

رفتار ترمولومینسانسی $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ سنتز شده با روش‌های مختلف جهت دوزیمتری فردی

خیرالله محمدی، علیرضا پورابراهیم، علی حسینی زاده

دانشگاه صنعتی مالک اشتر

چکیده: اگرچه اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) به دلیل خواصی مانند سختی بالا، خنثی بودن از نظر شیمیایی و شفافیت، داشتن نقطه‌ی ذوب بالا، عایق الکتریسیته و هادی حرارت بودن، کاربرد بسیاری در صنایع مختلف پیدا کرده اما استفاده از آن در حوزه‌ی دوزیمتری ترمولومینسانس به دلیل حساسیت پایین، از گذشته با محدودیت‌هایی روبه‌رو بوده است. برای غلبه بر این مشکل، ایجاد ساختاری با عیوب آنیونی و همراه با ناخالصی با رشد کروندوم ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) از مذاب در دمای 2052°C و محیط احیاءکنندگی شدید و حضور گرافیت پیشنهاد شد که با دوپ کردن کربن در ساختار اکسید آلومینیوم همراه بود. اگرچه میزان حساسیت ترمولومینسانس این ماده ۶۰-۴۰ برابر $\text{LiF:Mg, Ti (TLD-100)}$ بود و باند نشری در $410\text{-}420\text{nm}$ داشت اما به دلیل تجهیزات مورد نیاز، انرژی مصرفی زیاد و شرایط حساس رشد و پیدا کردن روشی مناسب از نظر هزینه و مشخصه‌ی ترمولومینسانسی، بررسی رفتار ترمولومینسانسی $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ سنتز شده از روش‌های مختلف آغاز شد. در این مقاله به بررسی رفتار ترمولومینسانسی $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ در اشکال متفاوت بلوری، پودری و فیلم نازک، سنتز شده به وسیله‌ی روش‌های مختلف اعم از EFG، گرادیان دمایی، سنتز احتراقی محلول، پرس سرد و آندایزینگ پرداخته شد. نتایج نشان داد که روش سنتز احتراقی در مقایسه با روش‌های دیگر از نظر هزینه و خواص دوزیمتری مناسب تر می‌باشد.

کلمات کلیدی: رفتار ترمولومینسانس، اکسید آلومینیوم دوپ شده با کربن، روش‌های ساخت، دوزیمتری فردی

۱- مقدمه

اکسید آلومینیوم در شکل بلوری خود معروف به کروندوم بوده و در مقیاس موس بعد از الماس در رتبه‌ی دوم قرار دارد. هم‌چنین شفاف و از نظر شیمیایی خنثی بوده و نقطه‌ی ذوب بالایی، بیش از 2002°C ، دارد. $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ عایق الکتریسیته‌ی خوبی بوده و هدایت حرارتی مناسبی دارد. این ویژگی‌ها سبب استفاده‌ی گسترده از این ماده در حوزه‌های الکترونیکی، نوری و صنعتی شده است. ساختار بلوری $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ، هگزاگونال فشرده بوده که یون‌های اکسیژن (O^{2-}) در گوشه‌ی سلول واحد قرار داشته و جاهای خالی هشت وجهی شبکه توسط یون‌های آلومینیوم (Al^{3+}) اشغال شده‌اند. برای خنثی نگهداشتن بار کلی این ترکیب و با توجه به بارهای یون‌های اکسیژن (۲ بار منفی) و آلومینیوم (۳ بار مثبت)، دو سوم جاهای خالی توسط یون‌های Al^{3+} اشغال شده است [۱].

بررسی‌های اولیه درباره‌ی خواص ترمولومینسانسی $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ در سال ۱۹۵۷ توسط ریک^۱ و دانیلز^۲ صورت پذیرفت که تلاش‌های زیادی را برای درک بهتر جزئیات نشر ترمولومینسانس در بلورهای مختلف انجام می‌دادند. اگرچه بسیاری از خواص $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ برای کار در حوزه‌ی دوزیمتری ترمولومینسانس مناسب بود اما حساسیت پایین آن نسبت به تابش یونیزه کننده در مقایسه با مواد شناخته شده در آن زمان مانند LiF سبب محدودیت کاربرد $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ در این حوزه شده بود. برای رفع این مشکل، آکسلرد^۳ و همکارانش [۳] $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ را همراه با عیوب آنیونی به وسیله‌ی دوپ کردن کربن در ساختار با رشد $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ از مذاب در دمای 2052°C و محیط احیاءکنندگی شدید و

¹ Rieke

² Daniels

³ Akselrod

حضور گرافیت انجام دادند. این روش که معروف به فرآیند استفانو^۱ است، سبب ایجاد ناخالصی‌هایی (مانند کربن) در بلور با خلوص بالا شد. وجود کربن به شکل یون‌های C^{2+} سبب تسریع تشکیل جاهای خالی اکسیژن شده و منجر به سنتز ماده‌ای دارای عیوب آنیونی^۲ شد. تولید لومینسانس در $\alpha-Al_2O_3:C$ نسبت به جاهای خالی اکسیژن حساس بوده و حالات مختلفی دارد که مهم‌ترین آن‌ها مراکز F و F^+ هستند. اثر متقابل این مراکز سبب تولید ترمولومینسانس و لومینسانس تهییج شده با نور می‌شود. مکانیزم اصلی در دوزیمتری ترمولومینسانس و لومینسانس تهییج شده با نور با استفاده از $\alpha-Al_2O_3:C$ ، به صورت آزاد شدن الکترون‌های گرفتار شده طی پرتودهی به وسیله‌ی تهییج نوری و حرارتی و سپس باز ترکیب الکترون‌ها در مراکز F^+ جهت تولید لومینسانس بیان شده که توسط معادله‌ی (۱) تشریح می‌شود.



F^* یک مرکز F تهییج شده است. در واقع حساسیت ترمولومینسانس و لومینسانس تهییج شده با نور $\alpha-Al_2O_3:C$ به غلظت مرکز F^+ وابسته است [۱،۴].

اخیرا تلاش‌های بسیار زیادی برای افزایش حساسیت اکسید آلومینیوم با استفاده از دوپانت‌های مختلف مانند Si ، Ti ، Mg و Cr و Ni صورت پذیرفته است. براساس تحقیقات انجام شده توسط آکسلرد و همکارانش [۵] در سال ۱۹۹۳، حساسیت ترمولومینسانسی $\alpha-Al_2O_3:C$ ، ۶۰-۴۰ برابر TLD-100 می‌باشد. مزیت‌های دیگر $\alpha-Al_2O_3:C$ در حوزه‌ی ترمولومینسانسی شامل حالت خطی در محدودی دوز وسیع، منحنی تابش ساده، محو کنندگی پایین، تکرارپذیری خوب، استحکام مکانیکی و عدد اتمی نسبتا پایین آن است. مواد دوزیمتری ترمولومینسانس که هم‌اکنون در حال استفاده هستند، به شکل‌های مختلفی از جمله تک‌بلور، پودر و فیلم نازک و با روش‌های گوناگونی مانند رشد بلور [۶،۷]، سل-ژل [۸]، ژل پلی آکریلامید [۹]، سنتز احتراقی [۱۰،۱۱]، اکسیداسیون الکتروشیمیایی [۱۲] ساخته می‌شوند.

هدف از این پژوهش، بررسی ویژگی‌های ترمولومینسانسی اکسیدهای آلومینیوم دوپ شده با استفاده از روش‌های EFG^۳، گرادیان دمایی، سنتز احتراقی محلول، پرس سرد و آندایزینگ و همچنین مقایسه‌ی مواد و تجهیزات آزمایشگاهی لازم جهت تولید این مواد است.

۲- روش‌های ساخت

از زمانی که $\alpha-Al_2O_3:C$ به عنوان یک ماده‌ی ترمولومینسانس برای کار در حوزه‌ی دوزیمتری شناخته شد، روش‌های متفاوتی برای تولید آن به خصوص به شکل بلور مورد توجه قرار گرفت. روش سنتی برای تهیه‌ی $\alpha-Al_2O_3:C$ روش چکرالسکی^۴ بود که در آن رشد بلور از دمای ذوب ($2050^\circ C$) و تحت اتمسفر بسیار کاهنده در حضور گرافیت انجام شد. در این روش، ویژگی‌های دوزیمتری به پارامترهای رشد بسیار وابسته بود و کوچکترین تغییر در شرایط رشد، تشکیل تله‌ها و توزیع عیوب را تحت تاثیر قرار می‌داد. الحاق کربن به ساختار با دوپ شدن و رشد همزمان بلور در دماهای بالا انجام پذیرفت و از آنجا که کنترل الحاق کربن به درون مذاب، از جایی که بلور رشد می‌کرد، دشوار بود پس کنترل ایجاد عیوب هم بسیار سخت بود [۱۳]. علاوه بر این روش سنتی، روش‌های ساخت $\alpha-Al_2O_3:C$ دیگری وجود داشته که هر کدام دارای مکانیزم‌های مختلف و مواد اولیه و تجهیزات گوناگونی بوده که در ادامه به آن‌ها اشاره خواهد شد.

۲-۱- رشد بلور

یانگ^۵ و همکارانش [۶] برای ساخت بلور $\alpha-Al_2O_3:C$ با حساسیت بالا از روش EFG استفاده کردند که توسعه یافته‌ی روش چکرالسکی توسط لابل^۶ بود و برای تولید اکسیدهای آلومینیوم با اشکال متفاوت به کار می‌رفت. در این روش با طراحی مناسب

¹ Stepanov

² Anion-defective

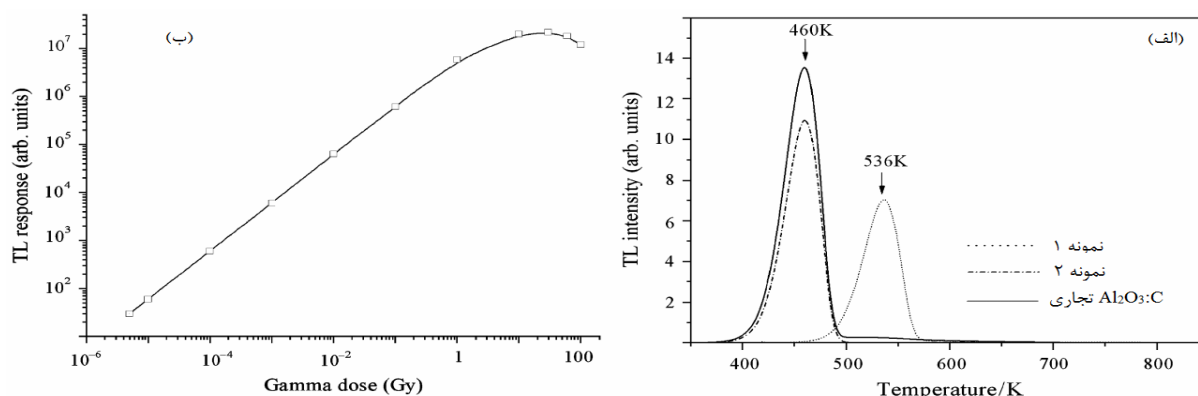
³ Edge-defined, Film-fed Growth

⁴ Czochralsky

⁵ Yang

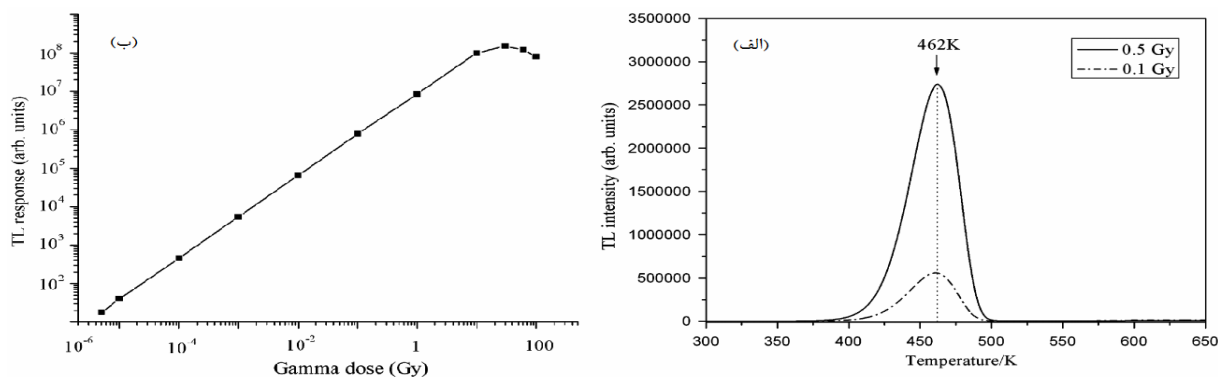
⁶ Labelle

یک قالب و بوت‌هی مولیبدنی و استفاده از اتمسفر بسیار کاهنده و سازه و حفاظ‌های گرافیتی که به عنوان منبع تأمین کننده‌ی کربن در طول رشد $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ عمل می‌کردند، تولید بلورها انجام می‌پذیرفت. سپس بلورها در اتمسفرهای مختلف و زمان‌های گوناگون آنیل می‌شد. با توجه به شکل ۱ (الف) می‌توان بیان کرد که نمونه‌ی تهیه شده از EFG (نمونه‌ی ۱) و نمونه‌ی آنیل شده در اتمسفر هیدروژن و دمای 1400°C به مدت ۸۰ ساعت (نمونه‌ی ۲)، به ترتیب پیک تابشی مشخصی را در 263°C و 187°C از خود نشان داده‌اند. طبق پاسخ ترمولومینسانس بلور آنیل شده در اتمسفر هیدروژن نسبت به منبع ^{137}Cs که در شکل ۱ (ب) آورده شده است، مشخص است که در محدوده‌ی دوز $0.1\text{--}10\text{ Gy}$ پاسخ خطی خوبی وجود داشته و از ۰/۲ تا 1.0 Gy پاسخ تقریباً خطی شده و در حدود 1.0 Gy اشباع رخ داده است.



شکل ۱- (الف) منحنی ترمولومینسانس نمونه‌های ۱ و ۲ و بلور $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ تجاری، (ب) پاسخ ترمولومینسانس نمونه‌ی ۲ به دوز گاما [۶Cs].

یانگ و همکارانش [۷] در سال ۲۰۰۸ از روش گرادیان دمایی برای ساخت بلور $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ با حساسیت بالا استفاده کردند. روش گرادیان دمایی یک تکنیک انجماد جهت دار بوده که فصل مشترک جامد-مایع زیر سطح مذاب غوطه‌ور شده و توسط مذاب با دمای بالا محاصره می‌شود. رشد بلور تحت گرادیان‌های دمایی پایین انجام شده و حوزه‌ی دمایی در مذاب مخالف جهت میدان گرانشی بوده که سبب به حداقل رساندن اثرات همرفتی می‌شود. بعد از اختلاط اکسید آلومینیوم و گرافیت، پودرها در فشار 25.0 MPa فشرده شدند. کوره‌ی مخصوص این فرآیند [۱۴] در دمای 1827°C به مدت چند ساعت حرارت دیده تا آلودگی‌های محیطی به حداقل رسیده و سپس فرآیند رشد در خلاء و دمای 2077°C انجام پذیرفت. بلور آنیل شده دارای یک پیک تابشی مشخص در 189°C بود که با افزایش دوز بتا، شدت ترمولومینسانسی افزایش می‌یافت (شکل ۲ (الف)). همانطور که در شکل ۲ (ب) مشخص است، پاسخ ترمولومینسانس بلور رشد داده شده در محدوده‌ی دوز $0.1\text{--}10\text{ Gy}$ خطی بوده و اشباع در 3.0 Gy اتفاق افتاده است.

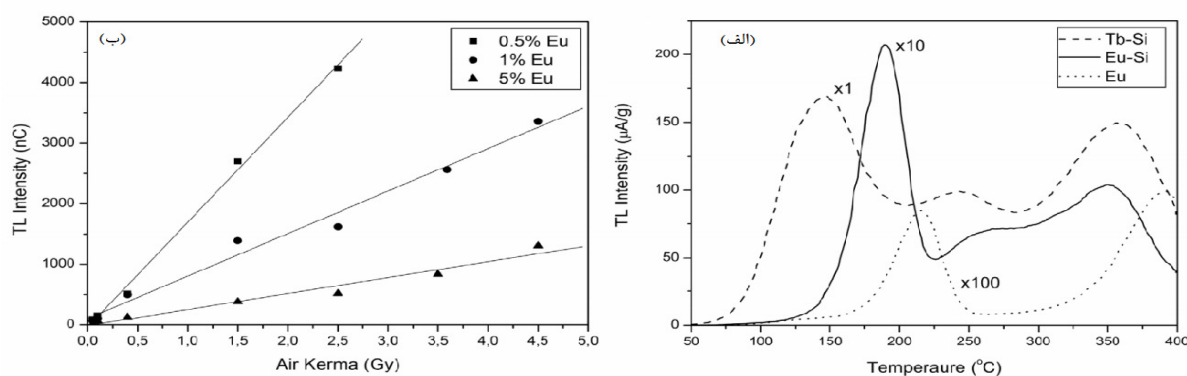


شکل ۲- (الف) منحنی‌های ترمولومینسانس بلور $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ رشد داده شده نسبت به دوز بتا، (ب) پاسخ ترمولومینسانس بلور $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ رشد داده شده نسبت به دوز گاما [۷].

۲-۲- سنتز پودر و قرص

اخیرا برای دوپ کردن عناصر نادر زمین در ساختار اکسید آلومینیوم از روش سنتز احتراقی محلول استفاده شده است. در این روش از یک محلول آبی اشباع از نمک فلزی دلخواه (معمولا نیترات‌ها به دلیل خواص اکسیدکنندگی مناسب و حلالیت زیاد در آب) و سوخت مناسب (مانند اوره) به عنوان احیاءکننده استفاده شد. مکانیزم روش سنتز احتراقی شامل یک واکنش اکسایش-کاهش بین نمک فلزی و سوخت و در نتیجه آزاد شدن حرارت ناشی از این واکنش بوده که منجر به تشکیل یک ماده‌ی اکسیدی با ساختار نانو می‌شود. از مشخصه‌های این روش، امکان دستیابی به پودرهای اکسیدی خالص و بلوری در مقیاس نانو با سطح ویژه‌ی بالا، رسیدن به فازهای دما بالا، سریع بودن فرآیند، دوستدار محیط زیست بودن و نیاز به انرژی کمتر به دلیل انجام واکنش احتراقی است [۱۰، ۱۵].

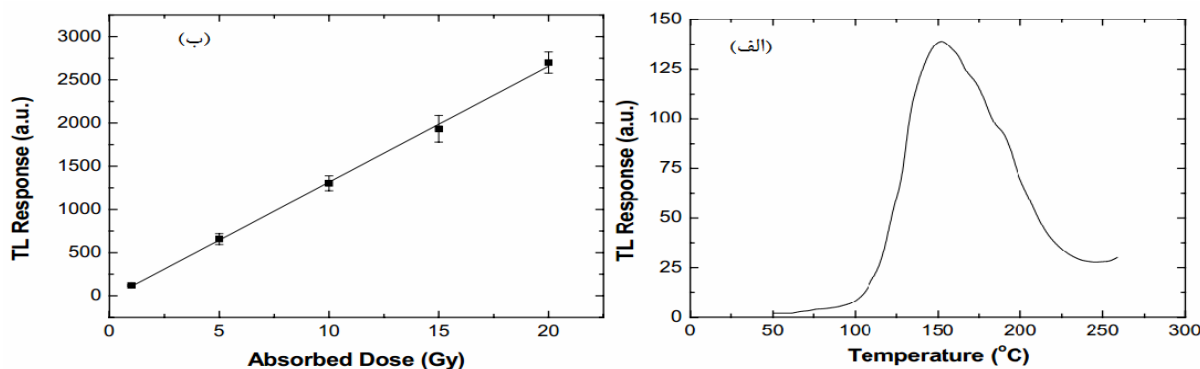
باروس^۱ و همکارانش [۱۰] با افزودن یورویوم (Eu)، تربیوم (Tb) و سیلیسیوم به عنوان دوپانت به محلول آبی آلومینیوم نیترات ۹ آب و اوره، رفتار ترمولومینسانسی اکسید آلومینیومی دوپ شده را بررسی کردند. طبق منحنی ترمولومینسانس نشان داده شده در شکل ۳(الف) چنین بیان کردند که اگرچه بیشترین حساسیت مربوط به نمونه‌ی $Al_2O_3:Tb, Si$ و پاسخ ترمولومینسانسی آن ۵۰۰۰ برابر اکسید آلومینیوم دوپ نشده بود اما نمونه‌ی $Al_2O_3:Eu$ که دارای یک پیک مشخص در حدود $200^\circ C$ بود، با وجود حساسیت کمتر برای دوزیمتری تابشی مناسب‌تر به نظر می‌رسید. با توجه به پاسخ ترمولومینسانس نمونه‌های $Al_2O_3:Eu$ در محدوده‌ی دوز $5Gy - 10^{-3}Gy$ که در شکل ۳(ب) نشان داده شده است، پاسخ خطی برای نمونه‌ها مشخص بوده که بیشترین حساسیت مربوط به ۰/۵ درصد Eu می‌باشد.



شکل ۳- (الف) منحنی‌های تابش $Al_2O_3:Tb, Si$ (۵ درصد Tb و ۵ درصد Si)، $Al_2O_3:Eu, Si$ (۵ درصد Eu و ۵ درصد Si) و $Al_2O_3:Eu$ (۵ درصد Eu) با غلظت‌های متفاوت [۱۰Eu].

روچا^۲ و همکارانش [۱۶] با اختلاط پودرهای اکسید آلومینیوم و کربن و سسپرس سرد آن‌ها و در نهایت سینتر کردن قرص حاصل در هوا و دمای $1650^\circ C$ به مدت ۳ ساعت، ویژگی‌های ترمولومینسانسی نمونه‌ی نهایی را بررسی کردند. با توجه به منحنی ترمولومینسانس نشان داده شده در شکل ۴(الف)، یک پیک دوزیمتری در $150^\circ C$ مشاهده شد و طبق شکل ۴(ب) می‌توان گفت که پاسخ ترمولومینسانس خطی بود.

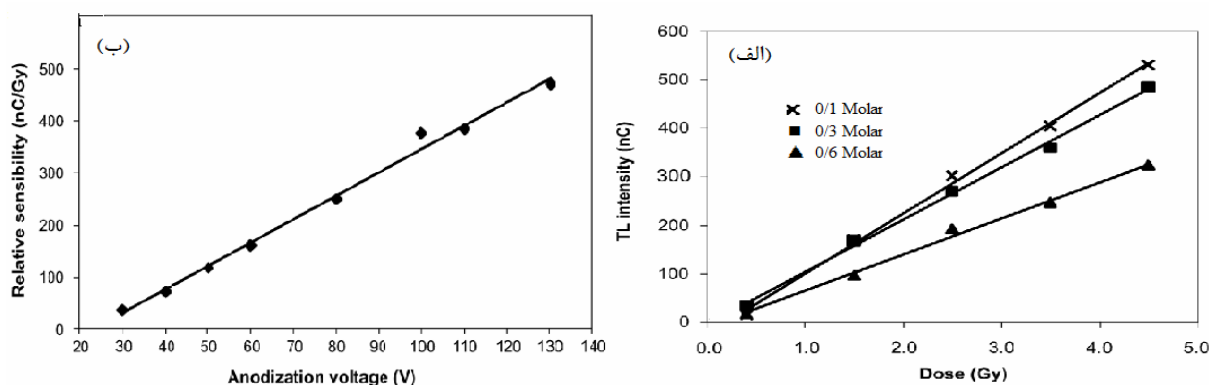
¹ Barros
² Rocha



شکل ۴- (الف) منحنی ترمولومینسانس قرص اکسید آلومینیومی سینتر شده نسبت به تابش اشعه‌ی X با دوز ۱۰ Gy و (ب) پاسخ ترمولومینسانس قرص سینتر شده نسبت به اشعه‌ی X با انرژی پایین [۱۶].

۲-۳- فیلم نازک

با استفاده از فرآیند آندایزینگ، فیلم‌هایی نازک با تخلخل‌های یکنواخت و قطر ۵۰ nm در سطح آلومینیوم ایجاد شد. در طول فرآیند، عناصر کربوکسیل در اثر برقراری ولتاژ ثابت از محلول اسید آلی، درون تخلخل‌های اکسید آلومینیوم مقرر گرفته و بعد از آنیل بخشی از این کربوکسیل‌ها تجزیه شده و به ساختار اکسید آلومینیوم نفوذ کردند. در فرآیند آندایزینگ از یک استوانه‌ی گرافیتی که در مرکز سلول قرار گرفته، به عنوان کاتد استفاده شد. طبق ویژگی‌های ترمولومینسانسی نشان داده شده در اشکال ۵ (الف) و (ب) می‌توان گفت که برای بهینه کردن پاسخ ترمولومینسانس باید از اگزالیک اسید با غلظت ۰/۱۰ مولار و ولتاژ اعمالی ۱۳۰۷ استفاده کرد [۱۲].



شکل ۵- (الف) پاسخ ترمولومینسانس نمونه‌های آندایز شده در غلظت‌های مختلف اسید و (ب) حساسیت نمونه‌های آندایز شده به ولتاژ بایاس فرآیند آندایزینگ [۱۲].

طبق مطالب گفته شده و مقایسه‌ی صورت گرفته در جدول ۱ می‌توان چنین گفت که اکسید آلومینیوم دوپ شده در اشکال متفاوتی اعم از بلور، پودر، قرص و فیلم نازک تولید شده است.

مرجع	پاسخ	نوع تابش	شکل محصول	دستگاه‌های مورد نیاز	انمسفر مورد نیاز جهت تولید	زمان کاری (min)	دمای کاری (°C)	مواد اولیه	روش
یانگ و همکاران [۶]	۴۰-۶۰ برابر TLD-100	Cs-۱۳۷ (5×10^{-6} - 1.00 Gy)	تک بلور	کوره دما بالا، قالب-هایی به منظور رشد بلور در جهت و شکل مورد نظر	انمسفر بسیار کاهنده	-	۲۰۵۰	پودر یا شمش یا بلورهای شکسته‌ی اکسید آلومینیوم	EFG
یانگ و همکاران [۷]	۴۰-۶۰ برابر TLD-100	Cs-۱۳۷ (5×10^{-6} - 1.0 Gy)	تک بلور	آسیاب گلوله‌ای، دستگاه پرس، قالب پرس، کوره دما بالا	خلأ	چندین ساعت	۲۰۷۷	پودر اکسید آلومینیوم و گرافیت	گرادیان دمایی
باروس و همکاران [۱۰]	۵۰۰۰ اکسید آلومینیوم دوپ نشده	Co-۶۰ ($0.1 - 7.0 \text{ Gy}$)	پودر نابو	صفحه‌ی داغ، کوره دما پایین	هوا	۱۰	۵۰۰	نمک فلزی، سوخت، دوپانت نیتراتی	سنتر احتراقی محلول
وانگ و همکاران [۹]	-	-	پودر	صفحه‌ی داغ، خشک-کن ترموستاتی، دستگاه اولتراسونیک جهت پراکنده‌سازی	هوا	۱۴۴۰	۱۲۰	نمک فلزی، عوامل کی‌لیت‌ساز، عامل اتصال دهنده‌ی عرضی	ژل پلی‌آکریل‌امید
روچا و همکاران [۱۶، ۱۷]	خطی	Co-۶۰ ($0.1 - 1.0 \text{ Gy}$)	قرص	تکاننده ^۱ ، دستگاه پرس، قالب پرس، کوره دما بالا	هوا (نمونه‌های بدون کریب) بدون آرگون	۶۰-۱۸۰	۱۶۵۰	پودر اکسید آلومینیوم و کریب	پرس سرد
باروس و همکاران [۱۲]	خطی	Co-۶۰ ($1.000, 6.000, 4.000, 2.000 \text{ Gy}$)	فیلم متخلخل	سلول آندایزینگ	هوا	۲۴۰	۲۵	ورقه‌های آلومینیوم، اسید آلی	آندایزینگ

¹ Shaker

۳- نتیجه گیری

مقایسه روش های مختلف تولید $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ نشان داد که اکسید آلومینیوم دوپ شده با کربن در اشکال متفاوتی اعم از بلور، پودر، قرص و فیلم نازک تولید شده که هر کدام نیاز به مواد اولیه، تجهیزات و روش های متفاوتی داشته و همین امر سبب تفاوت هزینه و رفتار ترمولومینسانسی نمونه های نهایی شده است. در فرآیندهای رشد بلور اگرچه امکان دستیابی به نمونه ای با حساسیت ۶۰-۴۰ برابر TLD-100 وجود دارد اما هزینه و انرژی بیشتری مورد نیاز است. برای غلبه بر این مشکل نیاز به استفاده از روش های دیگر با هزینه و انرژی کمتر برای تولید مواد ترمولومینسانس ضروری به نظر می رسد، با این شرط که این مواد حساسیت ترمولومینسانسی مطلوبی را برای کار در حوزه دوزیمتری فردی و رادیو پزشکی داشته باشند. تا کنون روش تولید صنعتی و مناسبی برای ساخت این دسته از مواد با عملکرد مطلوب جهت کار در حوزه دوزیمتری پیشنهاد نشده است اما یکی از روش هایی که توانایی صنعتی شدن از نظر هزینه، مواد و تجهیزات مورد نیاز را دارد، دوپ کردن مواد نادر زمین در ساختار $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ با استفاده از روش سنتز احتراقی محلول بوده که پاسخ ترمولومینسانسی خوبی (۵۰۰۰ برابر $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ دوپ نشده) را از خود نشان می دهند. با این حال محققین بسیاری سعی در شناسایی روشی جهت تولید اکسید آلومینیوم دوپ شده با مشخصات ترمولومینسانسی مناسب و هزینه ی کمتر را دارند.

مراجع

- [1] David Matthew Klein, Development and Characterization of Remote Radiation Dosimetry Systems Using Optically Stimulated Luminescence of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ and KBr:Eu , Oklahoma: Stillwater, 2008.
- [2] Rieke, J. K., and F. Daniels, "Thermoluminescence studies of Aluminum Oxide," Journal of Physical Chemistry, vol. 51, p. 629-633, 1957.
- [3] Akselrod, M. S., V. S. Kortov, D. J. Kravetsky, and V. I. Gotlib, "Highly Sensitive Thermoluminescence Anion-defective $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ Single Crystal Detectors," Radiation Protection Dosimetry, vol. 32, pp. 15-20, 1990.
- [4] Yang, X. B., Li, H. J., Bi, Q. U., Cheng, Y., Tang, Q., Xu, J., "Influence of Carbon on the Thermoluminescence and Optically Stimulated Luminescence of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ Crystals," Journal of Applied Physics, vol. 104, p. 3112, 2008.
- [5] Akselrod, M. S., V. S. Kortov, and E. A. Gorelova, "Preparation and Properties of Alpha- $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$," Radiation Protection Dosimetry, vol. 47, p. 159-164, 1993.
- [6] Xinbo Yang, Hongjun Li, Jun Xu, Yan Cheng, Liangbi Su and Qiang Tang, "Edge- Defined, Film- Fed Growth (EFG) Technique for the Preparation of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ Crystal with Highly Sensitive Thermoluminescence Response," Journal of American Ceramic Society, vol. 91, pp. 3098-3100, 2008.
- [7] Xinbo Yang, Hongjun Li, Yan Cheng, Qiang Tang, Liangbi Su, Jun Xu, "Growth of highly sensitive thermoluminescent crystal $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ by the temperature gradient technique," Journal of Crystal Growth, vol. 310, pp. 3800- 3803, 2008.
- [8] Kaplyanskii, A. B. Kulinkin, A. B. Kutsenko, S. P. Feofilov, R. I. Zakharchenya and T. N. Vasilevskaya, "Optical Spectra of Triply-charged Rare-earth Ions in Polycrystalline Corundum," Physics of The Solid State, vol. 40, pp. 1310-1316, 1998.
- [9] S. F. Wang, C. F. Zhuang, Y. G. Yuan, X. Xiang, G. Z. Sun, Q. P. Ding, Z. J. Li and X. T. Zu, "Synthesis and Photoluminescence of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ and C-doped $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ Powders," Transactions- Indian Ceramic Society, vol. 73, pp. 37-42, 2014.
- [10] Vinicius S.M. de Barros, Walter M. de Azevedo, Helen J. Khoury, Pedro Linhares Filho, "Combustion synthesis: A suitable method to prepare Al_2O_3 doped materials for thermoluminescent dosimetry," Radiation Measurements, vol. 43, p. 345- 348, 2008.
- [11] Katia A Gonçalves, Alexandre Ventieri, José F S Bitencourt, Juan C R Mittani and Sonia H Tatum, "Luminescence Dosemeter of The $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:Er,Yb}$," in International Nuclear Atlantic Conference, Belo Horizonte, MG, Brazil, 2011.
- [12] V. S. M. de Barros, H. J. Khoury, W. M. Azevedo, E. F. da Silva Jr, "Characterization of nanoporous $\text{Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ for thermoluminescent radiation dosimetry," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, vol. 580, pp. 180-182, 2007.
- [13] Leong Chuey Yong, Husin Wagiran, Abd Khamim Ismail, "Thermoluminescence Performance of Carbon-doped Aluminium Oxide for Dose Measurement by Various Preparation Methods," Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering), vol. 62, no. 3, pp. 109-113, 2013.
- [14] Xu Jianwei, Zhou Yongzong, Zhou Guoqing, Xu Ke, Deng Peizhen, Xu Jun, "Growth of large-sized sapphire boules by temperature gradient technique (TGT)," Journal of Crystal Growth, vol. 193, pp. 123-126, 1998.
- [15] Sergio L. Gonzalez- Cortes, Freddy E, Imbert, "Fundamentals, properties and applications of solid

catalysts prepared by solution combustion synthesis (SCS)," Applied Catalysis A: General, vol. 452, pp. 117-131, 2013.

- [16] Felicia D. G. Rocha, Mercia L. Oliveira, Linda V. E. Caldas, "Thin sintered Al₂O₃ pellets as thermoluminescent dosimeters for the therapeutic dose range," Applied Radiation and Isotopes , vol. 58, pp. 719- 722, 2003.
- [17] F. D. G. Rocha, E. Okuno, L. V. E. Caldas, J. C. Bressiani, M. R. O. O. da Silva, "Al₂O₃ Sintered Pellets for Dosimetry at Radiotherapy Level," in International of IRPA, São Paulo, Brazil, 2000.