

بررسی خواص سوسوزنی بلورهای CsI(Tl) رشد داده شده با آلاینده‌های Ca و Tm

سجاد شاه‌ملکی و فائزه رحمانی*

گروه فیزیک هسته‌ای، دانشکده فیزیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

*تهران، خیابان شریعتی، بالاتر از پل سیدخندان، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده فیزیک، گروه فیزیک هسته‌ای، کدپستی: ۱۵۴۱۸-۴۹۶۱۱

پست الکترونیکی: FRahmani@kntu.ac.ir

چکیده

در این پژوهش به ساخت بلورهای CsI(Tl) طی رشد به روش بریجمن با استفاده از آلاینده‌هایی نظیر Ca و Tm به منظور بررسی خواص سوسوزنی برای کاربرد به عنوان آشکاساز گاما پرداخته شده است. برای ارزیابی بلورهای رشد داده شده، پراش ایکس، طیف لیان نوری، طیف گرمایی و نیز طیف‌های گامای ثبت شده توسط بلورها، بررسی شدند. همچنین پارامترهای سوسوزنی از جمله قدرت تفکیک انرژی، پاسخ سوسوزنی بهره نوری و پس‌تاب مورد مطالعه و اندازه‌گیری قرار گرفتند. خواص سوسوزنی بلور CsI(Tl) با آلاینده‌های مختلف نسبت به CsI(Tl) به عنوان نمونه استاندارد (ساخت شرکت Amcrys) مقایسه شدند. برای بلور CsI با آلاینده Tl، بهره نوری ۹۷٪، قدرت تفکیک انرژی در انرژی ۶۶۲ keV برابر ۱۱٪ و پاسخ سوسوزنی ۱۰۵۴ ns اندازه‌گیری شد. افزودن آلاینده‌های Ca و Tm به ساختار بلوری CsI(Tl) باعث کاهش مراکز به دام افتاده و همچنین ایجاد زیر تراز لیان نوری شده، از این رو باعث تغییر خواص سوسوزنی می‌شوند. افزودن آلاینده Tm^{2+} در ساختار شبکه‌ای CsI(Tl) منجر به افزایش بهره‌نوری به ۱۰۳٪، قدرت تفکیک انرژی ۹۷٪ و پاسخ سوسوزنی ۱۳۷۳ ns شده، در صورتی که این آلاینده پاسخ سوسوزنی را کندتر می‌کند و باعث ایجاد پس‌تاب کم‌تری نسبت به نمونه CsI(Tl) می‌شود. آلاینده Ca^{2+} در ساختار شبکه‌ای CsI(Tl) بر روی بهره‌نوری و قدرت تفکیک انرژی اثر نامطلوب دارد، در صورتی که پاسخ سوسوزنی را سریع‌تر کرده و باعث ایجاد پس‌تاب بیش‌تری نسبت به نمونه CsI(Tl) می‌شود. همچنین باعث کاهش بهره‌نوری به ۹۸٪، قدرت تفکیک انرژی ۱۲٪ برای انرژی ۶۶۲ keV و پاسخ سوسوزنی ۵۳۷ ns می‌شود.

کلیدواژگان: دید سزیم آلاییده، قدرت تفکیک انرژی، بهره نوری، زمان فروافت سوسوزنی، لیان نوری، گرمایی.

۱. مقدمه

روش‌های موجود برای آشکارسازی و طیف‌نگاری بسیاری از پرتوها به شمار می‌آید. امروزه جستجو برای مواد سوسوزن جدید با توجه به نیاز روز افزون برای کاربردهای مختلف نظیر

آشکارسازی پرتوهای یونیزان توسط نور سوسوزنی ایجاد شده در مواد سوسوزن، یکی از قدیمی‌ترین روش‌های ثبت پرتوها محسوب می‌شود. فرایند سوسوزنی یکی از مفیدترین

استفاده می‌شود. با توجه به تحقیقات انجام شده، استفاده از آلاینده‌های In, Eu, Sm, Yb, Bi به دلیل ایجاد تراز در ساختار شبکه دید سزیم برای انتقال الکترون می‌تواند سرعت پاسخ سوسوزن را بهبود ببخشند و همچنین می‌توانند برای افزایش بهره نوری و قدرت تفکیک انرژی مطلوب مورد استفاده قرار گیرند [۷-۱۳]. در این پژوهش، بلورهای آشکارساز CsI(Tl) با آلاینده‌هایی نظیر CaF₂ (قلیایی) و TmF₂ (لاتانییدی) به روش بریجمن رشد داده شدند و با ورود آلاینده‌ها به داخل شبکه بلور، تغییرات خواص سوسوزنی اندازه‌گیری و ارزیابی شدند. لازم به ذکر است که اثر آلاینده‌های Tm و Ca تاکنون بررسی نشده‌اند، تأثیر افزودن این آلاینده‌ها در ساختار بلوری CsI(Tl) باعث تغییر چگالی مراکز به دام افتاده و زیر ترازهای لیانی می‌شوند، که در این تحقیق اندازه‌گیری و بررسی خواهند شد.

۲. روش کار

۱.۲. رشد بلور دید سزیم با آلاینده‌های مختلف

تک بلورهای CsI با آلاینده‌های Tm, Tl و Ca با استفاده از روش بریجمن در یک کوره شامل دو بخش فوقانی و تحتانی که با یک جرم نسوز^۳ از هم جدا شده‌اند، رشد داده شدند. شکل ۱ طرحی از سیستم ساخته شده رشد بلور به روش بریجمن و متعلقات آن را نشان می‌دهد. پودر CsI تمام نمونه‌ها به میزان یکسان و به همراه آلاینده‌های Tl, Tm و Ca مطابق با جدول ۱ در داخل بوتله قرار داده شد.

جدول (۱): درصد مولی آلاینده در نمونه‌ها.

| نوع آلاینده‌ها | درصد مولی آلاینده Tl | درصد مولی آلاینده‌های دیگر |
|----------------|----------------------|----------------------------|
| Tl | ۰/۳ | ... |
| Tl-Tm | ۰/۳ | ۰/۲ |
| Tl-Ca | ۰/۳ | ۰/۲ |

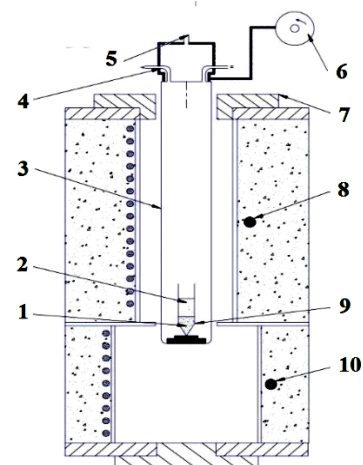
بازرسی صنعتی، دزیمتری، پزشکی هسته‌ای، تشخیص پزشکی، فیزیک انرژی بالا، اکتشافات فضایی، چاه پیمایی و ... در حال انجام است. با توجه به اینکه هیچ ماده سوسوزن ایده‌آلی یافت نمی‌شود، لذا ویژگی‌های نامطلوب هر سوسوزن بر اساس نوع کاربرد می‌تواند باعث تغییر در دقت اندازه‌گیری شود، بنابراین انتخاب نوع آشکارساز به کاربرد آن بستگی خواهد داشت. آشکارساز ایکس و گاما بایستی دارای خروجی نور بالا، شفافیت نور بالا، قدرت جذب بالای فوتون، پس‌تاب نوری کم (گسیل نور سوسوزنی تأخیری پس از نور سوسوزنی اصلی) و پاسخ سریع باشد [۱-۴]. دید سزیم به‌عنوان یک سوسوزن هالید قلیایی کاربردهای مختلفی دارد. دمای ذوب آن °C ۶۵۰ است و روش رشد بریجمن^۱ و چکرالسکی^۲ برای آن گزارش شده است. CsI(Tl) نور سوسوزنی با طول موج ۵۱۰ nm گسیل می‌کند که در نتیجه بازترکیب الکترون-حفره در حضور زیر تراز تالیوم می‌باشد [۵]. از جمله مزایای آشکارساز CsI(Tl) می‌توان به بهره نوری بالا، قدرت تفکیک انرژی مطلوب، چگالی بالا، نداشتن پس‌زمینه پرتوی داخلی، رطوبت‌پذیری پایین، فرآیند رشد و ساخت مناسب با توجه به دمای ذوب پایین و هزینه کم و نیز نرم بودن و شکل‌پذیری مطلوب آن اشاره کرد. همچنین از معایب این آشکارساز می‌توان به پاسخ زمانی کند حدود ۱ μs و پس‌تاب طولانی اشاره کرد که در بازه ۶ ms، حدود ۵-۵۰٪ کل نور خروجی را گسیل می‌کند. این مشخصه‌ها در مقایسه با NaI(Tl)، برای استفاده در طیف‌نگاری یک کاستی محسوب می‌شوند [۶]. امروزه تحقیقات وسیعی در زمینه کاهش پس‌تاب و افزایش سرعت پاسخ‌گویی سوسوزن‌ها صورت گرفته است. سوسوزن CsI(Tl) همراه با دیگر آلاینده‌ها به‌منظور کاهش زمان پس‌تاب، پاسخ زمانی سریع و بهینه‌سازی خواص آشکارسازی

¹ Bridgman

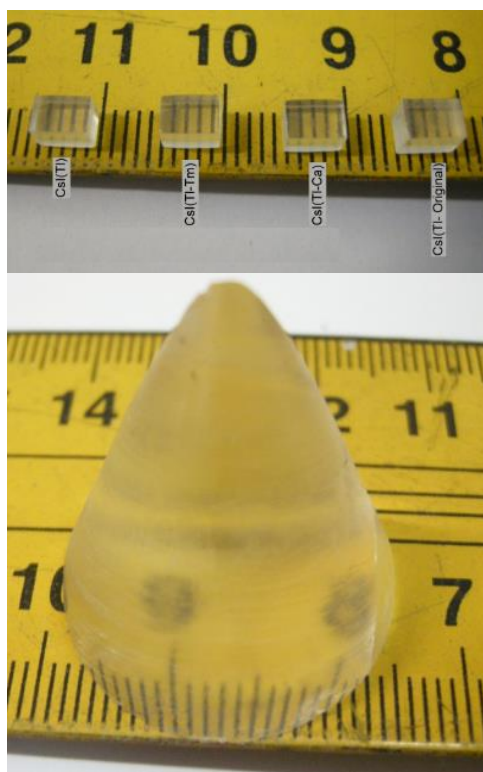
² Czochralski

³ Baffle

شده ضریب شکست بلور از پارامترهای مهمی است که باید در بلورهای سوسوزنی مورد بررسی قرار گیرد. نکته‌ای که لازم است به آن اشاره شود این است که CsI دارای ضریب شکستی برابر ۱/۷۹ است. در این پژوهش آلاینده‌ها با مقادیر بسیار کم به محیط میزبان CsI اضافه شده‌اند که اضافه کردن آلاینده در حد ۰/۳٪ مولی، تأثیر قابل مشاهده و قابل ملاحظه-ای روی ضریب شکست ندارد. سپس از نمونه‌ها پراش ایکس، لیان نوری، طیف گاما و گرمایی گرفته شد.



شکل (۱): طرحواره کوره دو بخشی مورد استفاده در رشد بلور به روش بریجمن، ۱: بلور، ۲: مذاب، ۳: راکتور، ۴: ورودی خلاء، ۵: قرائتگر خلاء، ۶: دستگاه کشنده 1mm/h، ۷: شیلد حرارتی، ۸: کوره منطقه ذوب، ۹: بوتله، ۱۰: کوره منطقه سرد.



شکل (۲): نمایی از بلور رشد داده شده (ابعاد بلور مخروطی به ارتفاع و قاعده ۲ سانتی‌متری).

۲.۲. اندازه‌گیری پراش ایکس، لیان نوری، طیف‌نگاری

گاما و گرمایی

اندازه‌گیری پراش ایکس از نمونه‌ها به جهت اطمینان از تک بلور بودن انجام شده است. طیف لیان نوری با استفاده از دستگاه LS55-Perkin Elmer در محدوده طول موج ۸۰۰-۲۰۰ nm در دمای اتاق اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری

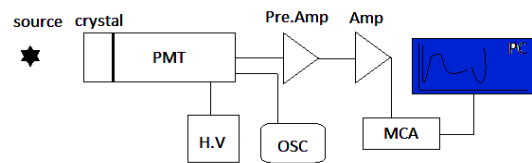
مواد اولیه (تهیه شده از کمپانی مرک^۱ و آلدریچ^۲ با درجه خلوص ۹۹/۹) پس از توزین در داخل بوتله گلاسه (ظرف استوانه‌ای با نوک مخروطی) ریخته شدند. بلور CsI باید در شرایط خلاء (بیش از 10^{-4} mbar) رشد داده شود [۱۴-۱۵]، بنابراین داخل کیسولی (آمپول) از جنس کوارتز قرار داده شد. بوتله به مدت ۲ ساعت در داغ‌ترین ناحیه کوره قرار گرفت تا تمام ماده ذوب شود. پس از آن بوتله به سمت مناطق با دمای پایین‌تر سوق داده شد. به‌منظور دستیابی به توزیع یکنواخت آلاینده‌ها، عملیات حرارتی پس از رشد کامل بلور، طی ۲۴ ساعت در دمای 500°C به کوره اعمال شد. پس از آن کوره با نرخ 50°C بر ساعت سرد شد. به‌منظور اطمینان از یکنواختی توزیع آلاینده‌ها در سرتاسر بلور، طیف فوتولومینسانس و طیف گاما بر اساس طول بلور گرفته شد که نتیجه یکسان به دست آمده نشان از یکنواختی توزیع آلاینده می‌دهد. شکل ۲ نمایی از بلور رشد داده شده را نشان می‌دهد. بلورهای شفاف و بدون ترک، در ابعاد $5 \times 5 \times 3 \text{ mm}^3$ برش خورده و پولیش داده شدند. در بررسی نمونه‌های ساخته

^۱ Merck

^۲ Aldrich

TI تقویت شده است. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، افزودن آلاینده‌ها باعث تغییر شدت و یا همان سطح زیر قله طیف گسیل می‌شوند، اما قله نوری مربوط به TI در همان طول موج ۵۱۰ nm مشاهده می‌شود که مطابق با نتایج ارائه شده در دیگر مقالات می‌باشد [۱۷]. رفتار طیف گسیل نمونه‌ها در بازه‌ی ۳۵۰-۶۵۰ nm یکسان می‌باشد و فقط سطح زیر قله آن‌ها با هم متفاوت می‌باشد. این امر نشان‌دهنده این است که کاتیون‌های F تأثیری در نتایج طیف لیان نوری و همچنین ایجاد قله گسیل دیگری ندارند. براساس این استدلال می‌توان با یک نوع لامپ تکثیرکننده فوتون (PMT)، مشخصه سوسوزنی نمونه‌ها را بدون توجه به بازه کوانتومی اندازه‌گیری کرد. لازم به ذکر است با این روند نتایج حاصل از مشخصه‌یابی سوسوزنی صرفاً به مشخصه اصلی سوسوزن‌ها بستگی دارد و نوع PMT در نتایج سوسوزنی اثرگذار نیست. همچنین در این تحقیق از PMT مدل XP2020 استفاده شده است [۱۸].

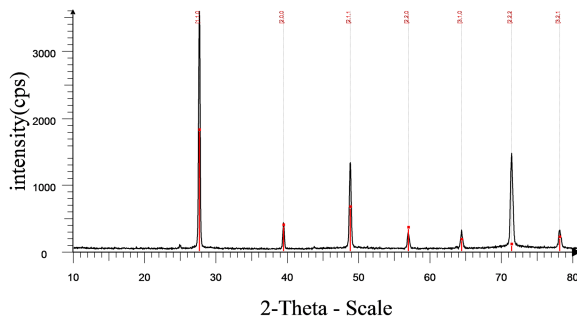
خواص سوسوزنی نمونه‌ها با چشمه ^{137}Cs و بدون سطح بازتابنده انجام شد. سپس بهره نوری، قدرت تفکیک انرژی و پاسخ زمانی نمونه‌ها در مقایسه با نمونه استاندارد [۱۶] اندازه‌گیری شد. شکل ۳ پیکربندی یک سیستم آشکارسازی برای آشکارساز سوسوزن را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری گرمالیانی (با نرخ گرمادهی $10^\circ\text{C}/\text{sec}$) با قرائت‌گر مدل Harshaw، نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت تحت تابش چشمه ^{90}Sr بتا قرار گرفتند. برای اندازه‌گیری گرمالیانی سعی شد که تمام نمونه‌ها با وزن یکسان و ابعاد $3 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$ برش داده شوند.



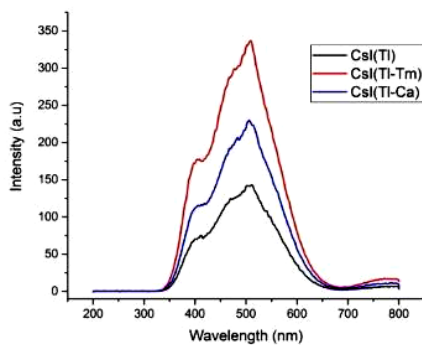
شکل (۳): پیکربندی یک سیستم آشکارسازی برای آشکارساز سوسوزن.

۳. بحث و بررسی

شکل ۴ ساختار بلوری CsI رشد شده را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری پراش ایکس از نمونه‌ها به جهت اطمینان از تک بلور بودن انجام شده است. مشخصه‌یابی نمونه CsI نشان دهنده ساختار مکعبی و تک بلور بودن نمونه است. همچنین با توجه به اینکه مقدار آلاینده‌ها، در نتایج پراش ایکس تغییرات محسوسی ایجاد نمی‌کند، پراش ایکس برای نمونه‌های با آلاینده انجام نشد. شکل ۵ طیف گسیل نمونه‌های رشد داده شده را که با طول موج ۳۰۸ nm (بیش‌ترین طول موج تحریک برای نمونه‌ها) تحریک شده‌اند، نشان می‌دهد. با توجه به تغییر نوع آلاینده‌ها، شدت طیف گسیل تغییر می‌کند. شدت طیف گسیل نمونه CsI با آلاینده TI-Tm نسبت به دیگر نمونه‌ها بیش‌تر می‌باشد که این اثر مربوط به ورود یون Tm می‌باشد. به دلیل ایجاد زیر تراز Tm، شدت قله گسیل مربوط به زیر تراز

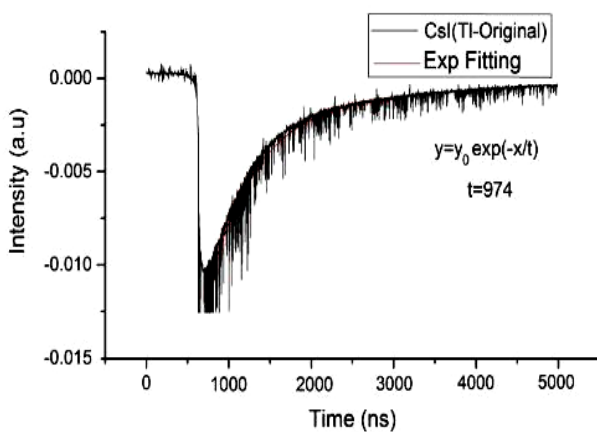


شکل (۴): طیف اندازه‌گیری پراش ایکس برای اطمینان از تک بلور بودن نمونه CsI.



شکل (۵): طیف گسیل نمونه‌ها با طول موج تحریکی ۳۰۸ nm.

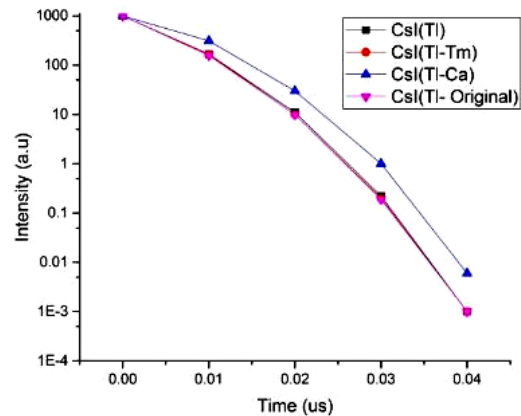
در شکل ۸، نمونه طیف خروجی آند PMT برحسب زمان-ولتاژ برای نمونه استاندارد CsI(Tl) نشان داده شده است. برای محاسبه زمان فروافت سوسوزنی از شکل پالس ولتاژ حاصل از آند لامپ تکثیرکننده فوتونی استفاده شد. به منظور میانگین‌گیری، آزمایش برای بیش از ۱۰ پالس تکرار شد. زمان فروافت سامانه الکترونیکی برای همه نمونه‌ها ثابت است. رفتار زمانی لبه بالارونده پالس توسط زمان فروافت مدار آند، $RC = \frac{1}{\theta}$ و رفتار زمانی دنباله پالس بر اساس زمان فروافت سیگنال سوسوزنی می‌باشد [۵]. برای محاسبه λ از برازش نمایی به طیف خروجی مربوط به نمونه‌ها استفاده شد. به منظور بررسی صحت آنالیز انجام شده، همین فرایند بر روی دیگر نمونه‌ها نیز انجام شد که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. این نتایج از پاسخ زمانی حاصل از طیف گسیل نمونه‌ها کسر شدند تا مؤلفه‌های پاسخ زمانی سوسوزنی کند و سریع مشخص شوند.



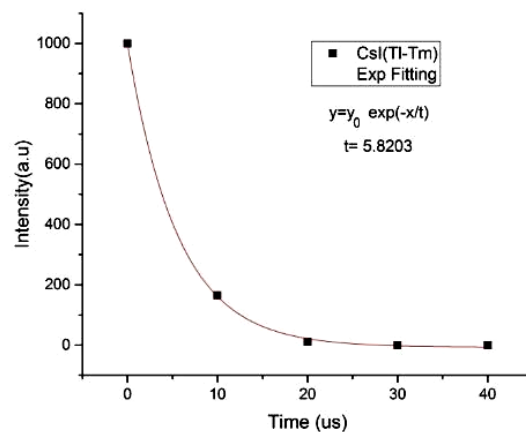
شکل (۸): طیف خروجی آند برای نمونه استاندارد CsI(Tl) با ارزیابی پاسخ زمانی ۹۷۴ ns.

شکل ۹ طیف گامای هر یک از نمونه‌ها را در مقابل چشمه ^{137}Cs با انرژی ۶۶۲ keV نشان می‌دهد. قدرت تفکیک انرژی و بهره نوری نمونه‌ها با نمونه استاندارد مقایسه شدند (جدول ۲).

شکل ۶ شدت قله گسیل نمونه‌ها را در بازه های زمانی $10 \mu\text{s}$ نشان می‌دهد. ثابت λ (ثابت زمانی فروافت سوسوزنی) با استفاده از شکل ۶ حاصل از طیف لیان نوری، محاسبه شد. برازش نمایی به طیف خروجی مربوط به ثابت زمانی فروافت سوسوزنی نمونه‌ها انجام شد. رفتار زمانی شدت قله گسیل بر اساس مجموع زمان نور سوسوزنی به صورت کند و سریع می‌باشد (شکل ۷). همین فرایند بر روی دیگر نمونه‌ها نیز انجام شد. لازم به ذکر است که همین فرایند برای نمونه استاندارد نیز انجام شد که با نتایج آن با نتایج گزارش شده توسط دیگران مطابقت دارد (نتایج در جدول ۲) [۱۳].



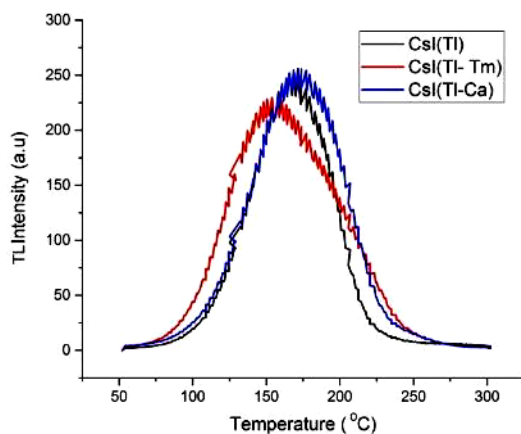
شکل (۶): طیف زمان فروافت سیگنال سوسوزنی بر اساس شدت گسیل نمونه‌ها.



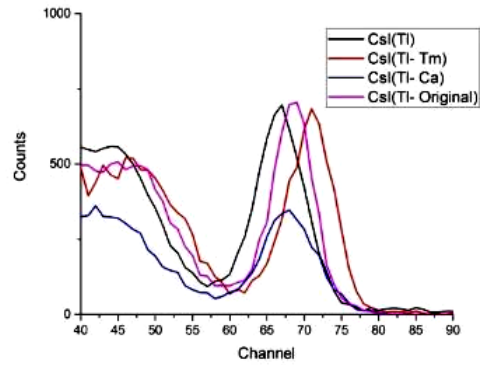
شکل (۷): طیف زمان فروافت سیگنال سوسوزنی بر اساس شدت گسیل نمونه CsI(Tl-Tm) با پاسخ زمانی در حدود $5.8203 \mu\text{s}$.

شدت کمتری است. برای اندازه‌گیری پس‌تاب از مکانیزم مبتنی بر فرایند گرمالیانی استفاده شد. لازم به ذکر است که پس‌زمینه دستگاه قرائت‌گر قبل از پرتودهی ۵ nQ اندازه‌گیری شده است. این اندازه‌گیری‌ها فقط برای نمونه‌های رشد داده با مقدار آلایندگی Tl یکسان انجام شد. لذا با توجه به عدم اطلاع از مقدار آلایندگی Tl در نمونه استاندارد، مقایسه و گزارش نتیجه برای نمونه استاندارد ارائه نمی‌شود. شکل ۱۰ و جدول ۲ نتایج حاصل از منحنی گرمالیانی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۰ می‌توان اثر پس‌تاب را در نمونه‌ها نسبت به نمونه CsI(Tl) به صورت زیر توضیح داد:

بر اساس نتایج، سطح زیر منحنی طیف گرمالیانی در نمونه CsI(Tl-Ca) افزایش یافته است که نشان می‌دهد چگالی مراکز دام الکترونی در ساختار شبکه‌ای نسبت به نمونه CsI(Tl) بیشتر می‌شود. همچنین در این بلور، قله گرمالیانی نمونه در دمای بالاتر نمایان شده است که نشان می‌دهد عمق چگالی مراکز الکترونی در ساختار شبکه‌ای بیشتر شده است، بنابراین باعث می‌شود در مدت زمان طولانی‌تری فرایند رهاسازی رخ دهد. پس انتظار می‌رود که این نمونه پس‌تاب بیشتری نسبت به نمونه CsI(Tl) داشته باشد. این نتایج با اندازه‌گیری زمان فروافت سوسوزنی کند که در جدول ۲ (ستون ج و د) نشان داده شده است، همخوانی دارد.

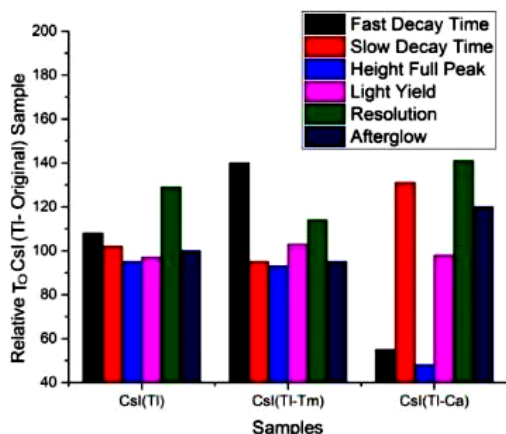


شکل (۱۰): طیف گرمالیانی نمونه‌ها.



شکل (۹): طیف ارتفاع پالس نمونه‌ها در انرژی ۶۶۲ keV در بازه زمانی ۱۵۰ s.

پس‌تاب، ناشی از بازترکیب تابشی الکترون‌ها و حفره‌ها است که با تأخیر زمانی رخ می‌دهد. با توجه به نوار انرژی بلور CsI(Tl)، قسمتی از الکترون‌ها در مراکز دام الکترونی Tl^+ گیر افتاده و پس از مدتی با اثر گرمایی از دام رها می‌شوند که فقط با مراکز دام حفره‌ای یا حفره‌های به دام افتاده (مراکز Tl^+) بازترکیب دارند، بنابراین گسیل متناظر با آن (پس‌تاب) با تأخیر قابل ملاحظه‌ای اتفاق می‌افتد. با افزایش دما در فرایند گرمالیانی، این الکترون‌های به دام افتاده در مراکز دام الکترونی آزاد شده و به نوار هدایت منتقل می‌شوند، لذا گرمای منظم و افزایش تدریجی دما باعث رهایی حامل‌های بار از دام و گسیل تابشی از مراکز لیانی می‌شود. سطح زیر منحنی گرمالیانی، چگالی الکترون‌های به دام افتاده را نشان می‌دهد که در اثر گرما از دام رها شده و با مراکز دام حفره‌ای بازترکیب شده و به گسیل تابشی تبدیل شده‌اند. لذا سطح زیر منحنی گرمالیانی بیانگر میزان دام الکترونی در ساختار شبکه‌ای می‌باشد، که اگر این مقدار کم باشد، نشان‌دهنده کم بودن چگالی مراکز دام الکترونی در ساختار شبکه‌ای است. همچنین مکان قله گرمالیانی در دماهای کم ظاهر می‌شود که نشان می‌دهد عمق چگالی مراکز الکترونی در ساختار شبکه‌ای کم است، لذا فرایند رهاسازی در مدت زمان کم‌تری انجام می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پس‌تاب یا تأخیر زمانی سوسوزن، دارای



شکل (۱۱): مقایسه خواص سوسوزنی نمونه‌ها (مطابق جدول ۲) با

آلاینده‌های متفاوت با نمونه استاندارد.

همچنین سطح زیر منحنی طیف گرمایی نمونه CsI(Tl-Tm) کاهش پیدا کرده که نشان‌دهنده کاهش چگالی مراکز دام الکترونی در ساختار شبکه‌ای نسبت به نمونه CsI(Tl) است. قله گرمایی نمونه در دمای پایین‌تر نمایان شده است که نشان‌دهنده عمق کم چگالی دام الکترونی در ساختار شبکه‌ای و به دنبال آن مدت زمان کوتاه‌تر فرایند رهاسازی است.

پس انتظار می‌رود که این نمونه نسبت به نمونه CsI(Tl)

پس تاب کم‌تری داشته باشد (جدول ۲).

جدول (۲): خواص سوسوزنی نمونه‌ها، (الف): زمان فروافت سوسوزنی قله گسیل حاصل از طیف لیان نوری، (ب): زمان فروافت سوسوزنی حاصل از طیف پالس آند نمونه‌ها در مقابل چشمه ^{137}Cs ، (ج): اختلاف الف و ب به عنوان زمان فروافت کند سوسوزنی یا همان پس تاب نمونه‌ها، (د): سطح زیر منحنی گرمایی به عنوان شاخص پس تاب، (ه): ارتفاع تمام قله گاما نمونه‌ها در مقابل چشمه ^{137}Cs ، (و): بهره نوری نمونه نسبت به نمونه استاندارد در مقابل چشمه ^{137}Cs .

| نوع آلاینده‌ها | زمان فروافت (μs) | زمان فروافت سریع (ns) | زمان فروافت کند (μs) | سطح زیر منحنی گرمایی (nQ) | ارتفاع قله گاما، شمارش | بهره نوری (%) | قدرت تفکیک انرژی در keV |
|-----------------------|------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------|------------------------|---------------|-------------------------|
| (الف) | (ب) | (ج) | (د) | (ه) | (و) | (و) | ۶۶۲ |
| Tl(0.3) | ۵/۸۷۱۷ | ۱۰۵۴ | ۴/۸۱۷۷ | ۱۵۸۳۶ | ۶۰۵ | ۶۶ | ۱۱ |
| Tl-Tm(0.3-0.2) | ۵/۸۲۰۳ | ۱۳۷۳ | ۴/۴۴۷۳ | ۱۵۱۴۰ | ۵۹۱ | ۷۰ | ۹/۷ |
| Tl-Ca(0.3-0.2) | ۶/۷۱۸۷ | ۵۳۷ | ۶/۱۸۱۷ | ۱۹۱۰۱ | ۳۰۵ | ۶۷ | ۱۲ |
| Tl- Original | ۵/۶۶۰ | ۹۷۴ | ۴/۶۸۶ | ۲۴۸۳۰ | ۶۳۶ | ۶۸ | ۸/۵ |

شکل ۱۱ مقایسه نتایج حاصل از خواص سوسوزنی نمونه‌ها با نمونه استاندارد می‌باشد. با توجه به شکل ۱۱ و جدول ۲، خواص سوسوزنی نمونه CsI(Tl) در مقایسه با نمونه استاندارد مطلوب نیست. قدرت تفکیک انرژی ۱۱٪ و بهره نوری آن نسبت به نمونه استاندارد ۹۷٪ اندازه‌گیری شده است. با توجه به زیرتراز لیانی Tl، پاسخ زمانی آن ۱۰۵۴ نانومتر-گیری شده است. این اختلاف ناشی از سرعت انتقال انرژی زیرتراز لیانی Tl و طول عمر حالت گسیل از مرکز لیانی است

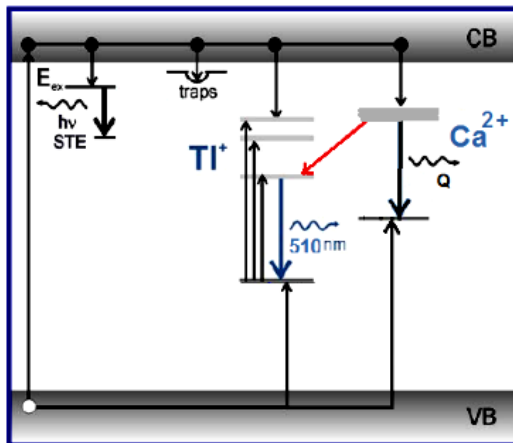
شکل ۱۱ مقایسه نتایج حاصل از خواص سوسوزنی نمونه‌ها با نمونه استاندارد می‌باشد. با توجه به شکل ۱۱ و جدول ۲، خواص سوسوزنی نمونه CsI(Tl) در مقایسه با نمونه استاندارد مطلوب نیست. قدرت تفکیک انرژی ۱۱٪ و بهره نوری آن نسبت به نمونه استاندارد ۹۷٪ اندازه‌گیری شده است. با توجه به زیرتراز لیانی Tl، پاسخ زمانی آن ۱۰۵۴ نانومتر-گیری شده است. این اختلاف ناشی از سرعت انتقال انرژی زیرتراز لیانی Tl و طول عمر حالت گسیل از مرکز لیانی است

که نسبت به حالت نمونه استاندارد کندتر می‌باشد. دلیل آن می‌تواند عدم تعیین غلظت بهینه Tl باشد که در مجموع میانگین زمان پاسخ سوسوزنی را کندتر می‌کند. بدیهی است که این پدیده تأثیر بسزایی در طیف‌نگاری گاما داشته و روند سوسوزنی و همچنین میزان قدرت تفکیک انرژی را تحت تأثیر خود قرار داده است.

مقدار Tl در نمونه CsI(Tl-Tm) برابر نسبت وزنی نمونه CsI(Tl) است، ولی آلاینده Tm نیز به آن افزوده شده است.

در نمونه CsI(Tl-Ca) مقدار Tl برابر نسبت وزنی نمونه CsI(Tl) است، ولی آلاینده Ca نیز به آن افزوده شده است. شدت طیف گسیل آن نسبت به نمونه CsI(Tl) بیش تر است. با توجه به شکل ۱۱ و جدول ۲، قدرت تفکیک انرژی 662 keV سزیم 137 برابر 12% و بهره نوری آن نسبت به نمونه استاندارد 98% اندازه گیری شده است با توجه به زیرتراز لیانی آلاینده های Ca و Tl ، پاسخ زمانی آن 537 nm اندازه گیری شده است که نسبت به حالت نمونه استاندارد سریع تر است. آلاینده Ca^{2+} با ایجاد تراز جدید انرژی، نقش دام مؤثر الکترونی را برای تسریع انتقال الکترون به تراز لیانی Tl دارد (شکل ۱۳).

همچنین به دلیل عمیق بودن مراکز دام الکترونی Ca^{2+} ، پس تاب و زمان پاسخ سوسوزنی تأخیری آن نسبت به نمونه CsI(Tl) بیش تر است. این نتایج را می توان با توجه به سطح زیر منحنی طیف گرمالیانی نیز ملاحظه کرد. با توجه به این توضیحات، آمار جمع آوری فوتون کم تر شده و روند سوسوزنی و همچنین قدرت تفکیک انرژی را تحت تأثیر خود قرار می دهد. همچنین اندازه گیری یکنواختی توزیع آلاینده در نمونه ها نیز بسیار اهمیت دارد.

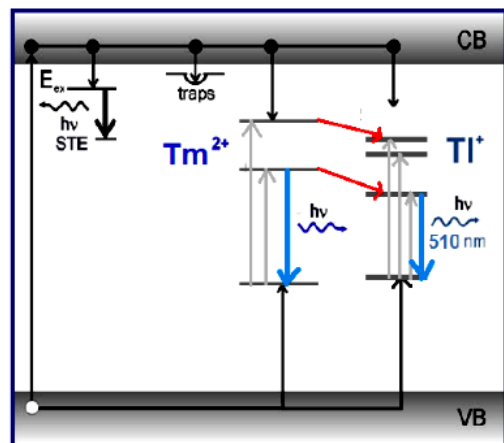


شکل (۱۳): طرحواره ای از نوار انرژی آشکارساز CsI(Tl-Ca) .

طیف گسیل آن نسبت به دیگر نمونه ها شدت بیشتری دارد. با توجه به شکل ۱۱ و جدول ۲، قدرت تفکیک انرژی در قله 662 keV سزیم 137 برابر $9/7\%$ و بهره نوری آن نسبت به نمونه استاندارد 103% اندازه گیری شده است که نسبت به نمونه CsI(Tl) نتایج مطلوب تری دارد.

با توجه به زیرتراز لیانی آلاینده های Tm و Tl ، پاسخ زمانی CsI(Tl-Tm) 1373 nm اندازه گیری شده است که پاسخ زمانی آن نسبت به نمونه استاندارد کندتر شده است. جذب و گسیل در زیرتراز لیانی Tm با گسیل زیرتراز Tl همپوشانی دارد، بنابراین گذار انتقال انرژی در ساختار شبکه ای بلور ایجاد می شود که به سبب آن آمار جمع آوری فوتون و شدت بهره نوری بیش تر شده، همچنین قدرت تفکیک انرژی نسبت به نمونه CsI(Tl) بهبود می یابد (شکل ۱۲).

مراکز دام الکترونی Tm^{2+} کم عمق می باشند و پس تاب و زمان پاسخ سوسوزنی تأخیری آن نسبت به نمونه CsI(Tl) کم تر است. این نتایج را می توان در سطح زیر منحنی طیف گرمالیانی نمونه ملاحظه کرد. با توجه به همپوشانی گسیل های مراکز Tl و Tm پاسخ سوسوزنی افزایش می یابد.



شکل (۱۲): طرحواره ای از نوار انرژی آشکارساز CsI(Tl-Tm) .

۴. نتیجه گیری

یون آلاینده Tl^+ ، باعث افزایش سرعت پاسخ سوسوزنی می‌شود. بر اساس نتایج گرمالیانی، با ورود این آلاینده به داخل ساختار شبکه‌ای CsI(Tl) چگالی دام الکترونی عمیق‌تر شده است و پس‌تاب نمونه نسبت به نمونه CsI(Tl) بیش‌تر می‌شود. مقدار ثابت زمان کند فروافت سوسوزنی با پس‌تاب نمونه‌ها رابطه مستقیم دارد که این تأثیر را می‌توان در جدول ۲ و شکل ۱۰ مشاهده کرد.

بر اساس نتایج طیف لیان نوری و طیف گاما، اثر آلاینده (نوع و غلظت آلاینده) در شدت طیف گسیل و مشخصه سوسوزنی اثر به‌سزایی دارد. برای دستیابی به بلوری با مشخصات سوسوزنی بهینه مورد نظر بر اساس پس‌تاب و نیز بهره نوری، باید غلظت آلاینده ورودی بهینه شده و نیز بعد از رشد اندازه‌گیری شود که در ادامه این پژوهش به آن پرداخته خواهد شد.

در این پژوهش، بلورهای آشکارساز CsI(Tl) با آلاینده‌هایی نظیر Ca و Tm به روش بریجمن رشد داده شدند. با ورود این آلاینده‌ها به داخل شبکه بلور CsI(Tl)، خواص سوسوزنی برای دستیابی به عملکرد مطلوب برای آشکارسازی گاما مورد بررسی قرار گرفت. آلاینده Tm^{2+} در ساختار شبکه‌ای CsI(Tl) منجر به افزایش بهره نوری و بهبود خواص سوسوزنی شده است، همچنین پاسخ سوسوزنی به دلیل همپوشانی گسیل‌های مراکز Tl و Tm افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج حاصل از اندازه‌گیری گرمالیانی، با ورود این آلاینده به داخل ساختار شبکه‌ای CsI(Tl)، چگالی دام الکترونی کم عمق می‌شود که منجر به پس‌تاب کم‌تری نسبت به نمونه CsI(Tl) خواهد شد. آلاینده Ca^{2+} در ساختار شبکه‌ای CsI(Tl) اثر نامطلوب در بهره نوری و قدرت تفکیک انرژی دارد، هر چند که ورود این آلاینده به دلیل ایجاد دام الکترونی و بازترکیب با

۵. مراجع

- [1] T. Jing, C. Goodman, J. Drewery, G. Cho, W. Hong, H. Lee, S. Kaplan, A. Mireshghi, V. Perez-Mendez and D. Wildermuth. Amorphous silicon pixel layers with cesium iodide converters for medical radiography, IEEE Trans. Nucl. Sci. 41 (1994) 903–909.
- [2] N. Martin. Scintillation detectors for x-rays, Meas. Sci. Technol. 17 (2006) 37–54.
- [3] A. Jhingan, P. Sugathan, Gurpreet Kaur, K. Kapoor, N. Saneesh, T. Banerjee, H. Singh, A. Kumar, B. Behera and B. Nayak. Front-end electronics for CsI based charged particle array for the study of reaction dynamics, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 786 (2015) 51–58.
- [4] W. Carel and V. Eijk. Inorganic scintillators in medical imaging detector, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 509 (2003) 17-25.
- [5] G.F. Knoll. Radiation Detection and Measurement, Third Edition, Wiley Inc., New York, (2000).
- [6] www.crystals.saint-gobain.com/sites/imdf.crystals.com/files/documents/Scintillation Arrays. sgc-array-assemblies.pdf.
- [7] C. Brecher, A. Lempicki, S.R. Miller, J. Glodo, E.E. Ovechkina, V. Gaysinskiy, V.V. Nagarkar and R.H. Bartram. Suppression of afterglow in CsI:Tl by codoping with Eu^{2+} —I: Experimental, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 558 (2006) 450–457.
- [8] E. Ovechkina, V. Gaysinskiya, S. Millera, C. Brecher, A. Lempicki and V. Nagarkara. Multiple doping of CsI:Tl crystals and its effect on afterglow, Radiation Measurements 42 (2007) 541–544.
- [9] J. Glodo, Y. Wang, R. Shawgo, C. Brecher, H. Hawrami, J. Tower and S. Shah. New Developments in Scintillators for Security Applications. Physics Procedia 90 (2017) 285–290.
- [10] L.A. Kappers, R.H. Bartram, D.S. Hamilton, A. Lempicki, C. Brecher, V. Gaysinskiy, E.E. Ovechkina, S. Thacker and V.V. Nagarkar. A tunneling model for afterglow suppression in CsI:Tl, Sm scintillation materials, Radiation Measurements 45 (2010) 426–428.
- [11] D. Totsuka, T. Yanagida, Y. Fujimoto, Y. Yokota, F. Moretti, A. Vedda and A. Yoshikawa. Afterglow Suppression by Codoping with Bi in CsI:Tl Crystal Scintillator, Applied Physics Express 5 (2012) 052601–052603.

- [12] Y. Wu, G. Ren, M. Nikl, X. Chen, D. Ding, S. Pana and F. Yang. CsI:Tl+,Yb²⁺: ultra-high light yield scintillator with reduced afterglow, 3312, Cryst Eng. Comm 16 (2014) 3312–3317.
- [13] Y. Wu, G. Ren, F. Meng, X. Chen, D. Ding, H. Li, S. Pan and L. Melcher. Scintillation Characteristics of Indium Doped Cesium Iodide Single Crystal, IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE 62 (2015) 571–576.
- [14] S. Singh, D. Desai, A. Singh, M. Tyagi, A. Sinha, S. Gadkari and S. Gupta. Growth of CsI:Tl crystals in carbon coated silica crucibles by the gradient freeze technique. Journal of Crystal Growth 351 (2012) 88–92.
- [15] A. Yoshikawa, Y. Yokota, Y. Shoji, R. Kral, K. Kamada, S. Kurosawa, Y. Ohashi, M. Arakawa, I. Chani, V. Kochurikhin, A. Yamaji, M. Andrey and M. Nikl. Development and melt growth of novel scintillating halide crystals. Optical Materials 74 (2017) 109–119.
- [16] <http://www.amcrys.com/pdf/4281.pdf>.
- [17] Y. Wu, G. Ren, M. Nikl, X. Chen, D. Ding, S. Pan and F. Yang. Ultralow-concentration Sm codoping in CsI:Tl scintillator: A case of little things can make a big difference, Optical Materials 38 (2014) 297–300.
- [18] <http://www.photonis.com>.