

بررسی خواص الکترومغناطیسی و جذب مایکروویو هگزافریت نوع Z با جانشانی روی

زینت میرزایی^۱، محمد جزیره پور^{۲*}، احمد پورباقرانی^۳

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

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

۳- پژوهشگر، دانشکده الکتروسرام و مهندسی برق، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران.

*عهده دار مکاتبات: Jazirehpour@mut-es.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۳۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۲۱)

چکیده: در این پژوهش اثر جانشانی مقادیر مختلفی از کاتیون روی (Zn) بر خواص الکترومغناطیسی و جذب مایکروویو هگزافریت باریم نوع Z با ترکیب شیمیایی $Ba_3Co_{2-x}Zn_xFe_{24}O_{41}$ ($x=1, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$) تولید شده به روش آسیاب کاری پراثری مورد مطالعه قرار گرفت. جهت بررسی و تایید تشکیل فاز هگزافریت باریم نوع Z در شرایط سنتز به کار رفته از روش پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده شد. خواص مغناطش مجموعه ترکیبات تولید شده توسط مغناطیس سنج گرادیان نیروی متناوب (AGFM) مطالعه گردید و مشاهده شد که با اعمال جانشانی در ترکیب مورد نظر مقدار مغناطش بیشینه افزایش می یابد، به طوری که از مقدار 67 emu/g برای نمونه بدون جانشانی به 84 emu/g برای ترکیب $Ba_3Co_{0.8}Zn_{1.2}Fe_{24}O_{41}$ در بیشترین مقدار خود می رسد. همچنین ضرایب گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی مختلط نمونه ها، توسط تحلیل گر برداری شبکه (VNA) مورد مطالعه قرار گرفت. با استفاده از ضرایب اندازه گیری شده، نمودارهای تلفات انعکاسی ترسیم شد. نتایج حاصل از نمودارهای تلفات انعکاسی (RL) نشان داد که به طور میانگین بیشترین پهنای باند جذب در بین نمونه ها در محدوده فرکانسی $4-8 \text{ GHz}$ رخ داده است. بهترین کیفیت جذب (منفی ترین تلفات انعکاسی) به میزان -47 dB و در فرکانس 7 GHz برای نمونه ی با شاخص جانشانی $x=1/3$ مشاهده گردید.

واژه های کلیدی: آسیاب کاری، جذب مایکروویو، گذردهی الکتریکی، نفوذپذیری مغناطیسی، هگزافریت نوع Z.

۱- مقدمه

به عنوان یون دو ظرفیتی (Me) استفاده شود این هگزافریت نسبت به فریت های خانواده اسپینل نفوذپذیری مغناطیسی بالاتری در محدوده فرکانسی گیگاهرتز خواهد شد. لذا این هگزافریت ها به منظور جاذب امواج الکترومغناطیسی با پهنای باند گسترده در این محدوده فرکانسی قابل استفاده هستند [۴]. هگزافریت های نوع Z دارای نفوذپذیری مغناطیسی بالا، رزونانس فرومغناطیسی بین $3/4-1/5 \text{ GHz}$ ، پایداری حرارتی بالا و دمای کوری بالاتر از 400°C هستند. خواص الکترومغناطیسی فریت ها، از جمله مغناطش اشباع، مقاومت، گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی را با

امروزه با گسترش کاربرد امواج الکترومغناطیسی به ویژه امواج مایکروویو مسئله تداخل امواج الکترومغناطیسی و آلودگی های الکترومغناطیسی باعث به وجود آمدن مشکلاتی برای بشر شده است. لذا تحقیقات بر روی مواد سد کننده و جاذب های امواج الکترومغناطیسی همواره رو به گسترش بوده است [۱-۳]. هگزافریت نوع Z با ساختار هگزاگونال و ترکیب شیمیایی $Ba_3Me_2Fe_{24}O_{41}$ یکی از مواد دارای قابلیت جذب امواج مایکروویو به حساب می آید (Me یک یون دو ظرفیتی می تواند باشد). اگر در ساختار فوق از یون کبالت

الکتریکی برای ترکیب $Ba_3Co_{2-x}Zn_xFe_{24}O_{41}$ به ازای مقادیر مختلف جانشانی در محدوده‌ی فرکانسی ۱-۱۸ GHz و در قالب نمونه‌های کامپوزیتی زمینه پارافین بررسی خواهد شد. انتظار می‌رود با انجام این جانشانی خواص مغناطش و خواص الکترومغناطیسی این هگزارفیت شامل نفوذپذیری مغناطیسی و گذردهی الکتریکی به نحوی تنظیم شود که شرایط این ترکیبات را برای کاربری جذب در فرکانس‌های مایکروویو مناسب‌تر نماید.

۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق، فرآوری و مخلوط سازی مواد اولیه تولید هگزارفیت نوع Z با ترکیب $Ba_3Co_{2-x}Zn_xFe_{24}O_{41}$ به ازای مقادیر ۵، ۴/۲، ۳/۱، ۲/۱، ۱/۰، ۱، x= با استفاده از دستگاه آسیاب انرژی بالا (SPEX 12000D) انجام شد. مواد اولیه‌ی مورد استفاده شامل $BaCO_3$ ، Co_2O_3 ، ZnO و Fe_2O_3 همگی دارای خلوص آزمایشگاهی و محصول شرکت مرک آلمان بوده‌اند. این مواد مطابق فرمول شیمیایی فوق‌الذکر به ازای مقادیر مختلف x توزین شدند و سپس تحت اتانول و به کمک گلوله‌های ۱ سانتی متری با نسبت پودر به گلوله ۱:۱۰، در داخل آسیاب انرژی بالا به مدت ۱ ساعت مخلوط شدند. بعد از این مرحله پس از خشک‌سازی دوغاب حاصل از آسیاب کاری (حذف اتانول)، پودر حاصل به مدت ۴ ساعت در کوره در دمای $1270^\circ C$ کلسینه شد تا فاز مورد نظر یعنی هگزارفیت نوع Z به دست آید. پودرهای فریت کلسینه شده با ۲۰ درصد وزنی پارافین ترکیب شده و سپس به شکل توروئید با قطر داخلی ۳ mm، قطر خارجی ۷ mm و ضخامت ۲ mm درآمدند. خواص جذب مایکروویو نمونه‌های تهیه شده توسط دستگاه تحلیل گر برداری شبکه (VNA Agilent/HP 8722ES) اندازه گیری شد. همچنین ساختار فازی نمونه‌ها به وسیله‌ی دستگاه پراش سنج اشعه ایکس (XRD Philips X' Pert Pro) و مورفولوژی آن‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (Hitachi S-4800 FESEM) بررسی شد.

جانشانی یون‌های دو ظرفیتی و سه ظرفیتی می‌توان کنترل کرد [۵]. نفوذپذیری مغناطیسی فریت‌ها نه تنها به ترکیب شیمیایی بلکه به ریزساختار آن‌ها از قبیل اندازه‌ی دانه، تخلخل و منافذ بین و درون دانه‌ای بستگی دارد [۶].

تحقیقات گسترده‌ای برای کنترل خواص الکترومغناطیسی هگزارفیت‌های نوع Z به منظور بهبود خواص جذب مایکروویو آن‌ها انجام شده است. بر این اساس گزارش شده است که جانشانی La در هگزارفیت نوع Z باعث افزایش نفوذپذیری مغناطیسی و در نتیجه افزایش تلفات در محدوده‌ی فرکانسی ۱۸-۲ GHz شده است. همچنین از تأثیرات این جانشانی می‌توان به افزایش مغناطش اشباع تا مقدار emu/g ۴۸/۶۸ و کاهش نیروی وادارندگی تا مقدار Oe ۴۱/۰۵ اشاره کرد [۷].

جانشانی یون Ti به جای Fe در ترکیب هگزارفیت نیز بررسی شده است و نتایج نشان می‌دهند این ترکیب که دارای ناهمسانگردی صفحه‌ی C می‌باشد، با این جانشانی میدان ناهمسانگردی μ_{0H}^{\max} در آن افزایش می‌یابد [۸]. در پژوهشی دیگر که توسط ژانگ و همکارانش انجام شده، با جانشانی Zn در ترکیبی به صورت $Ba_3Co_{2(10.8-x)}Zn_{2x}Cu_{0.4}Fe_{24}O_{41}$ مقدار نفوذپذیری مغناطیسی افزایش و دمای پخت کاهش پیدا کرده است [۹]. به علاوه انجام جانشانی یون Dy به جای Fe در ساختار این هگزارفیت و بررسی خواص آن در محدوده‌ی ۱ MHz تا ۱ GHz نشان داده است که با افزایش میزان جانشانی، در ابتدا نفوذپذیری افزایش و سپس با افزایش بیشتر میزان جانشانی، کاهش می‌یابد [۱۰].

با وجود گزارشات متعدد در رابطه با بررسی خواص الکترومغناطیسی هگزارفیت‌های نوع Z با توجه به یافته‌های نگارندگان این مقاله، اکثر پژوهش‌های انجام شده به بررسی خواص الکترومغناطیسی هگزارفیت‌های نوع Z به صورت قطعات بالک غیر کامپوزیتی و تنها در محدوده‌های فرکانسی کمتر از یک گیگاهرتز پرداخته‌اند [۱۱-۱۵]. به طور مشخص ضرایب الکترومغناطیسی هگزارفیت‌های نوع Z به ندرت در بازه فرکانسی مایکروویو مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله تغییرات ضرایب نفوذپذیری مغناطیسی و گذردهی

۳- نتایج و بحث

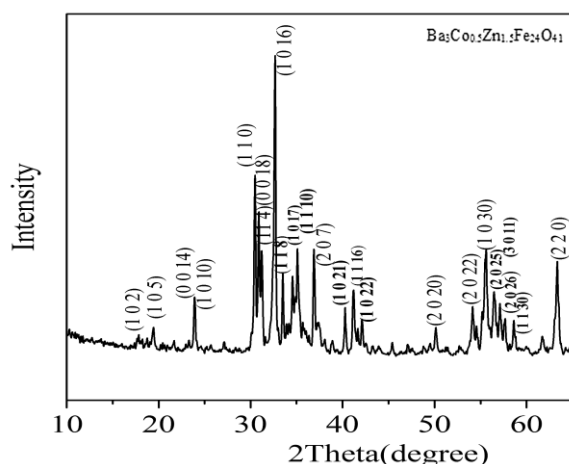
شکل (۱) الگوی XRD مربوط به پودرهای هگزافریت باریم نوع Z دارای جانشانی Zn را (به عنوان یک بررسی موردی، ترکیب با فرمول شیمیایی $Ba_3Co_{0.5}Zn_{1.5}Fe_{24}O_{41}$) نشان می دهد که در دمای $1270^\circ C$ کلسینه شده است. الگوی مربوط به نمونه‌ی مورد بررسی با کارت استاندارد "00-019-0097" مطابقت دارد و تشکیل فاز هگزافریت نوع Z را به خوبی تایید می کند.

ساختار بلوری هگزافریت‌ها شامل جایگاه‌های شبکه‌ای چهار، پنج و هشت وجهی می باشد. خواص مغناطیسی از جمله دمای کوری، مغناطش اشباع و ناهمسانگردی مغناطیسی به شدت تحت تأثیر توزیع یون‌های فلزی در جایگاه‌های شبکه‌ای است [۱۶]. در جدول (۱) نوع جایگاه، بلوک، تعداد یون در هر مولکول و جهت گیری‌های اسپینی موجود در فریت باریم نوع Z بیان شده است.

جدول (۱): نوع جایگاه، بلوک، تعداد یون در هر مولکول و

جهت گیری‌های اسپینی در فریت باریم نوع Z [۱۴].

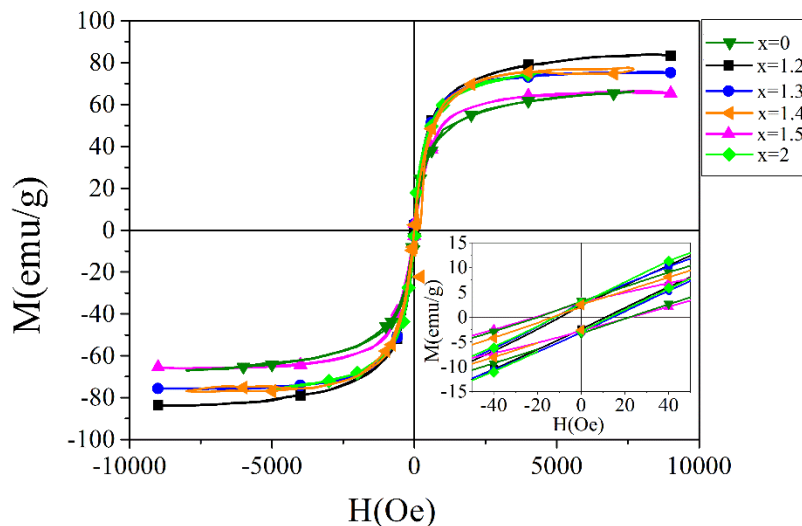
زیر شبکه	نوع جایگاه	تعداد یون در مولکول	اسپین	بلوک
12k _{VI}	هشت وجهی	۶	بالا	R-S
2d _V	پنج وجهی	۱	بالا	R
4f _{VI}	هشت وجهی	۲	پایین	R
4e _{VI}	هشت وجهی	۲	پایین	T
4e _{IV}	چهار وجهی	۲	پایین	S
4f _{IV}	چهار وجهی	۲	پایین	S
4f [*] _{IV}	چهار وجهی	۲	پایین	T
4f [*] _{VI}	هشت وجهی	۲	بالا	S
12k [*] _{VI}	هشت وجهی	۶	بالا	T-S
2a _{VI}	هشت وجهی	۱	بالا	T



شکل (۱): الگوی XRD مربوط به هگزافریت نوع Z با جانشانی روی.

با توجه به گزارشاتی در منابع [۱۶-۱۷] که ساختار هگزافریت نوع Z را با استفاده از روش طیف سنجی موزبائر مورد مطالعه قرار داده اند می توان به این جمع بندی رسید که یون های Zn عمدتاً قرار گیری در جایگاه های چهار وجهی $4f_{IV}$ و $4f_{IV}^*$ و جایگاه هشت وجهی $4f_{VI}$ را ترجیح می دهند [۱۶-۱۷]. از آنجا که جایگاه های مورد اشاره همگی دارای اسپین پایین هستند، سهم اسپین های پایین در مغناطش کل کاهش می یابد و این امر باعث افزایش مغناطش خالص می شود؛ در حالی که یون Co در چنین ترکیبی تمایل به اشغال جایگاه $12k_{VI}$ در

ویژگی های مغناطیسی سری ترکیبات $Ba_3Co_{2-x}Zn_xFe_{24}O_{41}$ با استفاده از دستگاه مغناطیس سنج با گرادیان نیروی متغیر (AGFM) اندازه گیری شد. منحنی های پسماند نمونه ها در حالت پودری و در یک میدان بیشینه $9000 Oe$ مورد بررسی قرار گرفت. در شکل (۲) مشاهده می گردد با اعمال جانشانی در ترکیب مورد نظر مقدار مغناطش بیشینه افزایش می یابد. به طوری که از مقدار $67 emu/g$ برای نمونه ی بدون جانشانی به $84 emu/g$ برای ترکیب با شاخص جانشانی $x=1/2$ در بیشترین مقدار خود می رسد.



شکل (۲): حلقه پسماند همگرافیت نوع Z با ترکیب $Ba_3Co_{2-x}Zn_xFe_{24}O_{41}$ به ازای مقادیر مختلف جانشانی

xهای مختلف نشان می‌دهد و مشاهده می‌شود که با انجام جانشانی میزان H_c در نمونه‌های حاوی جانشانی Zn نسبت به نمونه‌ی بدون جانشانی ($x=0$) کاهش یافته است. H_c از طرفی به اندازه ذرات و از طرف دیگر به ناهمسانگردی مغناطوبلوری و مغناطش اشباع وابسته است. رابطه‌ی زیر چگونگی این ارتباط را نشان می‌دهد [۱۹]:

$$H_c = 0.48 \left[\frac{K_1}{M_s} - N_d M_s \right] \quad (1)$$

در این رابطه K_1 ثابت ناهمسانگردی مغناطوبلوری، M_s مغناطش اشباع و N_d عامل و امغناطش (پارامتری مربوط به مورفولوژی و ابعاد ذرات) است. با توجه به فرآیند یکسان به کار رفته در تولید نمونه‌ها و بررسی‌هایی که توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام گرفت می‌توان اذعان کرد که در این نمونه‌ها تفاوت چندانی در اندازه ذرات (ابعاد متوسط ذرات در کلیه نمونه‌ها بین ۱۰ تا ۲۰ میکرون بوده است) وجود ندارد و لذا عامل کاهش نیروی وادارندگی تغییرات ابعادی ذرات نیست. بلکه به نظر می‌رسد برآیند تغییرات ثابت ناهمسانگردی تحت تأثیر تغییرات ابعادی تحمیل شده به یاخته واحد شبکه بلوری فریت در اثر ورود اتم‌های Zn به ساختار و نیز تغییرات مغناطش خالص فریت مذکور تحت تأثیر تغییر مکان‌های مرجح جایگیری اتم‌های Zn با تغییرات درصد جانشانی در این رابطه مؤثر است.

بلوک R-S با اسپین بالا و همچنین جایگاه $4f_{VI}$ در بلوک R و جایگاه هشت وجهی $4e_{VI}$ در بلوک T با اسپین پایین را دارد که باعث افزایش سهم اسپین‌های بالا و در نتیجه افزایش مغناطش خالص می‌شود [۱۶]. به همین دلیل این انتظار می‌رود که با جانشانی یون Zn در این ساختار، مغناطش اشباع نسبت به حالت بدون جانشانی افزایش یابد. چنانچه در شکل ۲ قابل مشاهده است، با افزایش میزان x مقادیر مغناطش بیشینه به طور منظم تغییر نکرده است. اشغال جایگاه‌های شبکه به روش سنتز مواد و همچنین مقدار جانشانی یون‌ها بستگی دارد [۱۸]. جایگاه‌های مرجح برای کاتیون روی پیش‌تر ذکر شد ولی اگر شرایط سنتز به گونه‌ای مناسب باشد که عمده‌ی یون‌های جانشانی بتوانند به درون شبکه وارد شوند با افزایش درصد جانشانی و اشباع شدن جایگاه‌های ترجیحی اولیه کاتیون‌های روی ممکن بی‌جایگاه‌هایی با اولویت ترجیح کمتر نیز وارد شوند. لذا جایگیری کاتیون‌های روی به ازای جانشانی‌های مختلف در جایگاه‌های متفاوت ممکن است سبب تغییرات نامنظم در مغناطش بیشینه شده باشد. تعیین چگونگی اشغال جایگاه‌های شبکه و انجام بحث مفصل و دقیق در این رابطه مستلزم مطالعات طیف‌سنجی موزبائر است که در پژوهش حاضر به آن پرداخته نمی‌شود.

جدول ۲ مقادیر مغناطش بیشینه (M_{9000Oe}) و نیروی وادارندگی (H_c) ترکیب $Ba_3Co_{2-x}Zn_xFe_{24}O_{41}$ را به ازای

جدول (۲): مقادیر مغناطش بیشینه و نیروی وادارندگی ترکیب

شاخص جانشانی	M _{90000e} (emu/g)	H _c (Oe)
x=0	۶۶/۸۸	۲۳/۰۰
x=۱/۲	۸۴/۴۰	۱۱/۵۰
x=۱/۳	۷۵/۸۶	۱۵/۰۰
x=۱/۴	۷۷/۶۵	۱۳/۰۰
x=۱/۵	۶۶/۷۲	۲۲/۰۰
x=۲	۷۷/۱۲	۱۳/۵۰

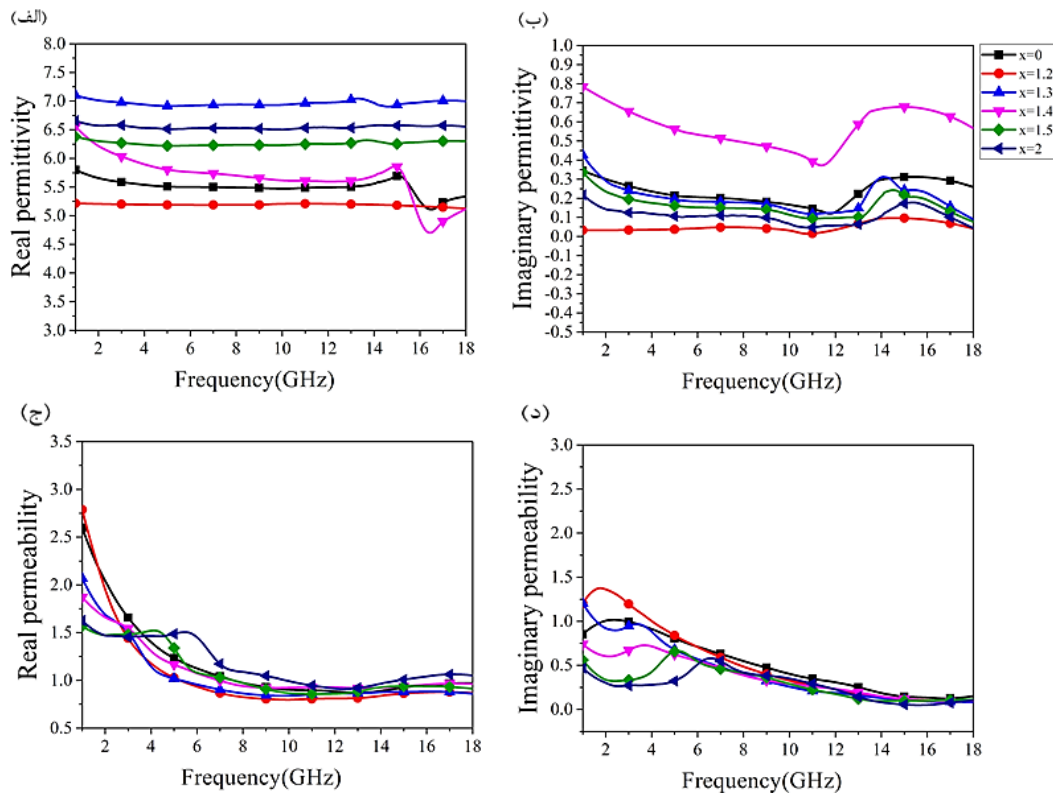
لذا با توجه به اینکه فرکانس قله‌های مذکور با تغییر ترکیب شیمیایی نمونه‌ها جابه‌جا شده است، به نظر می‌رسد منشأ قله‌های مورد بحث پدیده رزونانس فرومغناطیسی است [۵]. رزونانس فرومغناطیسی به طور مستقیم با میدان ناهمسانگردی در ارتباط است که این رابطه به صورت زیر قابل بیان است [۹]:

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

که در این رابطه γ نسبت ژیرومغناطیسی، H_θ میدان ناهمسانگردی خارج صفحه و H_ϕ میدان ناهمسانگردی درون صفحه است. بنابراین بر طبق رابطه (۱) و با توجه به منحنی نفوذپذیری مغناطیسی موهومی، می‌توان نتیجه گرفت افزایش میزان جانشانی می‌تواند باعث افزایش میدان ناهمسانگردی شود، به تبع آن فرکانس رزونانس فرومغناطیسی افزایش می‌یابد.

به‌طور کلی فریت‌های هگزآگونال دارای دو نوع ناهمسانگردی هستند. ناهمسانگردی محور C و ناهمسانگردی صفحه‌ای C، که به ترتیب با مغناطش آسان در طول محور C و صفحه‌ای C در ارتباط هستند. بر اساس گزارشات موجود در منابع، در طیف نفوذپذیری برخی ترکیبات مغناطیسی دو قله قابل مشاهده است که قله مشاهده شده در فرکانس پایین-تر به رزونانس دیواره‌ی حوزة دیگری به رزونانس فرومغناطیسی ارتباط داده شده است [۵ و ۷]، که بر اساس گزارشات، پدیده‌ی رزونانس دیواره حوزة غالباً تنها در فرکانس‌های رادیویی قابل مشاهده است [۱۷]، به این ترتیب به نظر می‌رسد در طیف نفوذپذیری مغناطیسی موهومی نمونه‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر، تنها قله قابل مشاهده در هر یک از طیف‌های نفوذپذیری مغناطیسی موهومی را می‌توان به پدیده‌ی رزونانس فرومغناطیسی مرتبط دانست.

نفوذپذیری مغناطیسی و گذردهی الکتریکی حقیقی و موهومی نمونه‌ها به ازای مقادیر مختلف جانشانی در ترکیب $Ba_3Co_{2-x}Zn_xFe_{24}O_{41}$ در محدوده‌ی فرکانسی GHz ۱۸-۱ اندازه‌گیری گردید (شکل ۴). بر اساس منحنی‌های رسم شده (شکل ۴- الف و ب)، منحنی تغییرات گذردهی الکتریکی حقیقی و موهومی برحسب فرکانس با تغییر میزان جانشانی تغییرات چشمگیری ندارد و به ترتیب به ازای مقادیر مختلف جانشانی دارای مقادیر گذردهی الکتریکی حقیقی ۶/۵ تا ۷/۲ و گذردهی الکتریکی موهومی ۰/۱ تا ۰/۲ است. شکل (۴- ج و د) منحنی‌های مربوط به نفوذپذیری مغناطیسی حقیقی و موهومی نمونه‌ها در بازه‌ی فرکانسی GHz ۱۸-۱ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشهود است در بازه‌ی فرکانسی GHz ۴-۱ مقدار نفوذپذیری مغناطیسی حقیقی مربوط به ترکیب جانشانی شده به ازای $x=۱/۲$ نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر است در حالی که از فرکانس GHz ۱۸-۲/۴ نمونه‌ی با شاخص جانشانی $x=۲$ میزان نفوذپذیری مغناطیسی حقیقی بیشتری دارد و دارای مقدار میانگین ۰/۵۱ است. با توجه به منحنی‌های نفوذپذیری مغناطیسی موهومی (شکل ۴- د) قابل مشاهده است که با افزایش میزان جانشانی، قله منحنی‌های مورد اشاره به سمت فرکانس‌های بالاتر انتقال یافته است.



شکل (۳): (الف و ب) گذردهی الکتریکی حقیقی و موهومی، (ج و د) نفوذپذیری مغناطیسی حقیقی و موهومی ترکیب $Ba_3Co_{2-x}Zn_xFe_{24}O_{41}$ به ازای مقادیر مختلف جانشانی.

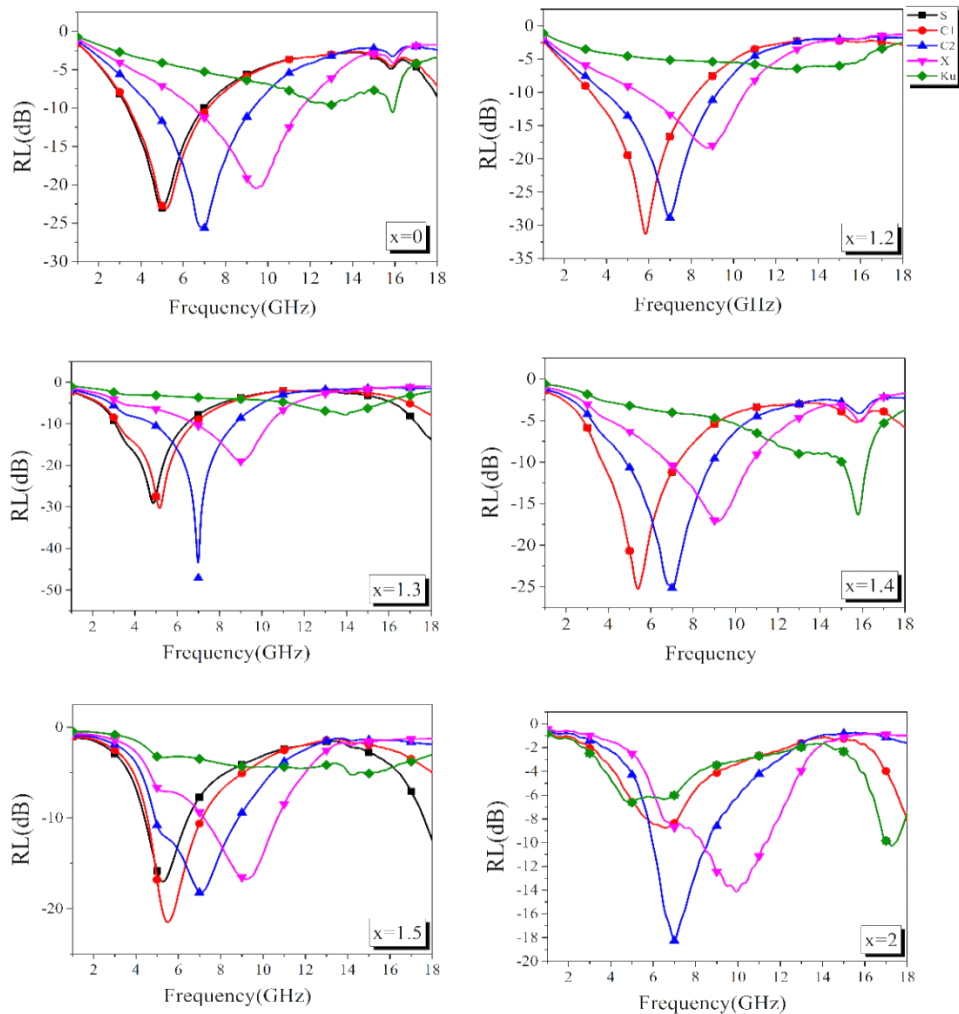
باند در نظر گرفته شده است. شکل (۴-۷) منحنی‌های تلفات انعکاسی بهینه ترکیب $Ba_3Co_{2-x}Zn_xFe_{24}O_{41}$ به ازای x های مختلف را در باندهای فرکانسی $S: 1-2\text{ GHz}$ ، $C: 4-8\text{ GHz}$ ، $X: 8-12\text{ GHz}$ ، $Ku: 12-18\text{ GHz}$ نشان می‌دهند. در این منحنی‌ها با تغییر ضخامت لایه‌ی جاذب و انتخاب ضخامت بهینه به منظور جذب بیشتر در هر کدام از باندهای فرکانسی موردنظر، منحنی تلفات انعکاسی بهینه رسم شده است. در جدول (۳) مقادیر ضخامت‌های بهینه ارائه شده است. منظور از ضخامت بهینه کمترین ضخامت است که به ازای آن بیشترین پهنای باند جذب بر مبنای تلفات انعکاسی کمتر از 10 dB و حداکثر ضخامت لایه جاذب 5 میلی‌متر در یک بازه‌ی فرکانسی مشخص حاصل می‌شود که در اینجا توسط کدنویسی در نرم‌افزار Matlab محاسبه شده است.

بر اساس نظریه‌ی خط گذار، از منحنی‌های تلفات انعکاسی (RL) به عنوان معیاری از خواص جذب مایکروویو برحسب فرکانس استفاده می‌شود که فرمول مربوطه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$R_L = -20 \log \frac{|Z_{in} - 1|}{|Z_{in} + 1|} \quad (3)$$

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{\mu' - j\mu''}{\epsilon' - j\epsilon'' - j\sigma/(\omega\epsilon_0)}} \times \tanh \left[j \frac{2\pi}{c} \sqrt{(\mu' - j\mu'')(\epsilon' - j\epsilon'' - j\sigma/(\omega\epsilon_0))} f d \right] \quad (4)$$

که در این روابط Z_{in} امپدانس ورودی یک لایه‌ی جاذب، ϵ' ، ϵ'' ، μ' ، μ'' به ترتیب گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی حقیقی و موهومی، c سرعت امواج الکترومغناطیسی در خلأ، f فرکانس موج برخوردی و d ضخامت لایه‌ی جاذب است [۲۰]. مقادیر 10 dB و 20 dB از تلفات انعکاسی به ترتیب به معنی میزان جذب و اتلاف 90% و 99% درصد انرژی موج برخوردی است. بازه‌ی فرکانسی شامل مقادیر تلفات انعکاسی 10 dB و کمتر از آن، به عنوان پهنای



شکل (۴): نمودارهای RL نمونه‌های مختلف بر اساس بهترین میزان جذب به ازای ضخامت بهینه.

نمونه‌ی با $x=1/2$ به میزان $RL=-32$ dB، در باند C2 مربوط به نمونه‌ی با $x=1/3$ و مقدار $RL=-45$ dB، در باند X مربوط به نمونه‌ی با $x=0$ و مقدار $RL=-21$ dB و در باند Ku به ازای $x=1/4$ و میزان $RL=-17$ dB رخ داده است. که در مجموع با توجه به نتایج فوق مشخص می‌شود بیشترین شدت جذب مربوط به نمونه $x=1/3$ در بازه فرکانسی ۴ تا ۸ گیگاهرتز بوده است.

۴- جمع‌بندی

در این پژوهش، ذرات هگزافریت نوع Z به صورت ترکیب $Ba_3Co_{2-x}Zn_xFe_{24}O_{41}$ به ازای مقادیر ۲، ۱/۵، ۱/۳، ۱/۲، $x=1/2$ سنت شدند. الگوی XRD مربوطه حاکی از تشکیل فاز این هگزافریت در دمای کلسیناسیون $1270^\circ C$ است. بر اساس منحنی‌های پسماند نمونه‌ها مشاهده گردید که با انجام جانشانی مقدار مغناطش اشباع تا مقدار ۸۴ emu/g برای

جدول (۳): ضخامت‌های مربوط به بهینه‌ترین منحنی RL هر نمونه در بازه‌های فرکانسی مختلف از لحاظ شدت و پهنای باند.

	باند S	باند C1	باند C2	باند X	باند Ku
	ضخامت (mm)	ضخامت (mm)	ضخامت (mm)	ضخامت (mm)	ضخامت (mm)
$x=0$	۵	۴/۴	۳/۷	۲/۹	۲/۱
$x=1/2$	۵	۴/۹	۴/۲	۳/۶	۵
$x=1/3$	۵	۴/۸	۳/۹	۳/۲	۲/۱
$x=1/4$	۵	۴/۶	۳/۸	۳/۲	۵
$x=1/5$	۵	۴/۶	۳/۹	۳/۲	۲/۱
$x=2$	۵	۴/۵	۳/۶	۲/۸	۵

با توجه به این منحنی‌ها مشاهده می‌شود در تمامی باندها بیشترین میزان جذب از لحاظ پهنای باند مربوط به نمونه‌ی با $x=1/2$ است. مقادیر مربوطه در جدول ۳ ذکر شده است. از طرفی با بررسی منحنی‌ها در باندهای مختلف بهترین عملکرد جذب مایکروویو (منفی‌ترین RL) در باند S و C1 مربوط به

- [8] Z. W. Li and Z. H. Yang, "Effect of Ti substitution on dynamic and static magnetic properties for $Ba_3Co_2Fe_{24-x}Ti_xO_{41}$ Hexaferrites", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 334, pp. 5–10, 2013.
- [9] 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.
- [10] C. Mu, Y. Liu, Y. Song, L. Wang & H. Zhang, "Improvement of high-frequency characteristics of Z-type hexaferrite by dysprosium doping", *Journal of applied physics*, Vol. 109, No. 12, p. 123925, 2011.
- [11] 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.
- [12] C. H. Mu, Y. L. Liu, H. W. Zhang, Y. Q. Song, Q. Y. Wen & J. Shen, "Influence of $MgTiO_3$ on the magnetic and dielectric properties of $Ba_3Co_2Fe_{24}O_{41}$ hexaferrite", *Journal of Applied Physics*, Vol. 107, No. 9, 2010.
- [13] C. H. Rhee, K. L. Cho & C. S. Kim, "Heat-treatment effect on Z-type hexaferrite for RF device application", *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 66, No. 1, pp. 96–99, 2015.
- [14] X. Zhang, Z. Yue, S. Meng, B. Peng & L. Yuan, "Magnetic and electrical properties of Z-type hexaferrites sintered in different atmospheres", *Materials Research Bulletin*, Vol. 65, pp. 238–242, 2015.
- [15] Z. Zheng, Q. Feng & V. G. Harris, "Low-loss Z-type barium hexaferrite composites from nanoscale $ZnAl_2O_4$ addition for high-frequency applications", *AIP Advances*, Vol. 8, No. 5, 2018.
- [16] Z. W. Li, L. Guoqing, N.-L. Di, Z.-H. Cheng & C. K. Ong, "Mössbauer spectra of CoZn-substituted Z-type barium ferrite $Ba_3Co_{2-x}Zn_xFe_{24}O_{41}$ ", *Physical Review B*, Vol. 72, No. 10, p. 104420, 2005.
- [17] Z. W. Li, L. Guoqing, L. Chen, W. Yuping & C. K. Ong, " $Co^{2+} Ti^{4+}$ substituted Z-type barium ferrite with enhanced imaginary permeability and resonance frequency", *Journal of Applied Physics*, Vol. 99, No. 6, p. 63905, 2006.
- ترکیب $Ba_3Co_{0.8}Zn_{1.2}Fe_{24}O_{41}$ افزایش یافته است. با بررسی منحنی‌های تلفات انعکاسی مشخص گردید که بیشترین مقدار جذب در نمونه‌ای به ضخامت ۳/۹ میلیمتر به ازای $x=1/3$ در محدوده‌ی باند C2 و به میزان ۴۷ dB- در فرکانس مرکزی ۷ GHz اتفاق افتاده است.
- ### ۵- مراجع
- [۱] م. جزیره‌پور و م. ح. شمس، "سنتر و مشخصه یابی نانو میله‌های $Fe_2O_3/BaFe_{12}O_{19}$ و بررسی خواص مغناطیسی آنها"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۱۱، شماره ۱، ص ۱۳۹-۱۴۸، ۱۳۹۶.
- [۲] 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، ص ۸۱-۸۶، ۱۳۹۲.
- [3] J. Shen, K. Chen, L. Li, Y. Ding, J. Li & W. Kong, "Fabrication of Z-type barium ferrite/silica composites with enhanced microwave absorption", *Science China Technological Sciences*, Vol. 57, No. 9, pp. 1858–1864, 2014.
- [4] T. Kikuchi, T. Nakamura, T. Yamasaki, M. Nakanishi, T. Fujii, J. Takada & Y. Ikeda, "Magnetic properties and high frequency response of single-phase Z-type strontium cobalt hexaferrite prepared by polymerizable complex method", *Advances in Science and Technology*, Vol. 67, pp. 104–107, 2010.
- [5] 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.
- [6] T. Nakamura and E. Hankui, "Control of high-frequency permeability in polycrystalline (Ba, Co)-Z-type hexagonal ferrite", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 257, No. 2, pp. 158–164, 2003.
- [7] M. M. Rashad, H. M. El-Sayed, M. Rasly, A. A. Sattar & I. A. Ibrahim, "Magnetic and dielectric properties of polycrystalline La doped barium Z-type hexaferrite for hyper-frequency applications", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, Vol. 24, No. 1, pp. 282–289, 2013.

- submicron-sized $\text{SrFe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$ with very high coercivity, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 320, No. 6, pp. 1068–1072, 2008.
- [20] J. Huo, L. Wang & H. Yu, “Polymeric nanocomposites for electromagnetic wave absorption”, *Journal of Materials Science*, Vol. 44, No. 15, pp. 3917–3927, 2009.
- [18] M. Jazirehpour, M. H. Shams & O. Khani, “Modified sol–gel synthesis of nanosized magnesium titanium substituted barium hexaferrite and investigation of the effect of high substitution levels on the magnetic properties”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 545, pp. 32–40, 2012.
- [19] P. E. Kazin, L. A. Trusov, D. D. Zaitsev, Y. D. Tretyakov & M. Jansen, Formation of

Investigation of Electromagnetic Properties and Microwave Absorption of Z-Type HexFerrite with Zinc Substitution

Zenat Mirzaei¹, Mohammad Jazirehpour^{*2}, Ahmad Pourbaferani³

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

2- Assistant professor, Department of Electroceramics and Electrical Engineering Malek Ashtar University of Technology.

3- Researcher, Department of Electroceramics and Electrical Engineering Malek Ashtar University of Technology.

*Jazirehpour@mut-es.ac.ir

Abstract

In this research, the effect of different substitution quantities of zinc cations on electromagnetic and microwave absorption properties of Z-type barium hexaferrite with chemical composition of $Ba_3Co_{2-x}Zn_xFe_{24}O_{41}$ ($x=0, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 2$) generated by high energy milling method was studied. X-ray diffraction (XRD) method was used to verify the formation of Z type Ba-hexaferrite phase in the synthesis conditions. Magnetization properties of different compositions were studied by alternative gradient force magnetometry (AGFM). X-ray diffraction (XRD) method was used to confirm the formation of Z-type Ba-hexaferrite phase. The investigations by AGFM showed that the amount of magnetization increased by substituting the desired composition. So that the amount of magnetization (67 emu/g) for an unsubstituted sample will reach its maximum (84 emu/g) for the sample with composition of $Ba_3Co_{0.8}Zn_{1.2}Fe_{24}O_{41}$. In addition, complex permeability and permittivity coefficients of the samples were studied by vector network analyzer (VNA). Using the measured coefficients, reflection loss curves were plotted. The results of the reflection loss (RL) plots showed that, on average, the maximum absorption bandwidth occurred among the samples at a frequency range of 4-8 GHz. The best absorption (the most negative reflectance loss) was observed at -47 dB and at a frequency of 7 GHz for the sample with an index of substitution of $x=1.3$.

Keywords: Milling, Microwave Absorption, Permeability, Permittivity, Z-Type Hexaferrite.

Journal homepage: ma.iaumajlesi.ac.ir

Please cite this article using:

Zenat Mirzaei, Mohammad Jazirehpour, Ahmad Pourbaferani, Investigation of Electromagnetic Properties and Microwave Absorption of Z-Type HexFerrite with Zinc Substitution, New Process in Material Engineering, 2020, 14(3), 61-70.