



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

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

^۱ آزمایشگاه تحقیقاتی نانو پتوالکترونیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۲ دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده - در این مقاله روش جدیدی برای نشر تک جهت آنتن پلاسمونی هیبریدی شکافدار موجبری در حضور تیغه‌ای از فرامواد با ثابت دی الکتریک 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 دی الکتریک منفی نزدیک صفر ثابت نفوذپذیری مغناطیسی برابر با یک میتوان جهت‌مندی آنتنهای پلاسمونی هیبریدی را به میزان ۳.۶۶dBi بهبود داد. ساختار ثابت دی الکتریک نزدیک به صفر واقعی با استفاده از نانوکامپوزیت‌های فلزی محقق و با مدل براگمن پیاده‌سازی شده است، استفاده از این تیغه‌ای 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، فرامواد با ثابت دی الکتریک نزدیک صفر، جهت‌مندی بهبود یافته.

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

Fatemeh Taghian¹, Vahid Ahmadi¹, Leila Yousefi² and Alireza Mobini¹

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 decrease of efficiency about 14%.

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

۱- مقدمه

تغییرات فاز نزدیک به صفر امواج الکترومغناطیسی در داخل فرامواد ENZ استفاده از آنها را برای نشر جهت‌مند و جهت‌دهی به موج تبلیسی پیشنهاد میکند همچنین قطبش منفی ذاتی این فرامواد 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-الکتريکهای قطبی و اکسیدهای رسانای شفاف موجود میباشد [۱]. با توجه به این که فلزات فرکانسهای پلاسما را در رژیم فرابنفش ایجاد می‌کنند وارد کردن فلزات نادر که در داخل زمینه دی‌الکتريک 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-دی‌الکتريک [۱] محقق می‌شوند فرامواد 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 فرامواد با ثابت دی‌الکتريک نزدیک به صفر در فرکانسهای نوری پیشنهاد شده است ساختار فرامادی پیشنهادی با استفاده از نانوکامپوزیتهای فلزی که ترکیبی از فلز نقره در ماده دی‌الکتريک آلومینا میباشد محقق شده است در این مقاله ابتدا در مورد نحوه‌ی تحقق فراماده با ثابت دی‌الکتريک 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 فرامواد با ثابت دی‌الکتريک نزدیک به صفر صحبت خواهد شد

۲- فیزیک و تئوری

۲-۱- فرامواد با ثابت دی‌الکتريک نزدیک

صفر و افزایش جهت‌مندی

یکی از کاربردهای فرامواد 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 فراماده‌ای 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

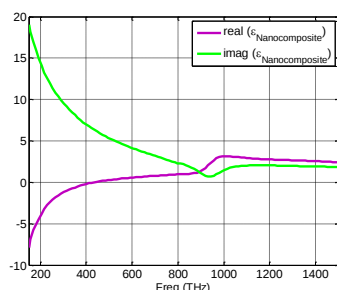
شکسته شده در هوا شبه‌موازی شده و تشکیل موج شبه‌تخت میدهند بنابراین یک تشعشع بسیار جهت‌دار به دست می‌آید [۸]. از آنجا که $n = \sqrt{\mu_r \epsilon_r}$ است ضریب شکست نزدیک به صفر تنها به شرطی به دست می‌آید که $\epsilon_r \approx 0$ و یا $\mu_r \approx 0$ باشد که این دو حالت تنها با استفاده از ساختارهای فرامواد و تحت شرایط خاص قابل حصول هستند

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

نانوکامپوزیت فلزی، به محیط دی‌الکتريک شامل نانوذرات فلزی است که به علت اثر پلاسمون سطح قوی و نیز اثر غیرخطی مورد توجه قرار گرفته‌اند مدل‌های مختلفی برای ثابت دی‌الکتريک موثر ساختارهای نانوکامپوزیت فلزی پیشنهاد شده است، از جمله مدل ماکسول-گانت-ماکسول-گانت 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 می‌شود 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

$$f_a \frac{\epsilon_a - \epsilon_{eff}}{\epsilon_a + 2\epsilon_{eff}} + f_b \frac{\epsilon_b - \epsilon_{eff}}{\epsilon_b + 2\epsilon_{eff}} \quad (1)$$

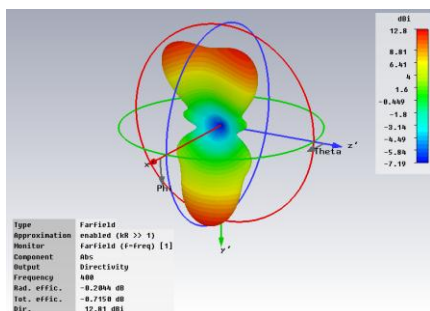
که در این مقاله برای به دست آوردن نانوکامپوزیتی با ثابت دی‌الکتريک نزدیک به صفر از ماده ی نقره با درصد حجمی ۴۰٪ درون ماده ی دی‌الکتريک آلومینا (Al_2O_3) با درصد حجمی ۶۰٪ با ثابت دی‌الکتريکهای به دست آمده از مرجع [۱۳] استفاده شده است مقادیر حقیقی و موهومی ثابت دی‌الکتريک نانوکامپوزیت به دست آمده مطلق شکل ۱ می‌باشد



شکل ۱- قسمت‌های حقیقی و موهومی ثابت دی‌الکتريک 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

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 750 نانومتر برابر با 227 نانومتر به دست می آید. بقیه ی مقادیر طراحی با مطالعه ی پارامتریک ساختار که با استفاده از نرم افزار برای داشتن بیشترین راندمان و جهت مندی صورت گرفته است. در طراحی ما $H_{sub}=96$ nm, $H_{in}=100$ nm, $W=775$ nm, $H_s=145$ nm, $H_{back}=700$ nm, $L=1352$ نانومتر در نظر گرفته شده است که با این پارامترها جهت مندی آنتن برابر با 12.81 dBi, راندمان کلی آنتن برابر با 85% می شود. همچنین مقادیر S_{11} و S_{21} آنتن برابر با -15.7 dB و -10.7 dB می باشد که نشان دهنده ی تطبیق مناسب و تشعشع نور از شکافها و عدم خروج نور از پورت دیگر می باشد. پترن تشعشعی آنتن پلاسمونی هیبریدی در شکل ۳ نشان داده شده است.

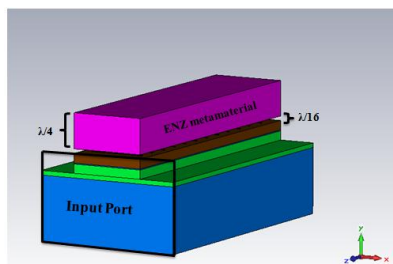


شکل ۳- الگوی تشعشعی آنتن پلاسمونی هیبریدی موج رونده در فرکانس 400 تراهرتز.

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 می شود.

۴-۱- شبیه سازی آنتن پلاسمونی هیبریدی بهبود یافته با ساختار ENZ در فرکانس 400 تراهرتز

پس از طراحی آنتن پلاسمونی هیبریدی، ماده ی فراماده با ثابت دی الکتریک نزدیک صفر ایده آل با $\epsilon \approx -0.001$ و $\mu = 1$ با ضخامت ربع طول موج $\lambda/4$ و با فاصله ی $\lambda/16$ بر روی سطح آنتن مطابق شکل ۴ قرار می گیرد.

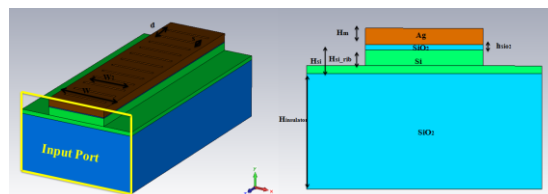


شکل ۴- آنتن پلاسمونی هیبریدی موج رونده با تیغه ی فراماده ENZ در فاصله ی $\lambda/16$ از سطح آنتن.

الکتریک نزدیک صفر میباشد. البته با تغییر پارامترهای مدل براگمن مانند محیطهای تشکیل دهنده ی دی الکتریک و فلز و درصد حجمی آنها میتوان خاصیت ثابت دی الکتریک نزدیک صفر را در فرکانسهای مختلف به دست آورد. بهبود جهت مندی آنتن در فرکانسهای نوری مانند 400 تراهرتز به دلیل کاربرد این فرکانس در آشکارسازهای نوری و سلولهای خورشیدی می باشد.

۴- طراحی آنتن پلاسمونی هیبریدی در فرکانس 400 تراهرتز

طراحی آنتن پلاسمونی هیبریدی شکافدار برای عملکرد در طول موج 750 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 3^{D} بعدی تمام موج FDFD با استفاده از نرم افزار CST برای طراحی و تحلیل مورداستفاده قرار می گیرد. در اینجا از محصورشدگی مود زیر طول موج و خواص تلفات کم ساختارهای پلاسمونی هیبریدی برای ایجاد آنتن اپتیکی بسیار جهت مند و با راندمان بالا استفاده میکنیم. ساختار آنتن پیشنهادی در شکل ۲ نشان داده شده است که آنتن برپایه ی ساختار هیبریدی پلاسمونی طراحی شده است که در آن ماده ی با ضریب شکست کمتر SiO_2 بین ماده ای با ضریب شکست بالاتر سیلیکون (Si) و فلز نقره (Ag) قرار گرفته است.



شکل ۲- 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 می شود [۱۴]:

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

که در این رابطه n مرتبه ی هارمونیک فضایی مود فلوکه، K_{zn} عدد موج مود فلوکه مرتبه n و E_{yn} وزن مود مرتبه n ، α میزان تضعیف میدان، d میزان تناوب ساختار و β_{zn} 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.

$$|real(K_{z,-1})| < \beta_0 \quad \text{or} \quad \left| n_{eff} \beta_0 - \frac{2\pi}{d} \right| < \beta_0 \quad (3)$$

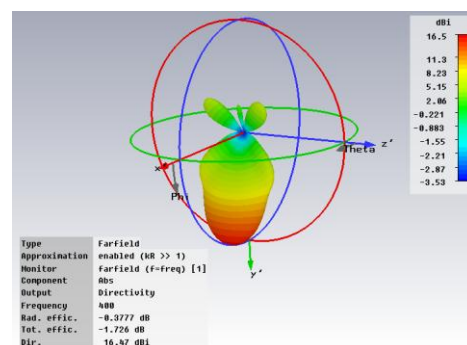
۵- نتیجه گیری

در این مقاله، روش جدیدی بر پایه ی فرمولاد ENZ برای بهبود میزان جهت-مندی آنتنهای پلاسمونی هیبریدی برای به دست آوردن الگوی تک جهته پیشنهاد شده است. ساختار فرامله با استفاده از نانوکمپوزیت فلزی نقره در محیط دی الکتریک آلومینا پیشنهاد شد که ثابت دی الکتریک موثر ساختار توسط مدل براگمن به دست آمده است. نتایج شبیه سازی بهبود میزان جهت مندی آنتن را با استفاده از فرمولاد ENZ به میزان ۲.۴۴ dBi نشان می-دهند. استفاده از فرمولاد ENZ اگرچه میزان جهت مندی آنتن را افزایش می-دهند اما با توجه به تلف دار بودن ساختار فرامله ENZ میزان راندمان آنتن را تا حدی کاهش می دهد که در ادامه بر روی افزایش میزان راندمان آنتن و کاهش اتلاف ساختارهای ENZ کار خواهد شد.

مراجع

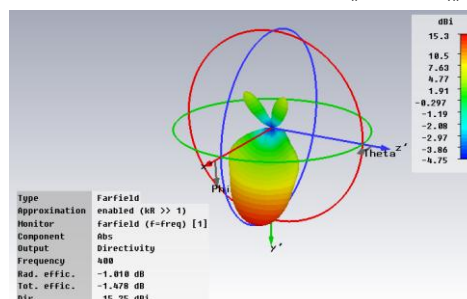
- [1] Gao J., Sun L., Deng H., Mathai C. J., Gangopadhyay S., Yang X., *Experimental realization of epsilon-near-zero metamaterial slabs with metal-dielectric multilayers*, **Applied Physics Letters**, 103 (2013), 051111-051111.
- [2] Sihvola, A. H., *Electromagnetic mixing formulae and applications*,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

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



شکل ۵- الگوی تشعشعی آنتن پلاسمونی هیبریدی با تیغه ی فراماده با $\epsilon \approx -0.001$ و $\mu = 1$.

در ادامه از ساختار ثابت دی الکتریک نزدیک صفر محقق شده با نانوکمپوزیتهای فلزی استفاده میکنیم همان طور که در بخش قبل توضیح داده شده ثابت دی الکتریک موثر محیطهای نانوکمپوزیتی را با استفاده از مدل براگمن به دست می آوریم که مقادیر حقیقی و موهومی موثر نانوکمپوزیت در شکل ۱ نشان داده شده است. استفاده از تیغه ی فرامله 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 ۱۵.۲۵ dBi، راندمان ۷۱٪ و مقادیر مقادیر S_{21} و S_{11} آنتن برابر با -۱۲.۸۲ dB و -۱۳ dB را از خود نشان میدهد که باعث افزایش میزان جهت مندی به اندازه ی ۲.۴۴ dBi و کاهش راندمان به میزان ۱۴٪ میشود اما همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده است با استفاده از این تیغه میتوان به الگوی تک جهته که دارای کاربردهای فرولنی به عنوان اینترکنکتهای اپتیکی میباشد دست یافت.



شکل ۶- الگوی تشعشعی آنتن پلاسمونی با ساختار ENZ تحقق یافته با استفاده از نانوکمپوزیتهای فلزی.