



بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و  
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس  
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،  
دانشگاه شیراز،  
شیراز، ایران.  
۱۳۹۷ بهمن ۹-۱۱



## بررسی و تحلیل طول موج تشدید در آنتن نانو میله فلزی با پوشش دی الکتریک

محمود تلافی نوغانی

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. وجود پوشش دی الکتریک بر روی هسته فلزی آنتن باعث تشدید این پدیده می شود. این پوشش می تواند نامطلوب (مثلا ناشی از خوردگی فلز) و یا مطلوب (مثلا به منظور ایجاد لایه محافظ بر روی فلز) باشد. در این مقاله، روشی تحلیلی برای محاسبه طول موج تشدید (یا موثر)  $(\lambda_{eff})$  آنتن نانومیله فلزی با پوشش دی الکتریک ارائه و با استفاده از آن، رفتار  $\lambda_{eff}$  بر حسب جنس دی الکتریک و ضخامت مواد تشریح شده است. مقایسه نتایج حاصل از این تحلیل با نتایج شبیه سازی تمام موج آنتن حاکی از دقت مناسب روش ارائه شده است.

کلید واژه- آنتن نوری، طول موج تشدید، نانومیله فلزی.

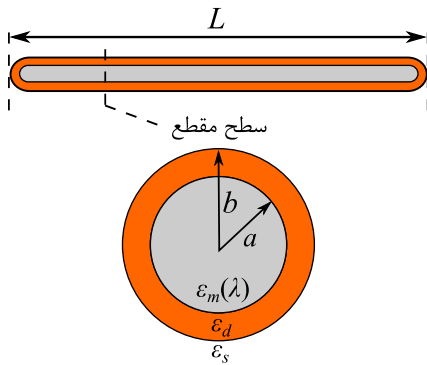
## Analysis of Resonant Wavelength in Dielectric Coated Nanorod Metallic Antennas

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  $(\lambda_{eff})$  of dielectric coated metallic nanorod antennas. Variation of  $\lambda_{eff}$  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.



شکل ۱: ساختار آنتن نانومیله فلزی با پوشش دی الکتریک

ما در این مقاله، با تحلیل انتشار موج در یک نانومیله دولایه، اثر جنس و ضخامت مواد بر روی 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  $\epsilon_m(\lambda)$ ، با لایه‌ای از دی الکتریک ( $\epsilon_d$ ) پوشانده شده و در یک محیط پیرامونی ( $\epsilon_s$ ) که معمولاً هوا فرض می‌شود قرار گرفته است.

برای محاسبه طول تشدید یک آنتن دوقطبی، فرض بر این است که موج با ثابت فاز  $\beta$ ، وقتی از یک سر آنتن به سر دیگر حرکت می‌کند، اختلاف فاز  $\pi$  را تجربه می‌کند. علاوه بر این، اثر راکتانس دو سر آنتن باعث یک تغییر فاز اضافه ( $\varphi$ ) می‌شود و در مجموع می‌توان نوشت:  $\beta L_{res} + \varphi = \pi$ . حال اگر فرض کنیم که طول موج موثر (یا تشدید) آنتن دوقطبی، دو برابر طول تشدید آن است می‌توان نوشت  $\lambda_{eff} = 2\pi/\beta - \delta$  که در آن  $\delta = 2\varphi/\beta$  و با توجه به تلفاتی بودن فلز، ثابت فاز موج، بخش حقیقی ثابت انتشار ( $\beta = \text{Re}[\gamma] = \text{Re}[\beta - j\alpha]$ ) خواهد بود. برای محاسبه  $\beta$  باید مدهای انتشاری موج در دستگاه مختصات استوانه‌ای را حل کنیم. از آنجا که در ساختارهای فوق، فلز در مجاورت دی الکتریک قرار دارد، در واقع امواج در قالب پلاریتون پلاسمون سطحی و با مود  $TM_z$  در مرز فلز-دی الکتریک منتشر می‌شوند. شکل میدان‌ها در نواحی سه‌گانه (شکل ۱) با استفاده از بردار پتانسیل (A) و با فرض اینکه دامنه

## ۱- مقدمه

یکی از نتایج پیشرفت تحقیقات در حوزه‌های نانوفوتونیک و پلاسمونیک طی یک دهه گذشته، تسری مفهوم آنتن از حوزه فرکانسهای میکروویو و پایین تر به فرکانسهای نوری است. تلاشهای متعددی برای تعمیم تئوری آنتنهای میکروویو به حوزه فرکانسهای نوری انجام شده و همچنان در حال پیگیری است [۱-۳]. بطور ویژه، لازم است قواعدی که در طراحی آنتنهای میکروویو استفاده می‌شود به قواعد مناسب در حوزه فرکانسهای نوری تبدیل شود. یکی از این موارد، طول تشدید آنتن است. در آنتن دوقطبی فلزی میکروویو، طول تشدید آنتن ( $L_{res}$ ) تقریباً نصف طول موج فضای آزاد ( $\lambda_0$ ) است. بررسیهای تئوری و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که طول تشدید یک نانومیله فلزی دوقطبی به میزان قابل توجهی کوچکتر از نصف طول موج است (تا حدود ۱/۱۰) [۴]. در نتیجه، محاسبه دقیق طول تشدید آنتن در موارد مختلف حائز اهمیت است. یکی از این موارد، پوشاندن فلز با لایه‌ای از دی الکتریک است. از بین فلزاتی که در آنتنهای نوری استفاده می‌شود، 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 ایجاد لایه سولفید ( $Ag_2S$ ) یا سولفات نقره ( $Ag_2SO_4$ ) بر روی آن می‌شود، در بسیاری از کاربردها با طلا جایگزین می‌شود. این مسئله باعث شده که گاهی ایده‌هایی از جمله استفاده از پوششهای محافظ [۵-۶] بر روی فلز مطرح شود. در نتیجه، بررسی اثر حضور لایه دی الکتریک روی فلز بر روی خصوصیات آنتنی و از جمله طول موج تشدید آن، چه برای بررسی تاثیر مواد ناخواسته (مثل سولفید یا سولفات)، چه برای بررسی تاثیر لایه محافظ و موارد دیگر حائز اهمیت خواهد بود.

### ۳ نتایج و بحث

فرض می‌کنیم که آنتن از فلز نقره با پوشش دی‌الکتریک تشکیل شده باشد. پارامترهای تابع دی‌الکتریک نقره، با انطباق مدل درود بر نتایج اندازه‌گیری منابع معتبر برابرند با:  $\epsilon_{\infty}=3.624$ ،  $\lambda_p=135.5$  nm و  $\lambda_v=58.5$   $\mu$ m [۷]. در شکل ۲، طول موج موثر آنتن ( $\lambda_{eff}$ ) که با رابطه (۴) محاسبه شده، به ازای ضرایب دی‌الکتریک مختلف در محدوده ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ نانومتر نشان داده شده است. شعاع فلز ۵ nm و ضخامت پوشش دی‌الکتریک نیز ۵ nm ( $b=10$  nm) فرض شده است. رفتار نسبتاً خطی  $\lambda_{eff}$  نسبت به  $\lambda$  مشهود است. ضمن اینکه کاهش  $\lambda_{eff}$  با افزایش  $\epsilon_d$  نیز به دلیل افزایش ضریب دی‌الکتریک موثر کل ساختار، منطقی است.

حال فرض می‌کنیم که در اثر خوردگی نقره به مرور لایه‌ای از سولفید نقره ( $Ag_2S$ ) با ضریب دی‌الکتریک تقریبی  $\epsilon_d=4.8$  بر روی آن تشکیل می‌شود. اثر این خوردگی بر روی طول موج موثر آنتن در شکل ۳ آمده است. ملاحظه می‌شود که ایجاد خوردگی باعث کاهش قابل ملاحظه طول موج تشدید آنتن می‌شود. به عنوان مثال، در طول موج مخابراتی ۱۵۵۰ nm، طول موج تشدید آنتن از ۱۰۲۰ nm در حالت نقره بدون پوشش تا حدود ۲۰۰ nm به ازای ضخامت ۱۵ نانومتری  $Ag_2S$  کاهش می‌یابد.

جهت تایید نتایج بدست آمده، آنتن نانومیله نقره به قطر ۱۰ nm با پوشش  $Ag_2S$  به ضخامت ۵ nm 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 تشدید 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 می‌شود:

$$\bar{A} = \Psi \bar{z} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \Psi_m = c_m I_0(\kappa_m \rho) e^{-j\gamma z} \\ \Psi_d = (c_{d1} J_0(\kappa_d \rho) + c_{d2} Y_0(\kappa_d \rho)) e^{-j\gamma z} \\ \Psi_s = c_s K_0(\kappa_s \rho) e^{-j\gamma z} \end{cases}$$

که در آن  $J_n$  و  $Y_n$  به ترتیب توابع بسل نوع اول و دوم و  $I_n$  و  $K_n$  توابع بسل اصلاح شده نوع اول و دوم و  $c_i$  ها، ضرایب مجهول هستند. اعداد موج در راستای عرضی عبارتند از:  $\gamma^2 - \kappa_m^2 = \epsilon_0 \epsilon_m k_0^2$ ،  $\gamma^2 - \kappa_d^2 = \epsilon_0 \epsilon_d k_0^2$  و  $\gamma^2 - \kappa_s^2 = \epsilon_0 \epsilon_s k_0^2$  چنانچه مود غالب  $TM_0$  را در نظر بگیریم، میدانهای  $H_\phi$ ،  $E_\rho$  و  $E_z$  حضور خواهند. با اعمال شرایط مرزی در محل  $\rho=a, b$  به دو رابطه پاشندگی زیر خواهیم رسید:

$$\frac{\kappa_m \epsilon_d I_0(\kappa_m a)}{\kappa_d \epsilon_m I_1(\kappa_m a)} = \frac{J_0(\kappa_d a) + p Y_0(\kappa_d a)}{J_1(\kappa_d a) + p Y_1(\kappa_d a)} \quad (2)$$

$$\frac{-\kappa_s \epsilon_d K_0(\kappa_s b)}{\kappa_d \epsilon_s K_1(\kappa_s b)} = \frac{J_0(\kappa_d b) + p Y_0(\kappa_d b)}{J_1(\kappa_d b) + p Y_1(\kappa_d b)} \quad (3)$$

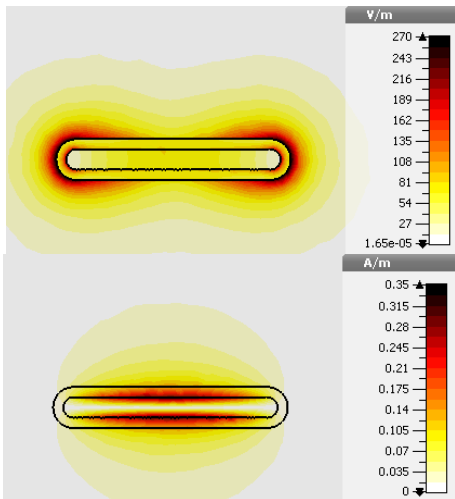
که در آن  $p=c_{d2}/c_{d1}$  با حل عددی معادلات پاشندگی فوق،  $\kappa_i$  ها بدست آمده و در نتیجه ثابت انتشار موج سطحی معین می‌شود. با فرض اینکه اختلاف فاز اضافی در یک سر آنتن را بتوان برابر با اختلاف فاز ناشی از انتشار موج سطحی به اندازه یک شعاع داخلی آنتن ( $a$ ) تخمین زد [۴]، آنگاه  $\delta=4a$  و طول موج موثر آنتن با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

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

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

$$\epsilon_m(\lambda) = \epsilon_\infty - \frac{\lambda^2}{\lambda_p^2 (1 + j\lambda / \lambda_v)} \quad (5)$$

که در آن  $\lambda_p$  طول موج پلاسما و  $\lambda_v$  طول موج برخورد است.



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

#### مرجع‌ها

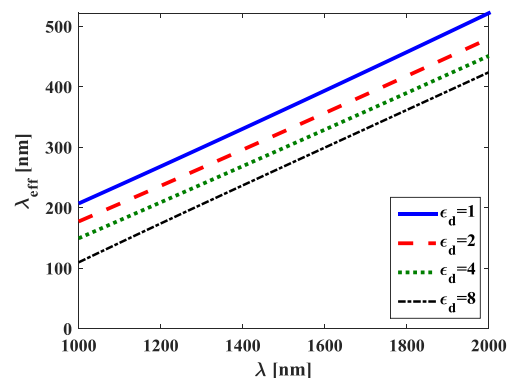
- [1] P. Bharadwaj *et al.*, "Optical Antennas," *Advances in Optics and Photonics*, vol.1, pp. 438–483, 2009.
- [2] S. He *et al.*, "Optical nanoantennas and metamaterials," *Materials Today*, vol. 12, pp. 16, 2009.
- [3] L. Novotny, "Optical antennas: A new technology that can enhance light-matter 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.

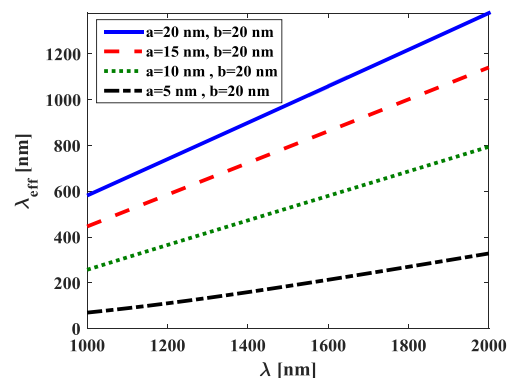
شایان ذکر است که یک دوقطبی عملی متشکل از دو جزء مجزاست که دارای یک شکاف کوچک جهت اعمال تحریک است. بحث این مقاله، مستقل از تحریک و با احتساب اینکه اثر شکاف توسط مدار تطبیق امپدانس قابل جبران است ارائه شده است.

#### ۴ نتیجه‌گیری

یک رویکرد تحلیلی برای محاسبه طول موج تشدید آنتن نانومیله با پوشش دی‌الکتریک ارائه شد. نشان دادیم که حضور پوشش دی‌الکتریک می‌تواند تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی طول موج تشدید 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 بر حسب ضرایب مختلف پوشش دی‌الکتریک به ضخامت ۵ nm



شکل ۳: اثر خوردگی نقره و تشکیل پوشش  $Ag_2S$  ( $\epsilon_d=4.8$ ) بر روی طول موج موثر آنتن نانومیله