



بررسی و مقایسه مشخصات الکترونیکی سه ساختار منتخب برای آشکارسازی اشعه ایکس مبتنی بر دیود نوری

امیررضا موسی‌زاده مقدم^۱، محمدرضا اشرف^{۱*}، مهدی کفایی^۲

۱. آزمایشگاه طراحی مدارهای مجتمع، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شاهرود، صندوق پستی: ۳۱۶، شاهرود - ایران

۲. دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شاهرود، صندوق پستی: ۳۱۶، شاهرود - ایران

*Email: m.r.ashraf@shahroodut.ac.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱/۲۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۲/۱۵

چکیده

تحقیقات اخیر نشان داده است که دیودهای نوری PIN در حوزه آشکارسازی پرتوهای یون‌ساز، به خصوص در پزشکی کاربردهایی دارند. در این تحقیق سه نمونه مدار آشکارساز اشعه ایکس مبتنی بر دیود نوری، در حالت پالسی تحلیل، شبیه‌سازی و ساخته شده است. پیش‌تقویت‌کننده در این مدارها، ساختار کاملاً متمایزی دارد و تعداد طبقه‌های تغییرشکل‌دهنده پالس و نحوه بایاس دیود نوری، در هر مدار متفاوت است. مدار اول به دلیل ساختار ساده، هزینه ساخت کمتری دارد. مدار دوم دارای پیش‌تقویت‌کننده با امپدانس بازخورد بوده که پالس‌هایی با دامنه بزرگ ایجاد می‌کند. مدار سوم به دلیل داشتن ساختار پیش‌تقویت‌کننده ترانزیستوری با خازن بازخورد کوچک، نویز بهتری نسبت به مدار دوم داشته و بهره آن از مدار اول بزرگ‌تر می‌شود. برای انجام آزمایش‌های عملی از حس گر S1223-01 شرکت Hamamatsu به عنوان آشکارساز استفاده شده که با استفاده از چشمه ^{232}Th تهییج می‌شود. با مقایسه بهره، توان اتلافی و دوره پالس مدارها می‌توان گفت، مدار دوم با بهره تبدیلی ۶۶٫۷۵ dB، بزرگ‌ترین دامنه را در اختیار دارد؛ همچنین مدار اول با توان نویز 1.15 nV^2 و توان اتلافی ۳۶٫۶ mW، کم‌ترین نویز و مصرف انرژی را در میان سایرین به ثبت رسانده است. مدار سوم با دوره زمانی ۸٫۲ μs ، کم‌ترین عرض پالس و زمان مرده را دارد.

کلیدواژه‌ها: آشکارسازی پرتوهای یون‌ساز، اشعه ایکس، دیود نوری، حالت پالسی

The investigation and comparison of three photodiode-based candidate structures for detecting the X-ray

A.R. Mousazadeh Moghaddam¹, M.R. Ashraf^{*1}, M. Kafaee²

1. Integrated Circuits Design Laboratory, Faculty of Electrical Engineering, Shahrood University of Technology, P.O.Box: 316, Shahrood - Iran

2. Faculty of Electrical Engineering, Shahrood University of Technology, P.O.Box: 316, Shahrood - Iran

Research Article

Received 8.2.2021, Accepted 5.5.2021

Abstract

Recently, research has shown that PIN photodiodes can be used in ionization radiation detection, especially in medical applications. In this research, three photodiode-based X-ray detectors have been implemented. The preamplifiers in these circuits have completely different structures; the number of pulse shaper stages and the bias of photodiodes are different. The first circuit benefits lower manufacturing costs due to its simple structure. The second circuit has a preamplifier with feedback impedance that generates pulses with a large amplitude. The third circuit has better noise than the second circuit due to the transistor preamplifier structure with a small feedback capacitor, and its gain is larger than the first circuit. The S1223-01 photodiode from Hamamatsu Corporation has been utilized in the experiments, which is excited using the ^{232}Th . Comparing the conversion gain, dissipation power, and pulse period of these circuits, the second circuit with a gain of 66.75-dB can be claimed to have the largest amplitude. Also, the first circuit with a noise power of 1.215-nV² and a dissipation power of 36.6-mW, has recorded the lowest noise and energy consumption among others. The third circuit with a time period of 8.2- μs has the lowest pulse duration and dead time.

Keywords: Ionization radiation detection, X ray, Photodiode, Pulse mode



۱. مقدمه

در نتیجه گسترش فن‌آوری هسته‌ای و پیشرفت سریع آن به خصوص در کاربردهای پزشکی، خطر حوادث ناشی از تابش‌های یون‌ساز، هم‌چون پرتوهای ایکس و گاما که بسیار خطرناک هستند، به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. دلیل این امر تخریب و جهش ژنتیکی در بافت‌های بدن انسان توسط تابش‌های پرنرژی است. پس باید تا جایی که امکان دارد آن‌ها را به کم‌ترین مقدار رساند [۱، ۲]. برای اندازه‌گیری میزان پرتوزایی محیط، اولین وسیله‌ای که در نظر می‌آید لامپ گایگر-مولر^۱ است [۱]. از جمله مشکلات آن در مقایسه با دیودهای نوری، کمیاب بودن، گران‌قیمت بودن و ولتاژ کاری بسیار بالای آن است. اخیراً صنایع هسته‌ای به دنبال آشکارسازهای کوچک‌مقیاس، سریع و ارزان‌قیمت هستند [۱]. تحقیقات گسترده علمی با هدف توسعه سیستم‌های دقیق، قابل اعتماد و مقرون به صرفه پایش گاما صورت گرفته است. نقطه مشترک تمامی این تحقیقات، نیمه‌هادی‌ها هستند [۱، ۳-۹]. دیودهای سیلیکونی PIN که از خانواده نیمه‌هادی‌ها به شمار می‌روند، به دلیل قیمت ارزان و دسترسی آسان در بازار، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۳]. از مزایای آشکارسازهای مبتنی بر دیود نوری، پاسخ سریع، ولتاژ کاری پایین، توان مصرفی کم، قابلیت جابه‌جایی آسان، فشردگی و کوچکی دستگاه و عمر طولانی است [۴]. آشکارسازهای مبتنی بر دیود PIN می‌توانند در دو حالت شمارش پالس و حالت جریانی قرار گیرند. دیود در حالت پالسی به صورت معکوس بایاس می‌شود و می‌تواند در حالت شمارش یا طیف‌نگاری به کار رود. هم‌چنین در حالت جریانی، جریان اندازه‌گیری شده متناسب با نرخ دز^۲ است. بیش‌تر تحقیقاتی صورت گرفته در این حوزه، آزمایش دیودهای نوری مختلف ارزان‌قیمت با استفاده از سامانه آشکارساز سفارشی است. اولین بار کاینکا^۳ در سال ۲۰۱۱ [۱] مداری ساده را جهت اندازه‌گیری تابش گاما با استفاده از دیود نوری BPW۳۴ ارائه کرد و از مزایای آن نسبت به لامپ گایگر-مولر سخن گفت. لامپ گایگر-مولر تا آن زمان مرجع اصلی تابش‌های پرنرژی بود. از معایب این ساختار عدم نمایش سطح کلی تابش بود. بعد از آن ساختاری دیگر توسط همین شخص ارائه شد. در این ساختار قسمت آنالوگ مدار بهبود یافت و در قسمت دیجیتال از میکروکنترلر ATmega۸۸ به‌عنوان شمارش‌گر استفاده شد [۵، ۶]. سپس در سال ۲۰۱۲، پکرز^۴ مقاله‌ای جهت افزایش محافظت مدار از نور مری و هم‌چنین افزایش حساسیت مدار به تابش‌های پرنرژی منتشر کرد [۷]. رودریگز^۵ تحقیقات پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد خود را بر روی ساخت دستگاه ارزان‌قیمت آشکارساز تابش گاما قرار داد. تابش گاما توسط دیود نوری جذب و سپس به‌وسیله مدار الکترونیکی آشکار می‌شود. در مرحله بعدی

اطلاعات به رایانه منتقل شده، و در نهایت نمودار طیفی رسم می‌شود [۸]. در سال ۲۰۱۶، طراحی و ساخت دستگاه تصویربرداری تابش ایکس، با استفاده از چندین دیود نوری BPW۳۴ صورت گرفت. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهند که سطح نویز مدار الکترونیکی برای تابش‌های ایکس تقریباً برابر ۵ keV است [۹].

با بررسی تحقیق‌هایی که در گذشته صورت گرفته، ساختارهای مختلفی در مدار سامانه آشکارسازهای مبتنی بر دیود نوری دیده می‌شود. هدف این تحقیق، بررسی سه نمونه ساختار مداری متداولی است که در تحقیقات علمی و تجربی از جمله کاینکا [۱، ۵، ۶]، رودریگز [۸] و امیرهان [۸] ۲۰۱۶ استفاده شده و دیگر ساختارها مشابهت زیادی با آن‌ها دارند. [۹] این تحقیق‌ها از سه ساختار متفاوت پیش‌تقویت‌کننده با طبقه‌های مختلف، استفاده کرده‌اند که هرکدام برتری نسبت به دیگری دارد. در این پژوهش مزایا و معایب هر ساختار بررسی و نتایج شبیه‌سازی و ساخت آن‌ها مورد بحث و مقایسه قرار گرفته و در نهایت تحلیل جامعی از ساخت یک آشکارساز تابش ایکس آورده شده است.

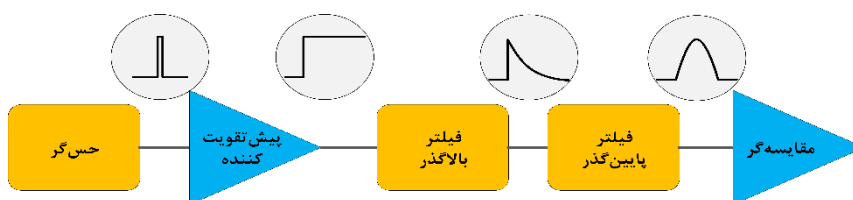
۲. سامانه‌های آشکارساز مبتنی بر دیود نوری

شکل ۱ نمودار بلوکی آشکارسازهای تابش ایکس را نشان می‌دهد. خروجی تمام حس‌گرهای تابش پرنرژی، بار الکتریکی است. هر بار ایجاد شده در خروجی حس‌گر معادل برخورد یک فوتون به حس‌گر است. با برخورد مکرر فوتون‌ها به حس‌گر، جریان‌های گذرا از بارهای تشکیل‌شده به وجود می‌آید. این جریان‌های گذرا بسته به نوع فوتون برخوردی، دارای پهنای زمانی و دامنه‌های متفاوت هستند. بارهای تشکیل‌شده در خروجی حس‌گر برای نمایش و دیجیتال شدن بسیار کوچک هستند. به همین دلیل جریان‌های گذرای حاصل از حس‌گر، به پیش‌تقویت‌کننده اعمال می‌شوند. خروجی تقویت‌کننده یک سیگنال پله بوده که متناسب با جریان ایجاد شده از برخورد فوتون‌ها به حس‌گر است. طبقه بعدی تغییرشکل‌دهنده پالس نام دارد و از چندین طبقه فیلتر بالاگذر و پایین‌گذر برای فیلتر کردن و اندازه‌گیری راحت‌تر سیگنال الکتریکی تشکیل شده است. در این طبقه شکل موج‌های گوسی‌شکل با قله‌های متفاوت به وجود می‌آید. در واقع اندازه هر قله معادل انرژی فوتون برخوردی به حس‌گر است. خروجی طبقه تغییرشکل‌دهنده پالس باید به سرعت به خط پایه^۶ برگردد تا از ایجاد تداخل و خطا در اندازه‌گیری جلوگیری شود. در این مرحله سیگنال الکتریکی برای دیجیتال‌شدن آماده شده است. ساده‌ترین نوع مدار دیجیتال، یک شمارنده بوده که می‌توان تعداد پالس‌های موجود در یک محدوده خاص را شمارش کرد [۱۰]. در ادامه به معرفی سه مدار منتخب در آشکارسازی تابش ایکس با استفاده از دیود نوری پرداخته شده است.

1. Geiger-Muller (G-M) Tube
2. Dose Rate
3. B. Kainka
4. T. Beckers
5. J. Rodriguez

6. Baseline



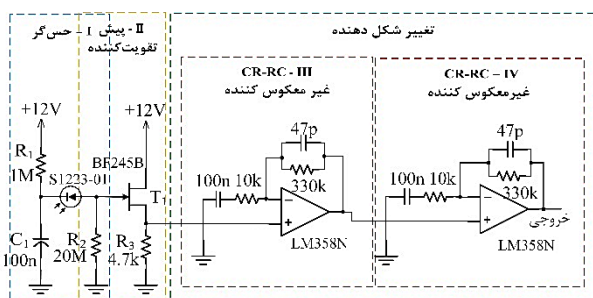


شکل ۱. نمودار بلوکی عملکرد سامانه آشکارساز [۱۰].

طبق مرجع [۱۰]، ساختاری متداول در آشکارسازهای هسته‌ای است. همچنین وجود اتصال AC بین حس گر و پیش تقویت کننده، موجب کاهش ولتاژ آفست ناشی از جریان نشتی حس گر در پیش تقویت کننده می‌شود.

۳.۲ ساختار مداری سوم

مدار شکل ۴ در مرجع [۹] استفاده شده است. در این مدار، حس گر (طبقه I) در تزویج AC است. امپدانس معادل دیده شده در گیت ترانزیستور T_1 شامل مقاومت‌های R_1 و R_2 به همراه خازن C_1 ، خازن دیده شده از خروجی حس گر و خازن دیده شده از ترانزیستورهای T_1 و T_2 است. ترانزیستور T_2 در ناحیه قطع بوده که به دلیل اتصال پایه‌های درین و سورس آن به یکدیگر، نقش یک خازن را بازی می‌کند. امپدانس شبکه بازخورد هم با اثر میلر در ورودی ظاهر می‌شود. پالس ایجاد شده از دیود نوری با ثابت زمانی $R_{eq}C_{eq}$ در ورودی ترانزیستور T_1 ظاهر می‌شود. سیگنال توسط طبقه‌های سورس مشترک و بیس مشترک با بار فعال، تقویت می‌شود. سپس دو طبقه دنبال کننده امیتر برای قابلیت جریان دهی پیش تقویت کننده، در ادامه این طبقه‌ها اضافه شده‌اند و سیگنال را وارد طبقه‌های تغییر شکل دهنده پالس می‌کنند. در این قسمت سیگنال توسط سه طبقه فیلتر میان گذر CR-RC معکوس کننده آماده دیجیتال شدن می‌شود. این مدار از ترانزیستور اثر میدان در ورودی پیش تقویت کننده استفاده کرده که نویز را به خوبی کاهش می‌دهد، همچنین ساختار حساس به بار آن در این طبقه، پیش تقویت کننده را پایدار می‌کند [۱۰]. طبق نتایج مرجع [۹]، این مدار انرژی‌های پایین (کمتر از ۶۰ keV) را به خوبی آشکار کرده است.



شکل ۲. طرح کلی مدار آشکارساز اول [۵].

۱.۲ ساختار مداری اول

در مدار شکل ۲ که از مرجع [۵] انتخاب شده است، حس گر (طبقه I) در حالت تزویج DC است. مقاومت R_1 و خازن C_1 نقش یک فیلتر پایین گذر برای کاهش نوسان‌های ولتاژ تغذیه را ایفا می‌کنند. مقاومت R_2 در طبقه I جهت تعیین ثابت زمانی سیگنال حاصل از دیود نوری است. همچنین این مقاومت برای بایاس طبقه دوم به کار می‌رود. امپدانس دیده شده در گیت ترانزیستور شامل مقاومت R_2 ، خازن معادل حس گر $S1223-01$ و خازن دیده شده از گیت ترانزیستور است. سیگنال تولید شده توسط دیود نوری با ثابت زمانی $R_{eq}C_{eq}$ وارد ترانزیستور طبقه II می‌شود [۱۰، ۱۱]. از وظایف طبقه دوم، ایجاد یک ولتاژ DC بر روی سیگنال حاصل از دیود نوری بوده تا شکل موج‌های منفی سیگنال با وجود تغذیه تک در مدار، به خوبی دیده شوند. همچنین به دلیل داشتن ساختار بافر، قابلیت جریان دهی به وجود می‌آورد. طبقات III و IV از یک شبکه CR-RC غیر معکوس کننده تشکیل شده که در واقع هر کدام یک فیلتر میان گذر هستند. دلیل استفاده این نوع فیلتر وجود پایداری و جلوگیری از ایجاد نویز است [۱۰-۱۲]. از ویژگی‌های مهم این مدار استفاده از ترانزیستور اثر میدان (JFET) در پیش تقویت کننده بوده که نویز بسیار کمی دارد. همچنین به دلیل ساختار ساده آن، هزینه ساخت پایینی دارد.

۲.۲ ساختار مداری دوم

مدار شکل ۳ از مرجع [۸] انتخاب شده است. در طبقه اول حس گر به صورت تزویج AC متصل شده است. امپدانس دیده شده در ورودی تقویت کننده عملیاتی طبقه دوم شامل مقاومت R_2 ، مقاومت شبکه بازخورد (که با اثر میلر در ورودی ظاهر می‌شود) [۱۲]، خازن معادل حس گر $S1223-01$ ، خازن دیده شده از ورودی تقویت کننده عملیاتی MAX4478، خازن C_2 و خازن شبکه بازخورد (که با اثر میلر در ورودی ظاهر می‌شود) [۱۲]، است. سیگنال حاصل از دیود نوری با ثابت زمانی $R_{eq}C_{eq}$ وارد پیش تقویت کننده می‌شود [۱۰، ۱۱]. طبقات III، IV و V از یک شبکه CR-RC تشکیل شده‌اند. هر کدام از این طبقه‌ها هم چون یک فیلتر میان گذر عمل می‌کنند. این مدار از ساختار حساس به بار در پیش تقویت کننده استفاده کرده که

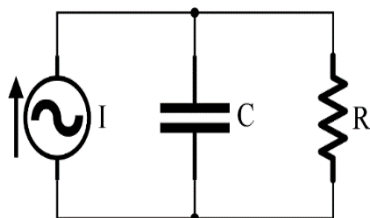


۵.۲ مدل آزمایشگاهی

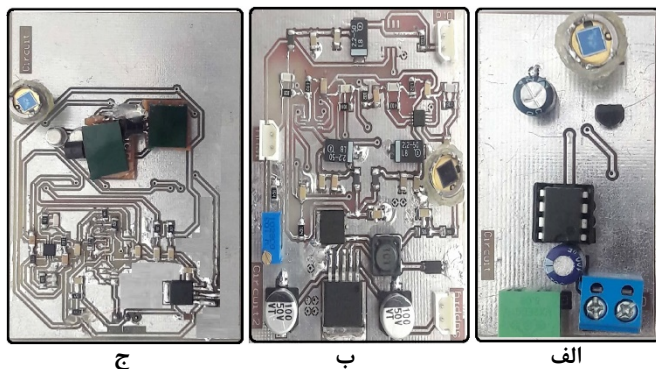
مهم‌ترین نکته برای رسیدن به نتیجه مطلوب و مشاهده خروجی مورد نظر، محافظت مدار از نویز و نور مرئی است [۱، ۳-۹، ۱۳]. به سبب این امر، مدارها داخل یک قوطی فلزی از جنس فولاد نرم با ضخامت ۲ تا ۳ میلی‌متر قرار گرفته که قسمت داخلی آن با لاک سفید پوشیده شده تا از اتصال کوتاه شدن جلوگیری شود. بدنه قوطی به زمین مدار متصل شده تا تأثیر هرگونه نویز الکترومغناطیسی را به حداقل برساند. با قرار دادن درب قوطی هیچ‌گونه نوری نمی‌تواند به داخل راه پیدا کند. تغذیه مدار که از هشت باتری زینک-کربن ۱/۵ ولتی تأمین شده است، داخل قوطی همراه با مدار قرار می‌گیرد. خروجی مدار از طریق یک جک ۳/۵ میلی‌متری با دنیای بیرون قوطی ارتباط برقرار کرده است. برای مشاهده خروجی در اسیلوسکوپ کافیتست خروجی جک را به آن متصل کرد. مدارچاپی‌های ساخته شده مدارهای اول تا سوم را می‌توان در شکل ۶ مشاهده کرد.

۳. نتایج شبیه‌سازی

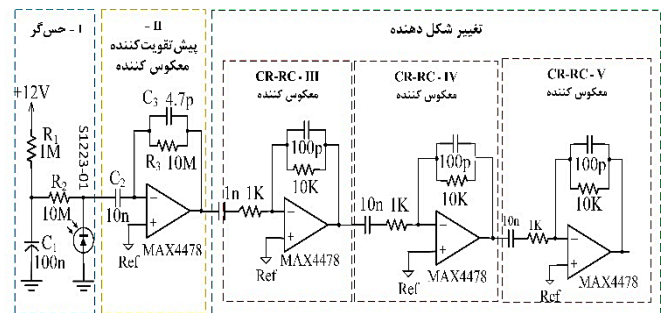
برای مقایسه عملکرد سه ساختار مداری معرفی شده در شکل‌های ۲ تا ۴، ابتدا این سه مدار توسط نرم‌افزار PSpice به طور کامل شبیه‌سازی گشتند. شکل‌های ۷ و ۸ پاسخ زمانی و شکل ۹ پاسخ فرکانسی این سه مدار را نشان می‌دهد.



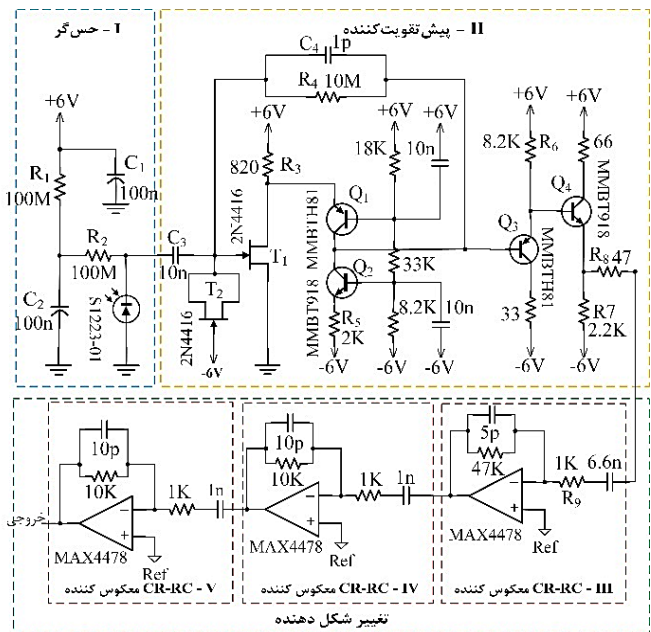
شکل ۵. مدل دیود نوری برای شبیه‌سازی برخورد تابش ایکس [۱۱].



شکل ۶. مدارچاپی آشکارسازهای الف: اول، ب: دوم و ج: سوم.



شکل ۳. طرح کلی مدار آشکارساز دوم [۸].



شکل ۴. طرح کلی مدار آشکارساز سوم [۹].

۴.۲ مدل سازی دیود نوری PIN

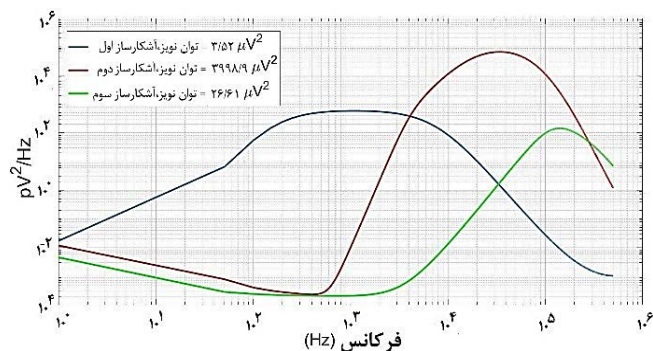
برای شبیه‌سازی مدارهای بحث‌شده، باید از مدل دیود نوری PIN که در شکل ۵ نشان داده شده است، در طبقه اول استفاده کرد. این مدل باید به گونه‌ای باشد که وضعیت برخورد یک تابش ایکس را شبیه‌سازی کند. به همین منظور در حالت پالسی، دیود نوری با یک منبع جریان موج مربعی با عرض پالس بسیار کوچک، دوره طولانی و دامنه ناچیز مدل می‌شود. این منبع می‌تواند با یک خازن و مقاومت که به ترتیب نقش ظرفیت ناحیه تخلیه دیود نوری و جریان تاریک آن را ایفا می‌کنند، در ساختار موازی قرار گیرد [۱۱]. این مقادیر را با توجه به مشخصات برگه فنی هر دیود نوری می‌توان به دست آورد. دیود نوری S۱۲۲۳-۰۱ که در این تحقیق شبیه‌سازی و آزمایش شده، دارای مقاومت $1/2 \text{ G}\Omega$ و ظرفیت خازنی 20 pF است.



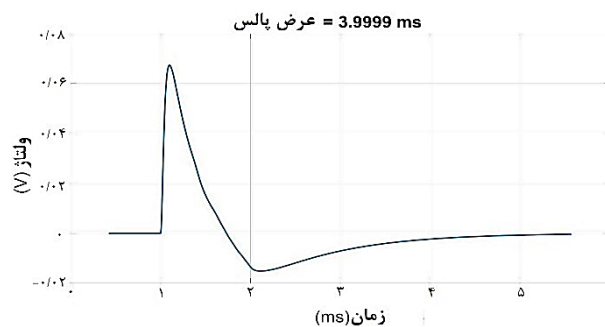
ورودی مدارهای اول، دوم و سوم به ترتیب برابر با 1.15 nV^2 ، 478.14 nV^2 و 5.4 nV^2 به دست آمده است. این نتایج نشان می‌دهد مدار دوم بیش‌ترین توان نویز و مدار اول کم‌ترین توان نویز را در خروجی تولید می‌کنند. توان اتلافی هر مدار به ترتیب 36.86 ، 180.7 و 157.78 میلی‌وات اندازه‌گیری شده است. در نتیجه مدار اول نسبت به دو مدار دیگر توان مصرفی کم‌تری دارد. از دلایل آن می‌توان به پیچیدگی کم‌تر و انتخاب قطعات با توان اتلافی کم‌تر اشاره کرد. خلاصه نتایج شبیه‌سازی در جدول ۱ قابل مشاهده است.

۴. نتایج تجربی

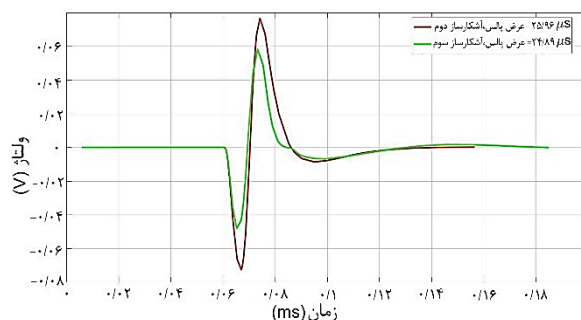
برای آزمایش عملی از مدل و مدارهای بحث شده در بخش ۵.۲ به همراه دیود نوری به عنوان حس‌گر استفاده شده است. مدارها با در نظر گرفتن نکات لازم جهت کاهش نویز و اغتشاشات، طراحی و ساخته شده و برای کاهش بیش‌تر اثر نویز، از اتصال مشترک میان زمین مدار و بدنه قوطی فلزی استفاده شده است. برای انجام آزمایش‌ها، چشمه توری گازی که حاوی ماده رادیواکتیو ^{232}Th بوده، به کار رفته است. چشمه توری گازی، پرتو گاما با انرژی 238.6 keV را از خود گسیل می‌کند. این نتایج از طیف‌سنجی چشمه مورد نظر با استفاده از دستگاه آشکارساز تجاری HVMCA مدل NT-124 همراه با حس‌گر سوسونز بدورسزیم مدل NT-811، در آزمایشگاه هسته‌ای دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود به دست آمده است. شکل ۱۱ نمایی از این چشمه را نشان می‌دهد. در ثبت نتایج آزمایش، از آشکارساز دیود نوری S1223-01 شرکت Hamamatsu استفاده شده است. مشخصات این دیود نوری در جدول ۲ مقایسه با چند نوع دیود نوری دیگر را می‌توان در جدول ۲ مشاهده کرد. این دیودهای نوری، دیودهایی هستند که در مقالات مختلف [۱، ۳-۹] آزمایش شده‌اند و به عنوان دیودهای ارزان قیمت از آن‌ها یاد می‌شود.



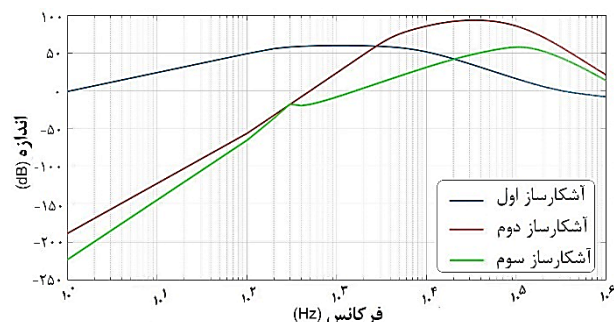
شکل ۱۰. شبیه‌سازی نویز آشکارسازهای اول، دوم و سوم.



شکل ۷. پاسخ زمانی مدار اول در حالت شبیه‌سازی.



شکل ۸. پاسخ زمانی مدارهای دوم و سوم در حالت شبیه‌سازی.



شکل ۹. پاسخ فرکانسی مدارهای اول، دوم و سوم.

در پاسخ زمانی سه مدار در حالت شبیه‌سازی، با توجه به شکل‌های ۷ و ۸ و قله‌هایی از پالس‌های گوسی شکل دیده می‌شود. هر کدام از این قله‌ها نمایان‌گر وجود یک فوتون ایکس هستند. این نوع پالس‌ها، پالس‌های دوقطبی نام دارند [۱۰]. طول زمانی پالس‌ها در مدار اول به اندازه 4 ms بوده در حالی که در مدار دوم و سوم به ترتیب 25.94 و 24.89 میکروثانیه است. در نتیجه مدار دوم و سوم سریع‌تر از مدار اول عمل می‌کنند. هم‌چنین با توجه به شکل ۹، مدار اول در فرکانس‌های پایین و مدارهای دوم و سوم در فرکانس‌های بالا پاسخ بهتری دارند. این امر سبب شده تا عرض پالس در مدار اول بزرگ‌تر از دو مدار دیگر بشود. هم‌چنین با توجه به این شکل، مقدار بهره برای مدارهای اول تا سوم در فرکانس کاری مدار به ترتیب برابر 57 ، 85.7 و 57.9 دسی‌بل به دست آمده است. بیش‌تر بودن بهره مدار دوم از دو مدار دیگر، سیگنال با دامنه بزرگ‌تری برای بلوک دیجیتال ایجاد می‌کند. شکل ۱۰ نتایج تحلیل نویز سه مدار را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل و بهره، توان نویز



شکل ۱۱. نمایی از چشمه توری گازی حاوی ^{232}Th .

جدول ۱. مقایسه نتایج شبیه‌سازی آشکارسازهای اول، دوم و سوم

نام مدار	بهره تبدیلی (dB)	نویز نهایی ارجاع شده به ورودی (nV)	دوره پالس (μs)	توان اتلافی (mW)
مدار اول	۵۷	۱/۱۵	۴۰۰۰	۳۶/۸۶
مدار دوم	۸۵/۷	۴۷۸/۱۴	۲۵/۹۴	۱۸۰/۷
مدار سوم	۵۷/۹	۵/۴	۲۴/۸۹	۱۵۷/۷۸

جدول ۲. مقایسه ویژگی‌های دیودهای نوری ارزان قیمت

حس‌گر	طول موج قابل جذب (nm)	ولتاژ شکست (V)	خازن تخلیه (pF)	جریان نشتی (nA)	مساحت فعال (mm^2)	بهترین پاسخگویی (A/W)	توان اتلافی (mW)
S1۲۲۳-۰۱	[۳۲۰، ۱۱۰۰]	۳۰	۲۰	۱۰	۱۳	۰/۶ (۹۹۰ nm)	۱۰۰
BPW۳۴	[۴۳۰، ۱۱۰۰]	۶۰	۴۰	۳۰	۹	۱ (۹۱۰ nm)	۲۱۵
BPV۱۰	[۴۰۰، ۱۱۰۰]	۶۰	۳/۸	۵	۰/۷۸	۱ (۹۲۰ nm)	۲۱۵
BPV۲۳NF	[۷۵۰، ۱۱۵۰]	۶۰	۴۸	۳۰	۴/۴	۱ (۹۴۰ nm)	۲۱۵
SFH۲۰۵	[۷۴۰، ۱۱۰۰]	۳۲	۷۲	۳۰	۷/۰۲	۱ (۹۰۰ nm)	۱۵۰

اول تا سوم در حالت عملی به ترتیب برابر ۵۵/۸، ۶۶/۷۵ و ۵۶/۵۱ دسی‌بل به دست آمده است. دوره زمانی پالس‌ها با توجه به نتایج عملی به ترتیب برابر ۴۴۰۰، ۱۲ و ۸/۲ میکروثانیه اندازه‌گیری شده است. موضوع دیگری که برای مقایسه سه آشکارساز می‌توان مطرح کرد، توان اتلافی در مدار آشکارسازها است. توان اتلافی مدارها که در حالت عملی اندازه‌گیری شده؛ برای مدارهای اول تا سوم به ترتیب برابر با ۳۶/۸۶، ۱۵۶/۲۴ و ۱۰۷/۷ میلی‌وات است. توان اتلافی در مدار آشکارساز اول کمتر از دو مدار دیگر بوده و علت این امر یک طبقه بودن بلوک پیش‌تقویت‌کننده آن و کمتر بودن توان اتلافی ترانزیستور BF۲۴۵B نسبت به مجموع ترانزیستورهای استفاده شده در سه طبقه پیش‌تقویت‌کننده مدار سوم و تقویت‌کننده عملیاتی MAX۴۴۷۸ در پیش‌تقویت‌کننده مدار دوم است. این امر سبب کاهش حجم و وزن مدل تجاری آن می‌شود. لازم به ذکر است قطعات انتخابی مشابه قطعاتی هستند که در مراجع [۵، ۸، ۹] استفاده شده‌اند. خلاصه نتایج عملی در جدول ۳ قابل مشاهده است.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی مؤید نتایج ساخت بوده و نشان می‌دهد نتایج حاصل از ساخت قابل اطمینان هستند. در خصوص مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و عملی باید گفت که در حالت شبیه‌سازی از مدل ایده‌آل دیود نوری (منبع جریان ایده‌آل) برای شبیه‌سازی استفاده شده است. همچنین مدل‌سازی ادوات نیمه‌هادی نیز معمولاً شرایط ایده‌آلی داشته و با ادوات ساخته شده و موجود در بازار تفاوت محسوسی دارند. این دلایل سبب اختلاف در نتایج شبیه‌سازی و عملی شده است.

مشخصه‌های زیادی برای دیودهای نوری وجود دارد که بسیاری از این ویژگی‌ها در آشکارسازی تابش‌های یونساز اثر دارند. در جدول ۲ به برخی از مهم‌ترین آن‌ها از جمله طول موج قابل جذب یا پاسخ طیفی، ولتاژ شکست، ظرفیت خازن تخلیه، جریان نشتی، مساحت ناحیه فعال، بهترین پاسخگویی در نمودار طیفی و توان اتلافی اشاره شده است.

عملکرد دیودهای نوری انتخابی را با استفاده از ویژگی‌های الکتریکی آن‌ها در جدول ۲، می‌توان رتبه‌بندی کرد. این رتبه‌بندی با استفاده از روش ارزیابی ساده چند شاخصه صورت می‌گیرد [۱۴]. طبق این رتبه‌بندی، دیود نوری S1۲۲۳-۰۱ در میان سایر دیودهای جدول ۲، انتخاب مناسبی برای آزمایش آشکارسازی تابش ایکس است [۱۴]. با مراجعه به مشخصات فنی دیود S1۲۲۳-۰۱، منحنی پاسخ آن در طول موج‌های مختلف (بیش‌تر از ۳۰۰ نانومتر) ترسیم شده است. بیش‌ترین حساسیت این دیود در ناحیه مرئی (۴۰۰ تا ۷۰۰ نانومتر) است. اما در طول موج‌های کوچک‌تر (نزدیک به ایکس و گاما)، این دیود حساسیت بسیار ناچیز از خود نشان داده که قابل آشکارسازی است. این توان آشکارسازی در تحقیقات گذشته [۱، ۳-۹] به اثبات رسیده است.

برای انجام آزمایش عملی، چشمه توری گازی همراه با مدارهای ساخته شده، در داخل مدل آزمایشگاهی بر روی حس‌گر قرار گرفته است. ولتاژ خروجی هر مدار به وسیله‌ی اسیلوسکوپ دیجیتال ثبت شده و در شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود هر سه شکل مانند حالت شبیه‌سازی، یک پالس گوسی‌شکل دوقطبی به ازای هر برخورد تابش ایکس را نشان می‌دهد. مقدار بهره مدارهای

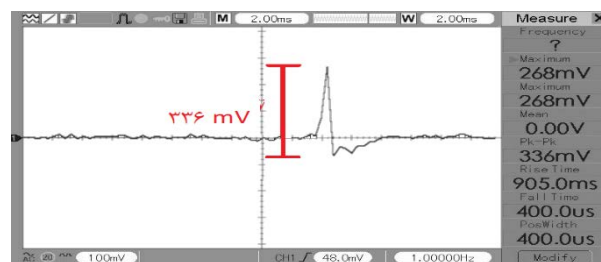


خازن بازخورد شده و این امر سبب ایجاد یک شیب مثبت در قسمت افقی ولتاژ پله ایجاد شده در دو سر خازن بازخورد می‌شود. در نهایت زمان نشست پالس خروجی پیش‌تقویت‌کننده افزایش یافته و زمان مرده^۱ آشکارساز بیش‌تر می‌شود [۱۰]. مشکل جریان نشستی به دلیل تزویج AC در مدارهای دوم و سوم به وجود نخواهد آمد. زیرا خازن تزویج از عبور این جریان جلوگیری می‌کند. جریان نشستی ایجاد شده در تزویج DC، نویز این طبقه را نیز افزایش می‌دهد. این نویز از نوع ضربه‌ای^۲ بوده که ناشی از جریان نشستی دیود نوری است [۱۱، ۱۳]. پس می‌توان نتیجه گرفت، مدار اول برای حس‌گرهایی که دارای جریان نشستی زیاد هستند، مناسب نیست. حال اگر از دیود نوری با جریان نشستی کوچک استفاده شود، اثر نویز ضربه‌ای در تزویج DC کاهش یافته و قابل صرف نظر است. در این حالت نویز تزویج DC بهتر از تزویج AC عمل کرده و SNR افزایش می‌یابد.

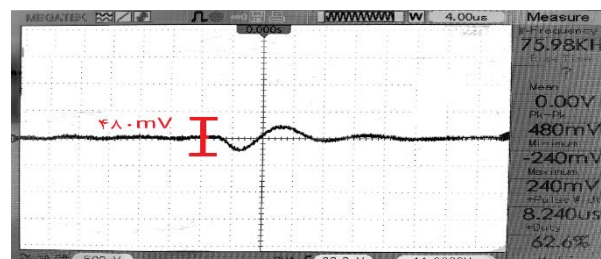
دلیل کاهش SNR در تزویج AC طبق مرجع [۱۱]، ایجاد خازن پارازیتی تا زمین است. از مزایای دیگر تزویج AC در مدارهای دوم و سوم، عدم تأثیر تغییرات مقاومت معادل در سمت حس‌گر، بر روی پیش‌تقویت‌کننده است. گاهی ممکن است به دلیل اتصالات نامرغوب حس‌گر و پیش‌تقویت‌کننده، تغییرات مقاومت حس‌گر به دلیل دما، تعویض دیود نوری که موجب تغییر مقاومت موازی^۳ آن می‌شود و تغییر مقاومت بار، مقاومت معادل سمت حس‌گر تغییر کند. این امر در تزویج DC، بایاس پیش‌تقویت‌کننده را تحت تأثیر قرار می‌دهد. زمان مرده‌ای که در حس‌گر سه مدار ایجاد می‌شود، یکسان است. زیرا زمان مرده در آشکارسازهای نیمه‌هادی، بستگی به زمان جمع آوری بار در آشکارساز داشته که در هر سه مدار به دلیل استفاده کردن از آشکارساز مشابه، یکسان است [۱۱]. با توجه به توضیحات فوق می‌توان گفت، ساختار به کار رفته در طبقه حس‌گر مدارهای دوم و سوم، از نظر ولتاژ آفست و تثبیت بایاس پیش‌تقویت‌کننده بهتر عمل کرده اما نویز بیش‌تری را ایجاد می‌کنند. این امر در نتایج حاصل از تحلیل نویز سه مدار دیده می‌شود.

۲.۵ طبقه پیش‌تقویت‌کننده

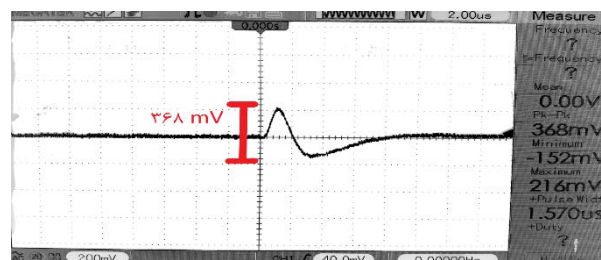
هرچه ثابت زمانی دیده شده از حس‌گر بزرگ‌تر باشد، زمان میرایی پالس خروجی پیش‌تقویت‌کننده زیاد شده و مشکل انباشتگی پالس^۴ را در نرخ‌های بالای شمارش، افزایش می‌دهد



شکل ۱۲. پاسخ عملی آشکارساز اول.



شکل ۱۳. پاسخ عملی آشکارساز دوم.



شکل ۱۴. پاسخ عملی آشکارساز سوم.

جدول ۳. مقایسه نتایج علمی شبیه‌سازی آشکارسازهای اول، دوم و سوم

نام مدار	بهره تبدیلی (dB)	دوره پالس (μs)	توان اتلاfi (mW)
مدار اول	۵۵/۸	۴۴۰۰	۳۶/۶
مدار دوم	۶۶/۷۵	۱۲	۱۵۶/۲۴
مدار سوم	۵۶/۵۱	۸/۲	۱۰۷/۷

۵. تحلیل ساختارها و بحث در خصوص نتایج

۱.۵ طبقه حس‌گر

در مدار اول، حس‌گر در تزویج DC و در مدارهای دوم و سوم به صورت تزویج AC قرار دارد. در تزویج AC یک طرف حس‌گر می‌تواند به زمین متصل شود، اما در تزویج DC حس‌گر باید از زمین جدا باشد [۱۰]. به همین دلیل نمی‌توان جای مقاومت بار را در این دو ساختار تغییر داد (مقاومت R_p در شکل‌های ۲، ۳ و ۴). از مشکلات تزویج DC می‌توان به ایجاد ولتاژ آفست در پیش‌تقویت‌کننده اشاره کرد. زیرا جریان نشستی دیود نوری بر روی مقاومت معادل ورودی، ولتاژ آفست تولید کرده که سبب خطا در اندازه‌گیری می‌شود. وجود تزویج DC در مدارهای دوم و سوم که پیش‌تقویت‌کننده دارای خازن بازخورد بوده، اصلاً توصیه نمی‌شود. زیرا در این حالت، جریان نشستی باعث شارژ

1. Dead Time
2. Shot Noise
3. Shunt Resistor
4. Pulse Pile-Up



در این رابطه A بهره حلقه باز پیش‌تقویت‌کننده، Q_{strike} بار ایجاد شده در دیود نوری، C_i خازن ورودی پیش‌تقویت‌کننده، C_s ظرفیت حاصل از اتصالات، C_d ظرفیت دیود نوری و C_f خازن شبکه بازخورد است. در صورتی که بهره حلقه باز پیش‌تقویت‌کننده بزرگ انتخاب شود، ولتاژ خروجی رابطه ۱ تنها به خازن بازخورد و بار بستگی پیدا می‌کند. در نتیجه هر چه مقدار خازن بازخورد کوچک‌تر انتخاب شود، بهره پیش‌تقویت‌کننده افزایش یافته و تابش‌هایی با انرژی کم‌تر، راحت‌تر آشکار می‌شوند. البته در حالت عملی حداقل مقدار این خازن بین ۰/۵ تا ۳ پیکوفاراد می‌تواند باشد [۱۱]. نتایج حاصل از آزمایش عملی (شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴) سه مدار نشان دادند که آشکارساز اول به دلیل بهره کم‌تر، انرژی مورد آزمایش را با دامنه کوتاه‌تری آشکار کرده، اما آشکارسازهای دوم و سوم بهره بیش‌تری داشته و این انرژی را با دامنه بزرگ‌تر آشکار کردند. زیرا در پیش‌تقویت‌کننده مدار اول از ساختار بازخورد استفاده نشده و خازن ورودی افزایش یافته و ولتاژ خروجی کم شده است. رابطه ۲ خازن ورودی دیده شده از دیود نوری در مدار اول را نشان می‌دهد.

$$C_{in} = C_{S1223-01} + C_{in,T1} + C_s \quad (2)$$

با توجه به این رابطه، $C_{S1223-01}$ ظرفیت دیود نوری $S1223-01$ تحت ولتاژ بایاس ۱۲ ولت و $C_{in,T1}$ ظرفیت معادل ورودی ترانزیستور طبقه دوم شکل ۲ است. ولتاژ خروجی پیش‌تقویت‌کننده در این مدار از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$V_{out} = \frac{Q_{strike}}{C_{in}} \quad (3)$$

که در این رابطه C_{in} ظرفیت دیده شده توسط دیود نوری است. در این ساختار، خازن ورودی تحت تأثیر ظرفیت مسیر ارتباطی، ورودی پیش‌تقویت‌کننده و دیود نوری است و در نتیجه خازن معادل افزایش یافته و طبق رابطه ۳ دامنه ولتاژ خروجی کاهش می‌یابد. همچنین تغییر دیود نوری و طول مسیر ارتباطی دیود نوری به پیش‌تقویت‌کننده، این خازن را تغییر داده و در این شرایط بهره دیگر ثابت نمی‌ماند. خازن معادل دیده شده از دیود نوری در مدارهای دوم و سوم به ترتیب در روابط ۴ و ۵ آمده است.

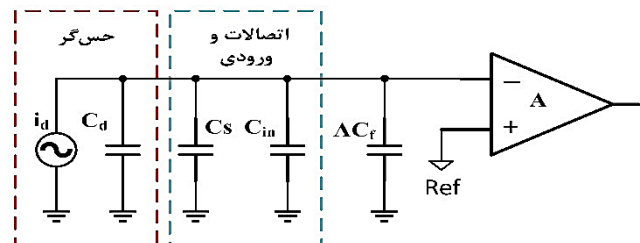
$$C_{in} = C_{S1223-01} + C_s + (C_f \parallel [C_{in,MAX4478} + A \times C_f]) \quad (4)$$

$$C_{in} = C_{S1223-01} + C_s + (C_f \parallel [C_{T1} + C_{T2} + AC_f]) \quad (5)$$

در این روابط A همان بهره حلقه باز پیش‌تقویت‌کننده شکل‌های ۳ و ۴ است. $C_{in,MAX4478}$ خازن ورودی تقویت‌کننده عملیاتی

[۱۰]. زیرا افزایش زمان میرایی سبب شده تا اگر پالس جدیدی رخ دهد، با پالس قبلی هم‌پوشانی ایجاد شده و به دلیل اثر انباشتگی پالس، قسمتی از دامنه سیگنال از بین برود. این مشکل در مدارهای دوم و سوم به خوبی حل شده است. در ساختار پیش‌تقویت‌کننده مدارهای دوم و سوم از امپدانس بازخورد استفاده شده است. در صورت بزرگ بودن امپدانس ورودی پیش‌تقویت‌کننده، جریان ناشی از حس‌گر به سمت امپدانس بازخورد روانه می‌شود. در نتیجه ثابت زمانی سیگنال پیش‌تقویت‌کننده به خازن و مقاومت بازخورد بستگی پیدا می‌کند [۱۰]. پس می‌توان گفت که اگر مقدار خازن و مقاومت بازخورد در مدارهای دوم و سوم کوچک انتخاب شود، اثر انباشتگی پالس در نرخ‌های بالای شمارش کاهش می‌یابد. البته باید توجه داشت که کوچک کردن زیاد مقاومت بازخورد، جریان نویز را افزایش می‌دهد. اما مدار اول به دلیل استفاده نکردن از خازن و مقاومت بازخورد، زمان نشست سیگنال ورودی آن به خازن و مقاومت ورودی پیش‌تقویت‌کننده وابسته شده است. از آن‌جا که در مدار اول مقدار این خازن به دلیل مجموع خازن‌های حس‌گر، مسیر ارتباطی و خازن ورودی پیش‌تقویت‌کننده بزرگ شده است، ثابت زمانی سیگنال افزایش پیدا کرده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی و ساخت مدارها اول تا سوم، این تحلیل را اثبات می‌کنند. طبق شکل ۷ و ۸ در حالت شبیه‌سازی و شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ در حالت ساخت، عرض پالس در مدارهای دوم و سوم در مقیاس میکرو به دست آمده در حالی که در مدار اول، این مقیاس هزار برابر افزایش داشته است. از جمله مزایای دیگر ساختار پیش‌تقویت‌کننده با خازن بازخورد در مدارهای دوم و سوم، بزرگ شدن اثر این خازن در ورودی پیش‌تقویت‌کننده به دلیل اثر میلر بوده و طبق شکل ۱۵ تأثیر زیادی در خازن معادل ورودی می‌گذارد. بنابراین چون مقدار خازن و بهره پیش‌تقویت‌کننده ثابت است، ولتاژ خروجی تنها با بار ورودی متناسب می‌شود. رابطه ۱ ولتاژ خروجی پیش‌تقویت‌کننده را نشان می‌دهد.

$$V_{out} = -A \frac{Q_{strike}}{C_i + C_s + C_d + (A+1)C_f} \quad (1)$$



شکل ۱۵. تأثیر خازن بازخورد در ورودی پیش‌تقویت‌کننده.



پالس خروجی هر سه مدار به صورت دو قطبی ظاهر شدند (شکل‌های ۷ و ۸ در حالت شبیه‌سازی و شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ در حالت عملی). پالس‌های دوقطبی دارای دو لوب بالایی و پایینی بوده که دلیل این امر وجود یک طبقه مشتق‌گیر در ادامه شبکه CR-RC بلوک تغییر شکل دهنده است. مزیت‌های این نوع پالس‌ها نسبت به تک‌قطبی زمانی مورد توجه قرار می‌گیرد که نرخ برخورد تابش بالا بوده و موجب تغییر خط پایه (متوسط سیگنال) شده و اطلاعات را از بین می‌برد. در واقع پایین زدگی سیگنال موجب می‌شود که اگر به سبب انباشتگی پالس، خط پایه تغییر کند؛ اطلاعات سیگنال بعدی حفظ شود [۱۰، ۱۱]. در مدار اول پالس دو قطبی ایجاد شده دارای دو لوب با مساحت غیر یکسان است. این امر در نرخ‌های شمارش بسیار بالا، احتمال انباشتگی پالس را افزایش می‌دهد [۱۰]. این مشکل در بلوک شکل‌دهنده پالس مدارهای دوم و سوم حل شده است. با افزودن یک طبقه شبکه CR-RC به بلوک شکل‌دهنده پالس، پالس‌های دو قطبی با لوب‌های هم مساحت ظاهر شده‌اند. این امر اثر انباشتگی و جابه‌جایی خط پایه را کاهش می‌دهد [۱۰]. هزینه اضافه کردن این طبقه، افزایش نویز است. زیرا پالس‌های دوقطبی هم‌مساحت، SNR ضعیف‌تری دارند. دلیل آن وجود مشتق‌گیر بوده که فرکانس‌های بالا را عبور می‌دهد و موجب افزایش نویز مدار می‌شود [۱۰]. به همین دلیل در نتایج حاصل از شبیه‌سازی نویز، مدار اول به سبب داشتن دو طبقه CR-RC بهتر از دو مدار دیگر عمل کرده، اما در نرخ‌های بالای شمارش اثر انباشتگی بیش‌تری دارد. بیش‌ترین تأثیر در افزایش زمان مرده آشکارسازهای نیمه‌هادی، بخش شکل‌دهنده پالس است [۱۱]. زیرا اثر انباشتگی پالس، زمان مرده را زیاد می‌کند. با توجه به توضیحات فوق، زمان مرده در مدارهای دوم و سوم نسبت به مدار اول کم‌تر است. افزایش تعداد طبقه‌های CR-RC علاوه بر کاهش اثر انباشتگی، بهره را بزرگ‌تر کرده که سبب آشکارسازی راحت‌تر پالس خروجی شده است. اما افزایش بیش از حد تعداد این طبقه‌ها، موجب اشباع سیگنال خروجی و هم‌چنین افزایش نویز مدار خواهد شد [۱۰].

۴.۵ جمع‌بندی

با توجه به اطلاعات به دست آمده از نتایج مدارهای ساخته شده در این تحقیق، مدار اول دارای مزایای ساختار ساده، هزینه ساخت پایین، توان مصرفی و توان نویز کم است. اما به دلیل دوره پالس بلند، در نرخ‌های بالای شمارش کاربرد صحیحی نداشته و موجب از دست رفتن اطلاعات خواهد شد. ساختار پیش‌تقویت‌کننده آن به دلیل عدم استفاده از امپدانس بازخورد، تأثیر زیادی به نوع دیود نوری و ظرفیت مسیر ارتباطی پیدا کرده، پس در نتیجه این ساختار برای هر نوع دیود نوری مناسب نیست و به دلیل ظرفیت ورودی زیادی که پیدا می‌کند، بهره آن

پیش‌تقویت‌کننده مدار دوم و $C_{in,T1}$ و $C_{in,T2}$ خازن‌های ترانزیستورهای ورودی پیش‌تقویت‌کننده مدار سوم هستند. با توجه به روابط فوق، خازن حس‌گر و پیش‌تقویت‌کننده در برابر اثر خازن بازخورد در ورودی بسیار ناچیز شده و در نتیجه بهره را تحت تأثیر قرار نمی‌دهند. هم‌چنین به دلیل بزرگ‌تر بودن بهره حلقه باز پیش‌تقویت‌کننده مدار دوم از مدار سوم، تقریب در معادله ۱ بهتر صورت گرفته و تقویت‌کننده پایدارتر می‌شود. در نتیجه بهره مدار دوم بیش‌تر از مدار سوم شده و پالس‌های خروجی آن بلندتر شده‌اند.

وجود امپدانس بازخورد معایبی را هم به همراه دارد. مقاومت بازخورد و ایجاد خازن پارازیتی در این نوع ساختار پیش‌تقویت‌کننده، نویز مدار را افزایش می‌دهد [۱۱]. نتایج شبیه‌سازی، گواه این تحلیل هستند. طبق نتایج شکل ۱۰، نویز مدار اول به دلیل عدم وجود خازن و مقاومت بازخورد در ساختار پیش‌تقویت‌کننده، از دو مدار دیگر کوچک‌تر بوده و مدار دوم بیش‌ترین نویز را داشته است. دلیل بزرگ‌تر شدن نویز مدار دوم از مدار سوم، هم‌چنان به ساختار پیش‌تقویت‌کننده آن‌ها باز می‌گردد. رابطه ۶، SNR سیگنال خروجی پیش‌تقویت‌کننده را نشان می‌دهد.

$$SNR = \frac{V_{out}}{V_n} = \frac{Q_{strike}}{C_f V_n} \quad (6)$$

در این رابطه، V_n ولتاژ نویز است. طبق آن می‌توان گفت، نسبت سیگنال به نویز با ظرفیت دیده شده از دیود نوری رابطه عکس دارد. پس هر چه این ظرفیت بزرگ‌تر شود، نویز پیش‌تقویت‌کننده بیش‌تر می‌شود. که در مدار دوم ظرفیت خازن بازخورد بیش‌تر از مدار سوم است. هم‌چنین تقویت‌کننده مدار دوم بهره حلقه باز بسیار بزرگی دارد. در نتیجه تأثیر مقاومت شبکه بازخورد آن، در ورودی به شدت کوچک شده و جریان نویز آن بزرگ می‌شود. با توجه به آن که چگالی طیف توان نویز خروجی پیش‌تقویت‌کننده با حاصل ضرب مربع اندازه بهره حلقه بسته در جریان نویز ورودی برابر است [۱۱]، بنابراین نویز پیش‌تقویت‌کننده مدار دوم از سوم بیش‌تر شده است. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که ساختار پیش‌تقویت‌کننده مدار دوم و سوم در نرخ‌های بالای شمارش بهتر از مدار اول عمل کرده و انرژی‌های کوچک‌تری را آشکار می‌کنند، اما در مقابل نویز بیش‌تری در این ساختارها تولید می‌شود. این نویز در مدار دوم بیش‌تر است.

۳.۵ طبقه‌های شکل‌دهنده پالس

این طبقه‌ها وظایف افزایش دامنه پالس خروجی، کاهش نویز و ایجاد پالس گوسی برای شمارش راحت‌تر را بر عهده دارند [۹، ۱۱]. هر سه مدار از چند طبقه CR-RC در این بلوک استفاده کرده‌اند. طبق نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی و ساخت، شکل



طبقه پیش تقویت کننده استفاده کرده، بیشترین بهره تبدیلی و مدار اول که از ساختار مداری ساده‌ای تشکیل شده، کمترین بهره تبدیلی را در اختیار قرار داد. توان نویز الکتریکی مدار اول در مقایسه با دو مدار دیگر کمتر بوده و مدار دوم بیشترین توان نویز را دارد. پیش‌بینی می‌شود که مدار دوم و سوم با ساختار پیش تقویت کننده حساس به بار ترانزیستوری، به دلیل عرض پالس کوچکتر، عملکرد بهتری در نرخ‌های بالای شمارش داشته باشند. همچنین مدار اول کمترین مصرف توان را در میان دو مدار دیگر به ثبت رسانده است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود به دلیل همکاری در طیف‌سنجی چشمه‌های در دسترس، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

مراجع

1. B. Kainka, *Measure gamma rays with a photodiode, Radiation Detector Using a BPW34*, Elektor, **419**, 22 (2011).
2. F. Baniyaghoobi, et al., *Radiation accidents and how to deal with it, MCS*, **1(1)**, 43 (2014) (In Persian).
3. S. Zhao, G. Lioliou, A.M. Barnett, *X-ray spectrometer with a low-cost SiC photodiode*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **887**, 168 (2018).
4. P. Mitra, et al., *Optimum Energy Compensation for Current Mode Application of Silicon PIN Diode in Gamma Radiation Detection*, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **63(6)**, 2777 (2016).
5. B. Kainka, *Improved Radiation meter, counter for alpha, beta and gamma radiation*, *Elektor*, **99**, 20 (2011).
6. B. Kainka, *Radiation Meter Reloaded, Simple modifications open up new possibilities*, *Elektor*, **102**, 54 (2012).
7. T. Beckers, *Radiation meter*, *Elektor*, **102**, 44 (2012).
8. J. Rodriguez, *M.S. thesis*, *Texas Tech University*, (2014).
9. E. Emirhan, et al., *A low cost X-ray imaging device based on BPW-34 Si-PIN photodiode*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **819**, 1 (2016).
10. G.F. Knoll, *Radiation detection and measurement*, **4th ed.** (Wiley, Ann Arbor, 2010).
11. M. Nakhostin, *Signal Processing for Radiation Detectors*, **1st ed.** (Wiley, Hoboken, 2018).
12. B. Razavi, *Fundamentals of microelectronics*, **2nd ed.** (Wiley, Hoboken, 2006).
13. H. Spieler, *Semiconductor detector systems*, **2nd ed.** (Oxford University Press, New York, 2005).
14. A. Mousazadeh, M. Kafaee, M. Ashraf, *Ranking of commercial photodiodes in radiation detection using multiple-attribute decision making approach*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, **987**, 164839 (2021).

کاهش می‌یابد. پس می‌توان در کاربردهایی با نرخ شمارش پایین و آشکارسازی انرژی‌های بالاتر از این ساختار استفاده کرد. برای بهبود این مدار می‌توان از دیودهای نوری با جریان نشتی و ظرفیت خازنی کوچکتر استفاده کرد. از مزایای مدار دوم، بهره بزرگ آن بوده، که تابش‌ها با انرژی بسیار پایین را هم شناسایی می‌کند. همچنین دوره پالس کوتاه آن نسبت به مدار اول، آشکارسازی در نرخ‌های بالای شمارش را تحقق می‌بخشد. از معایب آن ساختار پیچیده، هزینه ساخت بیشتر، توان اتلافی بالاتر و توان نویز زیاد است. این مدار برای آشکارسازی انرژی‌های کوچک در محیط‌هایی با نرخ شمارش بالا کاربردی است. برای بهینه کردن آن می‌توان از پیش تقویت کننده با نویز کمتر استفاده کرد تا توان نویز مدار کاهش یابد. مدار سوم نسبت به دو مدار دیگر دارای معایب کمتر و مزایای بیشتر است. با توجه به نتایج، بهره نسبتاً بزرگ، توان نویز کوچک و دوره پالس کوتاه، مزایای این مدار هستند. اما پیچیدگی آن نسبت به دو مدار دیگر و توان اتلافی زیاد، از معایب آن به حساب می‌آید.

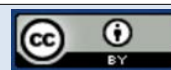
در نهایت پس از انتخاب بهترین ساختارهای مداری برای نرخ‌های بالا و نرخ‌های پایین شمارش با توجه به نکات مطرح شده، می‌توان آن‌ها را در میدان استاندارد تنظیم کرد.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش سه نمونه مدار برای آشکارسازی تابش ایکس در حالت پالسی با ساختارهای مختلف در بلوک‌های پیش تقویت کننده و شکل‌دهنده پالس تحلیل، شبیه‌سازی و ساخته شد. در بلوک حسگر از دیود نوری تجاری $Si^{223} - 01$ شرکت Hamamatsu که از آشکارسازهای ارزان قیمت بوده، به کار رفته است. جهت انجام شبیه‌سازی از مدل دیود نوری در حالت پالسی استفاده شده و برای آزمایش عملی، چشمه ^{232}Th با تابش گاما 238.6 keV به کار رفته است. پاسخ مدارها در حالت شبیه‌سازی و عملی بررسی شد. همچنین مشخصات الکترونیکی آن‌ها از جمله بهره تبدیلی، نویز الکتریکی، دوره پالس و توان اتلافی مدارات در حالت نظری، شبیه‌سازی و عملی مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به مشاهدات انجام شده، مدار دوم که از ساختار حساس به بار با تقویت کننده عملیاتی در

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

امیررضا موسی‌زاده مقدم، محمدرضا اشرف، مهدی کفایی (۱۴۰۱)، بررسی و مقایسه مشخصات الکترونیکی سه ساختار منتخب مبتنی بر دیود نوری برای آشکارسازی اشعه ایکس، ۳۳-۲۴، ۱۰۰

DOR: 20.1001.1.17351871.1401.43.2.3.8

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1380.html

