



شبیه سازی و مهندسی فراماده های پربولیک چندلایه ای با پاسخ اپتیکی پهن باند در ناحیه طول موجی مرئی

مریم محمودی، سید حسن توسلی

ایران، تهران، ولنجک، دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده لیزر و پلاسما

چکیده - فراماده های پربولیک یکی از پرکاربردترین شاخه های مواد مصنوع هستند که از ترکیب مواد دی الکتریک و فلز ساخته می شوند. این ساختارها به دلیل ویژگی های اپتیکی منحصر به فرد و همچنین فراهم آوردن قابلیت مهندسی پاسخ های اپتیکی، در حوزه های مختلف علوم بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. در این مقاله طراحی افزاره چندلایه ای فراماده های پربولیک و نتایج مشخصه یابی اپتیکی آن با استفاده از شبیه سازی *FDTD* ارائه شده است. نتایج بدست آمده ساختاری مهندسی شده با توان بازتاب بالای ۸۰ درصد در پهن باند ۴۸۵-۸۰۰ نانومتر (ناحیه طول موجی مرئی) و توان عبور بالا در طول موج های کوتاه تر از ۴۸۵ نانومتر را نشان می دهد.

کلید واژه - فراماده، فراماده های پربولیک، مهندسی اپتیکی

Simulation and Engineering of a Multilayer Hyperbolic Metamaterial with Broadband Optical Responses in Visible Wavelengths

Maryam Mahmoodi, Seyed Hassan Tavassoli

Iran, Tehran, Velenjak, Shahid Beheshti University, Laser and Plasma Research Institute

Abstract- Hyperbolic Metamaterials are of most attention gathering branches of artificial materials which are made of dielectrics and metals contribution. Due to unique optical properties as well as providing capability of engineering of their optical responses, these kind of metamaterials have applicability in different fields of science. In the following paper, designing of a multilayer hyperbolic metamaterial device and its optical characteristics using *FDTD* simulation are presented. The results demonstrate an engineered device with more than 80% reflectivity in broadband of 485-800 nm (visible wavelengths) and high transmittance at shorter wavelengths of 485nm.

Keywords: Metamaterials, Hyperbolic Metamaterial, Optical engineering

۱- مقدمه

در دو دهه اخیر نیاز به موادی با خواص نوری جدید محققین و دانشمندان را به سمت مفهومی به نام فرامواد هدایت کرده است. پیشرفت همزمان روش های ساخت ادوات نانومتری نیز از انگیزه های اصلی برای تمرکز بیشتر در حوزه ساختارهای زیرطول موجی و پدیده های منحصر به فرد آنها شده است. فرامواد، ساختارهایی در ابعاد زیرطول موج هستند که خواص نوری غیرمعمول از خود نشان می دهند که برای مهندسی کردن و کنترل انتشار امواج الکترومغناطیسی استفاده می شوند. در این میان دسته ای از مواد مصنوعی که به عنوان یکی از مهم ترین مواد در ناحیه طول موج های مرئی شناخته شده اند، فرامواد های پربولیک هستند (HMM^۱). تحقیقات بر روی فرامواد های پربولیک با تمرکز بر ویژگی ناهمسانگردی شدید در پاسخ اپتیکی آنها آغاز شد. پس از آن با گسترش یافتن کاربردهای این نوع از فرامواد در تصویرنگاری زیرطول موجی، موج برهای نانومتری، محبوس سازی نور، افزایش تابش خودبخودی تابشگرهای کوانتومی و حسگرهای زیستی [۱ و ۲]، زمینه تحقیقات بر روی این مواد گسترش یافت. از دلایل عمده برای توجه دانشمندان به این مواد می توان سادگی در ساخت، پاسخ غیرتشدید در حالت توده ای^۲، تنظیم پذیری در بازه بزرگ طول موجی را نام برد [۱ و ۲]. در این مقاله ابتدا به معرفی تئوری فرامواد های پربولیک چندلایه ای که خواص های پربولیک در ناحیه مرئی از خود بروز می دهند، می پردازیم و در ادامه با استفاده از شبیه سازی بر مبنای روش FDTD^۳ افزاره های پربولیک چندلایه ای متشکل از ۱۴ لایه متناوب از نقره و اکسید آلومینیوم طراحی شده و ضرایب گذردهی الکتریکی و همچنین طیف بازتابی و عبوری آن در بازه طول موجی ۳۰۰-۸۰۰ نانومتر محاسبه و ارائه می شود.

۲- تئوری

فرامواد های پربولیک چندلایه ای، با قرار گرفتن متناوب لایه های نازک (در ابعاد نانومتر) فلز و دی الکتریک بر روی یکدیگر طراحی می شوند. سلول واحد در این ساختارها دولایه ای های فلز و دی الکتریک است. با تکرار سلول واحد، جفت شدگی بین پلاسمون پولاریتون های سطحی موجب تشکیل مدهای بلاخ حجمی می شود. چنین رفتاری باعث میشود که بر خلاف ساختارهای مبتنی بر تشدید پلاسمونی، ساختارهای فرامواد های پربولیک پاسخ های اپتیکی غیرتشدید و پهن باند داشته باشند. ویژگی منحصر به فرد این ساختارهای غیرتشدید و غیرمغناطیسی، ناهمسانگردی شدید در پارامترهای اپتیکی آن است. توضیح دقیق این ویژگی منحصر به فرد با استفاده از مفهوم سطوح هم فرکانس امکان پذیر است.

۲-۱- سطوح هم فرکانس

همانطور که می دانیم در خلا، رابطه پاشندگی خطی و رفتار همسانگرد امواج منتشرشونده با سطح هم فرکانس کروی و با رابطه (۱) بیان می شود (شکل ۱ الف).

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \quad (1)$$

در یک محیط ناهمسانگرد تک محوری^۴ که با تانسور گذردهی الکتریکی در دستگاه مختصات اصلی^۵ به شکل رابطه (۲) بیان می شود، $\epsilon_{||} = \epsilon_x = \epsilon_y$ مولفات درون سطح و $\epsilon_{\perp} = \epsilon_z$ مولفه عمود بر سطح ماده و هر دو مقادیری مثبت هستند. در چنین محیطی امواج عادی^۶ با قطبش TE و غیرعادی^۷ با قطبش TM دو مد انتشاری هستند که برای امواجی با قطبش TM سطح هم فرکانس کروی به سطح بیضوی تبدیل می شود.

^۴ Uniaxial Anisotropy^۵ Principal coordinate system^۶ Ordinary wave^۷ Extraordinary wave^۱ Hyperbolic MetaMaterials^۲ Bulk^۳ Finite Difference Time Domain

ضخامتی برابر با t_m, ε_m و t_d, ε_d باشند، بر اساس این تئوری، ضریب پرتشددگی^{۱۰} فلز، به صورت نسبت ضخامت فلز به ضخامت سلول واحد و با رابطه (۳) بیان می‌شود.

$$q = \frac{t_m}{t_m + t_d} \quad (3)$$

و می‌توان ضرایب تانسور گذردهی، مولفات موازی و عمود نسبت به محور نوری، را با رابطه (۴) محاسبه کرد [۳].

$$\varepsilon_{\perp} = \frac{\varepsilon_m \varepsilon_d}{q \times \varepsilon_d + (1-q) \times \varepsilon_m} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{\parallel} = q \times \varepsilon_m + (1-q) \times \varepsilon_d$$

با تغییر جنس و ضخامت سلول واحد می‌توان به ساختارهایی با پاسخ اپتیکی متفاوت دست یافت. شرط برقراری تئوری محیط موثر این است که نوسانات میدان الکترومغناطیسی در هر سلول واحد بسیار کوچک باشد. به عبارتی سلول واحد باید در ابعاد زیرطول موجی باشد [۴].

۳- نتایج و بحث

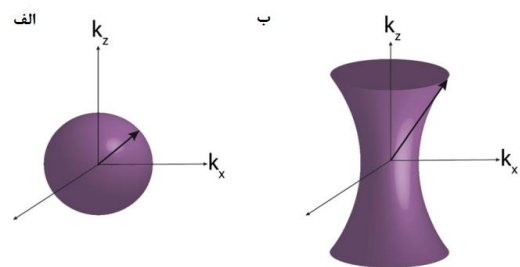
در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی بر اساس روش FDTD، ساختار هایپربولیک چندلایه‌ای متشکل از ۱۴ لایه متناوب از اکسید آلومینیوم^{۱۱} و نقره (۷ سلول واحد) را طراحی کرده‌ایم. ساختار طراحی شده با ۱۰ نانومتر نقره و ۲۵ نانومتر اکسید آلومینیوم و با ضریب پرتشددگی ۰.۲۸ تئوری محیط موثر را برآورده می‌کند. در شکل ۲، بخش حقیقی (خط آبی) و بخش موهومی (خط قرمز) مقادیر گذردهی الکتریکی نقره و همچنین گذردهی الکتریکی اکسید آلومینیوم (خط سبز) که از کتابخانه مواد پالیک^{۱۲} استخراج شده اند، نشان داده شده است. با استفاده از این مقادیر، مولفات تانسور گذردهی- الکتریکی ساختار را بر اساس تئوری محیط موثر و رابطه (۴)

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{\parallel} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{\perp} \end{bmatrix} \quad (2)$$

پاسخ دی‌الکتریک فرامواد هایپربولیک مشابه کریستال تک محوری است با این تفاوت که برای این مواد با ناهمسانگردی به صورت $\varepsilon_{\perp} \times \varepsilon_{\parallel} < 0$ ، سطح هم‌فرکانس برای امواجی با قطبش TM از حالت بسته (بیضوی) به صورت باز و به شکل هذلولی^۸ تبدیل شده (شکل ۱ ب) و رابطه پاشندگی برای آن به صورت رابطه (۳) بیان می‌شود. ویژگی چنین رابطه پاشندگی این است

$$\frac{k_x^2 + k_y^2}{\varepsilon_{\perp}^2} + \frac{k_z^2}{\varepsilon_{\parallel}^2} = \frac{\omega^2}{c^2} \quad (3)$$

که ساختار چندلایه‌ای در راستای عمود بر سطح ($\varepsilon_{\perp} > 0$) خواص دی‌الکتریک و در راستای درون سطح ($\varepsilon_{\parallel} < 0$) خواص فلزی از خود نشان می‌دهد.



شکل ۱: سطح هم فرکانس برای، الف: دی‌الکتریک همسانگرد ب: فرامواد ناهمسانگرد با $\varepsilon_{\perp} > 0$ و $\varepsilon_{\parallel} < 0$ [۴].

۲-۲- تئوری محیط موثر

برای محاسبه مولفات تانسور گذردهی برای چندلایه‌ای در ابعاد زیر طول موج، از تئوری محیط موثر^۹ استفاده می‌شود. در طراحی فرامواد هایپربولیک اگر لایه‌های فلز و دی-الکتریک به ترتیب دارای ضریب گذردهی الکتریکی و

^{۱۰} Fill Fraction

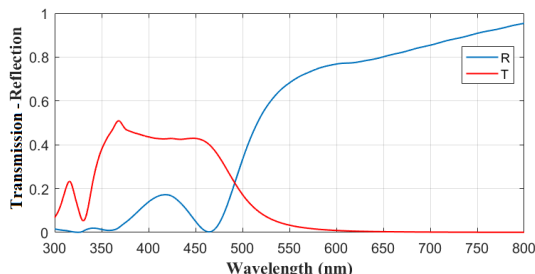
^{۱۱} Al₂O₃

^{۱۲} Handbook of Palik

^۸ Hyperbolic

^۹ Effective Medium Theory

باند مورد نظر است. با توجه به این نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که افزاره طراحی شده با دو مولفه منفی و یک مولفه مثبت در تانسور گذردهی در فاز هایپربولیک، پاسخی فلزگونه و با جذب بسیار کم خواهد داشت.



شکل ۴: ضرایب بازتاب (نمودار آبی) و عبور (نمودار قرمز) ساختار فراماده هایپربولیک

در شکل ۴ ضرایب بازتاب و عبور ساختار طراحی شده برای قطبش TM در بازه ۳۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر ترسیم شده‌اند. همان‌طور که انتظار داشتیم، این ساختار در طول موج‌های بالاتر از ۴۸۵ نانومتر که در فاز هایپربولیک قرار دارد، به دلیل غلبه خاصیت فلزی بازتاب زیاد از خود نشان داده و در طول موج‌های کوتاه‌تر از ۴۸۵ نانومتر ضریب عبور قابل ملاحظه‌ای دارد. از کاربردهای ساختار طراحی شده می‌توان طیف‌سنجی و میکروسکوپی فلئورسانس را نام برد که این افزاره به عنوان زیرلایه می‌تواند عبوری مناسب در ناحیه طول موج برانگیختگی فلئوفورها و بازتاب قابل توجه در ناحیه طول موج فلئورسانس آنها، که معمولاً بزرگتر از ۴۸۰ نانومتر است، را فراهم آورد.

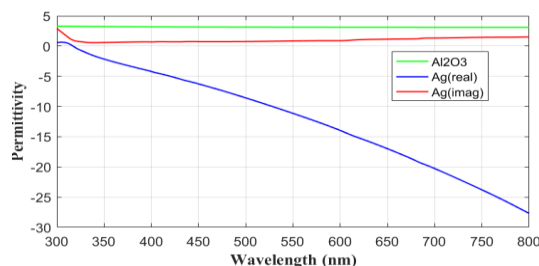
۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی ساختار فراماده هایپربولیک با ضریب بازتاب بالای ۸۰ درصد در پهن باند ۴۸۵-۸۰۰ نانومتر و ضریب عبور بالا در طول موج‌های پایین‌تر از ۴۸۵ نانومتر انجام شده و نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است.

مراجع

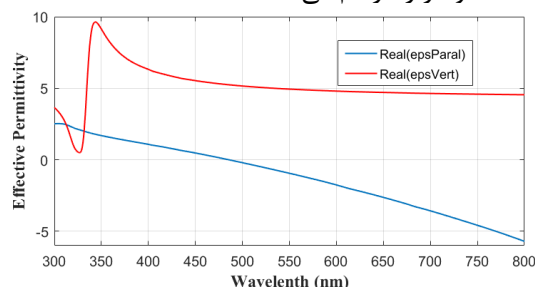
- [1] C. L. Cortes, W. Newman, S. Molesky, and Z. Jacob, "Quantum nanophotonics using hyperbolic metamaterials," *J. Opt.*, vol. 14, no. 6, p. 63001, Jun. 2012.
- [2] K. V. Sreekanth, K. H. Krishna, A. De Luca, and G. Strangi, "Large spontaneous emission rate enhancement in grating coupled hyperbolic metamaterials," *Sci. Rep.*, vol. 4, p. 6340, Jan. 2014.
- [3] V. Caligiuri, R. Dhama, K. V. Sreekanth, G. Strangi, and A. De Luca, "Dielectric singularity in hyperbolic metamaterials: the inversion point of coexisting anisotropies," *Sci. Rep.*, vol. 6, p. 20002, 2016.

محاسبه کرده‌ایم که در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

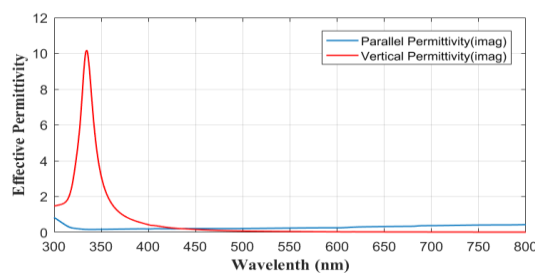


شکل ۲: ضریب گذردهی الکتریکی اجزای سازنده: اکسید آلومینیوم و نقره (بخش حقیقی و موهومی)

همان‌طور که در نمودار شکل ۳ الف مشاهده می‌شود، مولفه موازی گذردهی الکتریکی چندلایه‌ای هایپربولیک، $\epsilon_{||}$ ، در طول موج‌های بالاتر از ۴۸۵ نانومتر مقادیر منفی و مولفه عمودی $\epsilon_{\perp}$ ، در تمام بازه طول موجی مقادیر مثبت را دارا هستند و در نتیجه شرط $\epsilon_{\perp} \times \epsilon_{||} < 0$ برای گذار به فاز هایپربولیک در طول موج‌های بالاتر از ۴۸۵ نانومتر را فراهم می‌کنند.



الف



ب

شکل ۳: مولفات موازی و عمودی ضریب گذردهی الکتریکی موثر فراماده، الف: بخش حقیقی ب: بخش موهومی

همچنین از نمودار شکل ۳ ب مشخص می‌شود که بخش موهومی ضریب گذردهی موازی که مرتبط با پدیده جذب در ساختار است، مقداری ناچیز و در حدود ۰/۱ در کل پهنای

- [4] P. Shekhar, J. Atkinson, and Z. Jacob, "Hyperbolic metamaterials: fundamentals and applications," *Nano Conver.*, vol. 1, no. 1, p. 14, 2014.