



## استفاده از فعال ساز (تربیم) و حساسیت‌زای (گادولینیم) در شیشه و شیشه-سرامیک سیلیکاتی برای افزایش نورتایی نمونه‌های برانگیخته شده با پرتوهای انرژی- بالا

آیدا فایقی‌نیا<sup>۱\*</sup>، حسین جهانبخش<sup>۲</sup>

۱. پژوهشکده‌ی سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی، صندوق پستی: ۴۷۷۷-۱۴۱۵۵، کرج - ایران  
۲. گروه فیزیک، دانشکده‌ی اپتیک و لیزر، دانشگاه مالک اشتر، صندوق پستی: ۸۳۱۴۵-۱۱۵، اصفهان - ایران

**چکیده:** هدف این پژوهش ساخت شیشه‌ی سوسوزن لیتیم- آلومینیم- سیلیکات به عنوان میزبان ماده‌ی فعال تربیم، برای دست‌یابی به نور مریی از طریق برانگیزش با فرابنفش و پرتوهای گاما، ایکس و ذره‌های باردار بود. از ترکیب ۲۱٫۵۴ درصد  $\text{LaF}_3$ ، ۸٫۳ درصد  $\text{Li}_2\text{O}$ ، ۶٫۰۲ درصد  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ، ۳۲٫۴ درصد  $\text{SiO}_2$  برای ساخت این شیشه و شیشه-سرامیک استفاده شد. این شیشه‌ها با روش ریخته‌گری و ذوب ساخته شدند. طیف جذبی نمونه‌ها در ناحیه‌ی مریی و فرابنفش تهیه شد. طیف نورتایی (PL) در طول موج‌های ۲۵۹ و ۳۲۵ نانومتر به دست آمد. طیف جذبی نمونه‌های ساخته شده با تربیم (GTb<sup>۲</sup>) قله‌هایی را در ۳۲۵، ۴۳۶، ۴۶۰، ۴۹۰، ۵۴۵ و ۴۱۴ نانومتر نشان داد، که تا حدی با انتقال‌های انرژی یون تربیم انطباق دارد. اما در مورد شیشه‌ی ساخته شده با گادولینیم (GGd) به دلیل فعال شدن نوری کاستی‌های ساختاری شیشه مانند کاستی کامل شدن، طبق نتیجه‌های نورتایی، تمام انتقال‌های انرژی زیر ۳۰۰ نانومتر تضعیف شده و مشاهده نشد. انتقال انرژی از یون Gd به یون Tb در شیشه مورد مطالعه صورت نگرفت. ولی نتیجه‌های شدت نورتایی شیشه-سرامیک در مقایسه با شیشه به طور معنی‌داری تا ۸۰٪ افزایش یافت. پاسخ نوری نمونه‌های مورد مطالعه به پرتوهای بتا، ایکس و نوترون ارزیابی شد. طی این ارزیابی مشخص شد که هم نمونه‌های شیشه و هم نمونه‌های شیشه-سرامیک دارای پاسخ مناسبی به پرتوهای ایکس و بتا هستند. البته نمونه‌های شیشه-سرامیک حساسیت بسیار بالاتری از خود نشان دادند. در این بررسی مشخص شد که نمونه‌ها پاسخ قابل توجهی به نوترون ندارند که علت آن عدم استفاده از Li خالص‌سازی شده است.

**کلیدواژه‌ها:** شیشه، شیشه-سرامیک، نورتایی، فعال‌ساز تربیم، حساسیت‌زای گادولینیم

## The use of Tb activator and Gd sensitizer in silicate glass and glass-ceramics to increase the luminescence response of samples excited by high-energy radiation

A. Faeghinia\*, H. Jahanbakhsh

1. Ceramic Division, Materials and Energy Research Centre, P.O.Box: 14155-4777, Karaj – Iran
2. Physics Group, Optic and Lazer Faculty, Maleck Ashtar University of Technology, P.O.Box: 115-83145, Esfahan – Iran

**Abstract:** In this work, Lithium-Aluminum-Silicate (LAS) scintillator glass as a host for Tb activator, was prepared in order to reach the visible emission by UV, Gamma, X-Ray and charged particles excitation. The glass was made from 31 wt%  $\text{LaF}_3$ , 12.3 wt%  $\text{Li}_2\text{O}$ , 8.7 wt%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 48 wt%  $\text{SiO}_2$ . The forming methods were melting and casting. The Photo Luminescence spectra (PL) of the samples at 259 and 325nm wavelengths were obtained. The absorption spectrum of the Tb bearing system showed peaks at 325, 436, 460, 490, 545, 414nm, corresponding to Tb energy levels, but in the case of Gd bearing system, because of the optical effects of light-activated factors such as the stacking fault in the glass, the energy transfers below 300nm were weakened. The energy transfer from Gd to Tb was not observed. Compared to the glass system, the PL emission of the glass ceramic increased significantly (80%). The samples' PL response to beta, X-rays, and neutron, were also evaluated. It was shown that both glass and glass-ceramic have acceptable responses to X-rays and beta radiation. The glass-ceramic sensitivity was higher than that of sheer glass; also it was shown that the noutron response of the samples was negligible, presumably because of the lack of reached Li in our glass used.

**Keywords:** Glass, Glass-ceramic, Luminescence, Tb activator, Gd sensitizer

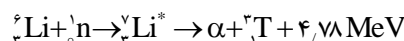
\*email: Aida.faeghinia@gmail.com



## ۱. مقدمه

فوتونی شناسایی شده و تبدیل به یک تپ الکتریکی شود [۱]، ۲، [۳]. سوسوزن‌های شیشه‌ای با ترکیب‌هایی از  $\text{LiO}_2$ ،  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ،  $\text{MgO}$ ،  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  و گاهی همراه با  $\text{BaO}$  برای افزایش چگالی شیشه ساخته می‌شوند [۴]. اما مشکل استفاده از  $\text{Ce}^{+3}$  به عنوان فعال‌ساز در شیشه‌های سیلیکاتی این است که زمانی که  $\text{Ce}^{+3}$  به  $\text{Ce}^{+4}$  اکسید می‌شود، پدیده‌ی خودخاموشی در شیشه‌ی سوسوزن اتفاق می‌افتد. بنابراین فکر استفاده از  $\text{Tb}^{+3}$  به جای  $\text{Ce}^{+3}$  از سال ۱۹۹۳ به منظور بررسی خواص نورتایی و نشر نور آن شکل گرفت. شیشه‌ی سوسوزن آلاییده شده با  $\text{Tb}^{+3}$  به علت شدت بالای نورتایی در ۵۵۰ نانومتر و تناسب با آشکارسازهای سیلیکونی، در آشکارسازهای نوترونی، رادیوگرافی، ماموگرافی و تصویربرداری پرتو ایکس مورد استفاده قرار گرفته است [۵]. از آن‌جا که اولاً مقدار ترییم مصرفی برای این منظور بسیار کم‌تر از سایر فلزهای خاکی نادر مثل  $\text{Dy}$ ،  $\text{Tm}$ ،  $\text{Eu}$ ،  $\text{Sm}$  است و ثانیاً شدت نور گسیلیده از این شیشه‌ها بالا است، بنابراین بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته است چرا که دز تابشی را که باید مریض دریافت کند، کاهش می‌دهد [۶]. از میان ترکیب‌های بلوری، بلورهای فلوریدی، بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته‌اند، زیرا محیط فلوریدی، انرژی فوتونی کمی دارد و اگر در داخل شیشه‌ی سیلیکاتی قرار گیرد، مزیت‌های شیشه‌ی سیلیکاتی نیز حفظ می‌شود. این مزیت‌ها عبارت‌اند از: پایداری شیمیایی، پایداری حرارتی و استحکام مکانیکی بالا [۷، ۸]. در سال ۱۹۹۵ بلورهای  $\text{Pb}_x\text{Cd}_{1-x}\text{F}_2$  به طور موفقیت‌آمیزی، بدون اتلاف در شفافیت شیشه، در داخل شیشه، متبلور شده، و خاصیت نورتایی از خود نشان دادند، ولی مشکل این بلور، سمیت آن بود. استفاده از  $\text{LaF}_3$  اولین بار توسط دجنکا [۹] در سال ۱۹۹۸ مطرح شد. این بلور، اولاً انحلال‌پذیری بالایی نسبت به یون‌های خاکی نادر دارد و ثانیاً شعاع یونی لانتانیم، نزدیک به شعاع یونی یون‌های خاکی نادر است و ثالثاً ظرفیت آن نیز مشابه ظرفیت یون‌های خاکی نادر است. این بلور بعدها توسط پژوهش‌گران، در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۶ به وسیله‌ی یون‌های مختلف  $\text{Ce}$ ،  $\text{Eu}$  آلاییده شده، و رفتار نورتایی شیشه-سرامیک حاصل مطالعه شد [۱۰]. در سال‌های اخیر، استفاده از حساسیت‌زاهای در کنار فعال‌سازها در شیشه-سرامیک‌های نورتاب مطرح شده است. با توجه به این که یون  $\text{Tb}^{+3}$  گران‌قیمت است و هم‌چنین برانگیزش آن نیازمند نور و فوتون با انرژی بالا است، از  $\text{Gd}$  با استناد به کار دیگران [۱۱] به عنوان

آشکارسازی انواع مختلف پرتوهای هسته‌ای همواره یکی از چالش‌های موجود در علم مهندسی هسته‌ای بوده است. دسته‌ای از ابزارهای آشکارسازی پرتوهای هسته‌ای هم‌چون گاما و نوترون مبتنی بر استفاده از سوسوزن‌ها است. سوسوزن‌ها ماده‌هایی هستند که در اثر برخورد پرتوهای هسته‌ای به آن‌ها خاصیت نورتایی (فلورسانسی) از خود را نشان می‌دهند. این نوع نورتایی به نورتایی پرتویی معروف است. ذره‌های باردار هسته‌ای مانند الکترون، پروتون و آلفا از طریق یونش مستقیم منجر به نورتایی در ماده می‌شوند، در حالی که پرتوهای گاما و ایکس و نوترون به طور غیرمستقیم، به نورتایی می‌انجامند. برای القای نورتایی به وسیله‌ی پرتوهای گاما، ایکس و نوترون، می‌توان ساختار شیشه-سرامیک را با افزودن برخی آلاینده‌ها فعال کرد، البته برای آشکارسازی نوترون علاوه بر عنصر فعال‌ساز، معمولاً نیاز به استفاده از عناصری مانند  ${}^6\text{Li}$  به عنوان مبدل نوترون به ذره‌های باردار است. در سال ۱۹۵۲ شیشه‌های سیلیکاتی مشتمل بر لیتییم غنی شده، آلاییده شده با سرب به عنوان شمارگرهای نوترون مورد استفاده قرار گرفتند. در شیشه‌های محتوی لیتییم غنی شده با  ${}^6\text{Li}$ ، نوترون مطابق واکنش،



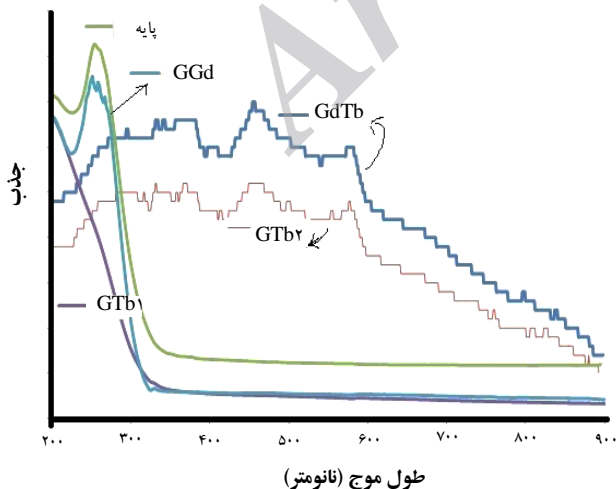
ذره‌های باردار ( $\alpha$ ) تولید می‌کند، که با اتم‌های مجاور در شیشه برخورد نموده و برخی الکترون‌های مداری را بیرون می‌اندازند. این الکترون‌ها در برخورد با الکترون‌های مداری اتم‌ها و مولکول‌های ماده‌ی آشکارساز انرژی از دست داده و کند می‌شوند (از این انرژی به عنوان انرژی به جا مانده صحبت می‌شود). این انرژی به الکترون‌های بیرونی یون‌های  $\text{Ce}^{+3}$  در شیشه، منتقل و سبب برانگیزش اتم‌ها می‌شود. بعد از ۰/۱۴ میکروثانیه، الکترون‌های برانگیخته شده به وضعیت اصلی‌شان برمی‌گردند؛ این فرایند معمولاً با گسیل یک فوتون، با طول موج حدود ۳۹۵ نانومتر همراه است. محصول‌های باردار تولید شده در اثر واکنش گیراندازی نوترون در شیشه، سبب گسیل چنین فوتون‌هایی در مدت زمان کوتاهی می‌شوند، و یک تپ نور در ناحیه‌ی نزدیک UV، توسط شیشه گسیل می‌شود. این نور می‌تواند توسط دستگاه‌های مرتبط مثل لوله‌ی تکثیرکننده‌ی

حاصل، که منجر به شکست آن شد، به ناچار شیشه مجدداً ذوب و شرایط تابکاری از ۲۰ دقیقه به یک ساعت تغییر داده شد که در نتیجه، نمونه‌ی نسبتاً قابل قبولی به دست آمد. سپس نمونه‌های شیشه‌ی به دست آمده توسط تیغه‌ی ۳ میلی‌متری با سرعت کم برش داده شد و نمونه‌ها و یک نمونه‌ی آلایده شده برای اندازه‌گیری جذب و شفافیت مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش نورتایی به وسیله‌ی دستگاه فوتولومینسانس (PL) مدل پرکین-المیر به انجام رسید. به منظور ارزیابی نورتایی پرتوی نمونه‌ها به وسیله‌ی دستگاه بولت-پاکارد ۲۰۰۰، یک ابزار نوری شامل یک فیبر نوری و موازی‌ساز و یک نگه‌دارنده‌ی نمونه، ساخته شد. با استفاده از این دستگاه، میزان نورتایی ایجاد شده در حین پرتو دهی نمونه با چشمه‌ی  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ، در مدت زمان ۲۰ ثانیه اندازه‌گیری شد. هم‌چنین برای اندازه‌گیری نورتایی ناشی از نوترون، نمونه‌ها در ۱۰ سانتی‌متری چشمه‌ی Am-Be با فعالیت پرتو زایی ۵Ci قرار گرفته و نور ایجاد شده، به وسیله‌ی فیبر نوری به سیستم اندازه‌گیری منتقل شد.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۱.۳ جذب شیشه‌ها

طیف‌سنجی فرابنفش شیشه‌ی محتوی تریبیم-۱ (GTb۱) هیچ قله‌ی جذبی برای این نوع شیشه نشان نداد. این مسأله می‌تواند به دلیل مقدار کم Tb در شیشه باشد، که توانایی جذب نور فرابنفش را نداشته است. اما با افزایش مقدار Tb در شیشه به ۲٪ وزنی و تهیه‌ی شیشه‌ی محتوی تریبیم-۲ (GTb۲) قله‌های جذب مشاهده شد (شکل ۱).



شکل ۱. جذب شیشه‌های مورد مطالعه در گستره‌ی ۲۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر G

موف شیشه، Tb موف تریبیم و اعداد ۱ و ۲ موف درصد تریبیم در شیشه است.

حساسیت‌زا استفاده شد. این یون توانایی انتقال انرژی از سطح  ${}^{4}\text{F}^{\text{y}}$  خود به سطح  ${}^{4}\text{F}^{\text{a}}$  تریبیم را دارد. این دو یون در شیشه‌های فسفاتی قبلاً استفاده شده و نتیجه‌های آن، دو گانه بوده است. یعنی از یک طرف بحث انتقال انرژی بین لایه‌های Gd به Tb مطرح است و از سوی دیگر زوال نوری، در اثر به‌گیر افتادن فوتون گسیل شده، در زیر لایه‌های Gd اتفاق می‌افتد. هم‌چنین، از این دو یون، در شیشه-سرامیک کلسیم‌دار استفاده شده است، اما به نقش Gd در کنار Tb اشاره نشده است. ولی در این سیستم، به تأثیر Gd از لحاظ ایجاد فوتون‌های انرژی بالا و انتقال آن به تریبیم اشاره شده است [۱۲]. هدف از کار حاضر اولاً بررسی نقش تریبیم و غلظت آن در رفتار نورتایی شیشه‌ی سیلیکاتی و ثانیاً بررسی تقویت‌کنندگی گادولینیم در شدت نورتایی سیستم شیشه و شیشه-سرامیک سیلیکاتی بوده است و ثالثاً رفتار این سیستم‌ها در اثر تابش پرتوهای پرانرژی به طور کیفی و نیمه کمی بررسی شده است. نورتایی شیشه‌های فسفاتی (و نه شیشه-سرامیک‌ها) مشتمل بر یون‌های مذکور طبق اطلاعات نویسنده در سال ۲۰۱۱ گزارش شده است، ولی به طور دقیق تاکنون در شیشه و شیشه-سرامیک سیلیکاتی مطرح نشده است.

### ۲. مواد و روش‌ها

ترکیب شیمیایی و درصد وزنی مواد استفاده شده در جدول ۱ ارائه شده است.

در این پژوهش، آلومینای مورد استفاده از شرکت مارتینزورک<sup>(۱)</sup>، لیتیم کربنات و لاتانیم فلورید از شرکت مرک و تریبیم فلورید از شرکت زیگما-آلد ریچ تهیه شد.

برای ذوب شیشه از یک بوته‌ی پلاتینی ۳۰ میلی‌لیتری استفاده شد و مخلوط مواد اولیه در دمای  $1450^{\circ}\text{C}$  ذوب شده و مذاب حاصل در قالب فولادی ریخته‌گری شد. آن‌گاه شیشه در دمای  $400^{\circ}\text{C}$ ، تابکاری شد. اما به دلیل تنش‌های زیاد در شیشه‌ی

جدول ۱. ترکیب شیمیایی شیشه‌های تهیه شده

| نام                           | Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TbF <sub>3</sub> | LaF <sub>3</sub> | Li <sub>2</sub> O | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | حجم مولی |
|-------------------------------|--------------------------------|------------------|------------------|-------------------|--------------------------------|------------------|----------|
| پایه                          | -                              | -                | ۳۱               | ۱۲٫۳              | ۸٫۷                            | ۴۸               | ۲۳٫۴۵    |
| شیشه‌ی محتوی تریبیم-۱         | -                              | ۱                | ۳۱               | ۱۲٫۳              | ۸٫۷                            | ۴۸               | ۲۴٫۴۷    |
| شیشه‌ی محتوی تریبیم-۲         | -                              | ۲                | ۳۱               | ۱۲٫۳              | ۸٫۷                            | ۴۸               | ۲۳٫۷۶    |
| شیشه‌ی محتوی تریبیم-گادولینیم | ۱                              | ۱                | ۳۱               | ۱۲٫۳              | ۸٫۷                            | ۴۸               | ۲۴٫۵۶    |
| شیشه‌ی محتوی گادولینیم        | ۱                              | -                | ۳۱               | ۱۲٫۳              | ۸٫۷                            | ۴۸               | ۲۳٫۵۷    |

**جدول ۲.** ترازهای انرژی یون تربیم

| طول موج | انتقال در ترازهای انرژی   |
|---------|---------------------------|
| ۲۶۴     | $^5H_7 \rightarrow ^5F_6$ |
| ۲۸۳     | $^5H_7 \rightarrow ^5F_6$ |
| ۳۰۳     | $^5H_7 \rightarrow ^5F_6$ |
| ۳۲۵     | $^5D_7 \rightarrow ^5F_6$ |
| ۴۱۴     | $^5D_7 \rightarrow ^5F_6$ |
| ۴۳۶     | $^5D_7 \rightarrow ^5F_6$ |
| ۴۶۰     | $^5D_7 \rightarrow ^5F_6$ |
| ۴۹۰     | $^5D_7 \rightarrow ^5F_6$ |
| ۵۴۵     | $^5D_7 \rightarrow ^5F_6$ |
| ۵۹۰     | $^5D_7 \rightarrow ^5F_6$ |
| ۶۲۰     | $^5D_7 \rightarrow ^5F_6$ |

**جدول ۳.** ترازهای انرژی یون گادولینیم

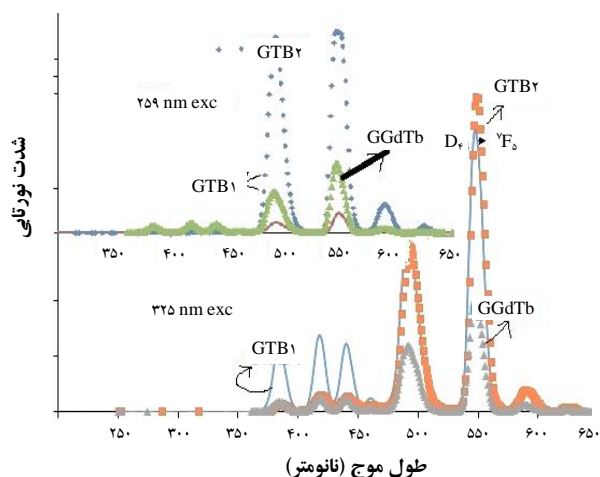
| طول موج       | انتقال در ترازهای انرژی           |
|---------------|-----------------------------------|
| ۲۵۳، ۲۴۷      | $^6D_{9/2} \rightarrow ^8S_{7/2}$ |
| ۲۷۹، ۲۷۶، ۲۷۳ | $^6I_7 \rightarrow ^8S_{7/2}$     |
| ۳۰۵           | $^6P_{7/2} \rightarrow ^5S_6$     |
| ۳۱۲           | $^6P_{5/2} \rightarrow ^8S_{7/2}$ |
| ۳۲۴           | $^6P_{7/2} \rightarrow ^8S_{7/2}$ |

### ۲.۳ نورتایی شیشه‌ها

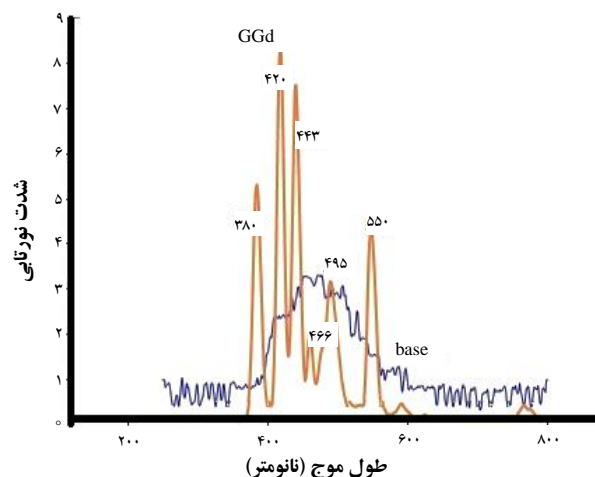
با توجه به این که هر دو یون تربیم و گادولینیم، در هر حالت، جذب زیر ۳۰۰ نانومتر دارند، یک بار طول موج ۲۵۹ و بار دیگر ۳۲۵ برای دمش، و برای مقایسه‌ی نورتایی شیشه‌ها استفاده و شدت نورتایی شیشه‌ی GGd و شیشه‌ی پایه با استفاده از دمش (برانگیزش) در ۲۵۹ نانومتر اندازه‌گیری شد (شکل ۲).

طبق یافته‌های دیگران، موقعیت پاسخ نورتایی  $Gd^{3+}$  در ۳۱۲ نانومتر است، که این، در واقع از هم پوشانی در ۳۰۷ و ۳۲۴ نانومتر، به وجود می‌آید، [۶] و ما انتظار نشر، در چنین طول موج‌هایی را، در شیشه‌ی GGd داشتیم. با مقایسه‌ی نتیجه‌های جذب در شیشه‌ی پایه، و نتیجه‌ی جذب در شیشه‌ی GGd، این چنین به نظر می‌رسد که انرژی زمینه‌ی شیشه به سطح‌های  $^6D_7$  یون گادولینیم، منتقل می‌شود و با یک واهلش غیرتابشی، این انرژی، به سطح  $^6P_{7/2}$  منتقل شده و یک قله در ۳۸۰ مشاهده می‌شود. (باید اشاره کرد که موقعیت انتقال انرژی در شیشه‌ی GGd به پارامتر نفلوکستیک و مشخصه‌های میزبان وابسته است).

در شکل ۱ نتیجه‌های جذب فرابنفش برای شیشه‌های GGd، GdTb<sub>۱</sub>، GdTb<sub>۲</sub> و GdTb<sub>۳</sub> و شیشه‌ی پایه، برای مقایسه‌ی ارائه شده است. جذب GdTb<sub>۲</sub> مشابه جذب یون تربیم در شیشه‌های فسفاتی است [۱۳]. همان‌طور که می‌دانیم طیف جذب  $Tb^{3+}$  شامل دو ناحیه است: ناحیه‌ی جذب مربوط به انتقال‌های درون لایه‌ای f-f در داخل  $F_8$  و انتقال‌های مجاز  $F_8 \rightarrow F_7^5D$ . از آن‌جا که الکترون‌های ۴f به خوبی توسط اوربیتال‌های ۵s، ۵p پوشیده شده‌اند، بنابراین تأثیر ترکیب محیط، بر انتقال‌های انرژی، در محدوده‌ی جذب ۳۲۰ تا ۴۸۴ نانومتر کم است. اما در مورد انتقال‌های انرژی در لایه‌های  $F_8 \rightarrow F_7^5D$  که در محدوده‌ی طول موج ۲۳۰ تا ۲۵۰ نانومتر جای می‌گیرند، شاید بتوان گفت این نوار جذبی پهن، متأثر از ترکیب محیط است که در مورد شیشه‌های ساخته شده در این پژوهش، این محدوده‌ی جذب به دلیل جذب انرژی به وسیله‌ی ارتعاش‌های فونونی شبکه‌ی سیلیکاتی شیشه، بسیار محدود است. جدول ۲ به طور خلاصه به طول موج‌های جذب متداول یون تربیم در شیشه‌های فسفاتی می‌پردازد [۱۳]. همان‌طور که مشاهده می‌شود به علت واهلش مولتی فونونی شبکه‌ی سیلیکاتی، قله‌های جذب مربوط به زیر ۳۰۰ نانومتر، در شیشه‌ی مورد مطالعه‌ی این پژوهش مشاهده نشد. با مقایسه‌ی نتیجه‌های جذب در شیشه‌ی پایه (شکل ۱) و نتیجه‌های جذب در شیشه‌ی GGd انتقال‌های انرژی مربوط به  $^6G_7 \rightarrow ^8S_{7/2}$  در یون  $Gd^{3+}$  که باید در حدود ۲۰۴ نانومتر باشد [۱۱] مشاهده نمی‌شود. با توجه به این که شیشه‌ی سیلیکاتی (زمینه) جاذب قوی محدوده‌ی UV است، بنابراین جذب  $Gd^{3+}$  سرکوب (یا پنهان) می‌شود. خواص  $Gd^{3+}$  در شیشه‌ی سیلیکاتی تاکنون به طور دقیق بررسی نشده است. اما می‌توان گفت در زمینه‌ی شیشه‌ای آلومینوسیلیکاتی فوتون‌هایی با انرژی بالای ۵ الکترون ولت (زیر ۳۰۰ نانومتر)، ماتی<sup>(۲)</sup> ایجاد می‌کنند. هم‌چنین محدوده‌ی جذب مشاهده شده، که مربوط به انتقال‌های f-f در یون  $Gd^{3+}$  و به صورت یک نوار پهن و گسترده است، احتمالاً ناشی از کاستی‌های زمینه‌ی شیشه‌ای، از نوع نقص ناکاملی است. جدول ۳ مربوط به بررسی ترازهای انرژی متداول در یون گادولینیم است.



شکل ۳. نورتابی شیشه‌های GTb<sub>1</sub>، GTb<sub>2</sub>، GGdTb برای برانگیزش با ۳۲۵ و ۲۵۹ نانومتر.



شکل ۲. نورتابی شیشه‌ی پایه و GGdTb با دمش نور ۲۵۹ نانومتر.

### ۳.۳ نورتابی شیشه-سرامیک

شیشه‌های GTb<sub>1</sub>، GTb<sub>2</sub> و GGdTb طبق دماهایی که در یک مقاله‌ی دیگر [۱۴] به آن اشاره شده است، در دماهای حدود ۶۰۰ و ۵۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند؛ پاسخ نورتابی این شیشه‌ها به برانگیزش در ۲۵۹ نانومتر در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شدت نورتابی در شیشه-سرامیک GGdTb نسبت به سایر شیشه-سرامیک‌ها- GTb<sub>1</sub>، GTb<sub>2</sub> بیش‌تر و حدود ۶ برابر است. بنابراین نتیجه می‌شود که با ورود یون تربیم به ساختار منظم و بلوری LaF<sub>3</sub> احتمالاً واهلش بس‌فونونی ساختار بی‌شکل شیشه کاهش و انتقال انرژی از یون Gd به یون تربیم افزایش می‌یابد و از این‌رو روند افزایش شدت نورتابی با وجود Gd در کنار Tb در ساختار بلوری سبب افزایش نقل و انتقال‌های انرژی بین دو یون شده و این پدیده برخلاف یا برعکس مشاهده‌های نورتابی در حالت شیشه و تحت برانگیزش در ۲۵۹ نانومتر است [۵].

### ۴.۳ اندازه‌گیری زمان واپاشی

برای اندازه‌گیری زمان واپاشی از تجهیزهای الحاقی دستگاه PL استفاده و نتیجه‌های آن در شکل ۵ ارایه شد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، زمان واپاشی نمونه‌های مورد مطالعه، در حد صدم ثانیه است، که با ابزارهای موجود در کشور، قابل ارزیابی نیست، در هر حال، این آزمایش برای اطمینان از خاصیت فسفرسانسی شیشه مورد استفاده قرار گرفت.

از سوی دیگر نشر مربوط به کاستی‌های شیشه که از نظر نوری فعال شده‌اند در طیف ۴۰۰ تا ۶۰۰ نانومتر با شدت بیش‌تری خود را نشان می‌دهد. به منظور بررسی نقش گادولینیم در افزایش نورتابی شیشه‌ی ترکیبی، هر چهار ترکیب شیشه، یک‌بار در معرض برانگیزش (دمش) با نور ۲۵۹ نانومتر و بار دیگر با ۳۲۵ نانومتر قرار گرفتند، نتیجه‌های آن در شکل ۳ داده شده است.

از مقایسه‌ی شکل‌های ۲ و ۳، چنین نتیجه می‌شود، که برخلاف یافته‌های مرجع [۱۳]، که باید یون Gd در محدوده‌ی فرابنفش انرژی مربوط به لایه‌ی P<sup>۶</sup> را در ۲۵۹ نانومتر جذب و به وضعیت <sup>۷</sup>F<sub>۶</sub> تربیم منتقل می‌کرده است، این پدیده اتفاق نیافتاده است و در نتیجه شدت نورتابی GTb<sub>2</sub> با افزودن Gd کاهش یافته است. توجیه دیگر، این که، ممکن است، انتقال انرژی، از تربیم، به گادولینیم صورت گرفته باشد. انرژی لایه‌ی D<sup>۵</sup> از یون تربیم در شیشه‌ی سیلیکاتی حدود ۴۰۰۰۰ cm<sup>-1</sup> و بسیار بیش‌تر از انرژی لایه‌های D<sup>۵</sup>، J<sup>۶</sup> و P<sup>۶</sup> یون Gd<sup>۳+</sup> است. بنابراین، انرژی از وضعیت ۵d یون Tb<sup>۳+</sup> به وضعیت <sup>۶</sup>F<sub>۸</sub> یون Gd<sup>۳+</sup> منتقل می‌شود، و زمانی که با نور ۲۵۹ نانومتر برانگیخته می‌شود، شدت قله‌ی نشری در ۵۰۰ و ۵۵۰ نانومتر، در شیشه‌ی GGdTb نسبت به شیشه GTb<sub>2</sub> کاهش می‌یابد.



**جدول ۴.** نورتایی هسته‌ای حاصل از پرتو دهی با  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 

| انحراف معیار | میانگین | شمارش نورتایی (۲۰ ثانیه) |       |       | کد نمونه              |
|--------------|---------|--------------------------|-------|-------|-----------------------|
|              |         | ۳                        | ۲     | ۱     |                       |
| ۸            | ۴۰۹     | ۴۰۱                      | ۴۱۰   | ۴۱۶   | زمینه                 |
| ۸۷           | ۸۵۰     | ۸۷۸                      | ۷۵۳   | ۹۲۰   | G                     |
| ۲۱۷          | ۸۵۹۸    | ۸۶۶۷                     | ۸۳۵۴  | ۸۷۷۲  | GTb <sub>۱</sub>      |
| ۴۲۷          | ۱۰۸۹۹   | ۱۱۰۹۰                    | ۱۱۱۹۷ | ۱۰۴۰۹ | GTb <sub>۱</sub> -۵۴۰ |
| ۹۵           | ۹۸۲     | ۸۹۳                      | ۹۷۱   | ۱۰۸۲  | GTb <sub>۱</sub> -۶۰۰ |
| ۶۴           | ۳۲۲۲    | ۳۱۹۲                     | ۳۲۹۵  | ۳۱۷۸  | GTb <sub>۲</sub>      |
| ۶۲۳          | ۲۸۵۹۰   | ۲۸۹۵۰                    | ۲۸۹۵۱ | ۲۷۸۷۱ | GTb <sub>۲</sub> -۵۸۰ |
| ۱۱۳          | ۱۸۹۱    | ۱۸۱۹                     | ۲۰۲۱  | ۱۸۳۳  | GTb <sub>۲</sub> -۶۰۰ |

**جدول ۵.** نورتایی هسته‌ای حاصل از پرتو دهی با چشمه‌ی Am-Be

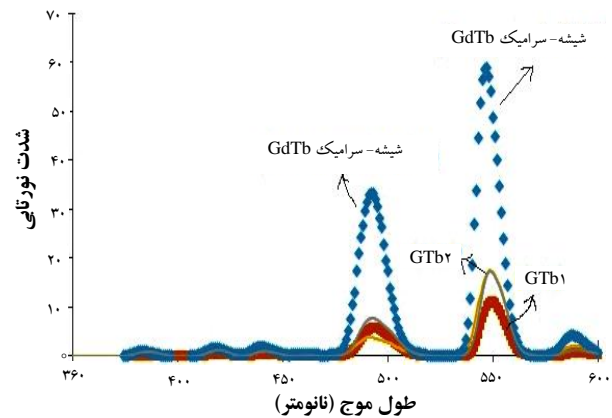
| انحراف معیار | میانگین | شمارش نورتایی (۲۰ ثانیه) |      |      | کد نمونه              |
|--------------|---------|--------------------------|------|------|-----------------------|
|              |         | ۳                        | ۲    | ۱    |                       |
| ۲۳۱          | ۲۲۶۶    | ۲۱۶۴                     | ۲۱۰۴ | ۲۵۳۰ | زمینه                 |
| ۴۱           | ۲۲۳۶    | ۲۲۲۴                     | ۲۲۰۲ | ۲۲۸۲ | G                     |
| ۶۷           | ۲۳۷۴    | ۲۴۵۰                     | ۲۳۲۶ | ۲۳۶۶ | GTb <sub>۱</sub>      |
| ۹۸           | ۲۲۱۷    | ۲۱۰۴                     | ۲۲۷۸ | ۲۲۶۸ | GTb <sub>۱</sub> -۵۴۰ |
| ۱۶۰          | ۲۱۹۵    | ۲۱۷۶                     | ۲۳۶۴ | ۲۰۴۶ | GTb <sub>۱</sub> -۶۰۰ |
| ۱۶۷          | ۲۷۴۰    | ۲۶۲۸                     | ۲۶۶۰ | ۲۹۳۲ | GTb <sub>۲</sub>      |
| ۱۶۴          | ۲۳۶۳    | ۲۳۶۶                     | ۲۲۰۸ | ۲۵۳۴ | GTb <sub>۲</sub> -۵۸۰ |
| ۶۳           | ۲۳۹۷    | ۲۴۴۶                     | ۲۴۲۰ | ۲۳۲۶ | GTb <sub>۲</sub> -۶۰۰ |

نوترون نداشته‌اند. علت این امر، می‌تواند موارد زیر باشد. اول این که در نمونه‌ها Li طبیعی (و نه لیتیم غنی شده) استفاده شده و ثانیاً شار نوترون در محل اصابت به نمونه‌ها به اندازه‌ی کافی بالا نبوده است.

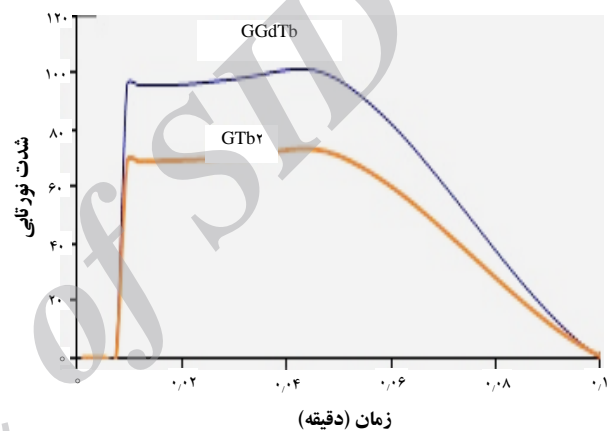
### ۶.۳ ریزنگارهای میکروسکوپی

برای اطمینان از نحوه‌ی تبلور ترکیب  $\text{LaF}_3$  در نمونه‌های موردنظر و بررسی ریزساختار شیشه-سرامیک  $\text{GdTb}_2$  تحت عملیات قرار گرفته در دمای ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، ریزنگارهایی با استفاده از میکروسکوپی الکترون پویشی (SEM) تهیه شد (شکل ۶).

با توجه به ابعاد ریزساختار  $\text{LaF}_3$  در نمونه‌ی حاضر، به راحتی این بلورها قابلیت شناسایی دقیق با استفاده از میکروسکوپی الکترون پویشی را ندارند. ولی در هر حال ساختار لایه لایه‌ای و خرمالویی شکلی که از بلور  $\text{LaF}_3$  متصوریم در این تصویر واضح و آشکار شده است.



**شکل ۴.** نورتایی شیشه-سرامیک  $\text{GdTb}$  و شیشه‌های  $\text{GTb}_1$  و  $\text{GTb}_2$  برای برانگیزش در ۲۵۹ نانومتر.



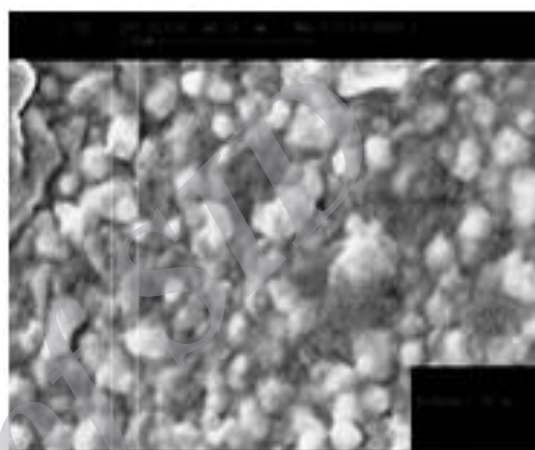
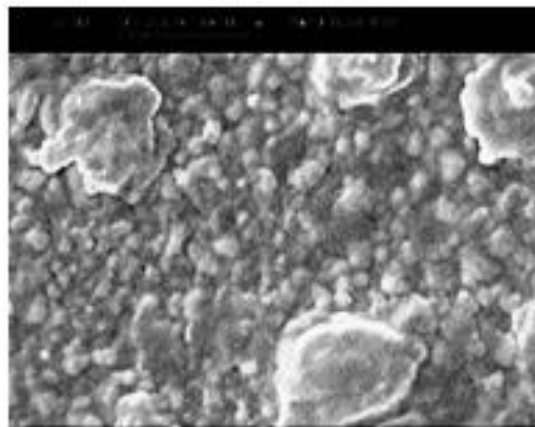
**شکل ۵.** زمان واپاشی شیشه‌های  $\text{GdGdTb}$ ،  $\text{GTb}_2$ .

### ۵.۳ اندازه‌گیری نورتایی هسته‌ای بتا، ایکس و نوترون

چشمه‌ی  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  یکی از چشمه‌های معروف بتا است. در آزمایش انجام شده چون غلاف چشمه از جنس استیل خیلی نازک (۵ تا ۱۰ میلی‌متر) بود، بخشی از پرتوهای  $\beta$  می‌توانست مقدار قابل توجهی پرتو ایکس ترمزی ایجاد کند، بنابراین نورتایی هسته‌ای ایجاد شده، نتیجه‌ی برخورد پرتوهای بتا و پرتو ایکس ترمزی با نمونه بوده است. نتیجه‌های به دست آمده در جدول ۴ داده شده است. با توجه به نتیجه‌های به دست آمده، مشخص شد که افزودن مقداری Tb به شیشه، نورتایی نمونه‌ها را به شدت افزایش داده است. هم‌چنین نتیجه‌ها نشان می‌دهد که عملیات حرارتی تا دمای ۵۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بهترین نتیجه را در بر داشته، و از ۵۸۰ تا ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد پاسخ نوری را کاهش داده است. در جدول ۵ نتیجه‌های نورتایی هسته‌ای نمونه در اثر پرتو دهی با چشمه‌ی نوترون بررسی شده است. براساس اطلاعات این جدول هیچ کدام از نمونه‌ها پاسخ نوری مناسبی به



پیشنهاد می‌شود. به عبارت دیگر، پیشنهاد می‌شود، در آینده، همین سیستم، با استفاده از منبع‌های اولیه‌ی  $\text{LiF}_3$ ،  $\text{AlF}_3$  برای تأمین Al و Li در شیشه، مورد استفاده قرار گیرد و از سیستم‌های حساسیت‌زایی چون Eu و Sm (به دلیل جذب در طول موج‌های بالاتر) برای ارزیابی رفتار نورتایی شیشه‌ی اکسی-فلوریدی آلاینده شده با تربیم استفاده شود، هم‌چنین پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های بعدی از عنصر B برای افزایش حساسیت به نوترون استفاده شود.



### پی‌نوشت‌ها

1. Martinswerk
2. Opacity
3. Long range order

شکل ۶. ریزنگارهای الکترونی نمونه‌ی شیشه-سرامیک GGdTb تحت عملیات حرارتی قرار گرفته در ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد (بزرگ‌نمایی  $\times 17000$ ).

### ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش شیشه‌ی لیتیم-آلومینیم-سیلیکات مشتمل بر بلور  $\text{LaF}_3$  آلاینده شده با Gd و Tb تهیه شد. در شیشه-سرامیک، به علت ایجاد نظم برد بلند<sup>(۳)</sup> و حذف ارتعاش‌های فونونی شبکه، نقل و انتقال‌های فوتونی تشدید شده و افزایش شدت نورتایی در اثر استفاده از دو آلاینده‌ی گادولینیم و تربیم در طول موج ۵۵۰ نانومتر، مشاهده شد. در شیشه-سرامیک مذکور، نسبت شدت نور گسیل شده در ۵۵۰ نانومتر به ۴۹۰ نانومتر، دو برابر بیش‌تر از همین نسبت، در حالت شیشه‌ای بود. ارزیابی نورتایی هسته‌ای نمونه‌ها نشان داد که افزودن درصد مناسبی از Tb و سپس انجام یک فرایند تابکاری بهینه بر روی نمونه، پاسخ نوری به پرتوهای ایکس و بتا را به شدت افزایش می‌دهد که این برای  $\text{GTb}_2\text{-}580$  بهترین حالت بود.

استفاده از ترکیب‌های فلوریدی در شیشه‌ی سیلیکاتی برای کاهش ارتعاش‌های فونونی اکسیژنی به عنوان یک راه کار



- [1] N. Ghal-Eha, R. Koochi-Fayegh, S. Hamidi, Low-energy neutron flux measurement using a resonance absorption filter surrounding a lithium glass scintillator, *Radiation Physics and Chemistry*, 76 (2007) 917-920.
- [2] A.H. Summer, Characterizing of photomultiplier tubes, *J. Applied. physics*, 29 (8) (1990) 1527.
- [3] A. Hoaksey, Terbium doped glasses: their optical properties and potential applications, Durham E-Theses, (1975).
- [4] A. Hoaksey, Luminescence of  $Tb^{3+}$  ions in silicate glasses, *J. Lum*, 17 (1978) 385-400.
- [5] R. Smith, R.K. Fisher, J.S. Leffler, Lithium-free scintillation glasses for fast-neutron detection, *J. Rev. Sci. instrum*, 58 (1987) 1905-1909.
- [6] Yu, Daqin Chen, Yuansheng, A new transparent oxyfluoride glass ceramic with improved luminescence, *Journal of Non-Crystalline Solids*, (2007) 405-409.
- [7] George H. Beall, Linda R. Pinckney, Nanophase glass-ceramics, *Journal of American Ceramic Society.*, 82 (1999) 5-16.
- [8] B. Layne, W.H. Lowdermilk, M.J. Weber, Multiphonon relaxation of rare-earth ions in oxide glasses, *Physica Review*, B 16 (1977) 10-18.
- [9] M.J. Dejneka, The luminescence and structure of novel transparent oxyfluoride glass-ceramics, *J. Non-Cryst. Solids*, 239 (1998) 149-155.
- [10] Wang Jin, Preparation and luminescence of  $Er^{3+}$  doped oxyfluoride glass ceramics containing LaF<sub>3</sub> nanocrystals, *Journal of Rare Earths*, 24 (2006) 67-71.
- [11] A. Maresa, M. Nikla, K. Nitscha, N. Solovievaa, A. Krasnikovb, S. Zazubovichb, Role of  $Gd^{3+}$  in scintillating processes in Tb-doped Na-Gd, phosphate glasses, *Journal of Luminescence*, 94-95 (2001) 321-324.
- [12] Y.U. Chunlei, L.Ia. Shunguang, Energy transfer between  $Gd^{3+}$  and  $Tb^{3+}$  in phosphate glass, *Journal of Rare Earths*, 29 (2011) 48-51.
- [13] Chenggang Zuoa, Luminescent properties of  $Tb^{3+}$  and  $Gd^{3+}$  ions doped alumino silicate oxy fluoride glasses, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 82 (2011) 406-409.
- [14] A. Faeghinia, Luminescence properties of lithium aluminium silicate glass and glass-ceramics containing nano-LaF<sub>3</sub> and Tb/Gd, *Physics and Chemistry of Glasses, European Journal of Glass Science and Technology Part B*, 5 (2013) 223-227.