

طراحی ساختار جاذب فراماده امواج الکترومغناطیسی پهن باند با ابعاد بهینه

سیدعلی تقوی^۱، جعفر خلیل‌پور^۲، حمیدرضا دلیلی اسکویی^۳

^۱دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران، ایران، emadtaghavi64@gmail.com

^۲دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء(ص)، دانشکده مهندسی برق، تهران، ایران، z_khalilpour@yahoo.com

^۳دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران، ایران، h_oskouei@yahoo.com

چکیده - در این مقاله، یک جاذب فراماده^۱ با ساختاری ساده با پهنای باند زیاد و ابعاد و ضخامت بهینه برای کاربردهای باند X پیشنهاد شده است. ساختار پیشنهادی از سه رینگ حلقوی شکافدار، حک شده بر روی یک زیرلایه تشکیل شده که دو رینگ وسطی با یک شکاف و بزرگترین رینگ با دو شکاف ارائه گردیده تا به بهترین پهنای باند جذب برسیم. این ساختار با ابعاد و ضخامت کم (ضخامت $\lambda_0/0.07$ در فرکانس مرکزی $10GHz$) پهنای باند جذب بسیار خوب $4.4584GHz$ را با جذب بالای ۹۰ درصد از فرکانس $7.4820GHz$ الی $11.9404GHz$ نشان می‌دهد که ۴۴،۵۸۴ درصد جذب را در فرکانس مرکزی $10GHz$ در بر می‌گیرد. در محدوده باند جذب، ساختار دارای ۳ پیک فرکانسی با درصد جذب بالای ۹۸/۸۹ و یک پیک فرکانسی با درصد جذب ۹۵/۷۸ می‌باشد. ساختار طراحی شده برای زوایای برخورد عمود و مایل موج الکترومغناطیسی، مورد آزمایش قرار گرفت که جذب خوبی را تحت زوایای مختلف از خود نشان داد. همچنین این ساختار برای قطبش متفاوت تحت زوایای تابش عمود و مایل موج الکترومغناطیسی، تست گردید. این ساختار به دلیل طراحی نامتقارن، حساس به قطبش است. توزیع میدان الکترومغناطیسی و نمودارهای جریان‌های سطحی برای آنالیز مکانیسم جذب ساختار نشان داده شده‌اند. کلید واژه- باند X، جاذب فراماده، رینگ حلقوی شکافدار، پهنای باند جذب.

کوچک هستند. فراماده بطور کلی در طبیعت وجود ندارند. خواص فرامواد شامل تولید ضریب شکست منفی و یا نامرئی سازی است. البته توجه روز افزون به سمت فراماده نه بخاطر خواص غیر طبیعی‌شان بلکه بیشتر بدلیل کارایی آنها در حوزه فرکانسی مایکروویو می‌باشد. مهم‌ترین مزیت استفاده از فراماده، نازک‌تر و کم حجم بودن این ساختار است. این مواد طوری طراحی و شکل‌دهی می‌شوند که انتشار امواج الکترومغناطیسی برخورد شده به خود را تغییر می‌دهند.

این تاریخچه فراماده به قرن ۱۹ میلادی، سال ۱۹۶۸ برمی‌گردد، یعنی زمانیکه فیزیکدان روسی ویکتور وسلایگو^۲ در مقاله‌ای با عنوان "خصوصیات الکتروپدینامیکی مواد با گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی همزمان منفی" به بررسی نظری امکان وجود ماده‌ای با ضریب شکست منفی که نور را در خلاف جهت عادی منحرف می‌کند، پرداخت [1]. در نهایت در سال ۲۰۰۰، D.R Smith و همکارانش با الهام از تحقیقات انجام شده توسط Pendry و همکارانش توانستند ساختاری ارائه دهند که بتواند ϵ و μ همزمان منفی ایجاد کند [2].

۱- مقدمه

جاذب‌ها از قدیمی‌ترین و پرکاربردترین ساختارها به منظور کاهش سطح مقطع راداری (Radar Cross Section) هدف به شمار می‌روند. این جاذب‌ها با جذب پرتوهای امواج ورودی کار می‌کنند. با پیشرفت تکنولوژی و قابلیت ساخت مواد و طراحی آنها در مقیاس نانو و حتی کوچکتر، تلاش جهت ساخت جاذب‌هایی بسیار نازک و سبک‌تر از انواع متداول نیز آغاز شد. یکی از روش‌های مناسب برای حل برخی از مشکلات و محدودیت‌های روش‌های مربوط به جاذب‌های راداری معمولی، در کاهش سطح مقطع راداری، استفاده از فرامواد است که با توجه به ویژگی‌های منحصر بفردشان از جمله امکان طراحی آنها در فرکانس‌های بالا نظیر تراهرتز، وزن، حجم و هزینه کم و سادگی ساختار آنها بیشتر مورد توجه می‌باشد. فرامواد ساختارهای مصنوعی منحصر به فردی هستند که رفتارهای ویژه‌ای از خودشان نشان می‌دهند، آنها ساختارهایی با ثابت‌های دی‌الکتریکی و مغناطیسی منفی و ابعاد

^۱ Metamaterial Absorber

^۲ V.G Veselago

را با جذب بالای ۹۰ درصد از فرکانس ۷,۴۸۲۰GHz الی ۱۱,۹۴۰۴GHz و با ۴ پیک در فرکانسهای ۷,۹GHz ، ۱۰,۳GHz ، ۱۱,۲GHz و ۱۱,۸GHz به ترتیب با درصد جذب ۹۹/۸۵ ، ۹۸/۸۹ ، ۹۵/۷۸ ، ۹۹/۲۴ ، نشان می‌دهد. توزیع میدان الکترومغناطیسی و شکل جریان سطحی در پیکهای جذب نشان داده شده‌اند تا مکانیزم جذب جذب پهن باند را تحلیل نماید. ساختار طراحی شده برای زوایای مختلف تحت برخورد عمودی و همچنین برای زوایای برخورد پهن مورد مطالعه قرار گرفت. شعاع، پهنای حلقه و پهنای شکافهای مربوط به هر یک از حلقه‌ها تغییر داده شد تا در بهینه‌ترین حالت قیدشده برای ساختار، بهترین حالت جذب مشاهده گردید.

۲- طراحی و نتایج شبیه سازی

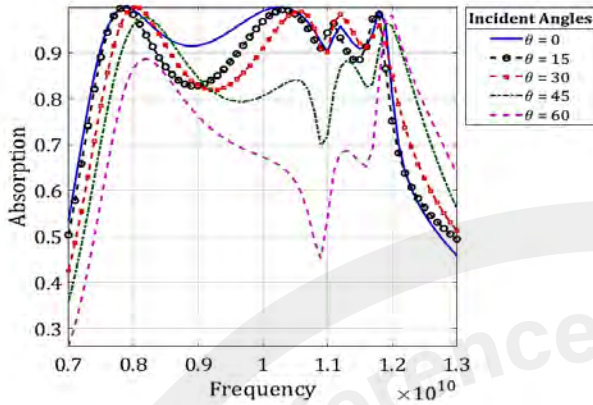
جذب پهن باند پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است. یک سلول واحد، از یک پیچ فلزی در بالا و صفحه زمین در انتها که بوسیله یک زیرلایه دی‌الکتریک از هم جدا شده‌اند، تشکیل شده است. زیرلایه FR-4 با $\epsilon_r = 4.2$ و $\tan \delta = 0.02$ بعنوان دی‌الکتریک با ضخامت ۲,۱ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. لایه بالایی از سه رینگ حلقوی شکافدار، که دو رینگ وسطی با یک شکاف و بزرگترین رینگ با دو شکاف هستند، تشکیل گردیده است. دو رینگ وسطی دارای یک شکاف در یک جهت و در جهت -y قرار داده شده و شکافهای بزرگترین رینگ نیز در امتداد مورب ساختار قرار دارد. هر دو پیچ بالایی و صفحه زمین انتهایی بوسیله مس با ضخامت ۰,۰۳۵ mm و ضریب هدایت پذیری $\sigma = 5.8 \times 10^7 S/m$ ساخته شده‌اند. ابعاد سلول واحد و پیچ بالایی عبارتند از: $a = 6.9$ ، $r_1 = 1.6$ ، $r_2 = 2.3$ ، $r_3 = 3.15$ ، $w_1 = 0.7$ ، $w_2 = 0.5$ ، $w_3 = 0.51$ ، $g_1 = 0.3$ ، $g_2 = 0.1$ ، $g_3 = 0.4$ (کلیه واحدها بر حسب میلی‌متر می‌باشند). این ابعاد با بهینه سازی تک تک المانها و سویپ پارامتری آنها بدست آمده و بهترین حالت برای این ساختار می‌باشند. این ساختار با ضخامت $0.07\lambda_0$ با در نظر گرفتن فرکانس مرکزی ۱۰GHz طراحی شده و به منظور تحلیل یک آرایه بی‌نیهایت برای جذب پیشنهادی، از نرم افزار HFSS و شرایط مرزی Master-Slave و تحریک با Floquet port در شبیه سازی استفاده گردیده است.

قابلیت جذب (Absorptivity) می‌تواند بصورت زیر بیان شود:

$$A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (1)$$

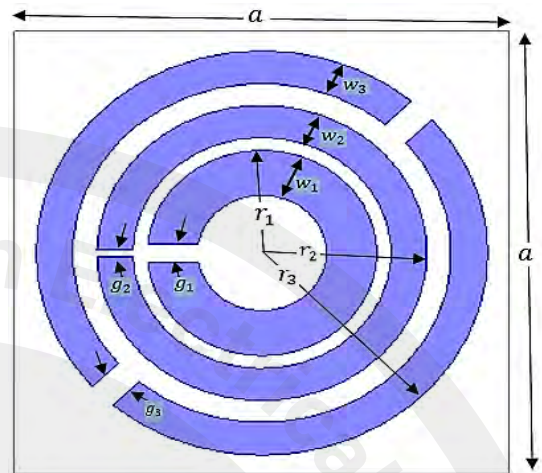
که در آن $|S_{11}|^2$ معادل توان منعکس شده و $|S_{21}|^2$ معادل توان انتقال یافته می‌باشد. از آنجا که بخش انتهایی ساختار با صفحه فلزی بطور کامل پوشانده شده است، لذا انتقال موجی نخواهیم داشت و $|S_{21}|^2 = 0$ می‌گردد. بنابراین، قابلیت جذب می‌تواند بوسیله کم

ویژگی‌های منحصر بفرد ساختارهای کامپوزیتی مصنوعی و ساخته دست بشر "فرامواد" [2]، توجه بسیاری از دانشمندان را به خود جلب نموده و در کاربردهای مختلفی از جمله جاذبها [3-4]، آنتن‌ها [5-6]، پوشش [7] و غیره مورد استفاده قرار گرفته است. علاقمندی به سمت جاذبهای فرامواد، بدلیل ساختار با ضخامت کم و فشرده آن می‌باشد که باعث شده جایگزین جاذبهای معمولی در باندهای فرکانسی مایکروویو، نوری، مرئی و مادون قرمز گردیده است [8-10]. همچنین این جاذبهای فراماده مزیت‌های دیگری از جمله جذب نزدیک به یک و پهنای باند خوب را نیز دارند. از اینرو، جاذبهای فراماده گوناگونی برای تک باند [11]، چند باند [12-15] و پهن باند [16-17] پیشنهاد شده‌اند. در سالهای اخیر، جاذبهای فراماده با پهنای باند زیاد، جلب توجه کرده‌اند، همچنین این جاذبها می‌توانند برای کاهش سطح مقطع راداری و تکنولوژی پنهان سازی (Stealth) مورد استفاده قرار بگیرند. با وجود طبیعت بسیار نازک و جذب نزدیک به یک، یکی از معایب جاذبهای فرامواد، باریک بودن پهنای باند عملکردی آنها می‌باشد. پهنای باند جاذبهای فراماده، با استفاده از ساختارهای چند لایه [18]، چند رزونانسی [19] و تک لایه [20-21] افزایش یافتند. در ساختارهای چند لایه، لایه‌هایی از ماده دی‌الکتریک برای جذب پهن باند، قرار داده شده است. این لایه‌های چندگانه، ضمن اینکه ضخامت جاذب را افزایش می‌دهند، بهره‌برداری از آنها جهت استفاده‌های معمولی را نیز سخت می‌نمایند. ساختارهای چند رزونانسی، از چند رزوناتور تشکیل شده که پهنای باند جذب وسیعی را می‌دهد اگرچه اندازه آنها بزرگ می‌باشد. در نتیجه، رزوناتورها با هم ترکیب شدند تا یک رزوناتور فشرده در یک لایه شکل گیرد، که طراحی و کنترل فرکانس رزونانس آن آسان است. ساختارهای تک لایه، با بهینه‌سازی مناسب، افزایش جذب و پهنای باند وسیع را به دنبال خواهند داشت. اگرچه این نوع از جاذبها، جذب با پهنای باند بهینه شده را با ساختار هندسی ساده‌تر نشان می‌دهند، اما ابعاد سلول واحد برای پیاده‌سازی آنها در کاربردهای معمولی، بسیار بزرگ است. این ساختارهای جاذب فراماده، عموماً بصورت آرایه‌ای از سلول واحد در بالای زیرلایه و صفحه کامل مسی در انتهای زیرلایه تشکیل شده است. در فرکانس رزونانس، سطح فرکانس گزین (FSS) بالایی، بصورت الکتریکی تحریک می‌شود، در حالیکه میدان مغناطیسی برخوردی، زیرلایه دی‌الکتریک را تحریک می‌کند که باعث تشکیل جریان سطحی از شار چرخشی می‌شود. در این مقاله یک ساختار تک لایه با ابعاد و ضخامت بهینه و پهنای باند جذب بسیار خوب برای فرکانسهای باند X طراحی و شبیه‌سازی شده و تقریباً کل محدوده باند X را پوشش می‌دهد. این ساختار با ضخامت کم (ضخامت $0.07\lambda_0$ با در نظر گرفتن فرکانس مرکزی ۱۰GHz) پهنای باند جذب بسیار خوب ۴,۴۵۸۴GHz



شکل ۳: نمودار جذب ساختار سلول واحد جاذب فراماده تحت زوایای تابش از ۰ درجه الی ۶۰ درجه

کردن انعکاس موج از ساختار جاذب، بهبود یافته و به جذب مطلوب برسد.



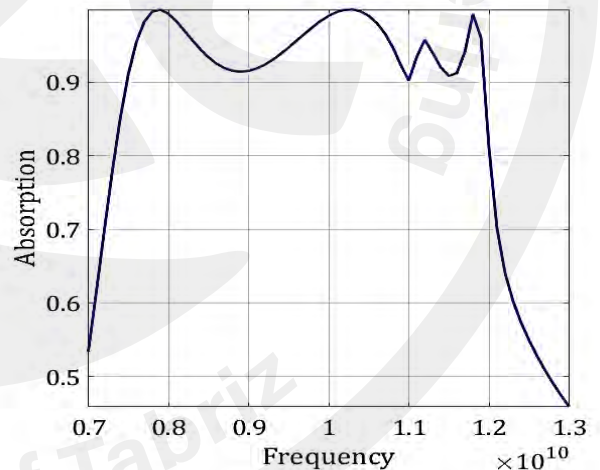
شکل ۱: نمای جلویی از ساختار سلول واحد جاذب فراماده با پهنای باند زیاد و ابعاد و ضخامت بهینه

۳- مکانیسم جذب

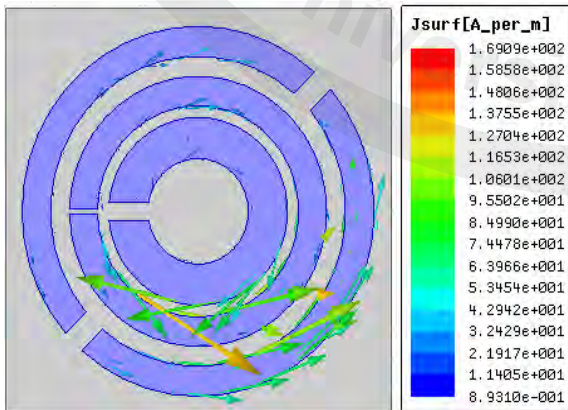
جریان سطحی و توزیع میدان الکترومغناطیسی در فرکانس مرکزی ۱۰ GHz به ترتیب در شکل‌های ۴، ۵، ۶ و ۷ نشان داده شده‌اند. این اشکال برای تحلیل مکانیسم جذب جاذب فراماده پیشنهادی مورد استفاده قرار می‌گیرند. همانگونه که در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است، توزیع‌های جریان سطحی در فرکانس مرکزی در لایه بالایی (شکل ۴) و لایه پایینی (شکل ۵) غیر موازی با یکدیگر هستند. این جریان‌های سطحی، حلقه‌های جریان چرخشی را در اطراف میدان مغناطیسی تشکیل می‌دهند و در این فرکانس، میدان‌های الکتریکی با میدان‌های مغناطیسی هم‌پوشانی می‌کنند تا به بیشترین مقدار جذب برسند.

شکل ۶ و شکل ۷ به ترتیب نشان می‌دهند که میدان‌های الکتریکی در نزدیکی شکاف‌های رینگ‌های حلقوی و میدان‌های مغناطیسی در قسمت پایینی رینگ‌های حلقوی در فرکانس مرکزی متمرکز شده‌اند تا جذب را به حداکثر برسانند.

در شکل ۲ می‌توان مشاهده نمود که پهنای باند جذب بسیار خوب ۴,۴۵۸۴ GHz را با جذب بالای ۹۰ درصد از فرکانس ۷,۴۸۲۰ GHz الی ۱۱,۹۴۰۴ GHz و با ۴ پیک در فرکانس‌های ۷,۹ GHz، ۱۰,۳ GHz، ۱۱,۲ GHz و ۱۱,۸ GHz به ترتیب با درصد جذب ۹۹/۸۵، ۹۸/۸۹، ۹۹/۲۴، ۹۵/۷۸ بدست آمده است.



شکل ۲: نمودار جذب ساختار سلول واحد جاذب فراماده با زاویه برخورد مستقیم

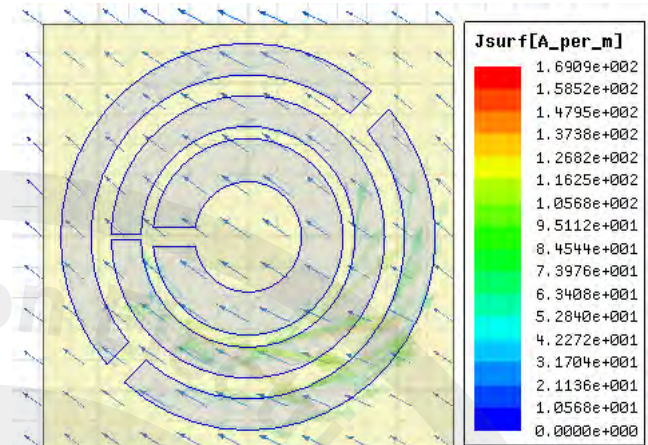


شکل ۴: توزیع جریان‌های سطحی برای لایه بالایی ساختار جاذب فراماده در فرکانس مرکزی ۱۰ GHz

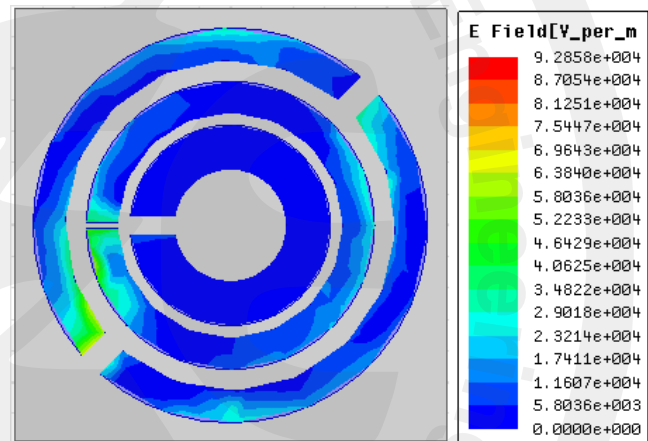
به منظور نشان دادن رفتار جاذب پهن‌بند در مواجهه با موج‌های برخوردی با زوایای مختلف، ساختار طراحی شده تحت زوایای تابش از ۰ درجه الی ۶۰ درجه قرار گرفت که در شکل ۳ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل مشخص است، با افزایش زاویه تابشی، جذب به سمت دو باند شده پیش می‌رود ولی خیلی تحت تاثیر زاویه تابش قرار نگرفته و حتی در زاویه تابش ۶۰ درجه نیز در برخی فرکانس‌ها جذب بالای ۹۰ درصد را از خود نشان می‌دهد.

۴- نتیجه گیری

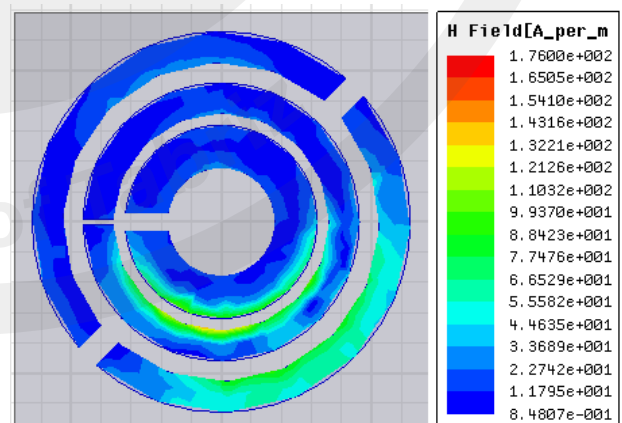
یک ساختار جاذب فراماده با ابعاد و ضخامت بهینه و پهنای باند زیاد در این مقاله ارائه گردیده است. از لحاظ هندسی، ساختار بصورت ساده طراحی شده و ضخامت آن $0.7\lambda_0$ در فرکانس مرکزی ۱۰ GHz بوده و از سه رینگ حلقوی شکافدار، که دو رینگ وسطی با یک شکاف و بزرگترین رینگ با دو شکاف هستند، تشکیل شده است. ساختار طراحی شده برای کاربردهای باند X مناسب بوده و پهنای باند جذب بسیار خوب ساختار، 4.4584 GHz با جذب بالای ۹۰ درصد از فرکانس 7.482 GHz الی 11.94 GHz، نشاندهنده، 44.584 درصد جذب در فرکانس مرکزی ۱۰ GHz می باشد. همچنین ساختار پیشنهادی، ۴ پیک در فرکانس های 7.9 GHz، 10.3 GHz، 11.2 GHz و 11.8 GHz به ترتیب با درصد جذب $99/85$ ، $98/89$ ، $95/78$ ، $99/24$ دارد. ساختار طراحی شده برای زوایای برخورد عمود و مایل موج الکترومغناطیسی، مورد آزمایش قرار گرفت که جذب خوبی را تحت زوایای مختلف موج برخوردی از خود نشان داد. همچنین این ساختار برای قطبش متفاوت تحت زاویه های تابش عمود و مایل موج الکترومغناطیسی، تست گردید. این ساختار به دلیل طراحی نامتقارن، حساس به قطبش است و در زاویه های مختلف در جذب دارای تأثیرات متنوعی است. توزیع میدان الکترومغناطیسی و نمودارهای جریان های سطحی برای تجزیه و تحلیل مکانیسم جذب ساختار پیشنهادی نشان داده شده اند. ساختار پیشنهادی را می توان برای کاربردهای زیادی از جمله در تکنولوژی پنهان سازی، تداخل الکترومغناطیسی (EMI)، سازگاری الکترومغناطیسی (EMC) و تصویربرداری فازی بکار برد.



شکل ۵: توزیع جریانهای سطحی برای لایه پایینی ساختار جاذب فراماده در فرکانس مرکزی ۱۰ GHz



شکل ۶: توزیع میدان الکتریکی در ساختار جاذب فراماده در فرکانس مرکزی ۱۰ GHz



شکل ۷: توزیع میدان مغناطیسی در ساختار جاذب فراماده در فرکانس مرکزی ۱۰ GHz

مراجع

- [1] V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative value of ϵ and μ ," *Sov. Phys. Usp.*, vol. 10, pp. 509-514, Feb. 1968.
- [2] D. R. Smith and W. J. Padilla and D. C. Vier and S. C. Nemat-Nasser and S. Schultz, "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity" *Physical Review Letters*, vol.84, pp.4184, 2000.
- [3] N. I. Landy and S. Sajuyigbe and J. J. Mock and D. R. Smith and W. J. Padilla, "Perfect metamaterial absorber" *Physical Review Letters*, vol.100, pp.207402, 2008.
- [4] F. Billotti and L. Nucci and L. Vegni, "An SRR based microwave absorber" *Microwave and Optical Technology Letters*, vol.48, pp.2171-2175, 2006.
- [5] L. W. Li and Y. N. Li and T. S. Yeo and J. R. Mosig and, O. J. F. Martin, "A broadband and high-gain metamaterial microstrip antenna" *Applied Physics Letters*, vol.96, pp.164101, 2010.
- [6] Ch. Arora and S. Pattnaik Shyam and R. N. Baral "Performance enhancement of patch antenna array for 5.8 GHz Wi-MAX applications using metamaterial inspired technique" *International Journal of Electronics and Communications*, vol.79, pp.124-131, 2017.

- [7] W. Chettiar and U. K. Chettiar and A. V. Kildishev and V. M. Shalaev, "Optical cloaking with materials" *International Journal of Electronics and Communications, Nature photonics*, vol.1, pp.224-227, 2007.
- [8] H. Li and L. H. Yua and B. Zhou and X. P. Shen and Q. Cheng and T. J Cui, "Ultrathin multiband gigahertz metamaterial absorbers" *Journal of Applied Physics*, vol.110, pp.014909, 2011.
- [9] N. Zhang and N. Zhang and P. Zhou and D. Cheng and X. Weng and J. Xie and L Deng, "Dual-band absorption of mid-infrared metamaterial absorber based on distinct dielectric spacing layers" *Optics Letters*, vol.38, pp. 1125-1127, 2013.
- [10] H. Tao, and N. I. Landy and C. M. Bingham and X. Zhang and R. D. Averitt and W. J. Padilla "A metamaterial absorber for the terahertz regime: Design, fabrication and characterization" *Optics Express*, vol.16, pp. 7181-7188, 2008.
- [11] M. R. Soheilifar and R. A Sadeghzadeh and H Gobadi, "Design and fabrication of a metamaterial absorber in the microwave range" *Microwave and Optical Technology Letters*, vol.56, pp. 1748-1752, 2014.
- [12] B. Ni and X. S Chen and L. J. Huang and J. Y. Ding and G. H Li and W Lu, "A dual-band polarization insensitive metamaterial absorber with split ring resonator" *Optical and Quantum Electronics*, vol.45, pp. 747-753, 2013.
- [13] S. Ramya and I. S. Rao, "Design of polarization-insensitive dual band metamaterial absorber" *Progress In Electromagnetics Research M*, vol.50, pp. 23-31, 2016.
- [14] Y. J. Yoo and Y. J. kim and et all, "Triple-band perfect metamaterial absorption, based on single cut-wire bar" *Applied Physics Letters*, vol.106, pp. 071105, 2015.
- [15] A. Bhattacharya and S. Bhattacharya and S. Ghosh and D. Chaurasiya and K.V. Srivastava, "An ultrathin penta-band polarization-insensitive compact metamaterial absorber for airborne radar applications" *Microwave and Optical Technology Letters*, vol.57, pp. 2519-2524, 2015.
- [16] J. Lee and S. Lim, "Bandwidth-enhanced and polarisation-insensitive metamaterial absorber using double resonance" *Electronics Letters*, vol.47, pp. 8-9, 2011.
- [17] S. Ghosh, and S. Bhattacharya and D. Chaurasiya and K.V. Srivastava, "An Ultra wideband Ultrathin Metamaterial Absorber based on Split Sing Resonators" *Applied Physics A*, vol.14, pp. 1172-1175, 2015.
- [18] S. Bhattacharya and S.Ghosh and D. Chaurasiya and K.V. Srivastava, "Bandwidth-enhanced dual-band dual-layer polarization-independent ultra-thin metamaterial absorber" *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol.118, pp. 207-215, 2015.
- [19] L. Lee and J. Wang, and H. Du and S. Qu and Z. Xu, "A band enhanced metamaterial absorber based on E-shaped all-dielectric resonators" *AIP Advances* vol.5, pp. 017147, 2015.
- [20] D. Sood, and C.C. Tripathi, "A wideband wide-angle ultrathin low profile metamaterial microwave absorber" *Microwave and Optical Technology Letters*, vol.58, pp. 1131-1135, 2016.
- [21] S. Ramya, and I. S. Rao, "A compact ultra-thin ultrawideband microwave metamaterial absorber" *Microwave and Optical Technology Letters*, vol.59, pp. 1837-1845, 2017.