

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه دوره‌ی کارشناسی ارشد مهندسی مواد-سرامیک

بررسی خواص مایکروویو دی‌الکتریک کامپوزیت $\text{Li}_2\text{TiO}_3\text{-Li}_2\text{Zn}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$

احمد صیادی شهرکی

استاد راهنما (اصلی):

دکتر احسان طاهری نساج

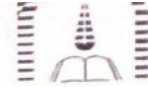
استاد راهنما (دوم):

دکتر زهرا اطلس باف

استاد مشاور:

دکتر سید علی حسن زاده تبریزی

زمستان ۱۳۹۱



تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

آقای احمد صیادی شهرکی پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان بررسی خواص
 ماکروویو دی الکتریک کامپوزیت $Li_2Zn_3Ti_4O_{12}-Li_2TiO_3$ در تاریخ
 ۱۳۹۱/۱۱/۱۵ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و
 پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی مواد - سرامیک پیشنهاد می
 کنند.

امضا	رتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیات داوران
	دانشیار	دکتر احسان طاهری نساج	استاد راهنما
	دانشیار	دکتر زهرا اطلس باف	استاد راهنمای دوم
		دکتر سیدعلی حسن زاده تبریزی	استاد مشاور
	دانشیار	دکتر پروین علیزاده	استاد ناظر
	دانشیار	دکتر تورج عبادزاده	استاد ناظر
	دانشیار	دکتر پروین علیزاده	مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان نامه / رساله مورد تایید است.

امضای استاد راهنما:

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان‌نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه / رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد. تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه / رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان‌نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین‌نامه‌های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۲/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می‌شود.

نام و نام خانوادگی
امضاء

آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته مهندسی مواد-

سرامیک است که در سال ۹۱-۹۰ در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر احسان طاهری نساچ و سرکار خانم دکتر زهرا اطلس باف، مشاوره جناب آقای دکتر سید علی حسن زاده تبریزی از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب احمد صیادی شهرکی دانشجوی رشته مهندسی مواد-سرامیک مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: احمد صیادی شهرکی

تاریخ و امضا:

چکیده

در تحقیق حاضر اثر کمک سینتر (LZB) $2\text{Li}_2\text{O}:3\text{ZnO}:5\text{B}_2\text{O}_3$ بر روی سینتر، ریز ساختار و خواص مایکروویو دی‌الکتریک‌های Li_2TiO_3 (LT)، $\text{Li}_2\text{Zn}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ (LZT) و کامپوزیت LT-LZT بررسی شد. پودرهای LZT و LT با استفاده از مواد اولیه TiO_2 ، ZnO و Li_2CO_3 به روش حالت جامد سنتز گردید. پودر LZT با کلسینه کردن در دمای 900°C به مدت ۸ h و پودر LT با کلسینه کردن در دمای 820°C به مدت ۴ h سنتز شدند. نمونه‌های شکل‌دهی شده LZT، LT و کامپوزیت LT-LZT همراه با مقادیر مختلف فریت LZB در دمای 900°C به مدت ۲ h سینتر گردید. نتایج نشان داد برای سرامیک LZT استفاده از ۱/۵ wt% فریت LZB باعث کاهش دمای سینتر دی‌الکتریک LZT به میزان 150°C شد و این نمونه دارای بهترین خواص مایکروویو دی‌الکتریک شامل $\tau_f = -48/9 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ و $Q_f = 42500 \text{ GHz}$ و $\epsilon_r = 19/1$ بود. در مورد سرامیک LT استفاده از ۲/۵ wt% فریت LZB باعث کاهش دمای سینتر دی‌الکتریک LT به میزان 250°C شد. نمونه LT حاوی ۲ wt% فریت LZB دارای بهترین خواص مایکروویو دی‌الکتریک شامل $\tau_f = +25/0.9 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ و $Q_f = 29802 \text{ GHz}$ و $\epsilon_r = 23$ بود. کامپوزیت LT-30 LZT، سینتر شده در دمای 1100°C به مدت ۲ h دارای خواص مایکروویو دی‌الکتریک بهینه شامل $\tau_f = -1/39 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ و $Q_f = 38900 \text{ GHz}$ و $\epsilon_r = 22/0$ بود. نتایج نشان داد کامپوزیت LT-20 LZT، سینتر شده به همراه ۲/۵ wt% فریت LZB در دمای 900°C به مدت ۲ h با خواص مایکروویو دی‌الکتریک $\tau_f = -1/57 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ و $Q_f = 28407 \text{ GHz}$ و $\epsilon_r = 22$ یک دی‌الکتریک با خواص خوب جهت استفاده در تکنولوژی LTCC می‌باشد.

کلید واژه: Li_2TiO_3 ، $\text{Li}_2\text{Zn}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ، سینتر، خواص مایکروویو دی‌الکتریک، LTCC

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
و.....	فهرست علائم و نشانه‌ها
ز.....	فهرست جدول‌ها
ح.....	فهرست شکل‌ها
۱.....	فصل ۱- مقدمه
۵.....	فصل ۲- مروری بر منابع مطالعاتی
۵.....	۱-۲- مقدمه
۶.....	۲-۲- تاریخچه
۷.....	۳-۲- مشدد دی‌الکتريک
۸.....	۱-۳-۲- نحوه‌ی کار کردن یک DR
۹.....	۲-۳-۲- انواع مشددهای دی‌الکتريک
۱۰.....	۴-۲- کاربرد مواد مایکروویو دی‌الکتريک
۱۲.....	۱-۴-۲- فیلترهای مشدد دی‌الکتريک
۱۳.....	۲-۴-۲- اوسیلاتورهای مشدد دی‌الکتريک
۱۴.....	۳-۴-۲- آنتن‌های مشدد دی‌الکتريک
۱۶.....	۴-۴-۲- تکنولوژی LTCC
۱۹.....	۵-۲- خواص سرامیک‌های مایکروویو دی‌الکتريک

- ۲۰ ضریب دی‌الکتریک نسبی ۱-۵-۲
- ۲۴ فاکتور کیفیت ۲-۵-۲
- ۲۶ ضریب پایداری دمایی فرکانس رزونانس ۳-۵-۲
- ۳۰ سینتر ۶-۲
- ۳۱ سینتر حالت جامد ۱-۶-۲
- ۳۲ سینتر به کمک فاز مذاب ۲-۶-۲
- ۳۴ Li_2TiO_3 دی‌الکتریک ۷-۲
- ۳۴ بررسی ساختار کریستالی ۱-۷-۲
- ۳۶ خواص میکروویو دی‌الکتریک ۲-۷-۲
- ۳۹ $\text{Li}_2\text{Zn}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ دی‌الکتریک ۸-۲
- ۳۹ ساختار کریستالی ۱-۸-۲
- ۳۹ خواص میکروویو دی‌الکتریک ۲-۸-۲
- ۴۰ نتیجه‌گیری ۹-۲
- فصل ۳ - فعالیت‌های آزمایشگاهی ۴۲**
- ۴۲ مواد اولیه مصرفی ۱-۳
- ۴۳ سنتز حالت جامد سرامیک‌های LT و LZT ۲-۳
- ۴۳ وزن کردن مواد اولیه ۱-۲-۳
- ۴۴ مخلوط کردن مواد اولیه ۲-۲-۳
- ۴۵ کلسینه کردن ۳-۲-۳
- ۴۵ آسیا کردن ۴-۲-۳

۴۶	افزودن چسب	۳-۲-۵
۴۷	شکل دهی	۳-۲-۶
۴۸	سینتر	۳-۲-۷
۴۹	آماده سازی فریت LZB	۳-۳
۵۰	شناسایی ساختاری و ریز ساختاری دی الکتریک ها	۳-۴
۵۰	شناسایی فاز به وسیله ی پراش اشعه ایکس	۳-۴-۱
۵۰	میکروسکوپ الکترونی روبشی	۳-۴-۲
۵۱	آنالیز EDX	۳-۴-۳
۵۱	آنالیز حرارتی	۳-۵
۵۱	اندازه گیری چگالی	۳-۶
۵۲	توزیع اندازه ذرات	۳-۷
۵۲	اندازه گیری خواص میکروویو دی الکتریک	۳-۸
۵۶	نتایج و بحث	۴
۵۶	فریت LZB	۴-۱
۵۶	بررسی رفتار حرارتی فریت LZB	۴-۱-۱
۵۸	توزیع اندازه ذرات فریت LZB	۴-۱-۲
۵۹	اثر کمک سینتر LZB بر روی سینتر و خواص میکروویو دی الکتریک سرامیک LZT	۴-۲
۵۹	توزیع اندازه ذرات پودر LZT	۴-۲-۱
۶۰	بررسی فازی پودر LZT کلسینه شده و نمونه های سینتر شده	۴-۲-۲
۶۳	چگالی	۴-۲-۳

۶۶	..... آنالیز ریزساختاری	۴-۲-۴
۷۳	..... خواص مایکروویو دی الکتریک	۵-۲-۴
۷۷	..... نتیجه گیری	۶-۲-۴
۷۷	..... اثر کمک سینتر LZB بر روی سینتر و خواص مایکروویو دی الکتریک سرامیک Li_2TiO_3	۳-۴
۷۷	..... توزیع اندازه ذرات پودر LT	۱-۳-۴
۷۸	..... بررسی فازی پودر LT کلسینه شده و نمونه های سینتر شده	۲-۳-۴
۸۰	..... چگالی	۳-۳-۴
۸۳	..... آنالیز ریز ساختاری	۴-۳-۴
۸۷	..... خواص مایکروویو دی الکتریک	۵-۳-۴
۹۱	..... نتیجه گیری	۶-۳-۴
۹۱	..... کامپوزیت LT-LZT	۴-۴
۹۱	..... آنالیز فازی	۱-۴-۴
۹۴	..... چگالی	۲-۴-۴
۹۵	..... آنالیز ریزساختاری	۳-۴-۴
۹۷	..... خواص مایکروویو دی الکتریک	۴-۴-۴
۱۰۱	..... نتیجه گیری	۵-۴-۴
	..... اثر کمک سینتر LZB بر روی سینتر و خواص مایکروویو دی الکتریک کامپوزیت LT-20	۵-۴
۱۰۱	..... vol.% LZT	
۱۰۱	..... آنالیز فازی	۱-۵-۴
۱۰۳	..... چگالی	۲-۵-۴
۱۰۵	..... آنالیز ریزساختاری	۳-۵-۴

۴-۵-۴ - خواص مایکروویو دی الکتریک ۱۰۸

۴-۵-۵ - نتیجه گیری ۱۱۱

فصل ۵ - نتیجه گیری و پیشنهادها ۱۱۲

۵-۱ - نتیجه گیری ۱۱۲

۵-۲ - پیشنهادها ۱۱۳

فهرست مراجع ۱۱۴

فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
ثابت دی‌الکتریک نسبی	ϵ_r
فاکتور کیفیت	Q_f
ضریب پایداری حرارتی فرکانس رزونانس	τ_f
ضریب انبساط حرارتی	α
ضریب پایداری حرارتی ثابت دی‌الکتریک	τ_ϵ
حجم مولی ماده‌ی دی‌الکتریک	V_m
قابلیت پلاریزاسیون دی‌الکتریک	α_D

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۲۷	جدول ۱-۲: برخی از سرامیک‌های مایکروویو دی‌الکتریک با τ_f نزدیک به صفر [۳۷].
۲۹	جدول ۲-۲: کامپوزیت‌های مایکروویو دی‌الکتریک با τ_f نزدیک صفر.
۳۶	جدول ۳-۲: خواص فیزیکی دو پلی‌مورف Li_2TiO_3 [۵۴].
۳۸	جدول ۴-۲: خواص مایکروویو دی‌الکتریک سرامیک‌های پایه Li_2TiO_3 .
۴۲	جدول ۱-۳: مشخصات مواد اولیه مورد استفاده.
۴۴	جدول ۲-۳: نسبت استوکیومتری فازهای LT، LZT، و فریت LZB.
۴۵	جدول ۳-۳: دما و زمان کلسینه کردن برای سنتز دو فاز LT و LZT.
۹۷	جدول ۱-۴: نتایج آنالیز EDX از دانه با اندازه بزرگ و کوچک برای کامپوزیت LZT 20 vol.% LT- ۹۷.

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۷.....	شکل ۲-۱: طیف الکترو مغناطیس و مایکروویو به همراه حوزه‌های استفاده از طیف مایکروویو [۱۶].
۹.....	شکل ۲-۲: نمایش طرح‌واره از انعکاس‌های مکرر موج الکترومغناطیس در داخل یک DR [۱۶].
۱۰.....	شکل ۲-۳: مشددهای دی‌الکتریک با اشکال مختلف [۱۶].
	شکل ۲-۴: برخی از کاربردهای مشددهای دی‌الکتریک در (a) LNB ماهواره، (b) سیستم هشدار دهنده برای جلوگیری از تصادف، (c) داپلیکسر مایکروویو، (d) آنتن رادار و (e) شبکه تلفن همراه [۱۷].
	شکل ۲-۵: (a) مشددهای دی‌الکتریک با اشکال مختلف مورد استفاده در ساخت فیلتر و (b) محفظه پوشش داده شده با نقره و دی‌الکتریک داخل آن مورد استفاده در فیلتر [۲].
۱۳.....	شکل ۲-۶: اوسیلاتور مشدد دی‌الکتریک [۱۸].
۱۴.....	شکل ۲-۷: (a) آنتن‌های مشدد دی‌الکتریک با اشکال مختلف و (b) آنتن مشدد دی‌الکتریک با کلاهک آن [۱۶].
۱۶.....	شکل ۲-۸: طرح‌واره مراحل ساخت مدارات مجتمع در تکنولوژی LTCC [۲۷].
۲۱.....	شکل ۲-۹: مکانیزم‌های پلاریزاسیون در یک دی‌الکتریک [۱].
۲۲.....	شکل ۲-۱۰: وابستگی ϵ_r به فرکانس [۳۰].
۲۴.....	شکل ۲-۱۱: کاهش طول موج الکترومغناطیس به اندازه $\epsilon_r^{1/2}$ با ورود به ماده‌ی دی‌الکتریک [۳].

- شکل ۲-۱۲: مکانیزم‌های مختلف سینتر: (۱) دیفوزیون سطحی، (۲) دیفوزیون شبکه‌ای از سطح، (۳) انتقال بخار، (۴) دیفوزیون مرز دانه‌ای، (۵) دیفوزیون شبکه‌ای از مرز دانه و (۶) جریان پلاستیک
- ۳۱ [۵۲]
- شکل ۲-۱۳: تغییر چگالی، اندازه دانه و ساختار تخلخل‌ها در فرایند سینتر [۱۶].
- ۳۲ [۵۳] $\text{Li}_2\text{O-TiO}_2$ فازی
- شکل ۲-۱۴: دیاگرام فازی
- ۳۴ [۹] Li_2TiO_3 کریستالی
- شکل ۲-۱۵: ساختار کریستالی
- ۳۵ مراحل مختلف ساخت نمونه‌های دی‌الکتریک.
- شکل ۳-۱: مراحل مختلف ساخت نمونه‌های دی‌الکتریک.
- ۴۳ گرانونه‌های تهیه شده قبل از فرایند شکل‌دهی پودر.
- شکل ۳-۲: گرانونه‌های تهیه شده قبل از فرایند شکل‌دهی پودر.
- ۴۷ برنامه حرارتی سینتر نمونه‌های حاوی فریت LZB استفاده شده در این تحقیق.
- شکل ۳-۳: برنامه حرارتی سینتر نمونه‌های حاوی فریت LZB استفاده شده در این تحقیق.
- ۴۹ تصویر طرح‌واره از دی‌الکتریک قرار داده شده بر روی یک پایه تفلونی در یک جعبه برنجی.
- شکل ۳-۴: تصویر طرح‌واره از دی‌الکتریک قرار داده شده بر روی یک پایه تفلونی در یک جعبه برنجی.
- ۵۴ تصاویری از (a) دستگاه برداری آنالیز شبکه، (b) جعبه برنجی استفاده شده به همراه نمونه داخل آن، (c) گرمکن برای اندازه‌گیری τ_f و (d) پیک فرکانس رزونانس برای یک نمونه اندازه‌گیری شده.
- ۵۵ شکل ۴-۱: منحنی DTA فریت LZB.
- شکل ۴-۱: منحنی DTA فریت LZB.
- ۵۷ شکل ۴-۲: منحنی توزیع اندازه ذرات فریت LZB پس از آسیاب‌کاری به مدت ۳ ساعت.
- شکل ۴-۲: منحنی توزیع اندازه ذرات فریت LZB پس از آسیاب‌کاری به مدت ۳ ساعت.
- ۵۸ شکل ۴-۳: منحنی توزیع اندازه ذرات برای پودر کلسینه شده LZT پس از آسیاب‌کاری به مدت ۶ ساعت.
- شکل ۴-۳: منحنی توزیع اندازه ذرات برای پودر کلسینه شده LZT پس از آسیاب‌کاری به مدت ۶ ساعت.
- ۵۹ شکل ۴-۴: الگوی XRD مربوط به (a) پودر کلسینه شده در $900^\circ\text{C}/8\text{ h}$ و (b) نمونه سینتر شده در $1075^\circ\text{C}/2\text{ h}$.
- شکل ۴-۴: الگوی XRD مربوط به (a) پودر کلسینه شده در $900^\circ\text{C}/8\text{ h}$ و (b) نمونه سینتر شده در $1075^\circ\text{C}/2\text{ h}$.
- ۶۱ ط

- شکل ۴-۵: الگو پراش اشعه ایکس برای نمونه‌های LZT همراه با (a) ۱ wt%، (b) ۱/۵ wt%، (c)
- شکل ۴-۶: چگالی نسبی نمونه‌های LZT بر حسب دمای سینتر به مدت ۲ h ۶۳
- شکل ۴-۷: چگالی بالک نمونه‌های LZT بر حسب مقدار LZB سینتر شده در دمای ۹۰۰ °C/۲ h ۶۴
- شکل ۴-۸: تصاویر SEM نمونه LZT سینتر شده در ۱۰۵۰ °C/۲ h در بزرگنمایی (a) ۵۰۰۰ برابر و (b) ۱۲۰۰۰ برابر ۶۶
- شکل ۴-۹: تصاویر SEM نمونه‌های LZT همراه با مقادیر (a) ۰/۵ wt%، (b) ۱/۵ wt%، (c) ۲ wt% و (d) ۳ wt% فاز فریت LZB سینتر شده در ۹۰۰ °C/۲ h ۶۷
- شکل ۴-۱۰: آنالیز EDX (a) نقطه ۱ و (b) نقطه ۲ نشان داده شده در شکل (d) ۴-۹ ۶۸
- شکل ۴-۱۱: تصویر SEM و طیف اسکن خطی EDX از فصل مشترک الکتروود نقره با زمینه سرامیکی LZT حاوی ۱/۵ wt% فریت LZB سینتر شده در ۹۰۰ °C به مدت ۲ h ۶۹
- شکل ۴-۱۲: تغییرات خواص میکروویو دی‌الکتریک سرامیک LZT بر حسب مقدار LZB ۷۰
- شکل ۴-۱۳: منحنی توزیع اندازه ذرات پودر LT آسیاب شده به مدت ۶ h با دور ۲۵۰ rpm ۷۱
- شکل ۴-۱۴: الگوی XRD مربوط به (a) پودر کلسینه شده LT در دمای ۸۰۰ °C به مدت ۴ h و (b) نمونه LT سینتر شده در دمای ۱۱۵۰ °C به مدت ۲ h ۷۲
- شکل ۴-۱۵: الگوی XRD مربوط به (a) نمونه LT همراه با ۲/۵ wt% فریت LZB و (b) نمونه LT همراه با ۲/۵ wt% فریت LZB و ۲۰ wt% پودر Ag سینتر شده در دمای ۹۰۰ °C به مدت ۲ h ۷۳
- شکل ۴-۱۶: چگالی نسبی نمونه‌های LT بر حسب دمای سینتر به مدت ۲ h ۷۴

- شکل ۴-۱۷: چگالی بالک نمونه‌های LT بر حسب مقدار LZB سینتر شده در دمای 900°C به مدت ۲h ۸۳
- شکل ۴-۱۸: تصاویر SEM نمونه‌ی (a) LT سینتر شده در $1150^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ ، (b) LT حاوی $1/5\text{ wt}\%$ فریت LZB سینتر شده در $900^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ ۸۵
- شکل ۴-۱۹: تصاویر SEM از سطح پولیش و اچ شده‌ی نمونه LT همراه با (a) $1\text{ wt}\%$ ، (b) $1/5\text{ wt}\%$ ، (c) $2\text{ wt}\%$ ، (d) $2/5\text{ wt}\%$ و (e) $3\text{ wt}\%$ فریت LZB سینتر شده در $900^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ ۸۶
- شکل ۴-۲۰: تصویر الکترون‌های برگشتی SEM (a) از سطح مقطع سرامیک LT پوشش داده شده با الکتروود نقره، (b) ریزساختار سرامیک LT حاوی $2/5\text{ wt}\%$ فریت LZB و $20\text{ wt}\%$ پودر نقره سینتر شده در $900^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ و (c) آنالیز EDX از نقطه مشخص شده در تصویر (a) ۸۷
- شکل ۴-۲۱: تغییرات خواص میکروویو دی‌الکتریک سرامیک LT بر حسب مقدار LZB ۹۰
- شکل ۴-۲۲: الگوی XRD مربوط به (a) LZT سینتر شده در $1075^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ ، (b) LT سینتر شده در $1150^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ کامپوزیت LZT $20\text{ vol}\%$ (d)، LZT $30\text{ vol}\%$ (e) و LZT $40\text{ vol}\%$ سینتر شده در $1100^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ ۹۳
- شکل ۴-۲۳: ارتباط چگالی نسبی با دمای سینتر برای کامپوزیت‌های LT-x (x= 15, 20, 25, 30, 40) LZT ۹۴
- شکل ۴-۲۴: تغییرات چگالی نسبی بر حسب درصد حجمی فاز LZT برای نمونه‌های سینتر شده در دمای 1100°C به مدت ۲ h ۹۵
- شکل ۴-۲۵: تصاویر SEM کامپوزیت LZT $20\text{ vol}\%$ LT سینتر شده در شرایط $1100^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ با بزرگنمایی (a) ۱۰۰۰ برابر، (b) ۲۳۰۰ برابر، (c) ۵۰۰۰ برابر و (d) ۷۵۰۰ برابر ۹۶

شکل ۴-۲۶: تغییرات خواص میکروویو دی‌الکتریک بر حسب درصد حجمی جزء LZT برای

کامپوزیت‌های سینتر شده در $1100^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ ۱۰۰

شکل ۴-۲۷: آنالیز XRD مربوط به کامپوزیت (a) LT-20 vol.% LZT سینتر شده در $1100^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ ،

(b) LT-20 vol.% LZT همراه با ۲/۵ wt% فریت LZB و (c) LT-20 vol.% LZT همراه با wt%

۲/۵ فریت LZB و ۲۰ wt% نقره، سینتر شده در $900^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ ۱۰۳

شکل ۴-۲۸: چگالی بالک بر حسب درصد وزنی فریت LZB برای نمونه LT-20 vol.% LZT سینتر شده

در $900^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ ۱۰۴

شکل ۴-۲۹: تصاویر SEM مربوط به کامپوزیت LT-20 vol.% LZT (a) دوپ شده با ۱/۵ wt% فریت

LZB با بزرگنمایی ۵۰۰۰ برابر، (b) ۱۰۰۰۰ برابر، (c) دوپ شده با ۲/۵ wt% فریت LZB با

بزرگنمایی ۵۰۰۰ برابر و (d) ۱۰۰۰۰ برابر. ۱۰۶

شکل ۴-۳۰: آنالیز EDX از (a) نقطه ۱ (دانه تیره) و (b) نقطه ۲ (دانه روشن) مشخص شده در شکل

(d) ۴-۲۷ ۱۰۷

شکل ۴-۳۱: (a) تصویر SEM کامپوزیت LT-20 vol.% LZT+ 2.5 wt.% LZB+ 20 wt.% Ag سینتر

شده در $900^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ و (b) آنالیز EDX از دانه نشان داده شده در تصویر (a) ۱۰۸

شکل ۴-۳۲: خواص میکروویو دی‌الکتریک بر حسب درصد وزنی فریت LZB برای نمونه LT-20 vol.%

LZT سینتر شده در $900^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ ۱۱۰

فصل ۱ - مقدمه

امواج میکروویو بخشی از امواج الکترومغناطیس با فرکانس بین ۳۰۰ MHz تا ۳۰۰ GHz می‌باشند. این محدوده فرکانس معادل طول موج ۱ m تا ۱ mm در خلاء می‌باشد [۱]. در سیستم‌های مخابراتی به منظور ارسال و دریافت اطلاعات از این امواج استفاده می‌شود. در امواج میکروویو به دلیل بالا بودن فرکانس، پهنای باند^۱ بیشتری برای انتقال اطلاعات فراهم می‌شود. در ساخت فیلترها و اوسیلاتورها^۲ در سیستم‌های ارتباطی مخابراتی به منظور انتخاب یا حذف برخی از فرکانس‌ها، از مشددها^۳ استفاده می‌شود که نقش بسیار مهمی در توسعه و پیشرفت سیستم‌های مخابراتی دارند. در سیستم‌های میکروویو قدیمی از محفظه‌های فلزی با ابعاد بزرگ به عنوان مشدد استفاده می‌شد. این مشددها دارای ابعاد بزرگ بوده و دارای قابلیت جمع در مدارات مجتمع میکروویوی را نمی‌باشند. از طرف دیگر مشددهای استریپ لاین^۴ به خاطر فاکتور کیفیت و پایداری دمایی پایین باعث کاهش پایداری مدار می‌گردند. اخیراً مشددهای دی‌الکتریک (DR)^۵ به واسطه‌ی قابلیت مجتمع شدن آسان در مدارات (MICS)، اتلاف پایین و پایداری حرارتی خوب به خصوص در محدوده طول موج‌های میلی متری مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته‌اند. علاوه بر این استفاده از مشددهای دی‌الکتریک باعث کاهش حجم قطعات مدارات الکترونیکی و کاهش قیمت تمام شده دستگاه‌های مخابراتی می‌شود [۲ و ۳].

^۱ Bandwidth

^۲ Oscillators

^۳ Resonators

^۴ Stripline

^۵ Dielectric Resonator

^۶ Microwave Integrated Circuits

مشدهای دی‌الکتریک با سه فاکتور ثابت دی‌الکتریک^۱ (ϵ_r)، فاکتور کیفیت^۲ (Qf) و ضریب پایداری حرارتی فرکانس رزونانس^۳ (τ_f) شناسایی می‌شوند. استفاده از دی‌الکتریک‌های با ϵ_r بالا امکان ساخت مشدهای کوچکتر را فراهم خواهد کرد. Qf بالا منجر به افزایش توانایی انتخاب^۴ موج دلخواه و حذف سیگنال‌های مزاحم می‌شود و τ_f نزدیک به صفر پایداری مشدد در برابر تغییرات دما را نشان می‌دهد.

تحقیقات در زمینه‌ی یافتن مواد دی‌الکتریک که همزمان دارای سه ویژگی فوق باشند، همچنان ادامه دارد. به طور کلی یافتن دی‌الکتریکی که همزمان دارای ϵ_r بالا، Qf بالا و τ_f نزدیک صفر باشد، مشکل است چرا که این ویژگی‌ها مستقل از هم نمی‌باشند [۲]. مشکل دیگر در این زمینه دمای بالای سینتر دی‌الکتریک‌های دارای خواص خوب می‌باشد که منجر به افزایش هزینه تولید و عدم استفاده از این دی‌الکتریک‌ها در تکنولوژی^۵ LTCC می‌شود. با استفاده از تکنولوژی LTCC می‌توان اجزای پسیو مدارات مدارات مثل خازن‌ها، القاگرها، مقاومت‌ها، رزوناتورها و فیلترها را در زیر لایه مدار الکترونیکی جمع کرد و باعث کاهش ابعاد قطعات الکترونیکی شد [۴ و ۵]. در این تکنولوژی مشدهای دی‌الکتریک همراه با الکتروود نقره سینتر می‌شوند. دمای ذوب الکتروود نقره 960°C می‌باشد، لذا دمای سینتر دی‌الکتریک بایستی به زیر این دما کاهش پیدا کند.

سرامیک (Li_2TiO_3) (LT) با ساختار کریستالی نمک طعام^۶ یک مشدد دی‌الکتریک با خواص خوب می‌باشد. این دی‌الکتریک دارای ثابت دی‌الکتریک در حدود ۲۲، Qf در محدوده‌ی ۶۳۵۰۰-۱۵۰۰۰ GHz و مقدار τ_f برابر $20/3 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ می‌باشد. دمای سینتر این دی‌الکتریک حدود 1200°C می‌باشد [۶-۱۲]. با وجود بالا بودن ثابت دی‌الکتریک و فاکتور کیفیت این سرامیک به دلیل τ_f بالای این دی‌الکتریک

¹ Dielectric constant

² Quality factor

³ Temperature coefficient of resonant frequency

⁴ Selectivity

⁵ Low Temperature Cofireable Ceramic

⁶ Rock salt