



بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه ۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز



طراحی و تحلیل جاذب فراماده‌ای به منظور بهبود میزان جذب نوری ساختار

محمدباقر گلبابایی قرا^۱، محمدکاظم مروج‌فرشی^۱ و الهام نبوی^۲

^۱ دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۲ گروه فیزیک و نجوم، دانشگاه منچستر، منچستر انگلستان

چکیده - در این مقاله، ساختار جدیدی به منظور بهبود عملکرد جاذب‌های فراماده‌ای در حوزه‌ی نورمرئی ارائه شده است. تحلیل‌ها با استفاده از روش عددی المان محدود نشان می‌دهد، میزان جذب ساختار با تغییر پارامترهای ساختار به حدود ۱۰۰ درصد می‌رسد. در این مقاله، به بررسی اثر زاویه‌ی بین دو بیضی بر طیف جذب فراماده‌ی پیشنهادی پرداخته شده است. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد، بازده جاذب فراماده تحت تابش غیرقطبیده‌ی نور برتری قابل ملاحظه‌ای نسبت به جاذب‌های غیرفراماده‌ی دارد. جاذب فراماده‌ی پیشنهادی شامل سه نانولایه از فلز طلا است که با استفاده از دو نانولایه از جنس Si_3N_4 از یکدیگر مجزا شده‌اند.

کلید واژه - فرامواد، جاذب نوری، ضریب شکست منفی، نانو ساختار.

Design and Analysis of Metamaterial Absorber

M. B. Golbabaie Ghara¹, M. K. Moravvej Farshi¹, E. Nabavi^{1,2}

¹ Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

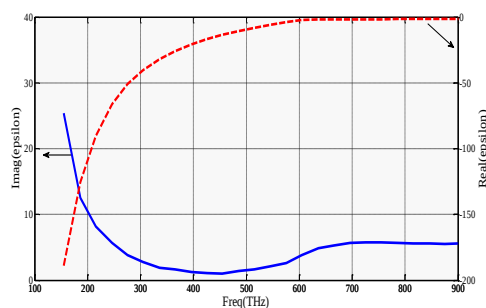
² Department of Physics and Astronomy, University of Manchester, UK

Abstract- A new structure for efficiency enhancement of metamaterial absorber in visible range of spectrum is proposed. The proposed structure is analyzed using FEM method. The results show that by changing the parameters of the proposed structure, the absorbance will increase to 100%. Also, we investigate the effect of the angle between two ellipses on the absorbance spectrum of metamaterial absorber. Simulation results show that metamaterial absorber has a significant preference in comparison to non-metamaterial absorber when illuminated with unpolarized light. The proposed metamaterial absorber consists of three gold nano-layers that are separated by two Si_3N_4 nano-layers.

Keywords: metamaterials, optical absorber, negative index, nanostructures.

۱- مقدمه

جریان‌های آنتی موازی در نانولایه‌های فلزی با استفاده از مولفه میدان مغناطیسی نور ورودی برانگیخته می‌شود. این جریان‌های آنتی موازی به همراه میدان جابه‌جایی در داخل عایق، حلقه‌ی جریان مداری را کامل و نفوذپذیری-مغناطیسی μ را تولید می‌کند. کاهش انتقال به کمک لایه فلزی یک پارچه زیرین و کاهش بازتاب به کمک تطبیق امپدانس ساختار و محیط، میزان جذب را افزایش می‌دهد. تنظیم فرکانس‌های تشدید الکتریکی و مغناطیسی در یک فرکانس یکسان، سبب رشد تطبیق امپدانس بهینه برای تابش اعمال شده می‌شود. بخشهای حقیقی و موهومی ثابت دی‌الکتریک طلا به صورت شکل ۲ تعریف می‌شود.



شکل ۲: قسمت حقیقی و موهومی ثابت دی‌الکتریک فلز طلا

با بهره‌گیری از پارامترهای پراکندگی S وابستگی ضریب های عبور، $T(\omega) = |S_{21}|^2$ ، و بازتاب، $R(\omega) = |S_{11}|^2$ ، به فرکانس محاسبه می‌شود [۷]. به‌طوریکه

$$S_{11} = \frac{\Gamma(1-Z^2)}{1-\Gamma^2 Z^2}, S_{21} = \frac{Z(1-\Gamma^2)}{1-\Gamma^2 Z^2}, \Gamma = \frac{Z-1}{Z+1}, Z = e^{jkd}$$

که d ضخامت افزاره و k بردار موج است. ضریب جذب عبارت است از:

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) \quad (1)$$

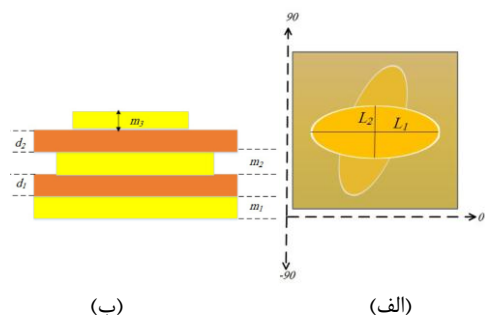
هندسه ساختار جاذب فراماده بر محصورشدگی نور در ساختار موثر خواهد بود و سبب تغییر تشدید میدان-الکتریکی، میدان مغناطیسی، فرکانس رزونانس، ثابت دی-الکتریک، نفوذپذیری مغناطیسی و امپدانس ساختار ($Z = \sqrt{\mu/\epsilon}$) خواهد شد.

نانوساختار فراماده‌ی پیشنهادی با تکرار متناوب سلول واحد نمایش داده شده در شکل ۱، در صفحه x - y حاصل می‌شود. نمای جانبی از ساختار سلول واحد در شکل ۱(الف) و نمای از بالای آن در شکل ۲(ب) نشان

فراماده، ماده‌ای دست‌ساز مرکب از چند ماده گوناگون، دارای ساختاری متناوب با سلول واحدی به ابعاد ۵ تا ۱۰ برابر کوچکتر از طول موج نور ورودی است. به علت رفتار رزونانسی، فراماده می‌تواند دارای ثابت دی‌الکتریک و نفوذپذیری مغناطیسی موثر با مقادیر حدی منفی کسب کند [۱، ۲]. جذب‌کننده‌های فراماده با ضخامت کم و جذب زیاد در فرکانس‌های مایکروویو و تراهرتز توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند [۳، ۴]. یک لایه از جاذب فراماده از صفحه‌های فلز که به وسیله تیغه‌های عایق از هم جدا شده‌اند تشکیل شده‌است. وقتی امپدانس ساختار این نوع فراماده با امپدانس فضای آزاد تطبیق یابد جاذب فراماده‌ی به‌دست‌می‌آید. تاکنون جاذب‌های فراماده‌ای تک‌فرکانسی، دوفرکانسی و چند فرکانسی طراحی شده‌اند [۵، ۶]. در این مقاله جاذب نوری فراماده‌ای برای نور قطبیده نشده در فرکانس‌های نوری طراحی و تحلیل شده است. بازده چنین جاذب‌هایی با استفاده از محاسبه‌ی میدان الکتریکی از طریق حل معادلات ماکسول بررسی شده است.

۲- ساختار سلول واحد و تئوری

جاذب فراماده‌ای، براساس برانگیختگی رزونانسی دوقطبی الکتریکی و دو قطبی مغناطیسی طراحی می‌شود. ساختار سلول واحد طراحی شده در این مقاله همانند شکل ۱ شکل ۲، شامل ۵ نانولایه شامل سه نانولایه‌ی فلزی (طلا) است که با دو نانولایه‌ی عایق (Si_3N_4) از یکدیگر جدا شده‌اند. سلول واحد این ساختار در معرض میدان الکتریکی نوری همانند تشدیدگرهای دوقطبی الکتریکی برای تولید ثابت دی‌الکتریک ϵ عمل می‌کند. رزونانس دوم به کمک



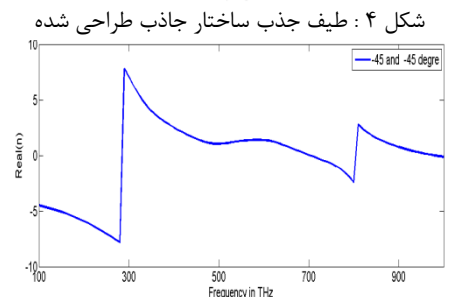
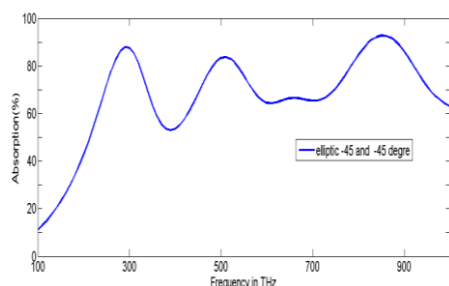
شکل ۱: (الف) تصویر جانبی (ب) تصویر از بالای سلول واحد (زاویه‌ای که قطر بزرگ بیضی‌ها با محور صفر درجه دارد میزان انحراف بیضی‌ها را مشخص می‌کند)

۹۹.۴٪ در فرکانس‌های به ترتیب ۳۸۰ و ۷۳۰ تراهرتز به دست می‌آید. تغییر در زاویه θ سبب تغییر در فرکانس رزونانس و مقدار جذب خواهد شد که علت آن تغییر در جهت جریان‌های آنتی‌موازی و همچنین تاثیر آن روی محصورشدگی میدان مغناطیسی و میدان الکتریکی در ساختار است و منجر به تغییراتی در نفوذپذیری-مغناطیسی و ثابت‌دی‌الکتریک موثر ساختار می‌شود. همچنین با تغییر زاویه بین بیضی‌ها سطح مقطع جریان مداری ناشی از میدان مغناطیسی تغییر می‌کند و سبب تغییر اندوکتانس معادل می‌شود و تغییر در فرکانس رزونانس را به دنبال خواهد داشت.

۳-۲- ضریب شکست ساختار

شکل ۴ طیف جذب را برای ساختار طراحی شده و برای زاویه‌ی بیضی‌ها برابر ۴۵- درجه نشان می‌دهد. ضریب-شکست با استفاده از پارامترهای s به صورت شکل ۵ به دست می‌آید. با توجه به طیف جذبی و طیف ضریب-شکست، پیک جذبی ساختار در فرکانس ۵۱۰ تراهرتز ناشی از فراماده نمی‌باشد.

طیف ثابت‌دی‌الکتریک ساختار در شکل ۶ نشان می‌دهد که در فرکانس ۵۱۰ تراهرتز، ϵ موثر ساختار برابر صفر است و ممکن است پیک جذبی در این فرکانس ناشی از تحریک پلاسمون و یا پراکنش با توجه به وجود عایق و فلز در ساختار باشد.



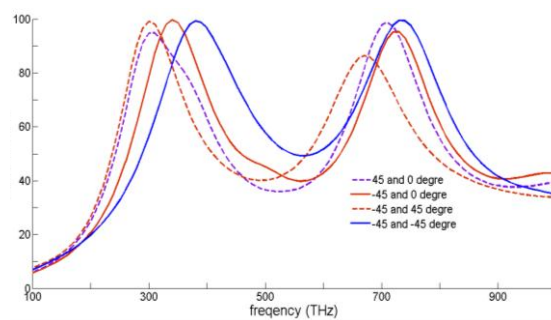
شکل ۵: ضریب شکست موثر ساختار جاذب طراحی شده

داده شده‌است. همان‌طور که در نمای از بالا مشاهده می‌شود، نانولایه‌های لایه طلای میانی به شکل بیضی با قطرهای کوچکتر $L_2=60$ nm و بزرگتر $L_1=100$ nm لایه‌ی طلای بالایی به شکل بیضی با قطرهای کوچکتر $L_2=40$ nm و بزرگتر $L_1=70$ nm برای فلز بالایی که الگوده‌ی شده‌اند. در صورتیکه نانولایه‌ی طلای زیرین و همچنین عایق‌ها یک پارچه‌اند. همچنین فرض شده است که قطرهای بزرگتر دو بیضی لایه‌های بالایی و میانی باهم زاویه‌ی θ بسازند. ضخامت لایه‌های فلزی (m) و عایق‌ها (d) همه $m_1=m_2=m_3=d_1=d_2=11$ nm برابرند. و مقطع از بالای سلول واحد هم مربعی به ابعاد ۱۷۰ نانومتر است. با استفاده از شرایط مرزی تناوبی در جهت‌های x ، y و با فرض تابش نور ورودی قطبیده نشده عمود بر سطح بالایی ساختار (در راستای محور z)، ضریب جذب محاسبه می‌شود. اثر اندازه‌ی زاویه θ بر روی اندازه‌ی ضریب جذب نیز بررسی می‌شود.

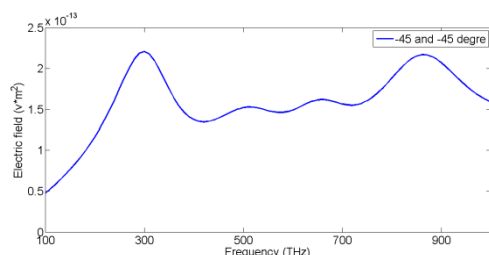
۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی اثر تغییر θ

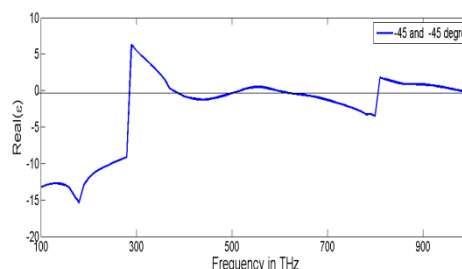
تغییر پارامتر در جاذب، محصورشدگی نور تابش شده به ساختار را تغییر می‌دهد که سبب تغییر در تشدید میدان مغناطیسی و میدان الکتریکی می‌شود و آن هم سبب تغییر ثابت دی‌الکتریک، نفوذپذیری مغناطیسی می‌شود. با تغییر ثابت‌دی‌الکتریک و نفوذپذیری مغناطیسی، امپدانس ساختار تغییر می‌کند. شکل ۷ طیف جذب را نسبت به تغییر فرکانس در زاویه‌های متفاوت بیضی برای سلول واحد $m_1=m_2=m_3=d_1=d_2=11$ nm و $L_2=50$ nm و $L_1=70$ nm نشان می‌دهد. با تغییر زاویه θ می‌توان محصورشدگی نور در ساختار را تغییر داد. با توجه به شکل ۳ با زاویه بیضی ۴۵- جذب خوبی حدود ۹۹.۳٪ و



شکل ۳: تغییر طیف جذب نسبت به فرکانس با تغییر زاویه



شکل ۷: طیف میدان الکتریکی در واحد حجم در ناحیه عایق ساختار جاذب طراحی شده



شکل ۶: طیف ثابت‌دی الکتریک موثر ساختار جاذب طراحی شده

مراجع

- [۱] J. Pendry, A. Holden, W. Stewart, and I. Youngs, "Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures," *Physical review letters*, vol. 76, p. 4773, 1996.
- [۲] J. Pendry, A. Holden, D. Robbins, and W. Stewart, "Low frequency plasmons in thin-wire structures," *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 10, p. 4785, 1998.
- [۳] N. Landy, S. Sajuyigbe, J. Mock, D. Smith, and W. Padilla, "Perfect metamaterial absorber," *Physical review letters*, vol. 100, p. 207402, 2008.
- [۴] H. Tao, C. Bingham, A. Strikwerda, D. Pilon, D. Shrekenhamer, N. Landy, et al., "Highly flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber: Design, fabrication, and characterization," *Physical Review B Condensed Matter And Materials Physics*, vol. 78, p. 241103R, 2008.
- [۵] H. Tao, C. Bingham, D. Pilon, K. Fan, A. Strikwerda, D. Shrekenhamer, et al., "A dual band terahertz metamaterial absorber," *Journal of physics D: Applied physics*, vol. 43, p. 225102, 2010.
- [۶] Q.-Y. Wen, H.-W. Zhang, Y.-S. Xie, Q.-H. Yang, and Y.-L. Liu, "Dual band terahertz metamaterial absorber: Design, fabrication, and characterization," *Applied Physics Letters*, vol. 95, pp. 241111-241111-3, 2009.
- [۷] X. Chen, T. M. Grzegorzczak, B.-I. Wu, J. Pacheco Jr, and J. A. Kong, "Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials," *Physical Review E*, vol. 70, p. 016608, 2004.
- [۸] S. Xiao, E. Stassen, and N. A. Mortensen, "Ultrathin silicon solar cells with enhanced photocurrents assisted by plasmonic nanostructures," *Journal of anophotonics*, vol. 6, pp. 061503-1-061503-7, 2012.

شکل ۷ طیف میدان الکتریکی در واحد حجم عایق از ساختار سلول واحد را نشان می‌دهد. میدان الکتریکی فرکانسی که طیف جذب ساختار دارای خاصیت فراموادی است، قوی می‌باشد و در پیکی از جذب که ساختار، فراماده نباشد شدت میدان هم ضعیف می‌باشد.

با توجه به رابطه ۲ و ارتباط جریان بر واحد سطح با میدان الکتریکی، در فرکانسی که ساختار فراماده است، جریان هم بیشتر خواهد بود [۸]. که در آن q بار الکترون، A سطح نوردهی شده، Γ_{GR} نرخ تولید الکترون در واحد حجم و انتگرال بر روی حجم است. $|E(\omega)|^2$ توان دوم اندازه میدان الکتریکی درون محیط فعال می‌باشد و $\varepsilon''(\omega)$ بخش موهومی تابع دی‌الکتریک محیط جذب می‌باشد، با توجه به نتایج می‌توان امیدوار به ساخت آشکارساز نوری که از جاذب فراماده در لایه فعال آن استفاده شود، بود.

$$J_{sc} = \frac{q}{A} \int \Gamma_{GR} dV \quad (2)$$

$$\Gamma_{GR} = \int \frac{\varepsilon''(\omega) |E(\omega)|^2}{2\hbar} d\omega \quad (3)$$

۴- نتیجه‌گیری

این مقاله نتایج شبیه‌سازی را برای جاذب فراموادی با سلول واحد بیضوی نشان می‌دهد. نتایج نشان از برتری در جذب فراموادی نسبت به جذب‌های غیرفراموادی در تولید الکترون-حفره و تولید جریان را دارد. تغییر θ در چنین ساختارهایی سبب تغییر جذب می‌شود. با تغییر θ جذبی خوب حدود ۹۹.۳٪ و ۹۹.۴٪ در فرکانس‌های به ترتیب ۳۸۰ و ۷۳۰ تراهرتز را خواهیم داشت. با توجه به بهبود میزان جذب ساختارهای فراماده نسبت به ساختارهای غیرفراماده می‌توان از چنین جاذبهایی در لایه فعال آشکارسازهای نوری و سلولهای خورشیدی به منظور بهبود راندمان سلولهای خورشیدی استفاده کرد.