

بررسی شیشه‌سرامیک‌های شفاف $\text{Li}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ در حضور آلاینده‌ی Nd_2O_3

علی گلشانی^{۱*}، محمد رضوانی^۲، محمد صادق شاکری^۳

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

۲- دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- دانشجوی دکتری، مهندسی مواد، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

*a_golshani1988@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۲/۰۳، تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۷/۰۹)

چکیده

شیشه‌سرامیک‌های شفاف سیستم LAS را اصطلاحاً شیشه‌سرامیک‌های اپتیکی دقیق می‌نامند که در کاربردهایی نظیر فوتونیک، لیزرهای حالت جامد، تقویت کننده‌های نوری و غیره استفاده می‌شوند. هدف از این پژوهش، بهینه‌سازی شرایط تبلور این نوع شیشه‌سرامیک‌ها در حضور آلاینده‌ی Nd_2O_3 می‌باشد. بدین منظور، آنالیز حرارتی افتراقی (DTA) برای بررسی رفتار حرارتی و تعیین دماهای تبلور، آنالیز پراش اشعه‌ی X برای بررسی بلورهای ایجاد شده، آنالیز ریزساختاری با استفاده از SEM برای بررسی ریزساختاری نمونه‌ها و آنالیز اسپکتروسکوپی UV-Vis برای بررسی میزان شفافیت شیشه‌سرامیک‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با روش تبلور کنترلی می‌توان در حضور ۰/۵٪ Nd_2O_3 شیشه‌سرامیک شفاف تولید کرد.

واژه‌های کلیدی:

شیشه‌سرامیک شفاف LAS، محلول جامد β -کوارتز، تبلور کنترلی، نانوبلور، خواص اپتیکی.

۱- مقدمه

اساس تئوری‌های ارائه شده برای شفافیت شیشه‌سرامیک‌ها، وجود دو ویژگی در آن‌ها باعث ابقای شفافیت بعد از تبلور شیشه می‌شود: (۱) وجود اختلاف ضریب شکست کم بین فاز شیشه‌ای و فاز بلورین و (۲) نانومتری بودن بلورها [۲-۵]. شیشه‌سرامیک‌های سیستم LAS با توجه به ترکیب شیشه‌ی پایه می‌توانند حاوی فازهای مختلف بلورین پس از فرآیند تبلور باشند. در میان فازهای بلورین که قابلیت تبلور در این سیستم را دارند،

شیشه‌سرامیک‌های شفاف، مواد آمورف حاوی بلورهای بسیار کوچک (چند ده نانومتر) هستند که از طریق تبلور کنترل شده در شیشه‌ی پایه جوانه زده و پس از رشد بطور یکنواخت در زمینه‌ی شیشه‌ای پخش می‌شوند.

مفهوم تبلور کنترل شده‌ی شیشه شامل جدایش فاز بلورین از فاز شیشه‌ی پایه به صورت بلورهای ریز می‌باشد، به طوری که نوع و مورفولوژی فاز بلورین، سرعت رشد و همچنین اندازه‌ی نهایی آن‌ها توسط عملیات حرارتی مناسب قابل کنترل می‌باشد [۱]. بر

شیشه به ترکیب پایه اضافه شده است که این مقدار TiO_2 تاثیر خیلی اندکی بر خواص نوری دارد.

۲- روش تحقیق

با توجه به اینکه فاز محلول جامد β -کوارتز حاصل جدایش فازی در فصل مشترک فازهای شیشه‌ای β -ایوکریتایت و β -اسپودومن است، در نتیجه با توجه به نمودار فازی سیستم لیتیم آلومینوسیلیکات، ترکیبی در فصل مشترک فازهای ایوکریتایت و اسپودومن برای فرآیند ذوب، انتخاب شد.

شیشه‌ی LAS با ترکیب پایه $14.5Li_2O-19.8Al_2O_3$ -(wt%) $63.7SiO_2$ حاوی ۲٪ جواهرزای TiO_2 و صفر تا ۱/۵٪ آلایندگی Nd_2O_3 با استفاده از روش معمول ذوب و ریخته‌گری تهیه شد. برای تامین مواد اولیه پودرهای Li_2CO_3 ، Al_2O_3 ، SiO_2 ، TiO_2 و Nd_2O_3 با خلوص بالا، تهیه شده از شرکت Merck آلمان مورد استفاده قرار گرفتند. این پودرها پس از مخلوط سازی در بوتی آلومینایی در دمای $1400^\circ C$ و به مدت ۲ ساعت در کوره‌ی الکتریکی قرار گرفتند. مذاب شیشه در قالب فولادی پیش گرم شده در دمای $450^\circ C$ ریخته‌گری شده و در داخل کوره تا دمای اتاق سرد شد. آنالیز حرارتی DTA شیشه‌ها با استفاده از دستگاه Shimadzu-DTG60AH بدست آمد. همچنین بر اساس نتایج آنالیز DTA دمای جواهرزنی و رشد تعیین شد. مقدار، نوع و اندازه‌ی فازهای بلورین با استناد به نتایج الگوی پراش اشعه‌ی X نمونه‌ها و با استفاده از دستگاه Siemens X-ray diffractometer D500، مورد بررسی قرار گرفتند. به منظور بررسی ریزساختاری، نمونه‌های عملیات حرارتی شده پس از فرآیند پولیش مکانیکی در محلول HCl (۵ درصد) به مدت ۱ دقیقه اچ شده و پس از خشک کردن سطح، نمونه‌ها پوشش طلا داده شدند. ریزساختار آن‌ها توسط میکروسکوپ FE-SEM (Hitachi-S-4800) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به منظور بررسی میزان شفافیت، نمونه‌های حاصله با استفاده از دستگاه T70 UV-Vis PG instruments طیف سنجی شدند.

فاز فرآینددار محلول جامد β -کوارتز به دلیل ماهیت ساختاری، ضریب شکست تقریباً مشابه با شیشه‌ی پایه دارد. از این رو، تبلور فاز محلول جامد β -کوارتز شرط اول را محقق می‌سازد [۶-۷]. حال با انجام عملیات حرارتی کنترل شده و ایجاد نانوبلورهای محلول جامد β -کوارتز، شیشه‌سرامیک شفاف LAS تولید خواهد شد [۸-۹]. شیشه‌سرامیک‌هایی که حاوی بلورهای نانومتری فاز محلول جامد β -کوارتز باشند، شفافیت تقریباً برابر با شیشه‌ی پایه دارند و بازده اپتیکی آن‌ها بیش از ۹۵٪ می‌باشد [۱۰]. شیشه‌سرامیک‌های سیستم $Li_2O-Al_2O_3-SiO_2$ به دلیل داشتن شفافیت بالا در ناحیه‌ی مرئی، ضریب انبساط حرارتی نزدیک به صفر، پایداری شیمیایی بالا و خواص نوری غیرخطی در تجهیزات نوری حساس و مخصوصاً به عنوان محیط لیزر حالت جامد به کار می‌روند [۱۱-۱۴].

حضور آلایندگی‌های فلزات واسطه و عناصر نادر خاکی در زمینه‌ی شیشه‌ای باعث تغییر ترازهای الکترونی شیشه‌ی پایه شده و ویژگی‌های اپتیکی آن را تحت تاثیر قرار می‌دهند. تغییر در خواص اپتیکی ماده‌ی پایه در حضور عناصر ناخالصی را می‌توان به ترتیب به تغییرات انرژی لیگاند اوربیتال‌های d و f فلزات واسطه و عناصر نادر خاکی نسبت داد [۱۵]. به عنوان مثال به دلیل کاربردی بودن قطعات شیشه‌سرامیکی حاوی یون آهن در کاربردهای مگنتوآپتیکی و الکتروآپتیکی و همچنین تولید لیزرهای حالت جامد، می‌توان به روش تبلور کنترلی و در حضور مقادیر اندک افزودنی Fe_2O_3 ، شیشه‌سرامیک‌های شفاف تولید کرد [۱۶]. همچنین افزودن مقادیر اندک افزودنی‌های CeO_2 و Y_2O_3 ، میزان باندهای ممنوعه‌ی مستقیم و غیر مستقیم و انرژی تراز فرمی را کاهش می‌دهد و باعث ایجاد ویژگی نیمه-رسانایی در شیشه‌های سیستم LAS می‌شود [۱۷-۱۸].

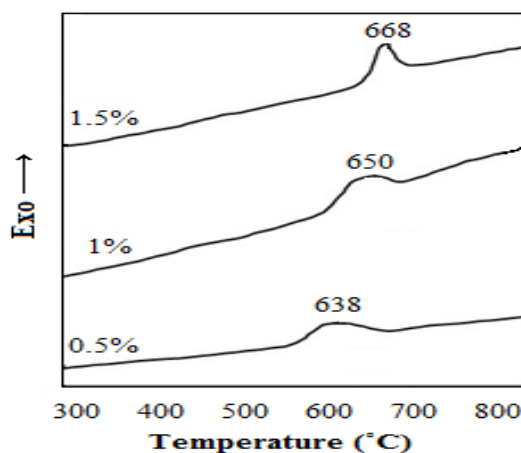
در تحقیق حاضر تلاش شده است تا تاثیر مقادیر مختلف آلایندگی Nd_2O_3 بر دمای عملیات حرارتی و خواص اپتیکی شیشه‌سرامیک‌های سیستم LAS بررسی شود. علاوه بر آلایندگی Nd_2O_3 ، ۲٪ TiO_2 به منظور جواهرزنی همگن در مرحله‌ی تولید

۳- نتایج و بحث

۱-۳- بررسی رفتار حرارتی شیشه ی LAS در حضور

آلایندہ ی Nd₂O₃ و تعیین برنامه عملیات حرارتی

شکل (۱) نتایج آنالیز DTA شیشه های حاوی مقادیر مختلف آلایندہ ی Nd₂O₃ را نشان می دهد. با استفاده از نتایج آنالیز DTA، برای بدست آوردن شیشه سرامیک های شفاف، نمونه ها تحت فرآیند تبلور دو مرحله ای (تبلور کنترل) قرار گرفتند. بر اساس تحقیقات گذشته، میانگین دماهای انتقال شیشه ای (T_g) و دمای نرمی دیلاتومتری (T_d) به عنوان دمای مناسب برای جوانه زنی (T_n) استفاده می شود [۱۹]. همچنین برای هر شیشه دماهای شروع پیک تبلور (T_{ost})، ۲۰°C بالاتر از T_{ost} و ۲۰°C بالاتر از دمای پیک تبلور (T_c)، به عنوان دماهای عملیات حرارتی در فرآیند رشد انتخاب شدند. دمای سوم تبلور برای بررسی جدایش فازی احتمالی شیشه ی LAS مورد آزمایش قرار گرفت.

شکل (۱): نمودار DTA شیشه LAS حاوی مقادیر مختلف Nd₂O₃

اطلاعات مربوط به شرایط عملیات حرارتی شیشه های حاوی افزودنی و مقادیر مختلف آلایندہ در جدول (۱) آمده است. با افزایش میزان آلایندہ ی Nd₂O₃ از ۰/۵٪ تا ۱/۵٪ دمای پیک تبلور از ۶۳۸°C به ۶۶۸°C افزایش یافت. این تغییر با استناد بر نقش شبکه سازی یون های Nd³⁺ در شبکه ی چهاروجهی های SiO₄ و کاهش اکسیژن های غیرپل ساز قابل پیش بینی می باشد.

۲-۳- بررسی تبلور شیشه سرامیک LAS در حضور آلایندہ-

ی Nd₂O₃

دلیل افزودن TiO₂ به ترکیب پایه، مناسب بودن جوانه زای TiO₂ به منظور جدایش فازی در حین تبلور و رسوب دادن نانوبلورهای محلول جامد β-کوارتز می باشد [۲۰]. بر اساس نتایج بدست آمده از نمودارهای DTA (شکل ۱) و فرآیند تبلور (جدول ۱)، روند کنترلی عملیات حرارتی برای تولید شیشه سرامیک ها و تعیین دماهای بهینه ی عملیات حرارتی انجام شد.

جدول (۱): دماهای عملیات حرارتی جوانه زنی و رشد در نمونه های حاوی

مقادیر مختلف آلایندہ ی Nd₂O₃

نمونه های حاوی ۲٪ TiO ₂ و ۰/۵٪ Nd ₂ O ₃				
کد نمونه	جوانه زنی		رشد	
	دما (°C)	زمان (h)	دما (°C)	زمان (h)
A	-	-	-	-
B	۵۵۰	۲	۵۸۰	۲
C	-	-	۶۰۰	-
D	-	-	۶۵۸	-
نمونه های حاوی ۲٪ TiO ₂ و ۱٪ Nd ₂ O ₃				
کد نمونه	جوانه زنی		رشد	
	دما (°C)	زمان (h)	دما (°C)	زمان (h)
E	-	-	-	-
F	۵۵۰	۲	۶۰۰	۲
G	-	-	۶۴۵	-
H	-	-	۶۷۰	-
نمونه های حاوی ۲٪ TiO ₂ و ۱/۵٪ Nd ₂ O ₃				
کد نمونه	جوانه زنی		رشد	
	دما (°C)	زمان (h)	دما (°C)	زمان (h)
I	-	-	-	-
J	۶۰۰	۲	۶۱۰	۲
K	-	-	۶۲۵	-
L	-	-	۶۸۸	-

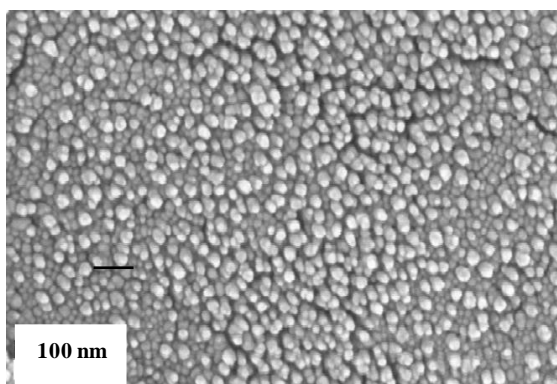
برای نمونه‌های حاوی بلورهای بیشتر از ۱۰۰nm، مقادیر دقیق اندازه‌ی بلور این نمونه‌ها ذکر نشده است. جدول (۲) اندازه‌ی بلورها را برای مقادیر مختلف افزودنی در دماهای مختلف نشان می‌دهد.

جدول (۲): متوسط اندازه‌ی بلور در نمونه‌های شیشه‌سرامیکی حاوی Nd_2O_3

نمونه	متوسط اندازه‌ی بلور (nm)
B	۵۵
C	۸۵
D	≥۱۰۰
F	۷۵
G	≥۱۰۰
H	≥۱۰۰
J	۸
K	≥۱۰۰
L	≥۱۰۰

۳-۳- بررسی ریزساختاری شیشه‌سرامیک‌های سیستم LAS در حضور آلایندگی Nd_2O_3

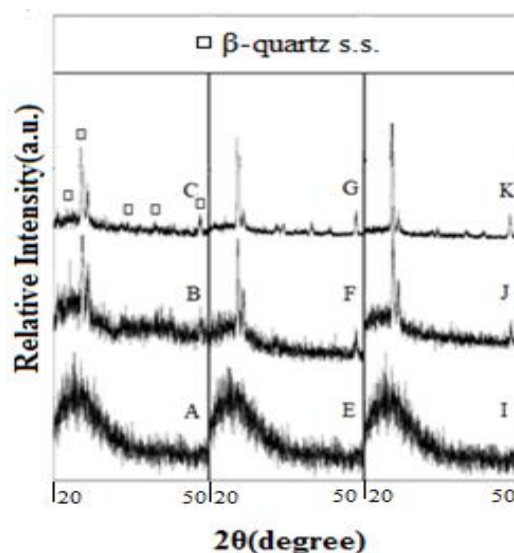
شکل (۳) تصویر SEM شیشه‌سرامیک حاوی ۲٪ جوانه‌زای TiO_2 و ۵٪ آلایندگی Nd_2O_3 که در دمای 550°C به مدت ۲ ساعت تحت عملیات حرارتی جوانه‌زنی و در دمای 580°C به مدت ۲ ساعت تحت عملیات حرارتی رشد قرار گرفته است را نشان می‌دهد. چنانچه در شکل مشخص است، بلورهای نانومتری در زمینه‌ی شیشه‌ای به صورت قطعات برجسته تشکیل شده‌اند.



شکل (۳): تصویر تهیه شده توسط SEM از نمونه‌ی شیشه‌سرامیکی

شکل (۲) الگوی XRD شیشه‌سرامیک‌های حاوی مقادیر مختلف آلایندگی Nd_2O_3 که تحت شرایط مختلف طبق جدول (۱) عملیات حرارتی شده‌اند را نشان می‌دهد.

بررسی‌های انجام گرفته در مورد الگوهای XRD حاکی از آن است که محلول جامد β -کوارتز در تمامی نمونه‌ها متبلور شده است. وجود پیک‌های پهن با شدت قابل مقایسه با شدت زمینه را می‌توان دلیلی برای وجود شفافیت در شیشه‌سرامیک‌ها دانست. افزایش شدت پیک‌های تبلور با افزایش دمای عملیات حرارتی را می‌توان به افزایش کسر حجمی بلور در زمینه‌ی شیشه‌ای نسبت داد. همچنین با کاهش دمای عملیات حرارتی و کاهش میزان آلایندگی، اندازه‌ی بلورها کاهش می‌یابد.



شکل (۲): الگوی XRD شیشه و شیشه‌سرامیک‌های مختلف حاوی ۰/۵٪ تا Nd_2O_3 ۱/۵٪

با استفاده از رابطه‌ی شرر [۲۱] میزان متوسط اندازه‌ی بلورها محاسبه شد.

$$t = 0.9 \lambda / B \cos \theta_B \quad (1)$$

در این رابطه، t میانگین اندازه‌ی بلورها، B پهنای پیک در نصف ارتفاع بیشینه، λ طول موج پرتو X برخوردی و θ_B زاویه‌ی براگ مربوط به پیک مورد بررسی است. شایان ذکر است که به دلیل پایین بودن دقت معادله‌ی شرر برای تخمین اندازه‌ی متوسط بلور

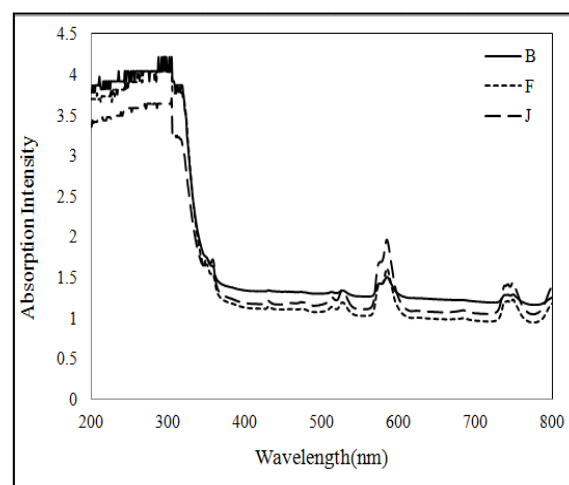
تبلور کنترلی به راحتی می توان حتی در حضور ۱/۵٪ آلایندہ، شیشه سرامیک شفاف تولید کرد. اندازه ی بلورها عمدتاً نانومتری بودند. بررسی طیف سنجی انجام شده نیز در محدوده ی مرئی شفافیت شیشه سرامیک های حاصل شده را به اثبات رساند. این شیشه سرامیک ها می توانند جایگزین تک بلور YAG آلایندہ شده با Nd³⁺ به منظور نشر لیزر طول موج مادون قرمز باشند.

۵- مراجع

- [1] R. Krsmanovic, S. Bals, G. Bertoni & G. Van Tendeloo, "Structural Characterization of Er-doped Li₂O-Al₂O₃-SiO₂ Glass Ceramics", Optical Materials, Vol. 30, pp. 1183-1188, 2008.
- [2] P. Hartmann, R. Jedamzik, S. Reichel & B. Schreder, "Optical Glass and Glass Ceramic Historical Aspects and Recent Developments", Applied Optics, Vol. 49 pp. 157-176, 2010.
- [3] K. H. Park & D. W. Shin, "The Correlation between the Crystalline Phases and Optical Reflectance in Glass Ceramics for IR reflector", Journal of Ceramic Processing Research, Vol. 3, pp. 153-158, 2002.
- A. Buch, M. Ish-Shalom, R. Reisfeld, A. Kisilev & E. Greenberg, "Transparent Glass Ceramics: Preparation, Characterization and Properties", Materials Science and Engineering, Vol. 71, pp. 383-389, 1985.
- [4] P. Riello, P. Canton, N. Comelato, S. Polizzi, M. Verita, G. Fagherazzi, H. Hofmeister & S. Hopfe, "Nucleation and Crystallization Behavior of Glass Ceramic Materials in the Li₂O-Al₂O₃-SiO₂ System of Interest for their Transparency Properties", Journal of Non-crystalline Solids, Vol. 288, pp. 127-139, 2001.
- [5] A. Arvind, A. Sarkar, V. K. Shrikhande, A. K. Tyagi & G. P. Kothiyal, "The Effect of TiO₂ Addition on the Crystallization and Phase Formation in Lithium Aluminum Silicate (LAS) Glasses Nucleated by P₂O₅", Journal of Physics and Chemistry of Solids, Vol. 69, pp. 2622-2627, 2008.
- [6] M. Clara Gonçalves, F. Santos & R. M. Almeida, "Rare-Earth-Doped Transparent Glass Ceramics", C. R. Chimie, Vol. 5, pp. 845-854, 2002.

۳-۴- بررسی شفافیت شیشه سرامیک LAS در حضور آلایندہ ی Nd₂O₃

شکل (۴) طیف جذبی مرئی-فرابنفش (UV-Vis) شیشه-سرامیک های شفاف را نشان می دهد. با استناد بر روند نشان داده شده در این شکل، مشخص است که تمامی نمونه ها که در دمای پای پیک تبلور (Onset) عملیات حرارتی شده اند، شفاف می-باشند. بنابراین می توان در حضور مقادیر مختلف آلایندہ ی Nd₂O₃ و با انجام عملیات حرارتی کنترل شده در دمای پای پیک تبلور، شیشه سرامیک های شفاف تولید کرد. نمونه های دیگر مات یا نیمه شفاف بودند که طیف آن ها به دلیل اهمیت کم گزارش نشده است. در شکل (۴)، جذب های موجود در طول موج های ۷۵۰ و ۶۰۰ nm به ترتیب مربوط به انتقالات الکترونی $^4F_{3/2} \rightarrow ^4G_{5/2}$ و $^4F_{3/2} \rightarrow ^4G_{7/2}$ می باشد که عوامل اصلی نشر لیزری در طول موج های مادون قرمز نزدیک برای مواد حاوی یون Nd³⁺ می باشد [۹].



شکل (۴): طیف جذبی مرئی-فرابنفش شیشه سرامیک های مختلف در دمای شروع پیک تبلور

۴- نتیجه گیری

تولید شیشه سرامیک شفاف در حضور آلایندہ ی Nd₂O₃ با کنترل عملیات حرارتی دو مرحله ای امکان پذیر شد. فاز تشکیل شده محلول جامد β-کوارتز است. افزودنی اکسید نئودیموم منجر به افزایش دمای بیشینه ی تبلور می شود. با انجام فرآیند

- [14] S. Rani, S. Sanghi, A. Agarwal & V. P. Seth, "Study of Optical Band Gap and FTIR Spectroscopy of $\text{Li}_2\text{O-Bi}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5$ Glasses", *Spectrochimica Acta A*, Vol. 74, pp. 673-677, 2009.
- [۱۵] ع. گلشنی، م. رضوانی و م.ص. شاکری، "بررسی خواص اپتیکی شیشه‌سرامیک‌های شفاف سیستم LAS در حضور آلاندهی Fe_2O_3 قابل کاربرد به عنوان لیزر حالت جامد و مصارف انرژی بالا"، اولین همایش مواد پیشرفته در صنایع هوایی و انرژی، کرج، پژوهشگاه مواد و انرژی، مهر ۱۳۹۱.
- [16] M. S. Shakeri & M. Rezvani, "Optical Band Gap and Spectroscopic Study of Lithium Aluminosilicate Glass Containing Y^{3+} Ions", *Spectrochimica Acta*, Vol. A79, pp. 1920-1925, 2011.
- [17] M. S. Shakeri & M. Rezvani, "Optical Properties and Structural Evaluation of $\text{Li}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-TiO}_2$ Glassy Semiconductor Containing Passive - Agent CeO_2 ", *Spectrochimica Acta A*, Vol. 83, pp. 592-597, 2011.
- [18] Z. Strnad, "Glass Ceramic Materials, Second edition, Elsevier Science Publishers", ISBN: 444995242.
- [19] A. M. Hu, M. Li & D. L. Mao, "Growth Behavior, Morphology and Properties of Lithium Aluminosilicate Glass Ceramics with Different Amount of CaO, MgO and TiO_2 Additives", *Ceramics International*, Vol. 34, pp. 1393-1397, 2008.
- [20] L. Cervinca & J. Dusil, "Determination of Crystallinity in Crystallized Glasses by X-ray Diffraction", *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 21, pp. 125-136, 1976.
- [7] Y. Li, K. Liang, J. Cao & B. Xu, "Spectroscopy and Structural State of V^{4+} Ions in Lithium Aluminosilicate Glass and Glass Ceramic", *Journal of Non-Crystalline Solid*, Vol. 356, pp. 502-508, 2010.
- [8] A. A. Dymnikov, O. S. Dymshits, A. A. Zhilin, V. A. Savostjanov & T. I. Chuvaeva, "The structure of Luminescence Centers of Neodymium in Glasses and Transparent Glass Ceramics of the $\text{Li}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ System", *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 196, pp. 67-72, 1996.
- [۹] م.ص. شاکری و م. رضوانی، "رابطه بین ساختار و شفافیت در شیشه-سرامیک‌های شفاف سیستم LAS حاوی بلورهای نانومتری β -کوارتز"، فصلنامه علمی-پژوهشی مهندسی مواد مجلسی، سال ششم، شماره ۲، بهار ۱۳۹۱.
- [10] A. M. Malyarevich, I. A. Denisov, Y. V. Volk, K. V. Yumashev, O. S. Dymshits & A. A. Zhilin, "Nanosized Glass Ceramics Doped with Transition Metal Ions: Nonlinear Spectroscopy and Possible Laser Applications", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 341, pp. 247-250, 2002.
- [11] K. Cheng, "Carbon effects on Crystallization Kinetics of $\text{Li}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ Glasses", *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 238, pp. 152-157, 1998.
- [12] M. Mortier, A. Monteville, G. Patriarche, G. Maze & F. Auzel, "New Progresses in Transparent Rare-Earth-Doped Glass-Ceramics", *Optical Material*, Vol. 16, pp. 255-267, 2001.
- [13] G. Feng, Sh. Zhou, J. Bao, X. Wang, Sh. Xu & J. Qiu, "Transparent Ni^{2+} -Doped Lithium Aluminosilicate Glass-Ceramics with Broadband Infrared Luminescence", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 457, pp. 506-509, 2008.