بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

نشر تک جهت آنتن پلاسمونی هیبریدی موج رونده با استفاده از فراماده با ثابت دی-الکتریک نزدیک صفر

فاطمه تقیان[۱]، وحید احمدی[۱]، لیلا یوسفی[۲] و علیرضا مبینی[۱]

[۱]آزمایشگاه تحقیقاتی نانواپتوالکترونیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت‌مدرس، تهران، ایران

[۲]دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده - در این مقاله روش جدیدی برای نشر تک‌جهت آنتن پلاسمونی هیبریدی شکافدار موجبری در حضور تیغه‌ای از فراماده با ثابت دی‌الکتریک نزدیک صفر در فرکانسهای نوری ارائه شده است. دیده میشود که با قرار دادن این تیغه بر روی آنتن پلاسمونی و با انتخاب صحیح ضریب شکست، مکان و ضخامت آن، میتوان جهت‌مندی آنتن را در فرکانسهای نوری بهبود بخشید. نتایج شبیه‌سازی نشان میدهد که با استفاده از ساختارهای فراماده ایده‌آل با ثابت دی‌الکتریک منفی نزدیک صفرو ثابت نفوذپذیری مغناطیسی برابر با یک میتوان جهت‌مندی آنتنهای پلاسمونی هیبریدی را به میزان ۳.۶۶dBi بهبود داد. ساختار ثابت دی‌الکتریک نزدیک به صفر واقعی با استفاده از نانوکامپوزیت‌های فلزی محقق و با مدل براگمن پیاده‌سازی شده است، استفاده از این تیغه‌ی فراماده افزایش میزان جهت‌دهی آنتنهای پلاسمونی هیبریدی را به میزان ۲.۴۴dBi نشان میدهد، اما به دلیل تلف‌دار بودن ساختار واقعی محقق شده با نانوکامپوزیتهای فلزی میزان راندمان آنتن حدود ۱۴٪ کاهش می‌یابد.

کلید واژه- آنتن پلاسمونی هیبریدی، فراماد با ثابت دی‌الکتریک نزدیک صفر، جهت‌مندی بهبود یافته.

Unidirectional Emission of Hybrid Plasmonic Travelling-wave Antenna Using ENZ Metamaterials

Fatemeh Taghian[1], Vahid Ahmadi[1], Leila Yousefi[2] and Alireza Mobini[1]

[1] Nano-Optoelectronic Research Lab, Department of Electrical and Computer Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
[2] Department of Electrical and Computer Engineering, Tehran University, Tehran, Iran

Abstract- The radiation properties of a hybrid plasmonic travelling wave antenna in the presence of an epsilon near zero (ENZ) metamaterial layer at optical frequencies are investigated. By choosing the best position, thickness and refractive index of this layer the directivity of the antenna is improved. Simulation results show that by using ideal ENZ metamaterial with negative ENZ and magnetic permeability equal one, the directivity of hybrid plasmonic antenna is enhanced by 3.66dBi. The actual structure of the ENZ metamaterial implemented using metallic nanocomposites and is modeled by Brugman model. Using this ENZ slab on top of the hybrid plasmonic antenna enhances directivity of antenna 2.44dBi, But the loss of metallic nanocomposite causes decreasement of efficiency about 14%.

Keywords: Hybrid Plasmonic Travelling wave Antenna, Epsilon Near Zero (ENZ) Metamaterial, Enhanced Directivity.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-15]

۱- مقدمه

تغییرات فاز نزدیک به صفر امواج الکترومغناطیسی در داخل فراماده ENZ، استفاده از آنها را برای نشر جهت‌مند و جهت‌دهی به موج تابشی پیشنهاد میکند. همچنین قطبش منفی ذاتی این فراماده ENZ، کاربردهای ذاتی آنها را در شفافیت الکترومغناطیسی و استتارشدگی غیرقابل رویت توانا می‌سازد. نفوذپذیری نزدیک به صفر در فلزات نادر، نیمه‌هادیهای آلاییده شده، دی-الکتریکهای قطبی و اکسیدهای رسانای شفاف موجود میباشد[۱]. باتوجه به این که فلزات، فرکانسهای پلاسما را در رژیم فرابنفش ایجاد می کنند، وارد کردن فلزات نادر که در داخل زمینه دی‌الکتریک قرار داده شده برای سنتز مواد ENZ در حوزه نور مرئی و فرکانسهای فروسرخ نزدیک بر اساس تئوری محیط موثر[۲] به کار می‌رود. رفتار ENZ با استفاده از موجبرهای پوشش داده شده با فلز در فرکانس قطع [3] ، نانوسیمهای طلا یا نقره رشد داده شده بر روی الگوی آلومینای متخلخل[۴، ۵] و ساختارهای چندلایه فلز-دی الکتریک [۱] محقق می شوند. فراماد چندلایه برای تحقق عملکردهای اپتیکی یکتا با ضریب شکست منفی [۶، ۷] محقق شده‌اند. در این مقاله، روش جدیدی برای افزایش جهت‌مندی آنتنهای پلاسمونی هیبریدی با استفاده از فراماد با ثابت دی‌الکتریک نزدیک به صفر در فرکانسهای نوری پیشنهاد شده است. ساختار فرامادهی پیشنهادی با استفاده از نانوکامپوزیتهای فلزی که ترکیبی از فلز نقره در مادهی دی‌الکتریک آلومینا میباشد، محقق شده است. در این مقاله، ابتدا در مورد نحوهی تحقق فراماده با ثابت دی الکتریک نزدیک به صفر با استفاده از نانوکامپوزیتهای فلزی در فرکانس ۴۰۰ تراهرتز بحث می‌شود. سپس در مورد طراحی و تحلیل آنتنهای پلاسمونی هیبریدی بحث خواهد شد و پس از آن در مورد عملکرد آنتنهای پلاسمونی هیبریدی در حضور تیغه‌ای از فراماد با ثابت دی الکتریک نزدیک به صفرصحبت خواهد شد.

۲- فیزیک و تئوری

۲-۱- فراماد با ثابت دی الکتریک نزدیک صفر و افزایش جهت‌مندی

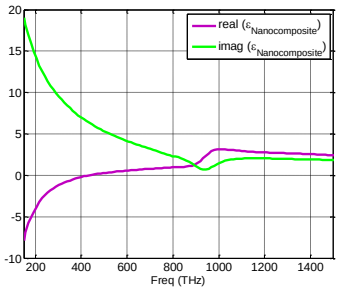
یکی از کاربردهای فراماد بصورت تیغه‌های لنزی در مسیر تشعشع آنتن برای افزایش بهره و جهت‌دهی میباشد. فرض کنید که روزنه‌ای در حال تشعشع به فضای آزاد است و ضریب شکست در محل تشعشع n_1 و ضریب شکست فضای آزاد $n_2=1$ است. حال با در نظر گرفتن قانون شکست اسنل میتوان این طور گفت که اگر پوشش روی روزنه، فراماده ای با ضریب شکست $n_2 \approx 0$ باشد زوایای خروجی θ_2 برای همه شعاعها با هر زاویه θ_1 نزدیک به صفر خواهد شد چرا که $\theta_2 = \sin^{-1}(\frac{n_2}{n_1}\sin\theta_1)$ است. این امر موجب می‌شود که همه پرتوهای شکسته شده در هوا شبه‌موازی شده و تشکیل موج شبه‌تخت میدهند. بنابراین یک تشعشع بسیار جهت‌دار به دست می آید [۸]. از آنجا که $n=\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}$ است، ضریب شکست نزدیک به صفر تنها به شرطی به دست می آید که $\varepsilon_r \approx 0$ و یا $\mu_r \approx 0$ باشد، که این دوحالت تنها با استفاده از ساختارهای فراماد و تحت شرایط خاص قابل حصول هستند.

۳- تحقق ساختار فراماده ثابت دی الکتریک نزدیک صفر با استفاده از نانوکامپوزیتهای فلزی

نانوکامپوزیت فلزی، به محیط دی‌الکتریک شامل نانوذرات فلزی است که به علت اثر پلاسمون سطح قوی ونیز اثر غیرخطی مورد توجه قرار گرفته‌اند. مدلهای مختلفی برای ثابت دی‌الکتریک موثر ساختارهای نانوکامپوزیت فلزی پیشنهاد شده است، از جمله مدل ماکسول-گارنت، ماکسول-گارنت اصلاح-شده[۹]، مدل براگمن و دیگر مدلها برای شرایطی که چگالی نانوذرات در برابر چگالی ماده میزبان قابل ملاحظه باشد از معادلاتی مشهور به مدل براگمن استفاده می شود. مدل براگمن حاصل ترکیب دو یا چند ماده با چگالیهای نسبتاً برابر و پارامترهای نوری خطی و غیرخطی متفاوت هستند. پارامتر خطی در این محیط که توسط براگمن[۱۰] پیشنهاد شده و لندور [۱۱] و اسپنس [۱۲] آن را توسعه دادند، به صورت معادله‌ی (۱) تعریف میشود:

$$f_a \frac{\varepsilon_a - \varepsilon_{eff}}{\varepsilon_a + 2\varepsilon_{eff}} + f_b \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_{eff}}{\varepsilon_b + 2\varepsilon_{eff}} \qquad (۱)$$

که در این مقاله، برای به دست آوردن نانوکامپوزیتی با ثابت دی الکتریک نزدیک به صفر از ماده ی نقره با در صد حجمی ۴۰٪ درون ماده ی دی الکتریک آلومینا (Al_2O_3) با درصد حجمی ۶۰٪ با ثابت دی الکتریکهای به دست آمده از مرجع[۱۳] استفاده شده است. مقادیر حقیقی و موهومی ثابت دی‌الکتریک نانوکامپوزیت به دست آمده مطابق شکل ۱ می‌باشد.



شکل۱- قسمتهای حقیقی و موهومی ثابت دی الکتریک نانوکامپوزیت نقره در آلومینا.

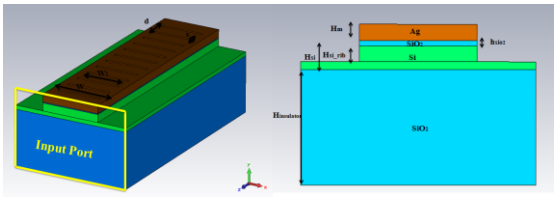
همان‌طور که در این شکل دیده میشود، نانوکامپوزیت فلزی در فرکانس ۴۰۰ تراهرتز معادل طول موج ۷۵۰ نانومتر دارای خاصیت ثابت دی

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-15]

الکتریک نزدیک صفر میباشد. البته با تغییر پارامترهای مدل براگمن مانند محیطهای تشکیل‌دهنده‌ی دی‌الکتریک و فلز و درصد حجمی آنها میتوان خاصیت ثابت دی الکتریک نزدیک صفر را در فرکانسهای مختلف به دست آورد. بهبود جهت‌مندی آنتن در فرکانسهای نوری مانند ۴۰۰ تراهرتز به دلیل کاربرد این فرکانس در آشکارسازهای نوری و سلولهای خورشیدی می باشد.

۴- طراحی آنتن پلاسمونی هیبریدی در فرکانس ۴۰۰ تراهرتز

طراحی آنتن پلاسمونی هیبریدی شکافدار برای عملکرد در طول موج ۷۵۰ نانومتر پیشنهاد میشود. در اینجا تئوری فلوکه به همراه تئوری پلاسمون سطحی برای ایجاد فرمولهای تحلیلی برای طراحی و تحلیل استفاده شده و روش عددی ۳بعدی تمام موج FDFD با استفاده از نرم افزار CST برای طراحی و تحلیل مورداستفاده قرار می گیرد. در اینجا از محصورشدگی مود زیر طول‌موج و خواص تلفات کم ساختارهای پلاسمونی هیبریدی برای ایجاد آنتن اپتیکی بسیار جهت‌مند و با راندمان بالا استفاده میکنیم. ساختار آنتن پیشنهادی در شکل ۲ نشان داده شده است که آنتن برپایه‌ی ساختار هیبریدی پلاسمونی طراحی شده است که در آن ماده‌ای با ضریب شکست کمتر SiO_2 بین ماده ای با ضریب شکست بالاتر سیلیکون(Si) و فلز نقره (Ag)قرار گرفته است.



شکل۲- شماتیک آنتن پلاسمونی هیبریدی موج رونده.

بر طبق تئوری Floquet با توجه به این که ساختار متناوب میباشد، مولفه ی y میدان الکتریکی در داخل آنتن بر اساس بسط سری فوریه به صورت زیر نوشته می‌شود[۱۴]:

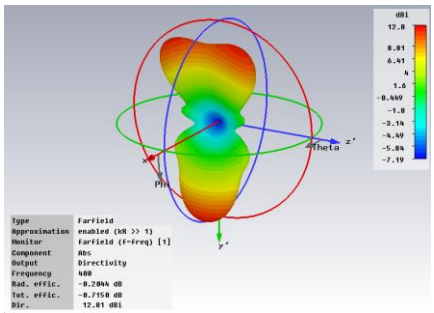
$$E_y(x,z)=\sum_{n=-\infty}^{\infty}E_{y,n}e^{-jK_{z,n}z},K_{z,n}=j\alpha+\beta_{z,0}+2n\frac{\pi}{d} \qquad (۲)$$

که در این رابطه n مرتبه ی هارمونیک فضایی مود فلوکه، K_{zn} عدد موج مود فلوکه مرتبه n، E_{yn} وزن مود مرتبه nام، α میزان تضعیف میدان، d میزان تناوب ساختار و β_{z0} عدد موج مود پلاسمونی هیبریدی موجبر هنگامی که هیچ شکافی وجود ندارد میباشد.

در اینجا آنتن را به نحوی طراحی میکنیم که تنها مود فلوکه مرتبه اول، بیم تشعشعی ما را بسازد و بقیه مودهای فلوکه مرتبه n امواج میرا باشند.

$$\left|real\,(K_{z,-1})\right|<\beta_0 \quad or \quad \left|n_{eff}\,\beta_0-\frac{2\pi}{d}\right|<\beta_0 \qquad (۳)$$

که در این رابطه β_0 عدد موج هوا و n_{eff} ضریب شکست موثر مود پلاسمونی موجبر پلاسمونی هیبریدی بدون شکاف‌ها میباشد. میزان ضریب شکست موثر مود پلاسمونی هیبریدی موجبر برابر $n_{eff}=3.2$ به دست می آید و بنابراین مقدار d در طول موج ۷۵۰ نانومتر برابر با ۲۲۷ نانومتر به دست می‌آید. بقیه‌ی مقادیر طراحی با مطالعه‌ی پارامتریک ساختار که با استفاده از نرم افزار برای داشتن بیشترین راندمان و جهت مندی صورت گرفته است، در طراحی ما H_{si_sub}=96 h_{sio2}=10 h_m=100 W=775 H_s=145 $H_{Insulator}$=700 L= 1352 نانومتر در نظر گرفته شده است. که با این پارامترها جهت‌مندی آنتن برابر با ۱۲۸۱ dBi ، راندمان کلی آنتن برابر با ۸۵٪ می شود. همچنین مقادیر S_{11} و S_{21} آنتن برابر با ۱۵.۷dB و ۱۰.۷ dB- میباشد که نشان دهنده ی تطبیق مناسب و تشعشع نور از شکافها و عدم خروج نور از پورت دیگر میباشد. پترن تشعشعی آنتن پلاسمونی هیبریدی در شکل ۳ نشان داده شده است.

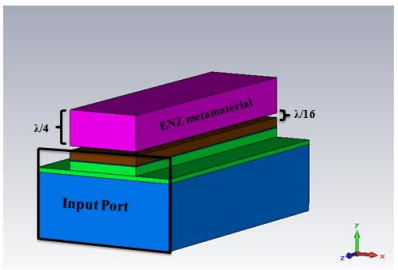


شکل۳- الگوی تشعشعی آنتن پلاسمونی هیبریدی موج رونده در فرکانس ۴۰۰ تراهرتز.

در شکل ۳ دیده می شود، آنتن پلاسمونی هیبریدی منفرد دارای الگوی دو طرفه می باشد، که در ادامه ی کار با استفاده از ساختارهای ENZ الگوی آنتن به صورت تک جهته و جهت مندی آنتن بهبود داده می‌شود.

۴-۱- شبیه سازی آنتن پلاسمونی هیبریدی بهبود یافته با ساختار ENZ در فرکانس ۴۰۰ تراهرتز

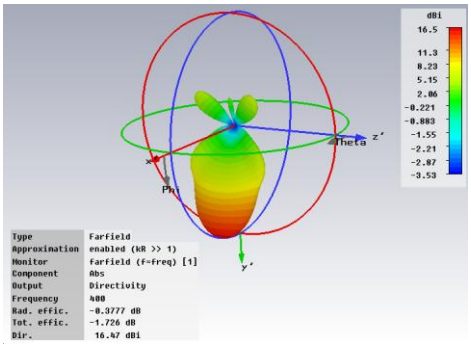
پس از طراحی آنتن پلاسمونی هیبریدی، ماده‌ی فرامواد با ثابت دی الکتریک نزدیک صفر ایده آل با $\varepsilon\approx-0.001$ و $\mu=1$ با ضخامت ربع طول موج $\lambda/4$ و با فاصله‌ی $\lambda/16$ بر روی سطح آنتن مطابق شکل ۴ قرار می‌گیرد.



شکل۴- آنتن پلاسمونی هیبریدی موج رونده با تیغه ی فرامواد ENZ در فاصله ی $\lambda/16$ از سطح آنتن.

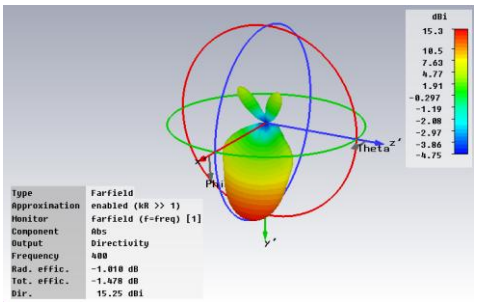
[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-15]

با استفاده از تیغه ی ثابت دی الکتریک نزدیک صفر $\varepsilon \approx -0.001$ و $\mu = 1$ ، میزان راندمان آنتن ۶۷٪، میزان جهت مندی آنتن برابر با dBi ۱۶.۴۷، مقادیر S_{11} و S_{21} آنتن برابر با ۱۶.۷۵dB- و ۶.۱dB- میباشد که نشان دهنده ی بهبود میزان جهت مندی آنتن به مقدار ۳۶۶dB و کاهش راندمان آنتن به میزان ۱۸٪ میباشد، اما همان طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، الگوی آنتن به صورت تک جهته در می آید و میزان جهت‌مندی بهبود می-یابد.



شکل۵- الگوی تشعشعی آنتن پلاسمونی هیبریدی با تیغه‌ی فراماده با $\varepsilon \approx -0.001$ و $\mu = 1$.

در ادامه از ساختار ثابت دی الکتریک نزدیک صفر محقق شده با نانوکامپوزیتهای فلزی استفاده میکنیم. همان‌طور که در بخش قبل توضیح داده شد، ثابت دی الکتریک موثر محیطهای نانوکامپوزیتی را با استفاده از مدل براگمن به دست می‌آوریم که مقادیر حقیقی و موهومی موثر نانوکامپوزیت در شکل۱ نشان داده شده است. استفاده از تیغه‌ی فراماده با ثابت دی الکتریک نزدیک به صفر با ضخامت ربع طول موج $\lambda/4$ و با فاصله ی $\lambda/16$ بر روی سطح آنتن که با مدل براگمن مدلسازی شده است جهت-مندی dBi۱۵.۲۵، راندمان ۷۱٪ و مقادیر مقادیر S_{11} و S_{21} آنتن برابر با dB-۱۲.۸۲ و dB-۱۳ را از خود نشان میدهد که باعث افزایش میزان جهت مندی به اندازه‌ی dBi۲.۴۴ و کاهش راندمان به میزان ۱۴٪ میشود. اما همان‌طور که در شکل۶ نشان داده شده است با استفاده از این تیغه میتوان به الگوی تک جهته که دارای کاربردهای فراوانی به عنوان اینترکانکتهای اپتیکی میباشد، دست یافت.



شکل۶ – الگوی تشعشعی آنتن پلاسمونی با ساختار ENZ تحقق یافته با استفاده از نانوکامپوزیتهای فلزی.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، روش جدیدی بر پایه ی فراماد ENZ برای بهبود میزان جهت-مندی آنتنهای پلاسمونی هیبریدی برای به دست آوردن الگوی تک جهته پیشنهاد شده است. ساختار فراماده با استفاده از نانوکامپوزیت فلزی نقره در محیط دی‌الکتریک آلومینا پیشنهاد شد که ثابت دی‌الکتریک موثر ساختار توسط مدل براگمن به دست آمده است. نتایج شبیه‌سازی بهبود میزان جهت مندی آنتن را با استفاده از فراماد ENZ به میزان dBi۲.۴۴ نشان می-دهند. استفاده از فراماد ENZ اگرچه میزان جهت‌مندی آنتن را افزایش می-دهند، اما با توجه به تلف دار بودن ساختار فراماده ENZ میزان راندمان آنتن را تا حدی کاهش می‌دهد که در ادامه بر روی افزایش میزان راندمان آنتن و کاهش اتلاف ساختارهای ENZ کار خواهد شد.

مراجع

[1] Gao J., Sun L., Deng H., Mathai C. J., Gangopadhyay S., Yang X., *Experimental realization of epsilon-near-zero metamaterial slabs with metal-dielectric multilayers*, **Applied Physics Letters**, 103 (2013), 051111-051111.

[2] Sihvola, A. H., *Electromagnetic mixing formulae and applications*, IET, 1999.

[3] Vesseur E. J. R., Coenen T., Caglayan H., Engheta N., Polman A., *Experimental verification of n= 0 structures for visible light*, **Physical review letters**, 110 (2013), 013902.

[4] Pollard R. J., and et al, *Optical nonlocalities and additional waves in epsilon-near-zero metamaterials*, **Physical review letters,** 102 (2009), 127405.

[5] Alekseyev L. V., Narimanov E. E., Tumkur T., Li H., Barnakov Y. A., Noginov M. A., *Uniaxial epsilon-near-zero metamaterial for angular filtering and polarization control*, **Applied Physics Letters**, 97 (2010), 131107-131107.

[6] Hoffman A. J., Alekseyev L., Howard S. S., Franz K. J., Wasserman D., Podolskiy V. A., *Negative refraction in semiconductor metamaterials*, **Nature materials**, 6 (2007), 946-950.

[7] Xu T., Agrawal A., Abashin M., Chau K. J., Lezec H. J., *All-angle negative refraction and active flat lensing of ultraviolet light*, **Nature**, 497 (2013), 470-474.

[8] Alù A., Bilotti F., Engheta N., Vegni L., *Metamaterial covers over a small aperture*, **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, 54 (2007), 1632-1643.

[9] Gehr R. J., Boyd R. W., *Optical properties of nanostructured optical materials*, **Chemistry of materials**, 8 (1996), 1807-1819.

[10] Bruggeman V. D., *Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen*, **Annalen der Physik**, 416 (1935), 636-664.

[11] Landauer R., *The electrical resistance of binary metallic mixtures*, **Journal of Applied Physics**, 23 (1952), 779-784.

[12] Aspnes D. E., *Optical properties of thin films*, **Thin solid films**, 89 (1982), 249-262.

[13] Palik E. D., *Handbook of Optical Constants of Solids: Index*. Vol. 3. Access Online via Elsevier, 1998.

[14] Yousefi L., Foster A. C., *Waveguide-fed optical hybrid plasmonic patch nano-antenna*, **Opt. Express**, 20 (2012), 18326-18335.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-15]