

محاسبه زمان فروافت سیگنال سوسوزن های غیر آلی با استفاده از شکل پالس داینود لامپ تکثیر کننده فوتونی به عنوان یک راهکار بررسی کیفیت رشد بلور

شاه ملکی، سجاد - رحمانی، فائزه

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده فیزیک، گروه فیزیک هسته‌ای

چکیده:

در این پژوهش، با استفاده از شکل پالس ولتاژ حاصل از داینود لامپ تکثیرکننده فوتونی به محاسبه ثابت زمانی سوسوزن پرداخته شد. چندین نمونه‌ی سوسوزنی ($NaI(Tl)$, $CsI(Tl)$, $CsI(Na)$, BSO) رشد داده شدند. با طراحی یک سیستم الکترونیک هسته‌ای، زمان فروافت سیگنال این نمونه‌ها با تقریب مناسبی محاسبه شد. برای بررسی صحت انجام آزمایش، یک نمونه سوسوزن استاندارد $NaI(Tl)$ نیز با روش ارائه شده مورد آزمایش قرار گرفت. برای دیگر نمونه‌های استاندارد نیز این آزمایش انجام شد و نتایج مطلوبی به دست آمد. اختلاف زمان فروافت سیگنال سوسوزن‌های رشد داده شده با مقدار استاندارد می‌تواند به عنوان معیاری برای بررسی کیفیت بلور رشد داده شده مورد ارزیابی قرار گیرد.

کلمات کلیدی: زمان فروافت سیگنال سوسوزنی، لامپ تکثیرکننده فوتونی، داینود، یدور سدیم، بلور سوسوزنی.

مقدمه :

زمان فروافت سیگنال سوسوزن مدت زمانی است که شدت پالس نور به $1/e$ مقدار بیشینه آن کاهش می‌یابد و یکی از مشخصات مهم سوسوزن‌ها محسوب می‌شود. اغلب سوسوزن‌ها دارای بیش از یک زمان واپاشی هستند که باید زمان فروافت سیگنال متوسط مؤثر برای آنها در نظر گرفته شود. این خاصیت در سرعت شمارش و کاربردهای زمانی دارای اهمیت است. پاسخ زمانی سوسوزن بستگی به سرعت انتقال انرژی مرکز لومینسانس و طول عمر حالت نشر از مرکز لومینسانس می‌باشد [۱]. بدست آوردن زمان فروافت سیگنال سوسوزن‌ها با دستگاه‌های تشخیصی فتولومینسانس انجام می‌شود. همچنین در صورتی که پاسخ زمانی این سوسوزن‌ها کمتر از ۱۰۰۰ نانو ثانیه باشد، نوع دستگاه‌های تشخیصی متفاوتی برای اندازه‌گیری زمانی استفاده خواهد شد. به عنوان مثال، برای بدست آوردن زمان فروافت سیگنال سوسوزنی در مرتبه کمتر ۱۰۰۰ نانو ثانیه احتیاج به شمارنده تک فوتونی است که با سیستم فلورسانس (FLS920) با تأخیر زمانی نانو ثانیه‌ای اندازه‌گیری می‌شود و یا از روش همزمانی با استفاده از LBNL Pulsed X-ray Facility که ۴۰۰۰ فوتون با

انرژی میانگین 18.5 keV در هر 1 ps تولید می‌کند، استفاده می‌شود [۲، ۳]. تهیه چنین سیستم‌هایی در داخل کشور به منظور اندازه‌گیری ثابت واپاشی ساده نیست، لذا با استفاده از سیستم‌های الکترونیکی هسته‌ای، آزمایشی طراحی شد تا به‌عنوان ابزار اندازه‌گیری زمان فروافت سیگنال نمونه‌های تولید شده در مرتبه نانو ثانیه در آزمایشگاه قابل استفاده باشد. این اندازه‌گیری می‌تواند به عنوان معیاری برای بررسی کیفیت رشد بلور مورد استفاده قرار گیرد زیرا در صورتی که کیفیت رشد بلور مناسب نباشد، زمان سوسوزنی طولانی‌تر شده که می‌تواند بر قدرت تفکیک انرژی اثرگذار باشد.

روش کار:

شکل پالس ولتاژ حاصل از داینود یک لامپ تکثیرکننده فوتونی (PMT) پس یک رخداد سوسوزنی، به ثابت زمانی مدار داینود وابسته است. مدار آند در خروجی PMT را می‌توان همانند شکل (۱) در نظر گرفت. در این شکل C ظرفیت آند به علاوه ظرفیت کابل‌های متصل و ظرفیت ورودی مداری است که آند به آن متصل است. جریان عبوری از آند $i(t)$ ناشی از جریان الکترون‌های حاصل از یک پالس است که در زمان $t=0$ آغاز شده است. شکل پالس ولتاژ آند نیز بر اساس $i(t)$ به دست خواهد آمد. در اینجا یک پالس الکترونی نوعی که به دنبال یک رخداد سوسوزنی شکل می‌گیرد، در نظر گرفته شده است. مؤلفه اصلی نور گسیل شده از اغلب سوسوزن‌ها توسط یک واپاشی ساده بیان می‌شود [۵]. اگر پهن شدگی زمان عبور الکترون در لامپ در مقایسه با این زمان فروافت سیگنال کوچک باشد، جریان الکترونی رسیده به آند لامپ تکثیرکننده فوتونی برابر است با:

$$i(t) = i_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

که λ ثابت واپاشی سوسوزن است. جریان اولیه، i را می‌توان برحسب کل بار جمع شده در مدت زمان پالس به صورت زیر بیان کرد:

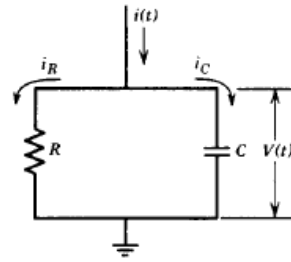
$$Q = \int_0^{\infty} i(t) dt \quad (2)$$
$$= i_0 \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{i_0}{\lambda}$$

بنابراین:

$$i_0 = \lambda Q \quad (3)$$

و معادله جریان برحسب زمان به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$i(t) = \lambda Q e^{-\lambda t} \quad (4)$$



شکل (۱) مدار موازی RC ساده شده در مدار آندی یک لامپ تکتی‌رکننده فوتونی

که جریان عبوری از مدار موازی RC برابر مجموع جریان عبوری از خازن، i_C و جریان عبوری از مقاومت، i_R است، لذا:

$$i(t) = i_C + i_R \quad (5)$$

$$i(t) = C \frac{dV(t)}{dt} + \frac{V(t)}{R} \quad (6)$$

با قرار دادن معادله (۴) برای $i(t)$ و تقسیم طرفین بر ظرفیت خازن، معادله (۶) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{dV(t)}{dt} + \frac{1}{RC} V(t) = \frac{\lambda Q}{C} e^{-\lambda t} \quad (7)$$

و با حل این معادله با شرط اولیه $V(0)=0$ رابطه ولتاژ برابر خواهد شد با:

$$V(t) = \frac{1}{\lambda - \theta} \cdot \frac{\lambda Q}{C} (e^{-\theta t} - e^{-\lambda t}) \quad (8)$$

که مقدار θ در معادله بالا معکوس ثابت زمانی مدار آندی یعنی $1/RC$ است.

در حالتی که ثابت زمانی آندی در مقایسه با زمان فروافت سیگنال سوسوزن کوچک باشد ($\lambda \ll \theta$) مقدار ثابت زمانی آندی برابر با ۱۸ نانو ثانیه است که در مقایسه با ۲۳۰ نانو ثانیه کوچک است)) ولتاژ خروجی برابر است با:

$$V(t) = \frac{\lambda Q}{\theta C} (e^{-\lambda t} - e^{-\theta t}) \quad (9)$$

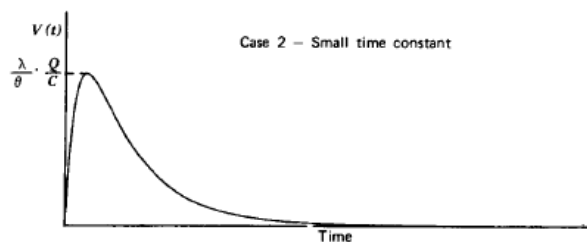
نمودار این پالس در شکل (۲) نشان داده شده است. در این حالت رفتار زمانی پالس برای زمان‌های کوچک t با معادله زیر بیان می‌گردد:

$$V(t) = \frac{\lambda Q}{\theta C} (1 - e^{-\theta t}) \quad (t \ll \frac{1}{\lambda}) \quad (10)$$

و برای t های بزرگ برابر نیز رابطه ولتاژ برابر خواهد بود با:

$$V(t) = \frac{\lambda Q}{\theta C} e^{-\lambda t} \quad (t \gg \frac{1}{\theta}) \quad (11)$$

لبه بالارونده پالس به صورت $(1 - e^{-\theta t})$ تابعی از ثابت زمانی مدار آند، $RC = \frac{1}{\theta}$ و رفتار زمانی دنباله پالس به صورت $e^{-\lambda t}$ تابعی از زمان فروافت سیگنال نور سوسوزنی می باشد. پس برای سوسوزن های معدنی یا حالت جامد در صورت برقرار بودن شرط زمانی (رابطه ۹ و ۱۰) براساس نوع PMT استفاده شده، می توان از این رابطه برای محاسبه λ یا همان زمان فروافت سیگنال سوسوزن استفاده کرد [۴-۵].



شکل (۲) نمودار ولتاژ دای نمود $V(t)$ به ازای ثابت زمانی کوچک آند برای یک پالس

نوری [5]

شرح آزمایش:

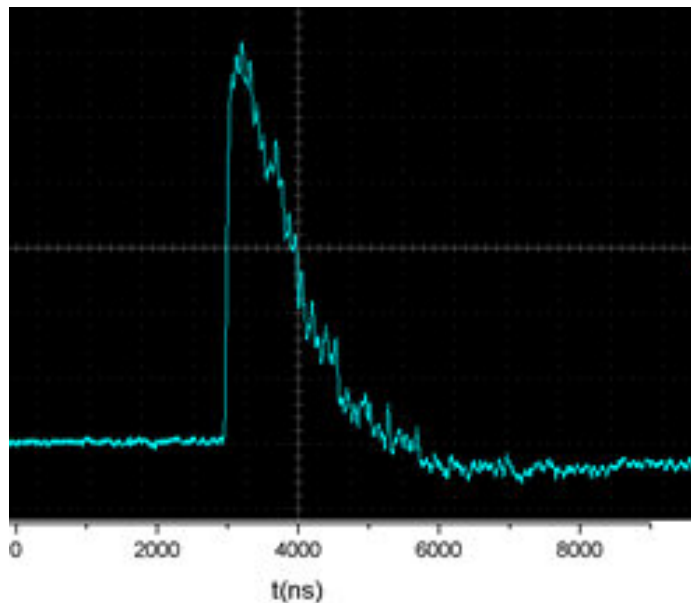
ابتدا تمام بلورهای سوسوزن رشد داده در آزمایشگاه رشد بلور را با یک سیستم الکترونیکی با مشخصات زیر با استفاده از چشمه سزیم ۱۳۷ طیف نگاری می کنیم:

(PMT:Photonis-XP2020, Base:IAP2025Za, H.V -1800V, Time 1000s, Output: Dynode, Amp gain: 3, Shaping time: 0.25 us, PreAmp: 3001, Amp: IAP 3600, ADC: IAP 4010)

ثابت زمانی سیستم الکترونیکی برای همه نمونه ها ثابت است، لذا مقدار مربوطه را برای نمونه استاندارد محاسبه و سپس این مقدار را از ثابت زمانی سایر نمونه ها کسر می کنیم. طیف نگاری از خروجی داینود PMT برای تک تک نمونه ها براساس زمان انجام می شود. با این کار جمع آوری نور بر اساس زمان ثبت خواهد شد.

در شکل (۳) نمونه طیف خروجی داینود PMT را بر حسب زمان - ولتاژ در اسیلوسکوپ نشان داده شده است.

همانطور که بیان شد، رفتار زمانی لبه بالارونده پالس توسط ثابت زمانی مدار آند، $RC = \frac{1}{\theta}$ و رفتار زمانی دنباله پالس بر اساس زمان فروافت نور سوسوزنی می باشد. برازش نمایی به طیف خروجی به دست آمده انجام شد تا λ (زمان فروافت سیگنال) مربوط به نمونه ها محاسبه شود. به منظور بررسی صحت آنالیز انجام شده، همین فرایند برای نمونه های استاندارد نیز انجام شد که نتایج آن در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل (۳): طیف خروجی دای‌نود برای نمونه NaI(Tl) رشد داده در آزمایشگاه رشد بلور

جدول (۱): زمان فروافت سیگنال نمونه سوسوزن‌های رشد داده در آزمایشگاه رشد بلور

نمونه	قدرت تفکیک انرژی در انرژی 661 keV(%) برای نمونه های رشد داده شده	قدرت تفکیک انرژی در انرژی 661 keV(%) نمونه استاندارد [۵]	زمان فروافت سیگنال با استفاده از پالس داینود برحسب ns	زمان فروافت سیگنال استاندارد [۵] برحسب ns	سوسوزن
Amcrys	7	7	254	230	NaI(Tl)
آزمایشگاه رشد بلور	10	7	275	230	NaI(Tl)
آزمایشگاه رشد بلور	14	7	481	230	NaI(Tl)
آزمایشگاه رشد بلور	11	8	1210	998	CsI(Tl)
آزمایشگاه رشد بلور	15	7	641	460	CsI(Na)
آزمایشگاه رشد بلور	35	22[6]	369	121[6]	BSO

بحث و نتیجه گیری:

در این پژوهش یک روش آزمایشگاهی در دسترس برای اندازه‌گیری زمان‌های واپاشی نمونه‌های سوسوزنی ارائه شد. برای صحت سنجی فرایند ارائه شده، زمان فروافت سیگنال نمونه سوسوزن استاندارد NaI(Tl) تهیه شده از کمپانی Amcrys مطابق با مرجع، 230 ns گزارش شده است، در صورتیکه زمان فروافت سیگنال این نمونه با آزمایش طراحی شده، 254 ns اندازه‌گیری شد. اختلاف را می‌توان به تأخیر زمانی سیستم الکترونیکی نسبت داد و با توجه به استفاده از همین سیستم الکترونیکی برای اندازه‌گیری سایر نمونه‌ها، زمان مذکور را از زمان محاسبه شده برای نمونه‌ها کسر کرد. در نمونه NaI(Tl) رشد داده شده در آزمایشگاه رشد بلور، زمان فروافت سیگنال 275 ns اندازه‌گیری شده است که 24 ns مربوط به تأخیر زمانی سیستم الکترونیکی می‌باشد. پس زمان فروافت سیگنال نمونه NaI(Tl) رشد داده شده تقریباً 251 ns می‌باشد که این میزان اختلاف (۲۱ نانو ثانیه بیشتر از حالت استاندارد) ناشی از سرعت انتقال انرژی مرکز لومینسانس و طول عمر حالت گسیل از مرکز لومینسانس است که نسبت به حالت استاندارد کندتر می‌باشد. به این مفهوم که علاوه بر زیر تراز ناخالصی Tl در شبکه کریستالی، کمپلکس‌های دیگری مانند ترکیبات آب و پیوند های OH با ناخالصی Tl در شبکه کریستالی موجود می‌باشند که در مجموع میانگین زمان فروافت سیگنال 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 می‌دهد. به بیان دیگر، زمان فروافت سیگنال نمونه‌ها (در صورت یکسان بودن خطای حاصل از سیستم های الکترونیکی را در تمام نمونه‌ها) با میزان قدرت تفکیک انرژی رابطه مستقیم دارند. همان طور که در جدول بالا ملاحظه می‌کنید برای نمونه‌های NaI(Tl) رشد داده شده در آزمایشگاه رشد بلور، زمان فروافت سیگنال به ترتیب 481-275 ns اندازه‌گیری شده است (که تقریباً 24 ns مربوط به تأخیر زمانی سیستم الکترونیکی می‌باشد) و قدرت تفکیک در انرژی 661 keV این نمونه‌ها به ترتیب 10-14% می‌باشد در صورتیکه این مقدار بایستی در حدود 7% باشد که این اختلاف ناشی از زیر ترازهای نامطلوب در شبکه بلور می‌باشد. برای نمونه‌های (CsI(Tl), CsI(Na), BSO) هم این موارد صادق است. در صورتی‌که این نمونه‌ها از نظر فرایند رشد بهینه شوند و قدرت تفکیک مطلوب به دست آید، زمان فروافت سیگنال نمونه هم مطابق با نمونه‌های استاندارد کاهش خواهد یافت.

مراجع:

- [1] H. Wiczorek, "Physical aspects of detector design", Radiation Measurements. 33(2001) 541-545.
- [2] G. Ren et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 579 (2007) 11-14.
- [3] K.S. Shah et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 505 (2003) 76-81.



بیست و سومین کنفرانس هسته‌ای ایران



۱۵ و ۴ اسفندماه ۱۳۹۵ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

- [4] W.H. Wong and H. Li, IEEE Trans. Nucl. Sci. 45(3), 838 (1998).
[5] G.F. Knoll., Radiation Detection and Measurement, Third Edition, Wiley Inc., New York, 2000.
[6] J.Hua.et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics research A 648 (2011)73-78.