بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۴-۱۲ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

شبیه سازی و مهندسی فراماده هایپربولیک چندلایه‌ای 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 – فراموادهایپربولیک یکی از پرکاربردترین شاخه‌های 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 گرفته‌اند. در این مقاله طراحی افزاره چندلایه‌ای فراماده هایپربولیک و نتایج مشخصه‌یابی 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 کوتاه‌تر از ۴۸۵ نانومتر را نشان می‌دهد.

کلید واژه- فراماده، فراموادهایپربولیک، 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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

۱- مقدمه

در دو دهه اخیر نیاز به موادی با خواص نوری جدید محققین و دانشمندان را به سمت مفهومی به نام فراماواد هدایت کرده است. پیشرفت همزمان روش های ساخت ادوات نانومتری نیز از انگیزه‌های اصلی برای تمرکز بیشتر در حوزه ساختارهای زیرطول موجی و پدیده‌های منحصر به فرد آن‌ها شده است. فراماواد، ساختارهایی در ابعاد زیرطول موج هستند که خواص نوری غیرمعمول از خود نشان می‌دهند که برای مهندسی کردن و کنترل انتشار امواج الکترومغناطیسی استفاده می‌شوند. در این میان دسته‌ای از مواد مصنوع که به عنوان یکی از مهم‌ترین مواد در ناحیه طول موج‌های مرئی شناخته شده اند، فراماواد هایپربولیک هستند (HMM[۱]). تحقیقات بر روی فراماواد هایپربولیک با تمرکز بر ویژگی ناهمسانگردی شدید در پاسخ اپتیکی آنها آغاز شد. پس از آن با گسترش یافتن کاربردهای این نوع از فراماواد در تصویرنگاری زیرطول‌موجی، موج‌برهای نانومتری، محبوس-سازی نور، افزایش تابش خودبخودی تابشگرهای کوانتومی و حسگرهای زیستی[۱و۲] ، زمینه تحقیقات بر روی این مواد گسترش یافت. از دلایل عمده برای توجه دانشمندان به این مواد می‌توان سادگی در ساخت، پاسخ غیرتشدیدی در حالت توده ای[۲]، تنظیم‌پذیری در بازه بزرگ طول‌موجی را نام برد[۱و۲]. در این مقاله ابتدا به معرفی تئوری فراماواد هایپربولیک چندلایه‌ای که خواص هایپربولیک در ناحیه مرئی از خود بروز می‌دهند، می‌پردازیم و در ادامه با استفاده از شبیه‌سازی بر مبنای روش FDTD[۳] افزاره هایپربولیک چندلایه‌ای متشکل از ۱۴ لایه متناوب از نقره و اکسیدآلومینیوم طراحی شده و ضرایب گذردهی الکتریکی و همچنین طیف بازتابی و عبوری آن در بازه طول موجی ۳۰۰-۸۰۰ نانومتر محاسبه و ارائه می‌شود.

۲- تئوری

فراماواد هایپربولیک چندلایه‌ای، با قرار گرفتن متناوب لایه-های نازک (در ابعاد نانومتر) فلز و دی‌الکتریک بر روی یکدیگر طراحی می‌شوند. سلول واحد در این ساختارها دولایه‌ای‌های فلز و دی الکتریک است. با تکرار سلول واحد، جفت‌شدگی بین پلاسمون پولاریتون‌های سطحی موجب تشکیل مدهای بلاخ حجمی می‌شود. چنین رفتاری باعث میشود که بر خلاف ساختارهای مبتنی بر تشدید پلاسمونی، ساختارهای فراماواد هایپربولیک پاسخ‌های اپتیکی غیرتشدیدی و پهن‌باند داشته باشند. ویژگی منحصر به فرد این ساختارهای غیرتشدیدی 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 می‌دانیم در خلا، رابطه پاشندگی خطی و رفتار همسانگرد امواج منتشرشونده با سطح هم فرکانس کروی و با رابطه (۱) بیان می شود (شکل۱ الف).

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \frac{w^2}{c^2} \qquad (۱)$$

در یک محیط ناهمسانگرد تک محوری[۴] که با تانسور گذردهی الکتریکی در دستگاه مختصات اصلی[۵] به شکل رابطه (۲) بیان می‌شود، $\varepsilon_{||} = \varepsilon_x = \varepsilon_y$ مولفات درون سطح و $\varepsilon_{\perp} = \varepsilon_z$ 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 می‌شود.

---

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

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

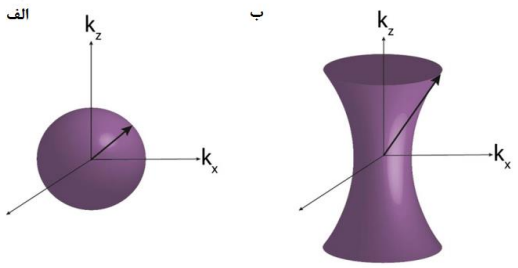
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{||} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{||} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{\perp} \end{bmatrix} \quad (۲)$$

پاسخ دی‌الکتریک فرامواد هایپربولیک مشابه کریستال تک محوری است با این تفاوت که برای این مواد با ناهمسانگردی به صورت $\varepsilon_{\perp} \times \varepsilon_{||} < 0$، سطح هم‌فرکانس برای امواجی با قطبش TM از حالت بسته (بیضوی) به صورت باز و به شکل هذلولی[۸] تبدیل شده (شکل۱ ب) و رابطه پاشندگی برای آن به صورت رابطه (۳) بیان می‌شود. ویژگی چنین رابطه پاشنگی این است

$$\frac{k_x^2 + k_y^2}{\varepsilon_{\perp}^{\,2}} + \frac{k_z^2}{\varepsilon_{||}^{\,2}} = \frac{w^2}{c^2} \quad (۳)$$

که ساختار چندلایه‌ای در راستای عمود بر سطح ($\varepsilon_{\perp} > 0$) خواص دی الکتریک و در راستای درون سطح ($\varepsilon_{||} < 0$) خواص فلزی از خود نشان می دهد.



شکل ۱: سطح هم فرکانس برای، الف: دی الکتریک همسانگرد ب: فرامواد ناهمسانگرد با $\varepsilon_{\perp}>0$ و $\varepsilon_{||}<0$ [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 ضخامتی برابر با ε_m، t_m و ε_d، t_d باشند، بر اساس این تئوری، ضریب پرشدگی[۱۰] فلز، به صورت نسبت ضخامت فلز به ضخامت سلول واحد و با رابطه (۳) بیان می‌شود.

$$q = \frac{t_m}{t_m + t_d} \quad (۳)$$

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

$$\varepsilon_{\perp} = \frac{\varepsilon_m \varepsilon_d}{q \times \varepsilon_d + (1-q) \times \varepsilon_m}$$
$$\varepsilon_{||} = q \times \varepsilon_m + (1-q) \times \varepsilon_d \quad (۴)$$

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 زیرطول‌موجی باشد[۴].

۳- نتایج و بحث

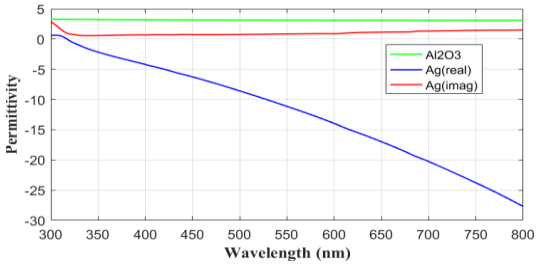
در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی بر اساس روش FDTD، ساختار هایپربولیک چندلایه‌ای متشکل از ۱۴ لایه متناوب از اکسیدآلومینیوم[۱۱] و نقره (۷ سلول واحد) را طراحی کرده‌ایم. ساختار طراحی شده با ۱۰ نانومتر نقره و ۲۵ نانومتر اکسید آلومینیوم و با ضریب پرشدگی ۲۸٪ تئوری محیط موثر را برآورده می‌کند. در شکل۲، بخش حقیقی (خط آبی) و بخش موهومی (خط قرمز) مقادیر گذردهی الکتریکی نقره و همچنین گذردهی الکتریکی اکسیدآلومینیوم (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)

[۸] Hyperbolic
[۹] Effective Medium Theory
[۱۰] Fill Fraction
[۱۱] Al_2O_3
[۱۲] Handbook of Palik

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

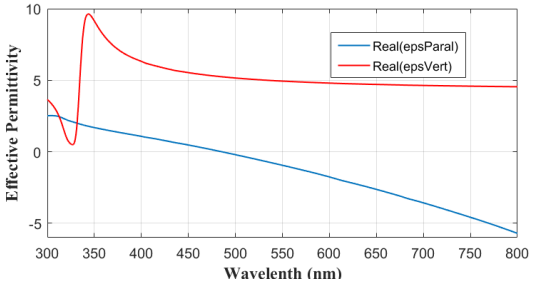
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

محاسبه کرده‌ایم که در شکل۳ مشاهده می‌شود.

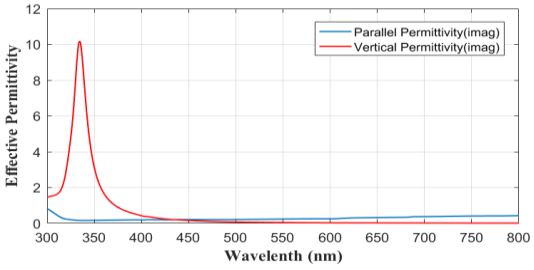


شکل ۲: ضریب گذردهی الکتریکی اجزای سازنده: اکسید آلومینیوم و نقره (بخش حقیقی و موهومی)

همانطور که در نمودار شکل۳ الف مشاهده می‌شود، مولفه موازی گذردهی‌الکتریکی چندلایه‌ای هایپربولیک، $\varepsilon_{\parallel}$، در طول موج‌های بالاتر از ۴۸۵ نانومتر مقادیر منفی و مولفه عمودی $\varepsilon_{\perp}$، در تمام بازه طول موجی مقادیر مثبت را دارا هستند و در نتیجه شرط $\varepsilon_{\perp} \times \varepsilon_{||} < 0$ برای گذار به فاز هایپربولیک در طول موج های بالاتر از ۴۸۵ نانومتر را فراهم می‌کنند.



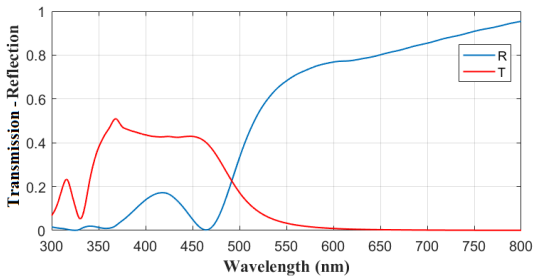
الف



ب

شکل۳: مولفات موازی و عمودی ضریب گذردهی الکتریکی موثر فراماده، الف: بخش حقیقی ب: بخش موهومی

همچنین از نمودار شکل۳ 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 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.



شکل۴: ضرایب بازتاب (نمودار آبی) و عبور (نمودار قرمز) ساختار فراماده هایپربولیک

در شکل۴ ضرایب بازتاب و عبور ساختار طراحی شده برای قطبش TM در بازه۳۰۰ 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 فلوئورسانس را نام برد که این افزاره به عنوان زیرلایه می‌تواند عبوری مناسب در ناحیه طول‌موج برانگیختگی فلوئوفورها و بازتاب قابل توجه در ناحیه طول موج فلوئورسانس آنها، که معمولا 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 پایین تر از ۴۸۵ نانومتر انجام شده و نتایج شبیه سازی 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.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.