

بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. ۱۳۹۷ بهمن ۱۳۹۷



بررسی و تحلیل طول موج تشدید در آنتن نانو میله فلزی با پوشش دیالکتریک

محمود تلافى نوغانى

پژوهشگاه هوافضا (وزارت علوم، تحقیقات و فناوری)، تهران، ایران.

چکیده – کاهش قابل ملاحظه طول تشدید نسبت به نصف طول موج در آنتن نانومیله دوقطبی فلزی، امری اثبات شده است. وجـود پوشش دیالکتریک برروی هسته فلزی آنتن باعث تشدید این پدیده میشود. این پوشش میتواند نامطلوب (مثلا ناشی از خوردگی فلز) و یا مطلوب (مثلا به منظور ایجاد لایه محافظ برروی فلز) باشد. در این مقاله، روشی تحلیلی برای محاسبه طول موج تشدید (یا موثر) (رابه) آنتن نانومیله فلزی با پوشش دیالکتریک ارائه و با استفاده از آن، رفتار رابه برحسب جنس دیالکتریک و ضخامت مواد تشریح شده است. مقایسه نتایج حاصل از این تحلیل با نتایج شبیهسازی تمام موج آنتن حاکی از دقت مناسـب روش ارائـه شـده است.

كليد واژه- آنتن نورى، طول موج تشديد، نانوميله فلزى.

Analysis of Resonant Wavelength in Dielectric Coated Nanorod Metallic Antennas

Mahmoud Talafi Noghani

Aerospace Research Institute (Ministry of Science, Research and Technology), Tehran, Iran.

Abstract- It is known that the resonant length of a metallic dipole nanorod antenna is typically very much shorter than half a wavelength. Presence of a dielectric coating on the metallic core, intensifies this effect. The coating might be undesired (e.g. caused by metal corrosion) or desired (e.g. to protect metal from damage or corrosion). In this paper, an analytical method is presented to calculate the resonant (or effective) wavelength (λ_{eff}) of dielectric coated metallic nanorod antennas. Variation of λ_{eff} due to change in material properties and thicknesses is investigated. In order to validate the results, they are compared with those from full wave simulations approving the accuracy of the proposed method.

Keywords: Metallic nanorod, optical antenna, resonant wavelength.

۱ –مقدمه

یکی از نتایج پیشرفت تحقیقات در حوزههای نانوفوتونیک و پلاسمونیک طی یک دهه گذشته، تسری مفهوم آنتن از حوزه فرکانسهای مایکروویو و پایین تر به فرکانسهای نوری است. تلاشهای متعددی برای تعمیم تئوری آنتنهای مایکروویو به حوزه فرکانسهای نوری انجام شده و همچنان در حال پیگیری است [۱-۳]. بطور ویژه، لازم است قواعدی که در طراحی آنتنهای مایکروویو استفاده می شود به قواعد مناسب در حوزه فرکانسهای نوری تبدیل شود. یکی از این موارد، طول تشدیدی آنتن است. در آنتن دوقطبی فلزی مایکروویو، طول تشدیدی آنتن (Lres) تقریبا نصف طول موج فضای آزاد (۵٫) است. بررسیهای تئوری و آزمایشگاهی نشان میدهد که طول تشدیدی یک نانومیله فلزی دوقطبی به میزان قابل توجهی کوچکتر از نصف طول موج است (تا حدود ۱/۱۰) [۴]. در نتیجه، محاسبه دقیق طول تشدیدی آنتن در موارد مختلف حائز اهمیت است. یکی از این موارد، پوشاندن فلز با لایهای از دیالکتریک است. از بین فلزاتی که در آنتنهای نوری استفاده می شود، طلا و نقره متداولتر هستند. نقره از لحاظ تلفات و تقویت میدان الکتریکی محلی نسبت به طلا مزیت دارد اما به دلیل پایداری شیمیایی کمتر و خوردگی ناشی از واکنش با مولکولهای حاوی گوگرد در هوا که منجر به (Ag_2SO_4) ايجاد لايه سولفيد (Ag_2SO_4) يا سولفات نقره (برروی آن می شود، در بسیاری از کاربردها با طلا جایگزین می شود. این مسئله باعث شده که گاها ایده هایی از جمله استفاده از پوششهای محافظ [۵-۶] برروی فلز مطرح شود. در نتیجه، بررسی اثر حضور لایه دیالکتریک روی فلز برروى خصوصيات آنتنى و از جمله طولموج تشديد آن، چه برای بررسی تاثیر مواد ناخواسته (مثل سولفید یا سولفات)، چه برای بررسی تاثیر لایه محافظ و موارد دیگر حائز اهميت خواهد بود.



شکل ۱: ساختار آنتن نانومیله فلزی با پوشش دیالکتریک

ما در این مقاله، با تحلیل انتشار موج در یک نانومیله دولایه، اثر جنس و ضخامت مواد برروی طول موج تشدید آن را بررسی خواهیم نمود.

۲ -روش تحلیل

ساختار آنتن نانومیله در شکل ۱ نشان داده شده است. یک نانومیله فلزی با ضریب ($\mathcal{E}_m(\lambda)$ با لایهای از دیالکتریک (\mathcal{E}_a) پوشانده شده و در یک محیط پیرامونی (\mathcal{E}_s) که معمولا هوا فرض میشود قرار گرفته است.

برای محاسبه طول تشدید یک آنتن دوقطبی، فرض براین است که موج با ثابت فاز eta، وقتی از یک سر آنتن به سر ديگر حركت مى كند، اختلاف فاز π را تجربه مى كند. علاوه بر این، اثر راکتانس دو سر آنتن باعث یک تغییر فاز اضافه $eta L_{res} + arphi = \pi$ می توان نوشت: (arphi) می شود و در مجموع می توان نوشت: (arphi) حال اگر فرض کنیم که طول موج موثر (یا تشدیدی) آنتن دوقطبی، دو برابر طول تشدید آن است می توان نوشت و با توجه به تلفاتی بودن $\delta {=} 2 arphi / eta$ که در آن $\lambda_{e\!f\!f} {=} 2 \pi / eta {-} \delta$ فلز، ثابت فاز موج، بخش حقيقى ثابت انتشار باید β باید β باید β باید β باید β باید β باید β مودهای انتشاری موج در دستگاه مختصات استوانهای را حل کنیم. از آنجا که در ساختارهای فوق، فلز در مجاورت دىالكتريك قرار دارد، در واقع امواج در قالب پلاريتون پلاسمون سطحی و با مود TM_z در مرز فلز-دیالکتریک منتشر میشوند. شکل میدانها در نواحی سه گانه (شکل ۱) با استفاده از بردار پتانسیل (A) و با فرض اینکه دامنه

۳ ختايج و بحث

فرض می کنیم که آنتن از فلز نقره با پوشش دی الکتریک تشکیل شده باشد. پارامترهای تابع دی الکتریک نقره، با انطباق مدل درود بر نتایج اندازه گیری منابع معتبر برابرند با: $\lambda_v = 58.5 \ \mu m$ و $\mu = 135.5 \ nm$. $\varepsilon_{\infty} = 3.624$ و μ ا شکل ۲، طول موج موثر آنتن (λ_{eff}) که با رابطه (۴) شکل ۲، طول موج موثر آنتن (λ_{eff}) که با رابطه (۴) محاسبه شده، به ازای ضرایب دی الکتریک مختلف در محاسبه شده، به ازای ضرایب دی الکتریک مختلف در شعاع فلز ۵ م و ضخامت پوشش دی الکتریک نیز ۵ nm شعاع فلز ۵ nm و ضخامت پوشش دی الکتریک نیز ۵ nm به دو است. ضمن اینکه کاهش λ_{eff} با افزایش λ_{eff} نیز به دلیل افزایش ضریب دی الکتریک موثر کل ساختار، به دلیل افزایش ضریب دی الکتریک موثر کل ساختار،

حال فرض میکنیم که در اثر خوردگی نقره به مرور لایهای از سولفید نقره (Ag_2S) با ضریب دیالکتریک تقریبی 4.8 $=_{a}$ برروی آن تشکیل میشود. اثر این خوردگی برروی طول موج موثر آنتن در شکل ۳ آمده است. ملاحظه میشود که ایجاد خوردگی باعث کاهش قابل ملاحظه طول موج تشدیدی آنتن میشود. به عنوان مثال، در طول موج مخابراتی ۱۵۵۰nm، طول موج مثال، در طول موج مخابراتی ۱۵۵۰nm، طول موج مثال، در طول موج مخابراتی ۲۰۰m کاهش مییابد.

جهت تایید نتایج بدست آمده، آنتن نانومیله نقره به قطر ۲۰۱۳ با پوشش Ag₂S به ضخامت ۵nm و با طولهای ۱۱۵ و ۱۵۳ نانومتر که متناظر با طولموجهای مخابراتی ۱۳۰۰ و ۱۵۵۰ نانومتر هستند را در نرمافزار تمام موج CST شبیهسازی کرده و طول موج موثر آنها را با محاسبه پاسخ طیفی پراکندگی آنها بدست آوردیم. توزیع میدانهای الکتریکی و مغناطیسی آنتن در حالت تشدید در شکل ۴ آمده است. طول موجهای تشدیدی حاصل به ترتیب ۱۳۵۰ و ۱۶۳۰ نانومتر است که حاکی از دقت مناسب میدان در فلز و محیط پیرامونی با دور شدن از مرزها، افت میکند، به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$\begin{split} \overline{A} &= \Psi \widehat{z} \\ \begin{cases} \Psi_m &= c_m I_0 \left(\kappa_m \rho\right) e^{-j\gamma z} \\ \Psi_d &= \left(c_{d1} J_0 \left(\kappa_d \rho\right) + c_{d2} Y_0 \left(\kappa_d \rho\right)\right) e^{-j\gamma z} \\ \Psi_s &= c_s K_0 \left(\kappa_s \rho\right) e^{-j\gamma z} \end{split}$$
(1)

 I_n که در آن J_n و J_n به ترتیب توابع بسل نوع اول و دوم و I_n و I_n و I_n و I_n به ترتیب توابع بسل نوع اول و دوم و r_n هر ایب و κ_n و κ_n توابع بسل اصلاح شده نوع اول و دوم و κ_n ها، ضرایب مجهول هستند. اعداد موج در راستای عرضی عبارتند از: $y^2 - \kappa_s^2 = \varepsilon_0 \varepsilon_s k_0^2$ و $y^2 - \kappa_a^2 = \varepsilon_0 \varepsilon_m k_0^2$ $y^2 - \kappa_s^2 = \varepsilon_0 \varepsilon_s k_0^2$ و $\gamma^2 - \kappa_m^2 = \varepsilon_0 \varepsilon_m k_0^2$ H_{φ} جانچه مود غالب TM_0 را در نظر بگیریم، میدانهای F_{φ} و E_z F_{φ} و E_z محضور خواهند. با اعمال شرایط مرزی در محل $\varphi = a,b$

$$\frac{\kappa_m \varepsilon_d}{\kappa_d \varepsilon_m} \frac{I_0(\kappa_m a)}{I_1(\kappa_m a)} = \frac{J_0(\kappa_d a) + pY_0(\kappa_d a)}{J_1(\kappa_d a) + pY_1(\kappa_d a)}$$
(7)

$$\frac{-\kappa_s \varepsilon_d}{\kappa_d \varepsilon_s} \frac{K_0(\kappa_s b)}{K_1(\kappa_s b)} = \frac{J_0(\kappa_d b) + pY_0(\kappa_d b)}{J_1(\kappa_d b) + pY_1(\kappa_d b)}$$
([°])

که در آن $p=c_{d2}/c_{d1}$ با حل عددی معادلات پاشندگی فوق، κ_i مها بدست آمده و در نتیجه ثابت انتشار موج سطحی معین میشود. با فرض اینکه اختلاف فاز اضافی در یک سر آنتن را بتوان برابر با اختلاف فاز ناشی از انتشار موج سطحی به اندازه یک شعاع داخلی آنتن (a) تخمین زد [4]، آنگاه $\delta=4a$ و طول موج موثر آنتن با رابطه زیر محاسبه میشود:

$$\lambda_{eff} = \frac{2\pi}{\operatorname{Re}\left(\left[\kappa_s^2 + 4\pi^2 / \lambda^2\right]^{1/2}\right)} - 4a$$
 (f)

در محاسبات فوق، از تابع دیالکتریک فلز با استفاد از مدل درود (Drude) بصورت زیر میتوان استفاده کرد:

$$\varepsilon_{m}(\lambda) = \varepsilon_{\infty} - \frac{\lambda^{2}}{\lambda_{p}^{2} \left(1 + j\lambda / \lambda_{v}\right)}$$
 (Δ)

که در آن λ_p طول موج پلاسما و λ_v طول موج برخورد است.

بیست وپنجمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، ۹–۱۱ بهمن ۱۳۹۷

V/m 270 -243 216 189 162 -135 108 81 54 27 1.65e-05 🖣 A/m 0.35 🔺 0.315 -0.28 0.245 -0.21 -0.175 -0.14 0.105 0.07 0.035

شکل ۴: توزیع میدان الکتریکی (بالا) و مغناطیسی (پایین) در اطراف آنتن نانومیله در طول موج تشدید

مرجعها

- P. Bharadwaj et al., "Optical Antennas," Advances in Optics and Photonics, vol.1, pp. 438–483, 2009.
- [2] S. He et al, "Optical nanoantennas and metamaterials," *Materials Today*, vol. 12, pp. 16, 2009.
- [3] L. Novotny, "Optical antennas: A new technology that can enhance light-matter interactions," *The Bridge*. vol. 39, no. 4, pp. 14 20, 2009.
- [4] L. Novotny, "Effective wavelength scaling for optical antennas," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 98, no. 26, pp. 1–4, 2007.
- [5] J. Kalbacova *et al.*, "Chemical stability of plasmon-active silver tips for tip-enhanced Raman spectroscopy," *Nanospectroscopy*, vol. 1, no. 1, pp. 12–18, 2015.
- [6] J. C. Reed *et al.*, "Graphene-enabled silver nanoantenna sensors," *Nano Lett.*, vol. 12, no. 8, pp. 4090–4094, 2012.
- [7] M. T. Noghani and M. H. V. Samiei, "Analysis and Optimum Design of Hybrid Plasmonic Slab Waveguides," *Plasmonics*, vol. 8, no. 2, pp. 1155– 1168, 2013.

تحلیل ارائه شده است. برای افزایش دقت، لازم است از تخمینی دقیقتر از 4a برای اثر راکتانس انتهای آنتن استفاده شود. شایان ذکر است که یک دوقطبی عملی متشکل از دو جزء شایان ذکر است که دارای یک شکاف کوچک جهت اعمال مجزاست که دارای یک شکاف کوچک جهت اعمال تحریک است. بحث این مقاله، مستقل از تحریک و با احتساب اینکه اثر شکاف توسط مدار تطبیق امپدانس قابل جبران است ارائه شده است.

۴ ختیجهگیری

یک رویکرد تحلیلی برای محاسبه طولموج تشدید آنتن نانومیله با پوشش دیالکتریک ارائه شد. نشان دادیم که حضور پوشش دیالکتریک میتواند تاثیر قابل ملاحظهای برروی طولموج تشدیدی آنتن داشته باشد و باید مورد توجه قرار گیرد. این رویکرد تحلیلی، برای طراحی نانوآنتنهای تک عنصری و آرایه قابل استفاده خواهد بود.



شکل ۲: طول موج موثر نانومیله نقره با شعاع a=5 nm برحسب ضرایب مختلف پوشش دیالکتریک به ضخامت ۵ nm



شکل ۳: اثر خوردگی نقره و تشکیل پوشش Ag2S (Ea=4.8) برروی طول موج موثر آنتن نانومیله