

اثر جابجایی آنتنها و تغییر جنس بر شفافیت القایی الکترومغناطیسی در یک فراماده دو بعدی

هادی، اعلائی^۱؛ مجتبی، ثروت خواه^{۲*}

۱ گروه فیزیک، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران

۲ گروه فیزیک، پردیس علوم تحقیقات فارس، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران

چکیده - پیشرفت روز افزون تکنولوژی نانو در اپتیک و فوتونیک با استفاده از روش های نوین کنترل نور در وسایل موجبری و نیاز به کوچک سازی وسایل الکترومغناطیسی از قبیل آنتن ها و نیز بهبود انتقال و ذخیره سازی اطلاعات در این ابزار الکترومغناطیسی، محققان را به سمت استفاده از پدیده شفافیت القایی الکترومغناطیسی (EIT) و پدیده های مشابه آن در فرامواد سوق داده است. در این کار ما ساختار فراماده ای را در ابعاد nm و ناحیه فرکانسی THz معرفی می کنیم که در آن با شکست تقارن هندسی ساختار، EIT با میزان عبور بالا و Q -فاکتور بیشتر نسبت به ساختارهای دو بعدی قبلی در ناحیه مادون قرمز رخ می دهد، که می تواند انتخاب مناسبی برای کاربردهای نور کند بوده و برای تقویت نور در نانو ساختارها و آشکارسازی مادون قرمز مورد استفاده قرار گیرد. همچنین اثر تغییر جنس فلز در فراماده پیشنهادی، مورد بررسی قرار گرفته است. محاسبات عددی و شبیه سازیها در این کار، با روش $FDTD$ انجام شده است.

کلید واژه - شفافیت القایی الکترومغناطیسی، فرامواد، شکست تقارن هندسی، نور کند

The effect of the antenna movement and material change on electromagnetically induced transparency in a two-dimensional metamaterials.

Mojtaba Servatkah*and Hadi Alaei

Physics Department, College of Sciences, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran

*Corresponding author: alaei.hadi@gmail.com

Increasing development of nano technology in optics and photonics by using modern methods of lighting control in waveguide devices and requiring miniaturization and electromagnetic devices such as antennas, transmission and storage as well as improvement in the electromagnetic tool, have led researchers to use the phenomenon of electromagnetically induced transparency (EIT) and similar phenomena in metamaterials. In this work, we introduce metamaterial structure in nm dimensions and THz frequency region. Moreover, by broking the geometrical symmetry structure, we offer EIT with high transmittance and more Q -factor in comparison with all previous study of two-dimensional structure, in the infrared region. These achievements can be a good choice for slow light applications and can be used to amplify light in nanostructure and also to detect the infrared light. Finally, we study the effect of changing the metal on the proposed metamaterial. Moreover, in this study, numerical calculations and simulations are done by $FDTD$ method.

Keywords: electromagnetically induced transparency, metamaterials, broken geometric symmetry, slow light

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

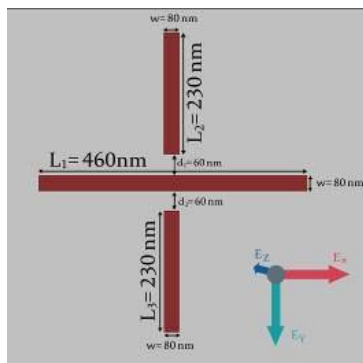
۱- مقدمه

پدیده شفافیت القایی الکترومغناطیسی (EIT)، که اپتیک کوانتومی بخوبی آن را شرح می دهد، یک خاصیت غیر خطی نوری است که حاصل برهم نهی ویرانگر دو پرتو لیزر؛ هنگام عبور از یک محیط اتمی کدر می باشد و در یک ناحیه طیفی باریک، یک محیط اپتیکی کدر را در شرایط خاصی به محیط شفاف تبدیل می کند. اثر مشهور این پدیده، کاهش سرعت نور در مواد می باشد. از کاربردهای کاهش یا متوقف کردن سرعت نور در مواد می توان به ذخیره نوری اطلاعات و پردازش اطلاعات کوانتومی در کامپیوترهای کوانتومی اشاره کرد. علاوه بر آن، این پدیده، کاربرد های بالقوه فراوانی در زمینه های فیلترها، سنسورها و سویچ های نوری از خود نشان می دهد. تحقیقات سال های اخیر نشان می دهد که مشاهده این اثر در مدل های کلاسیکی، بسیار ساده تر از مدل اتمی است. فرامواد ساختارهای مصنوعی هستند که ابعاد سلول واحدشان در مقایسه با طول موج کوچک می باشد؛ و خواص الکترومغناطیسی که از خود نشان می دهند در مواد طبیعی وجود ندارد. خواص الکترومغناطیسی این مواد را می توان با طراحی پارامترهای هندسی مناسب برای ساختار کنترل کرد. [3] اولین آزمایشی که در آن پدیده EIT منجر به تولید نور کند شد توسط Hau و همکارانش ارائه گردید [۱] که در آن سرعت نور تا مقدار 17 m/s کاهش یافت. به طور کلی شرط اساسی ایجاد پدیده EIT برهم کنش ویرانگر دو مد رزونانسی با Q-فاکتور متفاوت است. [۴و۲]

۲- نانو ساختار پیشنهادی

شکل ۱. طرح شماتیک سلول واحد فراماده پیشنهادی، در حالت متقارن همراه با پارامترهای هندسی آنتن ها را نشان می دهد. این سلول واحد شامل سه نانو نوار L_1 ، L_2 و L_3 به ضخامت 40 nm از جنس نقره با گذردهی الکتریکی توصیف شده توسط مدل درود که فرکانس پلاسمای آن $\omega_p = 1.4 \times 10^{16} \text{ s}^{-1}$ و فرکانس برخورد (ضریب میرایی) $\gamma = 3.2 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$ می باشد که روی یک لایه شیشه به ضخامت 100 nm و $n = 1.55$ قرار دارند. این سلول واحد در صفحه XY به صورت دوره ای تکرار می شود و یک تیغه فراماده دو بعدی ایجاد می کند. طول سلول واحد در راستای x، y و x، 850 nm، 850 nm و 80 nm فاصله نوارهای L_3 و L_2 از نوار L_1 ، 60 nm، طول نوار L_1 ، 460 nm و طول

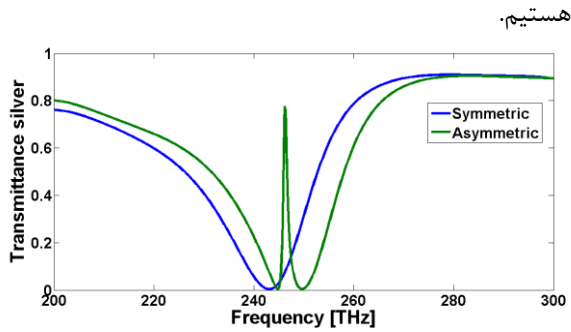
نوارهای L_2 و L_3 230 nm می باشد. نور به طور عمود بر صفحه نوارها تابش می شود و میدان الکتریکی در راستای محور X است. پاسخ های طیفی این ساختار و ضرایب عبور و بازتاب با استفاده از روش FDTD و بوسیله نرم افزار studio CST Microwave در حالت های مختلف محاسبه شده و با نرم افزار متلب رسم شده است.



شکل ۱: سلول واحد فراماده و پارامترهای هندسی ساختار

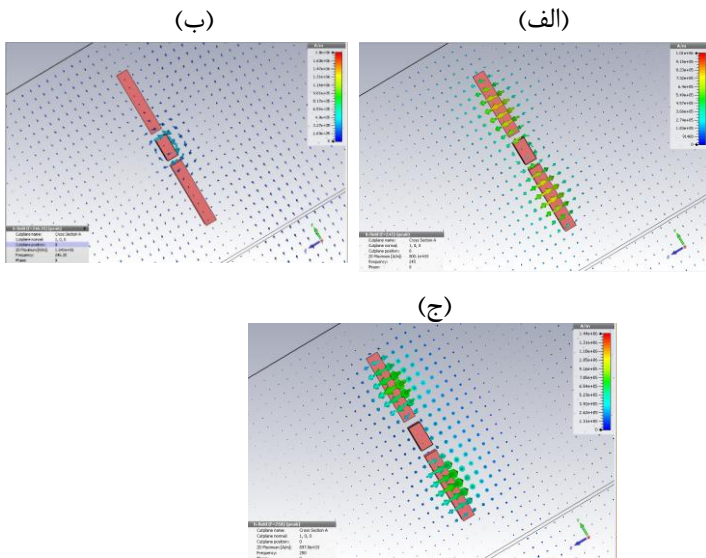
۳- بررسی نانو ساختار در حالت متقارن

در حالت متقارن، مد روشن آنتن های L_2 و L_3 بطور قوی با نور تابشی خارجی کوپل شده اما دچار اتلاف های تابشی زیاد ناشی از میرایی تابشی می شود و دارای فاکتور کیفیت پایینی می باشد. Q-فاکتور کوچک، بدلیل افت تابشی ناشی از دو قطبی های الکتریکی ایجاد شده در طول دو نوار فلزی است. (شکل 2.b) در واقع میدان الکتریکی موج تابشی که در راستای نوار فلزی افقی است، باعث ایجاد دو قطبی الکتریکی در طول نوارهای L_2 و L_3 می شود. دو قطبی های ایجاد شده در دو نوار یکسان و هم جهت است؛ در نتیجه تداخل میدانهای ساطع شده از این دو نوار، سازنده بوده و باعث افزایش پراکندگی می شود. همچنین از آنجایی که میدان مغناطیسی، در صفحه نوارها قرار دارد، امکان ایجاد مد پادمتقارن، به وسیله میدان مغناطیسی میسر نیست. به دلیل تقارن ساختار، مد تاریک آنتن L_1 مستقیماً نمی تواند با نور خارجی کوپل شود؛ بنابراین یک پاسخ طیفی باریک در مقایسه با مد روشن دارد و در نتیجه اتلاف پایین تر و ضریب کیفیت بالاتری را دارا می باشد که ناشی از اتلاف های خود فلز می باشد. (شکل 2.b) جفت شدگی بین آنتن ها وقتی اتفاق می افتد که تقارن ساختار شکسته شود و مدهای مرتبه دوم شروع به تحریک کنند. (شکل 2.b) در حالتی که ساختار متقارن است، فقط شاهد یک تک رزونانس در حدود فرکانس 243.2 THz خواهیم بود. (شکل 2.a)



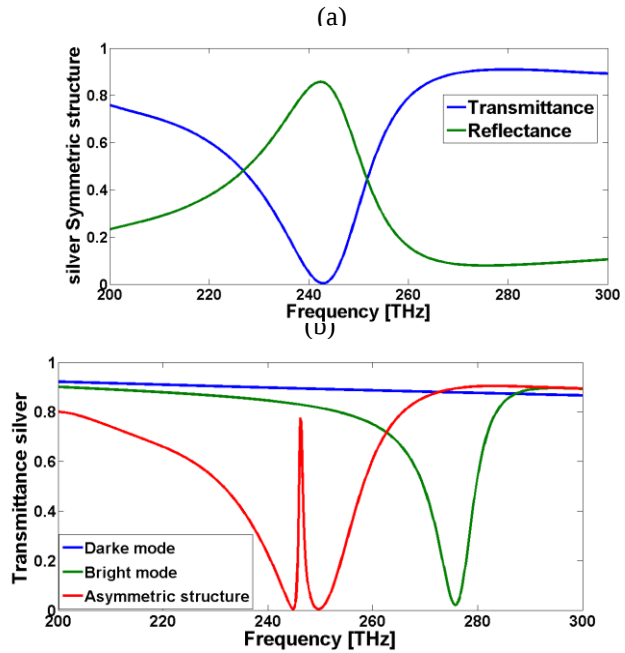
شکل ۴: خط آبی ساختار در حالت متقارن، و خط سبز ساختار در حالت نامتقارن، به ازای $L_2=L_1=230$ nm و $d_2=d_1=60$ nm و $g=10$ nm

در واقع ایجاد این رزونانس ها مربوط به برانگیخته شدن مد پاد متقارن است. علت کاهش افت (در اینجا انعکاس) و افزایش عبور این است که چون جریان های مساوی در خلاف جهت یکدیگر در دو نوار عمودی L_2 و L_3 ایجاد می شود، تداخل میدان های الکترو مغناطیسی ساطع شده توسط این دو جریان، ویرانگر بوده در نتیجه پراکندگی کاهش می یابد. اما از آنجایی که نوارهای فلزی عمودی در فاصله بسیار کمی از نوار L_1 قرار دارند، مد تاریک به طور غیر مستقیم بوسیله مد روشن تحریک میشود. EIT نتیجه تداخل ویرانگر این دو مد است. این اثر مشاهده شده، مطابق شکل در نمودارهای عبور، به اثر شفافیت القایی الکترو مغناطیسی معروف است که با شکستن تقارن هندسی ساختار حاصل شده است.



شکل ۵: (الف) نمایش جریانهای سطحی در مد روشن و تاریک ساختار در فرکانس ۲۴۵ THz، فرکانس قبل از رزونانس. (ب) نمایش جریانهای سطحی در مد روشن و تاریک ساختار در فرکانس ۲۴۶.۳۵ THz، فرکانس رزونانس. (ج) نمایش جریانهای سطحی در مد روشن و تاریک ساختار در فرکانس ۲۵۰ THz، فرکانس بعد از رزونانس.

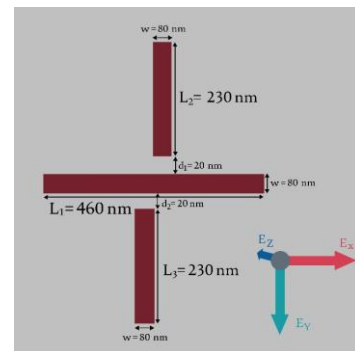
به منظور درک بیشتر موضوع، در شکل ۵ نحوه توزیع میدان و جریان های سطحی در حالت نامتقارن، در فرکانس



شکل ۲: (a) نمودارهای عبور و بازتاب ساختار با فلز نقره؛ در حالت متقارن؛ خط سبز، بازتاب و خط آبی، عبور (b) خط آبی؛ مد تاریک مربوط به نوار L_1 ، خط سبز مد روشن مربوط به نوارهای L_2 و L_3 ، خط قرمز؛ طیف عبور ساختار در حالت شکست تقارن به ازای L_2 و L_3 برابر با ۲۲۵ nm و $d_2=55$ nm و $d_1=45$ nm

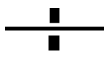
۴- بررسی اثر شکست تقارن نانو ساختار

در این کار با جابجایی افقی و معکوس نوارهای فلزی L_2 و L_3 پدیده EIT مورد مطالعه قرار می گیرد. همانطور که در شماتیک ساختار نامتقارن در شکل ۳ نشان داده شده است، نوارهای فلزی L_2 و L_3 که در فاصله ۶۰ nm از نوار فلزی L_1 قرار دارد را هم زمان به اندازه ۱۰ nm به ترتیب به سمت راست و چپ جابجا می کنیم.



شکل ۳: سلول واحد فراماده و پارامترهای هندسی ساختار

در این شرایط، طیف عبور ساختار کاملاً متفاوت خواهد بود. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، شاهد یک شدت عبور خوب و باند عبور نسبتاً تیز؛ با Q -فاکتور بزرگ در حدود ۲۲۴، حول فرکانس مرکزی ۲۴۶/۲۳ THz

معکوس آنتن های L_2 و L_3 در یک فراماده دوبعدی متشکل از پیکربندی آنتن های فلزی به شکل  به پدیده شفافیت القایی الکترومغناطیسی دست پیدا کردیم. طیفهای عبور بر اساس برهم کنش مدهای تاریک و روشن، شبیه سازی و مورد بررسی قرار گرفته و مشخص شد که وقتی نوار فلزی L_3 به اندازه $g=10\text{ nm}$ به سمت چپ و نوار فلزی L_2 ، به همان اندازه به سمت راست جابجا می شود، شاهد یک شدت عبور خوب و باند عبور تیز؛ با Q _فاکتور بزرگ در حدود ۲۲۴، حول فرکانس مرکزی $246/23\text{ THz}$ هستیم. که نشان می دهد این ساختار نسبت به ساختارهای دو بعدی دیگر در این ناحیه طول موجی از Q _فاکتور بزرگتر و بسیار خوبی برخوردار است. از آنجایی که فرکانس رزونانس تمام مدها در محدوده مادون قرمز قرار دارد، نانو ساختار پیشنهادی می تواند در کاربردهای آشکار سازی مولکول هایی که مد ارتعاشی آنها در ناحیه IR می باشد و نیز تقویت نور در نانو ساختارها [5,6] مورد استفاده قرار گیرد. همچنین با توجه به این که باند عبور تیز و Q _فاکتور بالا در پدیده EIT منجر به کاهش سرعت گروه و کند شدن نور می شود، از این ساختار می توان جهت ساخت حافظه های کوانتومی (ابزاری برای ذخیره اطلاعات) و ارتباطات نوری بهره برد.

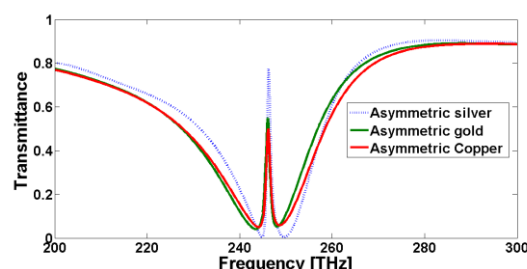
مراجع

- [1] Hau, Lene Vestergaard, et al. "Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas." *Nature* 397.6720 (1999): 594-598.
- [2] Tassin, Philippe, et al. "Planar designs for electromagnetically induced transparency in metamaterials." *Optics express* 17.7 (2009): 5595-5605.
- [3] Liu, Na, et al. "Plasmonic analogue of electromagnetically induced transparency at the Drude damping limit." *Nature materials* 8.9 (2009): 758-762.
- [4] Zhang, Lei, et al. "Large group delay in a microwave metamaterial analog of electromagnetically induced transparency." *Applied Physics Letters* 97.24 (2010): 241904.
- [5] Papasimakis, N., et al. "Metamaterial with polarization and direction insensitive resonant transmission response mimicking electromagnetically induced transparency." *Applied Physics Letters* 94.21 (2009): 211902.
- [6] Kamenetskii, E. O., G. Vaisman, and R. Shavit. "Fano-resonance spectra in microwave structures with magnetostatic-magnon particles." *Session IP8 SC3&4: Fano Resonances in Microwaves and Optics: Physics and Application* (2013): 330.

رزونانس، و نیز در یک فرکانس قبل وبعد از آن نشان داده شده است. در حالت نامتقارن، جهت جریان و میدانهای حاصل از آن در نوارهای فلزی L_2 و L_3 (مد روشن) در خلاف جهت یکدیگر است. با این توضیح بخوبی در شکلهای (الف)، (ب) و (ج) مشاهده می شود که قبل و بعد از رزونانس، جهت میدان حاصل از جریان، نوار L_2 و نوار L_3 تغییر نمی کند. اما در نوار L_1 (مد تاریک) جهت میدان حاصل از جریان، قبل از رزونانس یعنی در شکل (الف)، پاد ساعتگرد ولی در شرایط رزونانس یعنی شکل (ب) و بعد از آن یعنی شکل (ج) ساعتگرد شده است.

۵- بررسی اثر تغییر جنس فلز

هنگامی که در این نانو ساختار، از فلزات مختلف استفاده می کنیم؛ همانگونه که در نمودارهای عبور شکل ۵ نشان داده شده است، رفتار رزونانسی در پاسخهای طیفی شبیه سازی شده در فلزات نقره، طلا و مس تقریباً مشابه می باشد با این توضیح که در نقره بیشترین شدت عبور و Q _فاکتور (حدود ۲۲۴) و در مس کمترین شدت عبوری را داریم؛ و در مقایسه بین طلا و مس، طلا از شدت عبور و Q _فاکتور بیشتر (حدود ۲۰۵/۱۶) برخوردار است؛ اضافه بر آن فرکانس رزونانس نقره و مس با یکدیگر برابر بوده (حدود $246/23\text{ THz}$) اما در خصوص طلا یک شیفت فرکانسی بسیار کم به سمت اعداد کوچکتر یا اصطلاحاً blue shifte، در فرکانس های عبور و نیز پیک عبور (حدود $246/11\text{ THz}$) مشاهده میشود. از آنجایی که باند عبور و فرکانس رزونانس این سه فلز در محدوده مادون قرمز قرار دارد، نانو ساختار پیشنهادی می تواند برای کاربردهای آشکار سازی در ناحیه IR مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۶: خط چین آبی؛ ساختار با فلز نقره، خط سبز؛ ساختار با فلز طلا و خط قرمز؛ ساختار با فلز مس

۶-نتایج

در این کار با شکست تقارن هندسی از طریق حرکت افقی و