



انتخاب بهترین روش زمان‌سنجی برای امواج خروجی از آشکارسازهای سیلیکونی فوق سریع UFSD

محمد فدوی مزینانی^{۱*}، علی اصغر مولوی^۲

۱. گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، صندوق پستی: ۱۴۳۵۷۶۳۸۱۱، تهران - ایران

۲. گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، کدپستی: ۹۱۷۷۹۴۸۹۷۴، مشهد - ایران

*Email: fadavi54@gmail.com

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۹/۱۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱/۱۷

چکیده

روش‌های مختلفی برای زمان‌سنجی امواج مشابه و با تحریک یکسان ارائه شده است که با توجه به شرایط موج می‌توان بهترین گزینه را انتخاب کرد. لذا هدف ما یافتن بهترین روش زمان‌سنجی جهت امواج خروجی از حسگر UFSD است زیرا می‌خواستیم از این حسگرها برای آشکارسازی پروتون‌ها در سیستم پروتون درمانی برای درمان تومورهای سرطانی استفاده کنیم. در این راستا مقایسه روش‌های مختلف مثل تفکیک‌کننده کسر ثابت (CFD)، همبستگی متقابل (CC) و زمان بیش از آستانه (TOT) با داده‌های متفاوتی که حاصل شبیه‌سازی این امواج توسط نرم‌افزار Weightfield^۲ بود و داده‌های شبیه‌سازی عملی این امواج در آزمایشگاه و همچنین داده‌های تجربی که همان امواج واقعی حاصل تست UFSD در مقابل پرتو پیکولیز هستند، توسط برنامه‌های متعددی در نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. نهایتاً بهترین روش زمان‌سنجی را CFD تشخیص داده‌ایم.

کلیدواژه‌ها: پیکولیزر، حسگرهای سیلیکونی فوق سریع، زمان‌سنجی

Selecting the best time measurement method for the UFSD signals

M. Fadavi Mazinani^{*1}, A.A. Mowlavi²

1. Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University, P.O.BOX: 1435763811, Tehran - Iran

2. Department of Physics, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Postal Code: 9177948974, Mashhad - Iran

Research Article

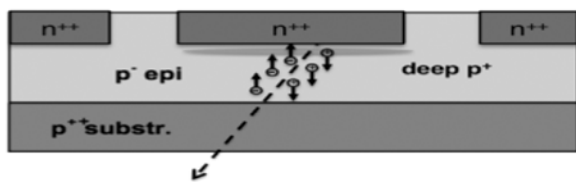
Received 4.12.2021, Accepted 6.4.2022

Abstract

Some different time measurement methods have been presented for similar signals with the same trigger that one can choose by considering signal conditions. Finding the best time measurement method for the output signals from the UFSD (Ultra Fast Silicon Detectors) is our goal because we wanted to use these sensors to detect protons in the proton therapy system to treat cancerous tumors. Some different methods include Constant Fraction Discriminator (CFD), Cross-Correlation (CC), and Time over Threshold (TOT) by different data. These kinds of data include Data from Weightfield² which is a UFSD signal simulator, Data from simulated signals in practice inside the laboratory, and experiment data, which are real data from the UFSD test in front of a Pico laser beam. Several programs in MATLAB software have been written and run to analyze and compare the different methods. The results are shown that CFD is the best method for time measurement finally.

Keywords: Pico-laser, Ultra-fast silicon detectors (UFSD), Time measurement





شکل ۱. ساختار یک دیود بهمنی توسعه یافته و مکان لایه P+.

۲. آشکارسازهای سیلیکونی فوق سریع (UFSD)

حسگرهای UFSD آشکارسازهای سیلیکونی جدیدی با نسبت موج به اغتشاش بزرگ‌تری از حسگرهای قدیمی را نوید می‌دهند. بهره داخلی بالا، آن‌ها را برای تفکیک زمانی دقیق و برای شمارش ذره در آهنگ GHz، ایده‌آل می‌کند. محاسبات و آزمایش‌ها بهترین توان تفکیک زمانی را در قطعات کوچک‌تر از یک حسگر ظریف نشان داده است. هرچه قطعات بزرگ‌تر باشند به خاطر ظرفیت بیش‌تر آن‌ها وضوح زمانی کم‌تری دارند. به عنوان مثال برای یک قطعه به طول $300 \mu\text{m}$ و با ضخامت $250 \mu\text{m}$ ، تفکیک زمانی 100ps به دست آمده است [۳، ۴]. ترکیب دقت تفکیک زمانی و مکانی که توسط UFSDها ارائه می‌شود پیش‌زمینه‌ای خواهد بود برای کاربرد آن در میدان‌های مختلفی که عبارتند از:

- الف) ردیابی: شناسایی دقیق‌تر اثر زمانی از وقایع متفاوت که موجب کاهش رویدادهای تصادفی می‌شود.
- ب) زمان پرواز (TOF): ابزاری است که برای شناسایی ذرات به‌کار می‌رود. (۱) TOF برای شناسایی ذرات در فضا. (۲) TOF برای (توموگرافی گسیل پوزیترون PET).
- ج) تصاویر سه‌بعدی: توانایی اندازه‌گیری دقیق زمان سیر پالس‌های نوری.
- د) شمارش تک‌تک ذرات در آهنگ بالا (GHz).

با توجه به توضیحات فوق ضروری است که امواج خروجی UFSD با بهترین روش تحلیل شود. چون می‌خواستیم از این آشکارسازها در سیستم انتقال دز در پروتون‌تراپی جهت شمارش پروتون‌های ارسالی به تومور سرطانی استفاده کنیم که خودش یک پروژه سه ساله تعریف شده در دانشگاه تورین ایتالیا بوده و این تحقیق در واقع گامی در جهت تصحیح سیستم انتقال دز به بیمار است، ایده‌ای که تاکنون در نوع خودش بدون رقیب بوده است. با توجه به این‌که مقالات کمی در مورد خود UFSD به چاپ رسیده است بنابراین در مورد تجزیه تحلیل امواج این آشکارسازها هم اطلاعات بسیار کمی در دسترس بود که بدین لحاظ بسیار مشتاق بودیم این تحلیل را انجام دهیم. در این راستا مهم‌ترین روش‌های زمان‌سنجی را انتخاب و تحلیل امواج به دست آمده را با آن‌ها انجام می‌دهیم. لذا ابتدا به طور خلاصه به توضیح نحوه عملکرد هر روش می‌پردازیم:

۱. مقدمه

دیودهای بهمنی که از دیرباز در صنعت الکترونیک کاربرد داشته اند اخیراً با تغییرات کمی و کیفی در آشکارسازی ذرات در صنعت هسته‌ای به کار گرفته شده‌اند و از سال ۲۰۱۵ به عنوان سریع‌ترین نوع آشکارسازهای جامد مورد علاقه محققان شده است و در آزمایشگاه‌های هم‌جوار شتاب‌دهنده‌ها و هم‌چنین در برخورد دهنده‌های هادرونی در آمریکا و اروپا مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است. امکان کنترل و کاربرد افزایش بار در آشکارسازهای سیلیکونی از موضوعات مهم مطالعاتی در RD۵۰ سرن آلمان بوده است و هم‌اکنون نیز توسط INFN ایتالیا پشتیبانی و در حال توسعه است که با توجه به این پژوهش‌ها در مورد آشکارسازی ذرات در آهنگ بالا (GHz)، آشکارسازهای سیلیکونی انتخاب می‌شوند [۱]. این آشکارسازها مثل اتافک یونش حالت جامد عمل می‌کند و در آن از سیلسیم که انرژی یونش آن برای هر رویداد حدود 3.5 eV است، استفاده می‌شود که بسیار کم‌تر از انرژی یونش در شمارشگرهای گازی ($\sim 35 \text{ eV}$) می‌باشد و از مزایای این آشکارسازها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. به دلیل داشتن زمان تفکیک بسیار کوتاه حدود نانو ثانیه قابلیت شمارش خیلی سریع دارند.
 ۲. توان تفکیک انرژی در آن‌ها حدود 3.5 eV است.
 ۳. ولتاژ کار نسبتاً پایین در حدود ۲۵ تا ۳۰ ولت دارند.
- دیودهای بهمنی کم‌بهره (LGAD)^۱ مطابق شکل ۱ توسعه داده شده‌اند. یک لایه P+ (نیمه‌هادی نوع P که ناخالصی تزریقی به آن افزایش یافته است) چند میکرونی زیر لایه n کاشته می‌شود. این عمل یک میدان الکتریکی بزرگ در عمق حدود $1.5 \mu\text{m}$ ایجاد می‌کند که با توجه به غلظت تزریق ناخالصی می‌تواند بهره‌ای از ۱۰ تا ۱۰۰ را (در مقایسه با بهره تکثیرگر نوری سیلیکونی (SiPM)^۱ و یا شمارنده فوتونی چند پیکسلی (MPPC)^۲ (که 10^4 است)) تولید کند [۱، ۲].

افزایش بهره خروجی، فواید دیگری هم دارد که عبارتند از:

۱. قابلیت توسعه آشکارسازهای ظریف با امواج خروجی بزرگ.
۲. هنگامی که با مقدار کمی از بار مواجه می‌شود ایمنی و راندمان بالایی در جمع‌آوری بار داشته، که خودش کلیدی برای داشتن یک توان تفکیک زمانی بسیار خوب، می‌باشد و آشکارسازهایی با این قابلیت را آشکارسازهای سیلیکونی فوق سریع (UFSD) می‌گویند که توان تفکیک زمانی در آن‌ها به کم‌تر از 30 ps می‌رسد.



نخواهد داد، مخصوصاً وقتی که محدوده زمانی مورد نظر پیکوتانیه باشد.

۳.۲ تفکیک‌کننده کسر ثابت (CFD)^۲

اگر یک موج مثلثی داشته باشیم: $v_1 = t \cdot \tan a$ که می‌دانیم $\tan a = \frac{V_m}{t_m}$. حال این موج را یکبار کمی شیفت زمانی یا تأخیر

بدهیم و یکبار هم آنرا تضعیف کنیم (فرمول ۲) و سپس دو موج حاصله را به یک مدار مقایسه‌گر بدهیم. بدیهی است که نقطه عبور از صفر موج خروجی مقایسه‌گر زمانی است که این دو موج با هم برابرند (فرمول ۳). لذا با برابر قرار دادن فرمول این دو موج خواهیم دید که زمان وقوع این رویداد به دامنه بستگی ندارد:

$$v_{1,1} = (t - t_d) \cdot \frac{V_m}{t_m}, \quad v_{1,2} = k \cdot t \cdot \frac{V_m}{t_m} \quad (2)$$

$$(t - t_d) \cdot \frac{V_m}{t_m} = k \cdot t \cdot \frac{V_m}{t_m} \Rightarrow t = \frac{t_d}{1 - k} \quad (3)$$

و البته این همان چیزی است که ما می‌خواهیم؛ یعنی تعیین یک نقطه زمانی که به دامنه و یا انرژی وابسته نباشد [۵، ۹] و بتوانیم با مدارات الکترونیکی با این روش امواجی را که با یک انحراف معیار کم‌تر از ۱۰۰ پیکو ثانیه از این نقطه می‌گذرند را گیر بیان‌دازیم. این امواج قابل قبول خواهند بود.

۳. سه نوع داده مختلف برای تحلیل نتایج

مجموعه امواج یا داده‌هایی که ما براساس روش‌های فوق مورد تحلیل قرار دادیم عبارتند از:

۱.۳ داده‌ی حاصل از نرم‌افزار Weightfield^۲ [۱۰]

این نرم‌افزار با گرفتن و تنظیم مشخصات حسگر UFSD توسط کاربر شکل موجی خروجی حسگر را شبیه‌سازی می‌کند. مشخصاتی چون ابعاد و جنس و ضخامت حسگر که $50 \mu\text{m}$ ، در $300 \mu\text{m}$ در نظر گرفته شد و همچنین ضرایب تقویت و ... در این نرم‌افزار تنظیم می‌شود که قسمتی از این تنظیمات در شکل ۳ آورده‌ایم [۶، ۱۱].

صدها فایل شامل اطلاعات امواج خروجی‌ای از (۴۰۰۰ نمونه در مدت زمان ۴۰ نانو ثانیه از هر موج) با تغییرات مختلفی که لحاظ کردیم، به دست آمد.

۱.۲ همبستگی متقابل (CC)^۱

این تابع که رفتارش هم‌چون تابع همبستگی است، ترتیبی از همبستگی متقابل را در طول یک بردار برمی‌گرداند. ما می‌توانیم از این تابع برای به دست آوردن اختلاف زمانی در لحظه تحریک دو موج استفاده کنیم. بدین ترتیب که اگر دو موج a, b داشته باشیم؛ رابطه CC به صورت زیر خواهد بود:

$$a[t_k] = \sum_{i=1}^{N-1} (a[t_i] \cdot b[t_{i+k}]) \quad k \in (-N+1 \dots N+1) \quad (1)$$

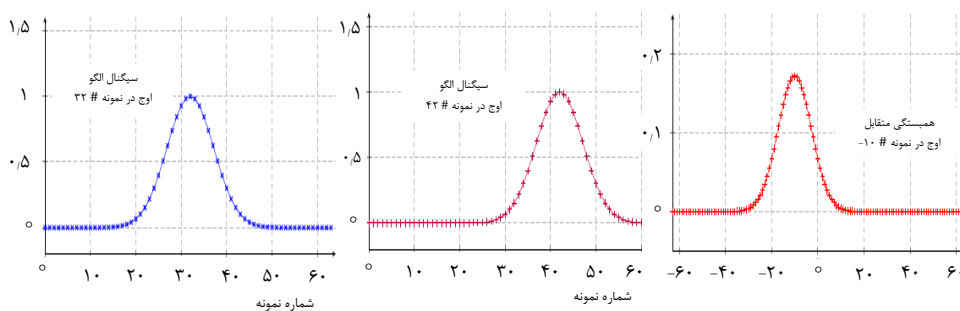
در این تابع وقتی $(a[t_i] = b[t_{i+k}])$ باشد حداکثر مقدار را خواهد داد. که $(t_k = t_{lag})$ همان اختلاف زمانی بین دو موج در لحظه تحریک خواهد بود [۵]. در شکل ۲ دیده می‌شود که CC برای موج نمونه نسبت به موج مرجع ۱۰- به دست آمده که نشان‌دهنده تأخیر زمانی ۱۰ واحدی می‌باشد. پس اگر اختلاف زمانی‌های متعددی را محاسبه کرده و انحراف معیار به دست آمده کم‌تر از 100 ps باشد می‌توان ادعا کرد که این روش برای اندازه‌گیری امواج ما مناسب خواهد بود. زیرا بر اساس آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه سرن بهترین تفکیک زمانی برای حسگرهای LGAD حدود 100 ps به دست آمده است [۶].

۲.۲ زمان بیش از آستانه (TOT)^۲

ابتدا خطی به عنوان ولتاژ آستانه اختیاری در صفحه مختصات امواج رسم می‌کنیم. به طوری که تمام امواج را در دو نقطه t_1, t_2 قطع کند و سپس منحنی متناسب شده t_1 ها برحسب $\Delta t = t_2 - t_1$ ها را رسم می‌کنیم (شکل ۶)؛ حال اگر شکل این منحنی معادل منحنی $y = a - x$ باشد آن‌گاه می‌توان با ضریب k این منحنی را به منحنی $t_1 = m$ تبدیل کرد و به اصطلاح به Δt ها وزن داده و بنابراین می‌توان گفت که Δt دیگر به دامنه و یا انرژی وابسته نیست [۷، ۸]. لذا اندازه‌گیری این Δt می‌تواند همان اندازه‌گیری موج باشد، چراکه توسط مدار الکترونیکی بعد از به دست آوردن Δt می‌توان با ضریب k مقدار m را محاسبه کرد و اگر انحراف معیار حول m قابل قبول باشد نشان‌دهنده آن است که موج قابل پذیرش است و ثبت می‌شود. اما وقتی منحنی متناسب شده t_1 برحسب Δt مثلاً مشابه منحنی $x = a$ باشد، نشان آن است که در یک Δt مشخص، اختلاف زیادی بین t_1 ها داریم و لذا پیدا است که این روش جهت ثبت امواج جواب

1. Cross-Correlation
2. Time Over Threshold



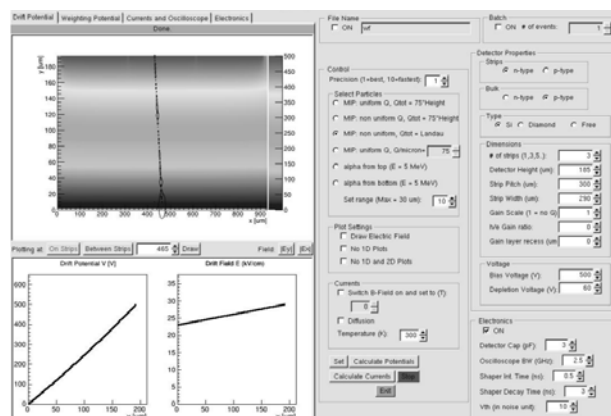


شکل ۲. CC را برای دو موج مرجع و نمونه، عدد ۱۰- به دست آورده است.

کاملاً یکسان برسد و همچنین توسط یک مولد پالس، دستگاه‌های مولد پیکولیزر [۱۴] و همچنین مبدل آنالوگ به دیجیتال را تحریک کردیم تا حداکثر همسان‌سازی را داشته باشیم. ضمناً از دو نوع تقویت‌کننده [۱۵] Broadband، [۱۶] CSA جهت تقویت موج خروجی استفاده شد. گفتنی است که تقویت‌کننده CSA تقویت بیشتری، معکوس‌کننده و اغتشاش کم‌تری نسبت به Broadband دارد. اطلاعات امواجی که هم‌زمان از دو کانال خروجی مبدل آنالوگ به دیجیتال گرفته می‌شد، به‌طور هم‌زمان روی اسیلوسکوپ و همچنین در کامپیوتر توسط نرم‌افزار Wavedump مشاهده و ثبت می‌گردد. هر فایل شامل حدود ۲۰۰۰ موج بوده که برای هر موج ۱۰۲۴ پیکسل ثبت شده است.

۴. روش تحلیل داده‌ها

داده‌ی گرفته شده از نرم‌افزار در واقع از خروجی یک حسگر بود ولی دو دسته داده‌ی دیگر، همگی از خروجی دو حسگر به‌صورت هم‌زمان بودند. داده‌های دریافت شده به روش‌های شبیه‌سازی و تجربی توسط برنامه‌های مختلفی که با نرم‌افزار MATLAB نوشته شد، مورد ارزیابی قرار گرفت. این برنامه‌ها، روش‌های زمان‌سنجی گفته شده را برای مجموعه‌های مختلفی از هر نوع داده اجرا کرده و برای بالا بردن دقت محاسبات از روش درونیابی هم بهره می‌برند. در مواردی هم برای داده‌های شبیه‌سازی شده اغتشاش نرم‌افزاری اضافه می‌شد تا به شکل واقعی موج نزدیک‌تر شویم. بدین ترتیب که در روش‌های CC و CFD امواج را به‌صورت جفت‌جفت تحلیل کرده و پس از گردآوری نتایج، انحراف معیار کل را محاسبه می‌کنیم.



شکل ۳. تنظیمات در محیط نرم‌افزار Weightfield2 [۱۰، ۶].

۲.۳ داده‌ی حاصل از شبیه‌سازی شکل موج توسط مولد پالس

برای این‌که کمی واقعی‌تر موضوع بررسی شود و از طرفی هم آمادگی برای آزمایش حسگر به‌طور عملی داشته باشیم، لذا در آزمایشگاه کوچکی که در شکل ۴ دیده می‌شود، امواج خروجی UFSD را توسط مولد پالس شبیه‌سازی کرده و دوموج مشابه با تحریک یکسان تنظیم و تولید می‌کنیم. سپس توسط مبدل آنالوگ به دیجیتال (دیجیتایزر) [۱۲] فایل‌هایی را از داده‌ی این امواج در کامپیوتر تحت نرم‌افزار Wavedump [۱۳] ثبت و ذخیره کردیم. این نرم‌افزار جهت مشاهده، تنظیم و ثبت امواج خروجی مبدل آنالوگ به دیجیتال استفاده می‌شود. برای دقت بیشتر این امواج توسط اسیلوسکوپ قابل مشاهده بود.

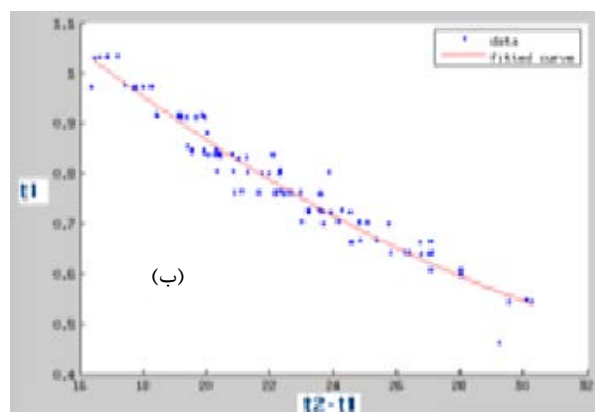
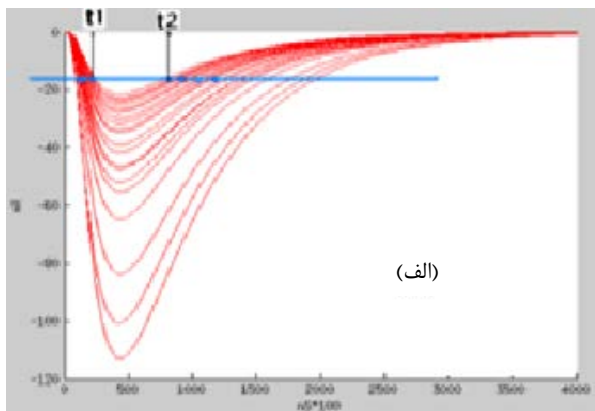
۳.۳ داده‌ی حاصل از آزمایش UFSD در مقابل پرتو پیکولیزر

با انتخاب دو حسگر مشابه UFSD به ضخامت $300 \mu\text{m}$ و ابعاد $(1/2 \text{ mm} \times 1/2 \text{ mm})$ در آزمایشگاه این حسگرها را در مقابل پرتو پیکولیزر قرار داده و با بستن مدار و سنسورها دیده به‌صورت بلوک دیاگرام و قسمتی از مدار و سنسورها دیده می‌شود پس از تنظیمات لازم و چندین آزمایش به امواج مطلوبی دست یافتیم. همان‌طور که دیده می‌شود از یک تقسیم‌کننده پرتو لیزر به نسبت ۲۵٪، ۲۵٪، ۵۰٪ استفاده شد که ما از دو کانال ۲۵٪ استفاده کردیم تا به دوحسگر، پرتوهای

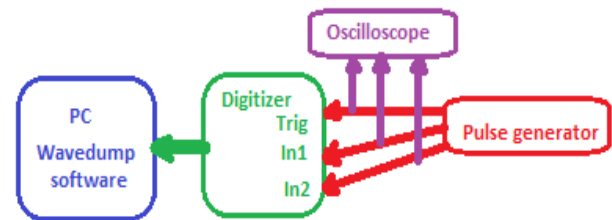


پالس و امواج واقعی تفاوت زیادی با این داده‌ها داشته و همچنین از خروجی دو حسگر به‌طور هم‌زمان منتج می‌شد و لذا همان‌گونه که در قسمت عملکرد این روش توضیح دادیم، این روش برای داده‌های حاصل از مولدپالس و همچنین تست پیکولیزر قابل ارزیابی و ادامه نبود چون در یک Δt مشخص اختلاف زیادی بین t_1 ها مشاهده گردید.

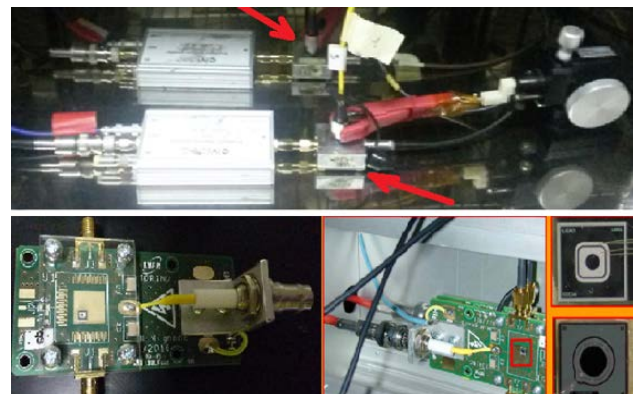
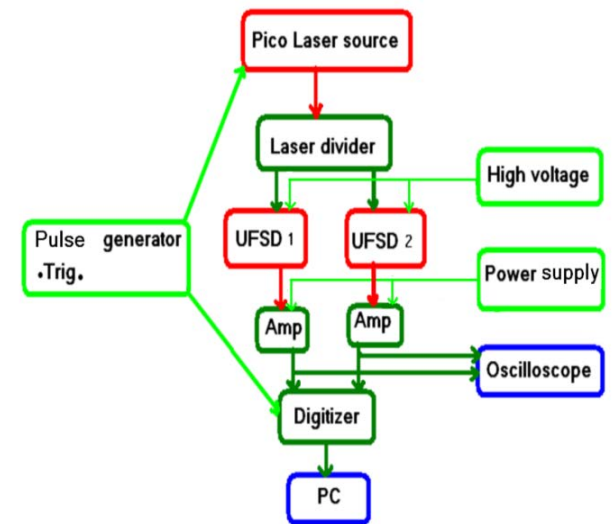
با پیاده‌سازی روش CC روی داده‌های Weightfield γ (نوعاً شکل ۷) به انحراف معیار حدود ۵۰ ps دست یافتیم. اما در مورد داده‌های دیگر مخصوصاً آزمایش پیکولیزر باز هم انحراف معیار بیش از ۱ ns به دست می‌آمد که قابل قبول نبود. ضمناً ساخت مداری که جهت اندازه‌گیری عملی امواج به کار می‌رود پیچیده‌تر از روش CFD است.



شکل ۶. (الف) امواج خروجی یک حسگر از نرم‌افزار Weightfield γ . (ب) نتیجه پیاده‌سازی روش TOT روی آن‌ها.



شکل ۴. بلوک دیاگرام مداری که جهت تهیه امواج شبیه‌سازی شده UFSD توسط مولد پالس استفاده شد.



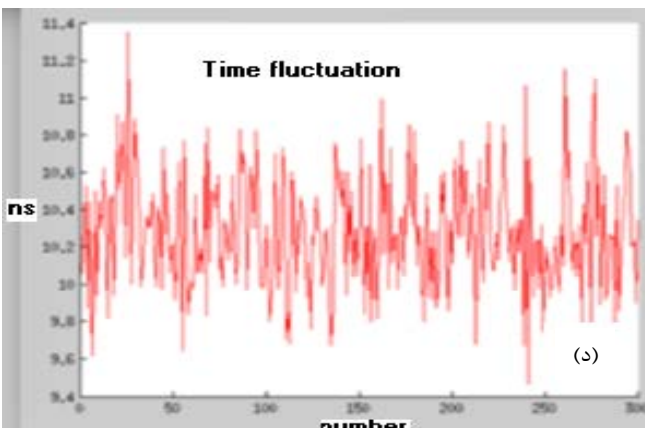
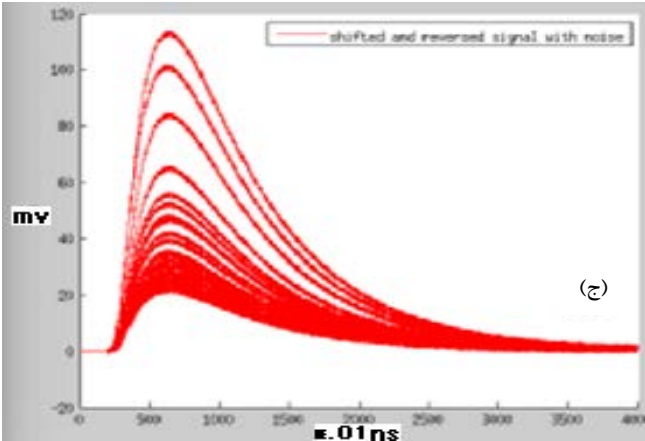
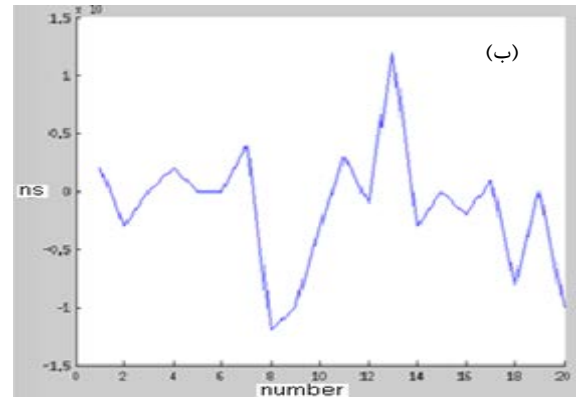
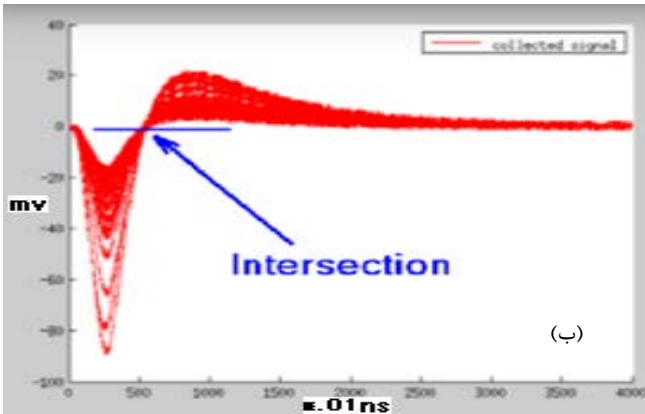
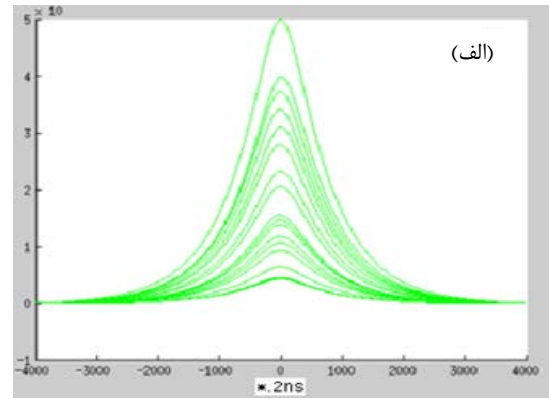
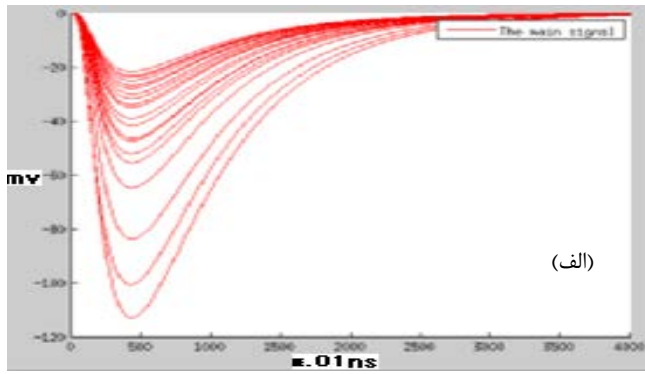
شکل ۵. بلوک دیاگرام کلی و عکس قسمتی از مدار با بزرگ‌نمایی سنسورهای مورد استفاده در تست دو عدد UFSD مقابل پیکولیزر.

۵. نتایج

بعد از تحلیل داده‌های مختلف با روش‌های زمانی متفاوت، نتایج به صورت زیر به دست آمد:

در مورد روش TOT این روش برای داده‌های Weightfield γ خوب جواب می‌داد و همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود نحوه چیدمان t_1 برحسب Δt ، استفاده از این روش را قابل اعتماد می‌ساخت. چرا که اولاً این امواج با یک نظم و منطق خاص تحویل می‌شدند و ثانیاً همگی از خروجی یک حسگر به دست می‌آمد. اما در عمل شکل امواج حاصل از مولد





شکل ۷. (الف) نمونه‌ای از CC انجام شده، (ب) اختلاف زمانی‌های به دست آمده، با داده‌های Weightfield۲.

جدول ۱. انحراف معیار نتایج CFD با داده‌های مختلف

روش CFD انحراف استاندارد (ps)			
Weightfield ۲ (۱۰۰ سیگنال)	مولد ضربان (۳۰ سیگنال)	آزمایشگاه پیکو لیزر ۱ (۳۰۰ سیگنال)	آزمایشگاه پیکو لیزر ۲ (۲۰۰ سیگنال)
تقویت کننده ۳۲	۱۳	۶۲ تقویت کننده BB	۱۵۰ تقویت کننده BB
۱۷۶ (تقویت نشده)	۲۰	۶۱ تقویت کننده CSA	۹۷ تقویت کننده CSA

در شکل ۸ پیاده‌سازی روش CFD مشاهده می‌شود و در جدول ۱ به طور نوعی نتایج روش CFD را برای داده‌های مختلف آورده‌ایم.

با بررسی تعداد امواج متفاوتی که در دسترس بود و اجرای روش CFD، انحراف معیار بر حسب پیکو ثانیه در جدول گزارش شده است. دو ستون سمت راست مربوط به نتایج حاصل از تکرار تست حسگر در مقابل پرتو پیکو لیزر می‌باشد. دو ستون سمت چپ مربوط به نتایجی از داده‌های Weightfield۲ و مولد پالس می‌باشد. مشاهده می‌شود که این شیوه نه تنها پاسخ‌گوی تمام داده‌ها در رنج نانوثانیه بوده است بلکه انحراف معیار مطلوبی هم حدود ۱۰۰ ps به دست داده است. مخصوصاً در تعداد بالا و با استفاده از تقویت کننده CSA، که ما را برای ادامه کار با این روش امیدوار می‌کند.

شکل ۸. نمونه‌ای از مراحل CFD پیاده‌سازی شده روی داده‌های Weightfield۲، که شامل امواج زیر است: (۱) امواج اصلی (الف)، (۲) امواج شیفت داده شده و معکوس شده (ج)، (۳) مجموع دو موج (ب) انحراف در نقطه گذار از صفر (د).



۶. نتیجه گیری

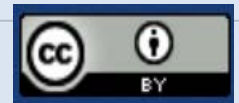
با بررسی نتایج حاصل از اجرای برنامه‌ها روی داده‌های مختلف و مقایسه آن‌ها می‌توان گفت هرچند استفاده از روش‌های TOT و CC در مورد تحلیل داده‌های نرم‌افزاری قابل پذیرش بود ولی در مورد داده‌های تجربی قابل قبول نبود. اما استفاده از روش CFD نتایج خوبی را برای تحلیل امواج متفاوت و مخصوصاً داده‌های تجربی به دست می‌دهد و ضمناً ساخت مدار الکترونیکی برای این روش جهت زمان‌سنجی واقعی یا سخت‌افزاری از روش‌های قبلی ساده‌تر و پرکاربردتر خواهد بود.

مراجع

- Nicolo Cartiglia, *Ultra-Fast Silicon Detector INFN, Torino - UFSD - CERN Detector Seminar*, 26-9- (2014).
- Particle identification using the time-over-threshold method in the ATLAS Transition Radiation Tracker, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A 474, 172-1 (2001).
- Study of time over threshold method using simulations and experimental verification Christiaan Brits, Dr. Vyacheslav Mikhailovich Golovatyuk JINR Summer student Program* (2015). Dubna, Russia (2015).
- Constant fraction discriminator in pulsed time-of-flight laser rangefinding, Ruitong ZHENG, Guan hao WU. Optoelectron*, 5(2), 182-186 (2012).
- Francesca Cenna, *Weightfield2: a Fast Simulator for Silicon and Diamond solid state detector – 10th International Conference on Radiation Effects on Semiconductor Materials, Detectors and Devices-Florence*, (October 10th 2014).
- Nicolo Cartiglia, *Ultra-Fast Silicon Detector INFN, Torino. UFSD Milano, Seminar*, (2 July 2014).
- Digitizer Families Waveform Recording CAEN 2016/2017 Product Catalog*.
- Wave Dump Quic Start Guide. CAEN. www.caen.it.
- Picosecond Laser A.L.S. GmbH. Schwarzschildstrase, 6. D-12489 Berlin. Germany. www.alsgmbh.de*.
- Broadband Amplifier CIVIDEC Instrumentation GmbH. www.cividec.at*.
- Fast Charge Amplifier CIVIDEC Instrumentation GmbH. www.cividec.at*.
- Nicolo Cartiglia, *Topics in LGAD Design INFN, Torino –UFSD, Trento, Tredi* (2015).
- H.F.-W. Sadrozinski, et al., *Sensors for ultra-fast silicon detectors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A765, 7-11 (2014).
- H.F.-W. Sadrozinski et al., *Ultra-fast silicon detectors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A730, 226-23 (2013).
- N. Cartiglia, et al., *Performance of Ultra-Fast Silicon Detectors*, arXiv:1312.1080v2.
- Herv_e Grabas, *Development of a picosecond time-of-flight system in the ATLAS experiment, Other [cond-mat.other]. Universit_e Paris Sud - Paris XI*, (2013). English. <NNT :2013PA112304>.

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

محمد فدوی مزینانی، علی اصغر مولوی (۱۴۰۲)، انتخاب بهترین روش زمان‌سنجی برای امواج خروجی از آشکارسازهای سیلیکونی فوق سریع UFSD، ۱۰۴، ۴۷-۵۳

DOI: 10.24200/nst.2023.1401

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1401.html



