Information Technology Innovations and Applied Communication

Vol. 3, No. 4, Winter, 2025, Serial No. 8,PP.15-19

Characterization of dead time in single photon avalanche detector

Mahdi Rahmanpour[1], Mahdi Khajeh[2] , Alireza Erfanian*[3]

*Associate Professor, Malekeashtar University Tehran, Iran.

(**Received:** 29 October 2025, **Revised:** 08 December 2025, **Accepted:** 31 December 2025, **Published:** 21January 2026)

Abstract

Due to the importance of the role of dead time in limiting the detection frequency of single photon avalanche detectors (SPAD) and limiting the exchange rate in various systems such as quantum key distribution (QKD), the value Obtaining this characteristic is important in single photon detectors. In the proposed method of this research, an FPGA chip is used to measure the dead time in single photon detectors. The selected FPGA model is xc7a35t from Artix family belonging to Xilinx company. With the help of VHDL hardware design code, a circuit is designed for the detector test, which provides the possibility to characterize the dead time on the SPAD by simultaneously controlling the single photon production source and the detector.

Keywords: Detector, Single photon, Quantum, Key Distribution, Dead time

* Corresponding Author E-mail: erfaniankam@gmail.com

«نوآوری‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات کاربردی»
سال سوم، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳؛ ص ۱۹-۱۵.

علمی - پژوهشی

مشخصه‌یابی زمان مرده در آشکارسازهای تک فوتون شکست بهمنی

مهدی رحمان‌پور[۱]، علیرضا عرفانیان*[۲]، مهدی خواجه[۳]

۱- دانشجوی دکتری ، ۲- مدیر تحقیقات ۳- دانشیاردانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، تهران ، ایران

(**دریافت:** ۰۷ آبان ۱۴۰۴ **بازنگری:** ۱۷ آذر ۱۴۰۴ **پذیرش:** ۱۰ دی ۱۴۰۴ **انتشار:** ۰۱ بهمن ۱۴۰۴)

چکیده

به دلیل اهمیت نقش زمان مرده[۱] در محدودیت فرکانس تشخیص آشکارسازهای تک فوتون شکست بهمنی[۲] (SPAD) و ایجاد محدودیت در نرخ تبادل در سیستم‌های مختلفی مانند توزیع کلید کوانتومی[3] (QKD)، اندازه‌گیری این مشخصه در آشکارسازهای تک فوتون بااهمیت است. درروش پیشنهادی این تحقیق، برای اندازه‌گیری زمان مرده در آشکارسازهای تک فوتون، از یک تراشه FPGA[۴] استفاده می‌شود. مدل FPGA انتخاب‌شده xc7a35t از خانواده Artix متعلق به شرکت Xilinx است. با کمک کد طراحی سخت‌افزار VHDL[۵]، مداری برای آزمون آشکارساز طراحی می‌شود که با کنترل هم‌زمان منبع تولید تک فوتون و آشکارساز، امکان مشخصه‌یابی زمان مرده را روی SPAD فراهم می‌کند.

کلیدواژه‌ها: آشکارساز، تک فوتون، کوانتوم، توزیع کلید، زمان مرده

* رایانامه نویسنده مسئول Email : erfaniankam@gmail.com:

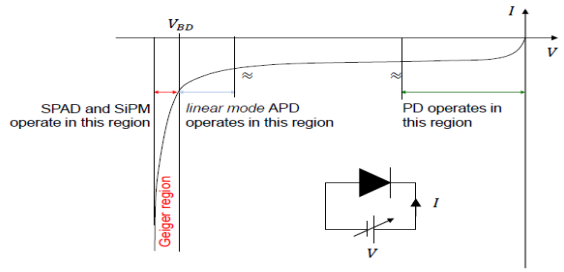
[1] Dead Time
[2] Single Photon Avalanched Diode
[3] Quantum Key Distribution
[4] Field Program Gate Array
[5] Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language

۱. مقدمه

فناوری تشخیص تک فوتون یک فناوری جدید است که سال‌های اخیر توسعه‌یافته و می‌تواند سیگنال‌های نور بسیار ضعیف را تشخیص دهد. شمارش فوتون در بسیاری از کاربردها که حساسیت دریافت تک فوتون و تشخیص زمان رسیدن آن اهمیت دارد، استفاده می‌شود [۱].

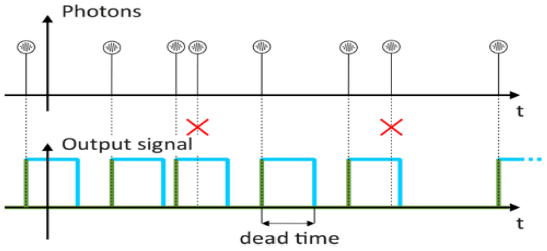
فتودیود شکست بهمنی (APD) یک فتودیود p-i-n با عرض بسیار بزرگ ناحیه تخلیه (i) در مقایسه با سایر مناطق (p و n) است. اگر توسط تک فوتون یک ولتاژ خارجی به این APD اعمال شود، به آشکارساز شکست بهمنی تک فوتون (SPAD) تبدیل می‌شود. ولتاژ اضافی باعث می‌شود که آشکارساز در منطقه پس از ولتاژ شکست کار کند که به آن گایگر گفته می‌شود. به‌طورکلی، در حالت گایگر، SPADها توسط یک ولتاژ اضافی به نام V_{ex} فراتر از ولتاژ شکست (V_{BD}) بایاس می‌شوند. ازاین‌رو، میدان الکتریکی در ناحیه تخلیه بسیار زیاد است و با تزریق یک حامل بار به لایه تخلیه، می‌تواند منجر به پدیده شکست بهمنی شود [۲].

SPADها در کاربردهای مخابراتی و امنیتی مانند سیستم‌های QKD اهمیت زیادی دارند. در این کاربردها، SPAD بازده تشخیص سیستم را بهبود می‌بخشد. عملکرد کلی سیستم به بازده تشخیص فوتون (PDE) و حساسیت در تشخیص رویدادهای جعلی بستگی دارد. در چنین کاربردهایی، شناخت عملکرد و محدودیت‌های SPAD ضروری است[2] .



شکل (۱). نواحی کار فوتو دیود در بایاس معکوس [۳]

فاصله زمانی که بین تشخیص هر فوتون توسط آشکارساز تا بازنشانی مجدد دیود گیرنده و آمادگی مجدد آن برای تشخیص بعدی وجود دارد، زمان مرده نامیده می‌شود. در طول زمان مرده، آشکارساز قابلیت تشخیص فوتون بعدی را ندارد.



شکل (۲). نمودار زمان مرده [۴]

در طی زمان مرده، SPAD جریان خروجی مربوط به آشکارساز تک فوتون را به خروجی خود هدایت می‌کند. این بدان معنی است که عرض پالس‌های خروجی از SPAD برابر بازمان مرده است [۵].

۲. روش مشخصه‌یابی

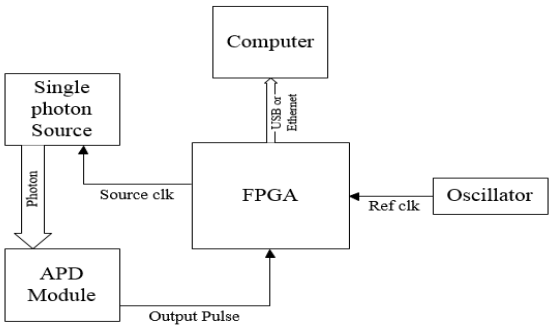
در این پژوهش به دنبال تعیین زمان مرده در آشکارسازهای تک فوتون مبتنی بر شکست بهمنی هستیم. در سیستم مشخصه یاب پیشنهادی این تحقیق، تراشه FPGA به دلیل انعطاف‌پذیری در پیاده‌سازی معماری کنترلی، سرعت و دقت بالای انتقال فرمان روی درگاه‌ها و امکان پردازش هم‌زمان درگاه‌های ورودی و خروجی، نقش اصلی را در استخراج پارامترهای SPAD بر عهده دارد.

۲-۱. بلوک دیاگرام آزمایش

همان‌طور که در ایده ارائه‌شده در شکل (۳) مشاهده می‌شود، از یک منبع تک فوتون جهت آزمایش آشکارساز استفاده‌شده است. در صورت انتخاب SPAD از نوع InGaAs، واسط ارتباط منبع با آشکارساز تک فوتون، فیبر نوری است. به دلیل نیاز به تولید پالس با فرکانس بالا برای منبع تک فوتون، مرجع تولید پالس در سیستم و پردازنده خوانش آشکارساز، تراشه FPGA خواهد بود. این تراشه نیز پالس اولیه خود را از یک اسیلاتور با فرکانس ۱۰ مگاهرتز و خطای بسیار کم (50PPM[1]) دریافت می‌کند. با تعبیه بلوک DCM[2] داخل تراشه FPGA، به کمک بلوک PLL[3] داخلی، امکان ایجاد پالس‌های مربعی با فرکانس بالاتر از این مقدار وجود دارد، اما بایستی دقت شود که فرکانس پالس موردنظر، حتماً بایستی با فرکانس اسیلاتور هم‌فاز باشد (ضریب صحیحی از آن باشد). درصورتی‌که شیفت فرکانس وجود داشته باشد، اندازه‌گیری موردنظر در پارامترهای SPAD، دچار خطا خواهد شد. خروجی پالس‌های آشکارساز نیز پس از تقویت و قرارگرفتن در رنج ولتاژ تعریف‌شده برای درگاه FPGA، به این تراشه منتقل و توسط شمارنده‌های طراحی‌شده در آن، ثبت می‌گردد. با اتصال FPGA از طریق درگاه USB[4] و یا اترنت[5] به رایانه، امکان قرائت، ثبت و تحلیل پارامترهای استخراج‌شده، با سهولت بیشتری فراهم می‌شود.

بلوک دیاگرام چیدمان و اتصالات سیستم مشخصه یاب پیشنهادی به شکل زیر است:

[1] Parts Per Million
[2] Digital Clock Manager
[3] Phase-Locked Loop
[4] Universal Serial Bus
[5] Ethernet

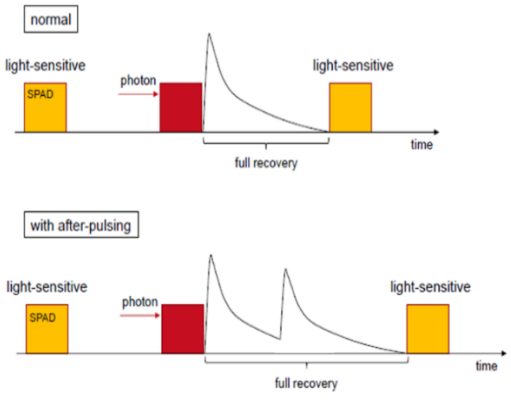


شکل (۳). بلوک دیاگرام سیستم مشخصه یاب پیشنهادی

بایستی دقت گردد به‌منظور جلوگیری از بروز خطا، مشخصه‌یابی در محیط ایزوله و فاقد تداخل فوتونی انجام شود. لازم به یادآوری است که SPAD، در وضعیت کاری پیوسته قرار دارد و پالس دروازه‌ای به آن اعمال نمی‌شود.

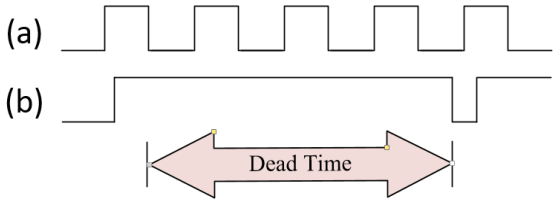
۲-۲. تعیین زمان مرده

آنچه در خروجی آشکارساز تک فوتون مشاهده می‌شود، ناشی از سه منشأ: فوتون ورودی، پالس تاریکی و پس پالس است. برای اندازه‌گیری زمان مرده روی SPAD در وضعیت کاری پیوسته، بایستی منبع ارسال تک فوتون با فرکانس بالا (متناسب با نوع SPAD و محدوده زمانی موردانتظار برای زمان مرده) تک فوتون‌ها را به سمت آشکارساز ساطع نماید. درصورتی‌که SPAD امکان تشخیص تک فوتون‌های با فرکانس 1Ghz را دارا باشد (برای فرکانس‌های کمتر نیز همین تناسب برقرار است)، فاصله بین هر دو فوتون 1ns خواهد بود. انتظار می‌رود به علت غیرفعال‌شدن دریافت SPAD در دوره زمان مرده آن، فوتون ورودی دیگری در این مدت آشکار نگردد و آنچه مشاهده می‌شود پالس‌های تاریکی و پس پالس باشد. باتوجه‌به تناوبی و منظم بودن فوتون‌های ساطع‌شده از منبع و در مقابل تصادفی و احتمالی بودن رخداد پالس‌های تاریکی و پس پالس، تفکیک این دودسته از یکدیگر، کار دشواری نبوده و با تکرار اندازه‌گیری، خطاهای احتمالی حذف می‌شوند.



شکل (۴). پس پالس‌های رخداده در زمان مرده [۳]

با دریافت اولین فوتون توسط آشکارساز، برای بازگشت به وضعیت آماده‌به‌کار مجدد، نیازمند سپری‌کردن زمان مرده خواهد بود. باتوجه‌به کنترل FPGA برای ارسال فوتون توسط منبع و دریافت متناظر پالس خروجی آشکارساز، درصورتی‌که FPGA اولین پالس خروجی آشکارساز مرتبط با فوتون ارسالی را دریافت نماید، بازمان مرده SPAD مواجه می‌گردد؛ لذا به علت فرکانس بالای ارسال فوتون، تا پایان زمان مرده SPAD، سایر فوتون‌های ارسالی قابل‌دریافت نخواهد بود. در این مدت اگر پالسی در خروجی آشکارساز در اثر جریان تاریکی یا پس پالس ایجاد شود، به دلیل عدم تناظر و تطبیق فاز بافرمان ارسال FPGA به منبع، قابل صرف‌نظر خواهد بود. اولین پالس خروجی آشکارساز که هم‌فاز بافرمان FPGA دریافت شود، بیانگر پایان زمان مرده است. فاصله زمانی دریافت اولین فوتون و فوتون هم‌فاز بعدی، زمان مرده آشکارساز را مشخص می‌کند و از شمارش تعداد پالس‌های فرمان FPGA به منبع تک فوتون، و متناسب با فرکانس آن اندازه‌گیری می‌شود. برای کاهش خطای اندازه‌گیری، بایستی این آزمایش به‌دفعات انجام و بیشینه و کمینه نتایج را ثبت نمود. در فهرست آشکارسازهای تک فوتون، بازهٔ کمترین تا بیشترین میزان زمان مرده اندازه‌گیری شده، برای اطلاع کاربر قابل درج است.



شکل (۵). (a) پالس‌های فرمان ارسال فوتون به منبع، (b) پالس خروجی آشکارساز با درنظرگرفتن زمان مرده (بدون وجود نویز)

در صورت بالابودن زمان مرده در SPAD، می‌توان فرکانس ارسال تک فوتون را در محدود 100Mhz تنظیم و فرایند مذکور را تکرار کرد. بدیهی است هر مقدار امکان افزایش فرکانس وجود داشته باشد، دقت اندازه‌گیری بیشتر خواهد بود.

۳. نتایج

روش‌های مشخصه‌یابی ارائه‌شده در این تحقیق، به دلیل هزینه پایین و سهولت اجرا، در آزمایشگاه‌های مختلف با تجهیزات محدود نیز قابل‌اجرا است. این روش‌ها قابلیت اجرا روی انواع مختلفی از آشکارسازهای تک فوتونی را دارد که به دلیل اهمیت کاربرد SPAD نوع InGaAs، تمرکز تحقیق روی آن قرار گرفت. پس از مشخصه‌یابی زمان مرده در SPAD، نتایجی به‌صورت جدول (۱) ثبت و به کاربر ارائه می‌گردد.

جدول (۱). پارامتر زمان مرده در یک آشکارساز تک فوتون [۶]

Parameter		Units
Wavelength range	900 - 1700	nm
Deadtime range	0.1 - 100	µs
Deadtime step	100	ns

۴. جمع‌بندی

مدل آشکارساز پیشنهادی جهت مشخصه‌یابی، SPAD نوع InGaAs با شماره G12180-210A از شرکت HAMAMATSU است [۷] و در وضعیت کاری پیوسته مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به دلیل عدم دسترسی به منبع و آشکارساز تک فوتون، این آزمایش به‌صورت نظریه مطرح گردیده، اما قابلیت اجرایی بودن برای آن در نظر گرفته‌شده است. مدل FPGA انتخاب‌شده xc7a35 متعلق به شرکت Xilinx است که قابلیت جایگزینی با سایر مدل‌های تولیدی و پیشرفته این شرکت را دارد.

با روش ارائه‌شده می‌توان در زمان سریع، تخمینی از حداقل و حداکثر زمان مرده در یک SPAD به دست آورد و مقایسه جامعی روی عملکرد آشکارسازهای مختلف تک فوتونی انجام داد. همچنین صحت اطلاعات درج‌شده در فهرست محصول قابل‌ارزیابی خواهد بود. بدیهی است بهینه‌سازی و کاهش زمان مرده می‌تواند منجر به افزایش سرعت تشخیص فوتون توسط آشکارساز شده و درنتیجه نرخ جابه‌جایی اطلاعات توسط تک فوتون‌ها در سیستم مخابراتی افزایش یابد.

۵. مراجع

[1] Yu, Y., et al. *A review of quenching circuit design based on Geiger-mode APD*. in *2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*. 2018. IEEE.

[2] Kadhim, A.C., *An Approach to Improve Single Photon Detectors for Highly Sensitive Applications*. 2018.

[3] Piatek, S., *MPPC & SPAD Future of Photon Counting Detectors*. 2019, New Jersey Institute of Technology & Hamamatsu Photonics,: USA. p. ٥٦.

[4] Hofbauer, M., K. Schneider-Hornstein, and H. Zimmermann, *Single-photon Detection for Data Communication and Quantum Systems.* 2021.

[5] Zhang, L., et al., *A comparison of APD-and SPAD-based receivers for visible light communications.* Journal of Lightwave Technology, 2018. **36**(12): p. 2442-2435.

[6] IDQ, *ID Qube Series: NIR*, S. Quantum, Editor. 2022 ,Swiss Quantum.

[7] K.K., H.P., *InGaAs PIN Photodiodes-G12180 series*, H.P. K.K., Editor. 2021, HAMAMATSU PHOTONICS K.K.