تحقق نامرئی‌سازی از طریق کاهش پراکندگی دوقطبی از فراماده لایه تخت در طول موج مرئی

محمدرضا فروزش فرد، عرفان قانع شیخ آبادی و محمد خان‌زاده

دانشکده فیزیک دانشگاه ولی عصر(عج)رفسنجان، بلوار ولایت، رفسنجان

چکیده - دراین مقاله فراماده‌ای لایه‌ای تخت از ترکیب فلز نقره و دی‌الکتریک SiO_2 برای مد TE طراحی و پیشنهاد شده است، به طوری که فراماده‌ای ناهمسانگرد و تک محور ایجاد می‌شود. مشاهده می‌شود که در فرکانس‌هایی که گذردهی مؤثر ساختار نزدیک صفر است، تخت بودن جبهه موج در عبور از این ساختار، تا زمانی که پراکندگی از نوع پراکندگی دوقطبی است، حفظ می‌شود لذا می‌توان با ایجاد حفره توخالی در وسط ساختار لایه‌ای به شرط کوچک بودن حفره از تخت بودن جبهه موج اطمینان حاصل کرد که نشان می‌دهد هر جسمی درون این حفره قرار گیرد نامرئی می‌شود. شبیه سازی‌های المان محدود با استفاده از نرم افزار کامسول نتایج را تایید می‌کنند. با استفاده از این ساختار به نامرئی‌سازی در طول موج مرئی ۵۳۲nm رسیده‌ایم.

کلید واژه- فراماده لایه‌ای، گذردهی نزدیک صفر، نامرئی‌سازی، نظریه محیط موثر

Feasibility of Invisibility through Dipole Scattering Cancellation in Layered Metamaterial in Visible Light

M. R. Forouzeshfard, Erfan Ghane Sheykh Abadi, and M. Khanzadeh

Department of Physics Vali-e-Asr University, Velayat BLVD Rafsanjan

Abstract: In this paper, a layered metamaterial structure composed of silver layers as a conductor and layers of SiO_2 as a dielectric is designed and proposed; so that a uniaxial anisotropic metamaterial is created. It is observed that in frequency at which the effective permittivity of the proposed structure goes to zero, the flat wave front of the plane wave is kept in passing through this structure provided that dipole approximation would be valid. Therefore, with creating a small cavity in the center of the layered metamaterial, the flat wave front of the plane wave is kept and each object which is placed inside the cavity is hidden from the external observer. Finite element simulation using COMSOL Multiphysics approved the result. Using this structure, we could yield the invisibility condition in visible spectrum of 532nm.

Keywords: Layered Metamaterial, Epsilon Near Zero, Invisibility, Effective medium theory

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-02]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

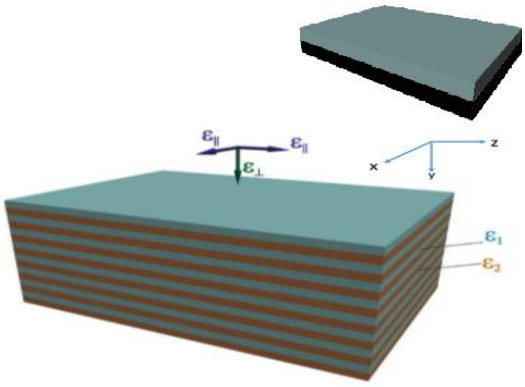
مقدمه

از سال ۲۰۰۶ که اولین مقاله‌ها در زمینه نامرئی‌سازی در مجله ساینس[۱] به چاپ رسید [۲،۱] تا کنون روش‌های مختلفی از نامرئی‌سازی مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. یکی از روش‌ها استفاده از اپتیک تبدیل [۲،۱و۳] است که باعث نامرئی‌سازی کامل می‌شود و شامل شنل‌های نامرئی‌ساز داخلی [۲،۱و۳]، شنل‌های نامرئی‌ساز خارجی [۴] و شنل فرش‌ها [۵] می‌باشد. کاهش سطح مقطع پراکندگی اشیاء نیز منجر به کاهش آشکارسازی و در نهایت نامرئی شدن می‌شود[۶]. رویکرد کیفی از نامرئی‌سازی با بهره‌گیری از فراماواد با ε نزدیک به صفر (ENZ) برای کاهش پراکندگی دو قطبی از یک شئ دلخواه و بزرگ در مرجع [۷،۶] ممکن شده است. در این مقاله قصد بررسی کاهش سطح مقطع پراکندگی نور از یک ساختار لایه‌ای تخت ناهمسانگرد برای مد TE را که ε مؤثر آن بسیار نزدیک صفر است، داریم.

درواقع دراین مقاله قصد داریم به هدف نامرئی‌سازی جسمی با ابعاد در محدوده‌ی طول موج نور فرودی برسیم. مبانی نظری این‌کار براساس کاهش سطح مقطع پراکندگی کل (و نه براساس اپتیک تبدیل) استوار است. بنابراین دراین روش، برخلاف روش اپتیک تبدیل، سطح مقطع پراکندگی کل به لحاظ نظری دقیقا صفر نخواهد شد. دراین روش کوچک بودن ابعاد جسم در مقایسه با طول موج، که تضمین کننده تقریب دوقطبی است، منجر به سطح مقطع پراکندگی بسیار کوچک خواهد شد.

طراحی فراماده‌ای ناهمسانگرد و تک محور

ساختاری مطابق شکل (۱) در نظر می‌گیریم. این ساختار ترکیبی تناوبی از لایه‌های فلز و دی‌الکتریک می باشد که ناهمگنی آن در ابعاد زیر طول موج است به طوریکه سلول واحد آن متشکل از فلز نقره به ضخامت $d_1 = 20nm$ و دی‌الکتریک SiO_2 به ضخامت $d_2 = 100nm$ می‌باشد.



شکل ۱: ساختار تناوبی از لایه‌های فلز با گذردهی الکتریکی ε_1 و دی‌الکتریک با گذردهی الکتریکی ε_2 است. ناهمگنی در ابعاد زیر طول موج می باشد. نظریه محیط‌های موثر گذردهی الکتریکی موثر را در دو راستای موازی و عمود به صورت روابط (۳)، (۴) و (۵) برای این ساختار پیشنهاد می‌کند.

با توجه به شکل ۱ کسر پر شدگی فلز نقره به صورت زیر است[۸]

$$f = \frac{d_1}{d_1 + d_2} \cong \frac{1}{6} \qquad (۱)$$

ابعاد سلول واحد را نسبت به طول موج کوچک در نظر می‌گیریم.

برای گذردهی ماده پلاسمونیکی از مدل درود-لورنتز استفاده می‌کنیم. نظریه‌ی درود-لورنتز برای فلزات در فرکانس‌های مختلف رابطه‌ی زیر را پیشنهاد می-دهد[۹،۸].

$$\varepsilon_p = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^{\,2}}{\omega^2 + i\omega\gamma} \qquad (۲)$$

که در اینجا برای فلز نقره $\omega_p = 14(10^{15} S^{-1})$ نشان دهنده فرکانس پلاسمای فلز و $\gamma = 0.032(10^{15} S^{-1})$ ثابت میرایی برای نقره است و ε_∞ سهم گذارهای درون باندی بوده و برای فلز نقره برابر با ۵ در نظر گرفته شده است. گذردهی الکتریکی SiO_2 را $\varepsilon_1 = 2.13$ و همچنین گذردهی الکتریکی فلز نقره با توجه به رابطه (۲) $\varepsilon_2 = -10.6 + 0.14i$ در نظر می‌گیریم[۸].

نظریه محیط های‌مؤثر، برای این محیط تانسور گذردهی

[۱] Science

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-02]

الکتریکی

$$\tilde{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{11} \end{pmatrix} \qquad (۳)$$

را پیش‌بینی می‌کند که گذردهی مؤثر این ساختار در دو راستای موازی و عمود بر سطح مقطع لایه‌ها به صورت زیر می‌باشد [۸،۶].

$$\varepsilon_{11}(\omega) = f\varepsilon_p(\omega) + (1-f)\varepsilon_I \qquad (۴)$$

$$\varepsilon_{\perp}(\omega) = \frac{\varepsilon_I \varepsilon_P(\omega)}{f\varepsilon_I + (1-f)\varepsilon_p(\omega)} \qquad (۵)$$

باتوجه به اینکه تانسور گذردهی الکتریکی قطری بوده و دو تا از عناصر روی قطر با یکدیگر برابرند، بنابراین به صورت یک ماده ناهمسانگرد تک محور عمل می‌کند. گذردهی مغناطیسی برای تمامی محیطها $\mu = 1$ فرض شده است.

با توجه به روابط و توضیحات فوق گذردهی الکتریکی مؤثر این ساختار در راستای موازی ε_{11} (جهت z) برای طول موج ۵۳۲nm که طول موج پرکاربردی است بسیار نزدیک به صفر خواهد بود لذا در این طول موج با یک ماده (ENZ) روبه‌رو هستیم.

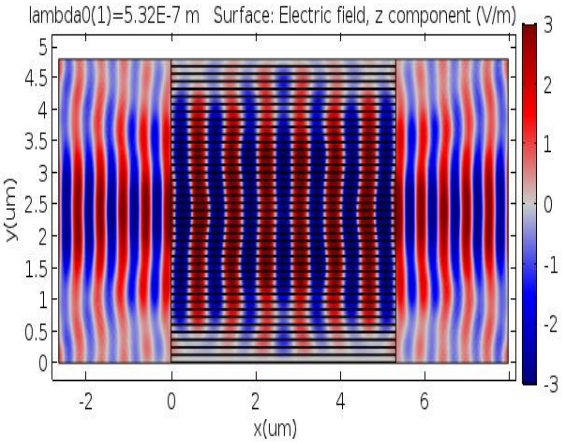
در مواد (ENZ) صفر بودن ضریب شکست باعث می‌شود پیشرفت فازی در ماده اتفاق نیفتد و نور پس از ورود به ساختار، فاز خود را حفظ کرده و فاز نور خروجی از ساختار دقیقا برابر با فاز نور قبل از ورود به ساختار است [۶و۸]

$$n = \sqrt{\varepsilon} \cong 0 \ ; \qquad (۶)$$

$$e^{ikx} = e^{i\frac{n\omega}{c}x} = e^{i\sqrt{\varepsilon}\frac{\omega}{c}x} \cong e^{0} \cong 1 \qquad (۷)$$

در مرجع[۶] نشان داده شده است که جبهه موج ناشی از تابش دو قطبی در ساختار های لایه‌ای تخت (ENZ)، در طول موج‌هایی که گذردهی ساختار لایه‌ای صفر می‌شود، تخت است، لذا مادامی که بتوان از دوقطبی بودن تابش مطمئن بود می‌توان از تخت بودن جبهه موج اطمینان حاصل کرد.

همانطور که می‌دانیم تابش ناشی از یک دوقطبی نقطه‌ای



شکل ۲: شبیه‌سازی المان محدود انتشار موج تخت (TE) در ساختار فراماده شکل(۱). این شبیه‌سازی در نرم‌افزار کامسول نسخه ۵/۲ انجام شده است.

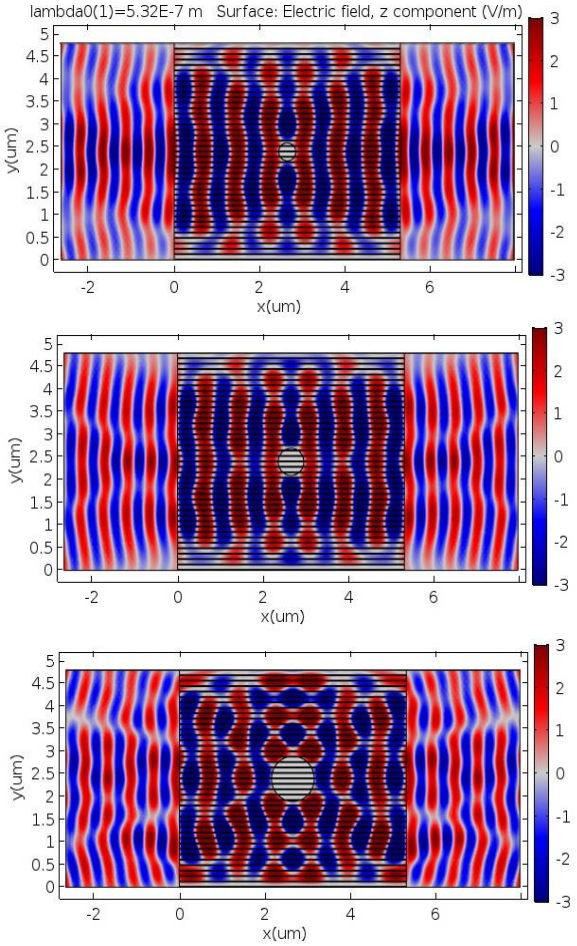
نوسان کننده در خلاء به صورت دمبلی شکل بوده و لذا جبهه موج ناشی از آن در خلاء تخت نیست[۹]. دراین مقاله با توجه به نتایج مرجع[۶] از این واقعیت بهره برده‌ایم که یک ماده‌ی (ENZ) می‌تواند جبهه موج یک تابش دوقطبی را تخت کند. بنابراین هنگامی که یک موج تخت به یک جسم کوچک (پراکندگی دوقطبی) در وسط یک ساختار (ENZ) می‌تابد به دلیل اینکه جبهه موج ناشی از پراکندگی دوقطبی جسم مانند جبهه موج نور فرودی تخت است لذا حضور جسم برای یک ناظر بیرونی حس نخواهد شد و می‌توان گفت جسم نامرئی شده است.

در شکل ۲ نحوه انتشار موج تخت TE (میدان الکتریکی در جهت Z) با طول موج ۵۳۲nm، برای این ساختار با استفاده از نرم افزار کامسول نسخه ۵/۲ نشان داده شده است. حفظ شدن جبهه موج در عبور از ساختار و به ویژه هنگام خروج از آن به وضوح در شکل مشخص است.

در شکل ۳ نحوه انتشار موج تخت (TE) در فراماده شکل(۱) نشان داده شده است به گونه‌ای که حفره‌ای کوچک در وسط ساختار ایجاد کرده‌ایم. در شکل۳-الف اندازه شعاع حفره کوچک است ($r = 0.2\mu m$) و می‌توان گفت، تقریب دوقطبی معتبر است و همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، جبهه موج همچنان تخت باقی مانده است.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-02]



شکل ۳: شبیه‌سازی المان محدود انتشار موج تخت (TE) در ساختار فرامادهٔ شکل(۱) با ایجاد حفره‌ای دایره‌ای شکل در مرکز ساختار شکل(۱) به اندازه‌های الف) $r = 0.2\mu m$، ب) $r = 0.3\mu m$، ج) $r = 0.5\mu m$

در شکل ۳-ب حفره را کمی بزرگتر کرده‌ایم ($r = 0.3\mu m$)، مشاهده می‌شود جبهه موج کمی اختلال دارد اما همچنان می‌توان آن را تخت در نظر گرفت.

در شکل ۳-ج حفره را باز هم بزرگتر کردیم ($r = 0.5\mu m$) و به هم ریختگی جبهه موج در این وضعیت کاملا مشخص است که نشان می‌دهد تقریب دوقطبی دیگر معتبر نیست.

نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از ساختارهای فرامادهٔ لایه‌ای و با استفاده از فلز نقره و دی‌الکتریک SiO_2 توانسته‌ایم یک فرماده با گذردهی الکتریکی نزدیک صفر در طول موج مرئی ۵۳۲nm داشته باشیم. نشان داده‌ایم که وجود حفره‌ای کوچک در وسط این ساختار نمی‌تواند اختلالی در جبهه موج تخت فرودی ایجاد کند. این یعنی سطح مقطع پراکندگی برای ترکیب ساختار (ENZ) و حفره‌ی وسط آن هنگامی که در معرض تابش موج تخت قرار می‌گیرد تقریبا صفر خواهد بود. بنابراین با ایجاد حفره‌ای در ساختار به شرط کوچک بودن، می‌توان هر جسم دلخواهی را به وسیله این ساختار نامرئی کرد.

شبیه‌سازی‌های المان محدود با استفاده از نرم‌افزار کامسول نسخه ۵/۲ صحت نتایج را تایید کرده است.

مراجع

[1] Pendry. J.B, Schurig. D, Smith. D.R.“ Controlling Electromagnetic Fields”, Science. 312, 1780-1782, 2006.

[2] Leonhardt, U. “Optical Conformal Mapping”, Science. 312, 1777-1780, 2006.

[3] Schurig. D, Mock. J.J, Justice. B. J, Cummer. S.A, Pendry. J.B, Starr. A.F, Smith. D. R. “Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies”, Science. 314. 977-980, 2006.

[4] Y. Lai, H. Chen, Z. Zhang and C. T. Chan, ″Complementary Media Invisibility Cloak That Cloaks Objects At a Distance Outside The Cloaking Shell″, Phys. Rev. Lett. 102, 093901 (2009).

[5] Broadband Ground-plane Cloak, Science, Vol 323, 366-369, 2009.

[6] A. S. Shalin, P. Ginzburg, A. A. Orlov, I. Iorsh, P. A. Belov, Y. S. Kivshar, and A. V. Zayats, "Scattering suppression from arbitrary objects in spatially dispersive layered metamaterils" , Phys. Rev. B 91,125426 (2015).

[7] A. Alu, N. Engheta, "Achieving transparency with plasmonic and metamaterial coatings" Phys. Rev. E 72,016623 (2005).

[8] W. Cai, V. Shalaev, D. K. Paul, "Optical metamaterials: fundamentals and applications" , Phys.Today, (2010).

[9] J. D. Jackson, Classical Electrodynamic, Third Edition, John Wiley & Sons, New York, 1999.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-02]