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

بررسی اثرات غیرخطی در ساختارهای فراماده تشکیل شده از جفت سیم های کوتاه و سیم های پیوسته

مهدی عسکری[۱و۲] و عبدالناصر ذاکری[۲]

[۱]بخش فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه سلمان فارسی کازرون، کازرون، ایران.

[۲]بخش فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز ۷۱۴۵۴، ایران.

چکیده – فراماده ای تخت با سلول های واحد تشکیل شده از جفت سیم های کوتاه و سیم های پیوسته را در نظر می گیریم. در فرکانس $13.77\ GHz$، اثر مقدار ثابت دی الکتریک لایه دی الکتریک بین سیم های کوتاه را بر ضریب شکست موثر ساختار بررسی می کنیم. با افزایش اندازه ثابت دی الکتریک، ضریب شکست موثر ساختار از مقادیر منفی به مقادیر مثبت تبدیل می شود. با الهام از این موضوع می توان فراماده ای ساخت که در ناحیه فرکانسی فروسرخ نزدیک و یا مرئی دارای ضریب شکست موثری باشد که علامت آن با افزایش شدت نور فرودی تغییر کند.

کلید واژه- اپتیک غیر خطی، ضریب شکست منفی، فراماده.

Investigating nonlinear effects in metamaterial structures composed of short wire pairs and continuous wires

Mehdi Askari [1,2] , Abdolnasser Zakery [2]

[1] Physics department, college of sciences, Salman Farsi University of Kazerun, Kazerun, Iran.

[2] Physics department, college of sciences, Shiraz University, Shiraz 71454, Iran.

Abstract- We consider a plane metamaterial with unit cells composed of short wire pairs and continuous wires. We investigate the effect of the value of the dielectric constant of the dielectric layer between short wires on the effective refractive index of the structure. By increasing the value of the dielectric constant, the effective refractive index of the structure changes from negative values to positive values. Inspired by this phenomenon, we can construct a metamaterial that its effective refractive index changes sign as the intensity of the incident light is increased.

Keywords: Nonlinear Optics, negative refractive index, metamaterials.

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

۱- مقدمه

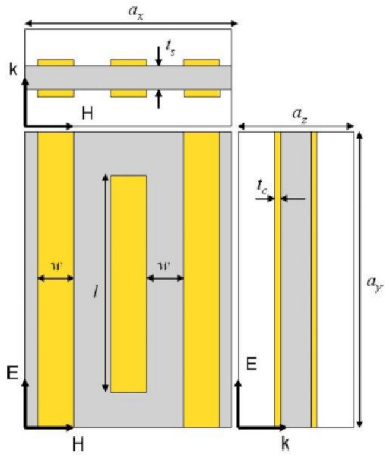
پس از آنکه ساختار متناوب تشکیل شده از حلقه های شکافته و سیم های پیوسته برای نمایش ضریب شکست منفی در محدوده ی فرکانسی مایکروویو ارائه گردید (پندری[۱] بطور نظری و *شلبی*[۲] به طور عملی)[۱و۲]، موج گسترده ای از علاقمندی ها برای مطالعه ساختار های با ویژگی مشابه ایجاد شد. پس از چندی گروهی به سرپرستی *کیوشار*[۳] نشان دادند که افزودن یک ماده ی دی الکتریک غیرخطی در فضای بین حلقه شکافته ها و سیم های پیوسته ی رسانا در نهایت منجر به ظهور رفتاری غیرخطی در تراوایی نسبی مغناطیسی (μ) و در نتیجه ی آن رفتاری غیر خطی در ضریب شکست می شود[۳].

ساختار تشکیل شده از جفت سیم های منقطع و جفت سیم های پیوسته از مهم ترین ساختار های معرفی شده برای ایجاد ضریب شکست منفی است[۴]. با وجود مطالعه وسیع در این زمینه، همچنان بسیاری از ویژگی های مربوط به پاسخ الکترومغناطیسی این ساختار بررسی نشده است[۵].

در این مقاله ما اثر مقدار ثابت دی الکتریک مربوط به دی الکتریک استفاده شده در فضای بین سیم های منقطع و پیوسته را بر ضریب شکست منفی ساختار بررسی می کنیم. نتایج ما نشان می دهند هنگامی که اندازه ی ثابت دی الکتریک از مقدار مشخصی بیشتر شد رفتار ماده در یک فرکانس خاص عوض شده و علامت ضریب شکست از منفی به مثبت تبدیل می شود.

۲- ساختار مورد استفاده و شبیه سازی

شکل (۱) یک سلول واحد از ساختار مورد نظر را نشان می دهد. در شبیه سازی، از یک موج قطبیده ی تخت با میدان الکتریکی در راستای محور y و میدان مغناطیسی در راستای محور x استفاده گردیده که بطور عمود بر



شکل ۱: هندسه سلول واحد ساختار ترکیبی از صفحه ی $E-H$، $E-k$ و $k-H$ دیده می شود. در آن a_x=7 mm، a_y=9.5 mm و $a_z = 2.274$ mm به ترتیب اندازه ی سلول واحد در راستاهای x، y و z است.

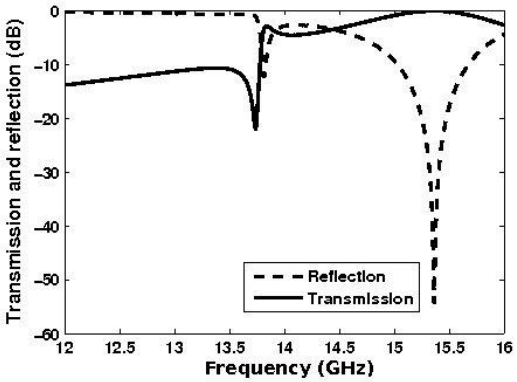
صفحه ی ساختار (صفحه ی x-y) تابیده می شود. طول l و پهنای w سیم های منقطع (سیم های کوتاه) را به ترتیب 7 و 1 میلیمتر در نظر گرفته و ضخامت قطعه های فلزی و لایه ی دی الکتریک را به ترتیب $t_c = 0.01mm$ و $t_s = 0.254mm$ در نظر می گیریم. برای شبیه سازی ضریب عبور و بازتاب، به کمک یک بسته ی نرم افزاری، از روش المان محدود استفاده کرده ایم. در شبیه سازی، برای مس مدل فلز دارای افت با رسانندگی $\sigma = 5.96\times10^{7}\,Sm^{-1}$ را مورد استفاده قرار داده ایم.

شکل (۲) طیف عبور و بازتاب (طیف پارامتر های پراکندگی) را برای یک تیغه ی تشکیل شده از سلول های واحد ذکر شده نشان می دهد. با استفاده از این پارامتر های پراکندگی[۴] و روشهای بازیابی[۵]، ضریب شکست مختلط n، امپدانس مختلط z، گذردهی الکتریکی مختلط ε و تراوایی مختلط μ را استخراج می کنیم. نتایج پارامتر های استخراج شده در شکل (۳) نشان داده شده اند. همانطوری که از شکل پیداست، در یک بازه ی فرکانسی کوچک اطراف $13.77\ GHz$، مقادیر ε و μ بطور همزمان منفی اند و در نتیجه مقدار ضریب شکست n نیز در این بازه منفی است.

---

[۱] Pendry.
[۲] Shelby.
[۳] Kivshar
[۴] Scattering parameters
[۵] Retrieval procedures

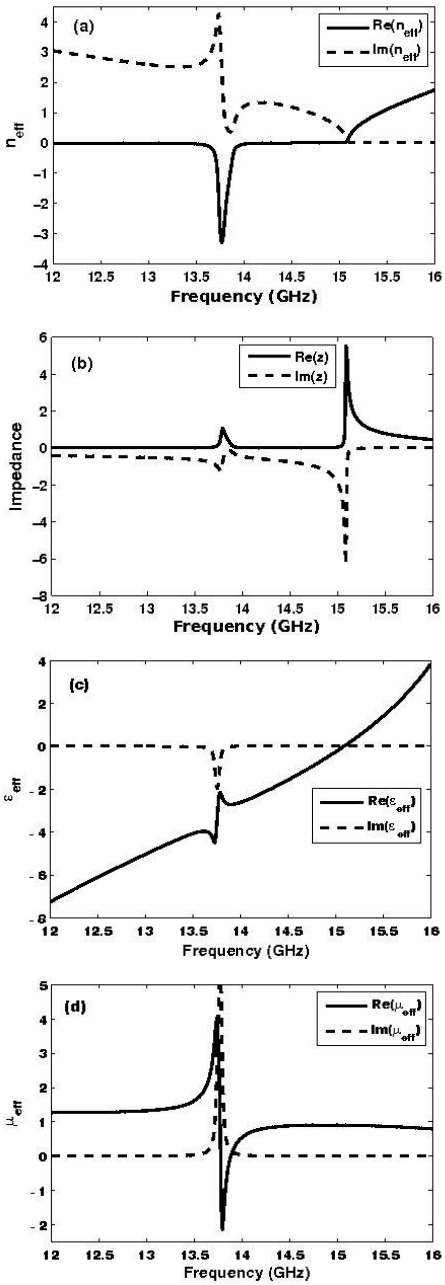
[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]



شکل ۲: طیف عبور ساختار تک لایه تشکیل شده از سلول واحد های نشان داده شده در شکل ۱.

اکنون اثر مقدار ثابت دی الکتریک مربوط به دی الکتریک مورد استفاده را بر ضریب شکست منفی این ساختار بررسی می کنیم. شکل (۴) مقدار ضریب شکست موثر را برای مقادیر مختلف ثابت دی الکتریک لایه ی جدا کننده نشان می دهد. همانطور که از شکل پیداست، در فرکانس $13.77\ GHz$، ضریب شکست موثر ساختار برابر -3.3 است. با افزایش ثابت دی الکتریک لایه ی دی الکتریک (ε_d)، مقدار ضریب شکست موثر (n_{eff}) افزایش می یابد. افزایش ε_d از 2.53 به 3.53 باعث تغییر n_{eff} از -3.3 تا صفر می شود. با افزایش ε_d تا مقدار 4.53، قسمت حقیقی n_{eff} تغییر علامت داده و به مقدار مثبت 1.3 می رسد. برای $\varepsilon_d = 5.53$ و $\varepsilon_d = 6.5$، مقادیر قسمت حقیقی n_{eff} به ترتیب برابر 2.5 و 4.7 خواهد شد.

همانطوری که از قسمت های a و b شکل (۵) پیداست، فرم کلی n_{eff} برای مقادیر مختلف ε_d یکسان است و تنها با افزایش ε_d، فرکانسی که در آن ضریب شکست منفی روی می دهد، به سمت فرکانس های پایین تر منتقل می شود. علیرغم این واقعیت، در فرکانس مورد نظر $13.77\ GHz$، با افزایش ضریب شکست لایه ی دی الکتریک، ضریب شکست موثر ساختار تغییر کرده و از مقداری منفی به مقداری مثبت تبدیل می شود. این پدیده الهام بخش طراحی و ساخت یک فراماده ی غیر خطی است. اگر بتوانیم ساختار فراماده ی ترکیبی را به



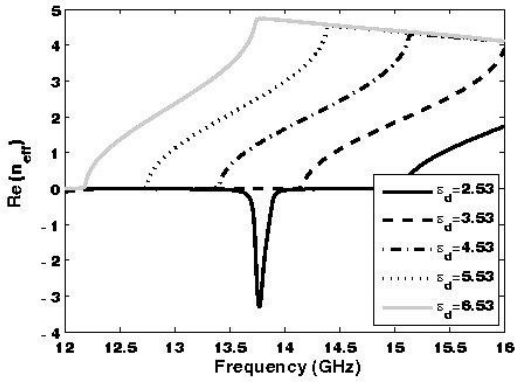
شکل ۳: مقادیر محاسبه شده ی ضریب شکست (a)، امپدانس (b)، ضریب گذردهی الکتریکی (c) و تراوایی نسبی مغناطیسی (d) برای ساختار نشان داده شده در شکل ۱.

گونه ای طراحی کنیم که در محدوده های فرکانسی فروسرخ نزدیک و مرئی ضریب شکست موثر منفی را به نمایش بگذارد، می توانیم از یک لایه ی دی الکتریک غیر خطی با ویژگی کر[۶] در فضای بین سیم های کوتاه استفاده کرده و در این صورت ساختاری با ضریب شکست

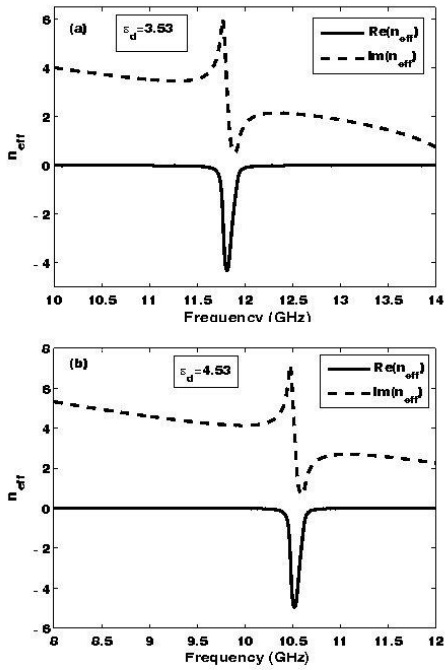
[۶] Kerr nonlinearity

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

منفی وابسته به شدت را داشته باشیم. در ناحیه ی عملکرد لیزر مورد استفاده، با افزایش شدت نور فرودی ضریب شکست لایه ی دی الکتریک افزایش می یابد و



شکل ۴: قسمت حقیقی ضریب شکست موثر به ازای مقادیر مختلفی از ثابت دی الکتریک لایه ی دی الکتریک جدا کننده.



شکل ۵: ضریب شکست موثر ساختار شکل ۱ به ازای ثابت دی الکتریک لایه دی الکتریک $\varepsilon_d = 3.53$ (قسمت a) و $\varepsilon_d = 4.53$ (قسمت b).

ضریب شکست موثر ساختار از مقداری منفی به مقداری مثبت تبدیل می شود. از چنین ساختاری می توان به عنوان یک سویچ تمام اپتیکی استفاده کرد که کاربردهای زیادی دارد.

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله ما اثر مقدار ثابت دی الکتریک مربوط به دی الکتریک استفاده شده در فضای بین سیم های کوتاه و سیم های پیوسته را بر ضریب شکست منفی ساختار بررسی کردیم. نتایج ما نشان می دهند در فرکانس $13.77\ GHz$ هنگامی که اندازه ی ثابت دی الکتریک را برابر با 2.53 در نظر بگیریم، ضریب شکست موثر ساختار ترکیبی برابر با -3.3 است. در فرکانس ذکر شده با افزایش اندازه ضریب شکست لایه دی الکتریک به تدریج اندازه ضریب شکست موثر ساختار افزایش یافته ابتدا به مقدار صفر رسیده و پس از آن به مقادیر مثبت تبدیل می شود. این رویداد نشان می دهد که اگر فراماده ای را در محدوده ی فرکانسی فروسرخ نزدیک و یا مرئی طراحی کنیم و از دی الکتریکی با خاصیت کر در این فراماده استفاده نماییم، ساختاری را خواهیم داشت که ضریب شکست موثر آن وابسته به شدت نور فرودی است و با افزایش شدت نور فرودی ضریب شکست موثر ساختار از مقادیر منفی به مقادیر مثبت تغییر علامت دهد که این تغییر ضریب شکست از منفی به مثبت می تواند به عنوان یک سوییچ تمام نوری در ابزارهای نوری مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

[1] J.B. Pendry, **Phys. Rev. Lett.** 85, 3966 (2000).
[2] R. A. Shelby, D. R. Smith, S. C. Nemat-Nasser, S. Schultz, **Appl. Phys. Lett.** 78, 489 (2001).
[3] A. A. Zharov, I. V. Shadrivov, and Yuri S. Kivshar, **Phys. Rev. Lett.** 91, 037401 (2003).
[4] J. F. Zhou, L. Zhang, G. Tattle, Th. Koschny, and C. M. Soukoulis, **Phys. Rev. B.** 73, 041101 (2006).
[5] J. W. Park, N. T. Tung, V. T. T. Thuy, V. D. Lam, Y. P. **Lee, Opt. Comm.** 284, 919 (2011).

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