بررسی ویژگی‌های دی‌الکتریک شیشه سرامیک سیستم $CaO-SiO_2-MgO$ در محدوده امواج مایکروویو

محبوبه کیانی زیتانی*[1]، محمد رضوانی[2]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه تبریز، گروه مهندسی مواد، تبریز، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

* Mahbube_kiani88@ms.tabrizu.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۷/۱۹، تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۱/۲۹)

چکیده

افزایش تقاضا برای دی‌الکتریک‌های با ثابت دی‌الکتریک و اتلاف دی‌الکتریک پایین (برای افزایش سرعت سیگنال) در محدوده طول موج مایکروویو منجر به افزایش روند تحقیقات در زمینه دی‌الکتریک‌های مایکروویو شده است. همچنین شیشه سرامیک‌ها دارای ویژگی‌های دی‌الکتریک برتر از فلزات و پلیمرهای آلی هستند. در این تحقیق سینترپذیری و ویژگی‌های دی‌الکتریک شیشه سرامیک سیستم $CaO-SiO_2-MgO$ بررسی شده است. نتایج حاصل از سینترپذیری نشان داد که این ترکیب برای کاربردهای دما پایین (LTCC) با دمای زینترینگ ^{o}C ۸۶۰-۸۰۰ (^{o}C > ۱۰۰۰) مناسب می‌باشد. شیشه سرامیک سینتر شده در دمای ^{o}C ۸۶۰ ثابت دی‌الکتریک ۶/۱۳ و اتلاف ۰/۰۰۳۷ را در محدوده ۱۲-۸ گیگاهرتز نشان داد.

واژه‌های کلیدی:

ثابت دی الکتریک، اتلاف دی الکتریک، شیشه سرامیک بر پایه فاز آکرمانیت، دایوپساید، ولاستونیت

۱- مقدمه

شیشه سرامیک‌ها گروهی از مواد سرامیکی هستند که از جوانه‌زنی و تبلور کنترل شده شیشه تشکیل می‌شوند [۱]. به‌طور معمول ریزساختار حاصل شده ۹۵-۵۰ درصد حجمی، بلوری است [۲]. در نتیجه‌ی پیشرفت سریع در تلفن همراه و سیستم‌های ارتباطات ماهواره‌ای، مواد دی‌الکتریک در فرکانس‌های مایکروویو گسترش یافتند [۲-۳]. سرامیک‌های ثابت دی‌الکتریک پایین به عنوان زیرلایه[1]، مدارهای مجتمع مایکروویو[2] استفاده می‌شوند [۴]. از میان روش‌های مختلف ساخت تجهیزات الکترونیک، فناوری LTCC[3] با سرعت بالا و عملکرد مناسب، برای تجهیزات، زیرلایه‌ها، مدول‌ها و اجزاء الکترونیکی مجتمع مورد توجه قرار گرفت. اجزاء غیرفعال[4] (مانند القاگرها[5] و خازن‌ها) درمیان زیرلایه‌ها تعبیه و با فلزات رسانا (مانند نقره و مس) در دماهای پایین بطور همزمان سینتر می‌شوند [۵]. دمای پایین بدین معنی است که زیرلایه‌های سرامیکی باید در دماهای کمتر از $^{\circ}C$ ۱۰۰۰ به منظور سینتر دوباره با مس ($^{\circ}C$ ۱۰۸۳)، نقره ($^{\circ}C$ ۹۶۱) و طلا ($^{\circ}C$ ۱۰۶۱)

Archive of SID

www.SID.ir

سینتر شوند [۶-۹]. به‌طور کلی مواد LTCC در دو گروه تقسیم بندی می‌شوند: مواد زیرلایه با ثابت دی‌الکتریک پایین (ε_r <۱۰) و مواد مورد استفاده در خازن که ثابت دی‌الکتریک متوسط یا بالایی دارند. به علت کنترل آسان خواص دی‌الکتریک و استحکام مکانیکی عالی، شیشه سرامیک‌ها به عنوان زیرلایه‌های سرامیکی چند منظوره با ثابت دی‌الکتریک پایین، استحکام بالا و ضریب انبساط حرارتی پایین استفاده می‌شوند [۱۰-۱۱]. سیستم‌های $CaO-B_2O_3-SiO_2$، $MgO-Al_2O_3-SiO_2$، $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ و $CaO-MgO-SiO_2$ مهم‌ترین شیشه سرامیک‌های گزارش شده با ثابت دی‌الکتریک پایین برای کاربردهای LTCC هستند [۱۲]. در سال ۲۰۰۸ Ch.Chiang و همکارانش ترکیبات مختلف سیستم $CaO-B_2O_3-SiO_2$ را در محدوده دمایی ۷۵۰°C تا ۱۲۶۰°C سینتر نمودند. در فرکانس ۱۰ گیگاهرتز ثابت دی‌الکتریک در دو گروه ۵-۴ و ۸-۷ گزارش شد. اتلاف دی‌الکتریک همه نمونه‌ها زیر ۰/۰۰۵ بود [۱۳]. Zhu و همکارانش در سال ۲۰۰۹ ترکیباتی از سیستم نام برده را به همراه افزودنی‌های $P_2O_5 + ZnO$ و $ZrO_2 + TiO_2$ و B_2O_3 در دمای ۸۲۰°C و ۹۰۰°C سینتر کردند. شیشه سرامیک‌های بدست آمده خواص مکانیکی بهتری داشتند، اما خواص دی‌الکتریک نامناسبی از خود نشان دادند. در فرکانس ۱۰ گیگاهرتز، ثابت دی‌الکتریک ۶/۵۱ و ۷/۰۷ و اتلاف دی‌الکتریک ۰/۰۰۲۹ و ۰/۰۰۱۹ گزارش شد[۱۴]. شیشه سرامیک‌های بر پایه فاز کوردریت[۶] ($2MgO.2Al_2O_3.5SiO_2$) به دلیل ثابت دی‌الکتریک پایین و ضریب انبساط حرارتی پایین برای کاربردهای الکترونیکی مناسب می‌باشند، اما در فرآیند ساخت به روش ذوب نیاز به دمای بالایی ($1600^{\circ}C \leq$) دارند. به علت ویسکوزیته بالای فاز آمورف و محدوده باریک دمای سینترینگ، بدست آوردن شیشه سرامیک‌های چگال با دمای عملیات حرارتی کمتر از ۱۰۰۰°C مشکل است [۱۵].

شیشه سرامیک سیستم $CaO-MgO-SiO_2$ نیز به عنوان یکی دیگر از سیستم‌های شیشه سرامیکی با ثابت دی‌الکتریک پایین و ویژگی‌های دی‌الکتریک خوب شناخته شده است [۱۰و۱۶]. سیستم نام‌برده در بین سیستم‌های مشهور دی‌الکتریک از کمترین اتلاف دی‌الکتریک برخوردار است [۱۲]. در سال ۲۰۰۹، M.Chang و همکارانش ترکیبات مختلف سیستم فوق را در دمای ۸۷۰°C سینتر کردند. فاز دایوپساید به عنوان فاز اصلی تبلور یافت. ثابت دی‌الکتریک برای همه نمونه‌ها در ۱ مگاهرتز در محدوده ۸/۱-۷/۲ و اتلاف دی‌الکتریک کمتر از ۰/۰۰۱۵ بود [۱۲]. در سال ۲۰۰۹، H.Wang و همکارانش با استفاده از روش سل- ژل در سیستم فوق به ثابت دی‌الکتریک ۷/۱۶ دست یافتند [۱۶]. باتوجه به اینکه ویژگی‌های دی‌الکتریک شیشه سرامیک‌های آکرمانیتی چندان بررسی نشده، در این تحقیق تلاش شده است ویژگی‌های دی‌الکتریک شیشه سرامیک سیستم $CaO-MgO-SiO_2$ بر پایه فاز آکرمانیت با دمای ذوب و دماهای سینترینگ پایین، مورد بررسی قرار گیرد.

۲- مواد وروش تحقیق

ترکیب شیشه پایه بصورت 36%CaO-48%SiO_2-16%MgO (wt%) انتخاب شد. به منظور بررسی ویژگی‌های دی‌الکتریک شیشه سرامیک سیستم $CaO-MgO-SiO_2$ بر پایه فاز آکرمانیت، ترکیب انتخاب شده در نمودار سه فازی $CaO-MgO-SiO_2$ در منطقه فازی آکرمانیت قرار دارد. همچنین ترکیب انتخاب شده به خطوط دمایی با دماهای پایین نزدیک است. با استفاده از مواد اولیّه مصرفی شامل سیلیس، کربنات کلسیم و هیدروکسید منیزیم با خلوص بالای ۹۹/۵٪ بچ ترکیب فوق، برای ذوب در بوته‌ی زیرکنی، توزین شد. ترکیب در دمای ۱۴۰۰ °C با نرخ $^{o}C\ min^{-1}$ ۱۰ و زمان نگهداری ۱ ساعت ذوب، و در آب سرد کوئنچ شد. فریت بدست آمده به مدت ۲ ساعت در خشک کن قرار داده شد، سپس با استفاده از هاون برقی به مدّت ۴۵ دقیقه آسیاب شده و به اندازه دانه زیر ۶۳ میکرون تبدیل شد. به منظور بررسی رفتار تبلور از آنالیز حرارتی افتراقی دستگاه Pyris TG/DTA, Perkin Elmer استفاده شد. نمونه‌های قرصی شکل با قطر ۲۲ mm و ضخامت ۴ mm با استفاده از روش پرس

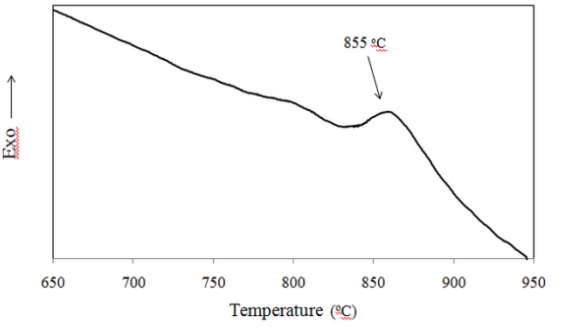
Archive of SID

www.SID.ir

با فشار MPa ۳۰ شکل داده شدند. دماهای مختلف عملیات حرارتی با نرخ $^{o}C\ min^{-1}$ ۱۰ و زمان نگهداری ۱ ساعت انتخاب شدند. به منظور بررسی سینترپذیری شیشه سرامیک‌های بدست آمده، دانسیته، انقباض، جذب آب و درصد تخلخل نمونه‌ها به روش ارشمیدس و دانسیته پیکنومتری اندازه‌گیری شد. نوع فازهای بلورین با استفاده از نتایج بدست آمده توسط پراش‌سنج Siemens D500, Germany شناسایی شدند. در نهایت ویژگی‌های دی‌الکتریک با استفاده از دستگاه Network Analyzers, 8757D محصول شرکت Agilent اندازه‌گیری شدند.

۳- نتایج و بحث

شکل (۱) آنالیز حرارتی DTA شیشه $36\%CaO-48\%SiO_2-16\%MgO$ را نشان می‌دهد.



شکل(۱): آنالیز حرارتی DTA شیشه‌ی $CaO-MgO-SiO_2$

با استناد به منحنی DTA دمای بیشینه تبلور T_p، ^{o}C ۸۵۵ بدست آمده است. با توجه به نتیجه بدست آمده از شکل (۱)، دماهای ^{o}C ۸۰۰، ۸۳۰ و ۸۶۰ با فاصله دمایی ^{o}C ۳۰ به عنوان دماهای عملیات حرارتی با مدت زمان نگهداری ۱ ساعت در نظر گرفته شد. شکل (۲) الگوی پراش اشعه ایکس XRD نمونه‌های تبلور یافته در دماهای مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در الگوی XRD شیشه‌ی سیستم نام‌برده مشاهده می‌شود به‌طور کامل آمورف می‌باشد و هیچ پیک تبلوری در آن مشاهده نمی‌شود. همچنین در دمای ^{o}C ۸۰۰ نیز الگوی XRD حالت آمورف را نشان می‌دهد امّا الگوی XRD این دما در زاویه 2θ حدود ۳۱ درجه، نشان دهنده تغییراتی مبنی بر تبلور فازی است که افزایش دما نیز این تغییرات را اثبات می‌کند. همان‌طور که در الگوی XRD دمای ^{o}C ۸۳۰ مشاهده می‌شود، با افزایش دما، تبلور فازی در شیشه رخ می‌دهد. در نتیجه آن فازهای آکرمانیت ($2CaO.2SiO_2.MgO$)، دایوپساید ($CaO.2SiO_2.MgO$) و ولاستونیت ($CaO.SiO_2$) در این دما با استفاده از CCD Card (01-088-0777,01-086-0932,01-072-2284) شناسایی شدند. فاز آکرمانیت شدّت بیشتری نسبت به دو فاز دیگر دارد. با افزایش دما تا ^{o}C ۸۶۰ شدّت پیک‌های تبلور افزایش یافت.

به منظور بررسی سینترپذیری شیشه سرامیک‌های عملیات حرارتی شده، دانسیته بالک، انقباض، جذب آب و تخلخل نمونه‌ها به روش ارشمیدس و دانسیته پیکنومتری اندازه‌گیری شد. همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود با افزایش دما از ^{o}C ۸۰۰ تا ^{o}C ۸۶۰ دانسیته نسبی و انقباض، ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. در طی سینترینگ نمونه‌های فریت شکل داده شده، سطح ویژه و انرژی سطحی کاهش می‌یابد. به‌عبارتی در عملیات حرارتی شیشه سرامیک‌ها دو فرآیند سینترینگ و تبلور همزمان رخ می‌دهد. اما تبلور در طی عملیات حرارتی سبب کاهش سرعت سینترینگ می‌شود [۱۷-۱۸]. به همین دلیل با افزایش دما از ^{o}C ۸۰۰، افزایش تبلور سبب افزایش ویسکوزیته فاز آمورف شده و بنابراین دانسیته نسبی و انقباض خطی کاهش می‌یابد. دمای ^{o}C ۸۶۰ بیشترین دانسیته نسبی، انقباض و کمترین مقدار تخلخل بسته را نشان می‌دهد. این امر بیانگر کامل شدن فرآیند سینترینگ در این دما است.

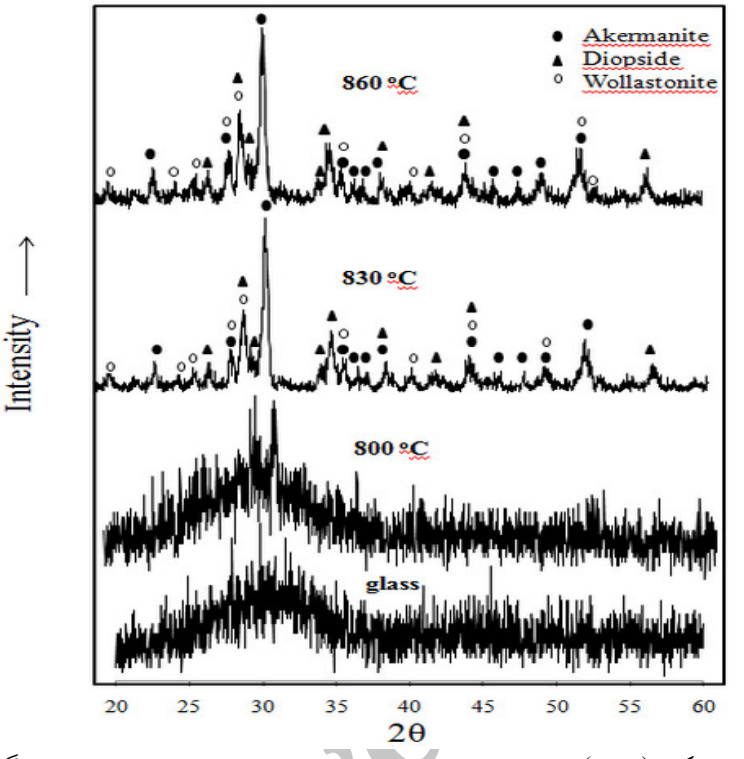
در نتیجه نمونه عملیات حرارتی شده در دمای ^{o}C ۸۶۰ به عنوان نمونه بهینه با ویژگی‌های فیزیکی مناسب انتخاب می‌شود.

به منظور بررسی ویژگی‌های دی‌الکتریک، نمونه‌ی شیشه سرامیک با ابعاد mm ۷ × ۱۰/۶ × ۲۲/۸ با فشار MPa ۳۰ پرس شد. با استفاده از دستگاه Network Analyzers در محدوده ۸-۱۲ GHz (باند x)، ثابت دی‌الکتریک و تانژانت تلفات نمونه‌ها اندازه‌گیری شدند. با استفاده از روش موج بر[۷]

Archive of SID

www.SID.ir

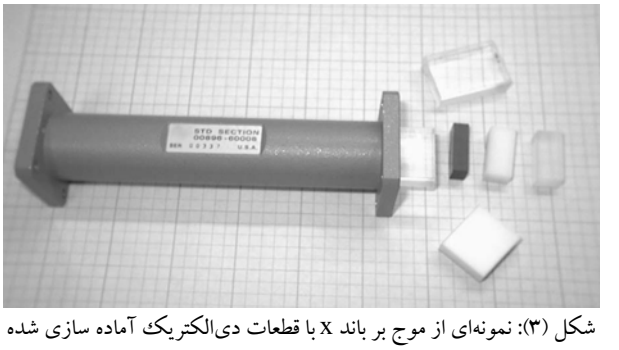
اندازه‌گیری ویژگی‌های دی‌الکتریک نمونه شیشه سرامیک انجام شد. شکل (۳) نمونه‌ای از موج بر محدوده باند X به همراه قطعات دی‌الکتریک آماده سازی شده را نشان می‌دهد.



شکل (۲): الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) نمونه‌های عملیات حرارتی شده در دماهای ۸۰۰ °C، ۸۳۰ و ۸۶۰ و زمان نگهداری ۱ ساعت

جدول(۱): ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌های عملیات حرارتی شده در دماهای مختلف

نمونه‌ها	درصد انقباض	دانسیته بالک (gr/Cm^3)	درصد تخلخل باز	دانسیته نسبی	درصد تخلخل بسته
۸۰۰ °C	۱۳/۵۲	۲/۹۴	۰/۰۰	۰/۸۸	۱۲
۸۳۰ °C	۱۲/۱۶	۲/۹۳	۰/۰۰	۰/۷۹	۲۱
۸۶۰ °C	۱۴/۳۰	۳/۰۰	۰/۰۰	۰/۹۶	۴



شکل (۳): نمونه‌ای از موج بر باند X با قطعات دی‌الکتریک آماده سازی شده

اساس اندازه گیری به روش موج بر، تبدیل پارامترهای S به ثابت دی‌الکتریک به شکل عدد مختلط می‌باشد. پارامترهای S به شکل S_{11} و S_{21} به ترتیب سیگنال‌های بازتابیده و عبوری هستند. با استفاده از روابط (۱) تا (۶) ثابت دی‌الکتریک نمونه شیشه سرامیک به شکل عدد مختلط محاسبه گردید [۱۹].

$$K = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \qquad (۱)$$

Archive

www.SID.ir

$$\Gamma = \kappa \pm \sqrt{\kappa^2 - 1} \quad (۲)$$

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \quad (۳)$$

$$X = \left(\frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}\right)^2 \quad (۴)$$

$$y = \left\{\frac{c}{\omega d} Ln\left(\frac{1}{T}\right)\right\}^2 \quad (۵)$$

$$\varepsilon_r = \sqrt{\frac{x}{y}} \quad (۶)$$

که d ضخامت نمونه، c سرعت نور در فضای آزاد، ω سرعت زاویه‌ای و ε_r ثابت دی‌الکتریک ماده است.

برای نمونه عملیات حرارتی شده در دمای $860^{o}C$ ثابت دی‌الکتریک در محدوده فرکانس GHz ۱۲-۸ (باند x) به شکل عدد مختلط $\varepsilon_r = 6/13 - 0/023i$ حاصل شد. بخش حقیقی عدد مختلط به عنوان ثابت دی الکتریک و نسبت بخش موهومی به حقیقی را اتلاف دی‌الکتریک می‌نامند. با توجه به عدد مختلط بدست آمده ثابت دی الکتریک ۶/۱۳ و اتلاف دی‌الکتریک ۰/۰۰۳۷ حاصل شد. واکنش دی‌الکتریک تابع پیچیده‌ای از فرکانس، دما و نوع جامد است. تحت شرایط DC، همه سازوکارها عملی هستند و ثابت دی‌الکتریک در حداکثر مقدار است. با افزایش فرکانس سازوکارهای مختلف قادر نخواهند بود از میدان تبعیت کنند و ثابت دی‌الکتریک افت می‌کند [۲۰]. سازوکارهای پلاریزاسیون در محدوده فرکانس‌های مختلف در ماده ایجاد می‌شوند. به همین دلیل کاهش ثابت دی‌الکتریک با افزایش فرکانس در محدوده وسیعی از فرکانس رخ می‌دهد. پلاریزاسیون الکترونی تا فرکانس 10^{15} Hz و پلاریزاسیون یونی تقریباً تا فرکانس 10^{13} Hz رخ می‌دهد بنابراین در محدوده فرکانس GHz ۱۲-۸ (باند x) پلاریزاسیون الکترونی و یونی سازوکارهای مؤثر بر ثابت دی‌الکتریک هستند [۲۱]. در این محدوده فرکانس تغییر ناگهانی سازوکار پلاریزاسیون رخ نمی‌دهد، در نتیجه تغییر محسوسی در ثابت دی‌الکتریک بوجود نمی‌آید. ثابت دی‌الکتریک و اتلاف دی‌الکتریک اندازه‌گیری شده برای نمونه عملیات حرارتی شده در دمای $860^{o}C$ برای تمامی فرکانس‌های محدوده GHz ۱۲-۸ (باند x) با تغییرات بسیار ناچیزی به ترتیب ۶/۱۳ و ۰/۰۰۳۷ بدست آمد. در شیشه سرامیک‌ها، ترکیب شیمیایی شیشه پایه، مقدار و نوع فازهای بلورین تشکیل شده و ریزساختار (ابعاد و شکل ذرات بلورین، نوع آرایش آنها، مقدار تخلخل...) تعیین کننده ویژگی‌های نهایی قطعه خواهد بود. همچنین این عوامل بر ثابت دی‌الکتریک نمونه نیز مؤثر خواهند بود [۱۰-۲۳]. ثابت دی‌الکتریک و اتلاف دی‌الکتریک بدست آمده در نمونه به ترکیب شیشه پایه و فازهای تبلور یافته وابسته است. فازهای تبلور یافته در نمونه عملیات حرارتی شده در دمای $860^{o}C$ فازهای آکرمانیت، دایوپساید و ولاستونیت هستند که فاز عمده تشکیل شده فاز آکرمانیت است. بنابراین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در نتیجه تبلور فاز آکرمانیت در نمونه می‌باشد.

٤- نتیجه‌گیری

۱- شیشه سرامیک $36\%CaO-48\%SiO_2-16\%MgO$ با دمای ذوب پایین $1400^{o}C$ و دمای عملیات حرارتی $860^{o}C$ ($1000^{o}C >$) نشان داد که برای تکنولوژی LTCC مناسب می‌باشد.

۲- بیشترین دانسیته نسبی در دمای $860^{o}C$ بدست آمد.

۳- ثابت دی‌الکتریک ۶/۱۳ و اتلاف دی‌الکتریک ۰/۰۰۳۷ بدست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که شیشه سرامیک $36\%CaO-48\%SiO_2-16\%MgO$ برای کاربردهای الکتریکی مناسب است و نسبت به تحقیقات پیشین در سیستم $CaO-MgO-SiO_2$، ثابت دی‌الکتریک پایین‌تری به‌دست آمد در نتیجه ویژگی‌های دی‌الکتریک بهبود یافته است.

۴- از این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که فاز آکرمانیت به عنوان فازی با ویژگی‌های دی‌الکتریک خوب یعنی ثابت دی‌الکتریک و اتلاف دی‌الکتریک پایین است.

Archive of SID

www.SID.ir

۵- مراجع

[1] W.Holand and G. Beal, "Glass Ceramic Technology", pp. 15-25, The American Ceramic Society, Westerville, Ohio 43081, 2000.

[2] E. Le Bourhis, "Glass / Mechanics and Technology", pp. 76-78, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2007.

[3] Dong Kyun Yim, "Microwave Dielectric Properties and Low-Temperature Sintering of $Ba_3Ti_4Nb_4O_{21}$Ceramics with B_2O_3 and CuO Additions", Journal of the European Ceramic Society, Vol. 27, pp. 3053-3057, 2007.

[4] M. T. Sebastian, "Dielectric Materials for Wireless Communication", pp. 1 and 11-13, Elsevier, Oxford, UK, 2008.

[5] R. Wang et al, "CaF_2–AlF_3–SiO_2 Glass-Ceramic with Low Dielectric Constant for LTCC Application", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 490, pp. 204-207, 2010.

[6] S. George and M. T. Sebastian, "Novel Low Loss, Low Permittivity Glass–Ceramic Composites for LTCC Applications", International Journal of Applied Ceramic Technology, Vol. 8, No. 1, pp. 172-179, 2011.

[7] Z. Yue et al, "Low-Temperature Sinterable Cordierite Glass-Ceramics for High-Frequency Multilayer Chip Inductors", Journal of Materials Science Letters, Vol. 19, pp. 213-215, 2000.

[8] S. George and M. Th. Sebastian, "Effect of Lithium-Based Glass Addition on the Microwave Dielectric Properties of $Ca[(Li_{1/3}Nb_{2/3})_{1-x}Ti_x]O_{3-\delta}$ Ceramics for LTCC Applications", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 473, pp. 336-340, 2009.

[9] M. Ohashi et al, "Microwave Dielectric Properties of Low-Temperature Sintered $Li_3AlB_2O_6$ Ceramic", Journal of the European Ceramic Society, Vol. 25, pp. 2877-2881, 2005.

[10] J. Kim et al, "Thermal and Dielectric Properties of Glass-Ceramics Sintered Based on Diopside and Anorthite Composition", J Electroceram, Vol. 23, pp. 209-213, 2009.

[11] K. M. Nair et al, "Dielectric Materials and Device", pp. 492-494, The American Ceramic Society, Westerville, Ohio 43081, 2002.

[12] M. W. Chang et al, "Properties of Glasses Based on the CaO–MgO–SiO2 System for Low-Temperature Co-Fired Ceramic", Ceramics International, Vol. 35, pp. 2513-2515.

[13] C. Chiang, "Densification and Micriwave Dielectric Properties of CaO-B_2O_3-SiO_2 System Glass-Ceramics", Ceramics International, Vol. 34, pp. 599-604, 2008.

[14] H. Zhu et al, "Low Temperature Sintering and Properties of CaO-B_2O_3-SiO_2 System Glass Ceramics for Composite", Vol. 482, pp. 272-275, 2009.

[15] G. H. Chen and X. Y. Liu, Sintering, "Crystallization and Properties of MgO-Al_2O_3-SiO_2 System Glass-Ceramics Containing ZnO", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 431, pp. 282-286, 2007.

[16] H. P. Wang, "Synthesis and Microwave Dielectric Properties of CaO–MgO–SiO_2 Submicron Powders Doped with Li_2O–Bi_2O_3 by sol–gel Method", Materials Research Bulletin, Vol. 44, pp. 619-622, 2009.

[17] M.O.Prdo et al, "On The Sinterability Of Crystallizing Glass Powders", Journal of Non-Crystalline Solids, Vol. 354, pp. 4589–4597, 2008.

[18] A. Karamanov and M. Peliono, "Sinter-Crystallization in the Diopside- Albite System part I. Formation of Induced Crystallization Porosity", Journal of the European Ceramic Society, Vol. 26, pp. 2511-2517, 2006.

[19] A.L.Paula, M.C.Rezende and J.J.Barroso, "Experimental Measurements And Numerical Simulation Of Permittivity And Permeability Of Teflon In X Band", J. Aerosp.Technol. Manag., São José dos Campos, Vol.3, No.1, pp. 59-64, 2011.

[20] Y. Shimada, Y. Yamashita & H. Takamizawa, "Low Dielectric Constant Multilayer Glass- Ceramic Substrate with Ag-Pd Wiring for VLSI Package", IEEE Transactions On Components, Hybrids. and Manufacturing Technology, Vol. 11, NO. 1, pp. 163-170, 1988.

[21] M. W. Barsoum, "Fundamentals of Ceramics", pp. 465-484, IOP Publishing Ltd, UK, 2003.

[22] M. S. Jogad, "Dielectric Measurement on Magnesium Aluminum Silicate Glass–Ceramics Prepared by Different Routes", Materials Letters, Vol. 57, pp. 619-627, 2002.

[23] F.M. Bertan et al, "Extruded $ZrSiO_4$ Particulate-Reinforced LZSA Glass–Ceramics Matrix Composite", Journal of Materials Proseccing Technolory, Vol. 29, pp. 1134-1142, 2009.

٦- پی‌نوشت

1- Substrate
2- Microwave Integrated Circuits (MIC)
3- Low Temperature Co-fired Ceramic
4- Passive
5- Inductors
6- Cordierite
7- Waveguide

Archive of SID

www.SID.ir