



لیفن
جذب نوری

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 بهبدود میزان جذب نوری ساختار

محمدباقر گلبابایی‌قراء^۱، محمدکاظم مروج‌فرشی^۱ و الهام نبوی^۲

^۱دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت‌مدرس، تهران، ایران

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

چکیده - در این مقاله، ساختار جدیدی به منظور بهبدود عملکرد جاذب‌های فراماده در حوزه‌ی نور مرئی 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 غیرقطبیده نور برتری قابل ملاحظه‌ای نسبت به جاذب‌های غیرفراماده 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 - فراماده، جاذب نوری، ضریب شکست منفی، نانوساختار.

Design and Analysis of Metamaterial Absorber

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

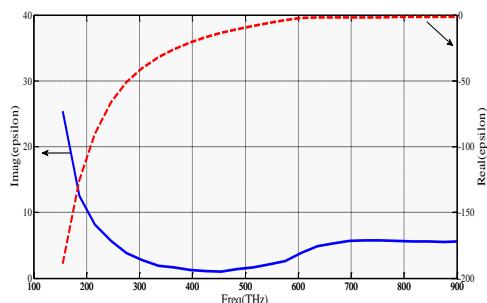
¹ Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

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.

جريان‌های آنتی موازی در نانولایه‌های فلزی با استفاده از مولفه میدان مغناطیسی نور ورودی برانگیخته می‌شود. این جريان‌های آنتی موازی به همراه میدان جابه‌جایی در داخل عایق، حلقه‌ی جريان مداری را كامل 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 تشیدیک الکتریکی و مغناطیسی در بک 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، $T(\omega)$ ، و بازتاب، $R(\omega) = |S_{11}|^2$ ، به فرکانس محاسبه می‌شود [۷]. به طوریکه

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

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

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

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

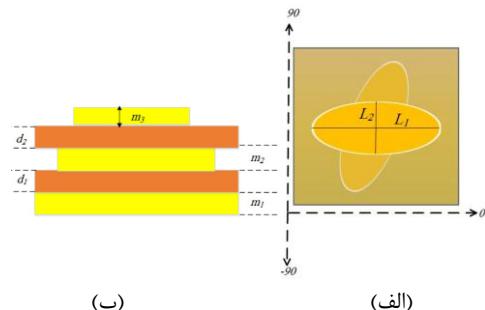
نانوساختار فرما مده پیشنهادی با تکرار متناوب سلول واحد نمایش داده شده در شکل ۱، در صفحه $x-y$ ، حاصل می‌شود. نمای جانبی از ساختار سلول واحد در شکل ۱(الف) و نمای از بالای آن در شکل ۲(ب) نشان

۱- مقدمه

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

۲- ساختار سلول واحد و تئوری

جادب فرما مده‌ای، 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 نانولایه فلزی (طلاء) است که با دو نانولایه عایق (Si_3N_4) از یکدیگر جدا شده‌اند. سلول واحد این ساختار در معرض میدان الکتریکی نوری همانند تشیدگرهای دوقطبی الکتریکی برای تولید ثابت دی‌الکتریک ۶ عمل می‌کند. رزونانس دوم به کمک



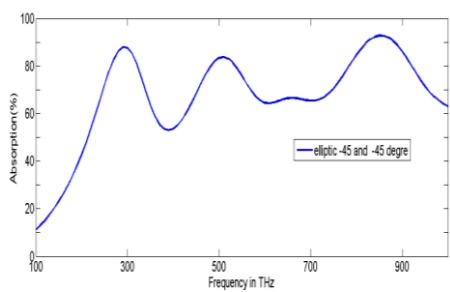
شکل ۱(الف) تصویر جانبی ب) تصویر از بالای سلول واحد (زاویه‌ای که قطر بزرگ بیضی‌ها با محور صفر درجه دارد میزان انحراف بیضی‌ها را مشخص می‌کند)

۹۹.۶٪ 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 محصورشدنگی 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.

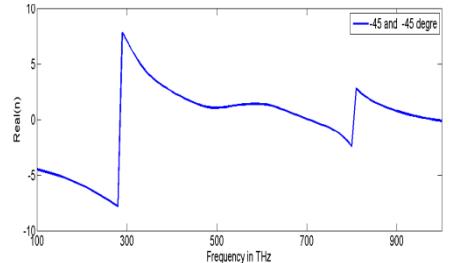
۲-۳- ضربی شکست ساختار

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

طیف ثابت‌دی‌الکتریک ساختار در شکل ۶ نشان می‌دهد که در فرکانس ۵۱۰ تراهرتز، ۶٪ 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 ۴ : طیف جذب ساختار جاذب طراحی شده



شکل ۵: ضربی شکست موثر ساختار جاذب طراحی شده

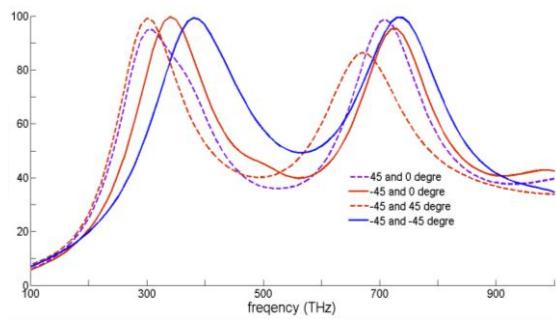
داده شده است. همان‌طور که در نمای از بالا مشاهده می‌شود، نانولایه‌های لایه طلای میانی به شکل بیضی با قطرهای کوچکتر $L_1=100$ nm و بزرگتر $L_2=60$ nm لایه‌ی طلای بالایی به شکل بیضی با قطرهای کوچکتر $L_1=70$ nm و بزرگتر $L_2=40$ nm برای فلز بالایی که الگوهی‌شده اند. در صورتیکه نانولایه‌ی طلای زیرین و همچنین عایق‌ها یک‌پارچه اند. همچنین فرض شده است که قطرهای بزرگتر دو بیضی لایه‌های بالایی و میانی باهم زاویه‌ی θ بسانند. ضخامت لایه‌های فلزی (m) و عایق‌ها $m_1=m_2=m_3=d_1=d_2=11$ 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 z فرض تابش نور ورودی قطبیده‌نشده عمود بر سطح بالایی ساختار (در راستای محور (z) ، ضربی جذب محاسبه می‌شود. اثر اندازه‌ی زاویه θ بر روی اندازه‌ی ضربی جذب نیز بررسی می‌شود.

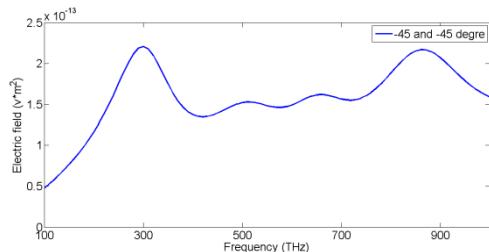
۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی اثر تغییر θ

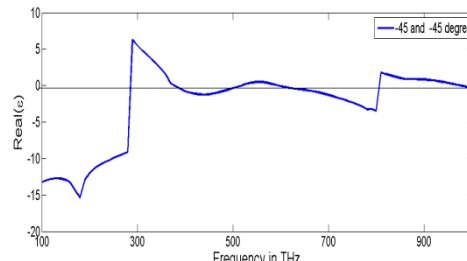
تغییر پارامتر در جاذب، محصورشدنگی نور تابش شده به ساختار را تغییر می‌دهد که سبب تغییر در تشید میدان مغناطیسی و میدان الکتریکی می‌شود و آن هم سبب تغییر ثابت‌دی‌الکتریک، نفوذپذیری‌مغناطیسی می‌شود. با تغییر ثابت‌دی‌الکتریک و نفوذپذیری‌مغناطیسی، امپانس ساختار تغییر می‌کند. شکل ۷ طیف جذب را نسبت به تغییر فرکانس در زاویه‌های متفاوت بیضی برای سلول-واحد $L_2=50$ nm و $m_1=m_2=m_3=d_1=d_2=11$ nm نشان می‌دهد. با تغییر زاویه θ می‌توان محصورشدنگی نور در ساختار را تغییر داد. با توجه به شکل ۳ با زاویه بیضی ۴۵-۴۵ درجه 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. Grzegorczyk, 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 nanophotonics*, 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 در 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. $|E(\omega)|^2 \epsilon(\omega)$ اندازه میدان الکتریکی درون محیط فعال می‌باشد و $\epsilon(\omega)$ بخش موهومیتابع دی الکتریک محیط جذب می‌باشد، با توجه به نتایج می‌توان امیدوار به ساخت آشکارسازنوری که از جاذب فراماده در لایه فعال آن استفاده شود، بود.

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

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

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 جاذبه‌ای در لایه فعال آشکارسازهای نوری و سلولهای خورشیدی به منظور بهبود راندمان سلولهای خورشیدی استفاده کرد.