

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

اثر جانشانی کاتیون Gd بر خواص ساختاری و الکترومغناطیسی هگزافریت باریم نوع Z

محمد جزیره پور^۱، احمد پورباقرانی^{۱*}، زینت میرزایی^۲

۱- استادیار، دانشکده الکتروسرام و مهندسی برق، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، علوم و فناوری نانو (نانوفیزیک)، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران.

*pourbafrani@mut-es.ac.ir#

مقاله پژوهشی

چکیده

در این تحقیق اثر جانشانی کاتیون گادولونیوم بر خواص ساختاری و الکترومغناطیسی ترکیب هگزافریت باریم نوع Z مورد بررسی قرار گرفت. این گروه از ترکیبها به صورت $Ba_3Co_{2-x}Gd_xFe_{24}O_{41}$ و به ازای مقادیر جانشانی ۰، ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۸ و ۱/۲ با استفاده از روش آسیابسر پراثرژی تولید شدند. برای بررسی دمای تشکیل فاز و اثر اندازه ذرات بر خواص این ترکیب، از نمونه‌ی $Ba_3Co_{1.6}Gd_{0.4}Fe_{24}O_{41}$ آنالیزهای پراش پرتو ایکس (XRD) و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) گرفته شد. به منظور بررسی خواص الکترومغناطیسی این ترکیبها، قسمت‌های حقیقی و موهومی ضرایب گذردهی الکتریکی (ϵ') و نفوذپذیری مغناطیسی (μ') نمونه‌ها توسط آنالیزگر برداری شبکه (VNA) اندازه‌گیری شد. با استفاده از این ضرایب، نمودارهای اتلاف بازتابی ترکیبات در محدوده‌ی فرکانسی ۱-۱۸ GHz ترسیم شد. با بررسی نمونه‌ها از لحاظ بیشترین میزان شدت جذب و پهنای باند به‌طور هم‌زمان؛ در باندهای فرکانسی S و C_1 نمونه‌ی با جانشانی Gd به مقدار $\alpha=0/5$ در باند C_2 نمونه‌ی با $\alpha=0/3$ در باند X نمونه‌ی با $\alpha=0/1$ و در باند Ku نمونه‌ی با $\alpha=1/2$ به عنوان نمونه‌های بهینه انتخاب شدند ($Ku: 12-18$ GHz, $X: 8-12$ GHz, $C_2: 4-8$ GHz, $C_1: 2-4$ GHz, $S: 1-2$ GHz).

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۳۰

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۵

کلید واژگان:

آسیابسر پراثرژی

جذب مایکروویو

گذردهی الکتریکی

نفوذپذیری مغناطیسی

هگزافریت باریم نوع Z

The Effect of Gd Cation Substitution on the Structural and Electromagnetic Properties of Z-Type Barium Hexaferrite

Mohammad Jazirehpour¹, Ahmad Pourbafrani^{1*}, Zenat Mirzaei²

1- Assistant Professor, Department of Electroceramics and Electrical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Iran.

2- Master student, Nanoscience and Technology (Nanophysics), Malek Ashtar University of Technology, Iran.

* pourbafrani@mut-es.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Doi:

20.1001.1.24233226.1401.16.3.6.7

Keywords:

Energetic Milling

Microwave Absorption

Electrical Permittivity

Magnetic Permeability

Z-type Barium Hexaferrite

Abstract

The effect of gadolinium cation substitution on the structural and electromagnetic properties of Z-type barium hexaferrite was investigated in this study. This group of compounds is known as $Ba_3Co_{2-x}Gd_xFe_{24}O_{41}$, and it was created using the energetic milling approach with substitution values of 0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.8, 0.1, and 1.2. X-ray diffraction (XRD) analyses and scanning electron microscopy (SEM) photos of $Ba_3Co_{1.6}Gd_{0.4}Fe_{24}O_{41}$ samples were obtained to investigate the phase formation temperature and the effect of particle size on the properties of this compound. A network vector analyzer was used to assess the real and imaginary components of the samples' electrical permittivity (ϵ') and magnetic permeability (μ') in order to evaluate their electromagnetic properties (VNA). Using these coefficients, reflection loss diagrams of the compounds were created in the frequency range of 1-18 GHz. By examining the samples in terms of maximum absorption intensity and bandwidth at the same time, the samples with Gd substitution with $x = 0.5$ in the frequency bands S and C_1 , the sample with $x = 0.3$ in the band C_2 , the sample with $x = 0.3$ in the X band, the sample with $x = 0.1$ in the X band, and the sample with $x = 1.2$ in the Ku band were chosen as the optimal samples (S: 1-2 GHz, C_1 : 2-4 GHz, C_2 : 4-8 GHz, X: 8-12 GHz, Ku: 12-18 GHz).

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Mohammad Jazirehpour, Ahmad Pourbafrani, Zenat Mirzaei, The Effect of Gd Cation Substitution on the Structural and Electromagnetic Properties of Z-Type Barium Hexaferrite, New Process in Material Engineering, 2022, 16(3), 71-79.

۱- مقدمه

یکی از حوزه‌هایی که در دهه‌های اخیر در کانون توجه محققان بوده است، مبحث مواد جاذب امواج الکترومغناطیسی است که در کنار جنبه‌های زیست محیطی و حفاظت ادوات الکترونیکی در برابر اختلالات، از حیث نظامی نیز حائز اهمیت است [۱-۳]. در همین رابطه زمانی که موج الکترومغناطیسی به ماده برخورد می‌کند، از طریق انواع مکانیزم‌های اتلافی درون ماده، شامل مکانیزم‌های دی‌الکتریکی و مغناطیسی، انرژی ورودی موج الکترومغناطیسی تضعیف می‌شود. برای ارزیابی چگونگی عملکرد یک ماده‌ی جاذب امواج الکترومغناطیسی در مواجهه با موج الکترومغناطیسی، پارامتری موسوم به اتلاف بازتابی (RL) تعریف می‌شود و این پارامتر در صورتی به وضعیت مطلوب می‌رسد که حداقل انعکاس و حداکثر اتلاف در مورد ماده رخ دهد. به منظور رسیدن به اتلاف بازتاب مطلوب در یک ماده جاذب، بایستی دو ویژگی وجود داشته باشد. نخستین ویژگی در این رابطه، بهبود تطابق امپدانس بین ماده و فضای آزاد است و این پارامتر در شرایطی بهبود می‌یابد که نسبت ضرایب مختلط نفوذپذیری مغناطیسی (μ_r) به گذردهی الکتریکی (ϵ_r) هر چه بیشتر به عدد یک میل کند. این در حالی است که در بیشتر مواد در محدوده‌ی فرکانسی ماکروویو، μ_r به طور قابل توجهی کوچک‌تر از ϵ_r است؛ بنابراین لازم است برای مقاصد کاربردی در زمینه‌ی جذب امواج الکترومغناطیسی، مواد به نحوی انتخاب و یا ویژگی‌های آن‌ها به گونه‌ای مهندسی شوند که ضریب μ_r آن‌ها با ϵ_r تناسب بیشتری داشته باشد. به عنوان دومین ویژگی، لازم است برای دستیابی به اتلاف بازتابی بهتر، قابلیت اتلافی ماده که بخش موهومی ضرایب μ_r و ϵ_r را می‌توان معیاری از آن در نظر گرفت تا حد ممکن بزرگ باشند [۳]. انواع فریت‌های مغناطیسی، دسته‌ی مهمی از مواد مورد توجه در زمینه‌ی جاذب‌های ماکروویو به حساب می‌آیند. در این میان نفوذپذیری مغناطیسی مختلط در فریت‌های اسپینلی در ناحیه‌ی فرکانسی گیگاهرتز به علت اثری موسوم به حد اسنوک کاهش می‌یابد و به همین دلیل این فریت‌ها در این ناحیه، جاذب‌های

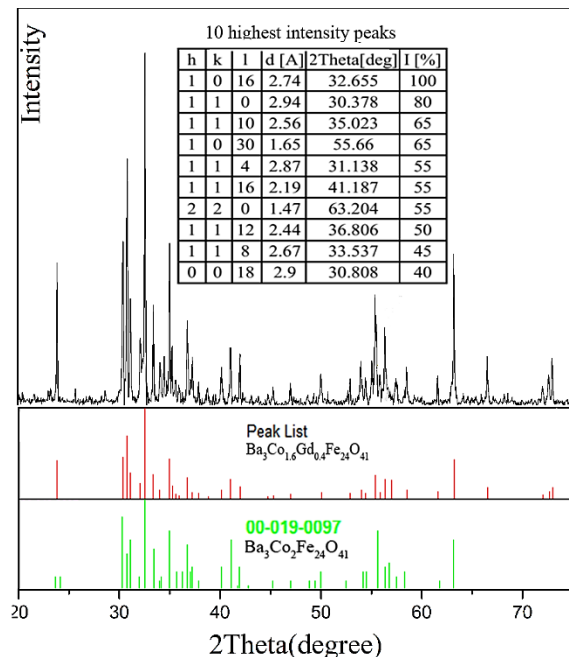
امواج مناسبی شناخته نمی‌شوند [۴]. هگزافریت‌های باریم یا استرانسیم به ویژه در حالت آلاییده، در مقایسه با فریت‌های اسپینلی و گارنت‌ها، به عنوان جاذب‌های مناسب‌تری در محدوده‌ی فرکانسی ماکروویو می‌توانند در نظر گرفته شوند. این هگزافریت‌ها به دلیل مغناطش اشباع بالا، پایداری شیمیایی عالی و ناهمسانگردی قابل تنظیم از طریق جانشانی یونی، دارای اهمیت بسیار بالایی هستند [۵-۱۰]. هگزافریت‌ها دارای انواع M، W، X، Y، Z و U می‌باشند که در این میان هگزافریت‌های نوع Z دارای نفوذپذیری مغناطیسی بالا، تشدید فرومغناطیسی بین ۳/۴-۱/۵ GHz، پایداری حرارتی بالا و دمای کوری بالاتر از 400°C هستند [۱۱-۱۵]. فریت‌های هگزائگونال بسیار به یکدیگر وابسته هستند و دارای ساختار بلوری بسیار پیچیده‌ای می‌باشند، ولی می‌توان تمام هگزافریت‌ها را از ترکیب سه نوع فریت S (اسپینل با ترکیب MeFe_2O_4)، فریت M ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) و فریت Y ($\text{Ba}_2\text{Me}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$) در نظر گرفت که Me در این رابطه کاتیونی نظیر کبالت است. در این حالت فریت با ساختار Z ($\text{Ba}_3\text{Me}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$) به صورت M+Y قابل توصیف خواهد بود. خواص دی‌الکتریکی و مغناطیسی هگزافریت‌ها شامل ضرایب μ_r ، ϵ_r ، وادارندگی مغناطیسی و مغناطش اشباع را می‌توان با جانشانی یون‌های دو و سه ظرفیتی در داخل ساختار آن‌ها کنترل کرد.

با توجه به گزارش‌های موجود در منابع مختلف، بیشتر پژوهش‌های انجام شده در ارتباط با هگزافریت‌های نوع Z به بررسی خواص الکترومغناطیسی آن‌ها در محدوده‌ی فرکانسی کمتر از ۱ GHz پرداخته‌اند [۱۱-۱۵]. لذا در این مقاله تغییرات قسمت‌های حقیقی و موهومی ضرایب نفوذپذیری مغناطیسی و گذردهی الکتریکی برحسب فرکانس، برای فریت نوع Z با ترکیب $\text{Ba}_3\text{Co}_{2-x}\text{Gd}_x\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ به ازای مقادیر مختلف جانشانی در محدوده‌ی فرکانسی ۱-۱۸ GHz بررسی خواهد شد. انتظار می‌رود که با انجام این جانشانی، خواص الکترومغناطیسی این نوع هگزافریت از قبیل نفوذپذیری مغناطیسی و گذردهی الکتریکی، دستخوش تغییراتی شده و در نتیجه، این گروه از

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خواص ساختاری

در شکل (۱) الگوی XRD مربوط به ذرات هگزافریت باریم نوع Z جانمایی شده با یون گادولونیوم (Gd) (به عنوان نمونه $Ba_3Co_{1.6}Gd_{0.4}Fe_{24}O_{41}$) نشان داده شده است. بر اساس مطالعات انجام شده، دمای تشکیل فاز در این هگزافریت، حدود $1270^\circ C$ است که با انتخاب این دما مشاهده شد که در الگوی حاصل، پیک‌های اصلی که دارای بیشترین شدت هستند، به الگوی مربوط به کارت استاندارد ترکیب $Ba_3Co_2Fe_{24}O_{41}$ با شماره "۰۰-۰۱۹-۰۰۹۷" یعنی هگزافریت باریم نوع Z پایه، مشابهت بالایی دارد که شکل گیری فاز هگزافریت باریم نوع Z را در این دما تأیید می‌کند.



شکل (۱): الگوی XRD مربوط به هگزافریت نوع Z با جانمایی کاتیون Gd مطابق فرمول $Ba_3Co_{1.6}Gd_{0.4}Fe_{24}O_{41}$ و مقایسه تغییرات ناشی از افزودن کاتیون Gd در مقایسه با ترکیب هگزافریت نوع Z مطابق اطلاعات کارت استاندارد "۰۰-۰۱۹-۰۰۹۷" مربوط به ترکیب $Ba_3Co_2Fe_{24}O_{41}$.

ترکیب‌ها به منظور کاربرد در فرکانس‌های ماکروویو مناسب‌تر شوند.

۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق، هگزافریت باریم نوع Z با ترکیب ساختاری به شکل $Ba_3Co_{2-x}Gd_xFe_{24}O_{41}$ و به ازای مقادیر مختلف عنصر جانمایی شده ی Gd، ($x=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1$) و با استفاده از روش آسیاب انرژی بالا توسط دستگاه SPEX 12000D سنتز شد. در این ترکیب جانمایی‌های دیگری از جمله $x=0.4$ نیز انجام شد که به دلیل عدم تغییر در نتایج آنالیز VNA مربوطه نسبت به سایر نمونه‌ها، از ذکر نتایج آن‌ها خودداری شد. مواد اولیه‌ی مورد استفاده برای سنتز این هگزافریت که همگی دارای خلوص آزمایشگاهی بالای ۹۹ درصد بوده‌اند، شامل Fe_2O_3 و Gd_2O_3 ، Co_2O_3 ، $BaCO_3$ هستند. در ابتدا این مواد اولیه به کمک ترازوی با دقت 0.0001 گرم با نسبت‌های استوکیومتری طراحی شده توزین شدند و سپس در محیط اتانول و به کمک گلوله‌های فولادی با قطر 10 mm با نسبت پودر به گلوله $1:10$ ، در داخل آسیاب انرژی بالا و در مدت زمان ۱ ساعت مخلوط شدند. در ادامه پس از خشک کردن دوغاب، کلوخه‌های حاصل به کمک هاون آسیاب شده و این پودر به مدت ۴ ساعت در کوره‌ی الکتریکی و در دمای $1270^\circ C$ کلسینه شد تا فاز مورد نظر به دست آید. سپس پودرهای فریت کلسینه شده با ۲۰ درصد وزنی پارافین ترکیب شده و به شکل رینگ با قطر داخلی 3 mm ، قطر خارجی 7 mm و ضخامت 2 mm در آمدند. خواص جذب ماکروویو نمونه‌های تهیه شده، توسط دستگاه تحلیل گر برداری شبکه (VNA) مدل Agilent/HP 8722ES اندازه گیری شد. همچنین ساختار فازی نمونه‌ها به وسیله‌ی دستگاه پراش اشعه X (XRD Philips X'Pert Pro) و مورفولوژی آن‌ها توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل Hitachi S-4800 تعیین شد.

کاتیون گادولونیوم ($x=0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1$) مورد بررسی قرار گرفت.

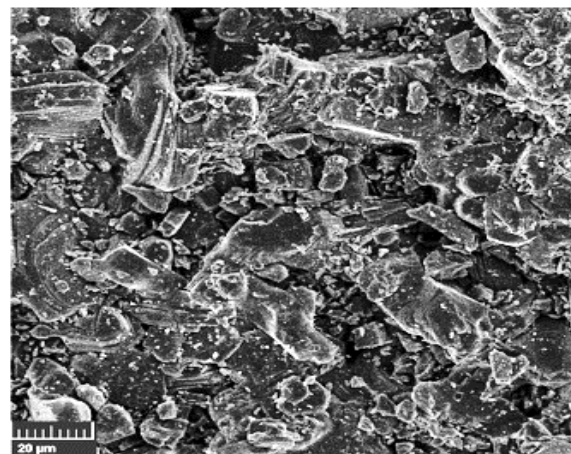
چنانچه در شکل (۳) مشاهده می‌شود با جانشانی کاتیون Gd در این ترکیب، مقدار گذردهی الکتریکی حقیقی (ϵ'') نسبت به حالت بدون جانشانی افزایش یافته است، به طوری که از مقدار متوسط 5.50 برای ترکیب بدون جانشانی، به 6.74 به ازای $x=0.1$ رسیده است. تغییرات منحنی گذردهی الکتریکی موهومی (ϵ'') روندی عکس داشته است، به طوری که با اعمال جانشانی کاتیون گادولونیوم در ترکیب مورد نظر، مقدار متوسط این کمیت از 0.24 برای ترکیب بدون جانشانی تا مقدار متوسط 0.07 به ازای $x=0.8$ کاهش پیدا کرده است. بر اساس منحنی‌های رسم شده در شکل (۳) قسمت (ب)، از ابتدای بازه‌ی فرکانسی تا فرکانس 12 GHz، مقدار ϵ'' در کلیه نمونه‌ها کاهش یافته است. در این بازه‌ی فرکانسی، گذردهی الکتریکی موهومی ترکیب بدون جانشانی از مقدار بیشینه‌ی 0.35 به 0.12 رسیده است. به همین ترتیب در همه‌ی نمونه‌ها در محدوده‌ی فرکانسی $16-14$ GHz یک قله قابل مشاهده است. در بین ترکیب‌های جانشانی شده، ترکیب $Ba_3Co_{1.7}Gd_{0.3}Fe_{24}O_{41}$ دارای بیشترین مقدار متوسط ϵ'' است و به مقدار ماکزیمم 0.28 در فرکانس 15 GHz می‌رسد.

به طور کلی خواص دی‌الکتریک فریت‌های بس‌بلور به علت قطبش سطح و قطبش دوقطبی الکتریکی ذاتی افزایش می‌یابد. مکانیسم قطبش دوقطبی الکتریکی ذاتی به دلیل انتقال الکترونی بین یون‌های Fe^{2+} و Fe^{3+} در جایگاه‌های هشت-وجهی شبکه‌ی بلوری می‌باشد. جانشانی کاتیون Gd^{3+} به جای Co^{2+} ، منجر به تغییر یون‌های Fe^{3+} به Fe^{2+} به منظور حفظ تعادل بار در شبکه می‌شود. با افزایش تعداد یون‌های Fe^{2+} ، احتمال افزایش نوسانات الکترونی افزایش می‌یابد که سبب افزایش کمیت گذردهی الکتریکی (ϵ'') در نمونه می‌شود [۱۱].

شکل (۳) قسمت‌های (ج) و (د)، منحنی‌های نفوذپذیری مغناطیسی حقیقی و موهومی برحسب فرکانس را نشان

بنابراین به منظور نمایش تأثیر جانشانی کاتیون Gd بر روی تغییرات پیک‌های الگوی پراش، در بخش پایینی الگوی پراش شکل (۱)، الگوی خطوط مشخصه پیک‌های ترکیب جانشانی شده و الگوی کارت استاندارد هگزافریت نوع Z پایه در کنار هم به عنوان مقایسه ارائه شده است.

شکل (۲) تصویر SEM ترکیب $Ba_3Co_{1.6}Gd_{0.4}Fe_{24}O_{41}$ که به مدت زمان ۴ ساعت و در دمای $1270^\circ C$ کلسینه شده است را نشان می‌دهد. در این نمونه، محدوده‌ی ابعاد ذرات در بازه‌ی $500-200$ nm قرار دارند. اندازه‌ی متوسط ذرات در این نمونه تقریباً 100 nm می‌باشد. به نظر می‌رسد عامل شکل‌گیری ذرات موجود در تصویر که از لحاظ ریخت‌شناسی فاقد یک نظم و شکل مشخص هستند، به دلیل استفاده از آسیاب پراورژی در فرآیند تولید نمونه‌ها باشد که علاوه بر این در بروز یک گستره‌ی وسیع ابعادی از ذرات نیز ممکن است مؤثر بوده باشد.



شکل (۲): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) هگزافریت باریم نوع Z با استوکیومتری $Ba_3Co_{1.6}Gd_{0.4}Fe_{24}O_{41}$.

۳-۲- خواص الکترومغناطیسی

مقادیر قسمت‌های حقیقی و موهومی گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی ترکیب هگزافریت نوع Z با فرمول $Ba_3Co_{2-x}Gd_xFe_{24}O_{41}$ ، به ازای مقادیر مختلف جانشانی

در نانو کامپوزیت‌های فریتی گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی تعیین‌کننده‌ی مشخصه‌های جذب این مواد هستند. در این تحقیق، اندازه‌گیری‌های مربوط به اتلاف بازتابی در محدوده‌ی فرکانسی ۱-۱۸ GHz بر اساس روش زیر انجام می‌شود. بر طبق نظریه‌ی عبور خطی، اتلاف بازتابی موج الکترومغناطیسی (RL(dB)، زمانی که موج فرودی به طور عمود بر سطح ماده‌ی تک لایه با پس‌زمینه‌ی فلزی فرود می‌آید، توسط رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۱۶]:

$$RL = -20 \log \frac{|Z_{in} - 1|}{|Z_{in} + 1|} \quad (2)$$

که در رابطه‌ی (۲)، Z_{in} امپدانس ورودی در محل تلاقی ماده و فضای آزاد بوده و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{\mu' - j\mu''}{\epsilon' - j\epsilon'' - j\sigma/(\omega\epsilon_0)}} \times \tanh \left[j \frac{2\pi}{c} \sqrt{(\mu' - j\mu'')(\epsilon' - j\epsilon'' - j\sigma/(\omega\epsilon_0))} fd \right] \quad (3)$$

در رابطه‌ی (۳)، ϵ' ، ϵ'' ، μ' ، μ'' به ترتیب قسمت‌های حقیقی و موهومی گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی، c سرعت موج الکترومغناطیسی در فضای آزاد، f فرکانس موج مایکروویو و d ضخامت ماده‌ی جاذب است [۱۹]. بنابراین اتلاف بازتابی سطحی از یک ماده‌ی جاذب، تابعی از شش پارامتر مشخصه‌ی ϵ' ، ϵ'' ، μ' ، μ'' ، f و d خواهد بود. بر طبق رابطه‌ی بالا زمانی که امپدانس ورودی ماده‌ی جاذب Z_{in} با مقدار امپدانس فضای آزاد Z_0 برابر شود، حالت تشدیدی صورت گرفته و بیشترین مقدار جذب در ماده نتیجه خواهد شد. در این حالت انرژی موج الکترومغناطیسی می‌تواند به طور کامل توسط ماده جذب شده و از طریق اتلاف‌های مغناطیسی و دی‌الکتریکی به گرما تبدیل شود. مقادیر ۱۰- و ۲۰ dB- در نمودار اتلاف بازتابی به ترتیب به معنی میزان جذب و اتلاف ۹۰ و ۹۹ درصد انرژی موج برخوردی است. در این تحقیق، بازه‌ی فرکانسی شامل مقادیر اتلاف بازتابی

می‌دهند. نفوذپذیری مغناطیسی حقیقی (μ') در این نمونه‌ها، با افزایش جانشانی Gd تا مقدار $x=0.5$ روند کاهشی داشته است. سپس در مقادیر جانشانی با مقادیر x برابر با ۰/۸ و ۱/۲ افزایش یافته است. کمیت μ' در نمونه‌ی با جانشانی Gd به مقدار $x=1.2$ ، بیشترین مقدار میانگین یعنی ۱/۱۶ را دارد. در شکل (۳) قسمت (د)، تغییرات ضرایب نفوذپذیری مغناطیسی موهومی (μ'') به ازای جانشانی‌های مختلف روندی منظم داشته است به طوری که با افزایش میزان جانشانی Gd در نمونه‌ها، قله منحنی μ'' مربوط به آن‌ها، به ویژه نمونه‌های با $x=0.8$ به سمت فرکانس‌های بالاتر انتقال یافته است و این قله‌ها مربوط به تشدید فرومغناطیسی در نمونه‌ها است [۱۶]. تشدید فرومغناطیسی به طور مستقیم با میدان ناهمسانگردی در ارتباط است که این رابطه به صورت زیر قابل بیان است [۱۷]:

$$f_R \propto \frac{1}{2\pi} \gamma (H_\theta H_\phi)^{1/2} \quad (1)$$

که در رابطه‌ی (۱)؛ γ نسبت ژیرومغناطیسی، H_θ میدان ناهمسانگردی خارج صفحه و H_ϕ میدان ناهمسانگردی درون صفحه است.

از آنجایی که فرکانس تشدید فرومغناطیسی با میدان ناهمسانگردی ارتباط مستقیم دارد، بنابراین محتمل است که افزایش جانشانی Gd در ساختار نمونه‌ها، باعث افزایش میدان ناهمسانگردی شده باشد و این امر سبب شده که تشدید فرومغناطیسی در فرکانس‌های بالاتر رخ دهد. دو مکانیسم در نفوذپذیری مغناطیسی مواد مغناطیسی نقش دارند که عبارت‌اند از؛ حرکت دیواره‌ی حوزه‌ها و چرخش بردار مغناطش آن‌ها. حرکت دیواره‌ی حوزه‌ها عموماً در محدوده‌ی فرکانسی مگاهرتز و چرخش بردار مغناطش در ناحیه‌ی فرکانسی گیگاهرتز مشاهده می‌شوند. در برخی از فریت‌های شش‌گوشی، چرخش بردار مغناطش به عنوان مکانیسم غالب مطرح می‌شود؛ زیرا ناهمسانگردی مغناطیسی صفحه‌ای قوی در آن‌ها، حرکت دیواره‌ی حوزه‌ها را مسدود خواهد کرد [۱۸].

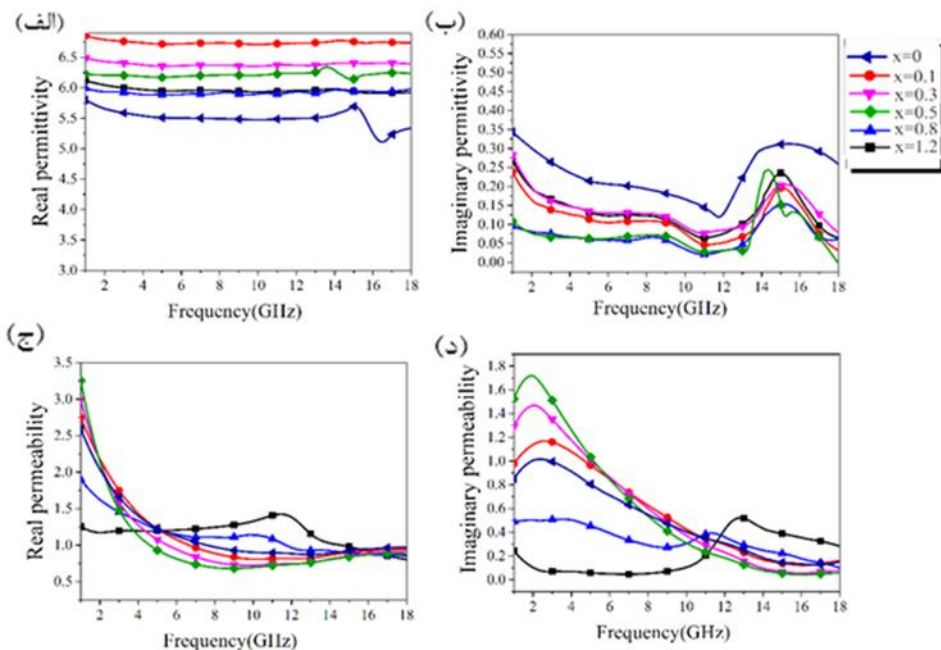
ترکیب و به ترتیب دارای مقادیر اتلاف بازتابی ۳۵ dB و -۱۰ dB است. باند فرکانسی C_2 نیز به ازای ترکیب با مقدار جانشانی $x=0$ و اتلاف $RL=-27$ dB است. مطابق جدول (۱) که مقادیر پهنای باند را در هر محدوده بیان می‌کند، مشاهده می‌شود که در باند فرکانسی S، بیشترین پهنای باند به دست آمده مربوط به ترکیب با مقدار جانشانی $x=0.5$ و به میزان ۵.۷ GHz، در باند C_1 ترکیب با جانشانی $x=0.5$ و به میزان ۶.۵ GHz، در باند C_2 مربوط به ترکیب با $x=0.5$ و به میزان ۷.۷ GHz، در باند X ترکیب با $x=0.3$ و به میزان ۷.۵ GHz و در نهایت باند Ku ترکیب با جانشانی $x=1.2$ و به میزان ۸.۲ GHz است.

با بررسی نمونه‌ها از لحاظ بیشترین میزان شدت جذب و پهنای باند به‌طور هم‌زمان؛ در باندهای S و C_1 نمونه‌ی با مقدار جانشانی $x=0.5$ ، در باند C_2 نمونه‌ی با $x=0.3$ ، در باند X نمونه‌ی با $x=0.1$ و در باند Ku نمونه‌ی با مقدار جانشانی $x=1.2$ به عنوان نمونه‌های بهینه انتخاب شده‌اند.

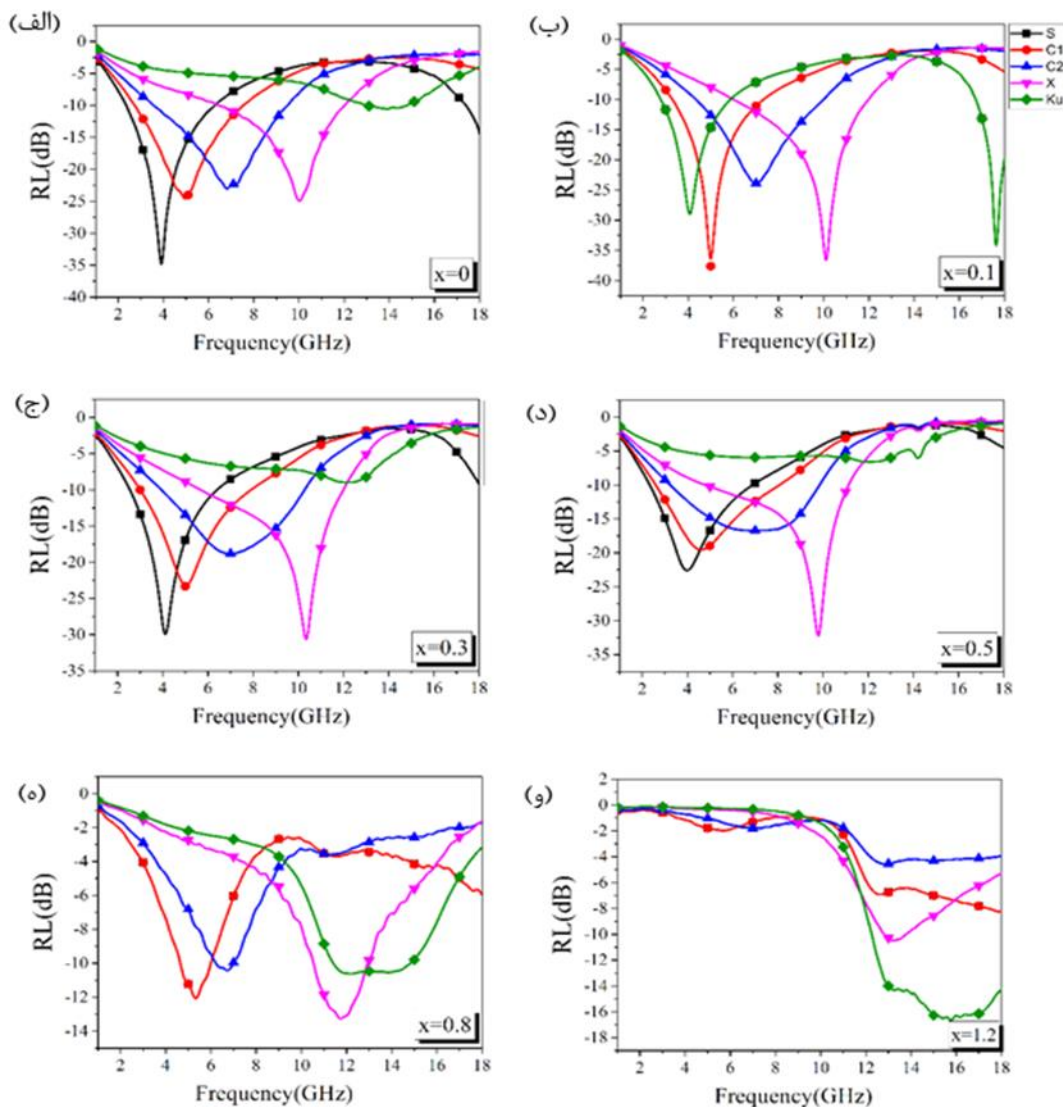
به‌عنوان پهنای باند در نظر گرفته شده است. ضخامت‌های بهینه با استفاده از یک کد کامپیوتری و به عنوان کمترین ضخامتی که بیشترین پهنای باند جذب و در عین حال بیشترین شدت جذب به ازای آن قابل محاسبه باشد در نظر گرفته شده است [۲۰].

در شکل‌های (۴ الف) تا (۴ و) منحنی‌های اتلاف بازتابی مربوط به ترکیب‌های مختلف $Ba_3Co_{2-x}Gd_xFe_{24}O_{41}$ به ازای $x=0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.8, 1.2$ رسم شده است. این منحنی‌ها به ازای ضخامت‌های بهینه‌ی ذکر شده در جدول (۱) و در باندهای فرکانسی مختلف (S: ۱-۲ GHz، C_1 : ۲-۴ GHz، C_2 : ۴-۸ GHz، X: ۸-۱۲ GHz و Ku: ۱۲-۱۸ GHz) رسم شده‌اند.

در باند فرکانسی S، بهترین میزان جذب از لحاظ شدت مربوط به ترکیب با جانشانی Gd به مقدار $x=0$ و به میزان اتلاف ۳۴ dB - RL ، در باند فرکانسی C_1 مربوط به ترکیب با $x=0.1$ و مقدار اتلاف $RL=-37$ dB، در باند فرکانسی X و Ku نیز برای همین



شکل (۳): منحنی‌های (الف) و (ب) قسمت‌های حقیقی و موهومی گذردهی الکتریکی و (ج) و (د) قسمت‌های حقیقی و موهومی نفوذپذیری مغناطیسی هگزا فریت باریم نوع Z با ترکیب $Ba_3Co_{2-x}Gd_xFe_{24}O_{41}$ به ازای مقادیر مختلف x.



شکل (۴): منحنی‌های تلفات انعکاسی ترکیب $Ba_3Co_{2-x}Gd_xFe_{24}O_{41}$ به ازای X های مختلف در باندهای فرکانسی ذکر شده و در ضخامت‌های بهینه.

جدول (۱): مقادیر ضخامت‌های بهینه و پهنای باند به ازای اتلاف بازتابی کمتر از ۱۰ dB - در باندهای فرکانسی مذکور به ازای مقادیر مختلف جانشانی عنصر

Gd در ترکیب $Ba_3Co_{2-x}Gd_xFe_{24}O_{41}$

مقدار جانشانی	باند S		باند C ₁		باند C ₂		باند X		باند Ku	
	پهنای باند (GHz)	ضخامت (mm)	پهنای باند (GHz)	ضخامت (mm)	پهنای باند (GHz)	ضخامت (mm)	پهنای باند (GHz)	ضخامت (mm)	پهنای باند (GHz)	ضخامت (mm)
x=۰	۴٫۵	۵	۴٫۸	۴٫۴	۵٫۷	۳٫۷	۶٫۱	۲٫۹	-	۲٫۱
x=۰٫۱	۴٫۲	۵	۵	۴٫۳	۶٫۸	۳٫۵	۷	۲٫۹	۴٫۲	۵
x=۰٫۳	۵	۵	۶	۴٫۴	۷٫۲	۳٫۷	۷٫۵	۳٫۱	-	۲٫۴
x=۰٫۵	۵٫۷	۵	۶٫۵	۴٫۶	۷٫۷	۴	۷٫۲	۳٫۴	-	۲٫۴
x=۰٫۸	۲٫۳	۵	۲٫۳	۵	۱٫۹	۴٫۱	۳٫۵	۲٫۶	۴٫۵	۲٫۲
x=۱٫۲	-	۵	-	۵	-	۴٫۱	۲	۲٫۴	۸٫۲	۱٫۹

همان طور که ملاحظه می شود ترکیب مورد بررسی در این مقاله، هم پهنای جذب خوبی در مقایسه با کارهای دیگران دارد و هم مقدار اتلاف بازتابی بالایی با ضخامت کم ماده‌ی جاذب به دست آمده است.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، ذرات هگزافریت باریم نوع Z به صورت ترکیب $Ba_3Co_{2-x}Gd_xFe_{24}O_{41}$ به ازای مقادیر مختلف $x=0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.8, 0.9$ سنتز شدند. با انتخاب دمای پهنه‌ی $1270^\circ C$ و بررسی الگوی XRD نمونه، مشخص شد که در این دما، فاز ساختاری مربوط به هگزافریت تشکیل شده است. تصویر SEM یکی از نمونه‌ها، ذراتی با توزیع اندازه‌ی $50-200$ nm را نشان می‌دهد. همچنین با بررسی منحنی‌های اتلاف بازتابی این نمونه‌ها و مقایسه‌ی میزان شدت جذب در باندهای فرکانسی مختلف، ترکیب با جاننشانی Gd به مقدار $x=0.1$ در باند فرکانسی C_1 و با dB $RL=-37$ ، بیشترین میزان شدت جذب را در بین همه‌ی این ترکیب‌ها داشته است.

۵- مراجع

[1] م. نصر اصفهانی، "تأثیر ابعاد ذرات بر روی خواص جذبی امواج رادار در کامپوزیت‌های نانو ساختار فریت نوع Z / پلیمر"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۷، شماره ۱، صفحه ۸۶-۸۱، ۱۳۹۲.

[2] ز. میرزایی، م. جزیره پور و ا. پوربافرانی، "بررسی خواص الکترومغناطیسی و جذب ماکروویو هگزافریت نوع Z با جاننشانی روی"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۱۴، شماره ۳، صفحه ۶۱-۷۰، ۱۳۹۹.

[3] Z. W. Li, M. J. Chua & Z. H. Yang, "Studies of static, high-frequency and electromagnetic attenuation properties for Y-type hexaferrites $Ba_2Cu_xZn_{2-x}Fe_{12}O_{22}$ and their composites". Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 382, pp. 134-141, 2015.

[4] Y. Bai, J. Zhou, Z. Gui & L. Li, "An investigation of the magnetic properties of Co_2Y hexaferrite". Materials Letters, vol. 57, no. 4, pp. 807-811, 2002.

در پایان این بخش، باید متذکر شد که تحقیقات گسترده‌ای برای کنترل خواص الکترومغناطیسی و بهبود خواص جذب ماکروویو در ترکیب هگزافریت نوع Z انجام شده است. با توجه به این گزارش‌ها، اکثر پژوهش‌های انجام شده به بررسی خواص هگزافریت‌های نوع Z به صورت قطعات بالک غیر کامپوزیتی و تنها در محدوده‌های فرکانسی کمتر از ۱ GHz پرداخته‌اند. در اینجا به منظور مقایسه به برخی از کارهای مشابه صورت گرفته بر روی این گروه از فریت‌ها می‌پردازیم.

پژوهش انجام شده بر روی جاننشانی یون Cr^{3+} به جای Fe^{3+} با مقادیر مختلف در ترکیب هگزافریت باریم نوع Z، نشان می‌دهد که جاننشانی یون Cr^{3+} به مقدار ۰/۶ به جای Fe^{3+} در ترکیب $Ba_3Co_2Cr_{2x}Fe_{24-2x}O_{41}$ در بهترین حالت از نظر مقدار اتلاف و پهنای جذب، اتلاف بازتابی dB $-35/2$ در فرکانس ۵/۳۴ GHz از خود نشان داده و پهنای جذب در اتلاف پایین تر از dB -10 در حدود ۳/۲۲ GHz است [۱۳]. در پژوهش دیگری، ترکیب $Ba_3Co_xZn_{2-x}Fe_{24}O_{41}$ با مقادیر مختلف یون Co^{2+} مورد بررسی قرار گرفته است. بهترین پهنای جذب به ازای مقادیر جاننشانی $x=0.7$ و $x=0.8$ به ترتیب حدود ۶/۲ GHz و ۸/۱ GHz است و بهترین مقدار جذب dB -18 می‌باشد [۱۶].

مطالعه‌ی دیگری که بر روی جاننشانی‌های مختلف در فریت نوع Z با ساختار $Ba_3Cu_2Al_{x/2}Cr_{x/2}Fe_{24-x}O_{41}$ انجام شده، نشان می‌دهد که به ازای جاننشانی $x=0.5$ در ترکیب، بیشترین اتلاف بازتابی به مقدار dB $-31/19$ در فرکانس ۱۱/۱۴ GHz حاصل می‌شود و در این حالت، بیشترین پهنای جذب نیز در حدود ۲/۲۲ GHz است [۲۱]. این نتایج به صورت خلاصه در جدول (۲) گزارش شده است.

جدول (۲): مقایسه ترکیبات با جاننشانی‌های مختلف با ترکیب مورد بررسی در این مقاله (f_0 فرکانس جذب، W_f پهنای جذب در اتلاف پایین تر از dB -10 و RL_{max} بیشترین اتلاف بازتابی است).

مرجع	ترکیب مورد بررسی	f_0	W_f	RL_{max}
[۲۱]	$Ba_3Co_2Cr_{2x}Fe_{24-2x}O_{41}$	۵/۳۴	۳/۲۲	-۳۵/۲
[۲۲]	$Ba_3Co_xZn_{2-x}Fe_{24}O_{41}$	۸/۲	۸/۰	-۱۸
[۲۳]	$Ba_3Cu_2Al_{x/2}Cr_{x/2}Fe_{24-x}O_{41}$	۱۱/۱۴	۲/۲۲	-۳۱/۱۹
همین مقاله	$Ba_3Co_{2-x}Gd_xFe_{24}O_{41}$	۱۶/۰	۸/۲	-۳۷

applications". *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 441, pp. 303-309, 2017.

[14] P. N. Dhruv, R. C. Pullar, C. Singh, F. E. Carvalho, R. B. Jotania, S. S. Meena & J. Singh, "Design and development of Ga-substituted Z-type hexaferrites for microwave absorber applications: Mössbauer, static and dynamic properties". *Ceramics International*, vol. 47, no. 1, pp. 1145-1162, 2021.

[15] P. N. Dhruv, S. S. Meena, R. C. Pullar, F. E. Carvalho, R. B. Jotania, P. Bhatt, C. L. Prajapat, J. P. B. Machado, T. C. Rao & C. B. Basak, "Investigation of structural, magnetic and dielectric properties of gallium substituted Z-type $Sr_3Co_{2-x}Ga_xFe_{24}O_{41}$ hexaferrites for microwave absorbers". *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 822, p. 153470, 2020.

[16] Z. W. Li, Y. P. Wu, G. Q. Lin & L. Chen, "Static and dynamic magnetic properties of CoZn substituted Z-type barium ferrite $Ba_3Co_xZn_{2-x}Fe_{24}O_{41}$ composites". *Journal of magnetism and magnetic materials*, vol. 310, no. 1, pp. 145–151, 2007.

[17] H. Zhang, J. Zhou, Y. Wang, L. Li, Z. Yue & Z. Gui, "The effect of Zn ion substitution on electromagnetic properties of low-temperature fired Z-type hexaferrite". *Ceramics international*, vol. 28, no. 8, pp. 917–923, 2002.

[18] Y. Bai, J. Zhou, Z. Gui & L. Li, "Frequency dispersion of complex permeability of Y-type hexagonal ferrites". *Materials Letters*, vol. 58, no. 10, pp. 1602–1606, 2004.

[19] J. Huo, L. Wang & H. Yu, "Polymeric nanocomposites for electromagnetic wave absorption". *Journal of materials science*, vol. 44, no. 15, pp. 3917–3927, 2009.

[20] M. Jazirehpour & S. A. Seyyed Ebrahimi, "Carbothermally synthesized core-shell carbon-magnetite porous nanorods for high-performance electromagnetic wave absorption and the effect of the heterointerface". *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 639, pp. 280-288, 2015.

[21] D. Basandrai, R. K. Bedi, A. Dhami, J. Sharma, S. B. Narang, K. Pubby, A. Gupta & A. K. Srivastava, "Aluminum and chromium substituted Z-type hexaferrites for antenna and microwave absorber applications". *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, vol. 85(1), pp.59-65, 2018.

[5] G. Mu, N. Chen, X. Pan, H. Shen & M. Gu, "Preparation and microwave absorption properties of barium ferrite nanorods". *Materials Letters*, vol. 62, no. 6–7, pp. 840–842, 2008.

[6] A. Manhas & M. Singh, "Remarkable room temperature magnetic behaviour of ferroplana Sr-Cu-Zn doped Z-type hexaferrites". *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 503, p.166640, 2020.

[7] X. Huo, H. Su, Y. Wang, Y. Li & X. Tang, "Effects of Zn substitution on high-frequency properties of $Ba_{1.5}Sr_{1.5}Co_{2-x}Zn_xFe_{24}O_{41}$ hexaferrites". *Ceramics International*, vol. 47, no. 12, pp.17120-17127, 2021.

[8] M. Kumar Manglam & M. Kar, "Effect of Gd doping on magnetic and MCE properties of M-type barium hexaferrite". *Journal of Alloys and Compounds*, p. 163367, 2021.

[9] S. Kolev, P. Peneva, K. Krezhov, T. Malakova, C. Ghelev, T. Koutzarova, D. Kovacheva, B. Vertruyen, R. Closset, L. Maria Tran & A. Zaleski, "Structural, Magnetic and Microwave Characterization of Polycrystalline Z-Type $Sr_3Co_2Fe_{24}O_{41}$ Hexaferrite". *Materials*, vol. 13, no. 10, p. 2355, 2020.

[10] K. Singha, R. Jasrotia, V. P. Singh, M. Chandel, R. Kumar & S. Kalia, "A study of magnetic properties of Y-Ni-Mn substituted Co_2Z -type nanohexaferrites via vibrating sample magnetometry". *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, vol. 97, no. 2, pp. 373-381, 2021.

[11] J. Xu, G. Ji, H. Zou, Y. Zhou & S. Gan, "Structural, dielectric and magnetic properties of Nd-doped Co_2Z -type hexaferrites". *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 509, no. 11, pp. 4290–4294, 2011.

[12] R. Joshi, C. Singh, J. Singh, D. Kaur & S.B. Narang, "A study of microwave absorbing properties in Co-Gd doped M-type Ba-Sr hexaferrites prepared using ceramic method". *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 28, no. 16, pp. 11969-11978, 2017.

[13] S. B. S. Magham, M. Sharma, S. R. Shannigrabi, Hui Ru Tan, V. Sharma, Yu Song Meng, S. Idapalpati, R. V. Ramanujan & D. V. M. Repaka, "Development of Z-type hexaferrites for high frequency EMI shielding