بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

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

محمدباقر گلبابایی‌قرا[۱]، محمدکاظم مروج‌فرشی[۱] و الهام نبوی[۱و۲]

[۱]دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت‌مدرس، تهران، ایران

[۲]گروه فیزیک ونجوم، دانشگاه منچستر، منچستر انگلستان

چکیده –در این مقاله، ساختار جدیدی به منظور بهبود عملکرد جاذب‌های فراموادی 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 می-دهد، بازده جاذب فراماده تحت تابش غیرقطبیده‌ی نور برتری قابل ملاحظه‌ای نسبت به جاذب‌های غیرفراموادی دارد. جاذب فراماده‌ی پیشنهادی شامل سه نانولایه از فلز طلا است که با استفاده از دو نانولایه ازجنس Si_3N_4 از یکدیگرمجزا شده‌اند.

کلید واژه- فراموا‌د، جاذب نوری، ضریب شکست منفی، نانوساختار.

Design and Analysis of Metamaterial Absorber

M. B. Golbabaei Ghara[1], M. K. Moravvej Farshi[1], 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.

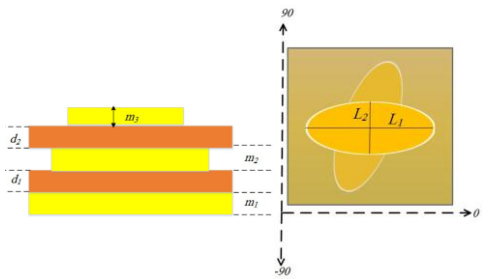
[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]

۱- مقدمه

فراماده، ماده‌ای دست‌ساز مرکب از چند ماده گوناگون، دارای ساختاری متناوب با سلول واحدی به ابعاد ۵ تا۱۰ برابر کوچکتر از طول موج نور ورودی است. به علت رفتار رزونانسی، فراماده می‌تواند دارای ثابت‌دی‌الکتریک 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 جاذب‌فراماده از صفحه‌های فلز که به وسیله تیغه‌های عایق از هم جدا شده‌اند تشکیل شده‌است. وقتی‌امپدانس ساختار این نوع فراماده با امپدانس فضای آزاد تطبیق یابد جاذب فرامادی به‌دست‌می‌آید. تاکنون جاذب‌های فراماده‌ای تک‌فرکانسی، دوفرکانسی و چند فرکانسی طراحی شده‌اند [۵, ۶]. در این مقاله جاذب نوری فراماده ای برای نور قطبیده‌نشده 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

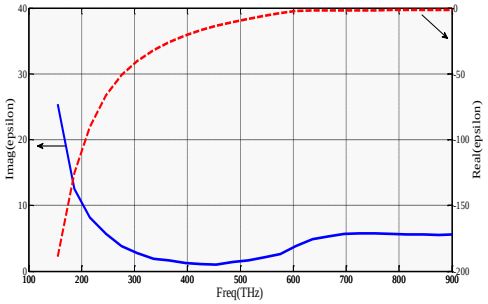
جاذب فراماده‌ای، براساس برانگیختگی رزونانسی دوقطبی الکتریکی و دو قطبی مغناطیسی طراحی می‌شود. ساختار سلول واحد طراحی‌شده دراین مقاله همانند شکل ۱ شکل ۲، شامل ۵ نانولایه شامل سه نانولایه‌ی فلزی (طلا) است که با دو نانولایه‌ی عایق (Si_3N_4) از یکدیگر جدا شده‌اند. سلول‌واحد این ساختار در معرض میدان الکتریکی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



(ب) (الف)

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)

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 یک‌پارچه 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 دی الکتریک 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

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

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

$$A(\omega)=1-R(\omega)-T(\omega) \qquad (۱)$$

هندسه ساختار جاذب فراماده بر محصورشدگی نور در ساختار موثر خواهد بود و سبب تغییر تشدید میدان-الکتریکی، میدان‌مغناطیسی، فرکانس‌رزونانس، ثابت‌دی-الکتریک، نفوذپذیری‌مغناطیسی و امپدانس‌ساختار ($Z=\sqrt{\mu/\varepsilon}$) خواهد شد.

نانوساختار فراماده‌ی پیشنهادی با تکرار متناوب سلول واحد نمایش داه شده در شکل ۱، در صفحه x-y، حاصل می‌شود. نمای جانبی از ساختار سلول‌واحد در شکل۱(الف) ونمای ازبالای آن در شکل۲(ب) نشان

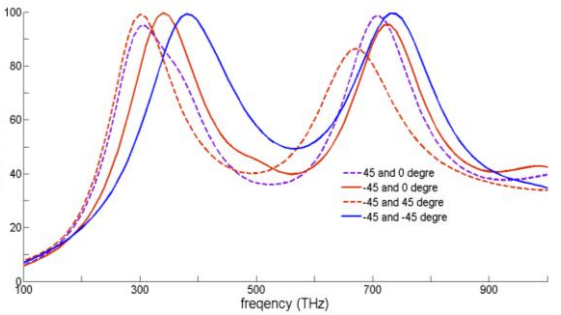
[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]

داده شده‌است. همان‌طور که در نمای از بالا مشاهده می‌شود، نانولایه‌های لایه طلای میانی به شکل بیضی با قطرهای کوچکتر L_2=60 nm وبزرگتر 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 الگودهی‌شده اند. درصورتیکه نانولایه‌ی طلای زیرین و همچنین عایق‌ها یک‌پارچه اند. همچنین فرض شده است که قطرهای بزرگتر دو بیضی لایه‌های بالایی و میانی باهم زاویه‌ی θ بسازند. ضخامت لایه‌های فلزی (m) و عایق ها (d) همه $m_1=m_2=m_3=d_1=d_2=11$nm برابرند. ومقطع ازبالای 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 قطبیده‌نشده 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 ومیدان الکتریکی می‌شود و آن هم سبب تغییر ثابت دی‌الکتریک، نفوذپذیری‌مغناطیسی می‌شود. با تغییر ثابت‌دی‌الکتریک و نفوذپذیری‌مغناطیسی، امپدانس ساختار تغییر می‌کند. شکل ۷ طیف جذب را نسبت به تغییر فرکانس در زاویه‌های متفاوت بیضی برای سلول-واحد m1=m2=m3=d1=d2=11nm و L2=50 nm و L1=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



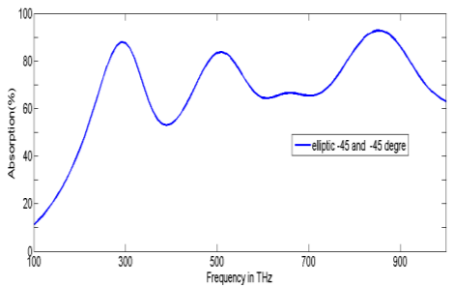
شکل ۳ : تغییر طیف جذب نسبت به فرکانس با تغییر زاویه

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 میدان‌الکتریکی 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.

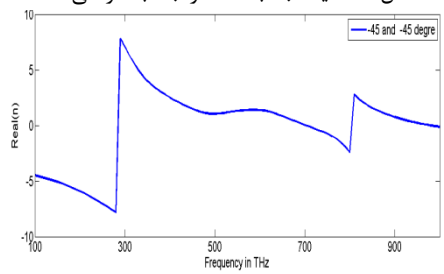
۳-۲- ضریب شکست ساختار

شکل ۴ طیف جذب را برای ساختار طراحی‌شده و برای زاویه‌ی بیضی‌ها برابر ۴۵- درجه نشان می‌دهد. ضریب-شکست با استفاده از پارامترهایs به صورت شکل ۵ به دست می‌آید. با توجه به طیف جذبی و طیف ضریب-شکست، پیک‌جذبی 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.

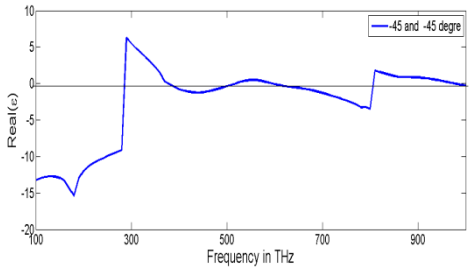


شکل ۴ : طیف جذب ساختار جاذب طراحی شده



شکل ۵: ضریب شکست موثر ساختار جاذب طراحی شده

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]



شکل ۶ : طیف ثابت‌دی‌الکتریک موثر ساختار جاذب طراحی شده

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

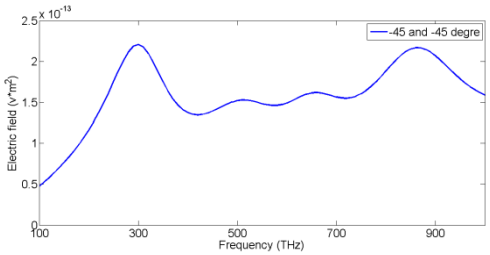
با توجه به رابطه۲ و ارتباط جریان بر واحد سطح با میدان‌الکتریکی، در فرکانسی که ساختار فراماده است، جریان هم بیشتر خواهد بود[۸]. که در آن q بار الکترون، A سطح نوردهی شده، Γ_{GR} نرخ تولید الکترون در واحد حجم و انتگرال بر روی حجم است. $|E(\omega)|^2$ توان دوم اندازه میدان‌الکتریکی درون محیط فعال می‌باشد و $\varepsilon''(\omega)$ بخش موهومی تابع دی‌الکتریک محیط جذب می‌باشد، با توجه به نتایج می‌توان امیدوار به ساخت آشکارسازنوری که از جاذب فرماده در لایه فعال آن استفاده شود، بود.

$$J_{sc} = \frac{q}{A}\int \Gamma_{GR} dV \qquad (۲)$$

$$\Gamma_{GR} = \int \frac{\varepsilon''(\omega)|E(\omega)|^2}{2\hbar} d\omega \qquad (۳)$$

۴- نتیجه‌گیری

این مقاله نتایج شبیه‌سازی را برای جاذب فراموادی با سلول‌واحد 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.



شکل ۷ : طیف میدان‌الکتریکی در واحد حجم در ناحیه عایق 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.

[٤] 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.

[٥] 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.

[٦] 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 anophotonics, vol. 6, pp. 061503-1-061503-7, 2012.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]