سازش بین کیفیت عبور و پهنای نوار فرکانسی ضریب شکست منفی

مهدی عسکری[۱] ، عبدالناصر ذاکری[۲] و علاالدین سیاحیان جهرمی[۳]

[۱]کازرون، دانشگاه سلمان فارسی کازرون، دانشکده علوم پایه، بخش فیزیک
[۲]شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکده علوم پایه، بخش فیزیک
[۳]زرقان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زرقان

چکیده – در این مقاله ما ضمن معرفی یک ساختار فراماده جدید برای ایجاد ضریب شکست منفی با کیفیت عبور بسیار بالا، اثرات تغییر ثابت شبکه را در میزان کیفیت عبور[۱](*FOM*) و همچنین پهنای فرکانسی ضریب شکست منفی بررسی می کنیم. برای این ساختار در محدوده فرکانسی تراهرتز، کیفیت عبور بسیار بالای 66.8 مشاهده می شود که در مقایسه با ساختار های پیشنهادی در این محدوده فرکانسی، مقدار بالا و قابل توجهی است. مشاهده می شود که با افزایش ثابت شبکه، مقدار *FOM* کاهش یافته ولی پهنای فرکانسی ضریب شکست منفی افزایش می یابد که این به معنای وجود سازش بین *FOM* و پهنای فرکانسی است.

کلید واژه- افت الکترومغناطیسی، پهنای باند، تشدید الکترومغناطیسی، ضریب شکست منفی، فراماده.

A tradeoff between figure of merit and negative refractive index frequency bandwidth

Mehdi Askari[1], Abdolnasser Zakeri[2], and Alaeddin Sayahian Jahromi[3]

[1]Physics department, College of Sciences, Salman Farsi University of Kazerun, Kazerun
[2]Physics department, College of Sciences, Shiraz University, Shiraz
[3]Zarghan Branch, Islamic Azad University, Zarghan

Abstract- In this paper in addition to introducing a novel metamaterial structure for creating negative refractive index with a high figure of merit (FOM), we investigate effects of changing the lattice constant on FOM and negative refractive index frequency bandwidth. For this structure, at terahertz frequency range, a very high FOM of 66.8 is observed which is a high and notable value in this frequency range. We observe that by increasing the lattice constant, the FOM decreases but the negative refractive index frequency bandwidth increases, which means a tradeoff between the FOM and the bandwidth.

Keywords: metamaterial, electromagnetic resonance, negative refractive index, frequency bandwidth, electromagnetic loss.

[۱] Figure of merit

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

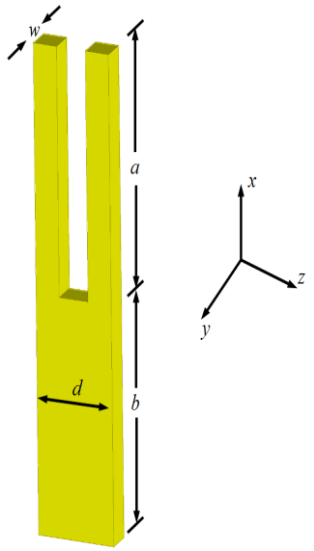
۱- مقدمه

یکی از کاربردهای مهم فراموادها استفاده از آن ها برای ایجاد ضریب شکست منفی است. این مفهوم برای اولین بار توسط آقای وسلاگو[۲] به عنوان یک مفهوم تئوری مطرح شد [۱] و پس از طرح آقای پندری برای ایجاد عملی و معرفی کاربردهای مهم آن، مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفت [۲]. از شروع مطرح شدن این بحث تاکنون ساختارهای ابداعی زیادی برای ایجاد ضریب شکست منفی معرفی شده اند که همواره از دغدغه های مهم ابداع کنندگان آن ها، پهنای فرکانسی محدوده ضریب شکست منفی و به حداقل رساندن افت و در نتیجه به حداکثر رساندن عبور در این محدوده های فرکانسی است.

در این مقاله ما ساختاری را معرفی کرده ایم که در محدوده فرکانسی تراهرتز دارای افت بسیار کمی در مقایسه با ساختارهای پیشنهاد شده تاکنون است. علاوه بر این تاثیر ثابت شبکه را بر میزان افت و پهنای فرکانسی ضریب شکست منفی بررسی کرده ایم. مشاهده می شود که با افزایش ثابت شبکه پهنای فرکانسی افزایش می یابد ولی در نقطه مقابل، افت نیز به همراه آن افزایش می یابد. بنابراین بین کیفیت عبور و پهنای فرکانسی، تبادلی وجود دارد که بسته به اینکه کدام یک در کاربرد مورد نظر ما اولویت دارد با تنظیم مناسب ثابت شبکه، می توانیم به خواسته خود برسیم.

۲- معرفی ساختار فراماده پیشنهادی

سلول واحد ساختار پیشنهادی ما، تنها شامل یک تشدیدگر شبه U شکل[۳] (SUR) است که از یک پایه ضخیم و دو بازو، همگی از جنس طلا، تشکیل شده است (شکل ۱). از ابتدای شروع بحث فراماواد، ساختار های U شکل برای ایجاد پذیرفتاری مغناطیسی منفی مورد استفاده قرار می گرفتند. در اینجا ما با وسعت دادن به ناحیه پایینی ساختار علاوه ایجاد پذیرفتاری مغناطیسی منفی، گذردهی الکتریکی را نیز منفی می کنیم. ضخامت این تشدیدگر برابر $w=1.6\mu m$، پهنای قسمت میانی $d=5.2\mu m$ و ارتفاع آن $b=12.5\mu m$ است. هر کدام از بازوها پهنای $w=1.6\mu m$ و بلندی $a=13\mu m$ را دارند. به جهت ساده سازی در شبیه سازی، برای این ساختار زیر لایه دی الکتریک را در نظر نگرفته ایم ولی در عمل می توان ساختار مذکور را در یک محیط میزبان از دی



شکل ۱: ساختار پیشنهادی برای ایجاد ضریب شکست منفی

الکتریک قرار داد. طول سلول واحد در جهت محور x برابر $27.5\mu m$ و طول آن در جهت y را برابر $15\mu m$ در نظر می گیریم. با این انتخاب ها فاصله گاف بین المان های SUR در جهت محور x برابر $2\mu m$ می شود. در راستای x و y، ساختار متناوب بوده ولی تنها یک لایه از آن در جهت محور z در نظر گرفته می شود. موج الکترومغناطیسی دارای قطبش خطی در راستای محور x بود و در راستای z منتشر می شود.

۳- نتایج محاسبات عددی

در انجام شبیه سازی ها، از نرم افزار HFSS[۴] که بر اساس روش عددی المان محدود[۵] عمل می کند استفاده می کنیم و تنها از یک سلول واحد با شرایط مرزی دوره ای در صفحه x-y و یک لایه در راستای انتشار (محور z) استفاده می کنیم. در محاسبات برای گذردهی الکتریکی مس مدل الکترون آزاد درود را به کار می گیریم:

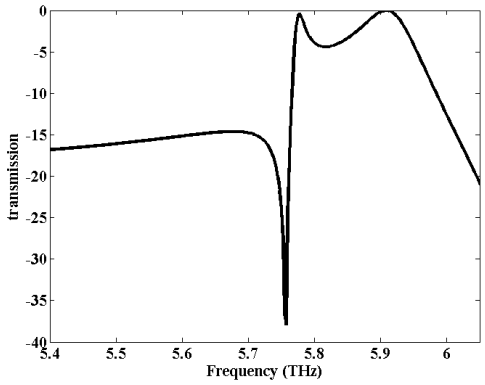
$$\varepsilon(\omega)=1-\frac{\omega_p^2}{\omega^2+i\omega\gamma}$$

[۲] Veselago
[۳] Semi-U-shape resonator
[۴] High Frequency Structure Software
[۵] Finite element method

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

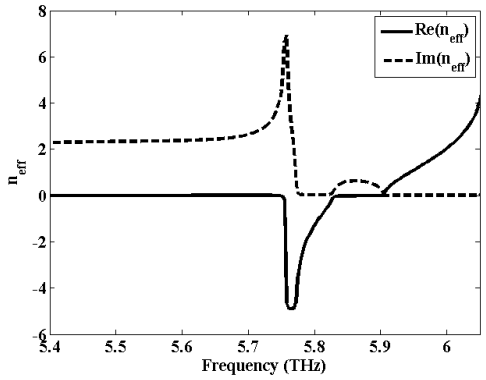
در این رابطه ω_p فرکانس پلاسمایی و γ فرکانس برخورد است. برای طلا این مقادیر را به ترتیب برابر با $1.37\times10^{16} rad/s$ و $4.08\times10^{13} rad/s$ در نظر می گیریم [۳]. با وجود اینکه در مقایسه با ابررساناها و حتی گرافن، فلزات نجیب رساناهای خوبی در فرکانس-



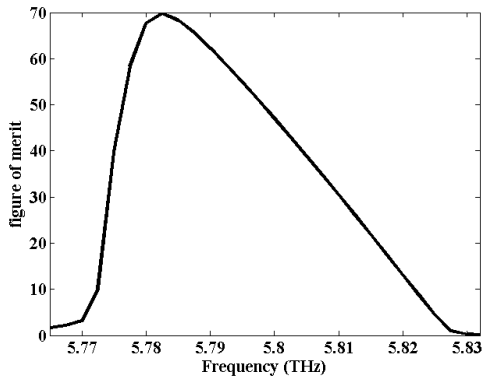
شکل ۲: منحنی ضریب عبور برای موج قطبیده خطی که در راستای محور z منتشر می شود.

-های بالا نیستند ولی همچنان بهترین گزینه برای استفاده به عنوان رسانا در فراماده می باشند[۳]. در این ساختار، در بسامدهایی پایین تر از فرکانس پلاسمایی، گذردهی الکتریکی (ε) منفی به کمک بخش پایینی ضخیم ساختار و همچنین بازوهای آن ایجاد شده و پذیرفتاری مغناطیسی μ آن توسط القای یک جریان چرخشی دایره ای در ساختار و درنتیجه تشدید مغناطیسی در آن به وجود می آید. فرکانس تشدید مغناطیسی ساختار از فرکانس پلاسمایی موثر کمتر بوده و لذا ε و μ در محدوده فرکانسی مشترکی منفی شده که این منجر به ایجاد ضریب شکست منفی می شود.

نظر به اینکه در راستای انتشار، ابعاد ساختار پیشنهادی بسیار کوچکتر از ابعاد طول موج تابش فرودی است، از دید موج الکترومغناطیسی، ساختار پیوسته به نظر رسیده و در نتیجه با اطمینان می توان از نظریه محیط موثر[۶] استفاده کرد. با استفاده از این نظریه، جهت اطمینان از وجود ضریب شکست منفی، پارامتر های موثر ساختار طراحی شده را به کمک روش های بازیابی استاندارد پیدا می کنیم [۴]. همان گونه که از شکل ۳ پیداست، در ناحیه باریکی در اطراف فرکانس $5.755THz$ قسمت حقیقی ضریب شکست منفی است. در فرکانس $5.779THz$ ضریب شکست برابر $n=-1.88+0.021i$ می باشد که کوچک بودن قسمت موهومی آن، نشان دهنده افت پایین و عبور بالا در این بسامد است. در این فرکانس، کیفیت عبور($FOM=|\mathrm{Re}(n)/\mathrm{Im}(n)|$) این ساختار



شکل ۳: منحنی قسمت حقیقی و موهومی ضریب شکست موثر



شکل ۴: کیفیت عبور در محدوده فرکانسی ضریب شکست منفی

برابر 66.8 است که در این محدوده فرکانسی نسبت به مقادیری که تاکنون گزارش شده مقدار بسیار بالا و قابل توجهی است (شکل ۴).

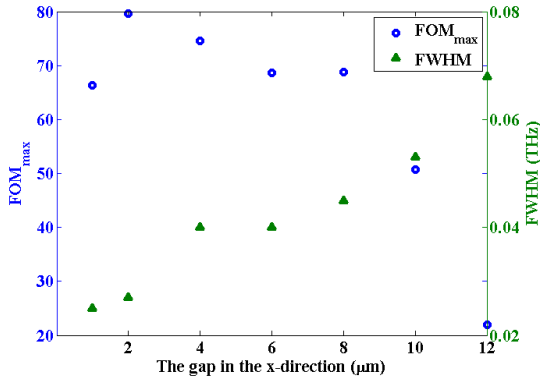
با وجود بالا بودن مقدار FOM، پهنای نوار فرکانسی ضریب شکست منفی برای این ساختار نسبتا کم است. برای رفع این مشکل، با توجه به اینکه فاصله گاف بین سلول واحد های مجاور نقشی حیاتی را در مقادیر گذردهی الکتریکی موثر، تراوایی مغناطیسی موثر و در نتیجه ضریب شکست موثر دارد [۵]، ما برای مقادیر مختلف این فاصله گاف در راستای x، شبیه سازی های زیادی را انجام دادیم که نتایج بخشی از آن ها در شکل ۵

[۶] Effective medium theory

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

مشاهده می شود. همان گونه که پیداست، با افزایش فاصله گاف مقدار FOM کاهش یافته ولی در عوض اندازه پهنای نوار فرکانسی ضریب شکست منفی که

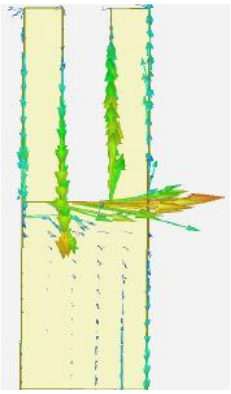


شکل ۵: نحوه تغییرات FOM و $FWHM$ با تغییر فاصله گاف بین سلول های واحد در راستای محور x در شکل ۱.

در شکل آن را با $FWHM$[۷] (به معنای پهنای کامل در نصف کمینه ضریب شکست) مشخص کرده ایم افزایش می یابد. بنابراین پهن کردن بازه فرکانسی ضریب شکست منفی به بهای از دست دادن کیفیت عبور FOM است. لذا تبادلی بین مقدار FOM ومقدار $FWHM$ وجود دارد که بسته به اینکه کدام یک از این دو کمیت برای ما در اولویت است می توانیم با تنظیم فاصله گاف به خواسته خود برسیم. علاوه بر شکل هندسی خاص ساختار پیشنهادی، عامل دیگر افت پایین فراماده طراحی شده، پایه نسبتا وسیع (ضخیم) سلول شبه U شکل است. افزایش سطح مقطع بخش پایینی ساختار باعث کاهش عمق نفوذ[۸] و در نتیجه شارش جریان در یک لایه نازک در سطح رسانا شده که این نیز منجر به کاهش افت اهمی می شود [۶].

۴- نتیجه‌گیری

دراین مقاله ما ساختار فراماده ای را برای ایجاد ضریب شکست منفی معرفی کرده ایم که در محدوده فرکانسی تراهرتز دارای افت بسیار کم و عبور بسیار بالایی است. با محاسبه FOM که در فرکانس $5.779THz$ دارای



شکل ۶: جریان سطحی شبیه سازی شده در بسامد $5.779\,THz$

مقدار بسیار بالای 66.8 است (نسبت به مقادیر گزارش شده تاکنون در این محدوده فرکانسی)، می توان به صحت این ادعا پی برد. با این وجود پهنای فرکانسی ضریب شکست منفی مقدار نسبتا کمی دارد. با انجام شبیه سازی های بسیار، اثر فاصله بین سلول واحدها در ساختار را بر مقدار FOM و پهنای فرکانسی ضریب شکست منفی بررسی کرده ایم. مشاهده می شود که با افزایش این فاصله ها، مقدار FOM کاهش ولی اندازه پهنای فرکانسی افزایش می یابد. لذا افزایش یکی به بهای کاهش دیگری است و برعکس. در نتیجه تبادلی بین مقدار FOM و پهنای فرکانسی وجود دارد که بسته به اینکه کدام یک از این دو کمیت برای ما در اولویت است می توان با تنظیم فاصله گاف، به مقدار دلخواه و مورد نظر دست یافت.

مراجع

[1] V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ε and μ", Sov. Phys. Usp., Vol. 10, p. 509, 1968.

[2] J. B. Pendry, "Negative Refraction Makes a Perfect Lens", Phys. Rev. Lett. , Vol. 85, p. 3966, 2000.

[3] P. Tassin, T. Koschny, M. Kafesaki, and C. M. Soukoulis, "A comparison of graphene, superconductors and metals as conductors for metamaterials and plasmonics", Nature. Photon. Vol. 6, p. 259, 2012.

[4] D. R. Smith, D. C. Vier, T. Koschny, and C. M. Soukoulis, "Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials", Phys. Rev. E. Vol. 71, p. 036617, 2005.

[5] Choi, *et. al.*, "A terahertz metamaterial with unnaturally high refractive index", Nature, Vol. 470, p. 369, 2011.

[6] Güney, et. al., "Reducing ohmic losses in metamaterials by geometrical tailoring", Phys. Rev. B. Vol. 80, P. 125129, 2009.

[۷] Full width at half minimum

[۸] Skin depth

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]