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

طراحی فراماده با گذردهی الکتریکی نزدیک صفر به عنوان جاذب شدید پلاسمونیکی و کابرد آن در نور کند و تند

مینا وفایی[۱]، محمود مرادی [۱]، غلامحسین بردبار[۱]

[۱]بخش فیزیک، دانشگاه شیراز، شیراز

چکیده – در این مقاله، فراماده با ضریب گذردهی الکتریکی نزدیک به صفر براساس ساختار فلز-دی الکتریک-فلز به صورت عددی طراحی و بررسی شده است. در این ساختار جفت شدن پرتو نور ورودی با امواج سطحی سبب ایجاد جاذب شدید پلاسمونیکی با کابردهای مختلف می‌شود. از طرف دیگر تنظیم پذیر بودن نانو ساختار از طریق تغییرات ویژگی‌های ساختاری این فراماده نشان داده شده است. برای این منظور با استفاده از شبیه‌سازی عددی ضریب جذب و بازتاب ساختار پلاسمونیکی پیشنهاد شده، محاسبه شده است. سپس براساس تأخیر گروه، ویژگی‌های کنترل انتشار امواج به عنوان نور تند و کند مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که فراماده پیشنهادی دارای گذردهی الکتریکی 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 می‌تواند به ترتیب ۱۱۰۰ و ۸۵۰ برسد.

کلید واژه- جاذب شدید، ضریب گذردهی الکتریکی، فراماده، نور تند و کند.

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

Mina Vafaei[1], Mahmood Moradi[1], Gholamhossein Bordbar[1]

[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 ۹. At the end, it was proved that using the gold metal, the fast and slow light coefficient can reach 1100 and 850 respectively.

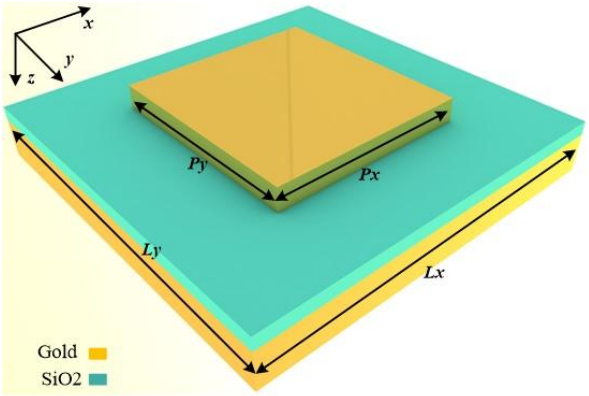
Keywords: perfect absorber, epsilon, metamaterial, slow and fast light.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

مقدمه

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



شکل ۱: ساختار فراماده پیشنهادی مبتنی بر ساختار فلز-دی الکتریک-فلز (Lx=Ly=۳۱۰ nm)

مواد جاذب کاربردهای وسیعی از جمله اتاق‌های ضد بازتاب و محافظت از تداخل‌های الکترومغناطیسی در مدارهای پرسرعت و کاهش نویز در مخابرات و ... دارند. همچنین بر اساس تأخیر گروه ثابت شده است که این نوع فراماده می‌توانند سرعت نور را را به مقدار قابل توجهی تند و یا کند کنند.

ساختار فراماده پیشنهادی

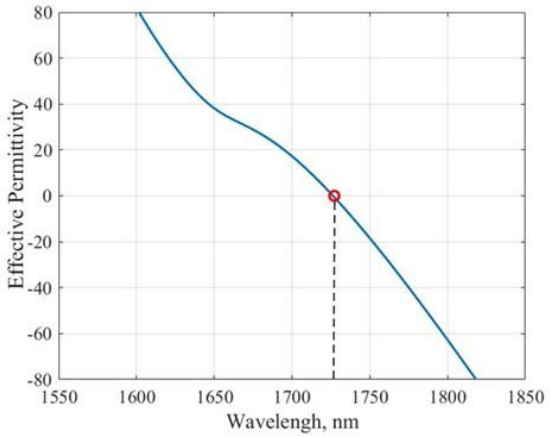
در شکل ۱ ساختار فراماده پیشنهادی شامل سه لایه فلز-دی-الکتریک-فلز با مواد غیر مغناطیسی طلا-دی اکسید سلیسیوم-طلا نشان داده شده است. در این ساختار از دی اکسید سلیسیم با گذردهی الکتریکی $\varepsilon_{SiO2}=2.1316$ به دلیل اینکه طول انتشار پلاسمون‌های سطحی را افزایش می‌دهد، استفاده شده است. اندازه لایه‌ها به همراه ضخامت و نوع مواد بکار رفته در ساختار فراماده 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 الکتریکی در راستای محور x نوسان می‌کند. از فلز طلا بعنوان لایه اول و سوم در ساختار فراماده پیشنهادی استفاده شده است که گذردهی الکتریکی آن با استفاده از مدل درود به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varepsilon=\varepsilon_{\infty}-\frac{\omega_p^2}{\omega\left(\omega+i\gamma_c\right)} \qquad (۱)$$

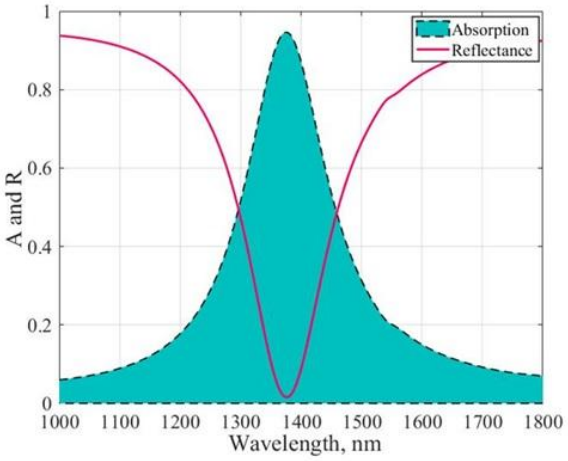
که گذردهی الکتریکی فرکانس بالا $\varepsilon_{\infty}=9$، فرکانس پلاسما $\omega_p=13.8\times10^{15}\,rad/s$ و فرکانس برخورد $\gamma=0.11\times10^{15}\,rad/s$ در نظر گرفته شده است. اگر پارامترهای هندسی ساختار بسیار کوچک‌تر از طول موج الکترومغناطیسی فضای (λ_0) آزاد باشند، ساختار مورد نظر می‌تواند به عنوان محیط مؤثر در نظر گرفته شود و گذردهی الکتریکی موثر ساختار بدست آید. در این کار گذردهی الکتریکی ساختار به روش شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار CST STUDIO SUITE بدست آمده است (شکل۲). در این روش از پارامترهای پراکندگی برای بدست آوردن ضریب شکست ساختار و در نتیجه گذردهی الکتریکی مؤثر استفاده می‌شود.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]



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



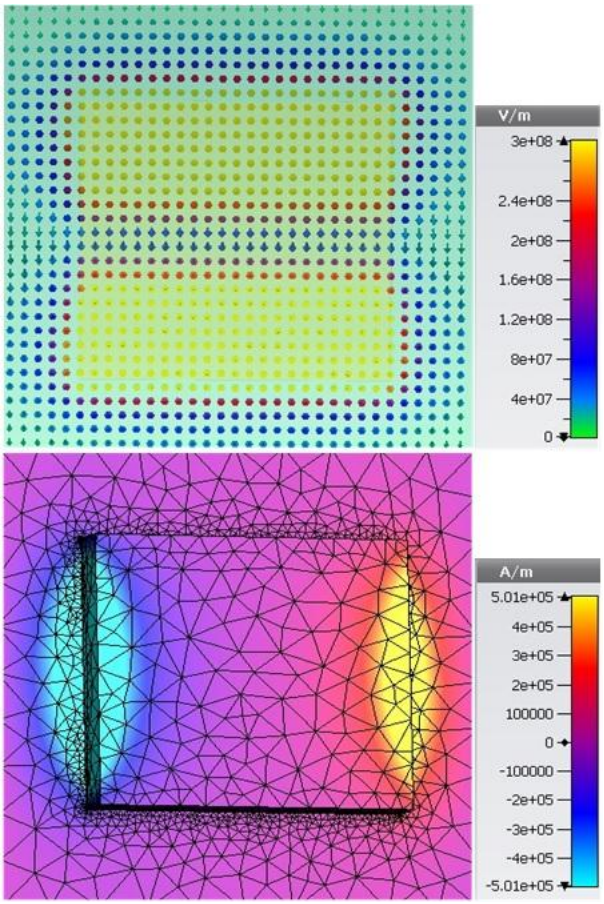
شکل ۳: نمودار طیفی جذب و بازتاب فراماد فلز-دی‌الکتریک-فلز

جدول ۱: اندازه‌های بکار رفته در فراماد 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 فراماد پیشنهادی را به عنوان جاذب شدید پلاسمونیکی معرفی کنیم. به این منظور، نمودار جذب و بازتاب ساختار پیشنهادی در بازه طول موجی ۱۰۰۰ nm تا ۱۸۰۰ 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 و نقره جذب می‌شوند. بیشینه مقدار جذب در طول موج ۱۳۸۷ nm 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.

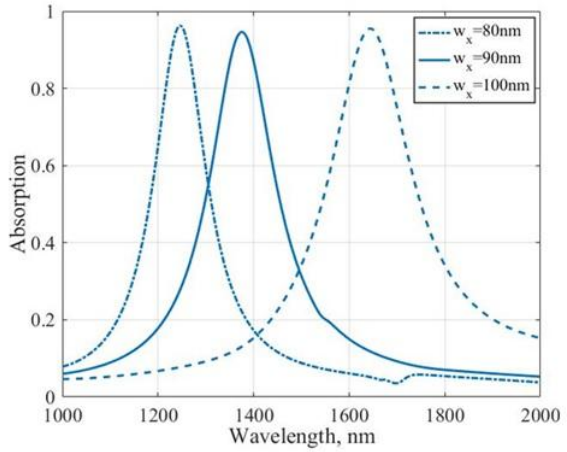


شـــکل ۴: (الف) توزیع جریان سطحی (ب) توزیع میدان مغناطیسی مماسی

همانطور که در شکل ۴ (الف) نمایان است، جریان سطحی در ساختار اطراف لایه طلای بالایی و از قسمت بالا به سمت پایین است. همچنین نمودار توزیع میدان مغناطیسی در شکل ۴ (ب) نشانگر تشکیل یک دوقطبی قوی در ساختار که بیان‌کننده جفت شدگی شدید نور ورودی با ساختار است. برای نشان دادن تنظیم پذیر بودن ساختار فراماد 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 ۱۰۰ nm به ۸۰ nm قله نمودار جذب به سمت طول موج‌های کم جابجا می‌شود که معادل با جابجایی آبی است.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]



شـــکل ۵: (الف) نمودار طیفی جذب به‌ازای مقادیر مختلف p_x

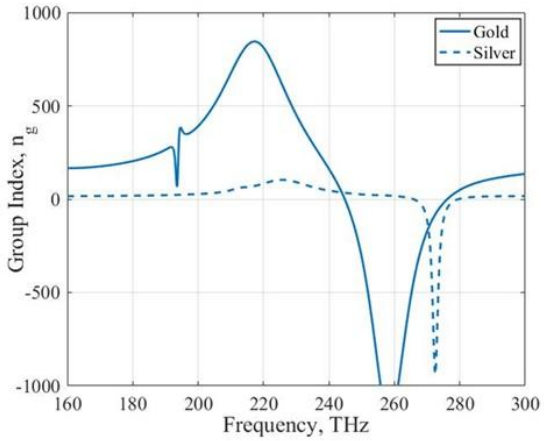
یکی از کابردهای مهمی که برای ساختار فراماد پیشنهادی می‌توان بیان کرد، توانایی کنترل نور بعنوان نور تند و کند است. برای تحقق این امر، در ابتدا بصورت عددی تأخیر گروه را بدست می‌آوریم، سپس با استفاده رابطه (۲) سرعت گروه را محاسبه می‌کنیم:

$$v_g = c_0 - \frac{L}{\tau_g} \qquad (۲)$$

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:

$$n_g = n + w\frac{dn}{dk} = \left(\frac{dw}{dk}\right)^{-1} = \frac{C_0}{v_g} \qquad (۳)$$

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 فراماد 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 می رود 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.



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

نتیجه‌گیری

در این مقاله فراماد 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 فراماد که به عنوان جاذب شدید پلاسمونیکی 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).

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.