendo que individualmente, a nanoantena piramidal com elemento irradiante em ouro, apresentou um ganho mais elevado na frequência de 352,5 THz (13,296 dB), enquanto que a nanoantena modificada com prata apresentou um ganho mais elevado (11,81 dB), na frequência de 193,5 THz.

A corneta piramidal em ouro apresentou os piores resultados encontrados nas simulações para os parâmetros de ganho e coeficiente de reflexão nas frequências de 229 e 352,9 THz, respectivamente. Ademais, os resultados obtidos apresentam concordância com a literatura, sendo que as diferenças identificadas são devidas às aproximações adotadas na solução do MEF, e das geometrias aplicadas neste trabalho.

As nanoantenas corneta piramidal e corneta chanfrada podem operar na faixa óptica de 40 a 160 THz. Porém o modelo chanfrado com elemento irradiante em prata apresentou ganhos mais satisfatórios para as janelas de comprimento de onda da comunicação óptica de 850, 1310 e 1550 nm, e portanto, essa nanoantena é uma boa candidata para as aplicações propostas, abrindo a perspectiva das comunicações ópticas sem fio de alta capacidade em nanoescala.

REFERÊNCIAS

- [1] D. B. Mazulquim, “Projeto e fabricação de nanoestruturas plasmônicas para aplicações em óptica difrativa,” Ph.D. dissertation, Universidade de São Paulo, 2016.
- [2] S. A. Maier *et al.*, *Plasmonics: fundamentals and applications*. Springer, 2007, vol. 1.
- [3] P. Biagioni, J.-S. Huang, and B. Hecht, “Nanoantennas for visible and infrared radiation,” *Reports on Progress in Physics*, vol. 75, no. 2, p. 024402, 2012.
- [4] P. Livreri and F. Beccaccio, “Optical plasmonic nanoantenna-mwcnt diode energy harvester for solar powered wireless sensors,” in *IEEE Sensors*. IEEE, 2021, pp. 1–4.
- [5] M. Alavirad, L. Roy, and P. Berini, “Optimization of plasmonic nanodipole antenna arrays for sensing applications,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 20, no. 3, pp. 7–14, 2013.
- [6] J.-S. Huang, T. Feichtner, P. Biagioni, and B. Hecht, “Impedance matching and emission properties of nanoantennas in an optical nanocircuit,” *Nano letters*, vol. 9, no. 5, pp. 1897–1902, 2009.
- [7] D. DasGupta, G. von Maltzahn, S. Ghosh, S. N. Bhatia, S. K. Das, and S. Chakraborty, “Probing nanoantenna-directed photothermal destruction of tumors using noninvasive laser irradiation,” *Applied Physics Letters*, vol. 95, no. 23, p. 233701, 2009.
- [8] Q. Gao, F. Ren, and A. X. Wang, “Direct and efficient optical coupling into plasmonic integrated circuits from optical fibers,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 28, no. 11, pp. 1165–1168, 2016.
- [9] A. Alù and N. Engheta, “Wireless at the nanoscale: optical interconnects using matched nanoantennas,” *Physical review letters*, vol. 104, no. 21, p. 213902, 2010.
- [10] A. Nourmohammadi and M. Nikoufard, “Ultra-wideband photonic hybrid plasmonic horn nanoantenna with soi configuration,” *Silicon*, vol. 12, no. 1, pp. 193–198, 2020.
- [11] A. A. C. Alves, M. C. Melo, J. J. Siqueira, F. Zanella, J. R. Mejia-Salazar, and C. S. Arismar, “Plasmonic nanoantennas for 6g intra/inter-chip optical-wireless communications,” in *6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*. IEEE, 2020, pp. 1–4.
- [12] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & sons, 2015.
- [13] COMSOL Multiphysics 6.0, Inc (<https://www.comsol.com/rf-module>).
- [14] COMSOL Documentation, Inc (<https://doc.comsol.com/6.0/docserver/#!/com.comsol.help.comsol/helpdesk/helpdesk.html>).
- [15] E. D. Palik, *Handbook of optical constants of solids*. Academic press, 1998, vol. 3.
- [16] P. B. Johnson and R.-W. Christy, “Optical constants of the noble metals,” *Physical review B*, vol. 6, no. 12, p. 4370, 1972.
- [17] “Modeling Electromagnetic Waves and Periodic Structures”, (<https://www.comsol.com/blogs/your-guide-to-lumped-ports-in-the-rf-module/>).
- [18] M. Tabatabaian, *COMSOL5 for Engineers*. Stylus Publishing, LLC, 2015.