



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



طراحی فرامواد با گذردهی الکتريکی نزدیک صفر به عنوان جاذب شديد پلاسمونیک و کاربرد آن در نور کند و تند

مینا وفايي^۱، محمود مرادي^۱، غلامحسين بردبار^۱

^۱بخش فیزیک، دانشگاه شیراز، شیراز

چکیده - در این مقاله، فرامواد با ضریب گذردهی الکتريکی نزدیک به صفر براساس ساختار فلز-دی الکتريک-فلز به صورت عددی طراحی و بررسی شده است. در این ساختار جفت شدن پرتو نور ورودی با امواج سطحی سبب ایجاد جاذب شديد پلاسمونیک با کاربردهای مختلف می شود. از طرف دیگر تنظیم پذیر بودن نانو ساختار از طریق تغییرات ویژگی های ساختاری این فرامواد نشان داده شده است. برای این منظور با استفاده از شبیه سازی عددی ضریب جذب و بازتاب ساختار پلاسمونیک پیشنهاد شده، محاسبه شده است. سپس براساس تأخیر گروه، ویژگی های کنترل انتشار امواج به عنوان نور تند و کند مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که فرامواد پیشنهادی دارای گذردهی الکتريکی صفر در طول موج ۱۷۳۰ nm و ضریب کیفیتی برابر ۹ است. در انتها ثابت شده است، که با بکار بردن فلز طلا، ضریب افزایش و کاهش سرعت نور می تواند به ترتیب ۱۱۰۰ و ۸۵۰ برسد.

کلید واژه- جاذب شديد، ضریب گذردهی الکتريکی، فرامواد، نور تند و کند.

Design of epsilon near zero metamaterial as a perfect plasmonic absorber and its application as slow and fast light

Mina Vafaei¹, Mahmood Moradi¹, Gholamhossein Bordbar¹

¹ Department of Physics, Shiraz University, Shiraz

Abstract- In this paper, epsilon near-zero (ENZ) metamaterial was designed and investigated based on metal-dielectric-metal structure. In this structure, the coupling of incident light with surface mode creates the perfect plasmonic absorber with different applications. On the other hand, it was also shown that the nanostructure is tunable due to the structural features changes. For this purpose, the absorption and reflection coefficient was calculated via numerical simulation. Then, the characteristics of the wave propagation are investigated as fast and slow light, based on group delay. The results show that the proposed metamaterial has epsilon near zero at 1730 nm wavelength and quality factor of 9. At the end, it was proved that using the gold metal, the fast and slow light coefficient can reach 1100 and 850 respectively.

Keywords: perfect absorber, epsilon, metamaterial, slow and fast light.

و کاهش نویز در مخابرات و ... دارند. همچنین بر اساس تأخیر گروه ثابت شده است که این نوع فرامواد می‌توانند سرعت نور را را به مقدار قابل توجهی تند و یا کند کنند.

ساختار فرامواد پیشنهادی

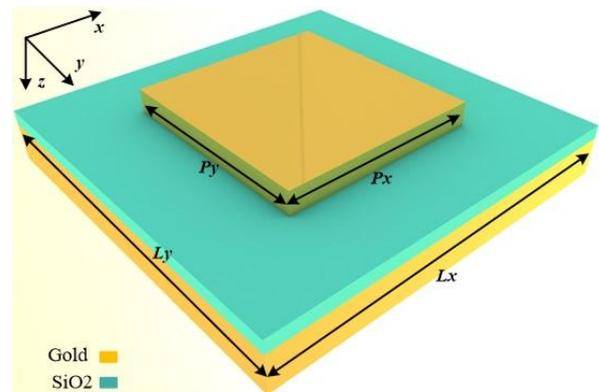
در شکل ۱ ساختار فرامواد پیشنهادی شامل سه لایه فلز-دی-الکتريک-فلز با مواد غیر مغناطیسی طلا-دی اکسید سلیسیوم-طلا نشان داده شده است. در این ساختار از دی اکسید سلیسیم با گذردهی الکتريکی $\epsilon_{SiO_2} = 2.1316$ به دلیل اینکه طول انتشار پلاسمون‌های سطحی را افزایش می‌دهد، استفاده شده است. اندازه لایه‌ها به همراه ضخامت و نوع مواد بکار رفته در ساختار فرامواد پیشنهادی در جدول ۱ آمده است. با جفت شدن مناسب نور ورودی با لایه طلای بالایی، پلاسمون‌های سطحی تحریک شده و طول موج‌های معینی جذب یا بازتاب می‌شوند. نور به طور عمود بر صفحه z تابش می‌کند و میدان الکتريکی در راستای محور x نوسان می‌کند. از فلز طلا بعنوان لایه اول و سوم در ساختار فرامواد پیشنهادی استفاده شده است که گذردهی الکتريکی آن با استفاده از مدل درود به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\epsilon = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma_c)} \quad (1)$$

که گذردهی الکتريکی فرکانس بالا $\epsilon_{\infty} = 9$ ، فرکانس پلاسما $\omega_p = 13.8 \times 10^{15} \text{ rad/s}$ و فرکانس برخورد پارامترهای هندسی ساختار بسیار کوچک‌تر از طول موج الکترومغناطیسی فضای (λ_0) آزاد باشند، ساختار مورد نظر می‌تواند به عنوان محیط مؤثر در نظر گرفته شود و گذردهی الکتريکی مؤثر ساختار بدست آید. در این کار گذردهی الکتريکی ساختار به روش شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار CST STUDIO SUITE بدست آمده است (شکل ۲). در این روش از پارامترهای پراکنندگی برای بدست آوردن ضریب شکست ساختار و در نتیجه گذردهی الکتريکی مؤثر استفاده می‌شود.

مقدمه

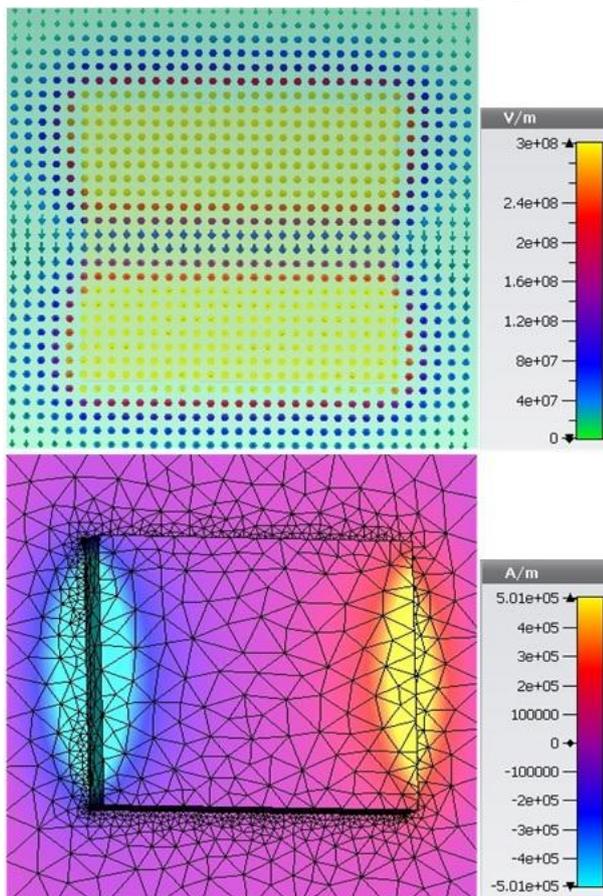
پیدایش فرامواد فرصتی مناسب برای طراحی موادی جدید با خواص الکترومغناطیسی جالب توجه با مقادیر غیر معمول گذردهی الکتريکی و نفوذپذیری مغناطیسی فراهم کرده است. این مواد، دسته‌ای از مواد مرکب می‌باشند که دارای خواص جدید و یکتایی هستند [۱]. دسته‌ای از این مواد مصنوعی، فرامواد با گذردهی الکتريکی مؤثر نزدیک به صفر (ENZ) هستند که در آنها قسمت حقیقی یک یا دو مؤلفه از گذردهی الکتريکی مؤثر ساختار صفر می‌شود. اخیراً این نوع فرامواد بدلیل بازه وسیعی از کاربردها در بازه مرئی و مادون قرمز توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. از این کاربردها می‌توان به نامرئی‌سازی، افزایش چگالی حالت‌های الکترومغناطیسی، انتقال تصویر زیر طول موج و افزایش انتشار خود به خودی اشاره کرد [۲]. فرامواد با گذردهی الکتريکی نزدیک به صفر در ساختارهای متنوعی از جمله ساختارهای متقارن چند لایه فلز-دی‌الکتريک [۳] و آرایه نانو سیم‌های فلزی تعبیه شده در ماتریس دی‌الکتريک به روش تئوری و آزمایشگاهی به اثبات رسیده است [۴]. در این مقاله فرامواد با گذردهی الکتريکی نزدیک به صفر برای نور قطبیده TE در تابش عمودی با ساختاری از فلز-دی‌الکتريک-فلز در ناحیه طول موجی فروسرخ طراحی و شبیه‌سازی شده است. طیف جذب و بازتاب محاسبه شده در ساختار نشان می‌دهد که این نوع فرامواد می‌تواند به عنوان جاذب شدید پلاسمونیک معرفی شود.



شکل ۱: ساختار فرامواد پیشنهادی مبتنی بر ساختار فلز-دی‌الکتريک-فلز ($L_x=L_y=310 \text{ nm}$)

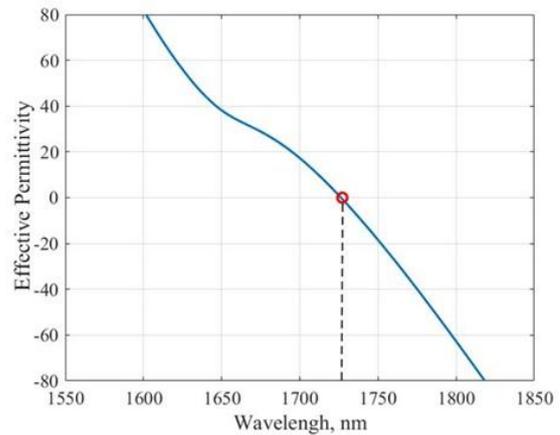
مواد جاذب کاربردهای وسیعی از جمله اتاق‌های ضد بازتاب و محافظت از تداخل‌های الکترومغناطیسی در مدارهای پرسرعت

و نقره جذب می‌شوند. بیشینه مقدار جذب در طول موج nm ۱۳۸۷ به اندازه ۹۵٪ نور ورودی است. لذا همانطور که از شکل ۳ مشاهده می‌شود با جفت شدن نور در این طول موج یک تشدید شدیدی در نمودار جذب رخ می‌دهد. برای درک بهتر این موضوع نمودارهای توزیع جریان سطحی و توزیع میدان مغناطیسی در شکل ۴ آمده است.

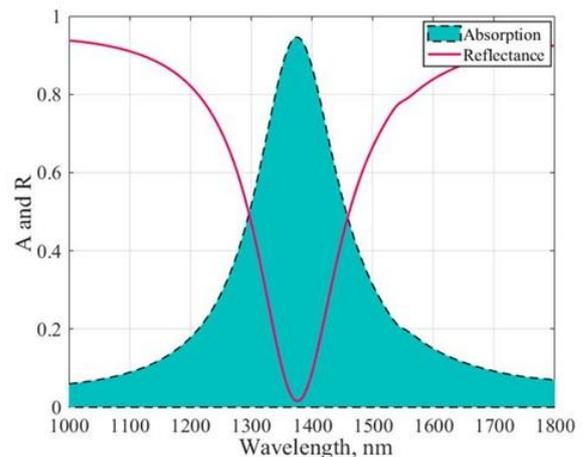


شکل ۴: (الف) توزیع جریان سطحی (ب) توزیع میدان مغناطیسی مماسی

همانطور که در شکل ۴ (الف) نمایان است، جریان سطحی در ساختار اطراف لایه طلائی بالایی و از قسمت بالا به سمت پایین است. همچنین نمودار توزیع میدان مغناطیسی در شکل ۴ (ب) نشانگر تشکیل یک دو قطبی قوی در ساختار که بیان‌کننده جفت شدگی شدید نور ورودی با ساختار است. برای نشان دادن تنظیم پذیر بودن ساختار فرامواد با گذردهی الکتریکی نزدیک صفر، با تغییر اندازه پارامتر p_x در ساختار، نمودار جذب را بدست آورده‌ایم. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، به ازای کاهش اندازه p_x از 100 nm به 80 nm قله نمودار جذب به سمت طول موج‌های کم جابجا می‌شود که معادل با جابجایی آبی است.



شکل ۲: گذر دهی الکتریکی مؤثر فرامواد فلز-دی‌الکتریک-فلز



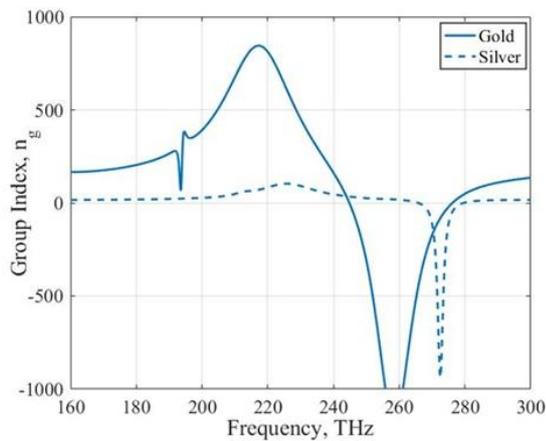
شکل ۳: نمودار طیفی جذب و بازتاب فرامواد فلز-دی‌الکتریک-فلز

جدول ۱: اندازه‌های بکار رفته در فرامواد پیشنهادی

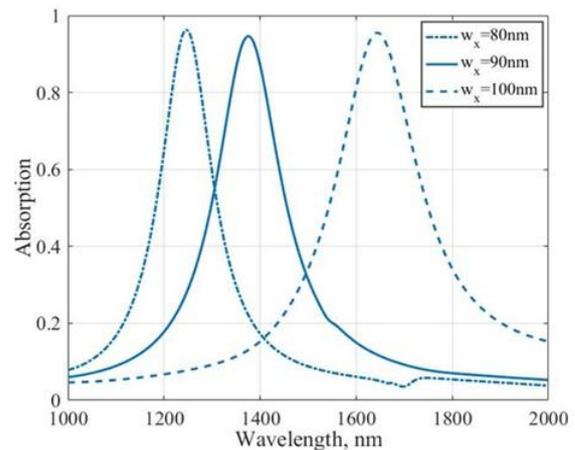
Layer	Type	Thickness (nm)	Size(nm)
First	Metal(gold)	40	310×310
Second	Dielectric(SiO ₂)	10	310×310
Third	Metal(gold)	30	200×200

بحث و نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت با توجه به طیف جذب و عبوری بدست آمده در نمونه نشان داده می‌شود که می‌توانیم فرامواد پیشنهادی را به عنوان جاذب شدید پلاسمونیک معرفی کنیم. به این منظور، نمودار جذب و بازتاب ساختار پیشنهادی در بازه طول موجی 1000 nm تا 1800 nm در شکل ۳ نشان داده شده است. با تابیدن نور ورودی با فرکانس ω به ساختار، جفت‌شدگی شدید بین نور ورودی و پلاسمون‌های سطحی ساختار ایجاد شده و یک سری از طول موج‌های تحریک شده بین لایه عایق



شکل ۶: نمودار ضریب گروه (n_g) به ازای تغییرات بسامد



شکل ۵: الف) نمودار طیفی جذب به ازای مقادیر مختلف w_x

نتیجه گیری

در این مقاله فرامواد تنظیم پذیر با گذردهی الکتریکی نزدیک به صفر براساس ساختار سه لایه فلز-دی‌الکتریک-فلز معرفی شده است. طیف‌های جذب، بازتاب، جریان سطحی و توزیع میدان مغناطیسی برهمکنش شدید نور ورودی با پلاسمون‌های سطحی در مرز فلز-دی‌الکتریک را نشان می‌دهد. نانو ساختار پیشنهادی دارای تشدید شدید در طول موج ۱۳۸۷ nm با ضریب جذب ۰/۹۵ و ضریب کیفیت ۹ است. همچنین، این فرامواد که به عنوان جاذب شدید پلاسمونیک معرفی شده است، توانایی استفاده در نور کند و تند با ضرایب ۸۵۰ و ۱۱۰۰ را داراست.

مراجع

- [1] W. Cai, V. Shalaev and D. K. Paul, "Optical Metamaterials: Fundamentals and Applications"; Springer, New York (2010).
- [2] L. Sun, Z. Li, T. S. Luk, X. Yang, and J. Gao, "Nonlocal effective medium analysis in symmetric metal-dielectric multilayer metamaterials," Phys. Rev. B 91(19), 195147 (2015).
- [3] J. Gao, L. Sun, H. Deng, C. J. Mathai, S. Gangopadhyay, X. Yang, "Experimental realization of epsilon-near-zero metamaterial slabs with metal-dielectric multilayers" Appl. Phys. Lett. 103, 051111 (2013).
- [4] R. Starko-Bowes, J. Atkinson, W. Newman, H. Hu, T. Kallos, G. Palikaras, R. Fedosejevs, S. Pramanik, and Z. Jacob, "Optical characterization of epsilon-near-zero, epsilon-near-pole, and hyperbolic response in nanowire metamaterials"; Journal of the Optical Society of America B, Vol. 32, No. 10 (2015).

یکی از کاربردهای مهمی که برای ساختار فرامواد پیشنهادی می‌توان بیان کرد، توانایی کنترل نور بعنوان نور تند و کند است. برای تحقق این امر، در ابتدا بصورت عددی تأخیر گروه را بدست می‌آوریم، سپس با استفاده رابطه (۲) سرعت گروه را محاسبه می‌کنیم:

$$v_g = c_0 - \frac{L}{\tau_g} \quad (2)$$

که در آن c_0 سرعت گروه در خلأ، L ضخامت زیر لایه و τ_g تأخیر گروه است. در نهایت توسط رابطه زیر، ضریب گروه، n_g را تعیین می‌کنیم:

$$n_g = n + w \frac{dn}{dk} = \left(\frac{dw}{dk} \right)^{-1} = \frac{c_0}{v_g} \quad (3)$$

در این رابطه ضریب گروه مثبت، توانایی کند کردن نور را نشان می‌دهد و به ازای ضریب گروه منفی، نور تند را خواهیم داشت. شکل ۶ نمودار ضریب گروه به عنوان تابعی از طول موج را نشان می‌دهد. ساختار فرامواد با ضریب گذر دهی نزدیک صفر دارای بیشینه ضریب گروهی برابر با ۸۵۰ و کمینه ضریب گروهی برابر ۱۱۰۰ است، که به ترتیب توانایی کنترل نور بعنوان نور کند و تند را داراست. با توجه به پارامترهای متفاوت در مدل درود برای فلزات طلا و نقره انتظار می‌رود که ساختار پیشنهادی دارای تأخیر گروه متفاوت، و در نتیجه ضریب گروه متفاوتی باهم داشته باشند. این ویژگی مناسب نانو ساختار پیشنهادی می‌تواند در سوئیچ‌های نوری که توسط نور کند کنترل می‌شوند، مورد استفاده قرار گیرد.