
The Design of a Miniaturized Narrow-Band Absorber Based on Metallic Metamaterial at Terahertz Frequency

S. Barzgarparizi*

* Faculty of Electrical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

(Received: 21/12/2020; Accepted: 20/11/2021)

Abstract

In this article, the design of a miniaturized narrow-band terahertz absorber is theoretically investigated. The designed absorber is made of an artificial dielectric layer (ADL) deposited on a substrate terminated by a metallic layer. The ADL includes two thin metal layers vertically separated by a thin dielectric film. Each metal layer is patterned to form a lattice of disconnected squares. The lattices on the two metal layers are shifted with respect to each other so that each square on the top lattice partially faces four squares on the bottom lattice. With a proper design of the structure parameters and utilizing the capacitive nature of ADL and the inductive property of the grounded dielectric spacer (the substrate terminated by a metallic layer), a resonant frequency can be achieved at the terahertz regime. In this paper, a simple circuit model is presented for surveying the absorber behavior at normal incidence. The designed absorber shows perfect absorption around a center frequency of 0.4 THz with a quality factor of $Q = 20$. The proposed structure is polarization insensitive and shows absorption stability over a wide range of oblique incidence angles. Furthermore, the size of the proposed absorber is very smaller than other metallic absorbers at low terahertz frequency. The thickness of the structure is 0.014λ and the size of the unit cell is $0.055\lambda \times 0.055\lambda$. Finally, a dual-band absorber can be realized using two layers of ADL.

Keywords: Narrowband absorber, Metamaterial, Artificial dielectric, Circuit model.

* Corresponding author E-mail: barzegarparizi@sirjantech.ac.ir

علمی - پژوهشی

طراحی یک جاذب باند باریک بسیار کوچک بر پایه فرامواد فلزی در فرکانس تراهرتز

سعیده برزگر پاریزی

استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران
(دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۲۵، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۹)

چکیده

در این مقاله، طراحی یک جاذب تراهرتز باند باریک که در آن ابعاد ساختار بسیار کوچک است، به صورت تئوری مورد مطالعه قرار می‌گیرد. جاذب طراحی شده، از یک لایه دی‌الکتریک مصنوعی که بر روی یک زیرلایه ختم شده به یک لایه هادی قرار گرفته است، تشکیل می‌شود. لایه دی‌الکتریک مصنوعی شامل دو لایه فلز است که با یک لایه دی‌الکتریک با ضخامت بسیار نازک جدا شده است. هر لایه فلزی شامل پترن‌های مربع شکل است. هر لایه فلز نسبت به لایه مجاورش شیفت داده شده است بنابراین هر مربع در لایه بالا با چهار مربع در لایه پائین همپوشانی دارد. با طراحی مناسب مؤلفه‌های ساختار و با استفاده از ویژگی خازنی این لایه دی‌الکتریک مصنوعی همراه با خاصیت القایی لایه دی‌الکتریک زمین شده (زیر لایه ختم شده به هادی) می‌توان به رزونانس در فرکانس تراهرتز دست یافت. یک مدل مداری ساده برای بررسی رفتار جاذب در برخورد نرمال ارائه می‌شود. جاذب طراحی شده، جذب کامل در فرکانس مرکزی ۰/۴ تراهرتز با ضریب کیفیت ۲۰ را نشان می‌دهد. ساختار پیشنهادی، غیرحساس به قطبش موج برخوردی و دارای پایداری بالا نسبت به زاویه برخورد مایل است. علاوه بر این، ابعاد ساختار ارائه شده در این مقاله نسبت به سایر جاذب طراحی شده در فرکانس‌های تراهرتز پائین، بسیار کوچک است. ضخامت ساختار حدود 0.14λ و ابعاد سلول واحد $0.55 \lambda \times 0.55 \lambda$ می‌باشد. در نهایت، با به کارگیری دو لایه از ساختار دی‌الکتریک مصنوعی می‌توان به یک جاذب دو بانده نیز دست یافت.

کلید واژه‌ها: جاذب باند باریک، فرامواد، دی‌الکتریک مصنوعی، مدل مداری

۱- مقدمه

فرامواد، مواد مصنوعی هستند که از آرایه‌های سه بعدی تشکیل شده از ذرات فلزی کوچک، در یک محیط دی‌الکتریک معمولی ساخته می‌شوند [۱-۵]. در صورتی که طول موج الکترومغناطیس در محیط از ابعاد و فواصل ذرات فلزی بسیار بزرگتر باشد، هر ذره به طور اساسی به صورت یک دو قطبی الکتریکی ماکروسکوپی مشابه دو قطبی‌های میکروسکوپی داخل یک دی‌الکتریک طبیعی عمل می‌کند. افزودن آرایه فلزی به یک دی‌الکتریک معمولی، منجر به افزایش شدید قطبش الکتریکی می‌شود. هر ماده دی‌الکتریکی مصنوعی را می‌توان با یک محیط مؤثر با مؤلفه‌های گذردهی الکتریکی و تراوی مغناطیسی مؤثر مدل کرد. مؤلفه‌های مؤثر معادل با محیط مصنوعی را می‌توان با تغییر اندازه، شکل و فاصله ذرات فلزی تنظیم کرد.

جاذب‌های فرامواد همیشه توجه محققان زیادی را در فرکانس‌های مایکروویو، تراهرتز و نوری به خود جلب کرده است

[۶-۷]. جاذب‌ها، اجزاء اصلی در کاربردهای زیادی از جمله جذب انرژی خورشیدی [۸-۹]، حسگرهای ضریب شکست [۱۰-۱۲]، تصویربرداری گرمایی [۱۳]، منتشرکننده‌های مادون قرمز گرمایی [۱۴] و غیره هستند. اغلب جاذب‌ها از سه لایه به صورت یک لایه فراماده در بالا، یک لایه دی‌الکتریک میانی و یک لایه فلز در پایین ساخته شده‌اند. معمولاً جاذب‌ها بسته به کاربرد به صورت باند باریک، پهن باند و چندباند ساخته می‌شوند که در اغلب ساختارهای چند بانده و پهن باند از دو یا چند رزوناتور با ابعاد متفاوت یا ساختارهای چند لایه، استفاده می‌شود [۱۵-۱۷].

همواره طراحی یک جاذب باند باریک با ضریب کیفیت بالا و با پاسخ فرکانسی پایدار نسبت به زاویه موج برخوردی و غیرحساس به قطبش موج برخوردی مورد توجه بوده است [۱۸-۲۲]. از این جاذب‌های باند باریک می‌توان برای پیاده‌سازی میکروبولومتر برای سامانه‌های تصویربرداری تراهرتز [۲۳] و علاوه با ایجاد رزونانس باند باریک با حساسیت بالا می‌توان از این جاذب‌ها برای کاربردهای سنسور ضریب شکست در فرکانس‌های

همپوشانی دو لایه فلز منجر به ایجاد یک خازن صفحات موازی می‌شود. با توجه به ابعاد ضخامت فلز و ضخامت لایه دی‌الکتریک بین دو لایه فلز، می‌توان به یک ثابت دی‌الکتریک بسیار بالا دست یافت [۲۶]. با استفاده از این ویژگی خازنی ساختار دی‌الکتریک مصنوعی و ویژگی القایی زیر لایه دی‌الکتریک زمین شده (زیر لایه ختم شده به لایه فلز هادی) می‌توان در طراحی جاذب‌ها از آن استفاده کرد. خود آرایه مربع‌های فلزی نیز به تنهایی به علت فاصله افقی بین پترن‌های فلزی دارای ویژگی خازنی هستند اما با توجه به ابعاد ساختار دی‌الکتریک مصنوعی به کار گرفته شده در فرکانس کاری مورد نظر در این مقاله، خازن‌های به وجود آمده از صفحات موازی لایه‌های فلزی بالا و پائین نقش غالب را ایفا می‌کنند و در واقع می‌توان از اثرات خازنی خود آرایه مربع‌های فلزی صرف نظر کرد. با استخراج ثابت دی‌الکتریک مؤثر متناظر با لایه دی‌الکتریک مصنوعی [۲۷]، یک مدل مداری ساده برای بررسی رفتار جذب ساختار در زاویه برخورد نرمال ارائه شده است. در نهایت با به کارگیری دو لایه از این ساختارها، می‌توان به یک جاذب دو بانده دست یافت که همچنان ابعاد و ضخامت آن بسیار کوچک هستند.

در بخش دوم این مقاله، ساختار هندسی جاذب و یک مدل مداری تقریبی برای ساختار ارائه شده است و رفتار جذب را مورد بررسی قرار خواهیم داد. در انتهای بخش دوم نتایج شبیه‌سازی ساختار و اثرات تغییر مؤلفه‌های ساختار و بحث پایداری رفتار جذب نسبت به زاویه موج برخوردی برای دو قطبش عمودی و افقی مورد تحلیل قرار گرفته است. در بخش سوم نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- طراحی جاذب باند باریک

در این بخش به طراحی یک جاذب باند باریک پرداخته شده است. ابتدا ساختار جاذب ارائه شده، سپس یک مدل مداری ساده برای بررسی رفتار جاذب مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت تأیید نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی تمام موج، آنها را با نتایج مدل مداری مقایسه می‌کنیم. شکل (الف.۱) نمای بخش عرضی ساختار جاذب را که شامل سه لایه به صورت: لایه فوقانی فراماده تشکیل شده از دو لایه پترن فلزی مربعی شکل که هر لایه نسبت به لایه مجاورش به اندازه نصف طول تناوب شیفت داده شده است، لایه میانی زیر لایه سیلیکون با ضخامت h و ضریب شکست n_s ، لایه پائین یک لایه فلز است، را نشان می‌دهد. لایه‌های فلزی از مس و ماده دی‌الکتریک در فراماده به صورت Al_2O_3 در نظر گرفته شده‌اند. شکل (ب.۱) نما از دید بالا ساختار

تراهترز استفاده کرد [۱۰-۱۲]. اگر چه در سال‌های اخیر، جاذب‌های باند باریک با ابعاد کوچک و ضریب کیفیت بالا بر پایه فرامواد گرافنی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۲۴-۲۵] اما به هر حال چالش‌های موجود در زمینه ساخت لایه‌های گرافنی و بحث‌های مرتبط با اعمال ولتاژ جهت رسیدن به پتانسیل شیمیایی مورد نظر، همچنان طراحی ساختارها بر پایه فرامواد فلزی از محبوبیت و مزیت بالاتری برخوردار هستند. بنابراین طراحی و ساخت جاذب بر پایه فرامواد فلزی با ابعاد بسیار کوچک و ضریب کیفیت بالا همچنان مورد توجه بوده است. اخیراً در [۲۱-۲۲] جاذب‌های باند باریک بر پایه فرامواد فلزی ارائه شده‌اند. ساختار ارائه شده در [۲۱] به صورت چند لایه که از بالا به پائین شامل: یک لایه فرامواد فلزی (آرایه‌ای از مش‌ها در یک لایه فلزی)، یک لایه دی‌الکتریک ضخیم، یک لایه فرامواد فلزی (آرایه‌ای از پیچ‌های فلزی)، یک لایه دی‌الکتریک ضخیم ختم شده به یک لایه فلز، که به عنوان منعکس کننده عمل می‌کند، می‌باشد. ساختار ارائه شده، منجر به ضریب کیفیت ۲۹ در فرکانس ۰/۵ تراهرتز می‌شود. طول تناوب و ضخامت کل این ساختار جاذب به ترتیب $0/117 \lambda$ و $0/119 \lambda$ است. در [۲۲]، ساختار شامل آرایه‌ای از حلقه‌های فلزی بسیار ضخیم که یک آرایه سه بعدی را ایجاد می‌کند، تشکیل شده است. این ساختار منجر به ضریب کیفیت ۳۶/۵ در فرکانس ۱/۵ تراهرتز شده است. طول تناوب و ضخامت کل این ساختار جاذب به ترتیب $0/85 \lambda$ و $0/115 \lambda$ است. در اینجا ما با استفاده از یک لایه فراماده فلزی [۳-۴]، یک جاذب باند باریک با ابعاد بسیار کوچک و ضخامت بسیار باریک ارائه می‌دهیم. ساختار ارائه شده منجر به ضریب کیفیت ۲۰ در فرکانس ۰/۴ تراهرتز خواهد شد. این ساختار نسبت به ساختارهای ارائه شده در [۲۱-۲۲] دارای ابعادی حدوداً ۰/۱ برابر کوچکتر خواهد بود. از طرفی به علت مسطح بودن ساختار پیشنهادی، به لحاظ ساخت این ساختارها با چالش‌های ساخت آرایه‌های سه بعدی مانند ساختار ارائه شده در [۲۲] مواجه نخواهد بود. ساختار دی‌الکتریک مصنوعی به کار گرفته شده در این مقاله، قبلاً به عنوان حفاظ برای موجبر مسطح به صورت تجربی [۳-۴] به کار گرفته شده است. بنابراین انتظار می‌رود به لحاظ ساخت با دسترسی به امکانات این ساختار جاذب به راحتی قابل پیاده‌سازی باشد.

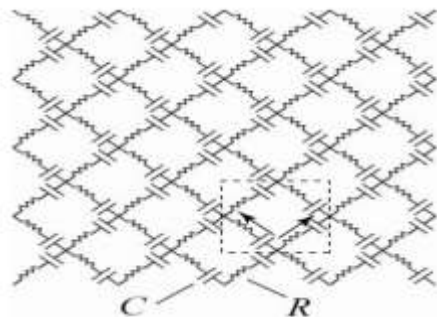
دی‌الکتریک مصنوعی به کار برده شده در این مقاله شامل دو لایه فلز با پترن‌های مربع شکل است که هر لایه نسبت به لایه مجاور خود شیفت داده شده است. بنابراین هر پترن فلزی در هر لایه با چهار مربع فلزی در لایه مجاور همپوشانی دارد. سطح

دی الکترونیک مصنوعی را نشان می‌دهد.

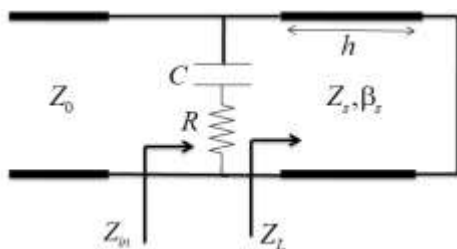
۱-۲- تحلیل مدل مداری

در این قسمت با یک مدل مداری ساده به بررسی رفتار جاذب پرداخته شده است. پاسخ یک سامانه به تحریک الکترومغناطیسی وابسته به ویژگی‌های ماده موجود در آن است. از مؤلفه‌های گذردهی الکترونیک و تراوایی مغناطیسی برای بیان ویژگی‌های یک ماده استفاده می‌شود. در یک ماده معمولی این ویژگی‌ها از ممان‌های دی‌پل الکترونیک و مغناطیسی در پاسخ به یک میدان خارجی در ابعاد اتمی ناشی می‌شوند. در ساختارهای دی‌الکترونیک مصنوعی، المان‌های فلزی موجود در ماده دی‌الکترونیک معمولی، ممان‌های دی‌پل الکترونیک و مغناطیسی را ایجاد می‌کنند. اگر چه این ساختارها بزرگتر از اندازه اتم هستند، اما اگر طول موج الکترومغناطیسی در آنها بزرگتر از ابعاد ساختار باشد، ممان‌های دی‌پل القا شده مشابه همتای اتمی‌شان (ممان‌های دی‌پل الکترونیک و مغناطیسی) عمل می‌کنند.

مدل مداری ساختار دی‌الکترونیک مصنوعی شامل شبکه دو بعدی از مقاومت R ناشی از هدایت محدود فلز و خازن C ناشی از همپوشانی دو لایه فلزی است، که در [۲۷] ارائه شده است. مدل این شبکه در شکل (۲. الف) نشان داده شده است.



(الف)



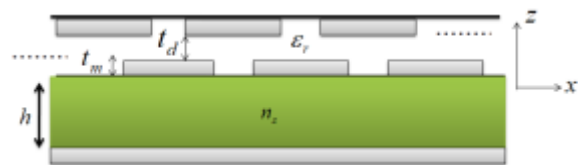
(ب)

شکل (۲): (الف) مدل مداری ساختار دی‌الکترونیک مصنوعی شامل شبکه‌ای از مقاومت R ناشی از هدایت محدود فلز و خازن C ناشی از همپوشانی دو لایه فلزی [۲۷] (ب) مدار معادل ساختار جاذب

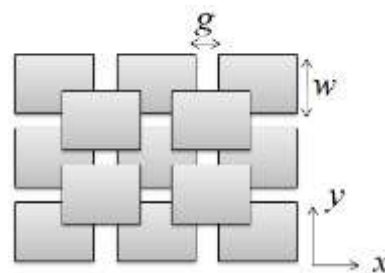
ضریب جذب از رابطه $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$ محاسبه می‌شود که در آن $R(\omega) = |S_{11}|^2$ و $T(\omega) = |S_{21}|^2$ به ترتیب ضرایب انتقال و انعکاس ساختار می‌باشد. اگر ضخامت لایه فلز به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شود لایه پائین مانند یک صفحه هادی کامل عمل می‌کند بنابراین ضریب انتقال در ساختار صفر خواهد شد و ضریب جذب به صورت $A(\omega) = 1 - R(\omega)$ محاسبه می‌شود. از طرفی با توجه به رابطه

$$|S_{11}| = \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right|$$

که در آن Z_{in} امپدانس معادل ساختار جاذب و Z_0 امپدانس فضای آزاد است. برای رسیدن به ضریب جذب ۱ لازم است شرایط تطبیق امپدانس به صورت $\text{Re}(Z_{in}) = Z_0$ و $\text{Im}(Z_{in}) = 0$ برقرار شود. ابعاد ضخامت لایه‌های دی‌الکترونیک و فلز در ساختار دی‌الکترونیک مصنوعی به کار برده در این مقاله در حد چند ده (صد) نانومتر و ابعاد پترن‌های فلزی در حد چند ده میکرومتر می‌باشد. با توجه به ابعاد ساختار، می‌توان از مدل مداری ارائه شده در [۲۷]، و در نتیجه محیط مؤثر معادل با لایه دی‌الکترونیک مصنوعی برای تحلیل مداری ساختار استفاده کرد. که در ادامه به آن می‌پردازیم.



(الف)

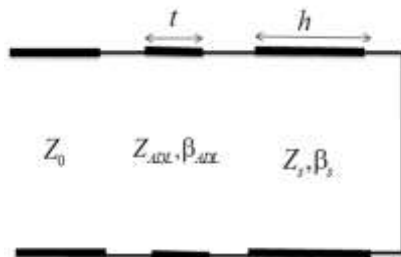


(ب)

شکل (۳): (الف) بخش عرضی ساختار جاذب شامل: یک لایه فراماده تشکیل شده از دو لایه پترن فلزی مربعی شکل که یک لایه نسبت به لایه بعدی شیفت داده شده است. لایه فراماده بر روی یک زیر لایه دی‌الکترونیک که به یک لایه فلز در پائین ختم شده است، قرار گرفته است. (ب) نمای بالایی ساختار فراماده

اگر ضخامت لایه‌های دی‌الکتریک از ابعاد مربعها بسیار کوچکتر باشد، می‌توان میدان‌های حاشیه‌ای را نادیده گرفت و مقدار خازن را با $C = \epsilon_0 \epsilon_r A / t_d$ تقریب زد که در آن A سطح همپوشانی بین مربع‌های فلزی است $A = ((w-g)/2)^2$. چون A از مرتبه میکرومتر مربع و t, t_d چندین ده (صد) نانومتر است ϵ_{ADL} بر مراتب از ϵ_r بزرگتر است. البته باید توجه داشت که هر لایه آرایه مربع فلزی، به علت وجود فاصله افقی مربع‌های فلزی، دارای یک مقدار خازن است [۲۹] که مقدار آن توسط g کنترل می‌شود و از رابطه $C_s = 2\epsilon_0 \epsilon_{eff} D \ln(\csc(\frac{\pi g}{2D})) / \pi$ محاسبه می‌شود. برای ساختار دی‌الکتریک مصنوعی با توجه به ابعاد ساختار می‌توان نشان داد که اثرات خازنی ناشی از فاصله افقی بین مربع‌های فلزی در مقابل اثرات خازنی صفحات موازی ناشی از همپوشانی دو لایه قابل صرف‌نظر کردن است. بعلاوه، اثرات خازن حاشیه‌ای [۳۰] نیز وجود دارند که می‌توان با چشم پوشی از این اثرات به نتایج قابل قبول دست یافت.

تلفات الکتريکی دی‌الکتریک مصنوعی، شامل هر دو تلف ناشی از تانژانت تلفات ذاتی لایه‌های دی‌الکتریک $(\tan \delta_d)$ و هدایت محدود مربع‌های فلزی است که به صورت $\omega\tau = \omega RC$ ظاهر می‌شود. برای ساختار دی‌الکتریک مصنوعی مقاومت محدود مربع‌های فلزی را می‌توان به صورت تقریبی از رابطه $R = D / (D-g) \sigma_m \delta$ که در آن $\delta = \sqrt{2 / \omega \mu_0 \sigma_m}$ عمق پوستی می‌باشد، محاسبه کرد [۳۱]. میدان مغناطیسی برخوردی در این مسئله موازی سطح مربع‌هاست، بنابراین تلفات ناشی از جریان‌ات گردابی در فلزات ناشی از مؤلفه عمودی میدان مغناطیسی بر مربع‌ها که در [۳] وجود داشت، اینجا مطرح نمی‌شود.



شکل (۳): مدل خط انتقال ساختار جاذب

مدل مداری تقریبی ارائه شده تحت شرایطی که فاصله افقی بین مربع‌های فلزی کوچک و ضخامت لایه دی‌الکتریک بین دو لایه فلزی خیلی کوچک $t_d \ll t_m$ باشد منجر به نتایج دقیق‌تر خواهد شد. در ادامه، دو ساختار جاذب با ضریب جذب کامل ارائه

بنابراین ساختار دی‌الکتریک مصنوعی را می‌توان با یک امپدانس سطحی $Z_s = R + (1/j\omega C)$ مدل کرد. اگر ضخامت لایه فلز پایینی به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شود، به‌عنوان یک منعکس کننده (هادی کامل) عمل می‌کند بنابراین در مدل مداری با یک مدار اتصال کوتاه [۳۱] جایگزین می‌شود. زیر لایه سیلیکون نیز با یک خط انتقال با امپدانس مشخصه $Z_s = Z_0 / n_s$ و ثابت انتشار $\beta_s = 2\pi n_s / \lambda$ مدل می‌شود. Z_0 امپدانس فضای آزاد و λ طول موج برخوردی در فضای آزاد می‌باشد. شکل (۲.ب) مدار معادل ساختار جاذب را نشان می‌دهد. می‌توان نتیجه گرفت که رفتار رزونانسی ساختار جاذب، ناشی از رفتار القایی دی‌الکتریک زمین شده $(Z_L = jZ_s \tan(\beta_s t))$ و رفتار خازنی ناشی از خازن صفحات موازی به‌وجود آمده از همپوشانی لایه‌های فلزی بالا و پائین در دی‌الکتریک مصنوعی می‌باشد. بنابراین امپدانس معادل با ساختار جاذب برای مدل ارائه شده معادل با

$$Z_{in} = \left((jZ_s \tan(\beta_s t))^{-1} + \left(R + \frac{1}{j\omega C} \right)^{-1} \right)^{-1}$$

می‌باشد. مقدار جذب بر پایه اتلاف توان موج برخوردی می‌باشد که واضح است بخش اعظم این اتلاف توان ناشی از هدایت محدود فلز در فرکانس تراهرتز است که در مدل مداری به صورت مقاومت سری R مدل شده است.

به هر حال برای درک بهتر ویژگی‌های الکتريکی ساختار دی‌الکتریک مصنوعی می‌توان با استفاده از تئوری محیط مؤثر، ضریب دی‌الکتریک مؤثر معادل با آن را تخمین زد. با توجه به این که، امپدانس سطحی یک لایه دی‌الکتریک نازک با ضریب دی‌الکتریک ϵ_{ADL} و ضخامت t برابر $t = 1 / j\omega \epsilon_{ADL} t$ است، $Z_s = 1 / j\omega \epsilon_{ADL} t$ ضریب دی‌الکتریک مؤثر معادل با دی‌الکتریک مصنوعی به صورت $\epsilon_{ADL} = (C/t) / (1 + j\omega\tau)$ که $\tau = RC$ و $t = t_d + 2t_m$ ضخامت کل لایه دی‌الکتریک مصنوعی است. شکل (۳)، مدل خط انتقال معادل با ساختار جاذب را نشان می‌دهد که در آن دی‌الکتریک مصنوعی، با خط انتقال معادل با محیط مؤثر لایه دی‌الکتریک مصنوعی با امپدانس مشخصه $Z_{ADL} = Z_0 / n_{ADL}$ و ثابت انتشار $\beta_{ADL} = 2\pi n_{ADL} / \lambda$ مدل شده‌اند. n_{ADL} ضریب شکست محیط مؤثر لایه دی‌الکتریک مصنوعی می‌باشند. بنابراین، امپدانس ورودی ساختار از رابطه

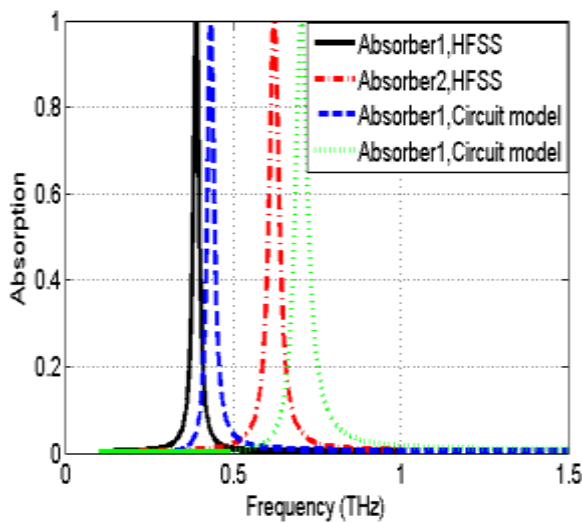
$$Z_{in} = Z_{ADL} \frac{Z_L + jZ_{ADL} \tan(\beta_{ADL} t)}{Z_{ADL} + jZ_L \tan(\beta_{ADL} t)}$$

محاسبه می‌شود.

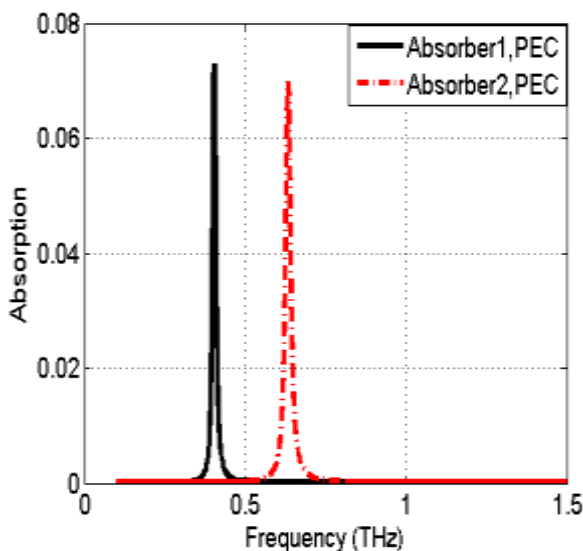
که دامنه جذب کامل ناشی از تلفات لایه‌های فلزی به کار رفته در لایه دی‌الکتریک مصنوعی می‌باشد.

جدول (۱): مؤلفه‌های ساختار جاذب برای رسیدن به جذب ۱۰۰٪ در دو فرکانس مختلف

ساختار	$D(\mu\text{m})$	$w(\mu\text{m})$	$h(\mu\text{m})$	$t_d(\text{nm})$	$f_0(\text{THz})$
۱	۱۲	۱۰	۳	۴۰	۰/۳۹
۲	۱۲	۹	۲	۴۰	۰/۶۲



(الف)



شکل (۴): (الف) ضریب جذب بر حسب فرکانس برای ساختار جاذب با مؤلفه‌های ارائه شده در جدول (۱) (ب) طیف جذب برای ساختار دی‌الکتریک مصنوعی تشکیل شده از لایه‌های فلز هادی کامل

شکل (۵)، امپدانس و روی نرمالیزه شده را بر حسب فرکانس برای ساختار جاذب شماره یک با ابعاد ارائه شده در جدول (۱) را

شده‌اند. به هر حال با طراحی مناسب مؤلفه‌های ساختار می‌توان ساختار با جذب ۱۰۰٪ در فرکانس‌های متفاوت تراهرتز پائین طراحی کرد.

۲-۲- نتایج و بحث

در این بخش با طراحی مناسب مؤلفه‌های هندسی ساختار به طراحی جاذب پرداخته می‌شود. جدول (۱) ابعاد ساختار جاذب را برای رسیدن به ضریب جذب حدوداً ۱۰۰٪ در دو فرکانس متفاوت را نشان می‌دهد. فلز به کار رفته برای ساختار پیشنهادی از مس می‌باشد به جهت ملاحظات عملی در فرکانس تراهرتز، در شبیه‌سازی انجام شده مدل واقعی مس بر مبنای مدل Drude در نظر گرفته شده است که در آن لایه‌های فلزی با گذردهی

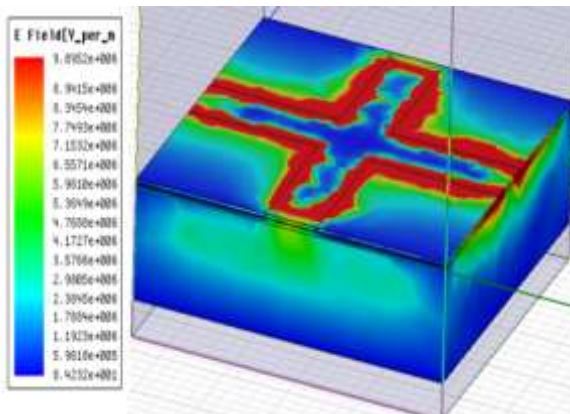
$$\epsilon_m(\omega) = \epsilon_\infty \epsilon_0 - \frac{\epsilon_0 \omega_p^2}{\omega^2 + j\omega\gamma}, \quad \epsilon_\infty = 4/6$$

$$\omega_p = 1.12 \times 10^{16} \text{ rad/s} \quad \text{و} \quad \gamma = 1.38 \times 10^{13} \text{ rad/s}$$

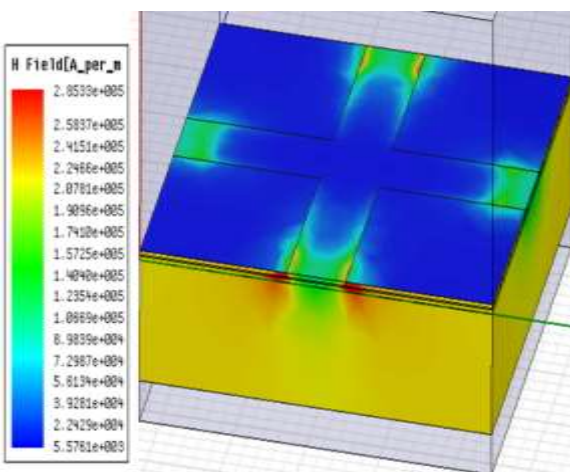
می‌باشد [۳۲] مدل شده‌اند. اگر چه در فرکانس‌های تراهرتز پائین می‌توان فلزات را با ضریب هدایت محدود آن تقریب زد، ضخامت پترن‌های فلزی به کار رفته در دی‌الکتریک مصنوعی $t_m = 100 \text{ nm}$ و ضخامت لایه فلزی پایین که به‌عنوان منعکس‌کننده به کار گرفته شده است 500 nm است. برای لایه دی‌الکتریک بین دو لایه پترن فلزی در دی‌الکتریک مصنوعی از ماده Al_2O_3 با ضریب دی‌الکتریک $\epsilon_r = 9.8(1 - j0.0005)$ استفاده شده است. به لحاظ ملاحظات عملی اگر چه این ماده در فرکانس‌های بالای تراهرتز دارای ویژگی پراکندگی است اما به هر حال برای فرکانس‌های زیر 10 تراهرتز خاصیت پراکندگی بسیار کوچک و قابل اغماض است [۳۳]. ماده دی‌الکتریک برای زیر لایه هم سیلیکون (Si) با ضریب شکست $n_s = 3/4$ در نظر گرفته شده است. سایر مؤلفه‌های هندسی ساختار در جدول (۱) مشخص شده‌اند. نتایج ضریب جذب بر حسب فرکانس در شکل (۴الف) رسم شده است. نتایج با نتایج مدل مداری مقایسه شده-

اند همان طور که مشاهده می‌شود بین نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی HFSS و نتایج به‌دست آمده از مدل تحلیلی تطابق نسبتاً خوبی وجود دارد. به هر حال با توجه به نتایج به‌دست آمده، در ساختار شماره ۲ که عرض پترن‌های فلزی کمتر از ساختار شماره ۱ است، نتایج مدل مداری از دقت کمتری برخوردار هستند که این از وجود خازن‌های حاشیه‌ای ناشی می‌شود. شکل (۴ب)، نتایج ضریب جذب را برای ساختار جاذب وقتی فلز به کار رفته در لایه دی‌الکتریک مصنوعی به‌صورت هادی کامل در نظر گرفته شده است، را نشان می‌دهد. با توجه به شکل واضح هست

(۷.الف) و (۷.ب) مشخص است، تمرکز میدان الکتریکی در لبه‌های پترن‌های فلزی و تمرکز میدان مغناطیسی در فاصله بین پترن‌های فلزی و داخل زیر لایه سیلیکون می‌باشد. در یک ساختار جاذب توان موج برخوردی توسط مواد و لایه‌های به کار رفته جذب می‌شوند. توزیع بردار پوینتینگ در شکل (۷.ج) نشان دهنده اتلاف توان موج برخوردی است، که عمدتاً در لبه‌های پترن‌های فلزی در فاصله بین پترن‌ها و داخل ماده زیرلایه در مرز بین ساختار دی‌الکتریک مصنوعی و ماده زیرلایه متمرکز شده است. در ادامه رفتار جذب را با تغییر مؤلفه‌های هندسی ساختار مورد بررسی قرار می‌دهیم. شکل (۸.الف) و (۸.ب) به ترتیب نتایج را برای عرض‌های پترن فلزی و ضخامت‌های زیرلایه متفاوت برای ساختار شماره یک نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش عرض پترن‌های فلزی فرکانس رزونانس به فرکانس‌های بالاتر شیفت داده می‌شود و دامنه جذب کاهش می‌یابد. بعلاوه با کاهش ضخامت زیرلایه نیز فرکانس رزونانس افزایش می‌یابد از لحاظ دامنه جذب برای زیر لایه با ضخامت ۳ میکرومتر می‌توان به ضریب جذب یک دست یافت.

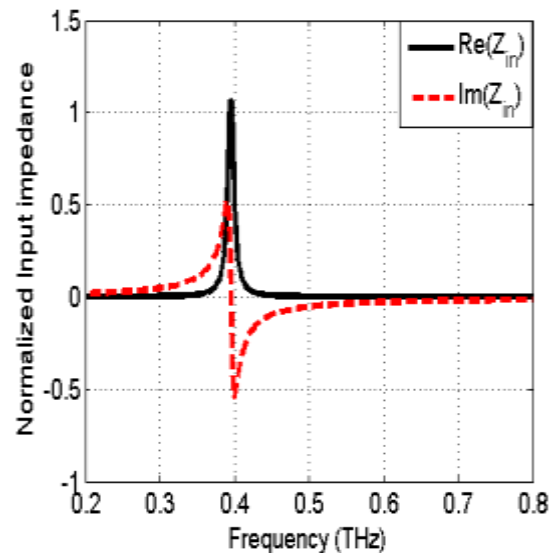


(الف)



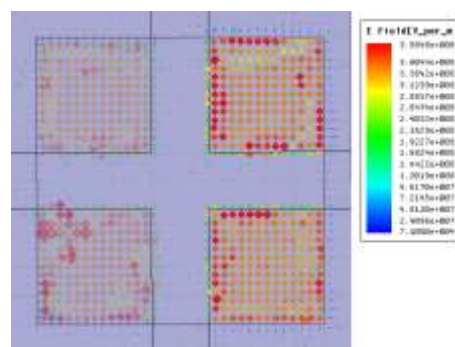
(ب)

نشان می‌دهد همان‌طور که مشاهده می‌شود، قسمت حقیقی امپدانس ورودی نرمالیزه شده به امپدانس فضای آزاد، برابر یک است و قسمت موهومی آن صفر می‌باشد. بنابراین شرایط تطبیق امپدانس در فرکانس رزونانس برقرار است.



شکل (۵): امپدانس ورودی نرمالیزه شده به امپدانس فضای آزاد بر حسب فرکانس برای ساختار شماره یک

شکل (۶) توزیع بردار میدان الکتریکی را در پترن‌های فلزی نشان می‌دهد همان‌طور که مشاهده می‌شود تمرکز این میدان‌ها در ناحیه همپوشانی پترن‌های فلزی نشان دهنده خازن صفحات موازی است از طرفی توزیع میدان الکتریکی در ناحیه بین فاصله افقی پترن‌های فلزی بسیار ناچیز است که نشان می‌دهد اثرات خازنی بین فاصله افقی قابل اغماض و چشم پوشی هستند.

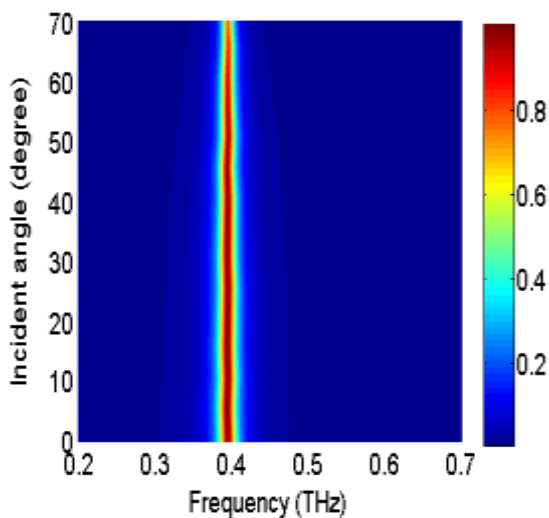


شکل (۶): توزیع بردار میدان الکتریکی روی پترن‌های فلزی

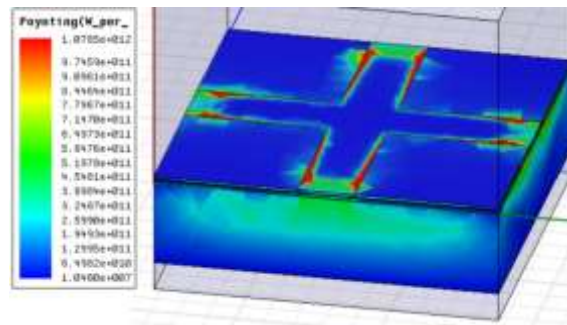
شکل (۷) توزیع میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی، و توزیع بردار پوینتینگ را برای درک مکانیزم جذب که بر پایه اتلاف توان موج برخوردی توسط مواد و لایه‌های به کار رفته در ساختار جاذب است، را نشان می‌دهد [۳۴]. همان‌طور که در شکل

زاویه موج برخوردی برای دو قطبش الکتریکی عرضی (TE) و مغناطیس عرضی (TM) می‌پردازیم. شکل (۹) طیف جذب را برای فرکانس‌های برخوردی متفاوت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ساختار جاذب برای زوایای کمتر از ۴۰ درجه به قطبش موج برخوردی وابسته نمی‌باشد از طرفی برای زوایای کمتر از ۶۰ درجه می‌توان به ضریب جذب بالای ۰.۸٪ برای هر دو قطبش TE و TM دست یافت.

جدول (۲) مقایسه بین ابعاد ساختار جاذب، ضریب کیفیت ساختار پیشنهادی با سایر جاذب‌های مبتنی بر فرامواد فلزی در فرکانس تراهرتز را نشان می‌دهد. اگرچه اخیراً جاذب‌های باند باریک متعددی بر پایه آرایه‌های گرافنی در فرکانس تراهرتز با ابعادی در حد ابعاد ساختار پیشنهادی ارائه شده است اما به هر حال ساخت آرایه‌های گرافن نسبت به فلز به مراتب پیچیده‌تر بوده و از طرفی بحث بایاس گرافن‌ها برای دستیابی به پتانسیل شیمیایی مورد نظر نیز خود چالشی دیگر است [۲۴-۲۵]. ضریب کیفیت از رابطه $Q = f_0 / FWHM$ محاسبه می‌شود که در آن f_0 فرکانس رزونانس و $FWHM$ پهنای باند ضریب جذب ۰/۵ می‌باشند. ساختار ارائه شده در مقاله [۱۹] و [۲۰] جاذب‌های دو بانده هستند که در اینجا فرکانس تراهرتز پائین جهت مقایسه آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ابعاد ساختار ارائه شده در این مقاله هم از حیث ابعاد سلول واحد و هم ضخامت ساختار خیلی کوچکتر از سایر جاذب‌های مبتنی بر فرامواد فلزی ارائه شده است. به لحاظ ضریب کیفیت نیز ساختار از ضریب کیفیت نسبتاً بالایی برخوردار است.

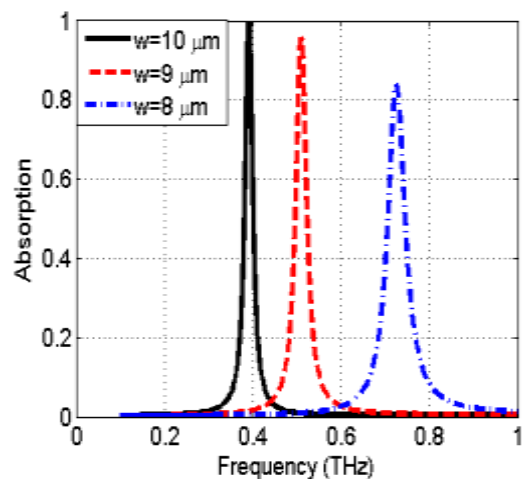


(الف)

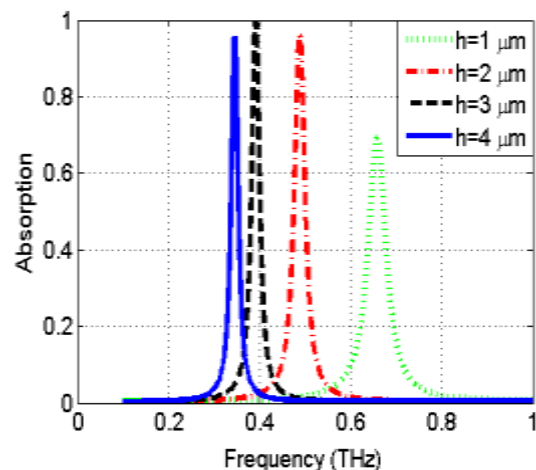


(ج)

شکل (۷): (الف) توزیع میدان الکتریکی (ب) توزیع میدان مغناطیسی (ج) توزیع بردار پوینتینگ ساختار جاذب پیشنهادی در فرکانس رزونانس



(الف)

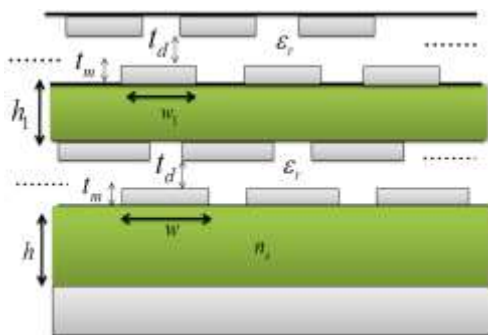


(ب)

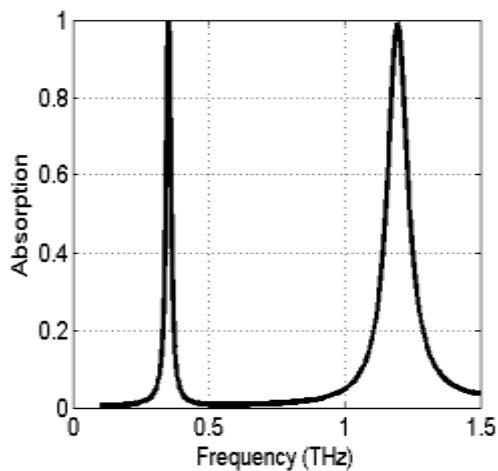
شکل (۸): طیف جذب برای (الف) عرض پترن‌های فلزی متفاوت (ب) ضخامت زیر لایه متفاوت در ساختار جاذب شماره یک

حال ما به بررسی پایداری ضریب جذب ساختار نسبت به

شماره یک با ابعاد مشخص شده در جدول (۱) یک لایه سیلیکون با ضخامت $h_1 = 2\mu\text{m}$ و بالای آن یک دی الکتریک مصنوعی با ابعاد پترن فلزی $w_1 = 7.2\mu\text{m}$ قرار داده شود می‌توان یک جاذب دو بانده با فرکانس‌های رزونانس 0.35 و $1/2$ تراهرتز دست یافت. ضخامت لایه دی الکتریک میزبان و فلزها و همچنین طول تناوب در ساختار دی الکتریک مصنوعی لایه دوم برابر با ابعاد آن در لایه اول در نظر گرفته شده‌اند. شکل (۱۱) طیف جذب ساختار را بر حسب فرکانس نشان می‌دهد.



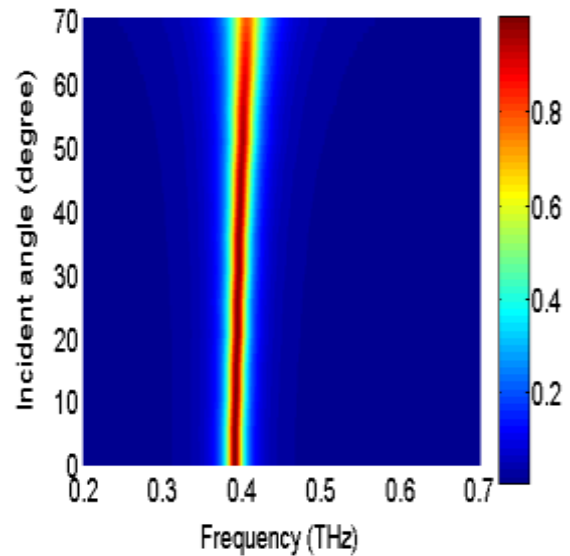
شکل (۱۰): (الف) بخش عرضی ساختار جاذب دو بانده



شکل (۱۱): طیف جذب ساختار دو بانده نشان داده شده در شکل (۱۰)

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک جاذب باند باریک براساس ساختارهای فرامواد فلزی به صورت تئوری مورد بررسی و تحقیق قرار گرفت. ساختار فراماده شامل دو لایه پترن فلزی است که توسط یک لایه دی الکتریک با ضخامت بسیار نازک از هم جدا شده‌اند. با طراحی مناسب ابعاد ساختار می‌توان جاذب باند باریک با ضریب جذب 100% در فرکانس‌های متفاوت تراهرتز تحقق بخشید. مزیت این نوع ساختار، ضریب کیفیت بالا و ابعاد بسیار کوچک آن در



(ب)

شکل (۹): طیف جذب برای زوایای برخوردی مایل متفاوت برای قطبش (الف) الکتریکی عرضی (ب) مغناطیسی عرضی

جدول (۲): مقایسه بین جاذب پیشنهادی و سایر جاذب‌ها

مرجع	فرکانس رزونانس (تراهرتز)	ضریب کیفیت	ابعاد سلول واحد	ضخامت ساختار
[۱۸]	۱/۱۵	۵/۸	$0.33\lambda \times 0.33\lambda$	0.05λ
[۱۹]	۰/۵	۴/۵	$0.66\lambda \times 0.66\lambda$	0.05λ
[۲۰]	۱/۴۶	۷	$0.76\lambda \times 0.76\lambda$	0.08λ
[۲۱]	۰/۵	۲۹	$0.17\lambda \times 0.17\lambda$	0.09λ
[۲۲]	۱/۵۳	۳۶/۵	$0.85\lambda \times 0.85\lambda$	0.11λ
جاذب در این مقاله	۰/۴	۲۰	$0.55\lambda \times 0.55\lambda$	0.04λ

۳-۲- ساختار جاذب دو بانده

برای طراحی یک جاذب دو بانده براساس ساختار ارائه شده کافی است از دو لایه ساختار دی الکتریک مصنوعی استفاده کرد. در واقع می‌توان روی ساختار شکل (۱) مجدد یک لایه سیلیکون با ضخامت h_1 و دو لایه پترن فلزی شیفت داده شده با عرض w_1 (ساختار دی الکتریک مصنوعی) قرار داد (شکل (۱۰)). با طراحی مؤلفه‌های لایه‌های دوم به گونه‌ای که فرکانس رزونانس متفاوت ایجاد کند می‌توان به یک جاذب دو بانده دست یافت که همچنان دارای ابعاد بسیار کوچک است. به عنوان مثال اگر روی ساختار

- Application as plasmonic sensor” *Nano Lett.*, vol. 10, pp. 2342–2348, 2010.
- [11] D. Wu, R. Li, Y. Liu, Zh. Yu, L. Yu, L. Chen, Ch. Liu, R. Ma, and H. Ye, “Ultra-narrow band perfect absorber and its application as plasmonic sensor in the visible region,” *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 12, p. 427, 2017.
- [12] M. Nejat and N. Nozhat, “Ultrasensitive THz refractive index sensor based on a controllable perfect MTM absorber,” *IEEE Sens. J.*, vol. 19, no. 22, pp. 10490-10497, 2019.
- [13] X. Liu, T. Starr, A. F. Starr, and W. J. Padilla, “Infrared spatial and frequency selective metamaterial with near-unity absorbance,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 104, no. 20, p. 207403, 2010.
- [14] X. Liu, T. Tyler, T. Starr, A. F. Starr, N. M. Jokerst, and W. J. Padilla, “Taming the blackbody with infrared metamaterials as selective thermal emitters,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 107, no. 4, p. 045901, 2011.
- [15] A. Malakzadeh, F. Khangeshlaghi, and M. Rezayatfam, “A new light and broadband metamaterial absorber with 1.4 mm thickness for reducing the radar cross section of objects,” *J. Appl. Electromagn.*, vol. 8, no. 1, pp. 27-33, 2020. (In Persian)
- [16] M. Biabanifard and M. S. Abrishamian, “Multi-band circuit model of tunable THz absorber based on graphene sheet and ribbons,” *AEU Int. J. Electron. Commun.*, vol. 95, pp. 256-263, 2018.
- [17] R. Gao, Z. Xu, Ch. Ding, L. Wu, and J. Yao, “Graphene metamaterial for multi-band and broadband terahertz absorber,” *Opt. Commun.*, vol. 356, pp. 400-404, 2015.
- [18] N. I. Landy, C. M. Bingham, T. Tyler, N. Jokerst, D. R. Smith, and W. J. Padilla, “Design, theory, and measurement of a polarization insensitive absorber for terahertz imaging,” *Phys. Rev. B*, vol. 79, no. 12, 2009, Art. no. 125104
- [19] X. He, S. Li, X. Yang, S. Shi, F. Wu, and J. Jiang “High-sensitive dualband sensor based on microsize circular ring complementary terahertz metamaterial,” *J. Electromagn. Waves Appl.*, vol. 31, no. 1, pp. 91-100, 2017.
- [20] B. X. Wang, X. Zhai, G. Z. Wang, W. Q. Huang, and L. L. Wang, “A novel dual-band terahertz metamaterial absorber for a sensor application,” *J. Appl. Phys.*, vol. 117, no. 1, p. 014504, 2015.
- [21] A. Ebrahimi, R. T. Ako, W. S. Lee, M. Bhaskaran, S. Sriram and W. Withayachumnan, “HighQ terahertz absorber with stable angular response,” *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, vol. 10, no. 2, pp. 204-211, 2020.
- [22] J. Yu, T. Lang, and H. Chen, “All-metal terahertz Metamaterial absorber and refractive index sensing performance,” *Photonics*, vol. 8, p. 164, 2021.
- مقایسه با سایر جاذب‌های فراماده تراهرتز موجود در فرکانس تراهرتز می‌باشد. بعلاوه ساختار ارائه شده دارای پایداری مناسب نسبت به زاویه برخوردی و همچنین غیرحساس به قطبش موج برخوردی می‌باشد. یک مدل مداری تقریبی برای درک رفتار رزونانسی و جذب ساختار در این مقاله ارائه شد. رفتار رزونانسی ساختار ناشی از ویژگی خازنی ساختار فراماده و امیداندس القایی زیر لایه زمین شده می‌باشد. جاذب پیشنهادی را می‌توان در کاربردهای تصویربرداری تراهرتز با رزولوشن بالا، طیف سنجی و سنجش تراهرتز با دقت بالا استفاده کرد.

۴- مراجع

- [1] M. Coulombe, H. Nguyen and C. Caloz, “Substrate integrated artificial dielectric structure for miniaturized microstrip circuits,” *IEEE Antennas Wirel. Propag. vol. 6*, pp. 575-579, 2007.
- [2] I. Awai, H. Kubo, T. Iribe, D. Wakamiya, and A. Sanada, “An artificial dielectric material of huge permittivity with novel anisotropy and its application to a microwave BPF,” *IEEE MTT-S Dig.*, vol. 1, pp. 301–304, 2003.
- [3] Y. Ma, B. Rejaei, and Y. Zhuang, “Artificial dielectric shields for integrated transmission lines,” *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.*, vol. 18, no. 7, pp. 431-433, 2008.
- [4] Y. Ma, B. Rejaei, and Y. Zhuang, “Low-loss onchip transmission lines with micropatterned artificial dielectric shields,” *Electron. Lett.*, vol. 44, no. 15, pp. 913-914, 2008.
- [5] K. Takahagi and E. Sano, “High-gain silicon on-chip antenna with artificial dielectric layer,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 10, pp. 3624-3629, 2011.
- [6] Sh. Ogawa and M. Kimata, “Metal-insulator-metal-based plasmonic metamaterial absorbers at visible and infrared wavelengths: a review,” *Mater.*, vol. 11, p. 458, 2018.
- [7] Y. Cui, Y. He, Y. Jin, F. Ding, L. Yang, Y. Ye, S. Zhong, Y. Lin, and S. He “Plasmonic and metamaterial structures electromagnetic absorbers,” vol. 8, pp. 495-520, 2014.
- [8] H. A. Atwater and A. Polman, “Plasmonics for improved photovoltaic devices,” *Nat. Mater.*, vol. 9, pp. 205-213, 2011.
- [9] R. A. Pala, J. White, E. Barnard, J. Liu, and M. L. Brongersma, “Design of plasmonic thin-film solar cells with broadband absorption enhancements” *Adv. Mater.*, vol. 21, pp. 3504–3509, 2009.
- [10] N. Liu, M. Mesch, T. Weiss, M. Hentschel, and H. Giessen, “Infrared perfect absorber and its

- [30] A. A. Baba, M. A. B. Zakariya, Z. Baharudin, M. Z. u. Rehman, M. F. Ain, and Z. A. Ahmad, "Equivalent lumped-element circuit of aperture and mutually coupled cylindrical dielectric resonator antenna array," *Prog. Electromagn. Res. C*, vol. 45, pp. 15-31, 2013.
- [31] C. S. R. Kaipa, A. B. Yakovlev, F. Medina, F. Mesa, C. A. M. Butler, and A. P. Hibbins, "Circuit modeling of the transmissivity of stacked two dimensional metallic meshes," *Opt. Express*, vol. 18, pp. 13309-13320, 2010.
- [32] M. A. Ordal, R. J. Bell, R. W. Alexander, L. L. Long, and M. R. Querry, "Optical properties of fourteen metals in the infrared and far infrared: Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Mo, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, V, and W.," *Appl. Optics*, vol. 24, pp. 4493-4499, 1985.
- [33] Kh. Z. Rajab, M. Naftaly, E. H. Linfield, J. C. Nino, D. Arenas, D. Tanner, R. Mittra, and M. Lanagan, "Broadband dielectric characterization of aluminum oxide (Al₂O₃)" *J. Micro. and Elect. Pack.*, vol. 5, pp. 101-106, 2008.
- [34] D. Hu, T. Meng, H. Wang, Y. Ma, and Q. Zhu, "Ultra-narrow-band terahertz perfect metamaterial absorber for refractive index sensing application," *Results in Phys.*, vol. 19, p. 103567, 2020.
- [23] T. Maier and H. Brückl, "Wavelength-tunable microbolometers with metamaterial absorbers," *Opt. Lett.*, vol. 34, p. 3012, 2009.
- [24] S. Barzegar-Parizi and A. Khavasi, "Designing dual-band absorbers by graphene/metallic metasurfaces," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 55, p. 7300108, 2019.
- [25] S. Barzegar-Parizi, and A. Ebrahimi, "Ultrathin, polarization-insensitive multi-Band absorbers based on graphene metasurface with THz sensing application," *J. Opt. Soc. Am. B.*, vol. 37, no. 8, pp. 2372-2381, 2020.
- [26] S. Barzegar-Parizi and B. Rejaei, "Calculation of effective parameters of high permittivity integrated artificial dielectrics," *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 9, no. 12, pp. 1287-1296, 2015.
- [27] Y. Ma, "Ferroelectric materials and artificial dielectric layer structures for microwave integrated circuit technologies," Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, 2011.
- [28] S. Barzegar-Parizi, A. Ebrahimi, and K. Ghorbani, "Dual-broadband and single ultrawideband absorbers from the terahertz to infrared regime," *J. Opt. Soc. Am. B.*, vol. 38, pp. 2628-2637, 2021.
- [29] O. Luukkonen, C. Simovski, G. Gran, G. Goussetis, D. Lioubtchenko, A. V. Raisanen, and S. A. Tretyakov, "Simple and accurate analytical model of planar grids and high-impedance surfaces comprising metal strips or patches," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 56, no. 6, pp. 1624-1632, 2008.