

ساخت و بررسی خواص ساختاری و جذب امواج الکترومغناطیسی در کامپوزیت های باریم استرانسیوم تیتانات/ فریت کبالت-روی

احمد پوربافرانی*

۱- دکتری، پژوهشکده الکتروسرام، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، اصفهان، ایران

*a.poorbafrani@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۰۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۲۴)

چکیده

در این تحقیق کامپوزیت های باریم استرانسیوم تیتانات / فریت کبالت-روی که از دو فاز مغناطیسی متفاوت تشکیل شده، مورد بررسی قرار داده شده است. فاز پیروالکتریک شامل ذرات باریم استرانسیوم تیتانات با اندازه ذرات در حدود ۱۵۰ نانومتر و فاز مغناطیسی نرم شامل نانوذرات فریت کبالت-روی با اندازه ذرات در حدود ۳۰ نانومتر است. هر دو فاز به کمک روش سل-ژل و هر یک با استوکیومتری به خصوصی تهیه شده اند. آنالیزهای پراش پرتو X تشکیل فاز خالصی را برای هر یک از فازهای مغناطیسی نشان داد و آنالیز FESEM بیانگر خواص ساختاری نانوذرات فریت کبالت-روی و باریم استرانسیوم تیتانات در ساختار است. بررسی گذردهی الکتریکی، تراوایی مغناطیسی و اتلاف بازتابی نمونه ها در محدوده فرکانسی ۱-۱۸ GHz چگونگی پاسخ امواج الکترومغناطیسی به این نمونه ها را در این محدوده فرکانسی نشان داد. بر طبق اتلاف بازتابی مربوط به کامپوزیت ها، دو مکانیزم برای جذب امواج الکترومغناطیسی وجود دارد. در ناحیه ابتدایی این محدوده فرکانسی، اتلاف مغناطیسی ناشی از وجود نانوذرات فریت کبالت-روی غالب بوده و در ناحیه انتهایی این محدوده، اتلاف دی الکتریک ناشی از وجود ذرات باریم استرانسیوم تیتانات غالب است.

واژه های کلیدی:

نانو کامپوزیت، جذب امواج الکترومغناطیسی، پیروالکتریک، اتلاف بازتابی، خواص ساختاری و مغناطیسی.

۱- مقدمه

می گیرند، چرا که پدیده ی تشدید فرکانسی برای این دسته از مواد در این ناحیه فرکانسی قرار دارد و در نتیجه ی این تشدید، اتلاف مغناطیسی (μ'') افزایش می یابد. همچنین در سال های اخیر استفاده از مواد فروالکتریک برای کاربرد در ناحیه ی فرکانسی مایکروویو مورد توجه قرار گرفته

جذب امواج الکترومغناطیسی در ناحیه ی مایکروویو به منظور کاربردهای صنعتی و نظامی، یکی از مسائل مهمی است که هنوز هم مورد بحث و بررسی می باشد. فریت های اسپینلی [۱-۲] و مواد مغناطیسی فلزی [۳-۶] از جمله مواد جاذب مایکروویو هستند که در ناحیه ی فرکانسی ۱-۵ GHz مورد استفاده قرار

در کامپوزیت‌های باریم استرانسیوم تیتانات / فریت کبات-روی انجام نشده است.

در این تحقیق خواص ساختاری و جذب امواج الکترومغناطیسی در کامپوزیت‌های باریم استرانسیوم تیتانات / فریت کبات-روی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور دو فاز مورد نظر با خواص بهینه به روش سل-ژل سنتز شده است. اندازه‌گیری خواص ساختاری و جذب امواج الکترومغناطیسی در محدوده فرکانسی ۱-۱۸ GHz نشان می‌دهد که این کامپوزیت‌ها برای کاربرد در مواد جاذب، در این ناحیه فرکانسی کاملاً مناسب هستند. این کامپوزیت‌ها پهنای جذبی در حدود ۳/۹ GHz در ضخامت‌های ۲/۸ و ۳/۵ mm دارند که نمونه‌ی با ضخامت ۲/۸ mm کل باند X و نمونه‌ی با ضخامت ۳/۵ mm کل باند C را پوشش می‌دهد.

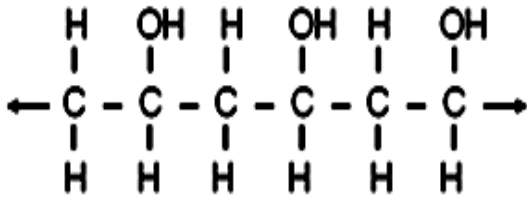
۲- مواد و روش انجام تحقیق

در این تحقیق از باریم استرانسیوم تیتانات (BST) با فرمول شیمیایی $Ba_{0.7}Sr_{0.3}TiO_3$ به عنوان فاز پیروالکترونیک و نانوذرات فریت کبات-روی (CZF) با فرمول $Co_{0.6}Zn_{0.4}Fe_2O_4$ به عنوان فاز مغناطیسی نرم برای تهیه کامپوزیت‌ها استفاده شد. هر یک از این دو ماده بر اساس روش سل-ژل و با استفاده از نیترات‌ها یا استات‌های مواد اولیه‌ی مورد نظر در هر ترکیب تهیه شده‌اند. در سنتز این دو فاز به روش سل-ژل سعی شده است تا حد ممکن خواص دی‌الکترونیک فاز پیروالکترونیک (BST) و خواص مغناطیسی فاز نرم (CZF) بهینه شوند. برای رسیدن به این اهداف، پارامترهای موثر در سنتز این دو ماده نظیر نوع مواد اولیه و استوکیومتری مناسب برای آن‌ها، نوع عامل کمپلکس‌ساز و درصد وزنی آن، آهنگ اضافه کردن محلول‌ها در طی فرآیند سنتز، دماهای تکلیس و آهنگ آن‌ها تا حد ممکن بهینه انتخاب شده‌اند.

است. وابستگی دمای کوری به ترکیب و ساختار مواد فروالکترونیک و رفتار غیرخطی پذیری رفتاری دی‌الکترونیک نسبت به میدان خارجی اعمالی، مواد فروالکترونیک از جمله باریم استرانسیوم تیتانات (BST) را نامزد مناسبی برای کاربرد در قطعات میکروویو کوک‌پذیر کرده است. از جمله این قطعات می‌توان به تغییردهنده‌ی فاز برای کاربردهای توان بالا، فیلترهای کوک‌پذیر و نوسان‌سازهای ولتاژ و... اشاره کرد. در تغییردهنده‌های فاز که در آن‌ها از BST استفاده شده است، علاوه بر اینکه دارای کوک‌پذیری بالایی هستند، اتلاف در آن‌ها نیز کم بوده و بنابراین می‌توان از آن‌ها برای توان‌های بالا که دارای کاربردهای نظامی نیز هست، بهره گرفت. به علاوه از نانوکامپوزیت‌های حاصل از این مواد با فریت‌ها به‌ویژه فریت‌های نرم می‌توان به عنوان مواد جاذب امواج در فرکانس‌های میکروویو استفاده کرد [۷-۹].

فریت کبات-روی به عنوان یک ماده‌ی مغناطیسی نرم، مغناطش اشباعی بزرگ و حد اسنوک بالایی داشته و در نتیجه دارای تراوایی مغناطیسی مختلط بزرگ، روی یک ناحیه فرکانسی گسترده است. این خاصیت، فریت کبات-روی را به عنوان یک ماده‌ی جاذب با ضخامت کم، در محدوده فرکانس‌های بالا، مطرح می‌سازد [۱۰-۱۱].

مطالعه و تحقیق بر روی کامپوزیت‌های باریم استرانسیوم تیتانات / فریت کبات-روی و به خصوص بررسی خواص جذب امواج میکروویو در این کامپوزیت‌ها بسیار کم انجام شده است و مطالعات بیشتر در مورد خواص دی‌الکترونیک کامپوزیت‌های باریم استرانسیوم تیتانات با فریت نیکل-روی، فریت نیکل-کبات یا فریت نیکل بوده است و به علاوه در این ساختارها، چگونگی وابستگی هدایت الکترونیک، ثابت دی‌الکترونیک و اتلاف دی‌الکترونیک به فرکانس و دما مورد بررسی قرار گرفته است [۱۲-۱۶]. بر اساس تحقیقات صورت گرفته، در کارهای دیگر محققین، بررسی وابستگی قسمت‌های حقیقی و موهومی گذردهی الکترونیک و تراوایی مغناطیسی به فرکانس و محاسبه اتلاف بازتابی در محدوده فرکانسی میکروویو ۱-۱۸ GHz



شکل (۱): ساختار شیمیایی زنجیره‌های مولکولی PVA

۲-۲- تهیه نانوذرات باریم استرانسیوم تیتانات

ساخت این نانوذرات بر اساس روش سل-ژل و بر مبنای تهیهی ۲۰ gr محصول نهایی بود. در ابتدا استات استرانسیوم (مرکب با خلوص ۹۹/۵ درصد) و استات باریم (مرکب با خلوص ۹۹/۵ درصد) هر یک به طور جداگانه در ۲۰۰ ml آب دیونیزه که روی گرم کن در دمای ۴۰°C در حال هم‌زده شدن بود، حل شدند. بعد از مدت زمان ۱/۵ ساعت و پس از انحلال کامل، این دو محلول به یکدیگر اضافه شدند. سپس ۵۷ ml اسید استیک (مرکب با خلوص ۹۹/۹ درصد) معادل با ۵۹/۸۹۲۶ گرم از این ماده به عنوان عامل کمپلکس‌ساز تهیه و محلول استات‌ها با آهنگ متوسط ۵٫۲ ml/min به این محلول اضافه شد. بر اساس استوکیومتری مورد نظر مقدار ۲۷/۸ ml تیتانیوم ایزوپروپوکساید (مرکب با خلوص ۹۹/۵ درصد و از نظر وزنی معادل با ۵۹/۸۹۲۶ از این ماده)، درحالی که محلول حاصل از مرحله قبل در حمام روغن با دمای ۵۰°C و در حال هم‌زده شدن بود، به صورت قطره‌قطره با سرعت متوسط ۰٫۰۲ ml/sec به آن اضافه شد.

در این مرحله به علت حساسیت بالای تیتانیوم ایزوپروپوکساید به رطوبت هوا، به تدریج تیتانیوم ایزوپروپوکساید موجود در دکانتور که در حال اضافه شدن بود، شروع به منجمد شدن در داخل دکانتور کرده و ادامه آزمایش با مشکل جدی مواجه شد، بنابراین تهیهی نمونه متوقف گردیده و آزمایش بار دیگر از سر گرفته شد. بر اساس تجربه‌ی به دست آمده در بار دوم برای حل مشکل مربوط به تیتانیوم ایزوپروپوکساید دو کار کلیدی انجام شد؛ اول اینکه برای پایداری بیشتر تیتانیوم ایزوپروپوکساید، ماده‌ی ۲- متوکسی اتانول (مرکب با خلوص ۹۹/۹ درصد) به آن

۲-۱- تهیه نانوذرات فریت کبالت-روی

به منظور ساخت نانوذرات فریت کبالت-روی، از پلی‌وینیل الکل (PVA) به عنوان عامل کمپلکس‌ساز استفاده شد. در ابتدا PVA (مرکب با خلوص ۹۹/۵ درصد) به مقدار ۳ درصد وزنی در آب دیونیزه حل شد. انتخاب این درصد بر اساس کارهای انجام شده در این زمینه در سال‌های اخیر بود که بر اساس آن‌ها مغناطش اشباعی بالایی برای نانوذرات فریت مورد نظر در این درصد به دست می‌آید [۱۷-۱۹]. انحلال PVA در آب دیونیزه به کندی صورت گرفته و حتی این درصد کم از این ماده به مدت زمان ۲۰ ساعت نیاز داشته و در ضمن دمای محلول در هنگام هم‌زدن باید تا حدود ۷۰°C افزایش داده شود و در صورت تبخیر آب، پس از انحلال کامل PVA به حجم مورد نظر اولیه رسانده شود. سپس نیترات آهن (مرکب با خلوص ۹۹/۰ درصد)، نیترات کبالت (مرکب با خلوص ۹۹/۵ درصد) و نیترات روی (مرکب با خلوص ۹۹/۰ درصد) به طور جداگانه در حجم مناسبی از آب دیونیزه در دمای ۴۰°C حل شد و با اضافه کردن این سه محلول به یکدیگر محلولی از نیترات‌ها ساخته شد. محلول نیترات‌ها در مدت زمان ۵ ساعت با آهنگ کند به محلول PVA که در دمای ۵۰°C روی هم‌زن قرار دارد، افزوده شده و پس از آن به منظور یکنواختی کامل محلول، عمل هم‌زدن به مدت ۳ ساعت ادامه یافت. از آن‌جا که PVA ماده‌ی خنثی است تغییری در pH محلول نهایی ایجاد نمی‌کند. لیگاند‌های قطبی هیدروکسیل در زنجیره‌ی طولانی PVA (مطابق شکل (۱)) می‌توانند یون‌های فلزی در محلول را جذب کنند و از کنار هم قرار گرفتن یون‌های فلزی جلوگیری کنند. سپس با افزایش دما تا ۷۰°C، تبخیر محلول تا رسیدن به ژل یکنواخت به مدت ۸ ساعت انجام می‌شود. به این دلیل که یون‌های فلزی به وسیله‌ی پلیمر احاطه می‌شوند، فرایند تبخیر به کندی صورت می‌گیرد. در ادامه دما تا ۸۰°C افزایش یافته و با خشک شدن ژل، پودر اولیه شکل می‌گیرد. با تکلیس این پودر در دمای ۸۰۰°C به مدت زمان ۲ ساعت فاز نهایی فریت کبالت-روی حاصل می‌شود.

حاصله در داخل کوره در دمای 900°C به مدت ۳ ساعت قرار داده شدند تا فاز کامپوزیتی مورد نظر شکل گیرد. نام گذاری نمونه‌های کامپوزیتی نیز بر اساس همین درصدهای وزنی به ترتیب به صورت‌های CZF۹۵/BST۵، CZF۸۰/BST۲۰، CZF۶۵/BST۳۵، CZF۵۰/BST۵۰، CZF۳۵/BST۶۵، CZF۲۰/BST۸۰ و CZF۵/BST۹۵ انجام شده است.

بر اساس تجربیات به دست آمده در آزمایش‌های صورت گرفته توسط نویسنده‌ی این مقاله در شرایط مختلف، مخلوط کردن دو فاز در مدت زمان نیم ساعت، ترکیب تقریباً یکنواختی از مخلوط را به دست می‌دهد. در ضمن بر اساس این آزمایش‌ها، با تکلیس این دو فاز حتی در مدت زمان ۲ ساعت و در دمای 800°C نیز فاز کامپوزیتی مورد نظر شکل می‌گیرد که برای اطمینان بیشتر، تکلیس در دمای 900°C و به مدت زمان ۳ ساعت صورت گرفته است.

برای بررسی و آنالیز ساختاری این نمونه‌ها از پراش پرتو X (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) استفاده شد. پراش پرتو X توسط تابش $\text{Cu-K}\alpha$ از دستگاه Philips X'Pert با آهنگ روبش $0.5/0.5^{\circ}\text{deg/s}$ و تصاویر میکروسکوپ الکترونی به کمک دستگاه Hitachi S4160 تهیه شدند. همچنین برای بررسی خاصیت جذب امواج الکترومغناطیسی نمونه‌ها در محدوده‌ی فرکانسی ۱-۱۸ GHz از دستگاه تحلیل کننده شبکه^۱ (VNA) مدل ZVK استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خواص ساختاری

شکل (۲) طیف XRD از نمونه‌های فریت کبالت-روی، باریم استرانسیوم تیتانات و کامپوزیت‌های این دو ترکیب را نشان می‌دهد. مقایسه‌ی طیف XRD با کارهای دیگران و کارت‌های استاندارد JCPDS در نمونه‌های تکلیس شده، نشان می‌دهند که نمونه‌های به دست آمده در این دماها دارای ساختار مورد نظر می‌باشند و طرح پراش در توافق کامل با کارهای ارائه شده توسط دیگران در مقالات مختلف است [۲۰-۲۳]. همچنین هیچ

اضافه شد و ثانیاً در این آزمایش جای محلول استات‌ها و تیتانیوم ایزوپروپوکساید در مرحله‌ی اضافه کردن به یکدیگر تغییر داده شد و این بار محلول استات‌ها به شکل قطره‌قطره به محلول تیتانیوم ایزوپروپوکساید حل شده در ۲- متوکسی اتانول اضافه گردید تا مشکل مرتفع گردد. پس از آن محلولی شامل ۱۸/۶ ml اتیلن گلیکول (مرک با خلوص ۹۹/۵ درصد) در ۵۰ ml آب دیونیزه تهیه و به عنوان کمک کننده به محلول حاصل از مرحله قبل اضافه گردید. محلول نهایی با pH در حدود ۴ حاصل شد و دمای محلول در پایان این فرآیند در حدود 80°C بود.

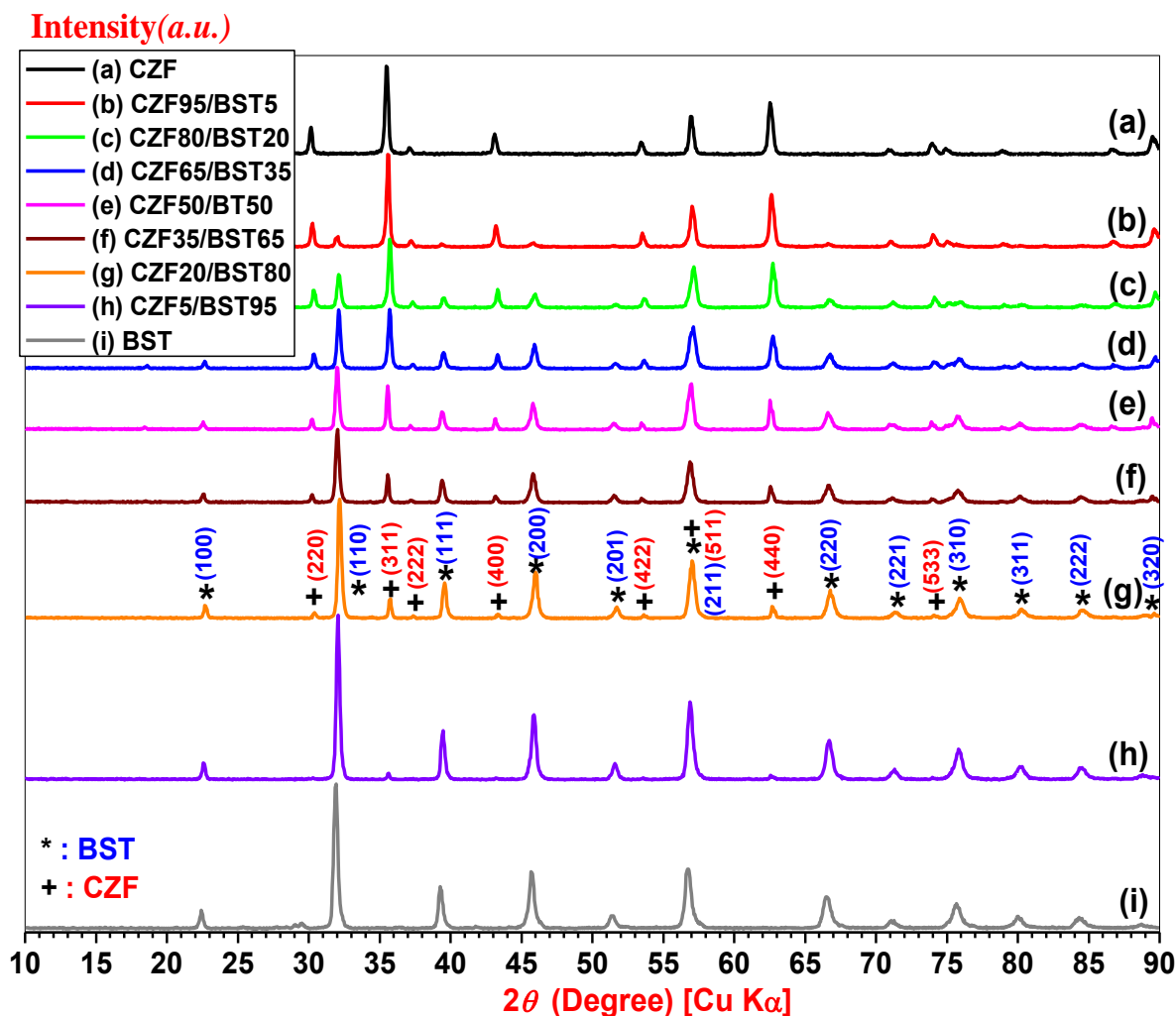
در این وضعیت با افزایش دما تا 200°C پس از ۴۸ ساعت ژل خشک شد. این پودر را کمی آسیاب کرده و آنالیز TG-DTA به منظور بررسی دمای تشکیل فاز بر روی آن انجام شد و سپس مراحل گرمادهی و تکلیس نمونه صورت گرفت.

در آخرین مرحله، مخلوط آسیاب شده داخل کروزه‌ای از جنس آلومینا ریخته شد و سپس کروزه در کوره قرار گرفت. برای انجام تفجوشی از کوره‌ی الکتریکی قابل برنامه‌ریزی مکعبی شکل استفاده شد. تفجوشی در محیط هوا و با روند حرارتی خاص انجام شد. بدین منظور پودر حاصل از مرحله‌ی قبل، برای رسیدن به فاز خالصی از نانوذرات باریم استرانسیوم تیتانات تا دمای 1200°C تکلیس شد. تکلیس نمونه از دمای اتاق تا دمای 400°C با آهنگ 6°C/min ، سپس از دمای 400°C تا 1200°C با آهنگ 3°C/min و پس از آن در دمای 1200°C به مدت ۲ ساعت انجام شد. در پایان فرآیند تکلیس، با خاموش کردن کوره، نمونه تا دمای اتاق به آرامی سرد شد.

۳-۲- تهیه نانوکامپوزیت‌های باریم استرانسیوم تیتانات/ فریت کبالت-روی

پس از اینکه فازهای مغناطیسی تهیه شدند و از خلوص فازهای مورد نظر اطمینان حاصل شد، این دو فاز به نسبت درصدهای وزنی CZF/BST با نسبت‌های ۹۵/۵، ۸۰/۲۰، ۶۵/۳۵، ۵۰/۵۰، ۳۵/۶۵، ۲۰/۸۰ و ۵/۹۵ با یکدیگر مخلوط شده و به مدت نیم ساعت توسط آسیاب دستی، آسیاب شدند و سپس پودرهای

قله‌ی اضافی در طیف‌ها مشاهده نمی‌شود که نشان‌گر تشکیل فازهای مورد نظر بدون وجود ناخالصی ساختاری می‌باشد.



شکل (۲): طیف XRD مربوط به فریت کبالت-روی، باریم استرانسیوم تیتانات و کامپوزیت‌های آن‌ها

ساختاری در دمای تکلیس 900°C می‌باشد. با افزایش درصد فریت کبالت-روی در ساختار کامپوزیت، به دلیل افزایش تعداد نانوذرات فریت با اندازه‌های خیلی کوچک، پهنای قله‌ها در نصف بیشینه افزایش می‌یابند.

به منظور بررسی ریزساختار نمونه‌ها از آنالیز FESEM در میدان 20 kV استفاده شده است. تصاویر (۳) به ترتیب مربوط به فریت کبالت-روی، باریم استرانسیوم تیتانات و کامپوزیت این دو ترکیب با نسبت درصد فریت کبالت-روی به باریم استرانسیوم تیتانات به صورت $50/50$ هستند.

در ساختار کامپوزیت‌ها، دو فاز تشکیل‌شده‌ی مربوط به فاز اسپینلی فریت کبالت-روی و فاز پروسکایتی باریم استرانسیوم تیتانات در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و یک ساختار دوفازی را تشکیل می‌دهند. با افزایش درصد فریت کبالت-روی و کاهش درصد باریم استرانسیوم تیتانات از شدت قله‌های مربوط به فریت کاسته شده و بر شدت قله‌های مربوط به باریم استرانسیوم تیتانات افزوده می‌شود. همچنین در حد دقت دستگاه XRD، هیچ‌گونه قله‌ی اضافی در طیف‌های مربوط به کامپوزیت‌ها مشاهده نمی‌شود که نشان‌گر تشکیل کامپوزیت بدون وجود ناخالصی

ارائه شده توسط دیگران است و از نظر اندازه‌ی ذرات با کارهای مشابه همخوانی دارند [۲۲-۲۵].

۳-۲- خواص مربوط به جذب امواج الکترومغناطیسی

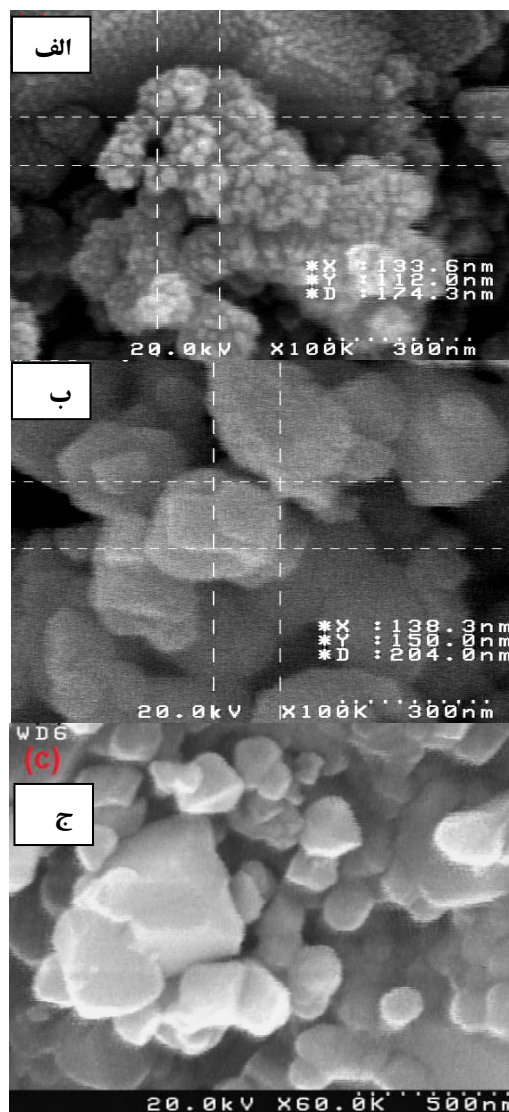
در این گروه از کامپوزیت‌ها، گذردهی الکتریکی نسبی ($\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$) و تراوایی مغناطیسی نسبی ($\mu_r = \mu' - j\mu''$)، تعیین‌کننده‌ی مشخصه‌های جذب این مواد هستند. در این تحقیق، اندازه‌گیری‌های مربوط به اتلاف بازتابی در محدوده‌ی فرکانسی ۱-۱۸ GHz بر اساس نظریه‌ی عبور خطی انجام شده است. بر طبق نظریه‌ی عبور خطی، اتلاف بازتابی^۳ مربوط به موج الکترومغناطیسی (dB) RL، زمانی که موج فرودی به طور عمود بر سطح ماده‌ی تک لایه با پس زمینه‌ی فلزی فرود می‌آید، توسط رابطه‌ی (۱) به دست می‌آید [۲۶-۲۸]:

$$RL = 20 \log \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \quad (1)$$

که Z_0 امپدانس مشخصه‌ی فضای آزاد و Z_{in} امپدانس ورودی در محل تلاقی ماده و فضای آزاد می‌باشد و با رابطه‌ی (۲) بیان می‌شود:

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left(j \frac{2\pi f t}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right) \quad (2)$$

در روابط (۱) و (۲)، c سرعت موج الکترومغناطیسی در فضای آزاد، f فرکانس موج مایکروویو و t ضخامت ماده‌ی جذب می‌باشد. بنابراین اتلاف بازتابی سطحی از یک ماده‌ی جذب، تابعی از شش پارامتر مشخصه‌ی ϵ' ، ϵ'' ، μ' ، μ'' ، f و t خواهد بود. بر طبق رابطه‌ی (۱) زمانی که امپدانس ورودی ماده‌ی جذب Z_{in} با مقدار امپدانس فضای آزاد Z_0 برابر شود، حالت تشدید صورت گرفته و بیشترین مقدار جذب در ماده نتیجه خواهد شد. در این حالت، انرژی موج الکترومغناطیسی می‌تواند به طور



شکل (۳): تصاویر FESEM از نانوذرات (الف): فریت کبالت-روی، (ب): باریم استرانسیوم تیتانات و (ج): کامپوزیت با درصد وزنی ۵۰/۵۰

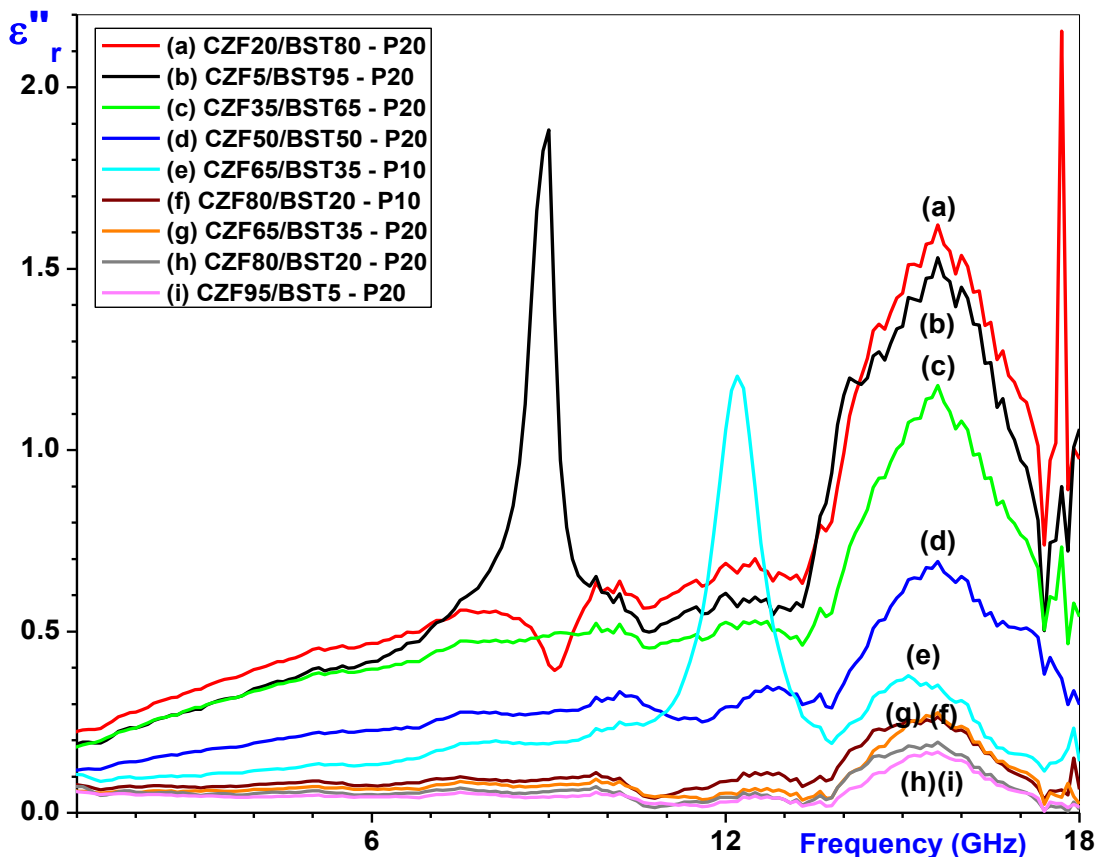
در تمام این نمونه‌ها اندازه‌ی ذرات، متغیر بوده و در نمونه‌ی فریت کبالت-روی اندازه‌ی ذرات حدود ۳۲ nm است. بنابراین احتمال می‌رود که ذرات کوچک‌تر در شکل (۳-ج) مربوط به فاز فریت کبالت-روی باشند، ولی برای بررسی دقیق‌تر آنالیزهای دیگری نظیر EDX موردنیاز است. شکل ذرات به‌صورت کاتوره‌ای بوده و تقریباً شکلی شبه‌کروی دارند. تصاویر ارائه شده در شکل (۳) در توافق کامل با گزارش‌های

بر طبق شکل (۴) تغییرات قسمت‌های موهومی گذردهی الکتریکی نمونه‌های با درصد‌های متفاوت پارافین و ماده‌ی مغناطیسی، در محدوده‌ی ۲-۰ تغییر می‌کنند. قله‌ی اصلی قسمت موهومی گذردهی نمونه‌ها در حوالی فرکانس ۱۵ GHz و در بازه‌ی فرکانسی ۱۷-۱۳/۵ GHz قرار دارد و در سه مورد از نمونه‌ها یک قله‌ی فرعی در حوالی ۹، ۱۲ و ۱۸ GHz قرار می‌گیرد. بنابراین انتظار می‌رود که برخی از قله‌های جذب در حوالی ۱۵ GHz قرار گیرند و در این نواحی مؤلفه‌ی میدان الکتریکی موج مایکروویو تضعیف شود.

بر طبق شکل (۵) قسمت‌های موهومی تراوایی مغناطیسی نمونه‌های با درصد پارافین مختلف، رفتاری متفاوت داشته و پس از آن که در فرکانس نزدیک به ۳ GHz به مقدار بیشینه‌ی خود می‌رسند، به صورت نمایی کاهش یافته و به سمت مقدار صفر که مربوط به ماده‌ی غیرمغناطیسی است، میل می‌کنند.

کامل توسط ماده، جذب شده و از طریق اتلاف‌های مغناطیسی و دی الکتریکی به گرما تبدیل شود [۲۷-۳۲].

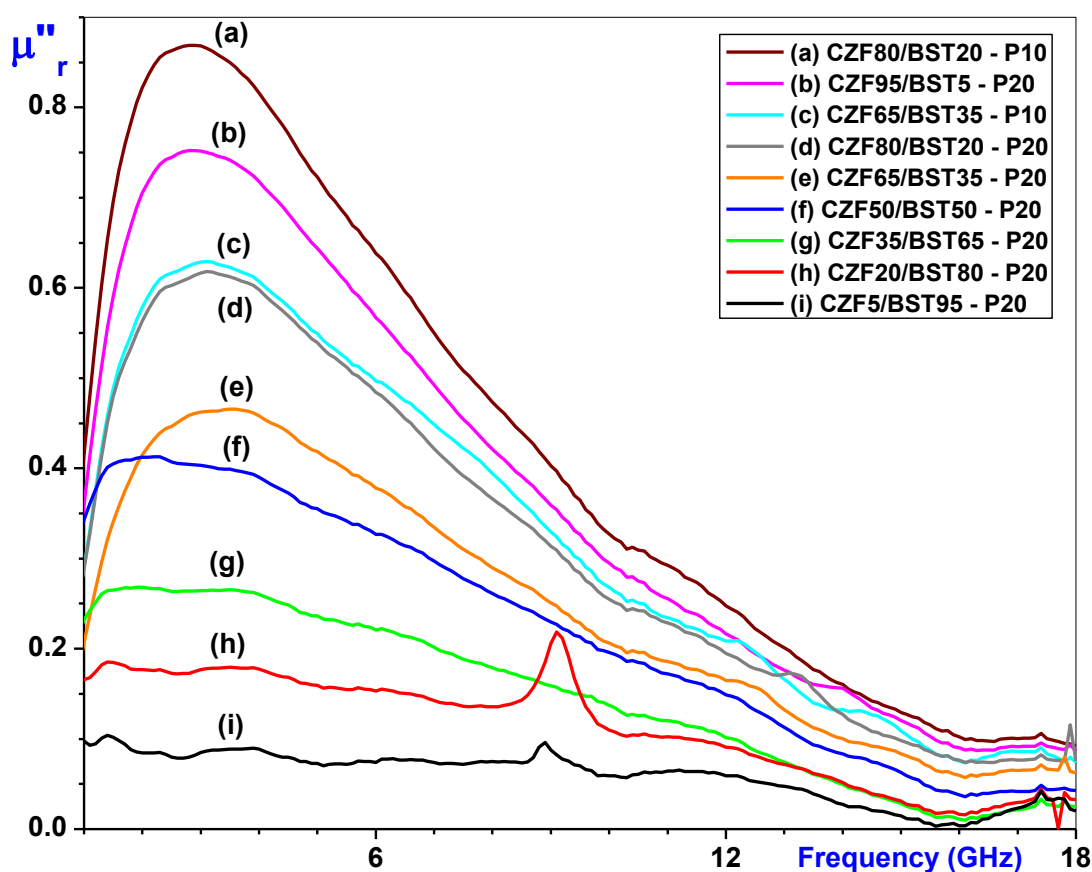
چگونگی پاسخ کامپوزیت‌های باریم استرانسیوم تیتانات/ فریت کبالت-روی در محیط پارافین در شکل‌های (۴) تا (۶) نشان داده شده است. در نمونه‌های با درصد پارافین ثابت ۱۰ یا ۲۰، با افزایش درصد باریم استرانسیوم تیتانات در ساختار کامپوزیت، به دلیل افزایش خاصیت دی الکتریکی ماده، قسمت‌های موهومی گذردهی الکتریکی کامپوزیت افزایش می‌یابند، به طوری که کامپوزیت با نسبت وزنی فریت کبالت-روی به باریم استرانسیوم تیتانات به صورت ۵/۹۵ و ۲۰ درصد پارافین، بیشترین مقدار موهومی گذردهی را دارد. در یک درصد ثابت پارافین، کامپوزیت‌هایی که درصد بیشتری باریم استرانسیوم تیتانات در ساختار خود دارند، قسمت موهومی گذردهی الکتریکی بیشتری داشته و در نتیجه اتلاف دی الکتریکی بالاتری را از خود نشان می‌دهند.



شکل (۴): تغییرات قسمت‌های موهومی گذردهی الکتریکی کامپوزیت‌های باریم استرانسیوم تیتانات/ فریت کبالت-روی با درصد‌های پارافین متفاوت

درصد پارافین ۱۰ است که مقدار ۰/۹۵ را دارد. با افزایش درصد پارافین، فرکانس مربوط به مقدار بیشینه جابجایی فرکانسی کوچکی دارد. با توجه به اینکه مقادیر قسمت‌های موهومی تراوایی نمونه‌ها در بازه‌ی ۰-۰/۹۵ تغییر می‌کنند، بنابراین پاسخ جذبی خوبی به دامنه‌ی میدان مغناطیسی موج الکترومغناطیسی در محدوده‌ی ۱-۱۸ GHz به خصوص در باندهای فرکانسی (۴-۲ S، ۸-۴ GHz) C و (۱۲-۸ GHz) X خواهند داشت.

در نمونه‌های با درصد پارافین ثابت ۱۰ یا ۲۰، با افزایش درصد فریت کبالت-روی در ساختار کامپوزیت، به دلیل افزایش خاصیت مغناطیسی کل ماده، قسمت‌های موهومی تراوایی مغناطیسی در کل کامپوزیت افزایش می‌یابند، به طوری که در درصد ثابتی از پارافین، کامپوزیت با نسبت وزنی بیشتر فریت کبالت-روی به باریم استرانسیوم تیتانات، بیشترین مقدار تراوایی مغناطیسی را دارد و در نتیجه اتلاف مغناطیسی بیشتری را از خود نشان می‌دهد. بالاترین بیشینه مربوط به نمونه‌ی با نسبت ۸۰/۲۰ و



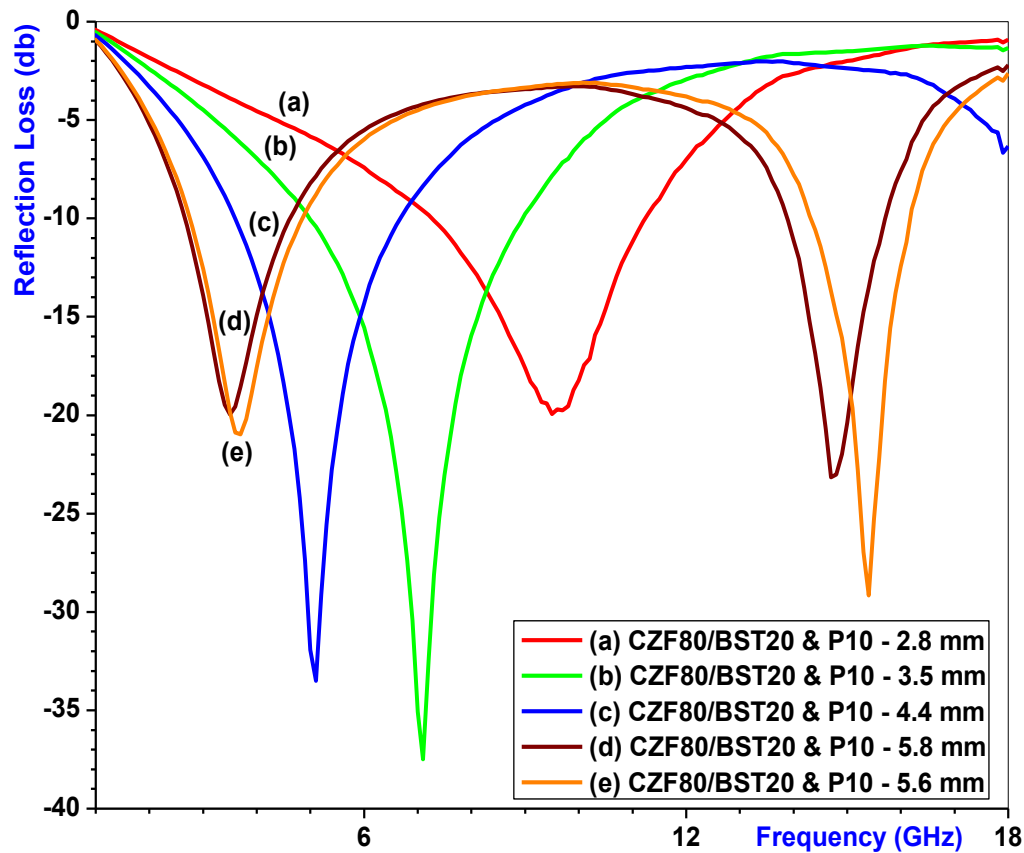
شکل (۵): تغییرات قسمت‌های موهومی تراوایی مغناطیسی کامپوزیت‌های باریم استرانسیوم تیتانات / فریت کبالت-روی با درصد‌های پارافین متفاوت

پارافین و فریت مورد نظر، قله‌های مربوط به فرکانس‌های بالاتر که در خارج از محدوده‌ی فرکانسی مورد نظر قرار دارند به داخل این محدوده جابجا شده و طیف از حالت تک قله‌ای، شکل دو قله‌ای به خود می‌گیرد؛ به طوری که در درصد بالای باریم استرانسیوم تیتانات، رفتار چند قله‌ای ناشی از ماده‌ی

به منظور بررسی این ادعاها، طیف اتلاف بازتابی نمونه‌های کامپوزیتی باریم استرانسیوم تیتانات / فریت کبالت-روی در محیط پارافین با درصد‌های بهینه‌ی پارافین ۱۰ و ۲۰ و در ضخامت‌های بهینه، بررسی شد که نتیجه آن در شکل (۶) نشان داده شده است. با افزایش ضخامت نمونه‌ها در هر درصد از

روی در نواحی ابتدایی محدوده‌ی فرکانسی ۱-۱۸ GHz بر عهده دارند و بخش دیگری از جذب را قسمت‌های موهومی گذردهی الکتریکی پیروالکتریک باریم استرانسیوم تیتانات در نواحی انتهایی این محدوده عهده‌دار هستند.

پیروالکتریک سهم شده و طیف پیچیده‌تر می‌شود. قله‌ی اول هر یک از این طیف‌ها در محدوده‌ی باندهای فرکانسی S، C و X که بیشینه‌های μ''_r قرار دارند، واقع شده است و قله‌ی دوم این طیف‌ها در حوالی فرکانس ۱۵ GHz یعنی در اواسط باند Ku که بیشینه‌های ϵ''_r وجود دارد، اتفاق می‌افتد. بنابراین بخشی از جذب را قسمت‌های موهومی تراوایی مغناطیسی فریت کبالت-



شکل (۶): طیف اتلاف بازتابی کامپوزیت‌های باریم استرانسیوم تیتانات/ فریت کبالت-روی به نسبت ۸۰/۲۰ با درصد پارافین ۱۰ و ضخامت‌های متفاوت

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق رفتار گذردهی الکتریکی، تراوایی مغناطیسی و جذب امواج الکترومغناطیسی در محدوده‌ی فرکانسی ۱-۱۸ GHz در کامپوزیت‌های باریم استرانسیوم تیتانات/ فریت کبالت-روی بررسی شدند. این بررسی‌ها نشان می‌دهند که با تغییر درصد مواد در این کامپوزیت‌ها، پاسخ جذبی خوبی در باندهای فرکانسی S، C، X و Ku به دست می‌آید. در این کامپوزیت‌ها بخشی از جذب را قسمت‌های موهومی تراوایی مغناطیسی فریت

بر طبق شکل (۶)، در کامپوزیت‌های با درصد پارافین ۱۰، نمونه-ی با درصد فریت کبالت-روی بیشتر (CZF ۸۰/BST۲۰)، به دلیل وارد شدن سهم اتلاfi بیشتری ناشی از مؤلفه‌ی μ''_r ، پهنای جذب بهتری را از خود نشان می‌دهد. پهنای جذب این نمونه مقداری در حدود ۳/۹ GHz را در ضخامت‌های ۲/۸ و ۳/۵ mm دارد که نمونه‌ی با ضخامت ۲/۸ mm کل باند X و نمونه‌ی با ضخامت ۳/۵ mm کل باند C را پوشش می‌دهد.

[۹] م. جزیره پور و م. ح. شمس، "سنتز و مشخصه‌یابی نانومیله‌های $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ و بررسی خواص مغناطیسی آن‌ها"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۱۱، صفحه ۱۴۸-۱۳۹، ۱۳۹۶.

[10] J. Wan, X. Wang & et al., "Magnetolectric $\text{CoFe}_2\text{O}_4\text{-Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ composite thin films derived by a sol-gel process", J. Appl. Phys. Lett., Vol. 86, pp. 122501-122503, 2005.

[11] J. Cao, W. Fu & et al., "Large-scale synthesis and microwave absorption enhancement of actinomorphic tubular $\text{ZnO}/\text{CoFe}_2\text{O}_4$ nanocomposites", J. Phys. Chem. B, Vol. 113, pp. 4642-4647, 2009.

[12] R. J. Pandya, U. S. Joshi & O. F. Caltun, "Microstructural and Electrical Properties of Barium Strontium Titanate and Nickel Zinc Ferrite Composites", Procedia Materials Science, Vol. 10, pp. 168 – 175, 2015.

[13] P. Pahuja, R. K. Kotnala & R. P. Tandon, "Effect of rare earth substitution on properties of barium strontium titanate ceramic and its multiferroic composite with nickel cobalt ferrite", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 617, pp. 140-148, 2014.

[14] K. Verma & S. Sharma, "Impedance spectroscopy and dielectric behavior in barium strontium titanate-nickel zinc ferrite composites", physica status solidi B, Vol. 249, pp. 209-216, 2012.

[15] C. M. Kanamadi, B. K. Das, C. W. Kim & et al., "Dielectric and magnetic properties of $(x) \text{CoFe}_2\text{O}_4 + (1-x) \text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ magnetolectric composites", Materials Chemistry and Physics, Vol. 116, pp. 6-10, 2009.

[16] D. R. Patil & B. K. Chougule, "Studies on magnetic and magnetolectric properties of the $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{TiO}_3$ composites", Journal of Materials Science: Materials in Electronics, Vol. 20, pp. 398-402, 2009.

[17] M. Sivakumar, S. Kanagesan & et al., "Synthesis of CoFe_2O_4 powder via PVA assisted sol-gel process", J. Mater. Sci.: Mater. Electron., Vol. 23, pp. 1045-1049, 2012.

[18] W. Li & L. Fa-Shen, "Structural and magnetic properties of $\text{Co}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparticles", Chin. Phys. B, Vol. 17, pp. 1858-1862, 2008.

کبالت-روی در نواحی ابتدایی طیف بر عهده دارند و بخش دیگر جذب را قسمت‌های موهومی گذردهی الکتریکی ماده پیروالکترونیک در نواحی انتهایی این محدوده عهده‌دار هستند.

۵- تشکر و قدردانی

نویسنده از پژوهشکده الکتروسرام وابسته به دانشگاه صنعتی مالک اشتر شاهین شهر به خاطر حمایت مالی از این کار پژوهشی کمال قدردانی را دارد.

۶- مراجع

[1] D. Y. Kim, Y. C. Chung & et al., "Dependence of microwave absorbing property on ferrite volume fraction in MnZn ferrite-rubber composites", IEEE Trans. Magn., Vol. 32, pp. 555-558, 1996.

[2] Y. Naito & K. Suetake, "Application of Ferrite to Electromagnetic Wave Absorber and its Characteristics", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 19, pp. 65-72, 1971.

[3] Saito, M. Ogawa, K. Tsutsui, H. Endo & S. Yahagi, Mater. Japan., Vol. 38, pp. 46-48, 1999.

[4] M. Matsumoto & Y. Miyata, Proceedings of EMC '98 ROMA, pp. 523-527, 1998.

[5] S. Yoshida, M. Sato, E. Sugawara & Y. Shimada, "Permeability and electromagnetic-interference characteristics of Fe-Si-Al alloy flakes-polymer composite", J. Appl. Phys., Vol. 85, pp. 4636-4638, 1999.

[6] T. Maeda, S. Sugimoto, T. Kagotani, D. Book, K. Inomata, H. Ota & Y. Houjou, "Electromagnetic Microwave Absorption Properties of a Fine Structure Formed from the $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ Compound after Disproportionation in Air or Nitrogen", Mater. Trans. JIM, Vol. 42, pp. 446-449, 2001.

[7] F. R. Lamastra, F. Nanni & et al., "Morphology and structure of electrospun CoFe_2O_4 /multi-wall carbon nanotubes composite nanofibers", Chem. Eng. J., Vol. 162, pp. 430-435, 2010.

[۸] ص. منافی و م. جعفریان، "سنتز نانوذرات باریم تیتانات با درجه بلورینگی بالا به روش هیدروترمال"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۷، صفحه ۱۳-۲۰، ۱۳۹۳.

- their dielectric properties”, *Ceram. Int.*, Vol. 41, pp. 12218-12228, 2015.
- [30] T. Hu, J. Juuti, H. Jantunen & T. Vilkmán, “Dielectric properties of BST/polymer composite”, *J. Eur. Ceram. Soc.*, Vol. 27, pp. 3997-4001, 2007.
- [31] E. A. Nenasheva, N. F. Kartenko, I. M. Gaidamaka, O. N. Trubitsyna, S. S. Redozubov & A. I. Dedyk, et al., “Low loss microwave ferroelectric ceramics for high power tunable devices”, *J. Eur. Ceram. Soc.*, Vol. 30, pp. 395-400, 2010.
- [32] J. Chameswary & M. T. Sebastian, “Butyl rubber–Ba_{0.7}Sr_{0.3}TiO₃ composites for flexible microwave electronic applications”, *Ceram. Int.*, Vol. 39, pp. 2795-2802, 2013.
- ۷- پی نوشت ها
-
- [1] Vector Network Analyzer
 [2] Transmission Line Theory
 [3] Reflection Loss
- [19] Hunyek, C. Sirisathitkul & P. Harding, “Synthesis and Characterization of CoFe₂O₄ particle by PVA sol-gel method”, *Adv. Mater. Res.*, Vol. 93-94, pp. 659-663, 2010.
- [20] N. C. Pramanik, N. Anisha & et. al., “Preparation of Ba_xSr_{1-x}TiO₃ (x = 0–1) nanoparticles by wet-chemical decomposition of Ti-complex and study their dielectric properties”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 476, pp. 524–528, 2009.
- [21] Q. Lu, D. Chen & et. al., “Preparation and characterization of Ba_{1-x}Sr_xTiO₃ (x=0.1, 0.2) fibers by sol-gel process using catechol-complexed titanium isopropoxide”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 358, pp. 76–81, 2003.
- [22] W. Li, Z. Xu & et. al., “Sol-gel synthesis and characterization of Ba_(1-x) Sr_xTiO₃ ceramics”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 499, pp. 255-258, 2010.
- [23] X. F. Zhang, Q. Xu & et. al., “Low-temperature synthesis of superfine barium strontium titanate powder by the citrate method”, *Ceramics International*, Vol. 36, pp. 1405–1409, 2010.
- [24] C. Mao, X. Dong & et. al., “Nonhydrolytic sol-gel synthesis and dielectric properties of ultrafine-grained and homogenized Ba_{0.70}Sr_{0.30}TiO₃”, *Ceramics International*, Vol. 34, pp. 45–49, 2008.
- [25] L. Q. Wang, H. M. Kang, D. F. Xue & C. H. Liu, “Synthesis and characterization of Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO₃ nanoparticles”, *Journal of Crystal Growth*, Vol. 311, pp. 605–607, 2009.
- [26] S. S. Kim, S. B. Jo, K. I. Gueon, K. K. Choi, J. M. Kim & K. S. Chun, “Complex Permeability and Permittivity and Microwave Absorption of Ferrite-Rubber Composite in X-band Frequencies”, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 27, pp. 5462–5464, 1991.
- [27] L. Li, Q. Li, C. Xiang, X. Liang & B. Hao, “Zn_{0.6}Cu_{0.4}Cr_{0.5}Fe_{1.46}Sm_{0.04}O₄ ferrite and its nanocomposites with polyaniline and polypyrrole: Preparation and electromagnetic properties”, *Synthetic. Metals*, Vol. 160, pp. 28-34, 2010.
- [28] D. M. Pozar, “Microwave Engineering”, John Wiley & Sons, New York, 2005.
- [29] L. Singh, I. W. Kim, B. C. Sin, U. S. Rai, S. H. Hyun & Y. Lee, “Combustion synthesis of nanostructured Ba_{0.8}(Ca, Sr)_{0.2}TiO₃ ceramics and