

بررسی رفتار جذب امواج رادار کامپوزیت‌های زمینه پلیمری حاوی ذرات باریم هگزافریت آلاییده شده

سید سلمان سید افقهی^۱، مجتبی جعفریان^{۲*}، محسن صالحی^۲

^۱ دانشگاه جامع امام حسین (ع)، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی مواد، تهران، ایران.

^۲ دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، تهران، ایران.

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۴/۹/۱۹، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۵/۸/۱، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۵/۹/۱

چکیده در این مقاله با هدف بررسی رفتار جذب امواج رادار توسط پودر مغناطیسی هگزافریت باریم آلاییده شده، کامپوزیت‌هایی حاوی این پودر با درصد وزنی مختلف (۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد وزنی) در زمینه رزین اپوکسی تهیه شد. آنالیزهای پراش اشعه ایکس (XRD)، مغناطیس‌سنج نمونه مرتعش (VSM) و تجزیه و تحلیل شبکه بردار (VNA) به ترتیب به منظور بررسی فازی، مغناطیسی و جذب امواج مایکروویو انجام شد. طبق نتایج ترکیب هگزافریت باریم به همراه مقدار ناچیزی فاز غیرمغناطیسی هماتیت تشکیل گردید. نتایج VSM حاکی از کاهش مقادیر مغناطش اشباع (Ms) و نیروی وادارندگی (Hc) در تمامی نمونه‌ها بود و کمترین میزان مغناطش اشباع (۱۸/۱۴ emu/g) و نیروی وادارندگی (۱۱۸ Oe) در نمونه حاوی یون قلع مشاهده شد. طبق نتایج VNA بیشترین میزان جذب در حالت استفاده از ۵۰ درصد وزنی پودر در زمینه رزینی و در صورت استفاده از نمونه با ترکیب $BaZn_{0.6}Zr_{0.3}Sn_{0.3}Fe_{10.8}O_{19}$ در فرکانس ۱۱/۱ GHz به میزان ۱۶/۳ dB حاصل گردید.

کلمات کلیدی: هگزافریت باریم، خواص مغناطیسی، جذب امواج رادار.

Investigation the Radar Absorption Behavior of Polymer Matrix Composites with Doped Barium Hexaferrite Particles

Seyyed Salman Seyyed Afghahi¹, Mojtaba Jafarian^{2*}, Mohsen Salehi²

¹Department of Materials sciencend Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran.

²Young Researchers and Elites club, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Abstract In this paper with the aim of investigating the radar absorption behavior of doped barium hexaferrite, composites contain this powder with different weight percent in resin epoxy matrix were prepared. X-ray diffraction analysis (XRD), Vibration sample magnetometer (VSM) and Vector network analysis (VNA) were performed in order to evaluate phase, magnetic properties and microwave absorption properties. According to the results, barium hexaferrite with negligibility amount of non-magnetic hematite phase were was formed. VSM results, representing the reduction of saturation magnetization (Ms) and coercive force (Hc) values in all samples, and the lowest value of saturation magnetization (18.14 emu/g) and coercive force (118 Oe) corresponded to the sample that contain tin ion. According to the VNA results, the maximum absorption is achieved when 50 wt.% of powder is used in resin matrix which was related to the sample with the composition of $BaZn_{0.6}Zr_{0.3}Sn_{0.3}Fe_{10.8}O_{19}$ at the frequency of 11.1 GHz with -16.3 dB.

Keywords: Barium hexaferrite, Magnetic properties, Radar waves absorption.

۱- مقدمه

پیشرفت‌های اخیر در زمینه دستگاه‌های ارتباط الکترونیکی بی‌سیم همچون تلویزیون، سیستم‌های رادیویی، تلفن‌های همراه، دستگاه‌های رادار، شبکه‌های دسترسی محلی و ... کاربرد در محدوده فرکانسی مگاهرتز تا گیگاهرتز را دچار مشکلات فراوانی از جمله تداخل امواج الکترومغناطیس نموده است [۴-۱]. بنابراین محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس امری اجتناب‌ناپذیر نه تنها به واسطه تداخل امواج و مختل نمودن عملکرد سیستم‌های الکترونیکی و مخابراتی بلکه به واسطه ماهیت مضر این امواج برای سلامت انسان می‌باشد [۵]. بنابراین جاذب‌های امواج الکترومغناطیس به منظور کاهش آلودگی تشعشعات ناشی از افزایش دستگاه‌ها و منشاهای امواج الکترومغناطیس مورد نیاز می‌باشد [۶]. تاکنون طیف وسیعی از جاذب‌های امواج الکترومغناطیس شناخته شده که قادر به جذب امواج در فرکانس‌های بالا و پایین می‌باشند [۷-۱۰]. فریت‌های اسپینلی طبق حد اسنوک در محدوده گیگاهرتز دچار افت خاصیت نفوذپذیری مغناطیسی می‌شوند و به همین دلیل در محدوده گیگاهرتز به عنوان جاذبی مناسب نمی‌توانند عمل کنند [۱۱].

به‌علاوه این ترکیبات دارای فرکانس رزونانسی پایینی در حد کمتر از ۱۰۰ MHz بوده و کاربرد آنها را در محدوده فرکانسی ۸-۱۲ GHz محدود می‌کند. از طرفی فریت‌های هگزاگونال با دارا بودن آنیزوتروپی مغناطوکرستالی تک‌محوری بالا، نفوذپذیری مغناطیسی پایین و فرکانس رزونانسی بالای خود نمی‌توانند به عنوان جاذب امواج مایکروویو مناسب باشند [۱۲].

با این حال، فریت‌های هگزاگونال با آنیزوتروپی صفحه‌ای به‌واسطه دارا بودن نفوذپذیری مغناطیسی بالا و فرکانس‌های رزونانسی در نزدیکی باند X، کاندیدهای مناسبی برای کاربرد به عنوان موادی با انعکاس‌پذیری پایین در فرکانس مایکروویو می‌باشند.

هگزافریت‌ها با توجه به ترکیب شیمیایی و ساختار کریستالی‌شان به پنج دسته طبقه‌بندی می‌شوند. این ترکیبات شامل هگزافریت باریم نوع M, W, Y, X و Z به ترتیب با فرمول کلی $BaMe_2Fe_{12}O_{22}$, $BaMe_2Fe_{16}O_{27}$, $BaFe_{12}O_{19}$, $Ba_2Me_2Fe_{24}O_{41}$ و $Ba_2Me_2Fe_{28}O_{46}$ می‌باشند که Me نشان

دهنده انواع کاتیون‌های دو ظرفیتی در ترکیب است [۱۴، ۱۳].

در میان تمامی فریت‌های هگزاگونال، باریم هگزافریت نوع M با ساختار مگنتوپلمبیت و گروه فضایی P63/mmc نسبت به سایر ترکیبات این خانواده از خواص مناسب‌تری برخوردار می‌باشد.

این ترکیب دارای نیروی وادارندگی ($Oe = 6700$)، مغناطش بالا (72 emu/g) و دمای کوری بالا ($T_c = 502^\circ C$) می‌باشد. خواص مغناطیسی مواد فریتی به طور گسترده توسط جانشینی با کاتیون‌های مختلف تنظیم می‌شود.

اصلاح هگزافریت باریم با جانشینی کاتیون‌های مختلف و یون‌های آهن تغییرات عمده‌ای در مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی این ترکیب از جمله آنیزوتروپی مغناطوکرستالی، نیروی پسماندزدا و دمای کوری ایجاد می‌کند [۱۶-۱۴]. خواص مغناطیسی هگزافریت باریم جانشین شده به شدت تابع شرایط سنتز و نحوه قرارگیری دوپنت‌ها در مکان‌های کریستالوگرافی پنج‌گانه یون‌های Fe^{+3} در ترکیب هگزافریت باریم می‌باشد. روش‌های متعددی به منظور سنتز و جانشینی کاتیون‌های مختلف در ساختار هگزافریت باریم همچون هم‌رسوبی [۱۷]، سل-زل [۱۸]، میکروامولسیون [۱۹]، آلیاژسازی مکانیکی [۲۰] و غیره به‌کار گرفته شده است. در میان این روش‌ها روش آلیاژسازی مکانیکی به عنوان یکی از ساده‌ترین و مقرون به‌صرفه‌ترین روش‌ها محسوب می‌شود، چرا که اصولاً مواد اولیه مورد نیاز در این روش در دسترس و ارزان می‌باشند. پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه اصلاح خواص مغناطیسی هگزافریت باریم با جانشینی کاتیون‌هایی همچون Ce [۲۱]، Al [۲۲]، Co-Ti [۲۳]، Mn-Cd-Zr [۲۴] و Co-Zr [۲۵] انجام شده است.

پس از جایگزینی یون‌های Ba و Fe با یون‌های مورد نظر مغناطش اشباع، نیروی وادارندگی، فرکانس رزونانس فرومغناطیسی ترکیب هگزافریت باریم تغییر نموده است. ارتباط بین کاهش فرکانس رزونانس فرومغناطیسی هگزافریت باریم با آلیش با عناصر مختلف نیاز به تحقیقات گسترده دارد. پژوهش حاضر با هدف مقایسه رفتار جذب امواج مایکروویو در ترکیب کامپوزیتی هگزافریت باریم-رزین اپوکسی آلایده شده با کاتیون‌های روی و زیرکونیوم به همراه کاتیون‌های تیتانیوم، سریوم و قلع برای اولین بار و منحصر به فرد به‌شمار می‌آید.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش به منظور سنتز پودر هگزافریت باریم دوپ شده با ترکیب $BaZn_{0.6}Zr_{0.3}X_{0.3}Fe_{10.8}O_{19}$ ($X=Ti, Ce, Sn$) از مواد اولیه شامل کربنات باریم (۱۰۱۷۱۴)، اکسید آهن (۱۰۳۸۱۹)، اکسید روی (۱۰۸۱۴۶)، اکسید زیرکونیوم (۱۷۰۳۹۰)، دی اکسید تیتانیوم (۱۰۰۸۰۵)، دی اکسید سربوم (۱۰۲۲۶۳) و دی اکسید قلع (۱۰۷۸۱۸) تهیه شده از شرکت مرک با خلوص ۹۹/۸ درصد به روش فعال سازی مکانیکی استفاده شد.

مواد اولیه با توجه به نسبت استوکیومتری و نسبت وزنی گلوله به پودر (۳۰:۱) در قندانی های آسیاب سیاره ای (Retsch PM100) قرار گرفته و به مدت ۲۰ ساعت در اتمسفر هوا آسیابکاری و سپس به مدت ۵ ساعت در دمای $1000^{\circ}C$ و با نرخ $5^{\circ}C/min$ حرارت داده شدند. در تمام شرایط به میزان ۱ cc اتانول به عنوان عامل کنترل کننده فرآیند به مخلوط پودری اضافه شد. بررسی فازی پودرهای سنتز شده با استفاده از دستگاه پراش اشعه ایکس (XRD, XMD۳۰۰) در محدوده $10-70^{\circ}C$ با استفاده از تابش $CuK\alpha$ با طول موج 1.54 آنگستروم صورت گرفت.

پارامترهای مغناطیسی نمونه های پودری تهیه شده، در دمای ۲۹۸ K با استفاده از دستگاه مغناطیس سنج نمونه مرتعش (VSM) اندازه گیری گردید. به منظور بررسی میزان جذب امواج میکروویو در محدوده باند X ($12.4-8$ GHz)، پس از آماده سازی نمونه ها در ابعاد $25 \times 10 \times 5$ mm به گونه ای که به میزان ۳۰، ۴۰ و ۵۰٪ پودر در زمینه رزین اپوکسی به طور کامل پخش شده بود، از دستگاه 8510C Vector Network Analyzer (VNA) استفاده گردید.

جدول (۱) نشان دهنده کدهای مربوط به نمونه های آلیش شده می باشد.

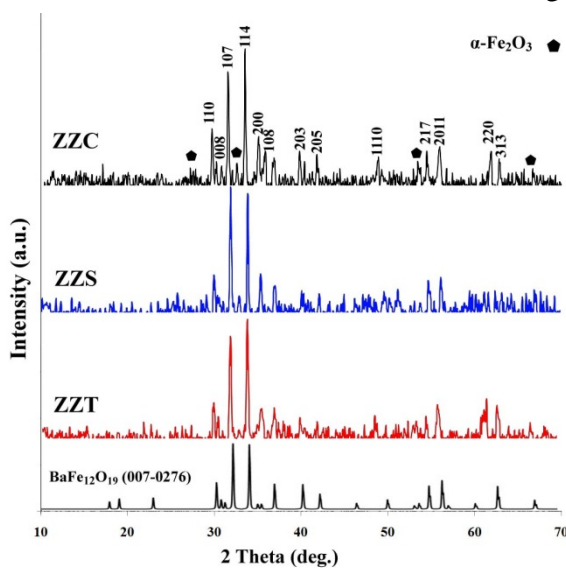
جدول ۱. کدهای مربوط به نمونه های آلیش شده.

کد نمونه	ترکیب
ZZT	$BaZn_{0.6}Zr_{0.3}Ti_{0.3}Fe_{10.8}O_{19}$
ZZC	$BaZn_{0.6}Zr_{0.3}Ce_{0.3}Fe_{10.8}O_{19}$
ZZS	$BaZn_{0.6}Zr_{0.3}Sn_{0.3}Fe_{10.8}O_{19}$

۳- نتایج و بحث

۳-۱ بررسی فازی (XRD)

از تمام نمونه های تولید شده به منظور بررسی فازی و ساختار بلوری آنالیز پراش اشعه ایکس به عمل آمد و با اطلاعات بدست آمده، از پراش نمایه سازی انجام شد. برای این منظور موقعیت پیک ها مشخص و مقادیر متناظر با $\sin 2\theta$ بررسی شد. شکل (۱) نشان دهنده الگوهای پراش اشعه ایکس مربوط به نمونه های دوپ شده با کاتیون های مورد نظر می باشد.



شکل ۱. الگوهای XRD نمونه های هگزافریت باریم دوپ شده.

با توجه به الگوها تشکیل ترکیب تقریباً تک فاز هگزافریت باریم نوع M با گروه فضایی P63/mmc در تمامی حالت ها تایید شد. پیک ها با الگوی استاندارد با شماره کارت (۰۲۷۶-۰۰۷) مطابقت داده و همان طور که ملاحظه می شود حضور مقداری فاز غیرمغناطیسی هماتیت در الگوهای پراش علاوه بر فاز مغناطیسی هگزافریت باریم مشاهده می شود.

۳-۲ بررسی مغناطیسی

شکل (۲) نشان دهنده حلقه های M-H نمونه های ZZT، ZZC و ZZS می باشد که در دمای اتاق تهیه شده اند. میدان پسماندزدا و مغناطش باقی مانده به طور مستقیم از حلقه های هیستریزس (M-H) بدست آمد. پارامترهای مغناطیسی کاربردی همچون مغناطش اشباع، نیروی وادارندگی و مغناطش باقیمانده نمونه ها نیز در جدول (۲) آورده شده است.

همان طور که ملاحظه می شود هر سه مشخصه

مربوط می‌باشد بلکه نحوه چینش و قرارگیری یون‌های مختلف در مکان‌های کریستالوگرافی یون‌های آهن نیز، نقش به‌سزایی در میزان مغناطش نهایی نمونه‌ها ایفا می‌کند. به‌طور کلی در ساختار هگزافریت باریم، یون‌های آهن با اسپین بالا در مکان‌های اکتاهدرال (۱۲k و ۲a) و بای‌پیرامید (۲b) و یون‌های آهن با اسپین پایین در مکان‌های تتراهدرال (۴f_۱) و اکتاهدرال (۴f_۲) توزیع شده‌اند [۲۵-۲۰]. طبق تئوری میدان لیگاند یون‌هایی با ۳d، ۲d، ۱d و ۲d به‌طور ترجیحی در مکان‌های تتراهدرال، در حالی که یون‌هایی با ۶d، ۷d، ۸d و ۹d در مکان‌های اکتاهدرال قرار می‌گیرند. یون‌هایی با ۵d، ۰d و ۱۰d مکان ترجیحی برای قرارگیری ندارند و می‌توانند در هر دو مکان تتراهدرال و اکتاهدرال قرار گیرند [۲۴].

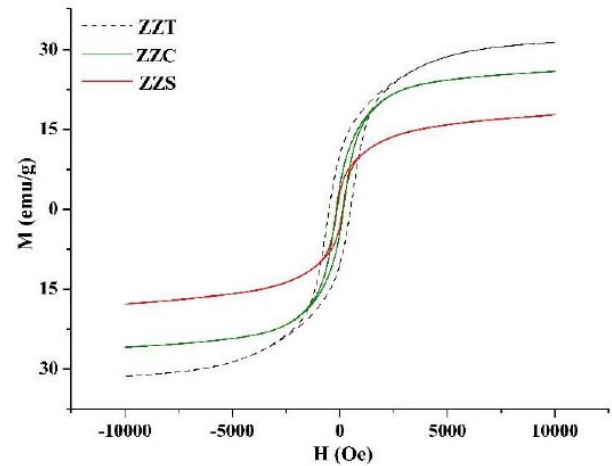
در نتیجه طبق این تئوری و بررسی‌های مزو بار انجام شده در سایر پژوهش‌ها در رابطه با نحوه اشغال مکان‌های مختلف توسط یون‌های مورد نظر می‌توان این چنین بیان نمود که یون‌های Zn^{2+} مکان‌های ۴f_۱ [۱۱]، Zr^{4+} فاقد مکان ترجیحی [۲]، یون‌های Ti^{4+} در صورتی که با یون‌های Zn^{2+} وارد ساختار شوند مکان‌های 4f_۱ و 4f_۲ [۶]، یون‌های Sn^{4+} مکان‌های ۲b [۴] و یون‌های Ce^{4+} مکان‌های ۴f_۱ [۲۱، ۱] را اشغال می‌نمایند. طبق نتایج نیز بیشترین میزان کاهش مغناطش اشباع در نمونه حاوی یون‌های قلع رخ داده است که می‌تواند ناشی از ورود این یون‌ها به مکان‌های ۲b باشد که نه تنها کاهش بیشتر در نیروی وادارندگی بلکه کاهش مغناطش اشباع را نیز به همراه داشته است. به‌طور کلی حضور فاز غیرمغناطیسی هماتیت نیز از دیگر دلایل کاهش کلی مغناطش اشباع می‌باشد که در الگوهای پراش مشاهده شد.

۳-۳ بررسی میزان جذب امواج میکروویو

برای کاهش بازتاب از جاذب‌ها باید امپدانس ذاتی جاذب با امپدانس موج در فضای آزاد برابر باشد که در نتیجه آن حالت تشدیدی صورت گرفته و بیشترین مقدار جذب در ماده نتیجه خواهد شد.

در این حالت انرژی موج الکترومغناطیسی جذب شده توسط ماده از طریق اتلاف‌های مغناطیسی و دی‌الکتریکی به گرما تبدیل می‌شود. زمانی که با یون‌های مختلف آرایش ساختار فریت‌های هگزائگونال صورت گیرد، با وارد شدن یون

مغناطیسی (Ms، Mr، Hc) در هر سه نمونه نسبت به حالت خالص هگزافریت باریم (Ms=۷۲-۹۴ emu/g) کاهش شدیدی داشته است. [۱۱-۱۵] Hc=۱/۹۸-۳/۲ kOe کاهش نیروی وادارندگی با دوپ نمودن یون‌های مختلف در ترکیب حاکی از کاهش ناهمسانگردی مغناطیسی- بلوری در راستای محور C نمونه‌ها می‌باشد.



شکل ۲. منحنی‌های M-H نمونه‌های ZZT، ZZC و ZZS

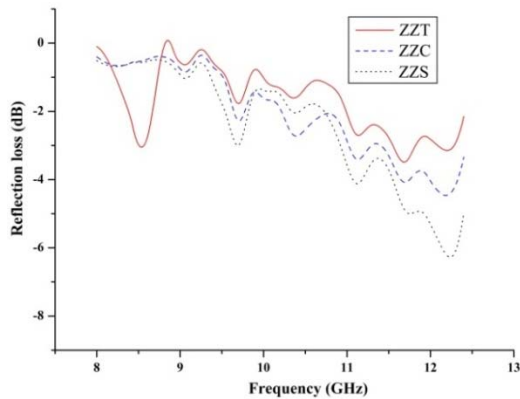
جدول ۲. مقادیر پارامترهای مغناطیسی نمونه‌های ZZT، ZZC و ZZS

نمونه	مغناطش اشباع (emu/g)	مغناطش باقیمانده (emu/g)	نیروی وادارندگی (Oe)
ZZT	۳۳/۱	۱۰/۱	۴۸۵
ZZC	۲۷/۲۴	۴/۳۱	۱۷۴
ZZS	۱۸/۱۴	۲/۹	۱۱۸

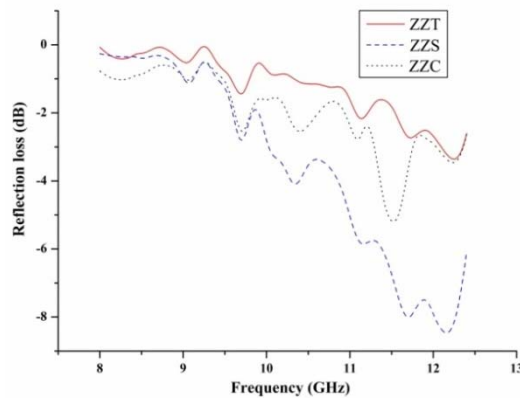
منشا ناهمسانگردی مغناطیسی- بلوری بالای هگزافریت

باریم نوع M حضور یون‌های آهن در مکان‌های ۲b و ۴f_۲ با عدم تقارن بالا است. طبق نتایج بیشترین میزان کاهش نیروی وادارندگی در نمونه ZZS رخ داده که ممکن است به دلیل جانشینی یون‌های دوپ شده مخصوصاً یون قلع در مکان‌های فوق باشد [۴]. از طرفی مغناطش اشباع شدیداً وابسته برهمکنش‌های فوق تبادلی از نوع Fe^{3+} -O- Fe^{2+} می‌باشد که خود نسبت به فواصل بین اتمی بسیار حساس می‌باشد. اصولاً دوپ نمودن یون‌های مختلف با شعاع‌های یونی بیشتر از یون‌های آهن منجر به کاهش برهمکنش‌های فوق تبادلی شده و در نتیجه کاهش در مغناطش اشباع رخ می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در تمامی حالت‌ها کاهش مغناطش اشباع رخ داده است. مغناطش اشباع نمونه‌های دوپ شده نه تنها به تغییر فاصله لایه‌ها و در نتیجه تضعیف برهمکنش‌های فوق تبادلی

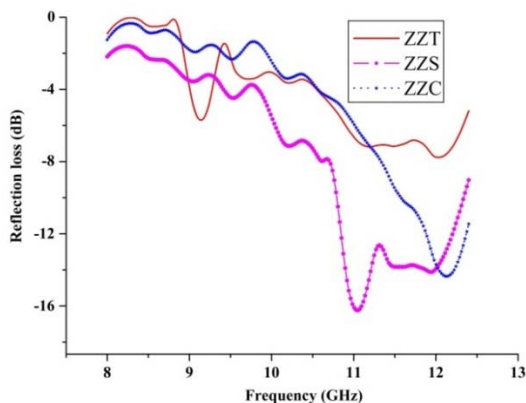
وزنی مشاهده می‌شود که در تمامی نمونه‌ها در محدوده باند X با افزایش فرکانس میزان جذب امواج افزایش می‌یابد. مقادیر پارمترهای جذب توسط نمونه‌ها در جدول (۳) آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بیشترین میزان جذب مربوط به نمونه ZZS می‌باشد. جذب بالای این نمونه می‌تواند ناشی از کمتر بودن نیروی وادارندگی H_c نسبت به دو نمونه دیگر و افزایش نفوذپذیری مغناطیسی ترکیب مورد نظر باشد. مکانیزم غالب جذب امواج الکترومغناطیس در نمونه‌های فریتی دوپ شده حرکت دیواره حوزه‌های مغناطیسی می‌باشد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳. منحنی‌های تغییرات جذب نسبت به بسامد در نمونه‌های ZZT، ZZS و ZC

در ساختار ماده، روی برهمکنش اسپین-مدار و ناهمسانگردی بلوری ماده تأثیر می‌گذارد و خواص مغناطیسی به‌ویژه H_c را تغییر می‌دهد. فرکانس رزونانس فرومغناطیسی هگزافریت باریم نوع M به‌واسطه آنیزوتروپی مغناطوکریستالین بالا در محدوده ۶۰-۵۰ GHz می‌باشد [۷-۱۰]. به‌علاوه فرکانس رزونانسی می‌تواند با جانشینی یون‌های فلزی با Fe^{+3} به سمت فرکانس‌های کمتر نیز انتقال پیدا کند. براساس تئوری رزونانس فرومغناطیس، فرکانس رزونانسی نسبت مستقیم با میدان ناهمسانگردی ترکیب هگزافریت باریم دارد. هرچند خواص مغناطیسی نمونه‌ها مبین تا حدودی نرم بودن تمام نمونه‌های آرایش شده می‌باشد ولی تنها براساس آن نمی‌توان بر روی خواص جذب فریت‌ها قضاوت کرد، به‌ویژه این‌که هر کدام از جاذب‌های امواج الکترومغناطیس در یک محدوده خاص می‌توانند جذب خوبی از خود نشان دهند.

بنابراین می‌بایست میزان جذب امواج الکترومغناطیس در فرکانس‌های مختلف توسط هر یک از کامپوزیت‌های مورد مطالعه، اندازه‌گیری شود. میزان تلفات انعکاسی یک ماده جاذب امواج الکترومغناطیس تحت برخورد عمودی، به صورت تک لایه و با پستی فلزی با توجه به مقدار امپدانس ورودی آن طبق نظریه خطوط انتقال با فرمول زیر مشخص می‌شود [۱۰]:

$$R(\text{dB}) = 20 \log \left| \frac{Z_{in} - 1}{Z_{in} + 1} \right| \quad \text{معادله (۱)}$$

شکل (۳) نشان دهنده نمودارهای میزان تلفات انعکاسی با فرکانس در محدوده ۸-۱۲/۴ GHz برای نمونه‌های ZZT، ZZC و ZZS در درصدهای وزنی مختلف ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد وزنی می‌باشد. در این‌جا پهنای باند به صورت محدوده فرکانسی که در آن میزان تلفات انعکاس بیش از ۱۰ dB باشد تعریف می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش میزان درصد وزنی پودر جاذب در زمینه رزین اپوکسی به‌واسطه کاهش میزان نقاط نشت (leakage) که منجر به عبور موج وارده و برخورد به صفحه فلزی پشتی و برگشت آن می‌شود و از طرفی افزایش مسیر جذب (Absorption path) در نمونه جاذب منجر به افزایش میزان جذب امواج رادار با افزایش میزان درصد پودر در زمینه می‌گردد.

با توجه به منحنی‌های جذب در حالت استفاده از ۵۰٪

6. An, S.Y., Shim, I.B., Kim, C.S., Mössbauer and magnetic properties of Co-Ti substituted barium hexaferrite nanoparticles, *Journal of Applied Physics*, 2002, 91, 8465-8467.
7. Wang, J.F., Ponton, C.B., Harris, I.R.: A study of the magnetic properties of hydrothermally synthesised Sr hexaferrite with Sm substitution, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2001, 234, 233-240.
8. Awawdeh, M., Bsoul, I., Mahmood, S., Magnetic properties and Mössbauer spectroscopy on Ga, Al, and Cr substituted hexaferrites, *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 585, 465-473.
9. Iqbal, M.J., Ashiq, M.N., Comparative studies of SrZr_xMn_xFe_{12-2x}O₁₉ nanoparticles synthesized by co-precipitation and sol-gel combustion methods, *Scripta Materialia*, 2007, 2, 145-148.
10. Wang, C.S., Wei, F.L., Lu, M., Han, D.H., Yang, Z., Structure and magnetic properties of Zn-Ti-substituted Ba-ferrite particles for magnetic recording, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1998, 183, 241-250.
11. Yang, Z., Wang, C.S., Li, X.H., Zeng, H.X., (Zn, Ni, Ti) substituted barium ferrite particles with improved temperature coefficient of coercivity, *Materials Science and Engineering*, 2002, 90, 142-145.
12. Dho, J., Lee, E.K., Park, J.Y., Hur, N.H., Effects of the grain boundary on the coercivity of barium ferrite BaFe₁₂O₁₉, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2005, 285, 164-168.
13. Gorter, E.W., Ionic distribution deduced from the g-factor of a ferrimagnetic spinel: Ti⁴⁺ in fourfold co-ordination, *Nature*, 1954, 173, 123-124.
14. Sozeri, H., Küçük, I., Özkan, H., Improvement in magnetic properties of La substituted BaFe₁₂O₁₉ particles prepared with an unusually low Fe/Ba molar ratio, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2011, 323, 1799-1804.
15. Haq, A., Anis-ur-Rehman, M., Effect of Pb on structural and magnetic properties of Ba-hexaferrite, *Physica B: Condensed Matter*, 2012, 407, 822-826.
16. Summergrad, R.N., Banks, E., New hexagonal ferrimagnetic oxides, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1957, 2, 312-316.
17. Turilli, G., Licci, F., Rinaldi, S., Mn²⁺, Ti⁴⁺ substituted barium ferrite *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2005, 59, 127-135.
18. Ghasemi, A., Hossienpour, A., Morisako, A., Liu, X., Ashrafzadeh, A., Investigation of the microwave absorptive behavior of doped barium ferrites, *Materials & Design*, 2008, 29, 112-117.
19. Tehrani, M.K., Ghasemi, A., Moradi, M., Alam, R.S., Wideband electromagnetic wave absorber using doped barium hexaferrite in Ku-band, *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509, 83-91.
20. Wartewig, P., Krause, M.K., Esquinazi, P., Rosler, S., Sonntag, S., Magnetic properties of Zn- and Ti-substituted barium hexaferrite, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1992, 192, 83-90.
21. Kanagesan, S., Jesurani, S., Velmurugan, R., Prabu, S., Kalaivani, T., Structural and magnetic properties of conventional and microwave treated Ni-Zr doped barium strontium hexaferrite, *Materials Research Bulletin*, 2012, 47, 188-193.
22. Sozeri, H., Baykal, A., Unal, B., Low-temperature synthesis of single-domain Sr-hexaferrite particles by solid-state reaction route, *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials*, 2012, 209, 2002-2013.
23. Sözeria, H., Deligözb, H., Kavasc, H., Baykal, A., Magnetic, dielectric and microwave properties of M-Ti substituted barium hexaferrites (M= Mn²⁺, Co²⁺, Cu²⁺, Ni²⁺, Zn²⁺), *Ceramics International*, 2014, 37, 234-246.

جدول ۳. پارامترهای جذب نمونه‌های ZZS و ZCZ و ZTZ

نمونه	فرکانس (GHz)	بیشترین اتلاف (dB)	پهنای باند جذب (GHz)
ZTZ	۱۲	-۷/۹	-
ZCZ	۱۲/۲	-۱۴/۲	۰/۹
ZZS	۱۱/۱	-۱۶/۳	۱/۶

۴- نتیجه گیری

روش فعال‌سازی مکانیکی به منظور آرایش پودر مغناطیسی هگزافریت باریم در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. عدم اسیدشویی پودر حاصل منجر به حضور فاز غیرمغناطیسی هماتیت در ترکیب پودر نهایی شد. آرایش سه‌تایی ترکیب هگزافریت باریم با کاتیون‌های مختلف منجر به کاهش آنیزوتروپی مغناطیسی و امکان کاربرد این ترکیب به عنوان پودر جاذب امواج رادار در محدوده فرکانسی باند X شد. حضور فاز غیرمغناطیسی هماتیت نه تنها تاثیر منفی در کاهش هر چه بیشتر پارامترهای مغناطیسی این ترکیب داشت بلکه منجر به کاهش جذب امواج رادار توسط این ترکیب در سه حالت مختلف گردید. بررسی اتلاف انعکاس در محدوده باند X برای نمونه حاوی یون چهار ظرفیتی قلع نسبت به نمونه‌های دیگر شاهد افزایش قابل ملاحظه‌ای بود که این امر به کمتر بودن نیروی وادارندگی این نمونه نسبت به دو نمونه دیگر و افزایش نفوذپذیری مغناطیسی آن مربوط بود.

مراجع

1. Pawar, R.A., Desai, S.S., Tamboli, Q.Y., Shirsath, E., Patange, S.M., Ce³⁺ incorporated structural and magnetic properties of M type barium hexaferrites, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, 378, 59-63
2. Chawla, S.K., Mudsainiyan, R.K., Meena, S.S., Yusuf, S.M., Sol-gel synthesis, structural and magnetic properties of nanoscale M-type barium hexaferrites BaCo_xZr_xFe_(12-2x)O₁₉, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2014, 350, 23-29.
3. Pashkova, E.V., Solovyova, E.D., Kolodiazhnyi, T.V., Ivanitskii, V.P., Belous, A.G., Effect of heat treatment on the phase composition, structure and magnetic properties of M-type barium hexaferrite, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2014, 368, 1-7.
4. Rasly, M.M., Rashad, M., Structural and magnetic properties of Sn-Zn doped BaCo₂Z-type hexaferrite powders prepared by citrate precursor method, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2013, 337-338, 58-64.
5. Wang, C.S., Qi, X.Q., Li, L.T., Zhou, J., Wang, X.H., Yue, Z.X., Effect of copper on the electromagnetic properties of Mg-Zn-Cu ferrites prepared by sol-gel auto-combustion method, *Materials Science and Engineering*, 2003, 86, 64-69.

24. Lisjak, D., Drofenik, M., Synthesis and characterization of A-Sn-substituted ($A^{1/4}$ Zn, Ni, Co) BaM-hexaferrite powders and ceramics, *Journal of the European Ceramic Society*, 2004, 24, 1841-1845.
25. Akman, O., Kavas, K., Baykal, A., Durmuş, Z., Aktaş, B., Sözeri, H., Microwave absorption properties of BaFe₁₂O₁₉-TiO₂ composite coated with conducting polymer, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2013, 26, 1369-1373.