

صلى الله عليه وسلم



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گرایش الکترونیک، طراحی مدارهای مجتمع

پایان نامه کارشناسی ارشد

طراحی و ساخت سامانه آشکارساز مستقیم تابش‌های کم انرژی ایکس در حالت جریانی و حالت پالسی با استفاده از دیود نوری

نگارنده: امیررضا موسی‌زاده مقدم

استادان راهنما

دکتر محمدرضا اشرف
دکتر مهدی کفائی

بهمن ۱۳۹۹

شماره: ۱۷۸۹، ج. ۲
تاریخ: ۹۹، ۱۱، ۲۹

باسمه تعالی

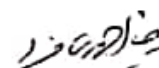


فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای امیررضا موسی زاده مقدم با شماره دانشجویی ۹۶۱۴۴۵۴ رشته برق الکترونیک گرایش (مدارهای مجتمع) تحت عنوان: طراحی و ساخت سامانه آشکارساز مستقیم تابش های کم انرژی ایکس در حالت جریانی و حالت پالسی با استفاده از دیود نوری که در تاریخ ۱۳۹۹/۱۱/۲۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

☐ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☒ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۸/۹۹
☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹	☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹
☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد	
☐ نظری	☒ عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	آقای دکتر محمدرضا اشرف	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	آقای دکتر مهدی کفائی	استادیار	
۳- استاد مشاور	—	—	—
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	آقای دکتر علی فتاح	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	آقای دکتر عماد ابراهیمی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	آقای دکتر مسلم سوهانی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: 
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:


تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیلی) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

این پایان نامه را به پدر بزرگوار و مادر مهربانم که سال ها به عنوان معلم،
در امر تعلیم و تربیت نقش بسزایی داشته اند، تقدیم می نمایم. همچنین در
برابرشان سر تعظیم فرود آورده تا دستان پاک و مقدسشان را که سال ها با قلم
عشق مانوس بوده، بر دیدگان گذاشته و بوسه زنم.

مراتب سپاس و تشکر را از خانواده عزیزم بالاخص پدر و مادر که مرا تقدیرم بجایم آورم که بی شک بدون
همراهی و حمایت آن بزرگواران به پایان رساندن این مسیر ممکن نبود.

ضمناً بر خود لازم می دانم تا از اساتید محترم، جناب آقای دکتر محمد رضا اشرف و جناب آقای دکتر
مهدی کفائی که در تمام مراحل پایان نامه و اتمام آن، ایجاب را همراهی و راهنمایی نموده اند، سپاسگزاری
و قدردانی نمایم. همچنین سپاس فراوان دارم از جناب آقای دکتر مسلم سولانی که در انجام آزمایش های
این پایان نامه مساعدت فرمودند.

و در خاتمه از دوست عزیزم آقای مهندس محمد مهدی دریانی که صمیمانه بنده را یاری نموده اند، تشکر می نمایم.

امیررضا موسی زاده مقدم
بهمن ۱۳۹۹

تعهد نامه

اینجانب **امیررضا موسی زاده** مقدم دانشجوی کارشناسی ارشد رشته الکترونیک مهندسی برق و رباتیک دانشگاه شاهرود، نویسنده پایان نامه با عنوان **طراحی و ساخت سامانه آشکارساز مستقیم تابش های کم انرژی ایکس در حالت جریانی و حالت پالسی با استفاده از دیود نوری**، تحت راهنمایی **محمدرضا اشرف** متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های دیگر پژوهش گران، به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب این پایان نامه، تا کنون توسط خود، یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارایه نشده است.
- حقوق معنوی این اثر، به دانشگاه صنعتی شاهرود تعلق دارد، و مقالات مستخرج با نام “ دانشگاه صنعتی شاهرود “ یا “ Shahrood University of Technology “ به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آوردن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده اند، در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در تمام مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در تمام مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته (یا استفاده شده است)، اصل رازداری و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

امیررضا موسی زاده مقدم

بهمن ۱۳۹۹

مالکیت نتایج و حق نشر

- تمام حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی، در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در این پایان نامه بدون ذکر منبع مجاز نمی باشد.

چکیده

آشکارسازی تابش‌های پرانرژی از جمله X و گاما برای مدت‌ها بخش مهمی از تحقیقات را به خود اختصاص داده است، زیرا تابش‌های پرانرژی سبب تخریب و جهش ژنتیکی در بافت‌های بدن انسان می‌شوند. پس باید تا جایی که امکان دارد مقدار آن‌ها را به حداقل رساند. این آشکارسازها میزان تشعشع رادیواکتیو را در محیط‌های مختلف به خصوص در محیط‌های تشخیصی-درمانی مانند اتاق‌های تصویربرداری، اندازه‌گیری می‌کنند. برای اندازه‌گیری میزان پرتو زایی محیط، اولین وسیله‌ای که در نظر می‌آید شمارشگر گایگر است. از جمله مشکلات آن کمیاب بودن، گران قیمت بودن و ولتاژ کاری بسیار بالای آن‌ها است. در این پایان‌نامه ابتدا به بررسی آشکارسازهای مبتنی بر دیودنوری پرداخته شده، سپس سه نمونه مدار آشکارساز تابش X مبتنی بر دیود نوری در حالت پالسی به همراه یک نمونه مدار حالت جریانی برای اندازه‌گیری نرخ دز تحلیل، شبیه‌سازی و ساخته شده است. در نهایت آشکارسازهای حالت پالسی برای کاربردهای مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

آشکارسازهای حالت پالسی دوم و سوم دارای ساختارهای پیش تقویت‌کننده با امپدانس بازخورد بوده در حالی که اولین آشکارساز ساختاری متفاوت در پیش تقویت‌کننده دارد. همچنین این سه آشکارساز در تعداد طبقات تغییر شکل دهنده متفاوت هستند. با مقایسه مشخصات الکترونیکی آن‌ها از جمله بهره تبدیلی، دوره پالس و توان تلفاتی می‌توان گفت آشکارساز دوم با بهره تبدیلی $66/75$ دسی‌بل، بزرگترین دامنه را در اختیار دارد. همچنین نسبت سیگنال به نویز در آشکارساز اول به اندازه $78/16$ dB بوده که در مقایسه با دو آشکارساز دیگر نویز کمتری را تولید می‌کند. آشکارساز دوم و سوم به دلیل داشتن دوره زمانی به ترتیب 12 و $8/2$ میکروثانیه، عملکرد بهتری در نرخ‌های بالای شمارش دارند. آشکارساز اول با توان تلفاتی $36/6$ میلی‌وات، کمترین مصرف انرژی را در میان سایرین داشته و به دلیل ساختار ساده، هزینه ساخت کمتری دارد. همچنین طبق آزمایش‌ها، آشکارسازهای حالت پالسی دوم و سوم به حداقل انرژی مورد آزمایش یعنی $59/54$ keV واکنش خوبی نشان می‌دهند و دامنه پالس‌های خروجی قابل تمییزی از نویز دارند. مدار اول به این انرژی حساسیت زیادی نشان نداده و برای این بازه از انرژی مناسب نیست. نتایج مدار چهارم (حالت جریانی) نشان می‌دهد که دز معادل در بازه 30 تا 800 میکرو سیورت بر ساعت، رابطه مستقیمی با ولتاژ اندازه‌گیری شده از آشکارساز دارد. در این تحقیق عملکرد دیودهای نوری انتخاب شده، قبل از انجام هر گونه شبیه‌سازی و آزمایش عملی، به وسیله روش SMART بررسی می‌شود. با استفاده از این روش، دیودهای S1223-01، BPV10، BPW34، S186P، PH320، PD438C و BPV23NF به ترتیب در رتبه‌های اول تا هفتم جهت استفاده به عنوان یک حسگر ارزان قیمت در سامانه آشکارساز، قرار می‌گیرند.

کلمات کلیدی: تابش‌های پرانرژی، تابش X، تابش گاما، دیودنوری PIN، حالت پالسی.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

1. A. R. Mousazadeh, M. Kafaei, M. R. Ashraf, "Ranking of commercial photodiodes in radiation detection using multiple-attribute decision making approach," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol.987, pp.164839, 2020.

فهرست مطالب

ق	فهرست شکل‌ها
ذ	فهرست جدول‌ها
۱	۱ مقدمه
۲	۱-۱ هدف
۳	۲-۱ مدار جلویی سامانه آشکارساز
۴	۳-۱ پیشینه تحقیق
۶	۴-۱ ساخت سامانه آشکارساز
۷	۵-۱ فصل بندی پایان نامه
۹	۲ مبانی نظری و مفاهیم پایه
۱۰	۱-۲ مقدمه
۱۰	۲-۲ تابش X
۱۱	۱-۲-۲ تاریخچه
۱۱	۲-۲-۲ خواص تابش X
۱۲	۳-۲-۲ راه‌های تولید تابش X
۱۲	۱-۳-۲-۲ تولید از طریق الکترون‌ها
۱۳	۲-۳-۲-۲ تولید به روش یون‌های پرسرعت مثبت
۱۴	۳-۲ آشکارسازی تابش‌های پرانرژی
۱۴	۱-۳-۲ بررسی اجمالی نمودار بلوکی سامانه
۱۵	۲-۳-۲ بلوک حس‌گر
۱۵	۱-۲-۳-۲ انواع حس‌گرهای آشکارساز
۱۶	۲-۲-۳-۲ حس‌گرهای گازی
۱۷	۳-۲-۳-۲ حس‌گرهای حالت جامد نیمه‌هادی
۱۸	۴-۲-۳-۲ حالات مختلف عملکرد حس‌گرهای نیمه‌هادی

۲۰	۵-۲-۳-۲ مدل سازی حس گرهای نیمه هادی
۲۲	۳-۳-۲ بلوک پیش تقویت کننده
۲۳	۱-۳-۳-۲ انواع پیش تقویت کننده ها بر اساس عملکرد
۲۵	۴-۳-۲ بلوک شکل دهنده پالس
۲۵	۱-۴-۳-۲ شکل دهنده CR-RC
۲۷	۲-۴-۳-۲ عوامل انتخاب ثابت زمانی
۲۸	۳-۴-۳-۲ شکل پالس خروجی به عنوان پالس گوسی
۲۸	۵-۳-۲ بلوک دیجیتال
۳۱	۳ مروری بر ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش
۳۲	۱-۳ مقدمه
۳۲	۲-۳ حس گرهای دیود نوری
۳۲	۱-۲-۳ دزسنجی تابش گاما در حالت جریانی
۳۵	۲-۲-۳ قابلیت دزسنجی دیود نوری در کاربردهای پرتوشناسی
۳۷	۳-۲-۳ مقایسه حس گرها
۳۸	۳-۳ آشکارسازهای حالت پالسی
۳۸	۱-۳-۳ اندازه گیری تابش گاما با دیود نوری
۴۰	۲-۳-۳ تابش سنج رادیواکتیو
۴۲	۳-۳-۳ محافظ تابش سنج رادیواکتیو
۴۴	۴-۳-۳ دیود نوری PIN برای اندازه گیری تابش گاما
۴۶	۵-۳-۳ سامانه ارزان قیمت شناسایی رادون
۴۹	۶-۳-۳ ساخت و آزمایش آشکارساز تابش گاما
۵۲	۷-۳-۳ دستگاه تصویربرداری ارزان قیمت تابش X
۵۵	۸-۳-۳ مقایسه مدارهای حالت پالسی
۵۷	۴-۳ آشکارسازهای حالت جریانی
۵۷	۱-۴-۳ سامانه دزسنجی جدید برای پرتوشناسی تشخیصی
۶۰	۲-۴-۳ بهینه سازی انرژی در سامانه آشکارساز حالت جریانی
۶۲	۳-۴-۳ مقایسه مدارهای حالت پالسی
۶۳	۴ ساخت آشکارساز
۶۴	۱-۴ مقدمه
۶۴	۲-۴ آشکارسازهای تجاری
۶۴	۱-۲-۴ طیف سنجی چشمه های مجهول
۶۶	۳-۴ سامانه آشکارساز

۶۶	۱-۳-۴ حس‌گرهای انتخابی
	۱-۳-۴-۱ تکنیک‌های نوین در تصمیم‌گیری‌های چند شاخصه
۶۷	(MADM)
۷۲	۲-۳-۴ مدار اول
۷۳	۱-۲-۳-۴ عملکرد مدار و قطعات انتخابی
۷۷	۲-۲-۳-۴ شبیه‌سازی طبقات
۷۸	۳-۳-۴ مدار دوم
۷۸	۱-۳-۳-۴ عملکرد مدار و قطعات انتخابی
۸۳	۲-۳-۳-۴ شبیه‌سازی طبقات
۸۴	۴-۳-۴ مدار سوم
۸۴	۱-۴-۳-۴ عملکرد مدار و قطعات انتخابی
۸۷	۲-۴-۳-۴ شبیه‌سازی طبقات
۸۸	۵-۳-۴ مدار چهارم
۸۸	۱-۵-۳-۴ عملکرد مدار و قطعات انتخابی
۹۰	۶-۳-۴ مدار دیجیتال
۹۰	۱-۶-۳-۴ بلوک مقایسه‌گر
۹۱	۲-۶-۳-۴ برد کنترلی
۹۲	۳-۶-۳-۴ مازول بلوتوث
۹۲	۴-۶-۳-۴ تلفن هوشمند

۹۳	۵ نتایج و پیشنهادها
۹۴	۱-۵ مقدمه
۹۴	۲-۵ مدل سازی دیود نوری PIN
۹۴	۳-۵ مدل آزمایشگاهی
۹۵	۴-۵ نتایج
۹۵	۱-۴-۵ نتایج تحلیل نظری
۹۵	۲-۴-۵ نتایج شبیه‌سازی
۱۰۰	۳-۴-۵ نتایج ساخت
۱۰۹	۵-۵ تحلیل ساختارها و بحث در خصوص نتایج
۱۰۹	۱-۵-۵ طبقه حس‌گر
۱۱۰	۲-۵-۵ طبقه پیش‌تقویت‌کننده
۱۱۲	۳-۵-۵ طبقات شکل‌دهنده پالس
۱۱۳	۴-۵-۵ جمع بندی
۱۱۴	۶-۵ نتیجه‌گیری

۱۱۵	۷-۵ پیشنهادها
۱۱۷	الف عملکرد و ساختار آشکارساز تجاری شرکت نوین طیف
۱۱۹	الف-۱ طیف سنجی با آشکارساز تجاری شرکت نوین طیف
۱۲۰	الف-۲ راهنمای استفاده از دستگاه HVMCA مدل NT-124
۱۲۱	الف-۳ طیف سنجی امواج پس زمینه
۱۲۲	الف-۴ تنظیم دستگاه
۱۲۵	ب مفاهیم برنامه نویسی اندروید و میکروکنترلرها
۱۲۶	ب-۱ میکروکنترلر
۱۲۶	ب-۲ برنامه نویسی آردوینو
۱۲۶	ب-۳ سیستم عامل اندروید
۱۲۷	ب-۴ توضیحات برنامه آشکارساز رادیواکتیویته
۱۲۹	مراجع

فهرست شکل‌ها

- ۱-۱ بلوک‌های تشکیل دهنده سامانه آشکارساز ۳
- ۱-۲ تصویر دست همسر روننگن در سال ۱۸۹۶ ۱۲
- ۲-۲ عملکرد سامانه آشکارساز: تابش در حس گر جذب شده و به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌شود. این سیگنال در پیش تقویت کننده به سیگنال ولتاژی تبدیل شده و بعد از تغییر شکل توسط واحد تغییر شکل دهنده پالس، دیجیتال شده و برای ذخیره سازی و تجزیه و تحلیل آماده می‌شود ۱۵
- ۳-۲ تصویر اجزاء درونی آشکارساز گایگر-مولر ۱۷
- ۴-۲ عناصر ساختاریافته و ساختارنیافته سیلیکون بی شکل ۱۸
- ۵-۲ آشکارساز مبدل مستقیم، مقطع عرضی دیود نوری PIN ۱۸
- ۶-۲ (الف) اندازه گیری جریان خروجی حس گر با آمپرسنج، (ب) مجموعه ای از سلسله فتون های برخوردی ۱۹
- ۷-۲ آرایش حس گر-پیش تقویت کننده، (الف) مدار معادل حس گر و پیش تقویت کننده قبل از اتصال، (ب) مدار معادل حس گر و پیش تقویت کننده بعد از اتصال ۲۰
- ۸-۲ اثر اندازه ثابت زمانی مدار خارجی بر جریان ایجاد شده از دیود نوری، (الف) جریان خروجی فرضی دیود نوری، (ب) ولتاژ دوسر مقاومت بار در ثابت زمانی های کوچک، (ج) ولتاژ دوسر مقاومت بار در ثابت زمانی های بزرگ ۲۱
- ۹-۲ اثر اندازه ثابت زمانی مدار خارجی بر جریان ایجاد شده از دیود نوری، (الف) ساختار حساس به ولتاژ، (ب) ساختار حساس به بار ۲۴
- ۱۰-۲ (الف) سیگنال دنباله دار ایجاد شده از پیش تقویت کننده، (ب) سیگنال مطلوب برای کاهش اثر انباشتگی ۲۶
- ۱۱-۲ شبکه تغییر شکل دهنده متشکل از دو طبقه مشتق گیر و انتگرال گیر ۲۶
- ۱۲-۲ پاسخ ورودی پله شبکه CR-RC برای ترکیب های مختلف τ_1 و τ_2 در زمان صفر. محور زمان و ثابت زمانی ها هم واحد هستند ۲۷
- ۱۳-۲ نمودار بلوکی ساده یک سامانه طیف سنجی انرژی مبتنی بر MCA همراه با شکل موج هر طبقه ۲۹

۳۳	۱-۳ نمودار بلوکی الکترومتر سفارشی
۳۳	۲-۳ (الف) رابطه بین جریان ناشی از تابش برخوردی و نرخ دز ، (ب) رابطه بین بار انباشته شده و کل دز جذب شده (در نرخ دز ۶۷ Gy/h)
۳۴	۳-۳ (الف) محفظه قرارگیری دیود نوری به همراه کابل اتصال ، (ب) محفظه دیود نوری در حالت باز شده
۳۵	۴-۳ (الف) پاسخ Kerma هوا به منبع سزیم ۱۳۷ ، (ب) پاسخ Kerma هوا به منبع کبالت ۶۰
۳۶	۵-۳ ضریب تنظیم دیودهای نوری به عنوان تابعی از انرژی تابش
۳۷	۶-۳ مدار تقویت کننده
۳۸	۷-۳ نسخه اولیه مدار ساخته شده
۳۹	۸-۳ (الف) خروجی در حالت خاموش ، (ب) خروجی منبع ساعت رادیومی در ۳۰ ثانیه ، (ج) خروجی منبع ماده معدنی حاوی اورانیوم در ۳۰ ثانیه
۴۰	۹-۳ مدار تقویت کننده
۴۱	۱۰-۳ (الف) تک پالس ، (ب) ترکیبی از نویز و سیگنال مطلوب
۴۲	۱۱-۳ طیف سنجی تابش گاما با استفاده از حس گر BPX61
۴۲	۱۲-۳ (الف) محافظت حس گر از نور با ورق آلومینیومی ، (ب) حفاظت مدار از نویز و نور با ورق آلومینیومی
۴۳	۱۳-۳ استفاده از قوطی فلزی برای محافظت از نور مرئی و اغتشاشات خارجی
۴۳	۱۴-۳ (الف) پیش تقویت کننده مبتنی بر FET ، (ب) تقویت کننده راه انداز سه طبقه
۴۵	۱۵-۳ (الف) طیف انرژی عنصر Ta ، (ب) طیف انرژی عنصر Am
۴۶	۱۶-۳ شمایی از یک ردیاب رادون
۴۷	۱۷-۳ (الف) پیش تقویت کننده ترانس امپدانس ، (ب) شکل دهنده پالس
۴۸	۱۸-۳ اندازه گیری رادون توسط کنترل کننده های موجود در زیرزمین ساختمان
۴۸	ITU در مدت ۱۲ روز
۵۰	۱۹-۳ مدار آشکارساز
۵۰	۲۰-۳ مدار چاپی سامانه آشکارساز
۵۱	۲۱-۳ نمودار بلوکی سامانه آشکارساز
۵۱	۲۲-۳ (الف) آزمایش گاما با منبعی به شدت ۴۲ میلی کوری و انرژی ۳۳۰ keV ، (ب) آزمایش گاما با منبعی به شدت ۱ میکروکوری و انرژی ۶۰ keV
۵۱	۲۳-۳ اطلاعات طیفی رسم شده در لب ویو
۵۲	۲۴-۳ طرح کلی مدار پیش تقویت کننده همراه با دیود نوری
۵۳	۲۵-۳ طرح کلی مدار تغییر شکل دهنده پالس
۵۴	۲۶-۳ مقایسه طیف اندازه گیری شده و شبیه سازی شده برای انرژی های مختلف
۵۴	۲۷-۳ سامانه تصویربرداری

- ۲۸-۳ تصویر گرفته شده از ساعت با استفاده از تابش X . تعداد گام های افقی ۲۲۹
- ۵۵ و عمودی ۲۰۰ عدد است
- ۵۷ ۲۹-۳ نمودار بلوکی سامانه دزسنجی PIN
- ۵۸ ۳۰-۳ طرح کلی مدار آنالوگ
- ۳۱-۳ (الف) نمودار Kerma هوا بر حسب زمان تابش برای دزسنج ساخته شده و استاندارد ، (ب) حساسیت دزسنج ساخته شده بر حسب دز اندازه گیری شده ، (ج) حساسیت دزسنج ساخته شده بر حسب انرژی فوتون اندازه گیری شده برای سه جریان مختلف تیوب ۵۹
- ۳۲-۳ مدار آشکارساز حالت جریانی برای اندازه گیری دز تابش X با استفاده از دیود نوری سیلیکونی ۶۰
- ۳۳-۳ رابطه خطی بین ولتاژ خروجی سامانه و نرخ دز ۶۱
- ۳۴-۳ پاسخ عملی و شبیه سازی انرژی نسبی دیود نوری در حالت های بدون فیلتر و با فیلتر ۶۲
- ۴-۱ طیف چشمه مجهول توری گازی، حاوی توریم - ۲۳۲ ۶۵
- ۴-۲ طیف چشمه مجهول آشکارساز دود حاوی آمرسیوم- ۲۴۱ ۶۶
- ۴-۳ نمودار بلوکی روش SMART ۶۸
- ۴-۴ نمودار میله ای اولویت بندی حس گر ها بر اساس روش SMART ۷۱
- ۴-۵ نمودار میله ای اولویت بندی حس گر ها بر اساس روش SMART بدون در نظر گرفتن شاخص قیمت ۷۲
- ۴-۶ طرح کلی مدار شماره یک ۷۲
- ۴-۷ طرح کلی طبقه اول مدار شماره یک ۷۴
- ۴-۸ طرح کلی طبقه دوم مدار شماره یک ۷۵
- ۴-۹ طرح کلی طبقه سوم و چهارم مدار شماره یک ۷۶
- ۴-۱۰ پاسخ فرکانسی طبقه سوم و چهارم شکل ۴-۶ در حالت تحلیل نظری، شبیه سازی و ساخت ۷۷
- ۴-۱۱ طرح کلی مدار شماره دو ۷۸
- ۴-۱۲ طرح کلی طبقه اول مدار شماره دو ۷۹
- ۴-۱۳ مدار معادل دو طبقه حس گر و پیش تقویت کننده ۸۱
- ۴-۱۴ طرح کلی طبقه دوم مدار شماره دو ۸۱
- ۴-۱۵ طرح کلی طبقات سوم تا پنجم مدار شماره دو ۸۲
- ۴-۱۶ پاسخ فرکانسی طبقه دوم شکل ۴-۱۱ در حالت تحلیل نظری، تحلیل نظری اصلاح شده، شبیه سازی و ساخت ۸۳

۱۷-۴	پاسخ فرکانسی طبقه سوم شکل ۴-۱۱ در حالت تحلیل نظری، شبیه‌سازی و ساخت	۸۴
۱۸-۴	پاسخ فرکانسی طبقه چهارم و پنجم شکل ۴-۱۱ در حالت تحلیل نظری، شبیه‌سازی و ساخت	۸۴
۱۹-۴	طرح کلی مدار شماره سه	۸۵
۲۰-۴	پاسخ فرکانسی طبقه سوم شکل ۴-۱۹ در حالت تحلیل نظری، شبیه‌سازی و ساخت	۸۷
۲۱-۴	پاسخ فرکانسی طبقه چهارم و پنجم شکل ۴-۱۹ در حالت تحلیل نظری، شبیه‌سازی و ساخت	۸۸
۲۲-۴	طرح کلی مدار شماره چهار (حالت جریانی)	۸۹
۲۳-۴	مقایسه بهره تحلیل نظری و شبیه‌سازی	۸۹
۲۴-۴	نمودار بلوکی پیشنهادی قسمت دیجیتال سامانه آشکارساز	۹۰
۲۵-۴	(الف) صفحه ابتدایی نرم‌افزار آشکارساز رادیواکتیویته ، (ب) صفحه درباره ما نرم‌افزار آشکارساز رادیواکتیویته ، (ج) صفحه نمایش داده‌ها نرم‌افزار آشکارساز رادیواکتیویته ، (د) صفحه تنظیمات بلوتوث نرم‌افزار آشکارساز رادیواکتیویته	۹۲
۱-۵	مدل دیود نوری برای شبیه‌سازی برخورد تابش X	۹۴
۲-۵	(الف) قسمت دیجیتال سامانه همراه با قاب ، (ب) قسمت دیجیتال سامانه بدون قاب ، (ج) قسمت‌های آنالوگ و دیجیتال سامانه آشکارساز همراه با پوشش ضد نور	۹۶
۳-۵	شکل موج مدل شده، برای شبیه‌سازی تابش یونیزان در حوزه زمان	۹۷
۴-۵	(الف) شبیه‌سازی شکل موج خروجی مدار اول (حالت پالسی) ، (ب) شبیه‌سازی شکل موج خروجی مدار دوم (حالت پالسی) ، (ج) شبیه‌سازی شکل موج خروجی مدار سوم (حالت پالسی)	۹۸
۵-۵	شبیه‌سازی توان نویز خروجی آشکارسازهای اول، دوم و سوم	۹۹
۶-۵	(الف) مدار ساخته شده اول ، (ب) مدار ساخته شده دوم ، (ج) مدار ساخته شده سوم و (د) مدار ساخته شده چهارم	۱۰۰
۷-۵	پاسخ (الف) مدار شماره یک ، (ب) مدار شماره دو ، (ج) مدار شماره سه به منبع توریم-۲۳۲ با حس‌گر S1223-01	۱۰۱
۸-۵	پاسخ مدار شماره یک با حس‌گر BPW34 به (الف) منبع توریم-۲۳۲ و (ب) منبع آمرسیوم-۲۴۱	۱۰۲
۹-۵	پاسخ مدار شماره دو با حس‌گر BPW34 به (الف) منبع توریم-۲۳۲ و (ب) منبع آمرسیوم-۲۴۱	۱۰۳

- ۵-۱۰ پاسخ مدار شماره سه با حس‌گر BPW34 به (الف) منبع توریم-۲۳۲ و (ب) منبع آمرسیوم-۲۴۱ ۱۰۳
- ۵-۱۱ پاسخ (الف) مدار شماره یک ، (ب) مدار شماره دو ، (ج) مدار شماره سه در سه دمای ۵، ۲۷ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد ۱۰۳
- ۵-۱۲ پاسخ مدار شماره یک با حس‌گرهای (الف) S1223-01 ، (ب) BPV10 ، (ج) BPW34 ، (د) S186P ، (ه) PD438C ، (و) PH320 و (ز) BPV23NF به منبع آمرسیوم-۲۴۱ ۱۰۵
- ۵-۱۳ پاسخ مدار شماره یک با استفاده از حس‌گر PD438C برای منبع (الف) آمرسیوم-۲۴۱ ($59/54\text{keV}$) ، (ب) سزیم-۱۳۷ ($661/7\text{keV}$) ، (ج) کبالت-۶۰ ($1332/5\text{keV}$) ۱۰۶
- ۵-۱۴ پاسخ مدار حالت جریانی (حالت جریانی) با حس‌گر S1223-01 به دستگاه پرتونگاری دندان XGENUS در فواصل مختلف ۱۰۸
- ۵-۱۵ تنظیم مدار حالت جریانی با دزسنج تجاری RAD DIGI 3000C ۱۰۸
- ۵-۱۶ تأثیر خازن بازخورد، در ورودی پیش‌تقویت‌کننده ۱۱۱
- الف-۱ تقویت‌کننده آشکارساز HVMCA ۱۱۸
- الف-۲ حس‌گر سوسوزن یدور سزیم (CSI) مدل NT-811 شرکت نوین ۱۱۸
- الف-۳ نمودار بلوکی آشکارساز سوسوزن ۱۲۰
- الف-۴ طیف‌سنجی تابشهای پس‌زمینه ۱۲۲
- الف-۵ تنظیم دستگاه با چشمه سزیم-۱۳۷ ۱۲۳
- الف-۶ تنظیم دستگاه با چشمه سزیم-۱۳۷ و کبالت-۶۰ ۱۲۴

فهرست جدول‌ها

۳۶	۱-۳	نتایج آزمون تکرارپذیری و تجدیدپذیری
۴۵	۲-۳	مقایسه آشکارساز نیمه هادی و لوله گایگر
۶۵	۱-۴	انرژی‌های حاصل از زنجیره نابودی توریم-۲۳۲
۶۶	۲-۴	انرژی‌های حاصل از زنجیره نابودی آمرسیوم-۲۴۱
۶۷	۳-۴	مقایسه ویژگی‌های حس‌گرهای انتخابی
۶۹	۴-۴	بیش‌ترین و کم‌ترین نرخ شاخص‌ها
۷۰	۵-۴	سطح‌بندی شاخص‌ها توسط تصمیم‌گیرنده
۷۰	۶-۴	رتبه‌بندی شاخص‌های حسگرها
۷۰	۷-۴	وزن مؤثر محاسبه شده برای حسگرها در هر شاخص
۷۱	۸-۴	وزن نرمال شاخص‌های حسگرها
۷۱	۹-۴	وزن نهایی حسگرها و اولویت‌بندی آن‌ها بر اساس وزن بدست آمده
۹۱	۱۰-۴	مشخصات آردوینو Pro Mini
۹۱	۱۱-۴	مشخصات ماژول بلوتوث HC05
۱۰۰	۱-۵	مقایسه نتایج شبیه‌سازی مدارهای اول، دوم و سوم
۱۰۴	۲-۵	مقایسه نتایج عملی آشکارسازهای اول، دوم و سوم
	۳-۵	مقایسه بهره تبدیلی بدست آمده از تحلیل نظری، شبیه‌سازی و آزمایش عملی
۱۰۶		عملی
۱۰۷	۴-۵	نتایج حاصل از آزمایش مدار چهارم در فواصل مختلف از تیوب تابش X
۱۱۸	الف-۱	مشخصات تقویت‌کننده آشکارساز شرکت نوین طیف

فصل ١

مقدمه

اخيراً تحقیقات نشان داده است که دیودهای نوری سیلیکونی PIN در حوزه آشکارسازی پرتوهای یونیزان، به خصوص در پزشکی کاربردهایی دارند. به همین جهت از این دیودها برای ساخت آشکارساز ارزان قیمت تابش X در این پایان نامه استفاده شده است. این آشکارسازها به صورت الکترونیکی، این تابش یونیزان را شناسایی می کنند.

۱-۱ هدف

در این پژوهش هدف، ساخت مدار آشکارساز الکترونیکی تابش X مبتنی بر دیودنوری، در حالت جریانی و حالت پالسی بوده و کاربرد آن برای آزمایش دیودهای نوری مختلف، جهت پی بردن به عملکرد و بازدهی آنها برای آزمون های دزسنجی^۱ و حفاظت پزشکی است. حالت پالسی به منظور اندازه گیری تک فوتون های موجود در مکان هایی بوده که تعداد این تابش کم است، علت این امر، تشخیص تابش های نرخ پایین بوده که به عنوان یک جنبه مهم در حفاظت پیشگیرانه از زندگی انسان است. حالت جریانی به منظور اندازه گیری میزان تشعشعات در مکان هایی بوده که تعداد زیادی از تابش های پرانرژی وجود دارند. این امر موجب جلوگیری از ایجاد خطرات احتمالی برای کاربر دستگاه های مولد تابش X در بیمارستان ها یا مراکز پژوهشی که با این قبیل تابش های پرانرژی به وفور سروکار دارند، خواهد شد.

در این تحقیق سه نمونه ساختار پالسی و یک نمونه ساختار جریانی برای آشکارسازی تابش های یونیزان از جمله X و گاما ساخته شده است. با مقایسه نتایج ساختارهای حالت پالسی برای هفت نمونه دیودنوری به عنوان حس گر، بهترین ساختار و حس گر جهت کاربردهای دزسنجی، تصویربرداری و ... معرفی می شود. ساختارهای حالت پالسی عموماً در پیش تقویت کننده با یکدیگر متفاوت هستند.

در پیشنهاد این تحقیق، آشکارسازی تابش هایی با انرژی پایین عنوان شده بود. همچنین حد پایین 20 keV و حد بالای 60 keV ، با یک تقریب اولیه برای دیود نوری با ضخامت سیلیکون مشخص ([۱])، با توجه به مراجع [۲] و [۳] تعیین شده بود. پس از شروع تحقیقات و جست و جو بیش تر، پیدا کردن منابعی با انرژی کمتر از 60 keV در عمل بسیار دشوار بود. سپس با تحقیقات بیش تر معلوم شد که در برخی از کاربردها مانند [۴]، انرژی های کمتر از 70 keV هم جزء تابش های کم انرژی X محسوب می شوند. منبع ^{241}Am انرژی معادل $59/54\text{ keV}$ دارد که در آشکارسازهای دود یافت می شود. با توجه به توضیحات فوق، کم ترین انرژی استفاده شده در این پایان نامه برای آزمایش سامانه، $59/54\text{ keV}$ است. همچنین انرژی های بالاتر توسط منابع موجود در آزمایشگاه هسته ای تا انرژی $1332/5\text{ keV}$ ، برای آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است.

^۱Dosimeter

۱-۲ مدار جلویی سامانه آشکارساز

قسمت‌های مختلف این دستگاه به صورت نمودار بلوکی در شکل ۱-۱ آمده است. ابتدا تابش X با برخورد به حس گر، پالس الکتریکی تولید کرده، این پالس توسط پیش تقویت کننده تقویت، سپس با اعمال تغییراتی روی شکل پالس، تعداد آن شمرده و طیف آن رسم می‌شود [۵]، [۶].

حس گر: حس گرها معمولاً دو ساختار مستقیم و غیر مستقیم دارند که در حالت غیرمستقیم فوتون‌های نوری به وسیله جرقه زن^۱ متناسب با تابش جذب شده تولید می‌گردند. سپس ضرب کننده نوری (PMT)^۲، سیگنالی جریانی را متناسب با فوتون‌های ورودی ایجاد می‌کند. اما در حالت مستقیم تابش فرودی مستقیماً به بار الکتریکی یا جریان تبدیل می‌شود. دو نمونه از حس گرهایی که به صورت مستقیم عمل می‌کنند، حس گر گایگر-مولر و دیودهای نوری حالت جامد می‌باشند. لوله گایگر-مولر^۳ دارای محیطی از حجم گاز بوده که وقتی تابش‌های پرانرژی به آن برخورد می‌کنند، آن را یونیزه کرده و یون‌های مثبت و منفی ایجاد شده و جذب الکترودهای دو سمت لوله که تحت یک میدان خارجی قرار دارند، می‌شوند. در نهایت جریانی متناسب با تابش فرودی به وجود می‌آید. حس گر دیودنوری یک دیود PIN در بایاس معکوس بوده که با برخورد فوتون‌های پر انرژی به صفحه حساس آن، زوج الکترون-حفره تولید می‌شود. این حامل‌ها در پایانه‌های دو طرف دیودنوری ایجاد بار الکتریکی یا جریان می‌کنند [۵]، [۶].

پیش تقویت کننده: در این بلوک معمولاً از یک تقویت کننده جریان با بهره تبدیلی بالا استفاده می‌شود. بار حاصل از دیود نوری بسیار ضعیف است (به ازاء هر کیلو الکترون ولت، ۵۰ آتو کولن و در انرژی‌های بالا تا ۴ فمتو کولن بار تولید می‌شود). در نتیجه باید پیش تقویت کننده دارای نسبت سیگنال به نویز (SNR)^۴ زیاد باشد [۵]، [۶].

شکل دهنده پالس: خروجی پیش تقویت کننده، پالسی با میرایی نمایی طولانی بوده که به آن پالس دنباله دار می‌گویند. در نرخ‌های بالای شمارش که تعداد برخورد فوتون‌های فرودی در زمان‌های کوتاه بسیار زیاد است، احتمال از دست دادن شمارش تعدادی از این فوتون‌ها



شکل ۱-۱: بلوک‌های تشکیل دهنده سامانه آشکارساز

¹Scintillator

²PhotoMultiPlier

³Geiger Muller (G-M) tube

⁴Signal to noise ratio

وجود دارد. همچنین نویزهای فرکانس بالا تأثیر مخربی بر اندازه‌گیری سامانه الکترونیکی وارد می‌کنند. برای غلبه بر این مشکلات، از بلوک شکل‌دهنده پالس که شامل طبقات مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر بوده، استفاده شده است [۵، ۶].

۳-۱ پیشینه تحقیق

در سال ۱۸۹۵، درخشش کوتاه صفحه فسفرساختی^۱ که در گوشه‌ای از آزمایشگاه نیمه تاریک بررسی تابش کاتدی قرار داشت، ذهن آماده و خلاق رنتگن^۲ که در آن زمان استاد فیزیک بود را متوجه تابش‌های تازه‌ای نمود که از حباب شیشه‌ای لامپ‌های کاتدی بیرون زده و بی آنکه به چشم دیده شود به اطراف پراکنده می‌شد. آنچه مایه شگفتی رنتگن شده بود، نفوذ این تابش‌ها از دیواره شیشه‌ای لامپ به بیرون و تأثیر آن روی صفحه فلئورسانت^۳ در گوشه‌ای نسبتاً دور از لامپ، در آزمایشگاه بود. رنتگن به بررسی‌های خود درباره کشف تازه که آن را تابش X نامید، ادامه داد. بعدها این تابش، رنتگن نامیده شد.

اولین بار در سال ۲۰۱۱ در مقاله‌ای تحت عنوان «اندازه‌گیری تابش‌های گاما با دیود نوری» در مجله الکتور [۷] به صورت رسمی مداری ساده جهت اندازه‌گیری تابش گاما با استفاده از دیود نوری BPW34 ارائه شد و مزایای آن نسبت به لوله گایگر-مولر که تا آن زمان مرجع اصلی آشکارساز تابش‌های پرنرژی بود، بررسی شد. از معایب مدار ارائه شده، عدم نمایش سطح کلی تابش بود. بعد از آن ساختار جدیدی ارائه شد [۸] که در این ساختار قسمت آنالوگ مدار بهبود یافت و در قسمت دیجیتال از میکروکنترلر ATmega88 به عنوان شمارشگر استفاده شد. سپس در ادامه این موضوع، مطلبی جهت افزایش محافظت مدار از نور مرئی و همچنین افزایش حساسیت مدار به تابش‌های پرنرژی منتشر شد [۹].

مرجع [۱] در سال ۲۰۱۲، دیود نوری تجاری BPW34 را به جای لوله گایگر-مولر، برای سنجش تابش‌های پرنرژی مانند گاما در حالت‌های شمارش و طیف‌سنجی قرار داد. در مرحله بعدی، یک نمونه مدار الکترونیکی جهت اندازه‌گیری تابش جذب شده توسط دیود نوری تشریح شد. نتایج حاصل نشان‌دهنده آن است که برای منبع ^{137}Cs با مقدار فعالیت ۵۵/۵ کیلو بکرل، وقتی حس‌گر در فاصله ۱۵ سانتی‌متری از منبع قرار دارد در مدت‌زمان ۳۳۰ ثانیه، ۲۷۵ شمارش ثبت می‌شود. این اعداد نشان می‌دهند که علاوه بر کاهش ولتاژ کاری به اندازه ۸ تا ۸/۶۷ برابر و کاهش ابعاد دیود نوری نسبت به لوله گایگر به اندازه ۶/۲۷ برابر، این حس‌گر می‌تواند جایگزین قابل اطمینانی برای لوله گایگر در کاربردهای مختلف باشد.

بایراک^۴ در سال ۲۰۱۳ یک آشکارساز کم هزینه رادون با استفاده از دیود نوری PS100-7

¹Phosphorescent

²W. Röntgen

³Fluorescent

⁴A. Bayrak

CER-2 برای پیش‌بینی زلزله ساخته است [۱۰]. پنجره شیشه‌ای این حس‌گر برای جذب بهتر تابش، شکسته شده است. در زمان شمارش، میزان فشار، رطوبت و دما محیط اندازه‌گیری می‌شود، چرا که میان این پارامترها و سطح تشخیص رادون همبستگی وجود دارد. این دستگاه‌ها می‌توانند به منظور نظارت بر فعالیت‌های رادون در زیرزمین ساختمان‌ها، غارها، تونل‌ها، معادن و ایستگاه‌های مترو بدون هیچ‌گونه تغییری مورد استفاده قرار گیرند. آن‌ها همچنین می‌توانند به سامانه گردش هوا در ساختمان‌ها برای نظارت بر کیفیت هوا متصل شوند.

مرجع [۱۱] یک سامانه دزسنجی تابش گاما حالت‌جریانی را معرفی کرد. در این دزسنج از دیودهای نوری تجاری BPW34، S1223-01، PS100.6 به‌عنوان حس‌گر و الکترومتر با بازه خودکار برای اندازه‌گیری پاسخ دیودهای نوری به تابش‌های جذب‌شده، استفاده شده است. این تحقیق به بررسی پنج نمونه آزمایشی مختلف می‌پردازد. سه نمونه اول در حالتی است که سه دیود نوری به‌صورت مجزا از یکدیگر تحت تابش گاما قرار گرفته‌اند. در دو نمونه بعدی به ترتیب دو و چهار حس‌گر BPW34 به‌صورت موازی بسته شده و به‌عنوان گیرنده تابش گاما استفاده شده‌اند. در این مقاله ^{60}Co به عنوان منبع تابش گاما به کار رفته است. نتایج کلی نشان می‌دهد که هرچه تعداد دیودهای نوری بیش‌تری در ساختار موازی قرار گیرند سطح مقطع حساس به تابش افزایش می‌یابد، یعنی در برخوردی بیش‌تر، زوج الکترون-حفره بیش‌تری تولید می‌شود، پس فوتون‌های بیش‌تری از تابش‌های پرنرژی قابل رهگیری خواهند شد. البته در مقابل، جریان ناشی مجموع حس‌گرهای موازی شده افزایش می‌یابد.

رودریگز تحقیقات پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد خود را بر روی ساخت دستگاه کم‌هزینه آشکارساز تابش گاما قرار داد [۱۲]. تابش گاما توسط دیود نوری جذب، سپس به‌وسیله سه طبقه پیش‌تقویت‌کننده، فیلتر بالاگذر یا مشتق‌گیر و فیلتر پایین‌گذر یا انتگرال‌گیر آشکار می‌شود. در مرحله بعدی اطلاعات توسط یک میکروکنترلر دیجیتال شده و از آن به واسطه ماژول Xbee pro900 به صورت بی‌سیم به نرم‌افزار لب‌ویو در رایانه منتقل خواهد شد. درنهایت با برنامه نویسی نمودار طیفی محاسبه شده و به iPad منتقل و نمایش داده می‌شود.

در مرجع [۱۳] یک سامانه دزسنجی حالت‌جریانی کوچک با استفاده از یک دیود نوری تجاری قابل دسترس مانند BPW34 برای آزمایش پرتوشناسی^۱ تشخیصی، در سال ۲۰۱۶ پیاده‌سازی شد. حداقل دز قابل تشخیص ۱۰ میکروگری^۲ با عدم اطمینان ۲۰ درصد است. این سامانه دزسنجی دارای مزایای حساسیت مناسب، هزینه پایین و قابلیت حمل آسان است. این سامانه می‌تواند جایگزینی برای سامانه دزسنجی غیرفعال مانند دزسنج نورتابی حرارتی^۳، در پرتوشناسی تشخیصی استفاده شود. در قسمت نتیجه‌گیری، برای بهبود عملکرد سامانه پیشنهادی دزسنجی، بررسی ویژگی‌های دقیق دیودهای نوری PIN، اثرات نویز حرارتی، تزویج

^۱Radiology^۲ μGy ^۳Thermoluminescence

خازنی، پاسخ فرکانسی سامانه آنالوگ و تأثیر تابش‌های پرانرژی بر دیود نوری پیشنهاد شده است.

مرجع [۱۴] عملکرد چند دیود نوری از جمله BPW34 را برای استفاده به عنوان آشکارسازهای تابش در حفاظت رادیویی بررسی کرد. در این تحقیق برمبنای معیارهای حداقل محدوده حساس ۵ میلی‌متر مربعی، حداقل نیم‌زاویه 60° درجه و حداقل هزینه، چهار دیود نوری تجاری BPW34، SFH206، FH205، BPX90 برای ارزیابی انتخاب شده‌اند. همچنین میزان حساسیت (بازدهی) دیود نوری به تابش X و گاما، میزان خطینگی و تکرار پذیری آن‌ها در $kerma^1$ هوا مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که از میان چهار دیودنوری، دیودنوری BPW34 بهترین انتخاب بوده، زیرا تغییرات تست تکرارپذیری آن کمتر از ۶/۱ درصد است و همچنین دارای حساسیت بالا در جذب تابش است. این امر به دلیل ناحیه ذاتی بزرگتر است. با توجه به وابستگی انرژی، وابستگی بیش‌تر در محدوده ۳۳ تا ۱۰۰ کیلو الکترون‌ولت صورت گرفته است.

در مرجع [۲] یک دستگاه تصویربرداری تابش X، با استفاده از چندین دیود نوری BPW34 طراحی و ساخته شد. حس‌گرها توسط یک واحد کنترل موقعیت مکانی دوبعدی در مقابل هدف حرکت داده شدند. بخش آنالوگ از یک پیش‌تقویت‌کننده حساس به بار و شکل‌دهنده پالس و همچنین بخش دیجیتال از یک پردازنده مدل AES220B و رایانه استفاده شد. اندازه‌گیری‌ها نشان دادند که سطح نویز مدار الکترونیکی برای تابش‌های X تقریباً برابر ۵ کیلو الکترون‌ولت است.

هدف تحقیق مرجع [۱۵]، بررسی وجود پاسخ مناسب در یک بازه وسیع انرژی برای آشکارسازهای گاما مبتنی بر دیود نوری در حالت جریانی است. در این مقاله یک دیود سیلیکون PIN با استفاده از کد مونت کارلو FLUKA شبیه‌سازی شد. از این کد برای شناسایی یک فیلتر کامپوزیتی که دارای دو یا چند فلز بدون سوراخ می‌باشد، استفاده شده است. هدف این امر ایجاد پاسخ انرژی مسطح در نمودار دز جذب شده توسط دیود است. انرژی فوتون‌های تابشی در محدوده 60 keV تا 1250 keV است. این نتایج به صورت تجربی، تأیید شد و سودمندی دیود برای تشخیص تابش گاما و نظارت بر طیف گسترده‌ای از انرژی‌ها مورد اثبات قرار گرفت. نرخ دز اندازه‌گیری شده با این سامانه در بازه $2/631\text{ mGy/h}$ تا $23/679\text{ Gy/h}$ است.

۴-۱ ساخت سامانه آشکارساز

برای اندازه‌گیری تابش‌های یونیزان محیط، اولین وسیله‌ای که در نظر می‌آید لوله گایگر-مولر بوده که از جمله مشکلات این دستگاه‌ها کم‌یاب، حجیم و گران‌قیمت بودن آن‌ها است. حتی اگر یکی از آن‌ها تهیه شود، بزرگترین مشکلی که به‌وجود می‌آید، ایجاد یک ولتاژ در

¹kinetic energy released per unit mass

مقیاس صدها ولت است. ابعاد دیودهای نوری چندین برابر کوچکتر از لوله گایگر است و این درحالیست که حساسیت و وضوح آن به مراتب بیش‌تر بوده و این امر سبب شده تا دستگاه اندازه‌گیری، سبک و قابل حمل شود. از دیگر مزایای دیودهای نوری، تبدیل مستقیم تابش یونیزان به بار الکتریکی است. به عبارت دیگر، خروجی این قبیل حس‌گرها جریان یا بار الکتریکی است. با توجه به مطالب فوق، ساخت آشکارساز تابش‌های یونیزان با هزینه پایین‌تر، حساسیت بالاتر و ابعاد کوچکتر مدنظر است.

با بررسی تحقیقاتی که در گذشته صورت گرفته، ساختارهای مختلفی در مدار سامانه آشکارسازهای مبتنی بر دیود نوری دیده می‌شود. هدف این تحقیق همانطور که در اول فصل گفته‌شد، ساخت مدار آشکارساز الکترونیکی تابش X مبتنی بر دیود نوری است. برای این منظور، سه نمونه ساختار مداری متداولی که در تحقیقات مختلف علمی و تجربی از جمله کاینکا ۲۰۱۱ [۷، ۸، ۱۶]، رودریگز ۲۰۱۴ [۱۲] و امیرهان ۲۰۱۶ [۲] استفاده شده و دیگر ساختارها مشابهت زیادی با آن‌ها دارند، بررسی شده است. این تحقیقات از سه ساختار متفاوت پیش‌تقویت‌کننده با طبقات مختلف، استفاده کرده‌اند که هرکدام برتری نسبت به دیگری دارد. طبقات مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر در بلوک تغییر شکل‌دهنده تقریباً یکسان بوده است. 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 X آورده شده است. ضرورت و انگیزه انجام این تحقیق پی‌بردن به بهترین ساختار از میان ساختارهای انتخابی، و از همه مهم‌تر ساخت سامانه آشکارساز با هدف بومی‌سازی و رونق تولید داخلی به تاکید مقام معظم رهبری (مد ظله العالی) است.

۵-۱ فصل بندی پایان نامه

در فصل دوم این پژوهش به شرح و تفسیر بلوک‌های تشکیل دهنده سامانه آشکارساز و بررسی سازوکار الکترونیکی هر بخش پرداخته شده است. در فصل سوم پیشینه تحقیق پیش‌رو در قالب خلاصه مقالات و پایان‌نامه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. فصل چهارم مربوط به ساخت سامانه آشکارساز تابش‌های پرانرژی است که در فصل پنجم نتایج آن مورد بحث قرار خواهد گرفت.

فصل ۲

مبانی نظری و مفاهیم پایه

۲-۱ مقدمه

تابش X^1 از سال ۱۸۹۵ به صورت گسترده در کاربردهای صنعت، فن‌آوری غیرمخرب، تشخیص پزشکی و ... مورد استفاده قرار می‌گرفت. امروزه به واسطه مدارهای مجتمع دستگاه‌هایی با ابعاد کوچکتر، چگالی بیش‌تر و دقت بالاتر عرضه شده‌اند [۱۷].

با گسترش روزافزون رادیوگرافی، سیستم بایگانی دیجیتال و شبکه، روش‌های گوناگونی برای دیجیتالی کردن تصاویر پزشکی مورد توجه قرار گرفته‌است. رادیوگرافی دیجیتال پیشرفت مهمی در تابش X است و از محاسن آن می‌توان به بازده بالا، دز پایین، قرار گرفتن کم‌تر در معرض تشعشع و کیفیت بالای تصویر اشاره کرد. به همین منظور آشکارسازهای الکترونیکی جای خود را به آشکارسازهای سنتی دادند و فن‌آوری آن‌ها روزبه‌روز در حال پیشرفت است [۱۸].

در بسیاری از مواقع از فن‌آوری MOS^۲ به دلایل مختلفی چون توان مصرفی پایین و سرعت زیاد در ساخت مدارات مجتمع استفاده می‌شود. از آن‌جا که در کاربردهای امروزه به‌ویژه آشکارسازها، مجتمع سازی الکترونیک دیجیتال کم‌توان در کنار سیگنال‌های آنالوگ از ملزومات طراحی است، این فن‌آوری به خوبی خواسته‌های صنعت را برآورده کرده است [۱۷].

۲-۲ تابش X

تابش X یا تابش رونتگن^۳، نوعی از تابش الکترومغناطیسی با طول موج حدود ۰/۱ تا ۱۰ نانومتر معادل با ۳۰ پتاهرتز تا ۳۰ اگراهرتز^۴ و انرژی بین ۱۰۰ الکترون‌ولت تا ۱۰۰ کیلوالکترون‌ولت است. طول موج تابش X از طول موج تابش فرابنفش پایین‌تر و از طول موج تابش گاما بالاتر است. نام دیگر تابش X ، تابش رونتگن است، که برگرفته از نام ویلهلم رونتگن، کاشف آن است. علت نام‌گذاری تابش X توسط رونتگن، کشف یک نوع تابش ناشناخته بود [۱۹].

به تابش X با فوتون‌های پرانرژی‌تر (بالای ۵ یا ۱۰ کیلو الکترون‌ولت و با طول موج ۰/۱ تا ۰/۲ نانومتر) تابش X سخت و تابش‌های با انرژی پایین‌تر را تابش X نرم می‌گویند. به دلیل توان نفوذ بالای تابش X سخت، از آن برای تصویربرداری از داخل اجسام، مانند پرتونگاری از اعضای بدن و همچنین قسمت امنیت فرودگاه‌ها و به عنوان یکی از روش‌های تست غیرمخرب در تشخیص نقص‌های موجود در اشیا استفاده می‌شود [۲۰].

این دیدگاه تعریف تابش X از دید فیزیک اتم مولکولی است. از دیدگاه فیزیک هسته‌ای و ذرات، تابش‌های پرانرژی دو نوع منشأ دارند: همه تابش‌هایی که منشأ آن‌ها از واکنش‌های

¹ X-ray

² Metal oxide semiconductor

³ Rontgen radation

⁴ 3×10^{16} - 3×10^{19} Hertz

درون هسته باشد، تابش گاما و اگر منشأ آن‌ها از واکنش‌های خارج هسته باشد، تابش X می‌گویند. این امر بدون توجه به انرژی تابش است. به همین دلیل نمی‌توان از روی انرژی، اختلافی بین تابش X و گاما قائل شد.

تابش گاما اولین بار توسط هنری بکرل^۱ فیزیک‌دان فرانسوی در سال ۱۸۹۶ کشف شد. تابش گاما تابشی بسیار یونیزان بوده و نوعی از تابش الکترومغناطیسی با طول موج کم‌تر از ۱۰ پیکومتر (فرکانس بیش‌تر از ۳۰ اگراهرتز) است. انرژی این ذرات تقریباً ۱۰۰۰۰ مرتبه بزرگ‌تر از نور مرئی در طیف امواج الکترومغناطیس است. این امواج بدون جرم و بدون مشخصات الکتریکی بوده و صرفاً یک انرژی الکترومغناطیسی هستند [۱۲].

۱-۲-۲ تاریخچه

در پاییز ۱۸۹۵، رونتگن، فیزیک‌دان آلمانی در دانشگاه ورزبورگ، هنگام آزمایش با تابش‌های کاندی از لوله‌ای که دور آن را کاغذ سیاه پیچیده و هوای داخل آن را کاملاً تخلیه کرده بود، جریان برق گذراند و متوجه شد زمانی که لوله را با ولتاژ بالا تحریک می‌کند، بلورهای روی میز می‌درخشند و تابش‌های عامل این فلوئورسانت از مواد جامد عبور می‌کنند. او پس از چند روز اولین عکس تابش X را به صورت اتفاقی از دست همسر خود گرفت که انگشت او به خوبی در عکس مشخص است (شکل ۱-۲) [۲۱].

ظرف چند هفته، خبر کشف وی به همه کشورهای پیشرفته رسید. پیش از کشف رونتگن، پژوهشگران آمریکایی نیز به طور اتفاقی یک تصویر تابش رونتگن گرفته بودند، اما علت آن را نمی‌دانستند. پس از چند ماه، گرفتن تصاویر تابش رونتگن پزشکی در بسیاری از نقاط جهان رایج شد. در ماه مه ۱۸۹۶، اولین مجله پزشکی درباره تابش رونتگن در بریتانیا چاپ شد [۲۱]. این گمان که تابش‌های X، امواج الکترومغناطیس با طول موج بسیار کوتاه هستند، به کمک یک آزمایش پراش دوگانه که در سال ۱۹۰۶ توسط بارکلا^۲ انجام گرفت، تأیید شد. سپس اثبات قطعی ماهیت موجی تابش X در سال ۱۹۱۲ به وسیله فون لائو^۳ ارائه شد.

رونتگن ویژگی‌های این تابش یونیزان را به طور کامل بررسی کرد. او در پاسخ به این پرسش که «چگونه به کشف تابش‌های جدید فکر کرده‌اید؟» پاسخ داد: «فکر نکردم، تحقیق کردم.» پژوهش‌های او بسیاری از مسائل پایه‌ای فیزیک تابش‌های رونتگن را حل کرد [۲۱].

۲-۲-۲ خواص تابش X

فوتون‌های تابش X دارای انرژی لازم برای یونیزه کردن اتم‌ها و شکستن پیوند اتمی هستند. این خاصیت تابش X را در طبقه‌بندی تابش‌های یونیزه‌کننده قرار می‌دهد و به

¹H. Becquerel

²C.G Barkela

³M. Von Laue



شکل ۱-۲: تصویر دست همسر روننگن در سال ۱۸۹۶ [۲۱]

همین دلیل برای بافت‌های زنده مضر است. قرار گرفتن در معرض مقادیر بالای دز تابش در یک دوره زمانی کم، باعث ایجاد بیماری‌های حاصل از تشعشع می‌شود و در عین حال قرار گرفتن در معرض پایین دز تابش، خطر ابتلا به سرطان‌های ناشی از تشعشع را بالا می‌برد. در تصویربرداری پزشکی این افزایش خطر ابتلا به سرطان در مقابل فواید استفاده از این روش برای تشخیص پزشکی، قابل چشم‌پوشی است. از قابلیت یونیزه کردن تابش X می‌توان در درمان سرطان استفاده کرد که در این روش پرتودرمانی از تابش X برای از بین بردن سلول‌های بدخیم سرطانی استفاده می‌شود. همچنین از طیف‌سنجی تابش X برای تعیین خصوصیات مواد استفاده می‌شود.

تابش X سخت می‌تواند با جذب یا پراکندگی کمتر، از اشیاء ضخیم عبور کند. به همین دلیل از تابش X سخت برای تصویربرداری از داخل اشیاء استفاده می‌شود. کاربردهای دیگر آن عبارتند از رادیوگرافی پزشکی و اسکنرهای امنیتی فرودگاه‌ها. در عین حال از روش مشابه در صنعت (برای مثال رادیوگرافی صنعتی و سی تی اسکن صنعتی) و همچنین تحقیقات (برای مثال سی تی اسکن حیوانات کوچک) استفاده می‌شود. عمق نفوذ تابش X با تغییر فرکانس آن تغییر می‌کند. این موضوع تنظیم انرژی فوتون برای کاربردهای مختلف را امکان‌پذیر می‌کند.

۳-۲-۲ راه‌های تولید تابش X

هر زمان که ذرات باردار (الکترون‌ها یا یون) با انرژی کافی به مواد برخورد نمایند، تابش X تولید می‌شوند. در ادامه به توضیح دو روش برای تولید تابش X پرداخته شده است.

۱-۳-۲-۲ تولید از طریق الکترون‌ها

در این روش از تولید تابش X، از تیوب تابش X استفاده می‌شود که این تیوب یک لوله تحت خلأ است که در آن به الکترون‌های تولیدی توسط یک کاند داغ شتاب داده شده تا به سرعت

بالا برسند. الکترون‌های با سرعت بالا پس از برخورد به مانع فلزی که همان آند است، تابش X را ایجاد می‌نمایند. در کاربردهای پزشکی مانع هدف در تیوب معمولاً از جنس تنگستن یا جنس آلیاژ مقاوم رنیوم (۵٪) - تنگستن (۹۵٪) است، ولی در برخی کاربردهای خاص مانند ماموگرافی که به تابش X نرم نیاز است، از مولیبدن^۱ استفاده می‌شود. در بلورنگاری^۲ استفاده از مانع هدف مسی بسیار معمول است و در برخی مواقع که فلورسنت موجود در آهن باعث اشکال می‌شود، از کبالت استفاده می‌شود. بیش‌ترین انرژی فوتون تابش X محدود به انرژی برخورد الکترون است، که برابر با ولتاژ شارژ شده در تیوب ضرب در بار الکترون است، پس در نتیجه یک تیوب ۸۰kV نمی‌تواند تابش X با انرژی بالاتر از ۸۰keV تولید نماید. زمانی که الکترون به هدف برخورد می‌کند، تابش X از طریق دو فرایند اتمی متفاوت ایجاد می‌شود که عبارتند از:

الف) تابش‌های X مشخصه^۳ (تشعشع تابش X)^۴: الکترون‌هایی که انرژی کافی دارند، با برخورد به الکترون‌های اتم فلز، آن‌ها را از جاذبه هسته خارج کرده و در نتیجه الکترون‌ها با انرژی بالاتر، جاهای خالی ایجاد شده را پر کرده و فوتون تابش X منتشر می‌شود. این فرایند باعث ایجاد طیف گسیلی تابش X در فرکانس‌های ناپیوسته می‌شود که بعضی اوقات به آن خط طیف نوری گفته می‌شود. این خطوط بر اساس جنس ماده هدف به کار رفته در فرایند، ایجاد می‌شوند [۲۱].

ب) تابش ترمزی: طبق معادلات ماکسول، هر بار شتاب دار، امواج الکترومغناطیس گسیل می‌کند. هرگاه یک ذره ی باردار از نزدیکی یک هسته عبور کند، بردار سرعت آن سریعاً تغییر می‌کند (لااقل از نظر جهت، یا از نظر اندازه)، به طوری که ذره دستخوش شتاب می‌شود و بنابراین تشعشع می‌کند. این نوع تابش X دارای طیف پیوسته است. شدت تابش X به‌طور خطی با کاهش فرکانس افزایش می‌یابد [۲۱].

هر دو روش تولید دارای بازده کم و نزدیک به یک درصد هستند و بیش‌تر انرژی الکتریکی مصرفی تیوب به صورت گرما هدر می‌رود. زمانی که تابش X قابل استفاده‌ای تولید می‌شود، باید در نظر داشت که تیوب تابش X طوری طراحی شود که این گرمای اضافی را پراکنده سازد [۲۱].

۲-۲-۳-۲ تولید به روش یون‌های پرسرعت مثبت

تابش X را می‌توان با استفاده از پروتون‌های پرسرعت یا یون‌های مثبت دیگر ایجاد نمود. تابش X حاصل از تحریک پروتون یا تابش X حاصل از ذرات تحریک شده، به‌طور گسترده به عنوان یک روش تحلیل مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۲].

¹Molybdenum

²Crystallography

³Characteristic X-ray emission

⁴X-ray fluorescence

۲-۳ آشکارسازی تابش‌های پرانرژی

این بخش به بررسی اجزاء سازنده یک آشکارساز تابش‌های پرانرژی می‌پردازد. در قسمت اول به بررسی بلوک حس‌گر و عملکرد آن و انواع حس‌گرهای موجود پرداخته شده و در ادامه به ساختار و فیزیک حس‌گرهای نیمه‌هادی اشاره شده است. در قسمت دوم با بررسی دیگر بلوک‌های تشکیل‌دهنده آشکارساز، روش‌های جمع‌آوری اطلاعات از سیگنال حاصل از خروجی حس‌گر مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۲-۳-۱ بررسی اجمالی نمودار بلوکی سامانه

شکل ۲-۲ اجزاء اساسی یک سامانه آشکارساز تابش‌های پرانرژی را نمایش می‌دهد. جزئیات هر قسمت در ادامه فصل مورد بحث قرار خواهد گرفت. خروجی تمام حس‌گرهای تابش پرانرژی، 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 [۵].

بارهای تشکیل‌شده در خروجی حس‌گر برای نمایش و دیجیتال شدن بسیار کوچک هستند. به همین دلیل جریان‌های گذرا حاصل از حس‌گر به تقویت‌کننده حساس به بار^۱ اعمال می‌شوند. خروجی تقویت‌کننده یک سیگنال پله بوده که متناسب با جریان ایجاد شده از برخورد فوتون‌ها به حس‌گر است. طبقه بعدی، شکل‌دهنده پالس نام دارد و از چندین طبقه فیلتر بالا و پایین گذر برای اندازه‌گیری راحت تر سیگنال الکتریکی تشکیل شده است. در این طبقه شکل موج‌های گوسی^۲ 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^۳ برگردد تا از ایجاد تداخل با پالس بعدی و خطا در اندازه‌گیری جلوگیری شود [۵]. در این مرحله سیگنال الکتریکی برای دیجیتال شدن آماده شده است. قبل از این کار می‌توان توسط یک مدار تفکیک‌کننده انتگرالی^۴ یا مقایسه‌گر، پالس‌هایی را انتخاب کرد که قله آن‌ها از یک حد آستانه بیش‌تر و یا کم‌تر باشند. پالس‌های انتخاب شده در نهایت دیجیتال می‌شوند. ساده‌ترین نوع مدار دیجیتال، یک شمارنده بوده که می‌توان تعداد پالس‌های موجود در یک محدوده زمانی خاص را شمارش کرد [۵].

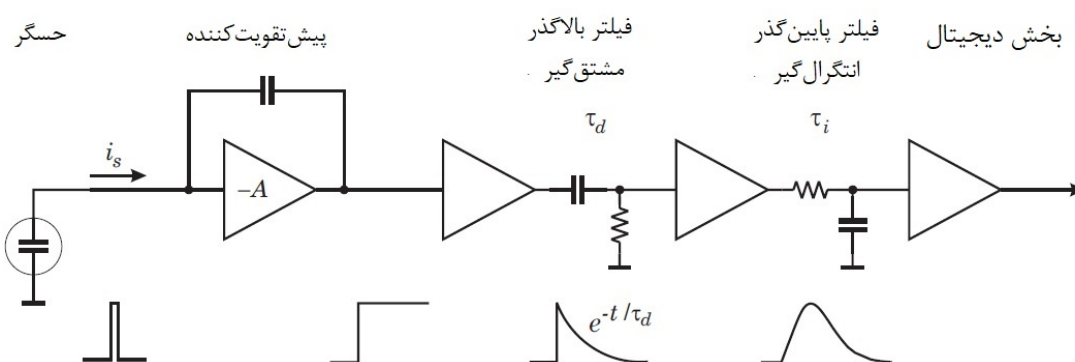
یکی از کاربردهای این آشکارسازها نمایش نمودار طیف انرژی فوتون‌های پرانرژی در یک زمان خاص می‌باشد. این نمودار را می‌توان با اندازه‌گیری انرژی هر فوتون برخوردی به روش

¹Charge sensitive amplifier

²Gaussian waveforms

³Baseline

⁴Integral discriminator



شکل ۲-۲: عملکرد سامانه آشکارساز: تابش در حس گر جذب شده و به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌شود. این سیگنال در پیش تقویت کننده به سیگنال ولتاژی تبدیل شده و بعد از تغییر شکل توسط واحد تغییر شکل دهنده پالس، دیجیتال شده و برای ذخیره سازی و تجزیه و تحلیل آماده می‌شود [۲۳]

فوق رسم کرد. [۵].

۲-۳-۲ بلوک حس گر

حس گرهای سیگنال جریانی را متناسب با فوتون برخوردی به ناحیه حساس آن‌ها ایجاد می‌کنند. بعضی از این مبدل‌های فوتون به سیگنال الکتریکی، دامنه خروجی مناسبی داشته^۱ و نیاز به پیش تقویت کننده در طبقه بعدی خود ندارند. اما برخی از آن‌ها مانند حس گرهای نیمه هادی دارای خروجی در مقیاس فمتوکولن هستند. در ادامه، انواع حس گرها و ساختمان داخلی آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد [۲۳].

۲-۳-۲-۱ انواع حس گرهای آشکارساز

آشکارساز تابش‌های پرانرژی وسیله‌ای برای آشکارسازی تابش‌های ناشی از واپاشی عناصر پرتوزا، تابش‌های کیهانی و شتاب دهنده ذرات است. آشکارسازهای امروزی علاوه بر تشخیص حضور تابش‌های پرانرژی، توانایی اندازه گیری خصوصیات این تابش‌ها از جمله طیف انرژی آن‌ها، زمان بندی نسبی بین برخوردها و موقعیت برخورد تابش‌ها با آشکارساز را دارند [۲۴]. در حالت کلی دو نوع حس گر تابش پرانرژی غیرفعال و فعال وجود دارد. آشکارسازهای غیرفعال برای آشکارسازی، به یک منبع انرژی خارجی نیاز ندارند، بلکه اطلاعات مربوط به ذرات فروودی را در طول دوره قرار گرفتن در معرض آن‌ها جمع آوری می‌کنند. نمونه‌هایی از آشکارسازهای تابشی غیرفعال عبارتند از: آشکارسازهای نورتابی حرارتی و آشکارسازهای ردیاب هسته‌ای^۲ [۲۴].

آشکارسازهای فعال برای آشکارسازی، به یک منبع انرژی خارجی نیاز دارند و می‌توان از

^۱ دامنه سیگنال خروجی آشکارساز گایگر بین ۱ تا ۱۰ ولت است.

^۲Nuclear track detectors

سیگنال خروجی تولید شده به صورت لحظه‌ای^۱ اطلاعات استخراج کرد. در میان آشکارسازهای فعال، آشکارسازهای گازی، آشکارسازهای نیمه‌هادی و آشکارسازهای جرقه‌زنی^۲ بیش‌ترین استفاده را در کاربردهای مختلف صنعتی، تصویربرداری پزشکی و فیزیک هسته‌ای دارند. هنگامی که تابش یونیزان با سطح مقطع حساس این حس‌گرها برخورد کند، یک پالس کوتاه جریانی به عنوان سیگنال الکتریکی در خروجی ظاهر می‌شود [۲۴].

۲-۲-۳-۲ حس‌گرهای گازی

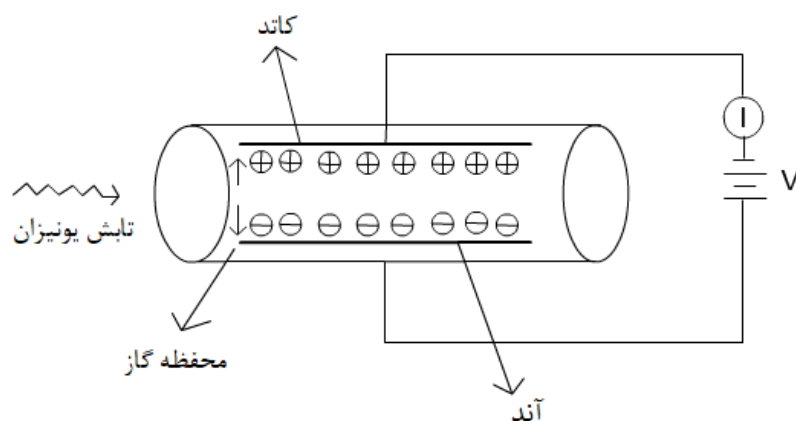
آشکارسازهای گازی از جمله مهم‌ترین و پرکاربردترین آشکارسازها محسوب می‌شوند. برای اولین بار در سال ۱۹۰۸ آشکارسازهای گازی برای آشکارسازی تابش توسط گایگر مولر در آزمایشگاه رادرفور استفاده شد و پس از آن برای آشکارسازی و سنجش تابش مورد استفاده قرار گرفت. آشکارساز گایگر-مولر (G-M) آشکارساز گایگر نیز نامیده می‌شود. این آشکارساز توانایی شمارش ذرات بنیادی و ذرات باردار را دارد. همچنین برای سنجش تابش X، گاما، ذرات آلفا و ذرات بتا نیز به کار می‌رود. آشکارساز گایگر از جمله آشکارسازهایی است که برای سنجش میزان آلودگی رادیواکتیو نیز استفاده می‌شود.

با توجه به شکل ۲-۳ مبانی کار بدین صورت است که زمانی که یک تابش یا ذره‌ی شتاب‌دار در حجم گاز وارد شود، یونیزه می‌شود. اگر اختلاف پتانسیلی بین دو الکترود برقرار باشد، میدان الکتریکی در گاز ایجاد شده و نیرویی از طرف میدان به یون‌ها وارد شده و یون‌های مثبت را به الکترود منفی و یون‌های منفی را به سمت الکترود مثبت هدایت می‌کند. حرکت یون‌ها منجر به تولید جریان الکتریکی لحظه‌ای می‌شود. جریان تولید شده به وسیله‌ی یک الکترومتر با حساسیت متوسط قابل اندازه‌گیری است. شدت جریان تولید شده به عواملی از جمله اختلاف پتانسیل الکترودها، فاصله‌ی دو الکترود، نوع گاز، حجم گاز، فشار و دمای گاز بستگی دارد که از بین این عوامل اختلاف پتانسیل بین دو الکترود مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در شدت جریان است. اگر ولتاژی بین دو الکترود برقرار نباشد، یون‌ها در محیط گازی ترکیب شده و اتم یا مولکول خنثی ایجاد خواهد شد و جریانی حاصل نمی‌شود. هر نوع گازی را می‌توان در آشکارسازهای گایگر استفاده کرد؛ البته همان‌طور که گفته شد نوع گاز نیز در سنجش و آشکارسازی ذرات با ایجاد جریان مؤثر است. در این آشکارسازها می‌توان از هوا و کلر برای آشکارسازی بهتر، در محیط محفظه گاز استفاده کرد.

از جمله مشکلات این دستگاه‌ها کم‌یاب، حجیم و گران‌قیمت بودن آن‌ها است. حتی اگر یکی از آن‌ها تهیه شود، بزرگترین مشکلی که به‌وجود می‌آید، ایجاد یک ولتاژ در ابعاد صدها ولت است. ابعاد دیودهای نوری چندین برابر کوچک‌تر از لوله گایگر است و این درحالیست که حساسیت و وضوح آن به مراتب بیش‌تر بوده و این امر سبب شده تا دستگاه اندازه‌گیری، سبک و قابل حمل شود [۱۴].

¹Real time

²Scintillation detectors



شکل ۲-۳: تصویر اجزاء درونی آشکارساز گایگر-مولر

۲-۳-۲ حس‌گرهای حالت جامد نیمه‌هادی

آشکارسازهای الکترونیکی تابش‌های پرانرژی به دو دسته تقسیم می‌شوند. این تقسیم‌بندی را می‌توان برای حس‌گرهای نیمه‌هادی هم بیان کرد:

الف) آشکارسازهای مبدل غیرمستقیم: در این نوع آشکارساز، تابش‌های پرانرژی ابتدا توسط جرقه‌زن یا سوسوزن^۱ به نور مرئی تبدیل شده، سپس در مرحله دیگر به بار الکتریکی تبدیل می‌شوند. معمولاً مرحله دوم نیز توسط عناصری مانند افزاره‌های بارجفت‌شده^۲ و یا عناصر بر پایه سیلیکون بی‌شکل (a-Si) صورت می‌گیرد [۲۵]. افزاره‌های بارجفت‌شده عناصری هستند که با برخورد فوتون به گیت آن‌ها، بار الکتریکی ایجاد می‌شود. سیلیکون بی‌شکل صفحه‌ای از فیلم نازک سیلیکونی و دیوده‌های نوری است. این عناصر به صورت ساختاریافته^۳ و ساختارنیافته^۴ وجود دارند (شکل ۲-۴)، که در حالت ساختاریافته فوتون‌های تولیدی جانبی کاهش یافته و این امر مانع از تارشدگی و ایجاد سایه در تصویر می‌شود [۲۵].

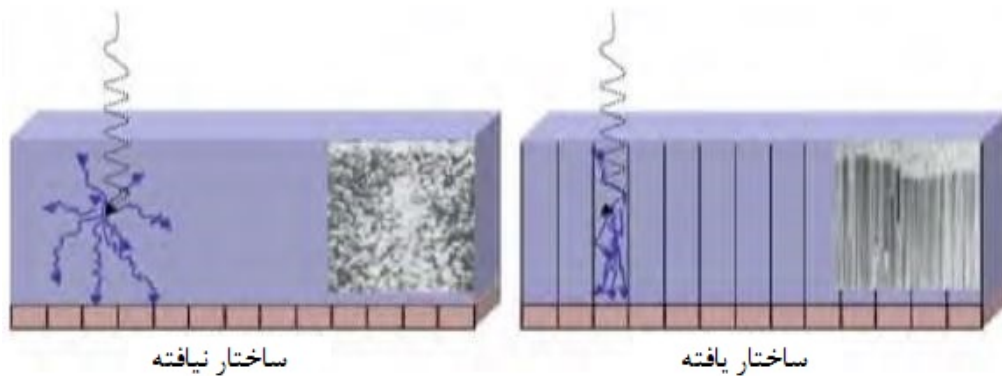
ب) آشکارسازهای مبدل مستقیم: در این نوع آشکارسازها، تابش‌های پرانرژی مستقیماً و بدون هیچ واسطه‌ای به بار الکتریکی تبدیل می‌شوند. معمولاً در این نوع آشکارسازها از عناصری مانند سلنیوم بی‌شکل (a-Se) استفاده شده است. ابتدا ساختار با اعمال پتانسیل الکتریکی نسبت به تابش پرانرژی حساس شده، سپس تابش پرانرژی با آن واکنش نشان داده و الکترون آزاد تولید می‌کند. این الکترون‌ها در مسیر میدان شروع به حرکت کرده و این امر سبب تفکیک هرچه بهتر در تصاویر حاصل از تصویربرداری تابش X می‌شود. دیوده‌های نوری PIN از این دسته آشکارسازها هستند (شکل ۲-۵) [۲۵].

^۱Scintillator

^۲Charge-coupled device(CCD)

^۳Structured

^۴Unstructured

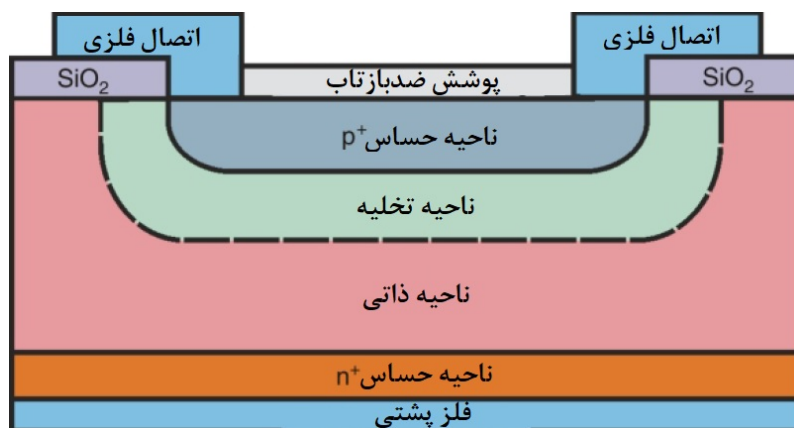


شکل ۲-۴: عناصر ساختاریافته و ساختارنیافته سیلیکون بی شکل [۲۵]

۴-۲-۳-۲ حالات مختلف عملکرد حس گرهای نیمه‌هادی

عموماً دو حالت برای اندازه‌گیری سیگنال خروجی حس گرهای نیمه‌هادی وجود دارد: حالت جریانی و حالت پالسی. معمولاً حالت پالسی بیش‌تر شناخته شده، ولی حالت جریانی در کاربردهای زیادی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۴، ۵].

حالت پالسی به حالتی گفته می‌شود که مدار الکترونیکی تنها تک فتون‌های برخوردی به ناحیه حساس را اندازه‌گیری می‌کند. در بسیاری از کاربردهای معمول، انتگرال زمانی جریان‌های تولید شده توسط سلسله ذرات برخوردی یا بار نهایی Q ، اندازه‌گیری می‌شود. میزان انرژی این ذرات مستقیماً به جریان تولید شده توسط هرکدام از ذرات بستگی دارد. حالت پالسی اطلاعات بیش‌تر و دقیق‌تری از دامنه و دوره سیگنال‌های جریانی حاصل از برخورد فتون‌ها را نسبت به حالت جریانی در اختیار قرار می‌دهد. درحالی که در برخوردهای نرخ زیاد که تعداد فتون‌های برخوردی در زمان، بسیار زیاد هستند، این حالت اندازه‌گیری غیر عملی و حتی غیرممکن است. در این شرایط زمان بین برخوردها بسیار کوتاه بوده، از این رو زمان کافی برای آشکارسدن توسط دیود نوری وجود ندارد. از دیگر مشکلات به‌وجود آمده آن است



شکل ۲-۵: آشکارساز مبدل مستقیم، مقطع عرضی دیود نوری PIN [۱۱]

که حتی اگر پالس‌ها بتوانند توسط دیود نوری آشکار شوند، ممکن است با یکدیگر همپوشانی زمانی داشته باشند [۵، ۲۴].

در حالت جریانی، جریان الکتریکی خروجی نیمه‌هادی با صرف نظر از ماهیت فتون برخوردی، به سادگی اندازه‌گیری می‌شود. در این حالت نمی‌توان اطلاعات زمانی و دامنه‌ای دقیقی از سیگنال خروجی حس‌گر بدست آورد اما در کاربردهای دزسنجی که تعداد فتون‌های برخوردی زیاد بوده که به دنبال آن نرخ برخورد افزایش می‌یابد، حالت جریانی عملکرد مناسب‌تری نسبت به حالت پالسی از خود نشان می‌دهد [۵].

انرژی لازم برای تولید یک زوج الکترون-حفره در افزاره‌های سیلیکونی برابر 3.6eV است. به عنوان مثال ^{241}Am دارای تک فوتون گاما با انرژی 59.54keV بوده که به اندازه 2.65fC بار تولید می‌کند [۱].

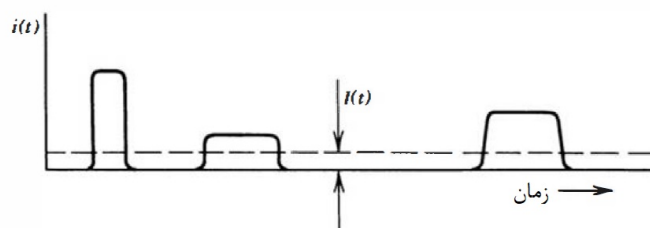
در شکل ۲-۶ (الف) جریان خروجی حس‌گر توسط آمپرسنج که مستقیماً به خروجی حس‌گر متصل شده، اندازه‌گیری شده است. اگر فرض کنیم که دستگاه اندازه‌گیری دارای پاسخ زمانی ثابت T باشد، پس سیگنال بدست آمده از دنباله برخوردها، یک جریان وابسته به زمان خواهد بود که توسط معادله ۱-۲ نشان داده شده است.

$$I(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t i(t') dt' \quad (1-2)$$

مدت زمان T در برابر زمان متوسط بین سیگنال‌های تولید شده از هر فتون، بسیار طولانی بوده بنابراین جریان اندازه‌گیری شده، متوسط جریان‌های حاصل از تعداد زیاد فتون‌های برخوردی



(الف)



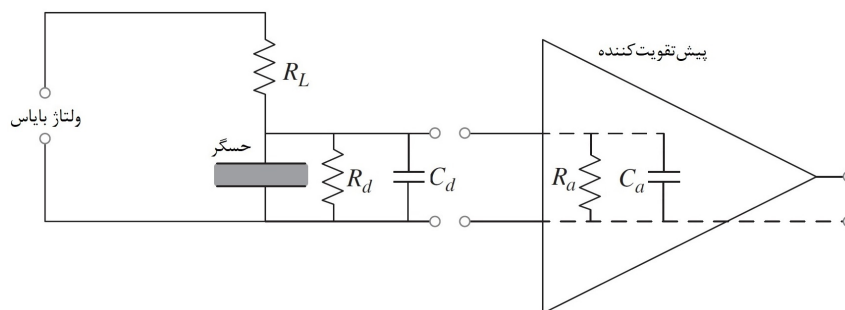
(ب)

شکل ۲-۶: (الف) اندازه‌گیری جریان خروجی حس‌گر با آمپرسنج، (ب) مجموعه‌ای از سلسله فتون‌های برخوردی [۵]

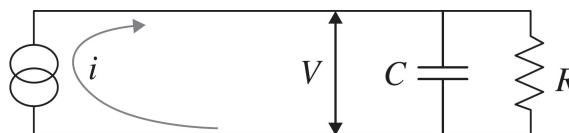
خواهد بود (شکل ۲-۶(ب)). اندازه این جریان به نرخ برخورد ذرات و میزان متوسط بار تولیدی در هر بار برخورد، بستگی دارد [۵].

۵-۲-۳-۲ مدل سازی حس گرهای نیمه هادی

همانطور که در بخش قبل اشاره شد، خروجی حس گرهای نیمه هادی سیگنال جریانی بوده و مانند یک منبع جریان عمل می کنند. شکل ۲-۷ مدار معادل حس گر و پیش تقویت کننده را قبل و بعد از اتصال نشان می دهد. با توجه به شکل ۲-۷(الف) مدار معادل دیود نوری شامل: منبع جریان، خازن پیوندی و مقاومت موازی^۱ است. منبع جریان، معادل جریان رانشی ایجاد شده توسط حامل های الکترون-حفره ای است که در اثر برخورد فتون ها با ناحیه ذاتی و عمل تولید و بازترکیب^۲ به وجود آمده اند. در حالت جریانی دیود نوری، در مدار معادل از منبع جریان مستقیم و در حالت پالسی از منبع جریان متناوب استفاده می شود. منظور از خازن پیوندی، ظرفیت ایجاد شده توسط ناحیه تخلیه دیود نوری بوده که با قرار گرفتن دیود نوری در ولتاژ معکوس، عرض این ناحیه افزایش پیدا کرده و ظرفیت خازن پیوندی (Cd) کاهش می یابد. مقاومت موازی نیز در اثر نشت جریان از طریق دیود نوری در اطراف لبه های قطعه و بین اتصالات قطب های مختلف ایجاد می شود. در یک دیود نوری ایده آل، مقدار این مقاومت بی نهایت خواهد بود و مسیر دیگری برای انتشار جریان ایجاد نخواهد شد. معمولاً این مقاومت در مسیر موازی با مقاومت بار قرار گرفته و به ولتاژ بایاس متصل می شوند. جریان



(الف)



(ب)

شکل ۲-۷: آرایش حس گر-پیش تقویت کننده، (الف) مدار معادل حس گر و پیش تقویت کننده قبل از اتصال، (ب) مدار معادل حس گر و پیش تقویت کننده بعد از اتصال [۲۴]

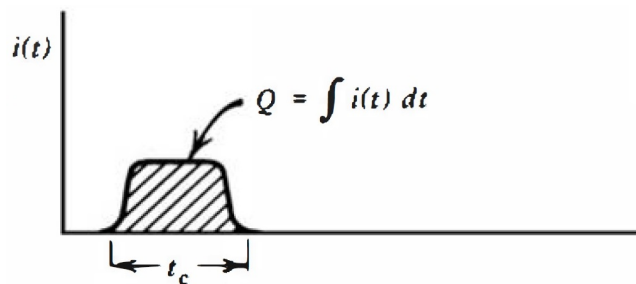
¹ Shunt Resistance

² Recombination-Generation

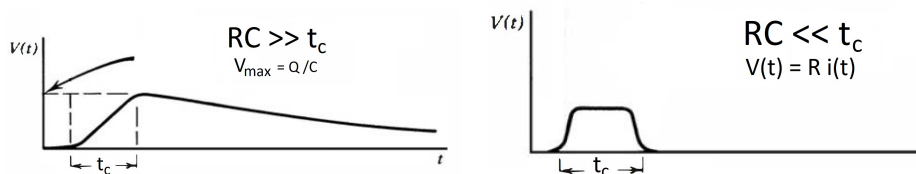
تولید شده توسط دیود نوری معمولاً با استفاده از پیش تقویت کننده اندازه‌گیری می‌شود [۲۴]. هر پیش تقویت کننده دارای مقاومت معادل ورودی R_a و خازن معادل ورودی C_a است (شکل ۲-۷ الف)). شکل ۲-۷ ب) مدار معادل دیود نوری و مدار اندازه‌گیری را پس از اتصال نشان می‌دهد. خازن معادل خازن‌های C_d و C_a که در وضعیت موازی با یکدیگر قرار دارند، با C و مقاومت معادل مقاومت‌های R_d و R_a که در وضعیت موازی با یکدیگر قرار دارند، با R نمایش داده شده است^۱. ولتاژ ایجاد شده دو سر مقاومت R بر اساس طول ثابت زمانی RC، دو شرایط مختلف را برای حالت پالسی ایجاد می‌کند [۲۴].

الف) RC کوچک ($\tau \ll t_c$) در این شرایط، ثابت زمانی مدار RC خارجی در برابر زمان جمع‌آوری بار (charge collection time)^۲ توسط دیود نوری بسیار کوچکتر بوده و جریان جاری شده در مقاومت معادل با جریان لحظه‌ای دیود نوری یکسان می‌شوند. با توجه به شکل ۲-۸ ب)، شکل ظاهری سیگنال V_t با سیگنال جریانی حاصل از دیود نوری (i_t) یکسان است. این سیگنال را پالس جریان^۳ گویند [۲۴]. معمولاً در زمان‌هایی که نرخ برخورد فوتون‌ها زیاد بوده و اندازه‌گیری زمان بین برخوردها مهم می‌شود، این حالت مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵].

ب) RC بزرگ ($\tau \gg t_c$) اگر ثابت زمانی مدار RC خارجی در برابر زمان جمع‌آوری بار توسط



(الف)



(ج)

(ب)

شکل ۲-۸: اثر اندازه ثابت زمانی مدار خارجی بر جریان ایجاد شده از دیود نوری، (الف) جریان خروجی فرضی دیود نوری، (ب) ولتاژ دوسر مقاومت بار در ثابت زمانی‌های کوچک، (ج) ولتاژ دوسر مقاومت بار در ثابت زمانی‌های بزرگ [۵]

^۱ امپدانس معادل در نظر گرفته شده، شامل امپدانس معادل خط انتقال بین دیود نوری و پیش تقویت کننده هم می‌شود.
^۲ t_c : به مدت زمان لازم برای رسیدن حامل‌های تولید شده ناحیه تهی دیود نوری، به الکترودها می‌گویند. این زمان بین

چند نانو ثانیه تا ده‌ها میلی ثانیه متغیر است.

^۳ Current pulse

دیود نوری بسیار بزرگتر باشد، مقدار کمی جریان از دیود نوری در مقاومت در زمان t_c جاری می‌شود و جریان دیود نوری به طور لحظه‌ای در خازن معادل ذخیره خواهد شد. در واقع امپدانس مدار خارجی از امپدانس مدار داخلی دیود نوری کمتر شده و جریان بیش‌تری روانه آن می‌شود [۵]. اگر زمان بین برخوردها به اندازه کافی بزرگ فرض شود، خازن در مقاومت معادل با ثابت زمانی τ تخلیه شده و ولتاژ دوسر مقاومت معادل ایجاد می‌شود. ولتاژ سیگنال مربوط به V_t در شکل ۲-۸ (ج) نشان داده شده و با معادله ۲-۲ توصیف می‌شود. Q_0 کل بار تولید شده در آشکارساز است. این سیگنال را پالس بار^۱ گویند [۲۴].

$$V(t) = \frac{Q_0}{C} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2-2)$$

از آنجا که مورد دوم به مراتب رایج‌ترین روش عملیات آشکارسازی در حالت پالسی است، نتایج مهمی می‌توان استنتاج کرد. اولاً آن که زمان لازم برای به حداکثر رسیدن مقدار سیگنال پالس، با زمان جمع‌آوری بار درون خود آشکارساز تعیین می‌شود و هیچ ویژگی از مدار خارجی یا بار، تأثیری بر زمان صعود پالس‌ها ندارد. به عبارت دیگر زمان میرایی پالس یا زمان لازم برای بازگرداندن ولتاژ سیگنال (V_t) به صفر، از طریق ثابت زمانی مدار خارجی و زمان صعود پالس V_t با ثابت زمانی خود آشکارساز تعیین می‌شود [۵]. ثانیاً از آنجا که مقدار خازن C به طور معمول ثابت بوده، می‌توان نتیجه گرفت که دامنه سیگنال به طور مستقیم با بار تولید شده در آشکارساز متناسب است:

$$V_{max} = \frac{Q_0}{C} \quad (2-3)$$

با توجه به اینکه کل بار تولید شده در دیود نوری، متناسب با انرژی ایجاد شده در آن بوده، معادله ۲-۳ به این معنی است که دامنه سیگنال پالس بار، متناسب با انرژی ایجاد شده در دیود نوری خواهد شد [۲۴].

۲-۳-۳ بلوک پیش‌تقویت‌کننده

به صورت معمول و با توجه به بخش‌های قبل، سیگنال خروجی همه حس‌گرها، از جنس بار است. در کاربرد تابش‌های پرانرژی، مقدار این بار بسیار کوچک بوده و ولتاژهای بسیار کوچکی تولید می‌کند. حس‌گر بار ایجاد شده را در خازن‌هایی که در مقابل خود می‌بیند، تخلیه می‌کند. این خازن‌ها می‌توانند خازن خروجی حس‌گر، کابل‌های ارتباطی و خازن ورودی مدار آشکارساز باشند [۵].

بهترین جایگاه برای قرار دادن پیش‌تقویت‌کننده در نزدیکی حس‌گر است. چرا که این امر از ظرفیت معادل خازن‌های دیده شده توسط حس‌گر می‌کاهد^۲ و نسبت سیگنال به نویز

^۱ Charge pulse

^۲ زیرا با کاهش طول مسیر ارتباطی، ظرفیت معادل مسیر کاهش و بار خازنی پیش‌تقویت‌کننده به حداقل می‌رسد.

(SNR) را افزایش می‌دهد [۵].

معمولاً طبقات بعدی پردازش را در فاصله دورتر از پیش تقویت کننده قرار می‌دهند؛ زیرا به دلیل خطر قرارگیری در معرض تابش، بهتر است اندازه‌گیری از فاصله دور انجام گیرد. به همین دلیل پیش تقویت کننده باید قابلیت ارسال سیگنال درون کابل بلند (که یک ظرفیت خازنی بزرگ ایجاد می‌کند) را داشته و امپدانس خروجی کوچکی داشته باشد [۵]. خروجی پیش تقویت کننده با کل بار ایجاد شده توسط دیود نوری (Q) متناسب است. در زمان‌های طولانی‌تر، پاسخ پیش تقویت کننده به یک پالس جریانی سریع، به شکل دنباله‌دار است. یک پالس دنباله‌دار^۱ رشد اولیه سریعی دارد و پس از یک میرایی نمایی بسیار طولانی به سطح پایه می‌رسد. دلیل وجود میرایی نمایی، مقاومتی است که به صورت موازی با خازن شبکه فیدبک بسته شده است. این امر (مقاومت موازی) به گونه‌ای ضروری است که پیش تقویت کننده بتواند به پالس‌های بعدی پاسخ دهد. خروجی پیش تقویت کننده تنها باید یک گام میانی در تولید یک خروجی قابل اندازه‌گیری در نظر گرفته شود [۵].

۲-۳-۱ انواع پیش تقویت کننده ها بر اساس عملکرد

دو نوع ساختار مختلف پیش تقویت کننده‌ها وجود دارد. پیش تقویت کننده‌های حساس به ولتاژ و پیش تقویت کننده‌های حساس به بار. نوع مرسوم‌تر آن در ساخت وسایل الکترونیکی، پیش تقویت کننده‌های حساس به ولتاژ است [۵].

۱. پیش تقویت کننده حساس به ولتاژ: تقویت کننده‌ای است که ورودی و خروجی آن ولتاژ بوده و با ضریبی که به آن بهره تقویت کننده گویند، سیگنال ورودی را به خروجی می‌برد^۲. این ساختار را می‌توان در شکل ۲-۹ (الف) مشاهده کرد. ولتاژ خروجی مدار برحسب ورودی آن با در نظر گرفتن بهره بزرگ پیش تقویت کننده (A) عبارت است از:

$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} V_{in} \quad A \gg \frac{R_2}{R_1} \quad (۴-۲)$$

در صورتی که ثابت زمانی ورودی مدار^۳ در مقایسه با زمان جمع‌آوری بار (t_c) بزرگ باشد، به عبارت دیگر امپدانس معادل مدار خارجی از امپدانس داخلی حس گر کوچکتر باشد (بخش ۲-۳-۲-۵)، ولتاژ ورودی برابر می‌شود با:

$$V_{max} = \frac{Q_{strike}}{C_{in}} \quad (۵-۲)$$

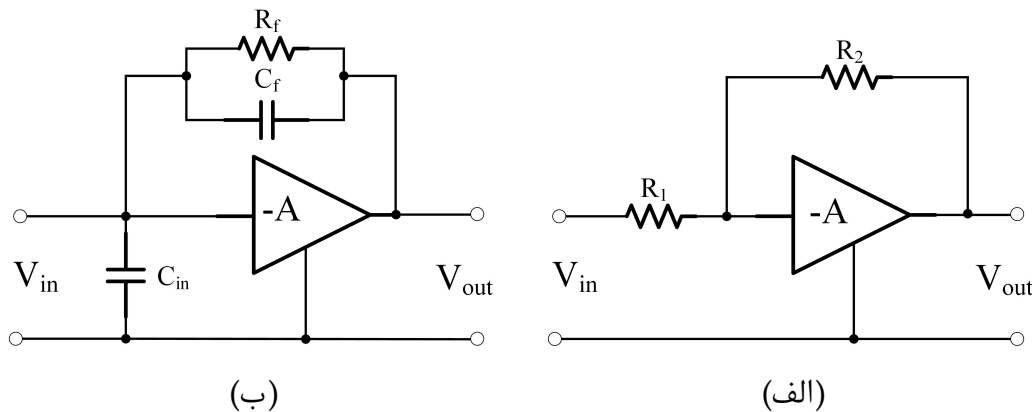
طبق این رابطه Q_{strike} بار معادل برخورد یک فوتون پرنرژی و C_{in} خازن معادل ظرفیت‌های خروجی حس گر، ورودی پیش تقویت کننده و خطوط ارتباطی است.

$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{Q_{strike}}{C_{in}} \quad A \gg \frac{R_2}{R_1} \quad (۶-۲)$$

^۱Tail pulse

^۲مقدار بهره عددی بزرگتر از ۱ است.

^۳ منظور از ثابت زمانی، ترکیب موازی خازن و مقاومت ورودی پیش تقویت کننده است.



شکل ۲-۹: اثر اندازه ثابت زمانی مدار خارجی بر جریان ایجاد شده از دیود نوری، (الف) ساختار حساس به ولتاژ، (ب) ساختار حساس به بار [۵]

با توجه به رابطه ۲-۶ و ثابت فرض کردن ظرفیت خازن C_{in} با هر مقدار بار تولید شده، ولتاژ معادل آن بدست می‌آید. اما بدلیل وجود نیمه‌هادی در ساختار حس گرها، شرایط محیطی مانند دما می‌توانند بر عملکرد حس گر تأثیر گذاشته و دیگر نمی‌توان مقدار خازن C را ثابت فرض کرد. به همین دلیل از ساختار دوم که ساختار حساس به بار است به عنوان پیش تقویت کننده استفاده می‌شود [۵].

۲. پیش تقویت کننده حساس به بار: در این ساختار ولتاژ خروجی متناسب با مقدار بار جمع شده در خازن ورودی پیش تقویت کننده (C_{in}) است که منجر به تولید پالس ورودی برای پیش تقویت کننده می‌شود. با توجه به شکل ۲-۹ (ب) مدت زمان پالس خروجی توسط ثابت زمانی $R_f C_f$ تعیین می‌شود [۵].

این ساختار به تغییر ظرفیت خازن ورودی پیش تقویت کننده و خروجی حس گر و دیگر خازن‌ها وابستگی نداشته و به همین دلیل است که برتری خود را در بسیاری از کاربردها نشان داده است [۵].

با در نظر گرفتن اثر میلر، امپدانس $Z_f = R_f || C_f$ با نسبت عکس بهره تقویت کننده ($\frac{1}{A}$) به ورودی می‌آید. مقدار امپدانس این شاخه به نسبت شاخه‌های دیگر کمتر بوده، پس جریان بیشتری در آن سرازیر می‌شود. به همین دلیل ولتاژ خروجی بر حسب این امپدانس بدست می‌آید. ولتاژ خروجی مدار بر حسب ورودی آن در رابطه ۲-۷ آمده است.

$$V_{out} = -AV_{in} \quad (۲-۷)$$

اگر ولتاژ ورودی را بر حسب بار بدست آمده از برخورد یک تابش و ظرفیت معادل ورودی جایگذاری کنیم خواهیم داشت:

$$V_{out} = -A \frac{Q}{C_{in} + (A+1)C_f} \quad (۲-۸)$$

با در نظر گرفتن بهره بزرگ حلقه باز پیش‌تقویت‌کننده، ولتاژ خروجی آن طبق رابطه ۹-۲ تقریب می‌خورد.

$$V_{out} = -\frac{Q}{C_f} \quad A \gg \frac{C_{in} + C_f}{C_f} \quad (9-2)$$

در شرایط ایده‌آل زمان صعود سیگنال تشکیل شده توسط پیش‌تقویت‌کننده حساس به بار، فقط به زمان جمع‌آوری بار (t_c) در ورودی آن وابسته بوده و به خازن خروجی حس‌گر و ورودی پیش‌تقویت‌کننده بستگی ندارد. اما برای آشکارسازهای سریع قضیه متفاوت خواهد بود. در این آشکارسازها زمان صعود پالس خروجی علاوه بر بار ایجاد شده توسط حس‌گر، به عواملی دیگر نیز وابسته است. گاهی به دلیل استفاده از اتصالات اهمی نامرغوب در ساخت دیود نوری، مقاومتی سری در مدار معادل دیود نوری شکل ۲-۷(ب) ایجاد می‌شود که بعد از اتصال به پیش‌تقویت‌کننده سبب آهسته شدن زمان صعود سیگنال (افزایش t_c) خواهد شد [۵].

۲-۳-۴ بلوک شکل‌دهنده پالس

برای تحلیل و پردازش راحت‌تر بر روی سیگنال‌های حاصل از پیش‌تقویت‌کننده لازم است شکل سیگنال تغییر داده شود. برای تضمین جمع‌آوری کامل بارهای ایجاد شده توسط حس‌گر، پیش‌تقویت‌کننده طوری تنظیم می‌شود که ثابت زمانی کافی (زمان لازم برای صفر شدن پالس) برای هر پالس به وجود آید. معمولاً این زمان ۵۰ یا ۱۰۰ میکروثانیه است. از آن جا که زمان برخورد فوتون‌ها تصادفی بوده، ممکن است انباشتگی^۱ رخ داده و قسمتی از اطلاعات سیگنال از بین برود. برای چیره شدن بر این مشکل باید شکل پالس شبیه چیزی مانند شکل ۲-۱۰(ب) شود. در این تصویر دنباله سیگنال حذف شده و فقط دامنه آن نگه داشته شده است. در ادامه در مورد تغییر شکل پالس با شبکه‌های آنالوگ غیرفعال ساده صحبت می‌شود [۵].

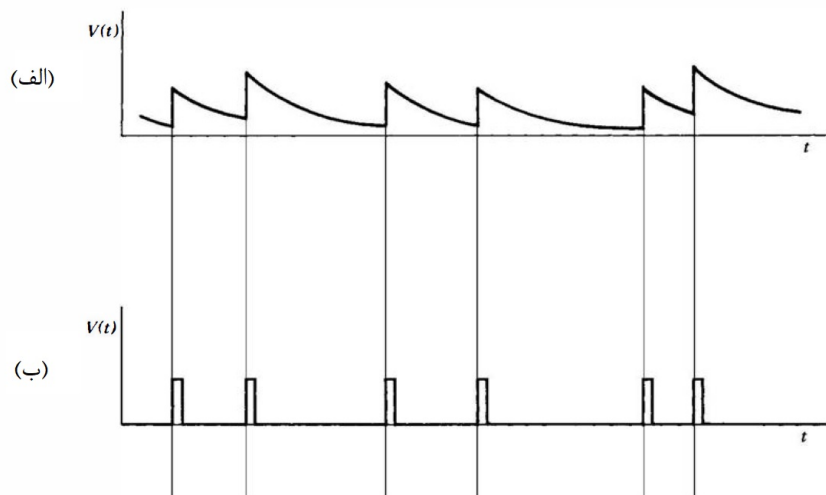
به طور کلی در مدارهای الکتریکی، اصطلاح شکل‌دهنده RC^۲ به استفاده از شبکه‌های مقاومتی-خازنی غیرفعال به منظور انجام تغییرات دلخواه در شکل پالس اشاره دارد. این شبکه‌ها می‌توانند به صورت RC یا انتگرال‌گیر و CR یا مشتق‌گیر عمل کنند. در حوزه فرکانس این شبکه‌ها به مانند یک فیلتر (پایین‌گذر یا بالا‌گذر) عمل کرده که تنها فرکانس‌های مشخصی را عبور می‌دهند که اتفاقاً یکی از اهداف این بلوک حذف نویز برای افزایش نسبت سیگنال به نویز (SNR) است [۵].

۲-۳-۴-۱ شکل‌دهنده CR-RC

یکی از راه‌های تغییر شکل پالس برای پردازش راحت‌تر استفاده هم‌زمان از شبکه مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر در دنباله هم است. اگر تنها از مشتق‌گیر استفاده شود، شکل موج خروجی آن

^۱Pile-up

^۲RC shaping



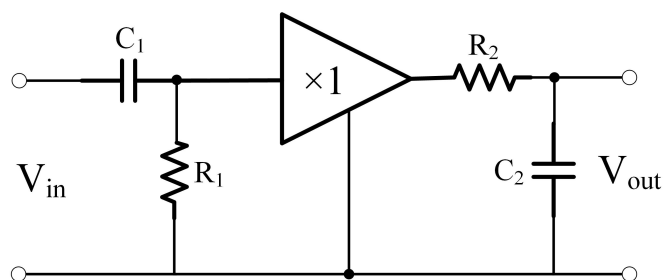
شکل ۲-۱۰: (الف) سیگنال دنباله‌دار ایجاد شده از پیش تقویت‌کننده، (ب) سیگنال مطلوب برای کاهش اثر انباشتگی [۵]

شکل موج مناسبی برای پردازش نیست. زیرا نقطه تیز بالایی که در بر گیرنده اطلاعات مورد نظر است، دارای زمان بسیار کوتاه بوده که این امر پردازش را بسیار سخت می‌کند. از طرفی با توجه به ماهیت بالاگذر این فیلتر، ناخواسته نویز سیگنال افزایش یافته و SNR کاهش می‌یابد. برای حل این مشکلات از یک شبکه انتگرال‌گیر در دنباله مشتق‌گیر استفاده می‌شود. شکل ۲-۱۱ ترکیب دو شبکه مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر پایه، همراه با یک تقویت‌کننده عملیاتی ایده‌آل با بهره واحد را نشان می‌دهد [۵]. پاسخ این سامانه به ورودی پله با دامنه V در زمان $t = 0$ برابر است با:

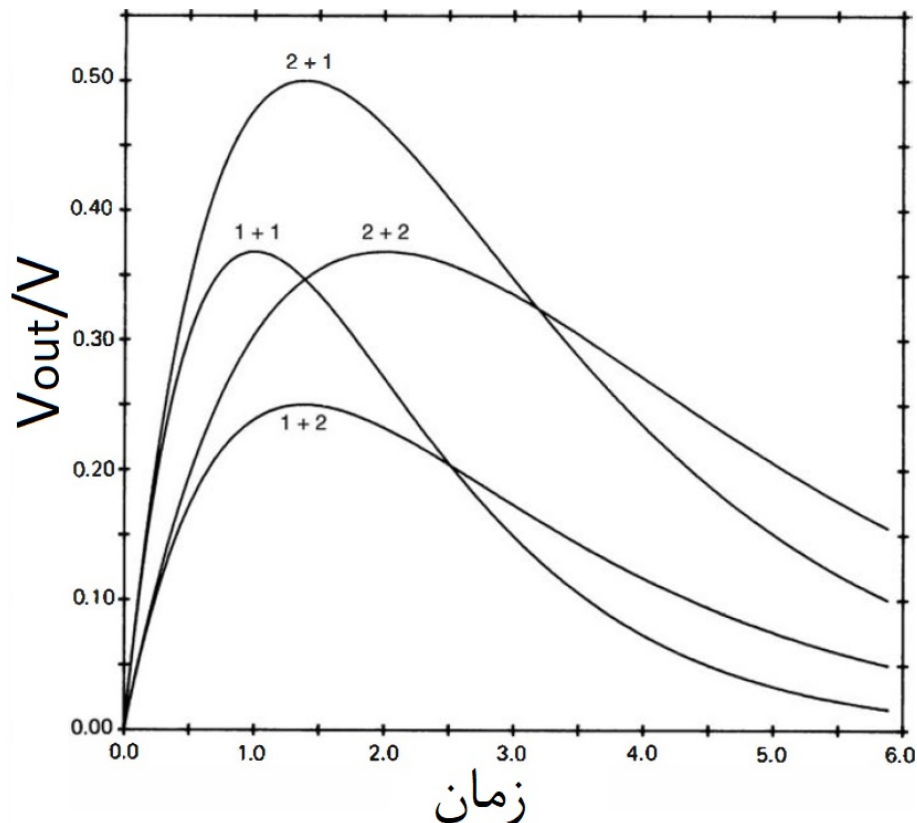
$$V_{out} = \frac{V\tau_1}{\tau_1 - \tau_2}(e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}) \quad (2-10)$$

که τ_1 و τ_2 به ترتیب ثابت زمانی شبکه مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر هستند. در شکل ۲-۱۲ پاسخ سامانه برای ترکیب‌های مختلف τ_1 و τ_2 رسم شده است. با توجه به این شکل، شکل موج خروجی شبیه به تابع گوسی است [۵].

در تقویت‌کننده‌های پالس هسته‌ای، ثابت‌زمانی‌های مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر یکسان و برابر



شکل ۲-۱۱: شبکه تغییر شکل دهنده متشکل از دو طبقه مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر [۵]



شکل ۲-۱۲: پاسخ ورودی پله شبکه CR-RC برای ترکیب‌های مختلف τ_1 و τ_2 در زمان صفر. محور زمان و ثابت زمانی‌ها هم واحد هستند [۵]

τ انتخاب می‌شود. در این صورت رابطه ۲-۱۰ پس از رفع ابهام به رابطه ۲-۱۱ تبدیل می‌شود.

$$V_{out} = V \frac{t}{\tau} (e^{-t/\tau}) \quad (۲-۱۱)$$

۲-۳-۴ عوامل انتخاب ثابت زمانی

۱. برای از بین بردن اثر انباشتگی، باید ثابت زمانی τ را کوچک انتخاب کرد. در این شرایط پالس با سرعت بیش‌تری به صفر رسیده و پالس بعدی روی آن انباشته نمی‌شود [۵].
۲. اگر ثابت زمانی τ نزدیک به زمان صعود پالس خروجی پیش‌تقویت‌کننده در نظر گرفته شود، پالس برای شبکه تغییر شکل دهنده مانند پله ظاهر نشده و قسمتی از دامنه حذف خواهد شد. به این دامنه از دست رفته کمبود بالیستیک^۱ می‌گویند. برای جلوگیری از این مشکل کافیست ثابت زمانی را طولانی‌تر از زمان انباشته شدن بار در نظر گرفت [۵].
۳. انتخاب ثابت زمانی مناسب در SNR سیگنال تأثیر بسزایی داشته و موجب کاهش اثرات متقابل منابع نویز سری و موازی می‌گردد. پس τ باید به گونه‌ای در نظر گرفته شود که مصالحه‌ای بین سه مورد فوق برقرار گردد [۵].

^۱Ballistic deficit

۳-۴-۳ شکل پالس خروجی به عنوان پالس گوسی

اگر شبکه تغییر شکل پالس دارای یک طبقه مشتق گیر و چند طبقه انتگرال گیر $CR-(RC)^n$ باشد، شکل موج نهایی به تابع گوسی ریاضی بیش تر شبیه می شود. اگر ثابت زمانی تمام طبقات یکسان و برابر τ باشد، پاسخ پله نهایی سامانه برابر می شود با:

$$V_{out} = \frac{V}{n!} \left(\frac{t}{\tau} \right)^n e^{-t/\tau} \quad (۱۲-۲)$$

که n تعداد طبقه انتگرال گیر است. اگر $n = 4$ باشد، اختلاف جزئی میان شکل موج خروجی و تابع گوسی واقعی قابل صرف نظر است [۵].

این شکل موج دارای مزایای خوبی است. در این تابع چون پالس به سرعت به صفر می رسد، احتمال انباشتگی پالس در نرخ های بالای برخورد تابش کاهش می یابد. همچنین SNR سیگنال در این شکل موج افزایش می یابد و این شکل موج را بر خلاف شکل موج مثلثی، می توان با شبکه های غیر فعال ساخت [۵].

۵-۳-۲ بلوک دیجیتال

پالس های تغییر شکل یافته که معمولاً به شکل گوسی هستند، توسط طبقه ای مجزا بر اساس اندازه دامنه شان تفکیک می شوند. در این طبقه می توان از ساختار تفکیک کننده انتگرالی استفاده کرد. این مدار همه پالس هایی با دامنه ی (انرژی) بزرگتر از یک حد آستانه را انتخاب می کند. تفکیک کننده های تفاضلی که به آن ها تحلیل گرهای تک کاناله^۱ هم می گویند، پالس هایی با مقادیر دامنه بین دو حد آستانه را انتخاب می کنند [۵].

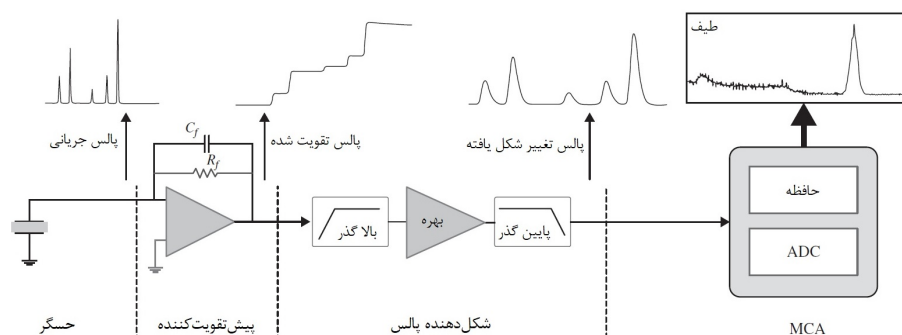
در نهایت پالس های انتخاب شده توسط مداری تحلیل می شوند که نتایج آن اطلاعات خوبی در مورد تابش های برخورد کرده به حس گر را می دهد. این سامانه می تواند به سادگی یک شمارنده باشد که تعداد تابش های برخورد کرده به حس گر را در یک دوره زمانی محدود نشان دهد [۵].

مثال پیچیده تر آن تحلیل گرهای چند کاناله (MCA)^۲ است. این سامانه دامنه هر یک از سری پالس های انتخاب شده را اندازه گیری می کند؛ سپس با استفاده از یک شمارنده (یا ثبات حافظه)، تعداد آن ها را می شمارد و در نهایت نمودار طیفی آن را برای رسم آماده می کند [۵]. به عنوان مثال تعداد تابش هایی با انرژی 10 keV را شمرده و حفظ می کند سپس به سراغ پالس هایی با انرژی 20 keV می رود و تعداد آن ها را می شمارد. به این ترتیب نمودار طیفی تابش ها با انرژی های مختلف بدست می آید.

یک MCA اساساً شامل یک مبدل آنالوگ به دیجیتال (ADC)، یک حافظه و یک دستگاه برای نمایش طیف ثبت شده در حافظه است. مبدل آنالوگ به دیجیتال با تبدیل دامنه پالس ها

^۱Single channel analyzer

^۲Multi Channel Analyzer



شکل ۲-۱۳: نمودار بلوکی ساده یک سامانه طیف سنجی انرژی مبتنی بر MCA همراه با شکل موج هر طبقه [۲۴]

به اعداد دیجیتال، نقش مهمی را ایفا می‌کند [۲۴]. از جمله پارامترهای مهم برای مبدل‌های داده آنالوگ به دیجیتال می‌توان به دقت^۱، زمان تبدیل^۲، غیرخطینگی^۳، سرعت^۴ و پایداری اشاره کرد [۶].

شکل ۲-۱۳ قسمت جلویی یک سامانه آشکار ساز از بلوک حس گر تا بلوک دیجیتال همراه با شکل موج خروجی در هر بلوک را نشان می‌دهد [۲۴].

¹Resolution

²Time conversion

³DNL, INL

⁴Sampling frequency

فصل ۳

مروری بر ادبیات موضوع و پیشینه
پژوهش

۱-۳ مقدمه

در فصل قبل به بررسی عملکرد بلوک‌های مختلف آشکارساز پرداخته شد. بعد از معرفی انواع حس‌گر و بررسی فیزیک آن‌ها، طبقات الکترونیکی قسمت جلویی برای تحلیل پالس خروجی حس‌گر، مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش تحقیقات پیشینه این موضوع شامل ساختارها، اهداف و نتایج که در منابع علمی مختلف از جمله مقالات، پایان‌نامه‌ها، مجلات علمی و ... آمده است، بحث و بررسی خواهد شد. این فصل به سه قسمت عمده تقسیم شده است. در قسمت اول به مقالاتی پرداخته شده که به بررسی حس‌گرهای دیود نوری مختلف پرداخته‌اند. در قسمت دوم پژوهش‌های مربوط به آشکارسازهای حالت پالسی بررسی شده است. و در انتها، مقالاتی که مربوط به آشکارسازهای حالت جریانی هستند، بررسی خواهند شد.

۲-۳ حس‌گرهای دیود نوری

۱-۲-۳ دزسنجی تابش گاما در حالت جریانی

هدف اصلی تحقیق [۱۱] ارزیابی مفهوم دزسنجی در حالت جریانی با استفاده از دیود نوری PIN تجاری و مدار اندازه‌گیری است. نتیجه این تحقیق برای بررسی تاثیر تابش گاما به مشخصات الکتریکی دیودهای نوری به کار می‌رود. زیرا در هنگام قرارگیری دیود نوری تحت دز بالای تابش، شبکه بلور سیلیکون دچار نقص شده که موجب افزایش جریان نشتی دیود و همچنین کاهش سطح جریان ناشی از برخورد تابش می‌شود. به همین دلیل حساسیت دیود نوری برای آشکارسازی کاهش می‌یابد. برای پی بردن به این امر، رابطه بین جریان ایجاد شده از تابش برخوردی و نرخ دز به همراه رابطه بین بار انباشته شده در دیود نوری و کل دز جذب شده بدست آمده است. در این آزمایش دیودهای BPW34، S1223، و PS100-6-CER2 در ساختارهای تکی و موازی با هم در حالت فتوولتائیک^۱ (بایاس نبودن دیودها) در معرض منبع ^{60}Co که دارای تابش گاما است، قرار گرفته‌اند.

در حالت اول، با اندازه‌گیری جریان حاصل از تابش‌های برخوردی به حس‌گر، نرخ دز مشخص شده است. در حالت دوم برای بدست آوردن رابطه بین بار انباشته شده و کل دز جذب شده، با اندازه‌گیری جریان حاصل از برخورد فوتون‌ها به دیود نوری در زمان مشخص، بار انباشته شده محاسبه شده و با ثابت فرض کردن نرخ دز، کل دز جذب شده محاسبه شده است [۱۱].

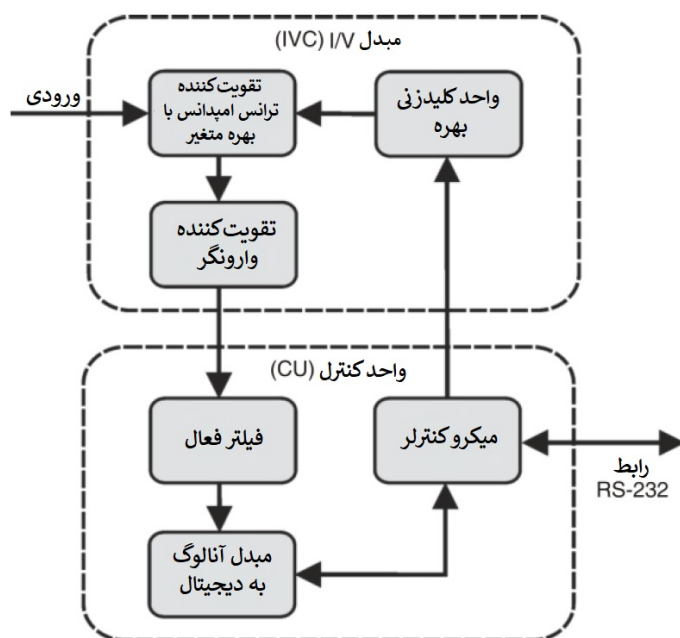
مقدار معمول جریان خروجی حس‌گر در حدود پیکوآمپر تا میلی‌آمپر بسته به شدت تابش و

^۱ Photovoltaic

مشخصه دیود نوری تغییر می‌کند. برای اندازه‌گیری جریان حاصل از حس گرها، از الکترومتر ارزان قیمت که به صورت سفارشی ساخته شده و می‌تواند اطلاعات حاصل از حس گرها را به صورت لحظه‌ای به رایانه انتقال دهد، استفاده شده است. سامانه اندازه‌گیری جریان از واحدهای تبدیل جریان به ولتاژ^۱ (IVC) و واحد کنترل^۲ (CU) تشکیل شده است. ساختار آن را در شکل ۱-۳ می‌توان مشاهده کرد. این دستگاه به صورت اختصاصی برای اندازه‌گیری در حالت جریانی ساخته شده و در بازه‌های کمتر از ۱nA، بین ۱ تا ۱۰ نانوآمپر، بین ۱۰ تا ۱۰۰ نانوآمپر، بین ۱۰۰ نانوآمپر تا ۱ میکروآمپر و بین ۱ میکروآمپر تا ۱۰ میکروآمپر جریان را اندازه می‌گیرد [۱۱].

این تحقیق به بررسی پنج نمونه آزمایشی مختلف می‌پردازد. سه نمونه اول در حالتی است که سه دیود نوری S1223، PS100-6-CER2، و BPW34 به ترتیب به صورت مجزا از یکدیگر به مدت سه دقیقه تحت تابش مستقیم گاما قرار گرفته‌اند. در دو نمونه بعدی به ترتیب دو و چهار حس گر BPW34 به صورت موازی بسته شده و به عنوان گیرنده تابش گاما استفاده شده‌اند. برای جلوگیری از برخورد نور، هر نمونه داخل ورق ضد نور قرار داده شده است [۱۱]. برای تنظیم سامانه، از دستگاه اندازه‌گیری Keithley 2636A با دقت بالا استفاده شده است. برای این کار داده‌های خروجی الکترومتر که بر روی رایانه بدست آمده، با سامانه تجاری 2636A مقایسه شده است [۱۱].

نمونه‌ها هرکدام در ۱۲ فاصله مشخص از منبع ^{60}Co قرار گرفتند. هر کدام از این فاصله‌ها معادل یک نرخ دز است. در هر فاصله دز با استفاده از دستگاه ساخته شده و دستگاه مرجع



شکل ۱-۳: نمودار بلوکی الکترومتر سفارشی [۱۱]

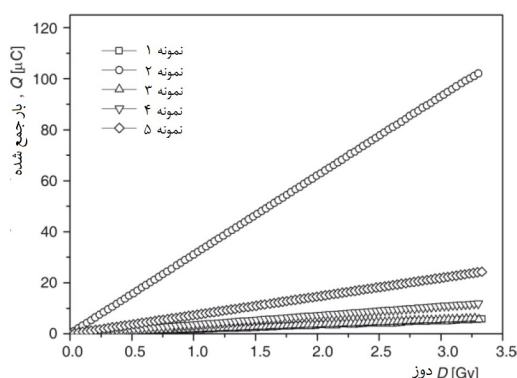
¹Current-to-Voltage Converter

²Control Unit

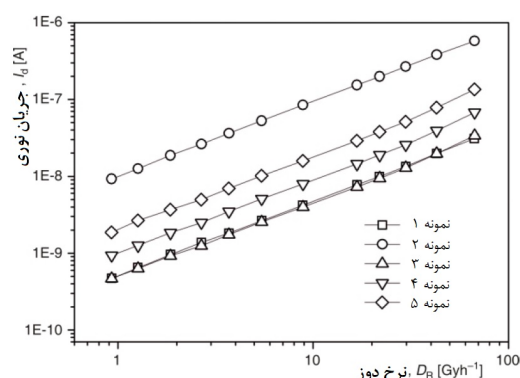
اندازه‌گیری شده است [۱۱].

شکل‌های ۲-۳ (الف) و ۲-۳ (ب) به ترتیب رابطه بین جریان ایجاد شده از تابش برخوردی و نرخ دز به همراه رابطه بین بار انباشته شده در دیود نوری و کل دز جذب شده را نشان می‌دهند. نتایج حالت اول با توجه به شکل ۲-۳ (الف) نشان می‌دهد که رابطه بین جریان اندازه‌گیری شده و نرخ دز برای تمام نمونه‌ها یک رابطه خطی است. در نمونه‌های اول تا سوم حساسیت جریان نوری به نرخ دز، بستگی به سطح حساس دیود دارد و با آن متناسب است. بیش‌ترین حساسیت مربوط به نمونه دوم (PS100-6-CER2) که برابر 1.78 nA.Gy^{-1} است. این در حالیست که برای نمونه اول (S1223) و سوم (BPW34) به ترتیب 0.461 pA.Gy^{-1} و 481 pA.Gy^{-1} ثبت شده است. همچنین حساسیت نمونه چهارم (دو عدد BPW34 موازی) برابر 961 pA.Gy^{-1} و نمونه پنجم (چهار عدد BPW34 موازی) 1.92 nA.Gy^{-1} اندازه‌گیری شده است. این اختلاف به راحتی با اختلاف سطح مقطع حساس نمونه‌ها توجیه می‌شود زیرا نمونه دوم سطح مقطع حساس بزرگتری نسبت به نمونه اول و سوم دارد. همچنین در نمونه چهارم و پنجم با موازی کردن، سطح مقطع زیاد شده است. البته با این کار جریان نشتی به صورت خطی با تعداد دیود موازی شده افزایش می‌یابد. در حالت دوم، همانطور که در شکل ۲-۳ (ب) نشان داده شده است، مانند حالت اول یک رابطه خطی بین بار انباشته شده و کل دز جذب شده بدست آمده است. حساسیت نمونه‌ها مانند حالت اول با افزایش سطح مقطع دیود نوری، افزایش پیدا کرده است [۱۱].

طبق نتایج این تحقیق دیود نوری با سطح مقطع بزرگتر، حساسیت بزرگتری به تابش یونیزان دارد. پس هرچه سطح مقطع دیود بزرگتر شود، مزیت آن برای استفاده به عنوان حس‌گر آشکارساز یونیزان افزایش می‌یابد. همچنین از مزایای اندازه‌گیری حالت جریانی با استفاده از دیود نوری می‌توان به خطی بودن رابطه جریان خروجی با دز جذب شده اشاره کرد.



(ب)



(الف)

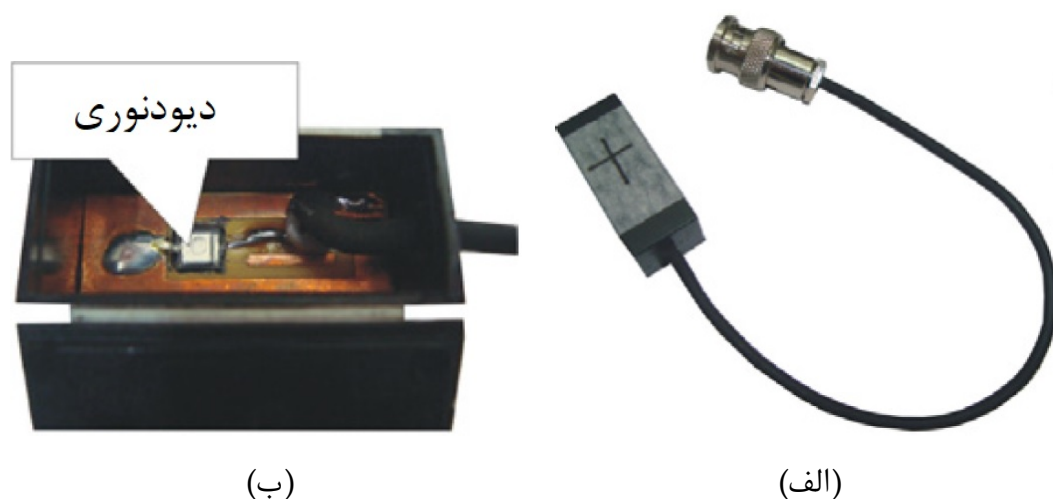
شکل ۲-۳: (الف) رابطه بین جریان ناشی از تابش برخوردی و نرخ دز، (ب) رابطه بین بار انباشته شده و کل دز جذب شده (در نرخ دز 67 Gy/h) [۱۱]

۲-۲-۳ قابلیت دزسنجی دیود نوری در کاربردهای پرتوشناسی

هدف اصلی تحقیق [۱۴] بررسی قابلیت آشکارساز ارزان قیمت مبتنی بر دیودهای نوری تجاری بوده که در کاربردهای مختلف از جمله حفاظت رادیویی، می تواند تابش X و گاما را شناسایی کند. در این پژوهش، آشکارساز در حالت جریانی قرار گرفته است. دیودهای نوری آزمایش شده در این تحقیق شامل: SFH205، SFH206، BPW34 و BPX90 هستند. این دیودها بر اساس حداقل ناحیه حساس $5mm^2$ ، حداقل نیم زاویه 60° و حداقل قیمت انتخاب شده اند. سپس هر یک از دیودها در محفظه ای قرار گرفته تا میزان نور برخوردی به حس گر، حداقل شود. در مرحله بعد حس گر با استفاده از کابل ارتباطی به الکترومتر استاندارد CDX-2000A متصل شده است. دیود نوری در حالت بدون بایاس قرار گرفته که به عنوان حالت فتوولتائیک یا حالت جریانی شناخته می شود. ساختار مورد نظر در شکل ۳-۳ نشان داده شده است [۱۴].

دیودهای نوری به ترتیب در داخل محفظه جایگذاری شده سپس تحت منبع تابش X (تیوب تابش X) مدل HF320، در Kerma هوا آزمایش شده اند. نمودار خروجی توسط اتاقک یونش مدل PTW-NE2575 تنظیم شده است. حس گرها در مرکز محل برخورد تابش در فاصله دو متری قرار گرفته سپس آزمون های تکرار پذیری^۱، تجدیدپذیری^۲ و وابستگی انرژی را پشت سر گذاشته اند [۱۴].

نتایج مربوط به آزمون تکرارپذیری و تجدیدپذیری را می توان در جدول ۳-۱ مشاهده کرد. این نتایج، انحراف معیار داده های بدست آمده از آزمون تکرارپذیری و تجدیدپذیری را نشان



شکل ۳-۳: (الف) محفظه قرارگیری دیود نوری به همراه کابل اتصال، (ب) محفظه دیود نوری در حالت باز شده [۱۴]

¹ Repeatability

² Reproducibility

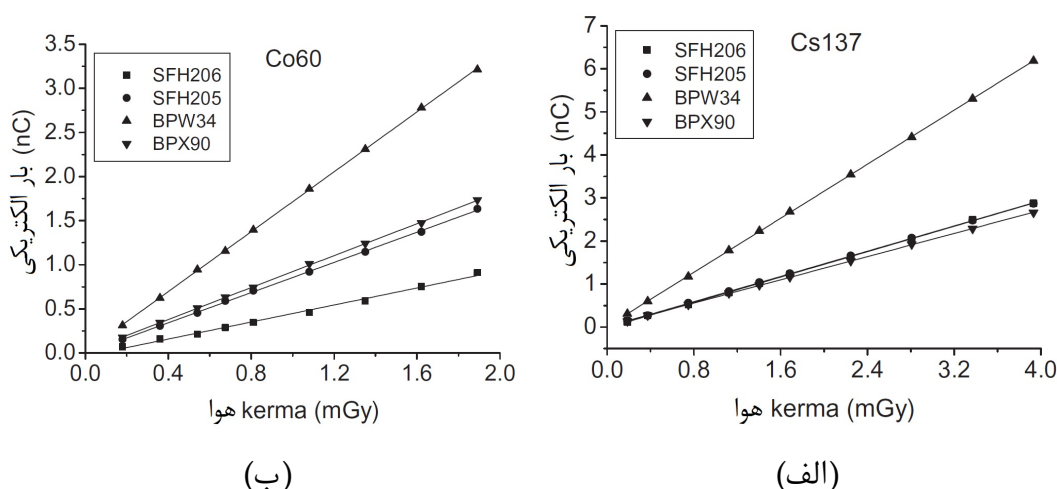
جدول ۳-۱: نتایج آزمون تکرارپذیری و تجدیدپذیری [۱۴]

دیود نوری	تکرارپذیری	تجدیدپذیری
SFH205	۱/۷٪	۱۰/۹٪
SFH206	۲/۸٪	۱۳/۰٪
BPW34	۱/۵٪	۱/۶٪
BPX90	۱/۶٪	۱/۵٪

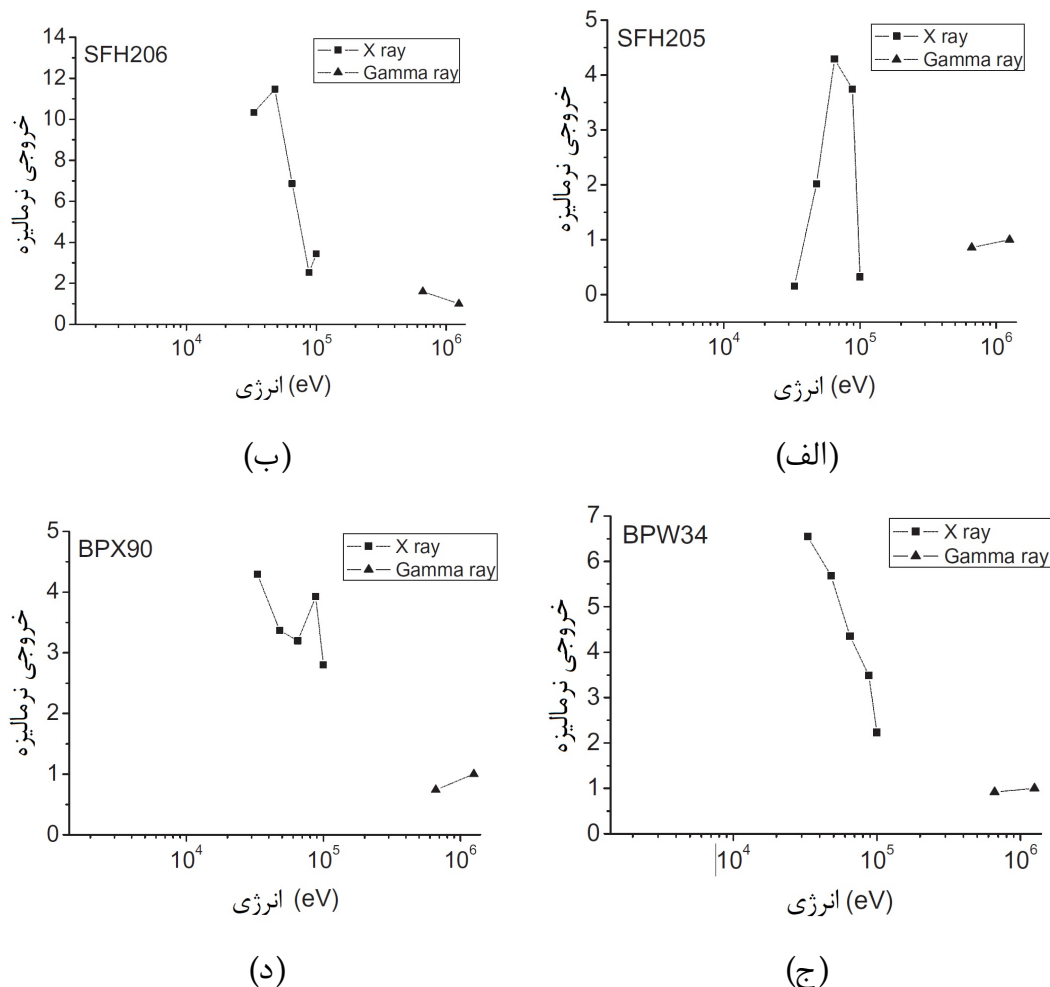
می‌دهند. در آزمون تکرارپذیری، دیودهای BPW34 و BPX90 بهترین نتایج را نشان می‌دهند، همانطور که در جدول ۳-۱ مشاهده می‌شود، تکرارپذیری BPW34 ۱/۵٪ است. نتایج مشابهی در آزمایش تجدیدپذیری وجود دارد، هر دو بهترین نتیجه را در این آزمون بدست آورده‌اند. با این حال، نتایج، حساسیت BPX90 را کمتر از BPW34 نشان می‌دهند [۱۴].

شکل ۳-۴ پاسخ دیودهای نوری در Kerma هوا برای منابع تابش گاما شامل ^{137}Cs و ^{60}Co را نشان می‌دهد. به عنوان مثال برای شرایط مشابه اندازه‌گیری، بار الکتریکی تولید شده توسط BPW34 برابر ۱/۰۸۸nC و BPX90 برابر ۰/۶۷۲nC است. این امر به دلیل ناحیه حساس کمتر BPX90 است. طبق نتایج، دیود BPW34 نسبت به سایر حس‌گرها پاسخ بهتری را نشان می‌دهد [۱۴].

همچنین در این تحقیق وابستگی انرژی برای منابع ^{137}Cs ، ^{60}Co و تیوب X در فاصله‌های ۳۰cm تا ۱m مورد بررسی قرار گرفته است. وابستگی انرژی دیودها در محدوده ۳۳ keV تا ۳۳ keV در شکل ۳-۵، آمده است. انرژی با توجه به استاندارد ISO 4037-1 اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد، دیود BPW34 دارای بیش‌ترین وابستگی انرژی در بازه ۳۳keV تا



شکل ۳-۴: (الف) پاسخ Kerma هوا به منبع سزیم ۱۳۷، (ب) پاسخ Kerma هوا به منبع کبالت ۶۰



شکل ۳-۵: ضریب تنظیم دیودهای نوری به عنوان تابعی از انرژی تابش [۱۴]

۱۰۰keV را دارد [۱۴].

طبق نتایج بدست آمده از این تحقیق، هر چهار دیود بحث شده قابلیت آشکارسازی تابش‌های گاما و X را دارند. طبق نتایج تکرار پذیری، تجدیدپذیری و وابستگی انرژی، دیودهای نوری BPX90 و BPW34 اولویت بالاتری در آشکارسازی این بازه انرژی از تابش‌های یونیزان را دارند.

۳-۲-۳ مقایسه حس‌گرها

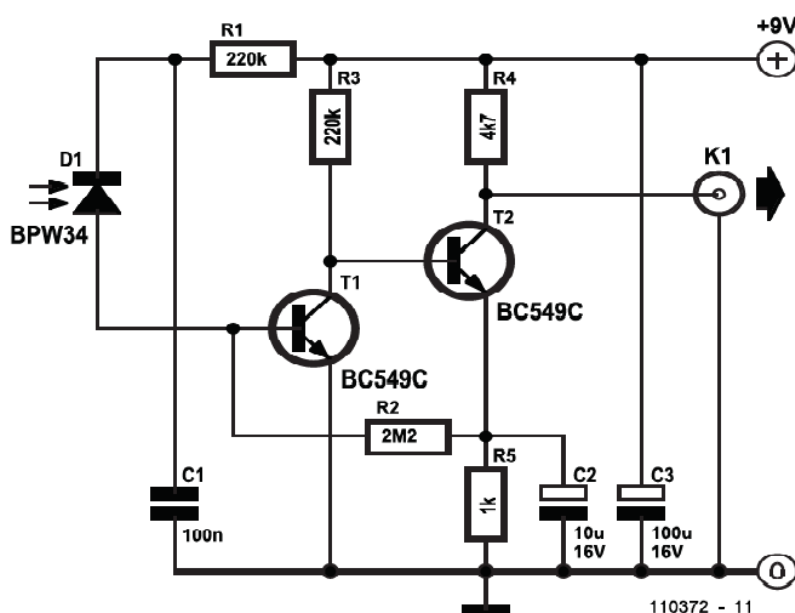
در تحقیقات [۱۱] و [۱۴] به بررسی دیودهای SFH206، BPX90، BPW34، S1223 و PS100-6-CER2 پرداخته شده است. تمامی دیودها در آزمایش دز جذبی پاسخ خطی از خود نشان دادند. طبق نتایج دو تحقیق، دیودهای PS100-6-CER2، S1223 و BPW34 به ترتیب دارای بهترین پاسخ در دزهای بالاتری (تا ۳ گری) بوده و بعد از آن‌ها، دیودهای BPX90، SFH206 و SFH205 به ترتیب دزهای پایین‌تری (تا ۴ میلی‌گری) را آشکار کردند. همچنین

این دیودها به انرژی‌های بالای ۳۳Kev واکنش نشان داده‌اند. با توجه به این موارد و نتایج حاصل از حساسیت دیودها در ناحیه خطی می‌توان گفت، دیودهای S1223، PS100-6-CER2، SFH205، BPX90، BPW34 و SFH206 در صورت موجود بودن در بازار ایران، به ترتیب اولویت مناسبی برای سامانه آشکارساز این پایان‌نامه هستند. البته دیود PS100-6-CER2 با توجه به قیمت بالایی که دارد [۲۶]، به عنوان گزینه مناسبی نمی‌توان در نظر گرفت.

۳-۳ آشکارسازهای حالت پالسی

۱-۳-۳ اندازه‌گیری تابش گاما با دیود نوری

در سال ۲۰۱۱ اولین بار به صورت رسمی مداری ساده جهت اندازه‌گیری تابش گاما با استفاده از دیود نوری BPW34 ارائه شد و مزایای آن نسبت به لوله گایگر-مولر که تا آن زمان مرجع اصلی آشکارساز تابش‌های پرانرژی بود، بررسی شد. هدف اصلی مرجع [۷] ساخت آشکارساز کم هزینه تابش‌های یونیزان به عنوان جایگزینی مناسب برای شمارش‌گر گایگر است. طبق تحقیقات این مقاله، حس‌گرهایی با حساسیت پایین همچون BPW34 و BPX61 دارای ناحیه حساس کوچک ولی قیمت پایین نسبت به آشکارسازهای غیر نیمه‌هادی هستند. این دو حس‌گر به ترتیب دارای محفظه‌های پلاستیکی و فلزی TO-5 که درون پنجره شیشه‌ای قرار گرفته، هستند [۷]. قسمت آنالوگ مدار این تحقیق در شکل ۳-۶ قابل رویت است. دو ترانزیستور برای تقویت سیگنال خروجی دیود نوری وجود دارد. ترانزیستور ورودی تقویت‌کننده



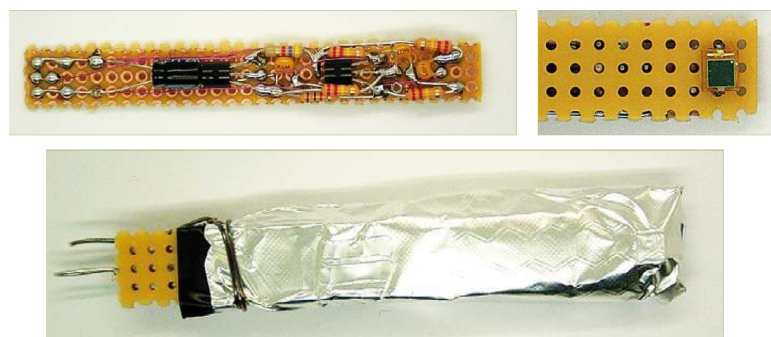
شکل ۳-۶: مدار تقویت‌کننده [۷]

دارای امپدانس ورودی نسبتاً پایینی بوده که تطابق^۱ نویز خوبی را به وجود آورد. خازن بیس-کلکتور طبقه اول به عنوان انتگرال گیر عمل می کند. ولتاژ بایاس معکوس با توجه به مشخصات دیود نوری BPW34 می تواند به اندازه ۳۲ ولت افزایش یابد. این امر ظرفیت خازن پیوندی دیود نوری را کاهش داده و در نتیجه حساسیت BPW34 افزایش می یابد. همچنین در این تحقیق برای افزایش بیش تر حساسیت، چند دیود نوری به صورت موازی با ولتاژ ۹ ولت بایاس شده اند. برای مشاهده شکل موج خروجی، اسیلوسکوپ به خروجی مدار متصل شده است [۷].

طبق شکل ۳-۷ این مدار بر روی برد سوراخ دار ساخته شده است. ابتدا تابش ها باید ورق آلومینیومی که بر روی حس گر قرار دارد را پشت سر گذاشته؛ سپس به حس گر برخورد کنند. ضخامت این آلومینیوم ۱۵ میکرومتر بوده و جهت کاهش نویز الکترومغناطیس و حذف نور محیط به زمین مدار متصل شده است. وجود این محافظ، مانعی برای تابش گاما نخواهد بود و تابش گاما می تواند از آلومینیوم با این ضخامت عبور کند. برای جلوگیری از اتصال کوتاه این مدار با محافظ آلومینیومی، مدار با یک نارسانا از آن جدا شده است [۷].

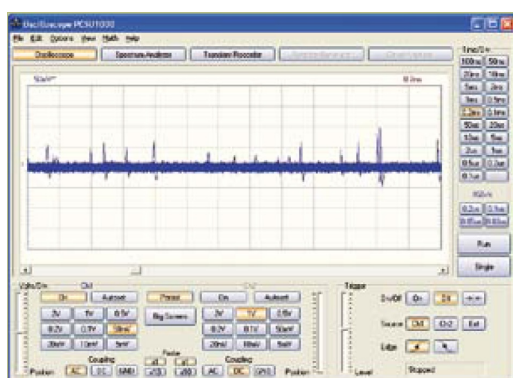
طبق نتایج این تحقیق، میزان دامنه نویز با توجه به شکل ۳-۸ (الف) برابر ۳۰ میلی ولت قله تا قله اندازه گیری شده است. این اندازه گیری در شرایطی صورت گرفته که هیچ منبع تابشی در نزدیکی دیود نوری قرار نگرفته است. همچنین زمانی که مدار در برابر تابش گاما قرار داده شد، پالس های مثبت به همراه پالس های منفی کوچک در اسکوپ مشاهده شد. پالس های منفی با دامنه بزرگ، نشان دهنده حفاظت نامناسب مدار در برابر نور و امواج RF است. شکل ۳-۸ (ب) و ۳-۸ (ج) نشان دهنده مجموعه از شکل موج های انباشته شده در طول زمان ۳۰ ثانیه در برابر ماده معدنی حاوی اورانیوم بوده که به عنوان منبع تابش گاما مورد استفاده قرار گرفته است. اطلاعات مورد نظر در پالس های مثبت قابل مشاهده است.

یکی از پیشنهاد های این تحقیق، ترکیب کردن مقایسه کننده با شمارنده دیجیتال است. با این عمل سطح کلی تابش محیط قابل اندازه گیری است. اگر مدار نمونه بردار برای ذخیره سطح انرژی به کار رود، خروجی چیزی شبیه به طیف نگاره انرژی خواهد شد.

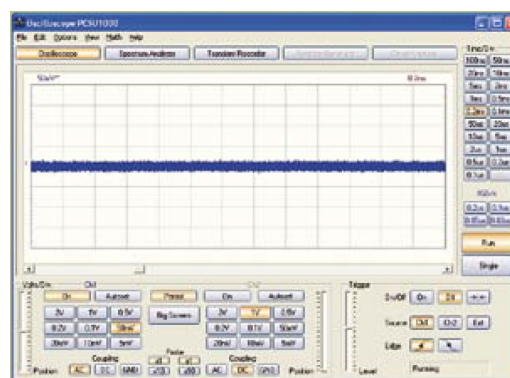


شکل ۳-۷: نسخه اولیه مدار ساخته شده [۷]

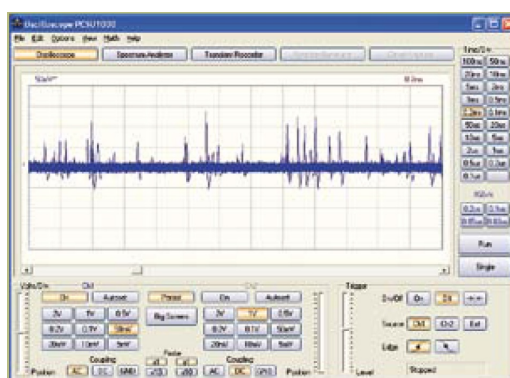
^۱Matching



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۳-۸: (الف) خروجی در حالت خاموش ، (ب) خروجی منبع ساعت رادیومی در ۳۰ ثانیه، (ج) خروجی منبع ماده معدنی حاوی اورانیوم در ۳۰ ثانیه [۷]

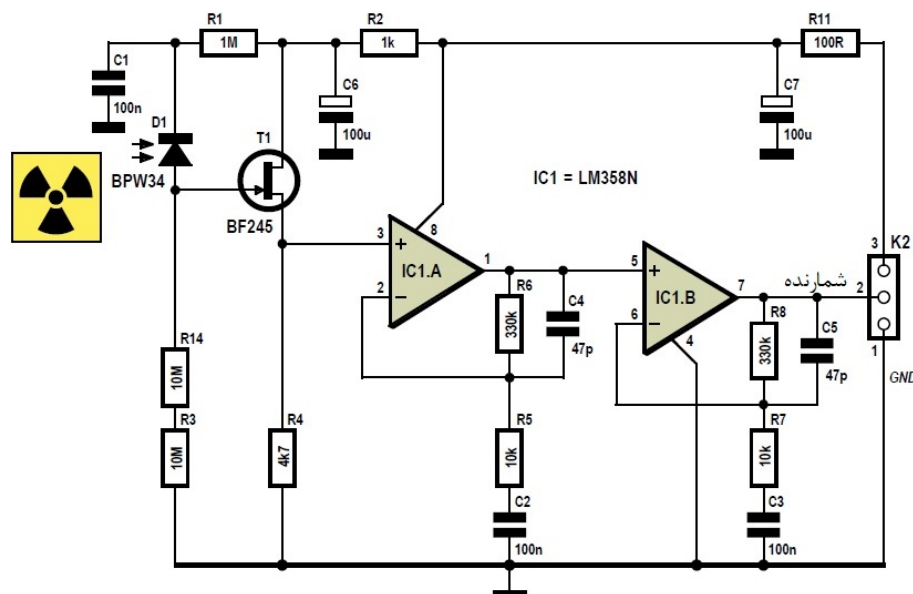
از معایب ساختار مطرح شده در این مقاله، نویزپذیری بالا به دلیل قطعات استفاده شده و کوچک بودن دامنه پالس خروجی است. از مزایای آن می توان به سادگی مدار جلوبی و استفاده از قطعات پرکاربرد و موجود در بازار اشاره کرد.

۳-۲- تابش سنج رادیواکتیو

در مرجع [۸] سعی شده معایب مقاله [۷] برطرف شود. در این ساختار از قطعات با نویز کمتر استفاده شده است. همچنین چند دیود نوری به صورت موازی در ورودی استفاده شده تا ناحیه فعال جهت برخورد تابش یونیزان افزایش یابد. چرا که این امر موجب افزایش نرخ برخورد می شود. البته باید در نظر داشت که این کار خازن ناحیه تخلیه را افزایش داده و در نتیجه نویز مدار بیش تر شده و دامنه خروجی کاهش می یابد [۸].

شکل ۳-۹ مدار آنالوگ این ساختار را نشان می دهد. در این مدار از تقویت کننده کم نویز BF245 که از ترانزیستورهای اثر میدان پیوندی^۱ بوده، در طبقه اول استفاده شده است. این

^۱JFET



شکل ۳-۹: مدار تقویت کننده [۸]

ترانزیستور نسبت سیگنال به نویز خوب و امپدانس ورودی بالایی دارد. طبقه اول در ساختار دنبال کننده سورس قرار گرفته که ولتاژ مستقیمی^۱ به اندازه ۲ تا ۳ ولت (بسته به مقدار تغذیه) در دو سر مقاومت سورس ایجاد می کند. این سطح ولتاژ برای نقطه کار تقویت کننده طبقه بعدی مناسب است. خروجی دنبال کننده سورس به یک مدار تقویت کننده با بهره بزرگ متصل شده است. طبق آزمایش های انجام شده، دامنه خروجی کل به ولتاژ ۲۰۰ میلی ولت و عرض پالس ۲۰ میلی ثانیه رسیده است. در نتیجه خروجی بدون هر گونه مدار واسط، مستقیماً می تواند به بلندگو متصل شده تا وجود هر پالس ناشی از برخورد یک تابش یونیزان را با صدا گزارش کند [۸].

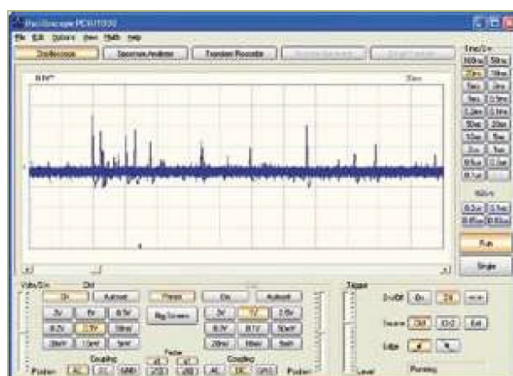
سطح نویز خروجی این مدار به اندازه 5 mV_{p-p} گزارش شده است. شکل های ۳-۱۰ (الف) و ۳-۱۰ (ب) واکنش مدار را به منابع رادیواکتیو نشان می دهند. طبق نتایج این تحقیق با توجه به دامنه بزرگ خروجی، دیودهای BPW34 و BPX61 هر دو به تابش گاما حساسیت داشته و توانسته اند آن را آشکار کنند [۸].

شکل ۳-۱۱ طیف نگاری تابش گاما منبع اورانیت یا دی اکسید اورانیوم^۲ را نشان می دهد. این طیف نگاری با اضافه کردن بلوک دیجیتالی به انتهای مدار تقویت کننده شکل ۳-۹ و نرم افزار نوشته شده در رایانه، انجام شده است. قسمت دیجیتالی، پالس های آشکار شده توسط حس گر BPX61 را شمارش کرده و آن ها را از طریق سریال به رایانه منتقل می کند [۸].

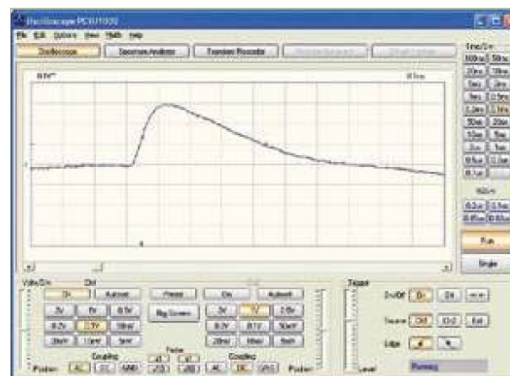
طبق نتایج این تحقیق، دامنه خروجی نسبت به تحقیق قبلی بزرگتر بوده و می توان پالس ها را از نویز متمایز کرد. این امر و ساختار ساده آن از مزایای این مدار به حساب می آیند. اما دوره پالس بزرگ آن سبب شده تا بعضی از پالس ها شناسایی نشده و از دست بروند. به همین

^۱DC voltage

^۲Pitchblende



(ب)



(الف)

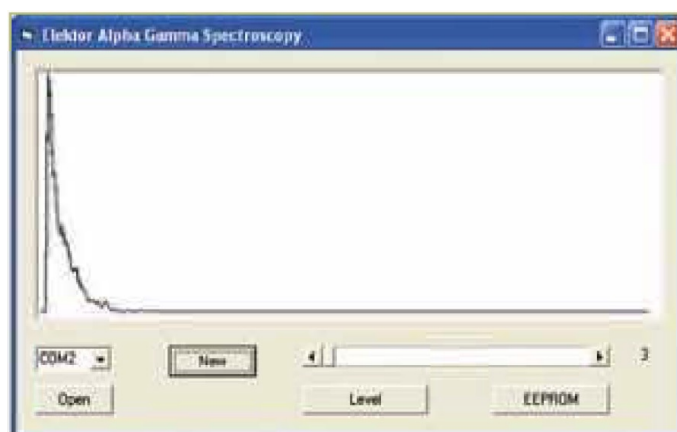
شکل ۳-۱۰: (الف) تک پالس، (ب) ترکیبی از نویز و سیگنال مطلوب [۸]

دلیل طیف‌سنجی با دقت پایین صورت می‌گیرد.

۳-۳-۳ محافظ تابش‌سنج رادیواکتیو

در مقاله [۹]، حفاظت مدار تقویت‌کننده ساخته شده در مرجع [۸]، در برابر مرئی به صورت دقیق‌تر بررسی شده است. در این مقاله دو راه برای جلوگیری از رسیدن نور محیط به حس‌گرهای BPW34 و BPX61 پیشنهاد شده است.

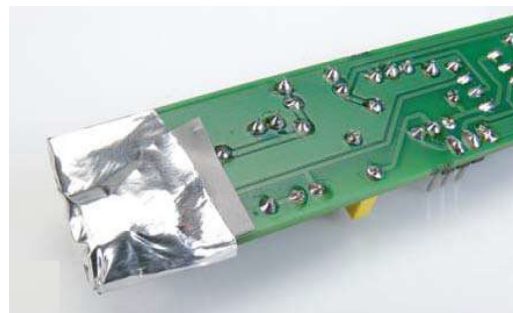
در روش اول ابتدا یک ماده عایق در دو طرف برد، در محل حس‌گر قرار داده شده که سبب جلوگیری از برخورد نور عبور کرده از برد بر روی حس‌گر می‌شود. سپس حس‌گر روی ماده عایق قرار گرفته و روی آن با ورق آلومینیوم پوشانده شده و برای کاهش نویز الکترومغناطیس، ورق به زمین برد متصل شده است. شکل ۳-۱۲ (الف) مدار را همراه با پوشش ضد نور و ضد نویز نشان می‌دهد. همچنین برای کاهش بیش‌تر اغتشاشات خارجی، با توجه به شکل ۳-۱۲ (ب) کل برد با ورق آلومینیوم پوشانده شده است [۹].



شکل ۳-۱۱: طیف‌سنجی تابش گاما با استفاده از حس‌گر BPX61 [۸]



(ب)



(الف)

شکل ۳-۱۲: (الف) محافظت حس گر از نور با ورق آلومینیومی، (ب) حفاظت مدار از نویز و نور با ورق آلومینیومی [۹]

در روش دوم با توجه به شکل ۳-۱۳ کل مدار تقویت کننده داخل یک قوطی فلزی قرار گرفته است. قوطی فاقد لولا بوده تا هیچ نوری نتواند به داخل راه پیدا کند. برای کاهش نویز الکترومغناطیس، بدنه قوطی به زمین مدار متصل شده است [۹].

برای ثبت نتایج، مدار تقویت کننده داخل قوطی فلزی قرار گرفته است. حس گر انتخابی BPX61 بوده که با از بین بردن پوشش شیشه‌ای آن، بتواند تابش آلفا را شناسایی کند. پس از قرار دادن منبع تابش آلفا^۱ درون قوطی، پالس‌های نشان داده شده دارای دامنه ۲۰۰ میلی‌ولت بودند. این تابش‌ها دارای انرژی ۵ MeV هستند [۹].

طبق نتایج این تحقیق می‌توان گفت مدار استفاده شده در [۸] به انرژی‌های بالا با مقیاس میلیون الکترون ولت حساس بوده و می‌تواند آن‌ها را شناسایی کند. همچنین روش دوم روش مناسب‌تری برای عایق کردن مدارات از نور محیط و نویز الکترومغناطیس است زیرا بزرگترین



شکل ۳-۱۳: استفاده از قوطی فلزی برای محافظت از نور مرئی و اغتشاشات خارجی [۹]

مزیت آن جلوگیری از اتصال کوتاه در مدار بوده و نویز بیش‌تر کاهش می‌یابد. چرا که حرکت ورق آلومینیومی روی حس‌گر سبب افزایش نویز در مدار می‌شود.

۴-۳-۳ دیود نوری PIN برای اندازه‌گیری تابش گاما

هدف اصلی این تحقیق، مطالعه‌ی دیود نوری تجاری BPW34 به جای لوله گایگر در کاربردهای شمارش و طیف سنجی است [۱].

در این تحقیق ساختار و مشخصات بسته‌بندی دیود نوری تجاری BPW34 و طریقه ایجاد بار بعد از برخورد فوتون‌های یونیزان بررسی شده است. طبق بررسی‌های انجام شده، این دیود برای برخورد یک تک فوتون با انرژی $59/54 \text{ keV}$ به اندازه $2/6 \text{ fC}$ بار تولید می‌کند. این تابش حاصل از منبع ^{241}Am است [۱].

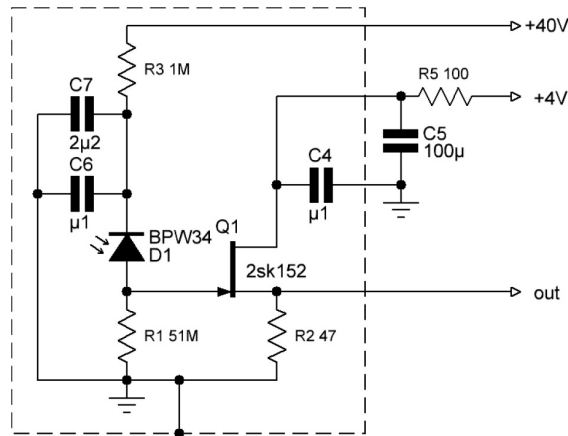
برای اندازه‌گیری این بار کوچک، از پیش‌تقویت‌کننده‌ای استفاده شده که ورودی آن ترانزیستور JFET است. مدار پیشنهاد شده را می‌توان در شکل ۳-۱۴ مشاهده کرد. این مدار شامل دو قسمت پیش‌تقویت‌کننده و تغییر شکل‌دهنده است. دلیل استفاده از مدار دنبال‌کننده سورس ۳-۱۴ (الف) در پیش‌تقویت‌کننده، ظرفیت ورودی کوچک آن است. در حضور ولتاژ گیت-سورس ثابت، خازن گیت-سورس تقریباً صفر می‌شود. همچنین به خاطر قضیه میلر، با ثابت ماندن پتانسیل درین، خازن گیت-درین ثابت مانده و افزایش نمی‌یابد و در نتیجه ولتاژ خروجی متناسب با بار ایجاد شده از حس‌گر می‌شود [۱].

ظرفیت خازن معادل ورودی شامل FET ورودی (برای ترانزیستور 2SK152 برابر 2 pF)، دیود نوری BPW34 تحت ولتاژ بایاس 40 V (10 pF) و کابل‌های ارتباطی 15 pF شده است. از این رو برای بار $2/6 \text{ fC}$ ولتاژ خروجی پیش‌تقویت‌کننده 17 mV است [۱].

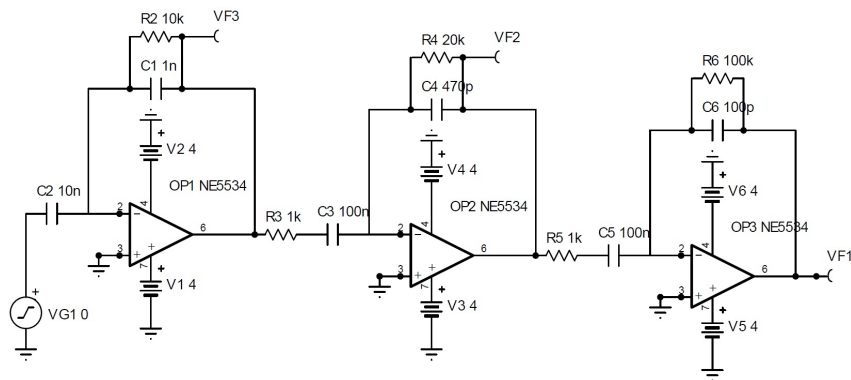
ولتاژ خروجی مدار دنبال‌کننده سورس به تقویت‌کننده راه‌انداز شکل ۳-۱۴ (ب) وارد شده و تحت بهره 2000 و زمان تغییر شکل $50 \mu\text{s}$ قرار گرفته است. این تقویت‌کننده شامل یک طبقه مشتق‌گیر و دو طبقه انتگرال‌گیر است. سپس خروجی توسط مدار ADC به میکروکنترلر منتقل شده و اطلاعات دیجیتال شده توسط پروتکل UART-USB به رایانه منتقل می‌شود [۱].

برای اندازه‌گیری در حالت شمارش، منبع ^{137}Cs با فعالیت $55/5$ کیلو بکرل استفاده شده است. وقتی حس‌گر در فاصله 15 سانتی‌متری از منبع قرار دارد، در مدت‌زمان 330 ثانیه، 275 شمارش ثبت شده است. این امر حاکی از آن است که حساسیت BPW34 برابر counts/R $10^6 \times 1/4$ است. جدول ۳-۲ به مقایسه آشکارساز نیمه‌هادی و گایگر مدل SBM-21 می‌پردازد. طبق این جدول با این که حساسیت گایگر بسیار بیش‌تر از دیود نوری بوده ولی دیود نوری دارای ابعاد و وزن کوچک‌تر بوده و همچنین ولتاژ بایاس کم‌تری نیاز دارد. به همین دلیل در کاربردهای عملی کار با آن بسیار راحت‌تر است. شکل ۳-۱۵ طیف رسم شده برای عنصرهای ^{179}Ta و ^{241}Am را نشان می‌دهد. مقدار تفکیک‌پذیری انرژی^۱ در این سامانه برای قله ^{179}Ta

^۱FWHM



(الف)



(ب)

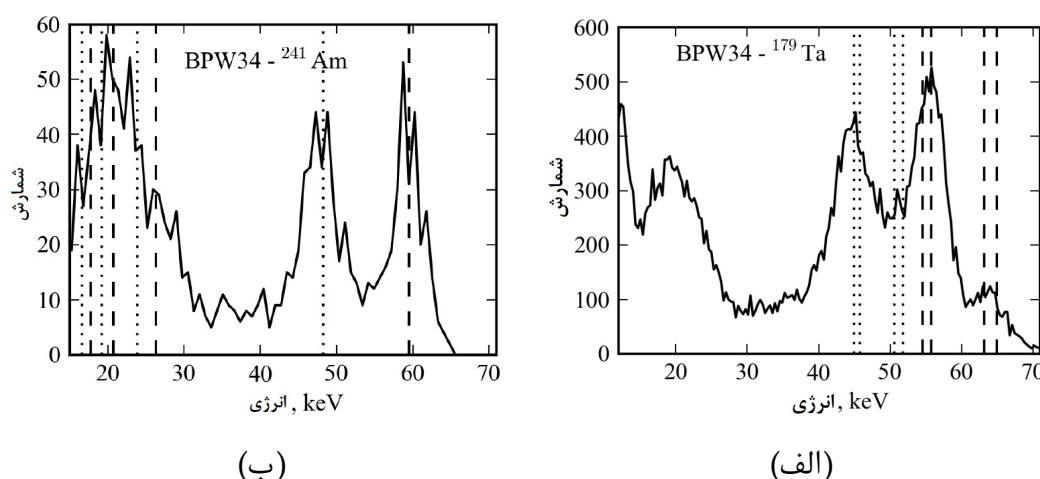
شکل ۳-۱۴: (الف) پیش تقویت کننده مبتنی بر FET، (ب) تقویت کننده راه انداز سه طبقه [۱]

برابر ۶ keV بوده و میزان سطح نویز هم برابر ۶ keV بدست آمده است [۱]. از مزایای این مدار می توان به تفکیک پذیری و سطح نویز خوب آن اشاره کرد. اما عیب بزرگ این ساختار وجود ولتاژ بایاس ۴۰ ولت برای دیود نوری بوده که سبب بزرگ تر شدن خازن های کنارگذر^۱ می شود که در نتیجه ابعاد دستگاه بزرگ خواهد شد.

جدول ۳-۲: مقایسه آشکارساز نیمه هادی و لوله گایگر [۱]

آشکارساز	حساسیت به ^{137}Cs (counts/R)	ولتاژ بایاس (v)	ابعاد (mm)
BPW34	۱/۴	۴۰-۳۰	۲×۴/۳×۴/۶۵
SBM-21	۳۰	۳۲۰-۲۶۰	طول: ۲۱، قطر: ۶

^۱Bypass



شکل ۳-۱۵: (الف) طیف انرژی عنصر Ta ، (ب) طیف انرژی عنصر Am [۱]

۳-۳-۵ سامانه ارزان قیمت شناسایی رادون

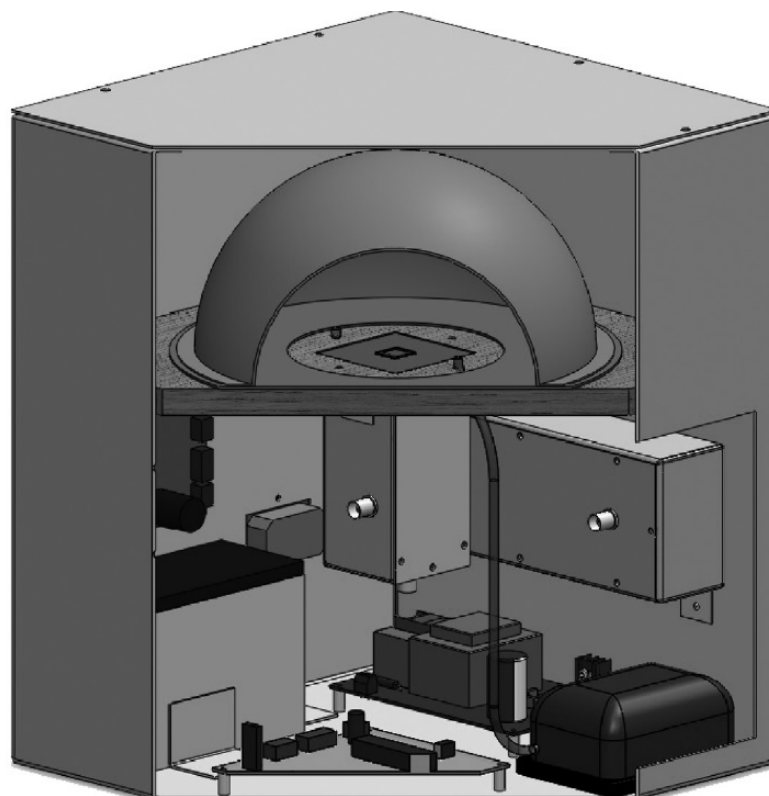
مقاله [۱۰] در مورد یک سامانه کامل و ارزان قیمت آشکارساز رادون بوده که برای پیش بینی زلزله در فاصله ۱۲۰۰ km شهر Anatolia شمالی به کار رفته است. این دستگاه، طراحی، ساخت و آزمایش شده است و از حس گر Ps-100-7-CER-2، نوعی دیود نوری بدون روکش، و یک تقویت کننده حساس به بار برای شمارش استفاده شده است. شمای این دستگاه در شکل ۳-۱۶ آمده است. بخش بالایی مربوط به محفظه جمع کننده^۱ و بخش پایینی مربوط به مدار الکترونیکی است. به منظور جمع آوری محصولات رادون طبیعی یونیزه شده بر روی سطح دیود نوری PIN، یک ولتاژ ۳۵۰۰ V بین دیود نوری و روکش نیم دایره‌ای محفظه جمع کننده دستگاه برقرار شده است. علاوه بر سرعت شمارش محصولات رادون، فشار مطلق، رطوبت و دما در طی اندازه گیری‌ها ثبت شده است. یک مودم SM 6 برای انتقال اطلاعات شمارش از نقاط مختلف به مرکز پردازش اطلاعات استفاده شده است [۱۰].

حس گر Ps-100-7-CER-2 به دلیل مشخصات الکتریکی خوبی که نسبت به سایر دیودهای نوری دارد، در این تحقیق به کار رفته است. از جمله مشخصات آن شامل: بسته بندی سرامیکی، اندازه ناحیه فعال 100 mm^2 ، بیشینه ولتاژ بایاس معکوس 5°V و جریان نشتی 5 nA است [۱۰].

این دستگاه از طریق شناسایی ذرات آلفا حاصل از واپاشی عنصر ^{222}Rn ، وجود این عنصر را تشخیص می دهد. این ذرات انرژی بین ۴ MeV تا ۱۰ MeV دارند. سپس با زیر نظر گرفتن فعالیت رادون با استفاده از این روش در خطوط گسل، زلزله را پیش بینی می کند [۱۰]. مدار الکتریکی ردیاب رادون شامل قسمت های آشکارساز، تأمین کننده ولتاژ بالا^۲، فیلتر،

¹Collection chamber

²High voltage



شکل ۳-۱۶: شمایی از یک ردیاب رادون [۱۰]

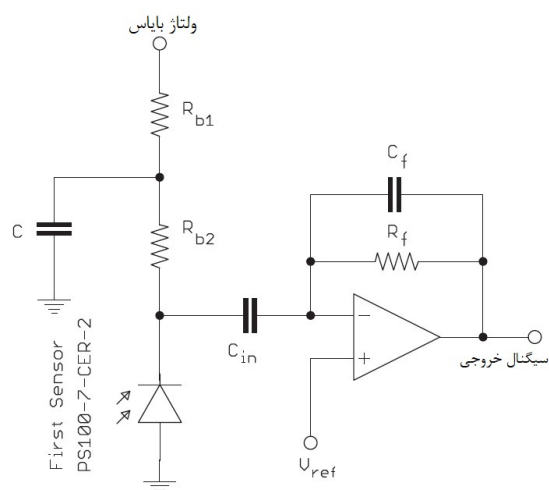
انتخاب کننده و توزیع کننده توان^۱، واحد حس گر و واحد اکتساب داده^۲ یا واحد SMS است [۱۰]. آشکارساز مهم ترین بخش تشکیل دهنده این سامانه بوده و از آن به عنوان قلب این سامانه یاد شده است. این بخش شامل سه قسمت پیش تقویت کننده و شکل دهنده پالس، مقایسه کننده و تحلیل گر چند کاناله یا MCA است. این بخش ها در شکل ۳-۱۷ آورده شده اند [۱۰]. آزمایش اولیه مدار سامانه با قرار دادن مستقیم ^{222}Rn روی حس گر انجام گرفته است. برای طیف نگاری این منبع از تحلیل گر چند کاناله جیبی مدل MCA-8000A شرکت Amptek استفاده شده است. این تحلیل گر به خروجی مدار آشکارساز متصل شده تا بتواند نمودار طیفی منبع ^{222}Rn را رسم کند. شکل ۳-۱۸ نتیجه این طیف نگاری را نشان می دهد. طبق این نتیجه، دو قله ۶ MeV و ۷/۶۹ MeV که به ترتیب انرژی ذرات آلفا ناشی از واپاشی ^{222}Rn به ^{218}Po و ^{214}Po بوده، نمایش داده شده است. این آزمایش برای تنظیم^۳ سامانه صورت گرفته است [۱۰].

نتایج طیف سنجی نشان می دهد که این آشکارساز همراه با دیود نوری Ps-100-7-CER-2 به انرژی حاصل از ذرات آلفا حساسیت مناسبی دارد. از معایب این طرح وجود های ولتاژ برای راندن ذرات یونیزه و اندازه گیری آن ها است. در این تحقیق در رابطه با آشکارسازی ذرات گاما

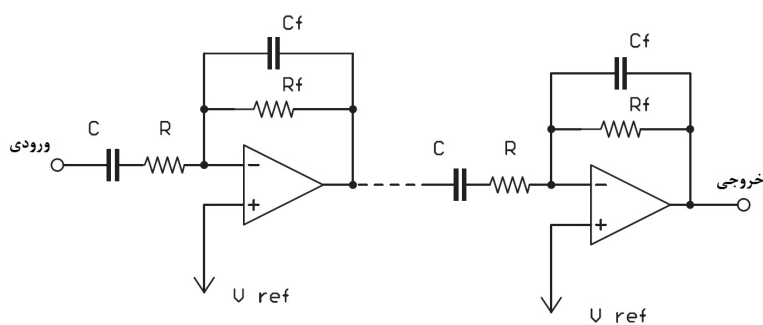
¹Power selector distributor

²Data logger

³Calibration

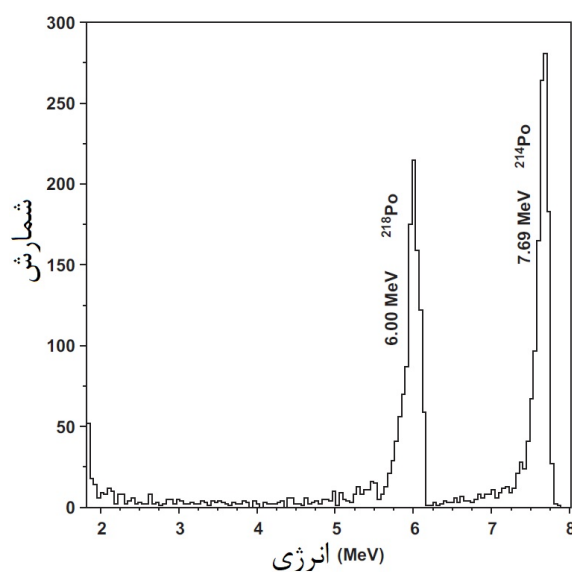


(الف)



(ب)

شکل ۳-۱۷: (الف) پیش تقویت کننده ترانس امپدانس ، (ب) شکل دهنده پالس [۱۰]



شکل ۳-۱۸: اندازه گیری رادون توسط کنترل کننده های موجود در زیرزمین ساختمان ITU در مدت ۱۲ روز [۱۰]

و یا X هیچ اظهارنظری نشده و به دلیل عدم قرار دادن نام و مقادیر قطعات به کار رفته در مدار آشکارساز، نمی‌توان در مورد آشکارسازی ذرات ذکر شده صحبت کرد چرا که مقدار بهره و نویز سامانه نامعین بوده و در نتیجه ممکن است انرژی‌های پایین‌تر را آشکار نکند.

۳-۳-۶ ساخت و آزمایش آشکارساز تابش گاما

پایان‌نامه [۱۲] مربوط به ارتقاء و بهبود آشکارساز تابش گاما که در آزمایشگاه دکتر جینگ^۱ در دانشگاه فنی تگزاس وجود دارد، است. اهداف این تحقیق، ساخت آشکارسازی ارزان‌قیمت و کوچکتر نسبت به نمونه قبلی و تغییر نحوه نمایش داده‌های خروجی است. سامانه قبلی داده‌ها را به صورت لحظه‌ای در رایانه نمایش نمی‌داد. اما در این پژوهش اطلاعات کاملاً به صورت لحظه‌ای، در گوشی‌های اندرویدی^۲ و رایانه‌های لوحی^۳ از جمله iPad نمایش داده شده است. این اطلاعات شامل طیف تابش‌های اندازه‌گیری شده است.

از جمله آشکارسازهای مرسوم موجود در آزمایشگاه، آشکارساز Amptek xr-100t است. این آشکارساز توانایی آشکار تابش‌های X و گاما را دارد. دیود به کار رفته به عنوان حس‌گر از نوع تلوراید کادمیوم بوده (CdTe) که ناحیه حساس آن دارای مساحت 9mm^2 و قطر 1mm است. پیش‌تقویت‌کننده آن دارای حساسیت 82mV/keV بوده که بر روی دوطبقه سرد کننده ترموالکتریک قرار گرفته است. ابعاد این دستگاه $3 \times 1.75 \times 1.13$ اینچ است. هنگامی که گاما به حس‌گر CdTe برخورد می‌کند، به طور متوسط هر $4/43\text{eV}$ انرژی گاما، یک زوج الکترون-حفره به وجود می‌آورد. این انرژی ناچیز در اثر پدیده فتوالکتریک و یا پدیده کامپتون به وجود می‌آید. در نهایت بار به وسیله پیش‌تقویت‌کننده و FET به ولتاژ تبدیل شده و اندازه‌گیری می‌شود. سامانه سردکننده برای کنترل دمای حس‌گر و FET تعبیه شده است. بازده این آشکارساز در انرژی‌های 10keV تا 55keV ، صد درصد گزارش شده است [۱۲].

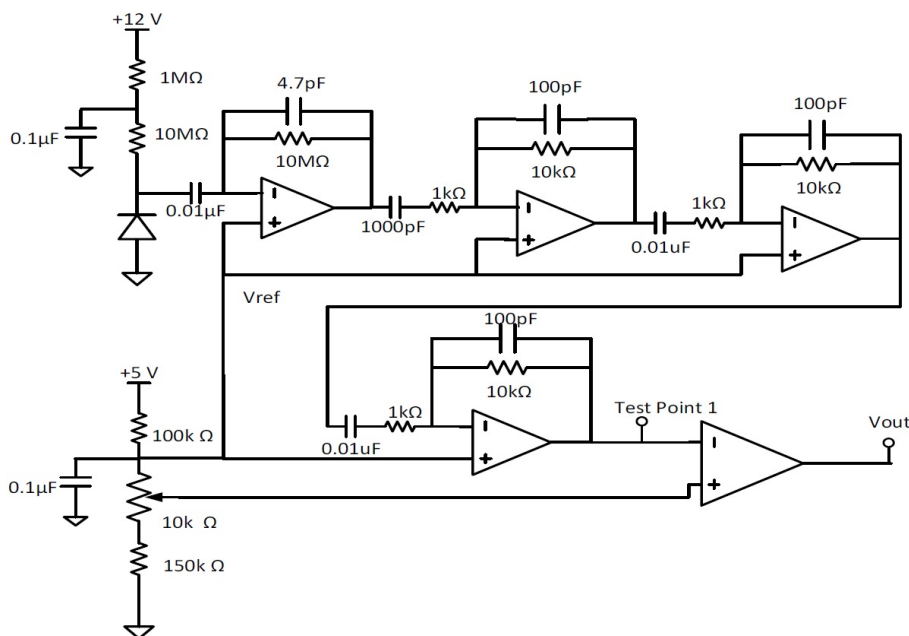
مدار مورد استفاده برای ساخت آشکارساز تحقیق [۱۲]، در شکل ۳-۱۹ آورده شده است. هنگامی که تابش گاما در حال عبور از دیود نوری است، با یک الکترون در پیوند p-n برخورد می‌کند. این امر سبب ایجاد بار در ورودی مدار آشکارساز می‌شود. مدار آشکارساز، بار ایجاد شده را با استفاده از خازن به ولتاژ تبدیل کرده؛ سپس سیگنال تقویت شده توسط چهار طبقه فیلتر به مقایسه‌گر می‌رسد. مقایسه‌گر وظیفه تفکیک اطلاعات از نویز را دارد [۱۲].

پس از بستن مدار شکل ۳-۱۹ بر روی برد مدار چاپی و استفاده از MAX4478 به عنوان تقویت‌کننده‌های عملیاتی و مقایسه‌کننده MAX987 برای طبقه آخر، ولتاژ ۱۲ ولت برای تغذیه عناصر مدار و بایاس حس‌گر استفاده شده است. همچنین دیود نوری QSE773 به عنوان حس‌گر در طبقه اول استفاده شده است. شکل ۳-۲۰ مدار چاپی ساخته شده مدار شکل ۳-۱۹ را نشان می‌دهد.

¹Dr Jiang

²Android phone

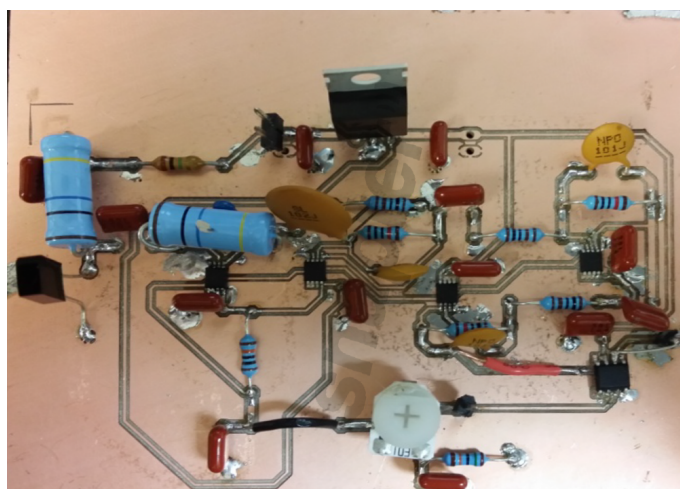
³Tablet



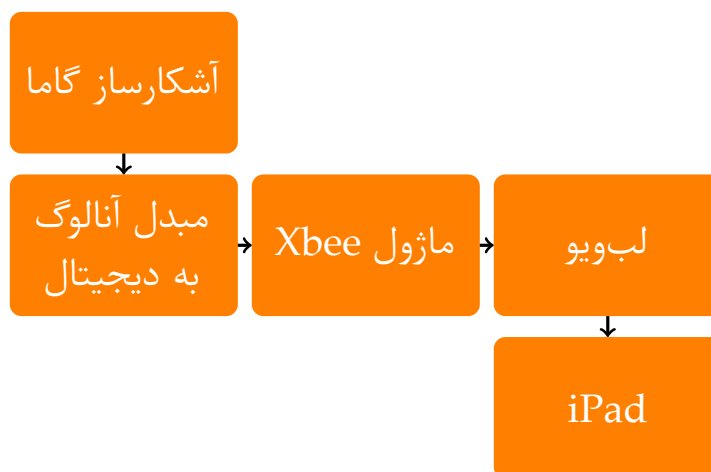
شکل ۳-۱۹: مدار آشکارساز [۱۲]

پس از آزمایش مدار، اطلاعات به گوشی همراه هوشمند یا رایانه لوحی منتقل شده است. نمودار بلوکی شکل ۳-۲۱ این روند را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار بلوکی بعد از آشکارسازی تابش گاما، اطلاعات توسط یک میکروکنترلر آردوینو دیجیتال شده و از آن به واسطه ماژول Xbee pro900 از طریق بی‌سیم به نرم‌افزار لب‌ویو در رایانه منتقل شده است. در نهایت با برنامه نویسی، نمودار طیفی محاسبه شده و به iPad منتقل و نمایش داده می‌شود [۱۲].

مدار تحت منابع رادیواکتیو با شدت‌های ۴۲ میلی‌کوری^۱ و ^{241}Am یک میکروکوری قرار گرفته است. انرژی تابش گاما این منابع به ترتیب برابر 33°keV و 6°keV است. نتایج در



شکل ۳-۲۰: مدار چاپی سامانه آشکارساز [۱۲]

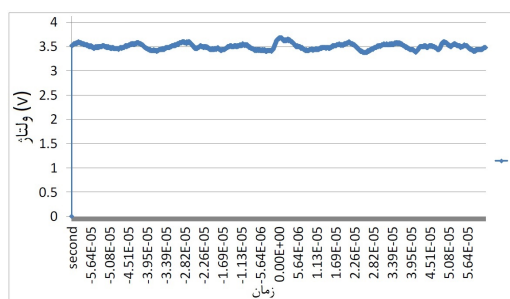


شکل ۳-۲۱: نمودار بلوکی سامانه آشکارساز [۱۲]

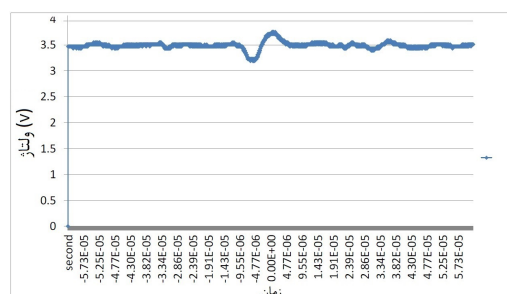
شکل ۳-۲۲ نشان داده شده است. طبق این نتایج مدار به منبع 33°keV واکنشی خوبی نشان داده و دامنه خروجی نزدیک به یک ولت قله تا قله رسیده است. اما واکنش مدار به منبع ^{241}Am ، قابل ملاحظه نبوده و طبق اندازه‌گیری‌های انجام شده، دامنه خروجی این پالس 25° میلی‌ولت قله تا قله است [۱۲].

شکل ۳-۲۳ نتیجه طیف‌سنجی تابش گاما با استفاده از سامانه آشکارساز ساخته شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. این طیف توسط لبویو برای پالس‌هایی با دامنه بزرگتر از $3/27$ بدست آمده است. پالس‌های زیر این ولتاژ، نویز محسوب می‌شوند [۱۲].

نتایج شکل ۳-۲۲، حساسیت مدار را به انرژی‌های بالای 10°keV و زیر آن نشان می‌دهد. در انرژی‌های پایین، پالس‌ها به سختی از نویز قابل تفکیک هستند. یکی از عوامل این امر کیفیت پایین برد مدار چاپی و جایگذاری نامناسب قطعات روی آن است. به عنوان مثال فاصله دیودنوری و پیش‌تقویت‌کننده زیاد بوده که این امر ظرفیت ورودی پیش‌تقویت‌کننده را بزرگ کرده و در نتیجه سیگنال خروجی پیش‌تقویت‌کننده دچار نویز می‌شود. همچنین سطح

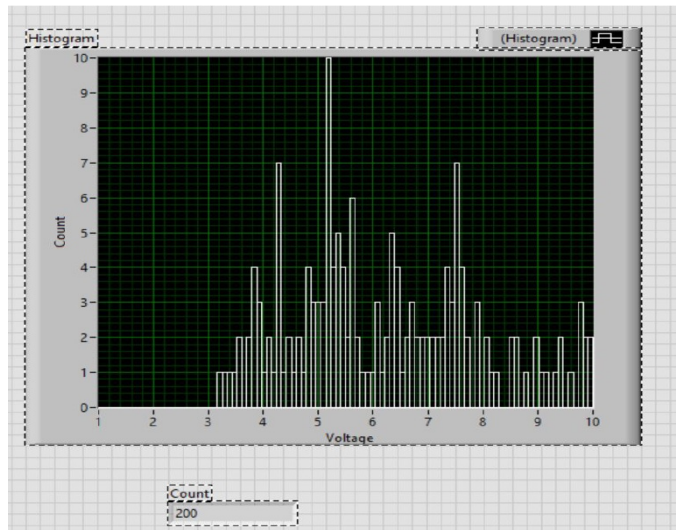


(ب)



(الف)

شکل ۳-۲۲: (الف) آزمایش گاما با منبعی به شدت 42 میلی‌کوری و انرژی 33°keV ، (ب) آزمایش گاما با منبعی به شدت 1 میکروکوری و انرژی 6°keV [۱۲]



شکل ۳-۲۳: اطلاعات طیفی رسم شده در لبویو [۱۲]

بزرگی از مدار بدون جایگذاری قطعات در آن، رها شده است که سبب ایجاد جریان نشستی بر روی برد شده که نویز مدار افزایش می‌یابد. این امر از معایب ساخت این سامانه به حساب می‌آید. از مزایای این ساختار، وجود پیش تقویت کننده با نویز بسیار کوچک است. به علاوه، سه طبقه تقویت کننده که در ساختار تغییر شکل دهنده پالس قرار گرفته‌اند، تابش‌ها با انرژی‌ها کوچک را می‌تواند به خوبی آشکار کنند.

۷-۳-۳ دستگاه تصویربرداری ارزان قیمت تابش X

در تحقیق [۲] یک دستگاه تصویربرداری ساده و ارزان قیمت تابش X بر مبنای دیود نوری تجاری و ارزان قیمت BPW34 معرفی شده است. اولویت طراحی این دستگاه، تصویربرداری سریع نیست، بلکه اولویت، داشتن یک کیفیت تصویر قابل قبول و حداقل هزینه ساخت است. هزینه کلی دستگاه تصویربرداری ارائه شده در این مقاله کم‌تر از ۱۰۰۰ دلار شده است. دستگاه‌های تصویربرداری تابش X در طیف وسیعی از کاربردهای صنعتی نقش دارند. زمان تصویربرداری تابش X برای بسیاری از کاربردها از جمله تصویربرداری پزشکی مهم است. زیرا دز جذب شده توسط بیمار باید حداقل باشد. با این حال در برخی موارد مانند بررسی نمونه‌های باستان‌شناسی با تابش X، زمان قرارگیری در معرض تابش مسئله مهمی نیست. برای چنین موردی، یک دستگاه تصویربرداری با هزینه پایین که به راحتی در دسترس باشد، بسیار مفید است [۲].

برای ساخت و آزمون این دستگاه نیاز به منبع تابش X است. برای این منظور از تیوب دندان پزشکی تابش X مدل CEIOX/70-P استفاده شده که در حال تابش به نمونه مورد نظر است. در ابتدا، طراحی مدار ولتاژ بالا برای فعال کردن این تیوب انجام شده است [۲]. سامانه آشکارساز شامل سه طبقه است. در طبقه اول از دیود نوری تجاری BPW34 استفاده

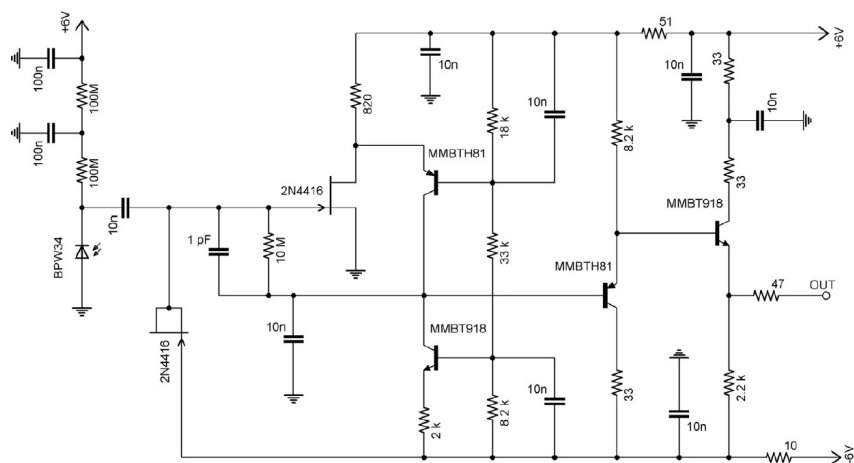
شده است. این دیود نوری به عنوان عنصر آشکارساز فعال مورد استفاده قرار گرفته است. ورق آلومینیومی با قطر ۱mm بر روی حسگر قرار گرفته تا هیچ نوری به آن برخورد نکند [۲]. طبقه دوم شامل یک پیش تقویت کننده حساس به بار بوده که ترانزیستور ورودی آن از نوع FET است. این پیش تقویت کننده در نزدیک ترین فاصله به دیود نوری قرار گرفته است. مدار این دو طبقه را می توان در شکل ۳-۲۴ مشاهده کرد [۲].

طبقه سوم مربوط به تغییر شکل دهنده پالس است. جذر میانگین مربعات یا مقدار موثر (RMS)^۱ نویز در خروجی این طبقه ۲۰mv اندازه گیری شده است. طرح کلی این بخش در شکل ۳-۲۵ آورده شده است [۲].

تنظیم انرژی این سامانه با استفاده از منبع ^{109}Cd که انرژی معادل ۲۲keV و منبع ^{241}Am که انرژی معادل ۵۹/۵۴keV دارد، انجام شده است. شکل ۳-۲۶ نتایج طیف سنجی این مدار را نشان می دهد. با توجه به این نتایج، محدودیت تشخیص این سامانه به اندازه ۱۰keV بوده که بزرگتر از بیشینه نویز موجود است. برای انتخاب انرژی هایی بالاتر از این محدودیت، از مدار مقایسه گر در خروجی طبقه شکل دهنده استفاده شده است [۲].

بعد از ساخت، آشکارساز توسط یک دستگاه کنترل موقعیت دو بعدی در گام های کوچک حرکت کرده و در هر گام شمارش را انجام می دهد [۲].

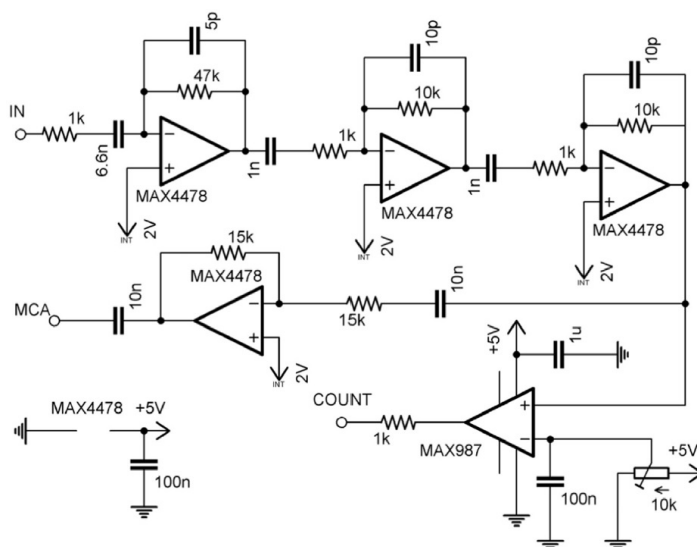
بخش های مختلف سامانه با توجه به شکل ۳-۲۷ در کنار هم قرار گرفته اند. نمونه و منبع تابش به صورت ثابت قرار گرفته و آشکارساز در مقابل نمونه توسط واحد کنترل موقعیت، حرکت می کند. سپس تعداد پالس های شمارش شده در هر گام توسط یک ثبات ذخیره و به وسیله یک FPGA مدل Aessent AES220B به رایانه منتقل می شود. شدت سنج در گوشه تابش تابیده شده از منبع قرار گرفته تا از شمارش فوتون های پراکنده جلوگیری کند. برای افزایش کیفیت تصویر از کولیماتور^۲ در خروجی تیوب تابش X استفاده شده است. همچنین فاصله



شکل ۳-۲۴: طرح کلی مدار پیش تقویت کننده همراه با دیود نوری [۲]

^۱Root means square

^۲Collimator

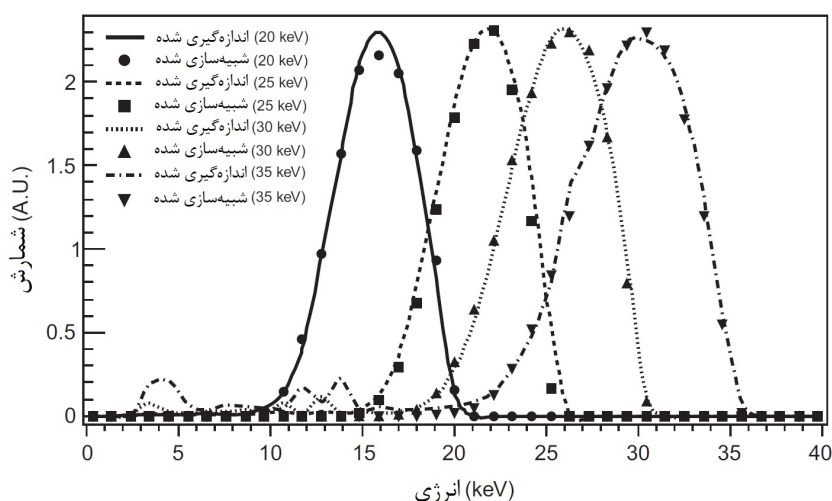


شکل ۳-۲۵: طرح کلی مدار تغییر شکل دهنده پالس [۲]

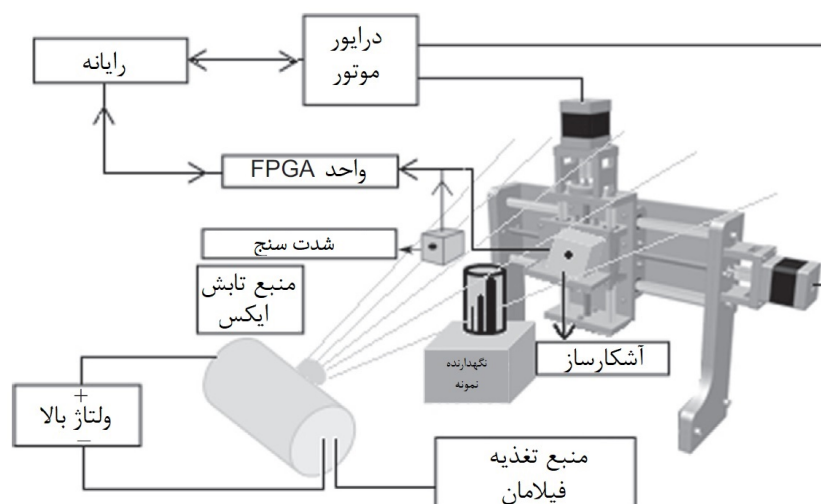
بین نمونه و آشکارساز، حداقل شده است. داده‌های تصویر شامل اطلاعات موقعیت و نرخ شمارش بوده که منجر به ساخت تصاویر خاکستری می‌شود [۲].

شکل ۳-۲۸ تصویر یک ساعت را که تحت تیوب تابش X با ولتاژ $17 \text{ kV} \pm$ قرار گرفته را نشان می‌دهد. این عکس توسط سامانه آشکارساز ۳-۲۷ گرفته شده است. حس‌گر با گام‌های 0.25° میلی‌متر به صورت عمودی و افقی در مقابل نمونه حرکت کرده است [۲].

در این مقاله مشخصات دقیقی از پیش تقویت کننده شرح داده نشده است. طبق نتایج طیف‌سنجی این مدار که در شکل ۳-۲۶ توصیف شد، مدار انرژی‌های بالای 15 keV را آشکار کرده است. این مدار مزایای زیادی از جمله حساسیت مناسب به انرژی‌های پایین و نویز کوچک دارد. از معایب آن می‌توان به ساختار پیچیده پیش تقویت کننده اشاره کرد. همچنین به دلیل استفاده از تعداد زیاد عناصر مختلف در این مدار، احتمالاً توان مصرفی مدار زیاد باشد.



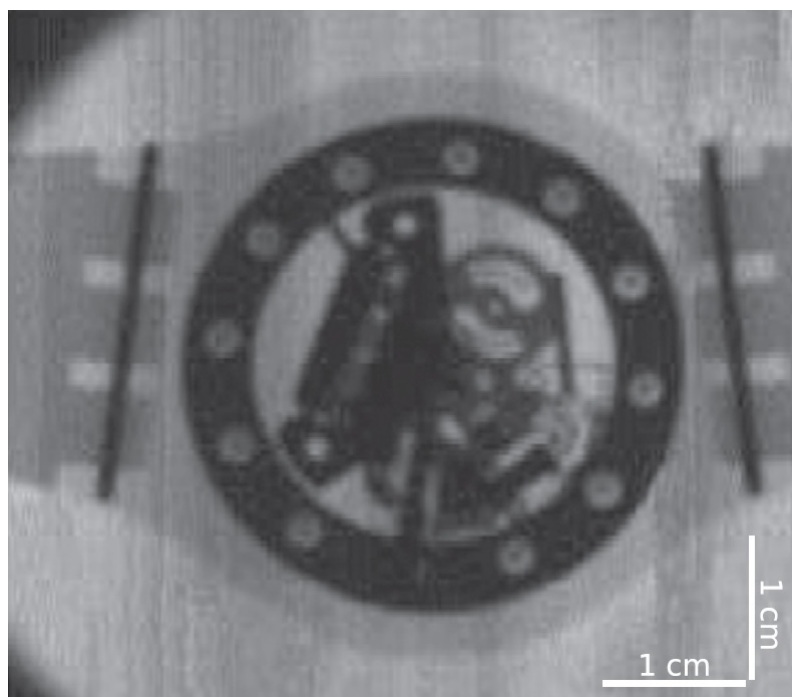
شکل ۳-۲۶: مقایسه طیف اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای انرژی‌های مختلف [۲]



شکل ۳-۲۷: سامانه تصویربرداری [۲]

۳-۳-۸ مقایسه مدارهای حالت پالسی

در مدار شکل ۳-۶ [۷]، تنها دو طبقه تقویت کننده ترانزیستوری برای تقویت سیگنال کوچک حاصل از دیودنوری استفاده شده که بهره پایینی برای سامانه ایجاد می کند. به همین دلیل انرژی های پایین در این مدار به راحتی قابل تفکیک از نویز نیستند. همچنین به دلیل استفاده از ترانزیستور دو قطبی در طبقه اول، نویز قابل توجهی در مدار به وجود می آورد.



شکل ۳-۲۸: تصویر گرفته شده از ساعت با استفاده از تابش X. تعداد گام های افقی ۲۲۹ و عمودی ۲۰۰ عدد است [۲]

از معایب دیگر این ساختار، تزویج DC حس گر با پیش تقویت کننده بوده که سبب ایجاد ولتاژ آفست می شود. این دلایل سبب شده تا این مدار برای آشکارسازی تابش های یونیزان مخصوصا در انرژی های پایین مناسب نباشد.

در مدار شکل ۳-۹ [۸] از یک طبقه پیش تقویت کننده و دو طبقه شکل دهنده پالس برای آشکارسازی استفاده شده است. پیش تقویت کننده دارای ترانزیستور ورودی نوع FET بوده که نویز را به خوبی کاهش می دهد. وجود دو طبقه شکل دهنده CR-RC باعث ایجاد پالس های دو قطبی در خروجی شده که اثر جابه جایی خط پایه و در نتیجه از دست دادن اطلاعات در نرخ های بالای شمارش را کاهش می دهد. با توجه به بهره مناسب، ساختار ساده و تزویج DC طبقه حس گر با پیش تقویت کننده، این مدار گزینه مناسب برای آشکارسازی تابش های یونیزان محسوب می شود. البته باید متذکر شد که تزویج DC طبقه اول و دوم، SNR را افزایش داده، اما موجب ایجاد ولتاژ آفست در پیش تقویت کننده می شود.

ساختار مدار شکل ۳-۱۴ [۱] همچون مدار [۸] از یک طبقه پیش تقویت کننده ترانزیستوری و سه طبقه تغییر شکل دهنده پالس تشکیل شده است. از جمله معایب بزرگ این مدار، ولتاژ بایاس بزرگ دیود نوری، ولتاژ تغذیه دوبل برای تقویت کننده های عملیاتی و قیمت بالای ترانزیستور استفاده شده در پیش تقویت کننده است. با توجه به توضیحات گفته شده، این مدار هزینه ساخت زیاد و ابعاد بزرگی دارد. با توجه به این دلایل و شباهت ساختاری آن به مدار [۸]، گزینه مناسبی برای ساخت در این پایان نامه نیست.

مدار شکل ۳-۱۷ [۱۰] از پیش تقویت کننده با ساختار تقویت کننده عملیاتی استفاده شده است. همچنین در بلوک تغییر شکل دهنده از تعداد نامشخصی شبکه CR-RC بهره گرفته شده است. حس گر به صورت تزویج AC با پیش تقویت کننده قرار گرفته که مدار را در مقابل ولتاژ آفست مصون نگه می دارد. از معایب بزرگ این تحقیق، مشخص نکردن نام قطعات به کار رفته در سامانه آشکارساز و مشخص نبودن تعداد طبقات شکل دهنده پالس است. به همین دلیل در مورد بهره و آشکارسازی انرژی های پایین نمی توان نظر داد. همچنین نتایج تحقیق هم به آشکارسازی انرژی های تابش گاما و X اشاره نکرده است. با توجه به این دلایل و شباهت ساختاری آن به مدار استفاده شده در مرجع [۱۲]، این مدار گزینه مناسبی برای ساخت در این پایان نامه نمی باشد.

در مرجع [۱۲] با توجه به شکل ۳-۱۹، از سامانه آشکارساز با ساختاری مشابه تحقیق [۱۰] استفاده شده است. در این تحقیق حس گر در حالت تزویج AC با پیش تقویت کننده قرار دارد. همچنین وجود سه طبقه تقویت کننده CR-RC، بهره بزرگی را تولید کرده که می تواند انرژی های پایین را آشکار کند. این سه طبقه فیلتر، موجب تولید پالس دوقطبی در خروجی شده که اثر جابه جایی خط پایه را در نرخ های بالای شمارش کاهش می دهد. تقویت کننده عملیاتی استفاده شده در طبقات مختلف این ساختار، نویز و جریان بایاس ورودی کوچکی دارد که سبب تفکیک مناسب پالس از نویز، مخصوصا در انرژی های پایین می شود. این ساختار، از ساختارهای معروف آشکارسازی تابش های یونیزان بوده که در تحقیقات و فعالیت های تجربی

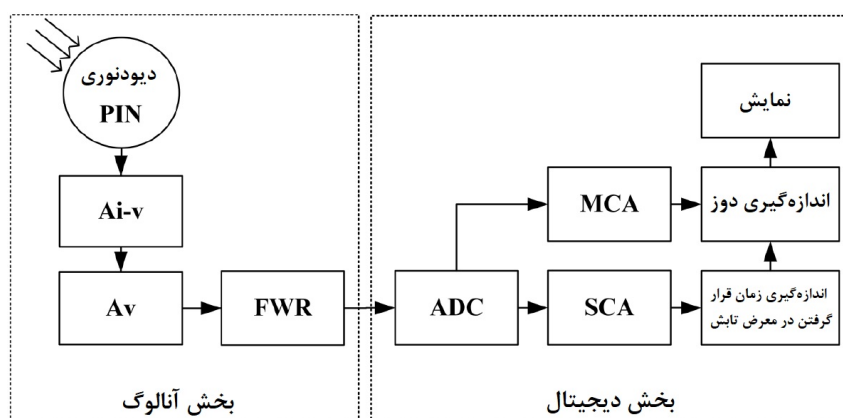
زیادی به کار رفته است. با توجه به این دلایل، این ساختار گزینه مناسبی برای ساخت است. با توجه به نتایج مدار به کار رفته در مرجع [۲] (شکل ۳-۲۴ و ۳-۲۵)، این مدار می‌تواند انرژی‌های پایین را آشکار کند. مدار مورد نظر از پیش تقویت کننده با ساختار ترانزیستوری استفاده کرده است. پیش تقویت کننده از دو طبقه تقویت کننده با بار فعال و دو طبقه دنبال کننده امیتر برای قابلیت جریان دهی استفاده کرده است. در ساختار پیش تقویت کننده، جهت کاهش نویز، بهره حلقه باز نسبت به مدار مرجع [۱۲] محدود شده است. سه طبقه شبکه CR-RC در بلوک تغییر شکل دهنده پالس و استفاده از تقویت کننده عملیاتی MAX4478 در آن‌ها، موجب تولید پالس‌های دوقطبی با دامنه بزرگ و نویز کم خواهد شد. طبق نتایج این تحقیق، انرژی‌هایی با اندازه ۲۲keV تا ۵۹/۵۴keV اندازه‌گیری شده که حساسیت بالای آن را نشان می‌دهد. این دلایل، دلایل مناسبی برای ساخت آن در این پایان‌نامه هستند.

۴-۳ آشکارسازهای حالت جریانی

۱-۴-۳ سامانه دزسنجی جدید برای پرتوشناسی تشخیصی

در مقاله [۱۳] از دیود نوری PIN سیلیکونی BPW34 برای دزسنجی تابش X استفاده شده است. حساسیت نوری زیاد، پاسخ زمانی سریع و ظرفیت خازنی کوچک (۲۵pF) از ویژگی‌های این حس‌گر گزارش شده است. به دلیل ناحیه حساس بزرگ ($7/5mm^2$) و جریان نشتی کم ($2nA$)، این حس‌گر برای آشکار ذرات و فوتون‌های پرنرژی مناسب است. این سامانه دزسنج بسیار ارزان قیمت بوده به طوری که حس‌گر، تقویت کننده سیگنال و مدار اکتساب داده جمعاً کم‌تر از ۳۵ دلار هزینه شده است. شکل ۳-۲۹ نمودار بلوکی سامانه دزسنج که از سه بخش اصلی حس‌گر، مدار اندازه‌گیری آنالوگ و پردازش سیگنال تشکیل شده است، را نشان می‌دهد [۱۳].

تابش X بر روی ناحیه حساس دیود نوری که در بایاس معکوس قرار گرفته، ایجاد زوج



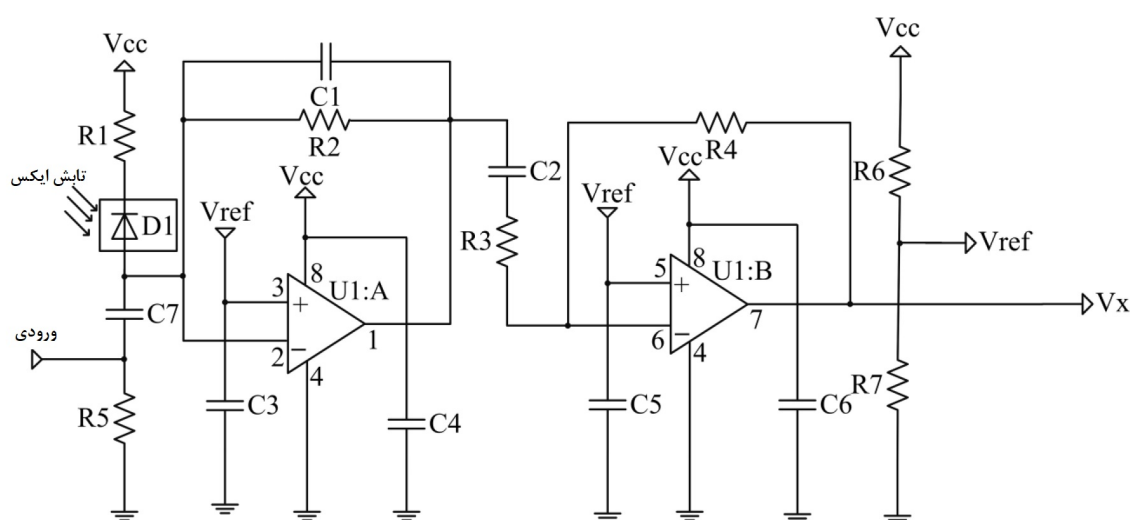
شکل ۳-۲۹: نمودار بلوکی سامانه دزسنجی PIN [۱۳]

الکترون-حفره می‌کند. این بارها بر روی جریان نشتی دیود نوری تأثیر گذاشته و باعث تغییر در آن می‌شود. سپس این جریان توسط بلوک A_{i-v} که همان پیش تقویت کننده جریان به ولتاژ است، اندازه‌گیری شده و سیگنال خروجی چند برابر می‌شود. بلوک FWR یا یکسوکننده تمام موج^۱ برای ارزیابی اندازه تغییرات سیگنال در انتهای قسمت آنالوگ قرار گرفته و سیگنال را برای بخش پردازش آماده می‌کند. طرح کلی مدار آنالوگ در شکل ۳-۳۰ قابل مشاهده است [۱۳].

بلوک ADC یا مبدل داده، سیگنال آنالوگ را با سرعت ۲۵۰ MHz و دقت ۸ bit به دیجیتال تبدیل می‌کند. بلوک SCA یا تحلیل گر تک کاناله دامنه جریان نشتی، تابش‌های پس‌زمینه و سایر منابع نویز را برای تشخیص بازه تابش X ورودی و نمونه برداری در زمان‌های تحریک توسط تابش، اندازه می‌گیرد. سپس بلوک اندازه‌گیری زمان قرار گرفتن در معرض تابش، زمان بین هر دو تحریک پشت سرهم را بدست می‌آورد. بلوک MCA یا تحلیل گر چند کاناله، اطلاعات سیگنال‌های ورودی را در رشته‌ای ذخیره کرده و زمانی که سیگنال ورودی نباشد، طیف را رسم می‌کند. دز جذب شده از طریق جمع دامنه‌های وزن داده شده^۲ که در هر کانال اندازه‌گیری شده است، در بلوک بعدی بدست می‌آید [۱۳].

یک لایه نازک از آلومینیوم با قطر تقریبی ۱۵ μm برای محافظت الکترومغناطیسی و نوری حس گر به کار رفته است. همچنین یک کابل هم محور^۳، حس گر را به مدار آنالوگ متصل کرده است. در نهایت مقدار دز اندازه‌گیری شده از رابطه ۳-۱، نمایش داده می‌شود.

$$\text{دز جذب شده} = C_f \times \sum_{N=N_b}^{N_r} (K_v \times N) \quad (1-3)$$



شکل ۳-۳۰: طرح کلی مدار آنالوگ [۱۳]

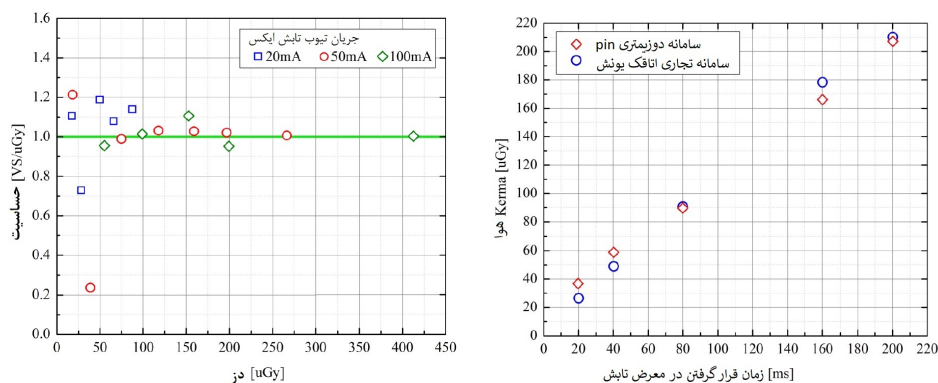
^۱ Full-wave rectifier

^۲ وزن هر دامنه با شماره کانال یکسان است.

^۳ Coaxial

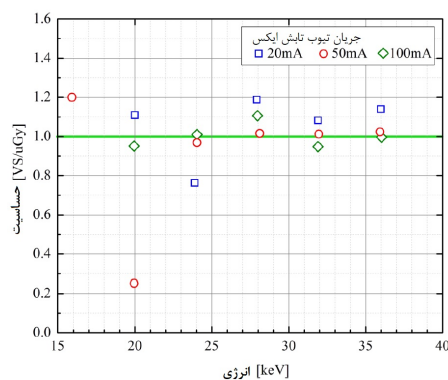
در این رابطه K_v اندازه سیگنال در نمودار طیفی و N شماره کانال است. خروجی بدست آمده با خروجی دزسنج تجاری مدل PTW 7734 با اتاقک یونش به حجم 1cm^3 ، مقایسه شده است. مقدار C_f در رابطه ۳-۱ برای تناسب شیب دو نمودار مقایسه شده به کار رفته است [۱۳]. برای آزمایش این سامانه، لوله تولید کننده تابش X رادیولوژی^۱ به عنوان منبع استفاده شده است. حس گرها با استفاده از 3°cm کابل هم محور به مدار متصل شده و در کنار دزسنج تجاری، در فاصله 2°cm از منبع قرار گرفته اند. به فاصله حس گر از منبع در تمام آزمایش ها توجه شده است [۱۳].

شکل ۳-۳۱ (الف) نتایج اندازه گیری شده توسط سامانه دزسنج PIN و دزسنج تجاری PTW 7734 را در Kerma هوا نسبت به زمان تابش، برای جریان و ولتاژ 5°mA و 7°kV_p تیوب X، نشان می دهد. شکل ۳-۳۱ (ب) و ۳-۳۱ (ج) نشان دهنده حساسیت سامانه دزسنجی PIN به ترتیب بر اساس دز و انرژی است. در شکل ۳-۳۱ (ب) برای دزهای کم تر از 5° میکروگری،



(ب)

(الف)



(ج)

شکل ۳-۳۱ (الف) نمودار Kerma هوا بر حسب زمان تابش برای دزسنج ساخته شده و استاندارد، (ب) حساسیت دزسنج ساخته شده بر حسب دز اندازه گیری شده، (ج) حساسیت دزسنج ساخته شده بر حسب انرژی فوتون اندازه گیری شده برای سه جریان مختلف تیوب [۱۳]

¹Radiological X-ray tube

سامانه به صورت خطی عمل نکرده است. اما بیش‌تر از 5° میکروگری، خطا سامانه کاهش یافته و سامانه پایدارتر شده است.

در شکل ۳-۳۱ (ج) با افزایش انرژی فوتون X از 16keV تا 40keV ، حساسیت سامانه تقریباً ثابت مانده است [۱۳].

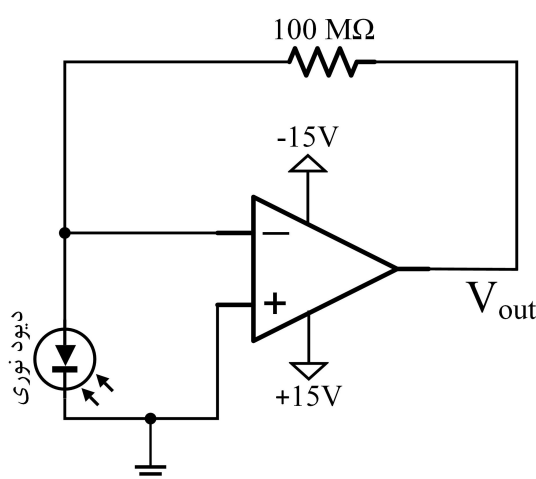
از مزایای این سامانه می‌توان به قیمت ارزان ساخت آن و حساسیت مناسب و پایدار در بازه انرژی‌های 16keV تا 40keV اشاره کرد. مدار استفاده شده در قسمت آنالوگ، دیود را بایاس کرده و از دو طبقه تقویت‌کننده استفاده کرده است. معمولاً زمانی نرخ دز مهم می‌شود که شدت تابش منبع رادیواکتیو زیاد باشد. در این حالت از مدارهای حالت جریانی بهره گرفته می‌شود که به دلیل شدت تابش بالا، دیود بایاس نمی‌شود و تنها با استفاده از یک طبقه تقویت‌کننده کم‌نویز می‌توان دامنه بزرگی در خروجی تولید کرد. مدار استفاده شده در این مقاله به نظر مدار پیچیده‌ای بوده که این امر توان مصرفی و اندازه سامانه را افزایش می‌دهد.

۲-۴-۳ بهینه‌سازی انرژی در سامانه آشکارساز حالت جریانی

هدف تحقیق [۱۵]، بررسی پاسخ مناسب آشکارسازهای گاما مبتنی بر دیود نوری در حالت جریانی است. آزمایش در بازه وسیعی از انرژی‌ها انجام شده است.

در این مقاله ابتدا یک دیود سیلیکون PIN با استفاده از کد مونت کارلو FLUKA^۱ شبیه‌سازی شده و پاسخ آن با استفاده از یک فیلتر کامپوزیتی بررسی شده است. سپس نتایج به صورت عملی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

برای تحقیق نتایج عملی، مدار آشکارساز شکل ۳-۳۲ به کار رفته است. این مدار شامل یک طبقه تقویت‌کننده عملیاتی حساس به جریان است که جریان حاصل از دیود نوری را به



شکل ۳-۳۲: مدار آشکارساز حالت جریانی برای اندازه‌گیری دز تابش X با استفاده از دیود نوری سیلیکونی [۱۵]

^۱ یکی از کدهای چند منظوره مونت کارلو بوده که برای تولید طیف تابش X به کار می‌رود.

ولتاژ تبدیل کرده و پس از تقویت آن را به خروجی می‌برد. محدوده جریان حاصل از دیود نوری بین ۱۰ پیکو آمپر تا ۱۰۰ نانو آمپر است [۱۵].

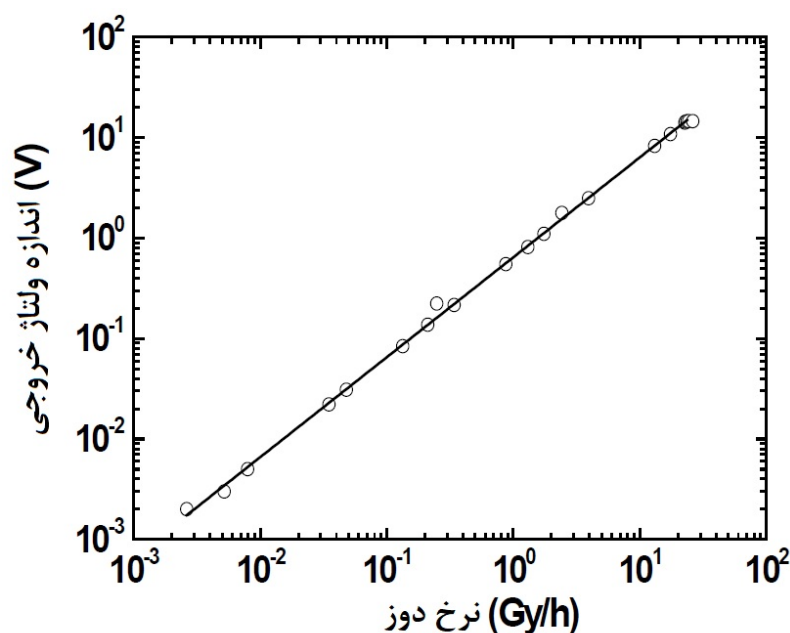
شکل ۳-۳۳ ولتاژ خروجی آشکارساز را بر حسب نرخ دز در بازه ۲/۶۳۱ mGy/h تا ۲۳/۶۷۹ Gy/h، در حالتی که در مقابل دیود هیچ فیلتری نباشد، را نشان می‌دهد. در نرخ دزهای بالاتر، تقویت‌کننده به اشباع می‌رود. پس می‌توان نتیجه گرفت این سامانه به عنوان سنجش نرخ دز در این بازه عمل کرده که برای تنظیم، از منحنی این شکل استفاده شده است. این امر در صورتی امکان پذیر بوده که بهینه‌سازی انرژی صورت گیرد. بهترین معادله خطی برای توصیف منحنی تنظیم، به صورت لگاریتمی عبارت است از:

$$\log |V|(Volt) = 0.99432 \times \log(D(Gy/h)) - 0.19132 \quad (۲-۳)$$

و در حالت ساده تر برابر می‌شود با:

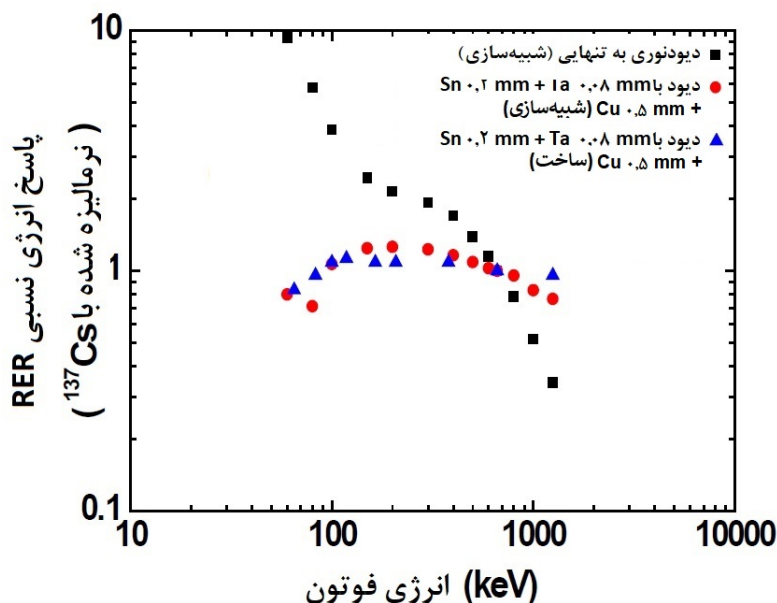
$$|V|(Volt) = 0.64369 \times \log(D(Gy/h))^{0.99432} \quad (۳-۳)$$

شکل ۳-۳۴ پاسخ انرژی نسبی (یا RER^۱) دیود نوری را بر حسب انرژی فوتون نشان می‌دهد. این آزمایش در حضور و عدم حضور فیلتر کامپوزیتی بهینه با فلزهای Ta، Sn و Cu انجام گرفته است. نتایج آن برای شبیه‌سازی و ساخت رسم شده است. این نمودار نشان می‌دهد در صورت استفاده از فیلتر کامپوزیتی، پاسخ به انرژی‌های پایین کاهش، و در انرژی‌های بالا افزایش یافته است. این امر سامانه را قادر ساخته تا پاسخ آن در بازه وسیعی از انرژی سطح و یکنواخت شود.



شکل ۳-۳۳: رابطه خطی بین ولتاژ خروجی سامانه و نرخ دز [۱۵]

^۱Relative energy response



شکل ۳-۳۴: پاسخ عملی و شبیه سازی انرژی نسبی دیود نوری در حالت های بدون فیلتر و با فیلتر [۱۵]

نتایج این تحقیق نشان می دهد که دز جذب شده در بازه $2/631 \text{ mGy/h}$ تا $23/679 \text{ Gy/h}$ با جریان خروجی مدار رابطه نزدیک به خطی دارد. از مزایای مهم این مدار سادگی و استفاده از قطعات کم در ساخت آن است. بازه تغذیه مدار بزرگ بوده که این امر موجب افزایش دامنه دز آشکارسازی، شده است. این دستگاه در بازه انرژی های $23/679 \text{ keV}$ تا 60 keV ، بدون فیلتر کامپوزیتی، پاسخ محدودتری پیدا کرده اما قابل ملاحظه بوده و می تواند این بازه انرژی را به تنهایی آشکار کند.

۳-۴-۳ مقایسه مدارهای حالت پالسی

مقاله به کار رفته در مرجع [۱۳] برای کاربردهای دزسنجی با انرژی های زیر 40 keV و دزهایی با مقیاس میکروگری کاربرد دارد. از مزایای این مدار با توجه به شکل ۳-۳۰، حساسیت به دزها و انرژی های پایین بوده ولی پیچیدگی زیاد آن موجب افزایش هزینه در دزسنجی های متعارف می شود. همچنین این مدار ساختار مشابه به مدار به کار رفته در مرجع [۱۲] داشته و تنها تفاوت ساختاری آن، تزویج DC حس گر با پیش تقویت کننده بوده که آشکارسازی را برای پالس های حالت جریانی انجام می دهد. در مقابل مدار به کار رفته در شکل ۳-۳۲ [۱۵]، ساختار ساده تری داشته و توانایی اندازه گیری دز، در مقیاس میلی گری را دارد. این مقیاس در کاربردهای دزسنجی متعارف مورد استفاده قرار می گیرد. پس برای آشکارسازی حالت جریانی مدار مرجع [۱۵] بررسی و ساخته خواهد شد.

فصل ۴

ساخت آشکارساز

۴-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا به معرفی آشکارساز تجاری استفاده شده، جهت طیف‌سنجی منابع به کار رفته در آزمایش‌ها پرداخته می‌شود. سپس در قسمت بعد، حس‌گرها و مدارات آنالوگ انتخابی در فصل ۳ بررسی و تحلیل خواهند شد. در نهایت ساختار پیشنهادی برای بلوک دیجیتالی شرح داده می‌شود.

۴-۲ آشکارسازهای تجاری

آشکارسازهای تجاری موجود در بازار عموماً از نوع آشکارسازهای گازی و سوسوزن هستند. به آشکارسازهای گازی، آشکارساز گایگرمولر و به آشکارساز سوسوزن، آشکارسازهای نیمه‌هادی غیر مستقیم هم می‌گویند.

در این پایان‌نامه ابتدا منابع به کار رفته، توسط دستگاه تجاری HVMCA مدل NT-124 همراه با حس‌گر سوسوزن یدور سزیم (CSI) مدل NT-811 شرکت نوین طیف پرتوگستر، طیف‌سنجی شده‌اند. سپس از این منابع برای آزمایش مدارهای ساخته شده، استفاده شده است. این آشکارساز در آزمایشگاه هسته‌ای دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود استقرار دارد. تمامی آزمایش‌ها زیر نظر مسئول بهداشت دانشکده در مدت سه جلسه انجام شده است. معرفی، عملکرد، راهنمای استفاده و تنظیم دستگاه آشکارساز شرکت نوین طیف در پیوست الف آمده است.

۴-۲-۱ طیف‌سنجی چشمه‌های مجهول

بعد از تنظیم دستگاه آشکارساز تجاری نوین طیف، چشمه‌های مجهولی که برای آزمایش سامانه آشکارساز مورد استفاده قرار گرفته‌اند، طیف‌سنجی خواهند شد. یکی از چشمه‌های مجهول شامل توری چراغ‌های قدیمی^۱ است که حاوی ماده رادیواکتیو ^{232}Th است. عناصر حاصل از واپاشی ^{232}Th به همراه انرژی‌های حاصل از آن‌ها، در جدول ۴-۱ آمده است. در انتهای زنجیره نابودی تمامی آن‌ها گاما نیز وجود دارد.

شکل ۴-۱ نتیجه طیف‌سنجی توری گازی را بعد از تنظیم دستگاه آشکارساز تجاری توسط چشمه‌های سزیم و کبالت نشان می‌دهد. تعداد شمارش‌ها در واحد زمان ۶۳۵ شمارش بوده و تعداد شمارش‌های کل ۴۵۰۲۵۴ در مدت زمان ۶۰۰ ثانیه است. همانطور که مشاهده می‌شود، با توجه به جدول ۴-۱، قله سرب-۲۱۲ به خوبی قابل مشاهده است. نتیجه دزسنجی این چشمه با دستگاه DOSE DIGI 3000C ساخت شرکت NDF Products برابر با $9\mu\text{Sv/h}$ است. با توجه به این که میزان متوسط دز معادل جذب شده جهانی در یک ساعت برابر $6\mu\text{Sv/h}$ است.

^۱Gas Mantle

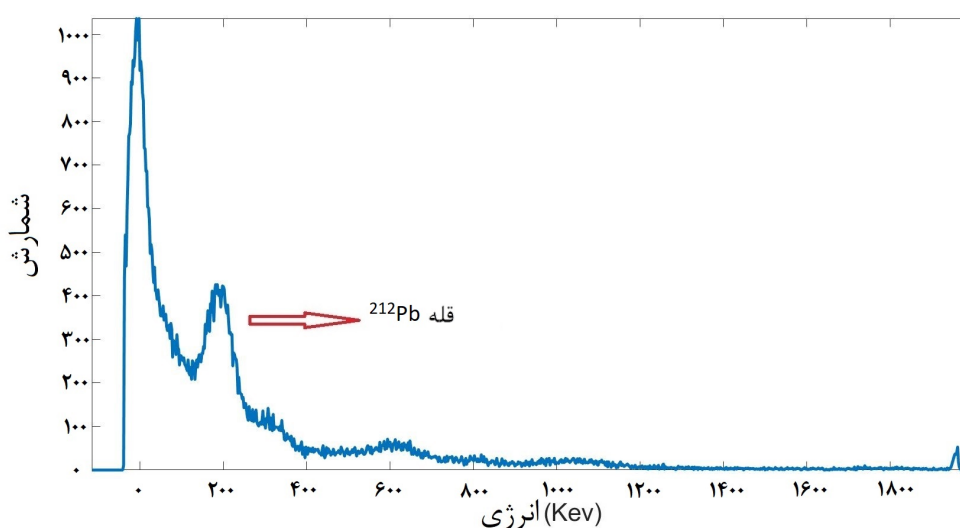
جدول ۴-۱: انرژی‌های حاصل از زنجیره ناپودی توریم-۲۳۲

ماده رادیواکتیو دختر	نوع واپاشی	اندازه انرژی (keV)
^{228}Ac	بتا	۳۳۸ ، ۹۱۱
^{212}Pb	بتا	۲۳۸/۶
^{212}Bi	آلفا و بتا	۷۲۷/۳
^{208}Tl	بتا	۵۸۳ ، ۲۶۱۴

است [۲۸]، پس می‌توان گفت، حضور طولانی‌مدت در کنار این منبع، خطر ابتلا به سرطان را افزایش می‌دهد.

دیگر چشمه قابل دسترس در بازار، چشمه ^{241}Am موجود در آشکارسازهای دود^۱ سقفی است. این آشکارساز از دو محفظه بیرونی و داخلی تشکیل شده و عنصر ^{241}Am به صورت محافظت شده در محفظه داخلی قرار گرفته است. عناصر حاصل از واپاشی ^{241}Am در جدول ۴-۲ آمده است.

شکل ۴-۲ نتیجه طیف‌سنجی آشکارساز دود را بعد از تنظیم دستگاه آشکارساز تجاری توسط چشمه‌ی سزیم نشان می‌دهد. تعداد شمارش‌ها در واحد زمان ۷۴۵ شمارش بوده و تعداد شمارش‌های کل ۴۹۰۱۰۰ در مدت زمان ۶۶۷ ثانیه است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با توجه به جدول ۴-۲، قله ^{241}Am که دارای انرژی ۵۹/۵۴ keV است، به خوبی قابل مشاهده بوده و اثر پراکندگی کامپتون آن به دلیل بستن کانال‌های پایین (کاهش نویز) دیده نمی‌شود. نتیجه دزسنجی این چشمه با دستگاه DOSE DIGI 3000C برابر با $2/\mu\text{Sv/h}$ بدست آمده



شکل ۴-۱: طیف چشمه مجهول توری گازی، حاوی توریم - ۲۳۲

جدول ۴-۲: انرژی‌های حاصل از زنجیره نابودی آمرسیوم-۲۴۱

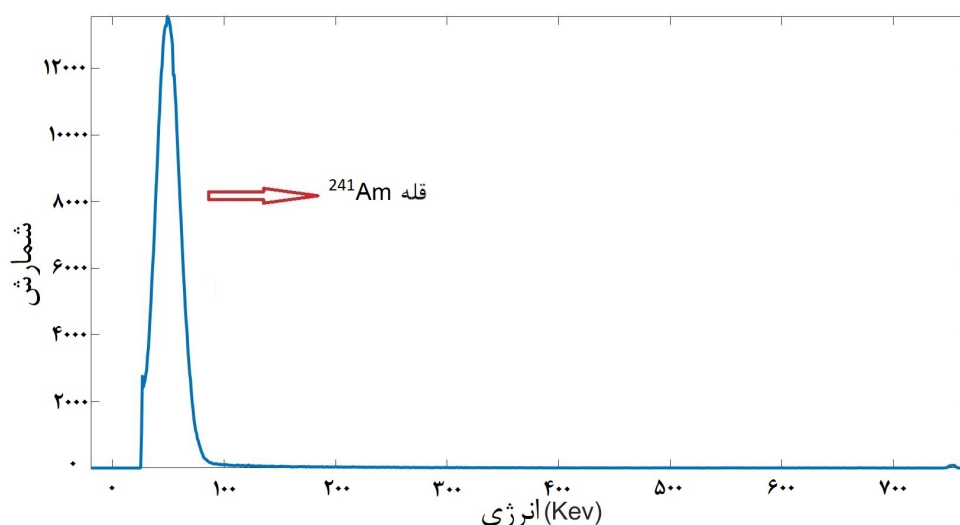
نوع واپاشی	اندازه انرژی (keV)
گاما	۵۹/۵۴ ، ۱۳/۹ ، ۱۷/۸ ، ۲۶/۴
آلفا	۵۳۸۸ ، ۵۴۴۳ ، ۵۴۸۶

است. پس می‌توان نتیجه گرفت، که حضور طولانی مدت در کنار آن، خطر آفرین است.

۳-۴ سامانه آشکارساز

۱-۳-۴ حس‌گرهای انتخابی

همان‌طور که در فصل ۲ گفته شد حس‌گر یکی از مهم‌ترین قسمت‌های تشکیل‌دهنده یک آشکارساز است. یکی از مسائل مهم در این تحقیق، ارزان تمام شدن قیمت نهایی آشکارساز است. پس بر این مبنا سعی شده حس‌گرهایی انتخاب شود که مشخصات الکترونیکی آن‌ها قابل قبول، قیمت آن‌ها ارزان و از همه مهم‌تر در بازار قابل دسترس باشند. چند مورد از حس‌گرهای بررسی شده در فصل ۳ که در بازار موجود بودند، به همراه چند حس‌گر دیگر که این ویژگی‌ها را داشته، انتخاب شده‌اند. مشخصات الکتریکی حس‌گرهای انتخابی در جدول ۴-۳ قرار داده شده است. در ادامه راجع به روشی صحبت می‌شود که با استفاده از آن بتوان این حس‌گرها را از نظر کارایی و کاربرد آن‌ها در این تحقیق، قبل از هرگونه شبیه‌سازی و آزمایش عملی رتبه‌بندی کرد.



شکل ۴-۲: طیف چشمه مجهول آشکارساز دود حاوی آمرسیوم-۲۴۱

۴-۳-۱- تکنیک‌های نوین در تصمیم‌گیری‌های چند شاخصه (MADM)

زمانی که در تصمیم‌گیری‌ها، بیش از یک معیار مدنظر تصمیم‌گیرنده (DM)^۱ باشد، بحث تصمیم‌گیری‌های چند معیاره (MCDM)^۲ مطرح می‌گردد که عمدتاً بخش بزرگی از تصمیم‌گیری‌های روزمره در سازمان‌ها و جوامع بشری را به خود اختصاص می‌دهد. MCDM به دو بخش تصمیم‌گیری‌های چند هدفه (MODM)^۳ و تصمیم‌گیری‌های چند شاخصه (MADM)^۴ تقسیم می‌گردد. MODM برای طراحی بهترین جواب و MADM برای انتخاب گزینه برتر به کار می‌رود [۲۹].

تکنیک MADM دارای ۲۷ روش VIKOR، PORMETHEE، ORESTE، REGIME، SMART، EVAMIX، SIR، QUALIFLEX و... برای انتخاب گزینه برتر است [۲۹]. در روش SMART به دلیل سهولت در استفاده و ریاضیاتی بودن روند آن نسبت به سایر روش‌های MADM، تصمیم‌گیرنده، رتبه‌بندی گزینه‌ها را انجام می‌دهد. این رتبه‌بندی به وسیله تابع مقدار که یک تابع خطی است، صورت می‌گیرد [۳۰].

روش SMART یا روش ارزیابی چند شاخصه ساده^۵ در سال ۱۹۸۶ توسط و. ادواردز^۶ معرفی شده است و روشی مناسب برای تصمیم‌گیری بر اساس معیارهای کمی و کیفی است. براساس

جدول ۴-۳: مقایسه ویژگی‌های حس‌گرهای انتخابی

نام حس‌گر	مساحت فعال (mm ²)	ولتاژ شکست (V)	طول موج قابل جذب (nm)	بهترین پاسخگویی (A/W)	جریان نشتی (nA)	خازن تخلیه (pF)	قیمت (\$)
BPW34	۹	۶۰	[۴۳۰-۱۱۰۰]	۱(۹۱۰nm)	۳۰	۴۰	۱/۰۲
BPV23NF	۴/۴	۶۰	[۷۵۰-۱۱۵۰]	۱(۹۴۰nm)	۳۰	۴۸	۱/۰۳
BPV10	۰/۷۸	۶۰	[۴۰۰-۱۱۰۰]	۱(۹۲۰nm)	۵	۳/۸	۱/۱۱
PD438C	۴/۸	۳۲	[۴۰۰-۱۱۰۰]	۱(۹۴۰nm)	۳۰	۲۵	۰/۴
S1223-01	۱۳	۳۰	[۳۲۰-۱۱۰۰]	۰/۶(۹۱۰nm)	۱۰	۱۰	۱۰/۷۳
S186P	۷/۵	۶۰	[۸۰۰-۱۱۰۰]	۱(۹۵۰nm)	۳۰	۴۰	۱
PH320	۳/۶	۳۲	[۸۲۰-۱۱۲۰]	۱(۹۹۰nm)	۱۰	۸	۲/۴۱

^۱Decision maker

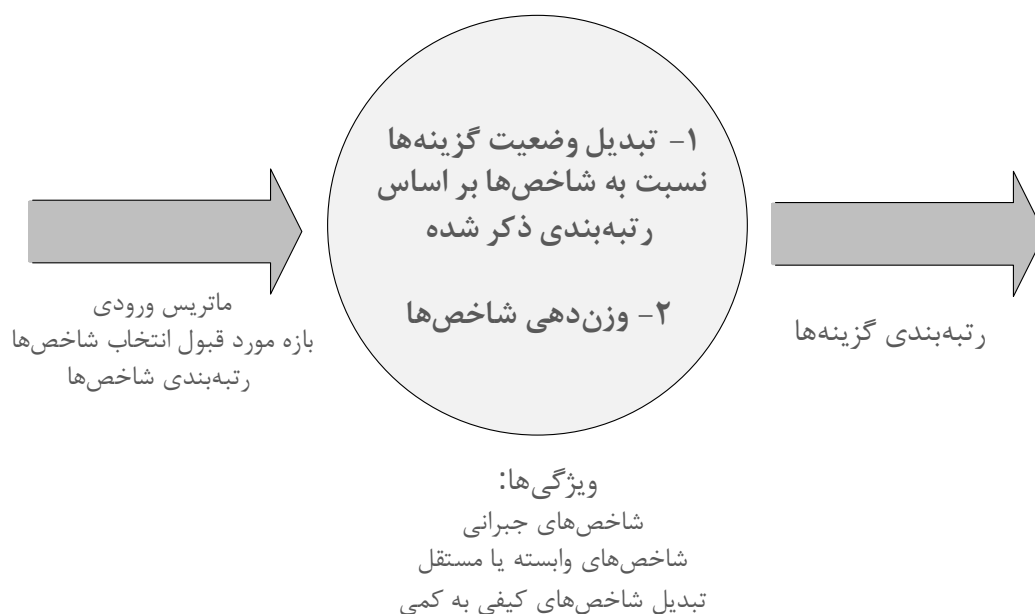
^۲Multi criteria decision making

^۳Multi objective decision making

^۴Multiple attributes decision making

^۵Simple multi-attribute rating technique

^۶V. Edwards



شکل ۴-۳: نمودار بلوکی روش SMART [۲۹]

روابطی که در این روش مطرح شده، معیارهای کیفی به کمی تبدیل شده و وزن مؤثر هر گزینه در هر معیار محاسبه شده و سپس با محاسبه وزن نهایی، گزینه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته و گزینه برتر انتخاب می‌شود. این روش، رتبه‌بندی از سایر گزینه‌ها را نیز در اختیار تصمیم‌گیرنده قرار می‌دهد. نمودار بلوکی این روش در شکل ۴-۳ به صورت خلاصه آمده است. در این تحقیق، روش SMART با استفاده از نرم‌افزار متلب^۱ برای رتبه‌بندی عملکرد حس‌گرهای انتخابی، پیاده‌سازی شده است. در مرحله اول باید ماتریس ورودی‌ها تعریف شود. ماتریس ورودی، شامل ویژگی‌های حس‌گرها بوده که برگرفته از جدول ۴-۳ است. این ماتریس به شکل زیر تعریف می‌شود:

9×10^{-6}	60	1100×10^{-9}	430×10^{-9}	910×10^{-9}	30×10^{-9}	40×10^{-12}	1.02
4.4×10^{-6}	60	1150×10^{-9}	750×10^{-9}	940×10^{-9}	30×10^{-9}	48×10^{-12}	1.03
0.78×10^{-6}	60	1100×10^{-9}	400×10^{-9}	920×10^{-9}	5×10^{-9}	3.8×10^{-12}	1.11
4.8×10^{-6}	32	1100×10^{-9}	400×10^{-9}	940×10^{-9}	30×10^{-9}	25×10^{-12}	0.4
13×10^{-6}	30	1100×10^{-9}	320×10^{-9}	990×10^{-9}	10×10^{-9}	10×10^{-12}	10.73
7.5×10^{-6}	60	1100×10^{-9}	800×10^{-9}	950×10^{-9}	30×10^{-9}	40×10^{-12}	1
3.6×10^{-6}	32	1120×10^{-9}	820×10^{-9}	990×10^{-9}	10×10^{-9}	8×10^{-12}	2.41

در این ماتریس، ستون‌ها به ترتیب نمایان‌گر شاخص‌های مد نظر که از سمت چپ عبارت

^۱MATLAB

است از: مساحت فعال، ولتاژ شکست، بیشترین طول موج قابل جذب، کمترین طول موج قابل جذب، بهترین طول موج قابل جذب، جریان نشتی، خازن تخلیه و قیمت. منظور از ناحیه فعال، ناحیه‌ای است که آرایش^۱ ناخالصی صورت گرفته و در اثر برخورد نور با این ناحیه، زوج الکترون-حفره تولید می‌شود. ولتاژ شکست، ولتاژ معکوسی است که جریان نشتی دیود تحت این ولتاژ به $10\mu A$ می‌رسد و با افزایش دما مقدار آن کاهش می‌یابد. دیودهای نوری در طیف وسیعی از طول موج‌ها یا فرکانس‌های نوری، پاسخ قابل توجهی دارند. بیشترین طول موج قابل جذب و کمترین طول موج قابل جذب در این پاسخ فرکانسی قابل مشاهده است. همچنین دیودهای نوری در یک طول موج مشخص، بالاترین پاسخ را در نمودار طیفی خود نشان می‌دهند که از آن با عنوان بهترین پاسخگویی یاد می‌شود. جریان نشتی یا جریان تاریک دیود نوری، مقدار جریان الکتریکی است که در عدم وجود فوتون‌ها، در دیود جاری می‌شود. خازن تخلیه تابعی از سطح آرایش و اندازه ناحیه تخلیه در دیود نوری بوده و با سرعت پاسخ دیود رابطه عکس دارد [۲۳].

سطرهای ماتریس فوق حس‌گرهای انتخابی اند که از بالا عبارت اند از: دیودهای نوری PH320 و S186P، S1223-01، PD438C، BPV10، BPV23NF، BPW34.

از نکات قابل توجه در این روش تشخیص شاخص‌های مثبت و منفی است. شاخص‌های مثبت به شاخص‌هایی گفته می‌شود که هرچه مقدار شاخص بیشتر باشد، بهتر است. مانند شاخص‌های مساحت ناحیه فعال و ولتاژ شکست حس‌گرها. شاخص‌های منفی به شاخص‌هایی گفته می‌شود که هرچه مقدار آن‌ها کمتر باشد، بهتر است مانند شاخص قیمت و دیگر شاخص‌ها [۲۹].

مرحله دوم مشخص کردن بیشترین و کمترین مقدار شاخص‌هاست که در بدست آوردن وزن نهایی مورد نیاز است. بیشترین و کمترین مقدار شاخص‌ها در جدول ۴-۴ آمده است. مرحله سوم رتبه‌بندی شاخص‌ها توسط تصمیم گیرنده است. در این مرحله شاخص‌ها بین اعداد ۴ تا ۱۰ با عملکرد نامطلوب، متوسط، خوب و عالی رتبه‌بندی می‌شوند. نتیجه این رتبه‌بندی در جدول ۴-۵ آمده است. این رتبه‌بندی با توجه به نکاتی از جمله کمترین نویز، بیشترین سطح ناحیه فعال، کمترین توان و ... مشخص شده است. بعد از مرتب کردن داده‌ها و سطح بندی شاخص‌ها، داده‌ها در جدول ۴-۶ قرار می‌گیرند.

جدول ۴-۴: بیشترین و کمترین نرخ شاخص‌ها

نرخ	مساحت فعال (mm^2)	ولتاژ شکست (V)	طول موج قابل جذب (nm)	بهترین پاسخگویی (A/W)	جریان نشتی (nA)	خازن تخلیه (pF)	قیمت (\$)
بیشترین	۱۰۰	۱۰۰	[۷۵۰-۱۱۰۰]	۱(۹۹۰nm)	۱۰۰۰	۴۴۰۰۰	۳۹۰
کمترین	۰/۷۸	۵	[۰/۰۰۱-۱/۲]	۱(۰/۱۲nm)	۰/۰۵	۳	۰/۴

^۱Doping

جدول ۴-۵: سطح بندی شاخص ها توسط تصمیم گیرنده

شاخص	مساحت فعال	ولتاژ شکست	بیش ترین طول موج	کم ترین طول موج	بهترین پاسخگویی	جریان نشتی	خازن تخلیه	قیمت
رتبه	۱۰	۶	۵	۷	۷	۸	۷	۱۰

جدول ۴-۶: رتبه بندی شاخص های حسگرها

		+	-	-	-	-	-	-	-
رتبه	عملکرد	مساحت فعال (mm ²)	ولتاژ شکست (V)	بیش ترین طول موج (nm)	کم ترین طول موج (nm)	بهترین پاسخگویی (nm)	جریان نشتی (nA)	خازن تخلیه (pF)	قیمت (\$)
۱۰	عالی	۱۰۰	۱۰۰	۱۸۳۶۹	۱۱۷۲۰	۱۵/۵۸۷	۱۵/۶۷۴	۶۹۰/۴۵	۶/۴۹
۹		۵۰/۳۹	۵۲/۵	۳۵/۵۳۸	۲۳/۴۳۸	۳۱/۰۵۴	۳۱/۲۹۸	۱۳۷۷/۹	۱۲/۵۸
۸	خوب	۲۵/۵۹	۲۸/۷۵	۶۹/۸۷۵	۴۶/۸۷۶	۶۱/۹۸۷	۶۲/۵۴۷	۲۷۵۲/۸	۲۴/۷۵
۷		۱۳/۱۸	۱۶/۸۸	۱۳۸/۵۵	۹۳/۷۵۱	۱۲۳/۸۵	۱۲۵/۰۴	۵۵۰۲/۶	۴۹/۱
۶	متوسط	۶/۹۸	۱۰/۹۴	۲۷۵/۹۰	۱۸۷/۵۰	۲۴۷/۵۹	۲۵۰/۰۴	۱۱۰۰۲	۹۷/۸
۵		۳/۸۸	۷/۹۷	۵۵۰/۶	۳۷۵	۴۹۵/۰۶	۵۰۰/۰۲	۲۲۰۰۱	۱۹۵/۲
۴	نامطلوب	۲/۳۳	۶/۴۸	۱۱۰۰	۷۵۰	۹۹۰	۱۰۰۰	۴۴۰۰۰	۳۹۰

⁺ نشان دهنده شاخص مثبت - نشان دهنده شاخص منفی

با توجه به روش SMART، بازه هر شاخص از کم ترین تا بیش ترین مقدار، به ترتیب از سطح ۴ تا ۱۰ در این جدول سطح بندی شده است.

در مرحله چهارم وزن مؤثر گزینه ها شامل حس گرهای BPW34، BPV23NF، BPV10، PD438C، S1223-01، S186P و PH320 در جدول ۴-۷ محاسبه شده است.

در مرحله پنجم وزن نرمال شاخص ها که در جدول ۴-۵ رتبه بندی شده بودند، در جدول ۴-۸ محاسبه شده است.

مرحله ششم که مرحله اولویت بندی گزینه ها نام دارد، با ادغام مراحل چهارم و پنجم بدست می آید. بعد از انجام این مراحل توسط نرم افزار متلب نتایج اولویت بندی گزینه ها در

جدول ۴-۷: وزن مؤثر محاسبه شده برای حسگرها در هر شاخص

نام حس گر	مساحت فعال	ولتاژ شکست	بیش ترین طول موج	کم ترین طول موج	بهترین پاسخگویی	جریان نشتی	خازن تخلیه	قیمت
BPW34	۶/۱۲۸	۹/۱۹۵	۴/۰۰۰	۴/۸۲۰	۴/۱۲۴	۱۰/۱۰۳	۱۱/۰۳۱	۱۱/۱۰۰
BPV23NF	۴/۴۴۰	۹/۱۹۵	۳/۹۳۵	۴/۰۰۰	۴/۰۷۶	۱۰/۱۰۳	۱۱/۰۴۸	۱۱/۱۰۲
BPV10	۶/۰۶۰	۹/۱۹۵	۴/۰۰۰	۴/۹۲۷	۴/۱۰۸	۱۱/۴۶۱	۱۰/۹۶۰	۱۱/۱۲۲
PD438C	۴/۶۹۵	۸/۱۲۶	۴/۰۰۰	۴/۹۲۷	۴/۰۷۶	۱۰/۱۰۳	۱۱/۰۰۱	۱۰/۹۵۹
S1223-01	۶/۸۰۶	۸/۰۰۸	۴/۰۰۰	۵/۲۶۰	۴/۰۰۰	۱۲/۳۰۴	۱۰/۴۹۸	۱۰/۴۹۸
S186P	۵/۷۶۰	۹/۱۹۵	۴/۰۰۰	۳/۹۰۶	۴/۰۶۱	۱۰/۱۰۳	۱۱/۰۳۱	۱۱/۰۹۵
PH320	۳/۳۷۳	۸/۱۲۶	۳/۹۷۴	۳/۸۷۰	۴/۰۰۰	۱۲/۳۰۴	۱۰/۹۶۸	۱۱/۴۸۷

جدول ۴-۸: وزن نرمال شاخص‌های حسگرها

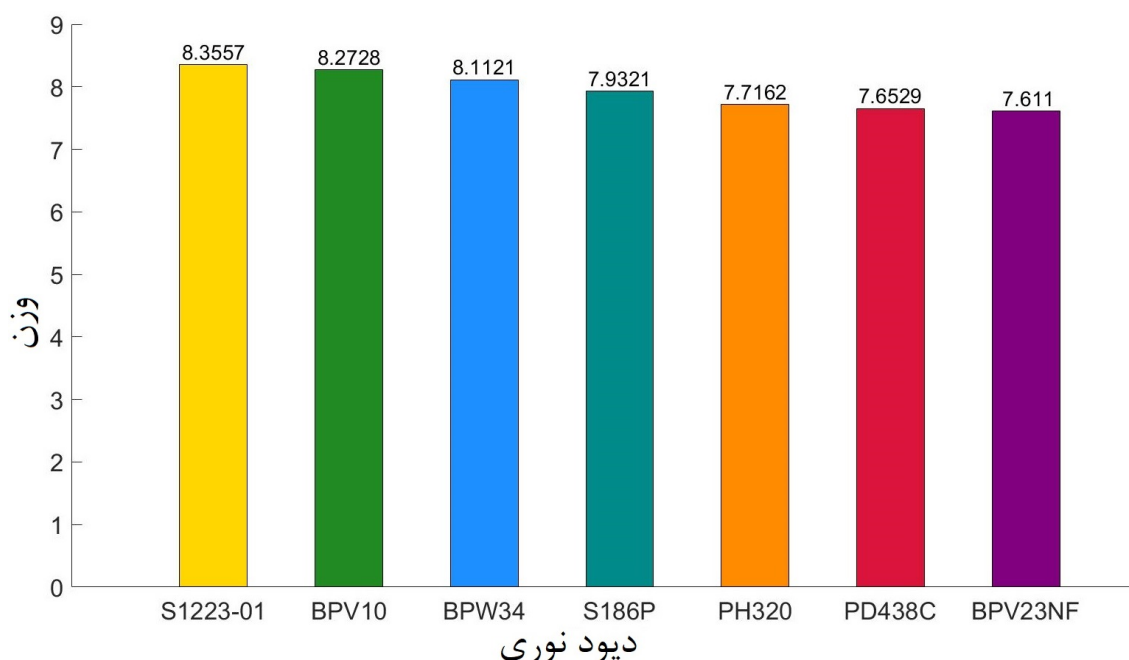
شاخص	مساحت فعال	ولتاژ شکست	بیش‌ترین طول موج	کم‌ترین طول موج	بهترین پاسخگویی	جریان نشتی	خازن تخلیه	قیمت
وزن نرمال	۰/۲۵۱	۰/۰۶۳	۰/۰۴۴	۰/۰۸۹	۰/۰۸۹	۰/۱۲۵	۰/۰۸۹	۰/۲۵۱

جدول ۴-۹: وزن نهایی حسگرها و اولویت بندی آن‌ها بر اساس وزن بدست آمده

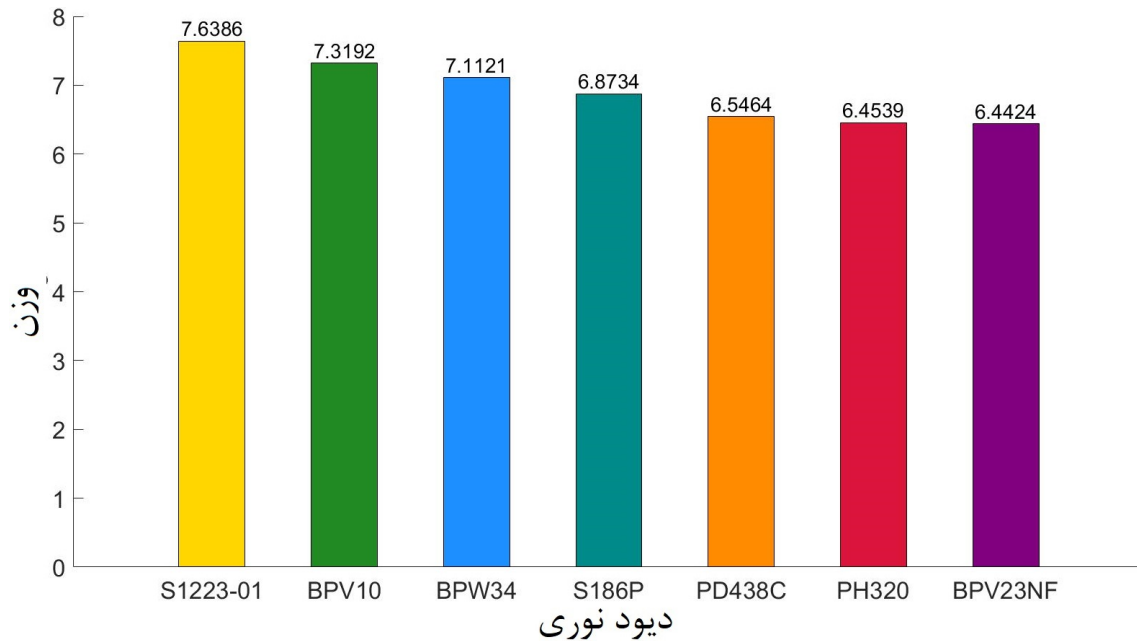
نام حسگر	S1223-01	BPV10	BPW34	S186P	PH320	PD438C	BPV23NF
وزن نهایی	۸/۳۵۶	۸/۲۷۳	۸/۱۱۲	۷/۹۳۲	۷/۷۱۶	۷/۶۵۳	۷/۶۱۱

جدول ۴-۹ قابل مشاهده است. نمودار میله‌ای اولویت‌بندی حس‌گرهای انتخابی در شکل ۴-۴ از جدول ۴-۹ رسم شده است. طبق این نمودار بهترین انتخاب، حس‌گر S1223-01 و بعد از آن حس‌گر BPV10 است. در صورت حذف شاخص قیمت از الگوریتم، و مقایسه دیودها تنها با مشخصات الکترونیکی آن‌ها، شکل ۴-۵ پدید می‌آید. مطابق شکل، تنها رتبه دیودهای PH320 و PD438C نسبت به یکدیگر تغییر کرده و همچنین فاصله بین وزن دیودهای رتبه‌بندی شده، بیش‌تر شده است.

در ادامه به بررسی عملکرد و تحلیل نظری مدار آشکارسازهای منتخب، که در این پایان‌نامه شبیه‌سازی و ساخته شده‌اند، پرداخته خواهد شد. این مدارها با توجه به بررسی‌های اولیه که در فصل ۳ صورت گرفته است، انتخاب شده‌اند.



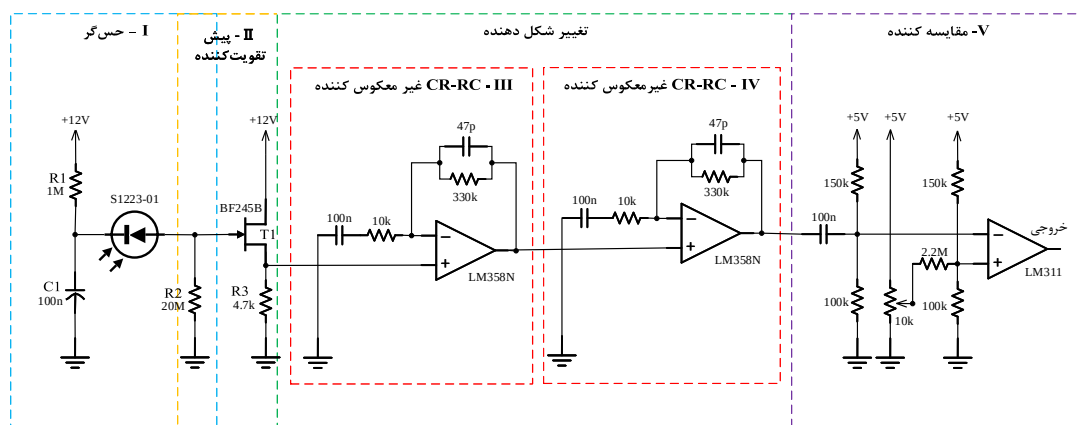
شکل ۴-۴: نمودار میله‌ای اولویت‌بندی حس‌گرها بر اساس روش SMART



شکل ۴-۵: نمودار میله‌ای اولویت‌بندی حس‌گرها بر اساس روش SMART بدون در نظر گرفتن شاخص قیمت

۴-۳-۲ مدار اول

مدار شکل ۴-۶ که از مرجع [۸] استفاده شده است، برای آشکارسازی در حالت پالسی به کار می‌رود. این مدار از حس‌گر و چهار طبقه مجزا شامل پیش‌تقویت‌کننده، طبقات مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر و مقایسه‌گر تشکیل شده است. به دلیل بار اندک ایجاد شده از حس‌گر و امپدانس خروجی زیاد آن، طبقه اول این مدار نقش مهمی را ایفا می‌کند. به همین دلیل این طبقه باید دارای امپدانس ورودی زیاد و امپدانس خروجی کم باشد. به عبارت دیگر، بهره جریان زیاد و نویز کم باشد.



شکل ۴-۶: طرح کلی مدار شماره یک [۸]

۴-۳-۲-۱ عملکرد مدار و قطعات انتخابی

از آن جا که این مدار برای حالت پالسی طراحی شده است، دیود نوری به صورت معکوس بایاس می‌شود. با برخورد امواج یونیزان به سطح حساس دیود نوری، زوج الکترون-حفره ایجاد می‌شود. بار تولید شده از هر برخورد بسیار کوچک بوده و برای آشکارسازی آن، از مقاومت‌هایی با مقدار بزرگ استفاده شده است.

در مدار شکل ۴-۶، حس گر (طبقه I) در حالت تزویج DC متصل شده است. یعنی مقدار DC طبقه اول و دوم یکسان در نظر گرفته شده است. اتصال مستقیم سبب کاهش خازن پارازیتی شده و در نتیجه نسبت سیگنال به نویز را بهبود می‌بخشد [۲۴].

در مدار شکل ۴-۶ مقاومت R_1 و خازن C_1 نقش یک فیلتر پایین‌گذر برای کاهش نوسانات ولتاژ تغذیه را ایفا می‌کنند. مقاومت R_2 در هر کدام از طبقات حس گر و پیش تقویت کننده نقش متمایزی دارد. این مقاومت در طبقه I جهت تعیین ثابت زمانی سیگنال حاصل از دیود نوری (بخش ۲-۳-۲-۵ فصل ۲) است و به دلیل مشارکت مستقیم آن در ایجاد نویز، باید از کیفیت ساخت خوبی برخوردار باشد. پس می‌توان نتیجه گرفت مقدار آن باید بزرگ انتخاب شود تا جریان نویز کاهش و ثابت زمانی سیگنال ایجاد شده برای ورودی طبقه بعدی افزایش یابد. البته این امر، اثر انباشتگی پالس را افزایش می‌دهد. همچنین به دلیل وجود جریان نشتی دیود نوری، اگر این مقاومت خیلی بزرگ انتخاب شود، ولتاژ آفست قابل توجهی در خروجی پیش تقویت کننده ایجاد شده که در اندازه‌گیری، خطا به وجود می‌آورد. نقش دیگر این مقاومت در طبقه II، بایاس ترانزیستور T_1 است.

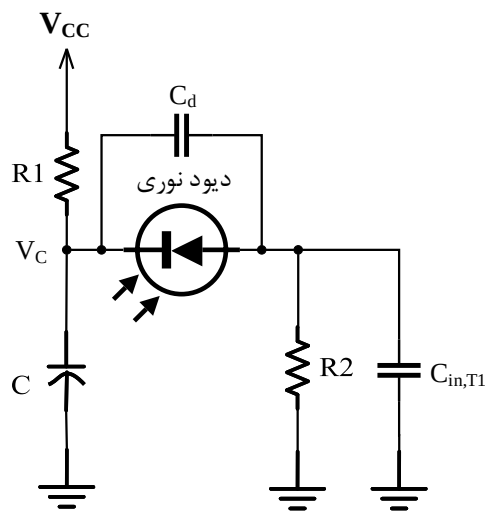
شکل ۴-۷ بایاس دیود نوری را نشان می‌دهد. همانطور که گفته شد، مقاومت R_1 و خازن C نقش فیلتر و مقاومت R_2 نقش مبدل جریان حاصل از دیود نوری به ولتاژ برای طبقه بعدی را دارد. این ولتاژ با ثابت زمانی $R_{in}C_{in}$ وارد طبقه پیش تقویت کننده می‌شود. این ثابت زمانی برابر است با:

$$\tau = R_{in}C_{in} = [R_1 + R_2] \times [(C_i + C) || C_d] \quad (۴-۱)$$

که C_i و C_d به ترتیب خازن معادل حس گر و ورودی پیش تقویت کننده است. برای بررسی کاهش تأثیرات نویز تغذیه بر روی بایاس دیود نوری، رابطه بین ولتاژ اعمال شده بر دیود نوری و ولتاژ تغذیه در حوزه فرکانس با توجه به شکل ۴-۷ از رابطه ۴-۲ بدست می‌آید.

$$\frac{v_C}{v_{CC}}(s) = \frac{\frac{C_i}{R_1 C_d} + \frac{1}{R_1 R_2 C_d s} + \frac{1}{R_1}}{\frac{C C_i s}{C_d} + \frac{C}{R_2 C_d} + C s + \frac{C_i}{R_1 C_d} + \frac{1}{R_1 R_2 C_d s} + \frac{1}{R_1} + C_i s + \frac{1}{R_2}} \quad (۴-۲)$$

این تابع تبدیل یک فیلتر پایین‌گذر است. با جایگذاری مقادیر مقاومت‌ها و خازن‌ها در رابطه ۴-۲، فرکانس قطع $1/6$ هرتز بدست می‌آید و نوسانات تغذیه بالاتر از این فرکانس تضعیف می‌شوند.



شکل ۷-۴: طرح کلی طبقه اول مدار شماره یک

برای جلوگیری از تأثیر جریان نشتی مدار ۴-۶ بر بایاس دیود نوری (طبقه I)، باید از مدار بافر استفاده کرد. اگر دیود مستقیماً به طبقه بعدی متصل شود، مقاومت بزرگ بایاس آن، ولتاژ آفست زیادی را ایجاد می‌کند. برای آشکارسازی سیگنال کوچک تولید شده توسط دیود نوری، طبقه دوم باید دارای نویز بسیار کم، امپدانس ورودی زیاد و ظرفیت خازنی کوچک باشد [۱].

امپدانس مؤثر دیده شده در گیت ترانزیستور T_1 شامل مقاومت R_2 ، خازن معادل دیود نوری و خازن دیده شده از گیت ترانزیستور است. سیگنال تولید شده توسط دیود نوری با ثابت زمانی $R_{in}C_{in}$ (رابطه ۴-۱) وارد ترانزیستور طبقه II می‌شود. بهترین ترانزیستوری را که می‌توان برای این طبقه انتخاب کرد، ترانزیستورهای اثر میدان یا FET می‌باشد. اگر این ترانزیستور در ساختار دنبال‌کننده سورس^۱ قرار گیرد، به دلیل مقاومت ورودی زیاد، ظرفیت خازنی ورودی کوچک و مقاومت خروجی کم، نقش یک بافر را ایفا می‌کند.

در این طبقه مقاومت‌های R_2 و R_3 برای بایاس ترانزیستور به کار می‌روند. همانطور که قبلاً اشاره شد مقاومت R_2 در این طبقه و طبقه قبلی نقش متمایز دارد. نقش این مقاومت در طبقه II بایاس گیت بوده که آن را در پتانسیل زمین نگه می‌دارد. مقاومت R_3 جریان عبوری از کانال ترانزیستور را تعیین می‌کند. این امر باید به گونه‌ای انتخاب شود تا ولتاژ ایجاد شده در سورس، در حد ۵٪ تا ۱ ولت باشد تا سیگنال خروجی بتواند طبقه بعدی را بایاس کند. در این مدار از ترانزیستور اثر میدان BF245B ساخته شده توسط شرکت On Semiconductor استفاده شده است. این ترانزیستور دارای نسبت سیگنال به نویز خوب و امپدانس ورودی بالا می‌باشد.

^۱ ورودی به گیت ترانزیستور اعمال و خروجی از سورس ترانزیستور گرفته می‌شود. در این حالت کلکتور سر مشترک به حساب می‌آید.

ظرفیت خازن معادل ورودی طبقه دوم شکل ۴-۶ شامل خازن معادل حس گر و خازن دیده شده از ورودی JFET، است. ظرفیت مؤثر معادل دیده شده از دیود نوری عبارت است از:

$$C_{in} = C_{i,BF245B} || C_d \quad (۳-۴)$$

با توجه به این رابطه، C_d ظرفیت دیود نوری تحت ولتاژ بایاس ۱۲ ولت، $C_{i,BF245B}$ ظرفیت معادل JFET طبقه دوم است. ولتاژ ورودی طبقه دوم از رابطه زیر بدست می آید.

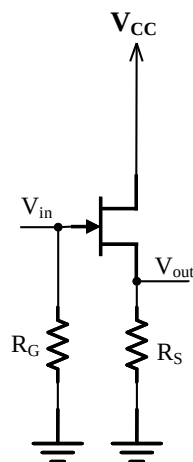
$$V_{in} = \frac{Q_{strike}}{C_{in}} \quad (۴-۴)$$

طبق این رابطه Q_{strike} بار ایجاد شده توسط دیود نوری در هنگام برخورد تابش X است. با توجه به رابطه ۴-۱، ظرفیت معادل ۱۵ پیکوفاراد ورودی (با در نظر گرفتن دیود نوری S1223-01 به عنوان حس گر) و مقدار مقاومت R_2 در شکل ۴-۶، زمان نشست سیگنال ورودی ۳۰۰ میکروثانیه محاسبه می شود. این ثابت زمانی ($R_{in}C_{in}$) بزرگتر از t_c یا زمان جمع آوری بار توسط حس گر است (بخش ۲-۳-۳-۱ فصل ۲). باید در نظر گرفت مقاومت R_2 در برابر مقاومت معادل حس گر و ورودی پیش تقویت کننده بسیار کوچک در نظر گرفته شده که از مقاومت آن ها بتوان صرف نظر کرد. در ادامه به تحلیل این طبقه پرداخته می شود. با نوشتن KVL برای مدار شکل ۴-۸ داریم:

$$V_{GS} = V_S = -R_S I_d \quad (۵-۴)$$

همچنین مقدار جریان ترانزیستور از رابطه زیر بدست می آید:

$$I_d = K(|R_S I_D| - |V_{T(ON)}|)^2 \quad (۶-۴)$$



شکل ۴-۸: طرح کلی طبقه دوم مدار شماره یک

با حل معادله فوق مقدار I_d بدست می‌آید. با توجه به رابطه ۴-۵ و مقدار مقاومت R_3 ، ولتاژ سورس ۵٪ ولت می‌شود. این ولتاژ برای بایاس طبقه بعدی به کار می‌رود. همچنین تحلیل سیگنال کوچک دنبال کننده سورس، بهره‌ای نزدیک به یک دارد. پس سیگنال ایجاد شده در ورودی آن بدون تغییر به خروجی می‌رود.

طبقات III و IV از یک شبکه CR-RC غیر معکوس کننده تشکیل شده است. این فیلتر میان‌گذر از ترکیب یک فیلتر بالاگذر، تقویت کننده غیر معکوس کننده و یک فیلتر پایین‌گذر تشکیل شده است. دلیل استفاده این نوع فیلتر وجود پایداری و جلوگیری از ایجاد نویز بوده که در فصل ۲ بخش ۲-۳-۴-۱ بحث شده است. شکل ۴-۹ یک فیلتر میان‌گذر فعال است. تابع تبدیل این فیلتر برابر است با:

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = 1 + \frac{Z_f}{Z_i} = 1 + \frac{R_f}{R_i} \frac{R_i C_i s}{(1 + R_f C_f s)(1 + R_i C_i s)} \quad (7-4)$$

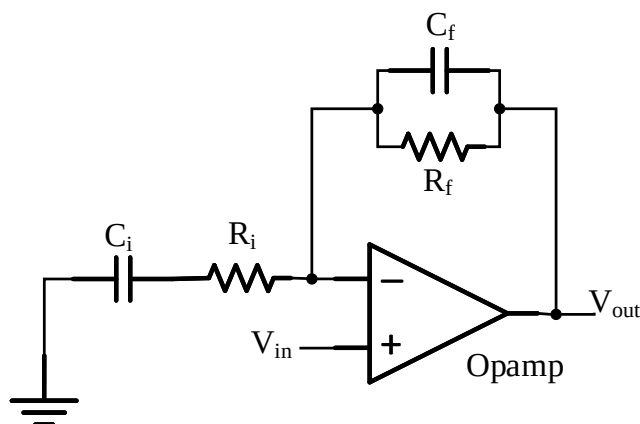
حال کافیسیت تابع تبدیل ۴-۷ را به صورت استاندارد مرتب کرد:

$$H(s) = 1 + \frac{R_f}{R_i} \frac{\omega_2 s}{(s + \omega_2)(s + \omega_1)} \quad (8-4)$$

این تابع تبدیل نشان دهنده یک فیلتر میان‌گذر با فرکانس‌های قطع و بهره میان‌گذری به صورت زیر است:

$$\omega_1 = \frac{1}{R_i C_i} \quad (9-4)$$

$$\omega_2 = \frac{1}{R_f C_f} \quad (10-4)$$



شکل ۴-۹: طرح کلی طبقه سوم و چهارم مدار شماره یک

$$k = 1 + \frac{R_f}{R_i} \frac{\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \quad (۱۱-۴)$$

طبق این روابط، ω_1 فرکانس قطع پایین، ω_2 فرکانس قطع بالا و k بهره میان گذر است. همچنین فرکانس مرکزی و پهنای باند فیلتر به ترتیب برابر می شود با:

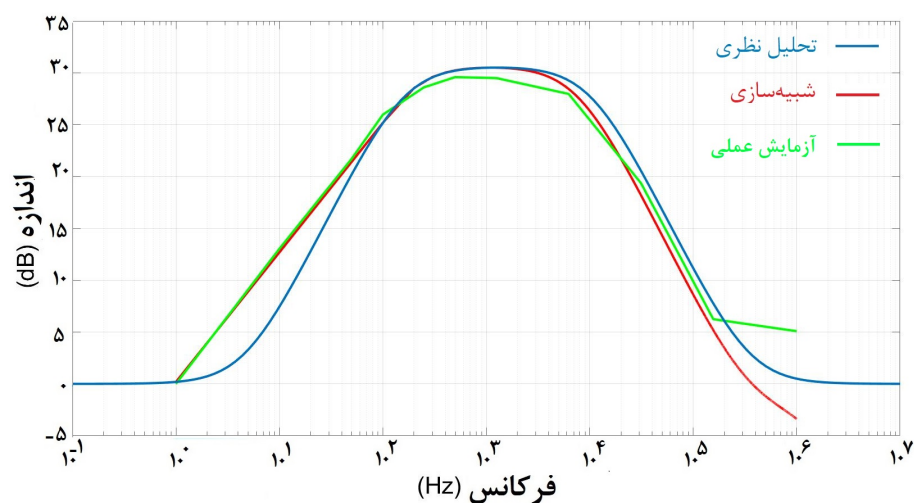
$$\omega_0 = \sqrt{\omega_1 \omega_2} \quad (۱۲-۴)$$

$$BW = \omega_2 - \omega_1 \quad (۱۳-۴)$$

در طبقه آخر (قسمت ۷ شکل ۴-۶) مقایسه کننده LM311 با سرعت پاسخ بالا جهت مقایسه خروجی با یک حد آستانه قابل تنظیم، استفاده شده است. مقادیر مقاومت ها و مقاومت متغیر به گونه ای انتخاب شده که اولاً بتوان تمام سیگنال را مشاهده کرد (قسمت های مثبت دامنه بیش تری دارند) و دوماً تغییرات اعمال شده جهت تنظیم آستانه بسیار کوچک باشد. این آستانه برای طبقات بخش دیجیتال کاربرد دارد.

۴-۳-۲ شبیه سازی طبقات

در گام اول با قرار دادن مقادیر در تابع تبدیل هر طبقه، پاسخ فرکانسی قابل رسم است. حال با استفاده از نرم افزار متلب و Pspice، پاسخ فرکانسی طبقات سوم و چهارم مدار شکل ۴-۶ در شکل ۴-۱۰ به صورت تحلیل تئوری (رابطه ۴-۸) و شبیه سازی قابل مشاهده است. همچنین در حالت آزمایش عملی نیز این پاسخ رسم شده است. با توجه به نتایج می توان گفت،



شکل ۴-۱۰: پاسخ فرکانسی طبقه سوم و چهارم شکل ۴-۶ در حالت تحلیل نظری، شبیه سازی و ساخت

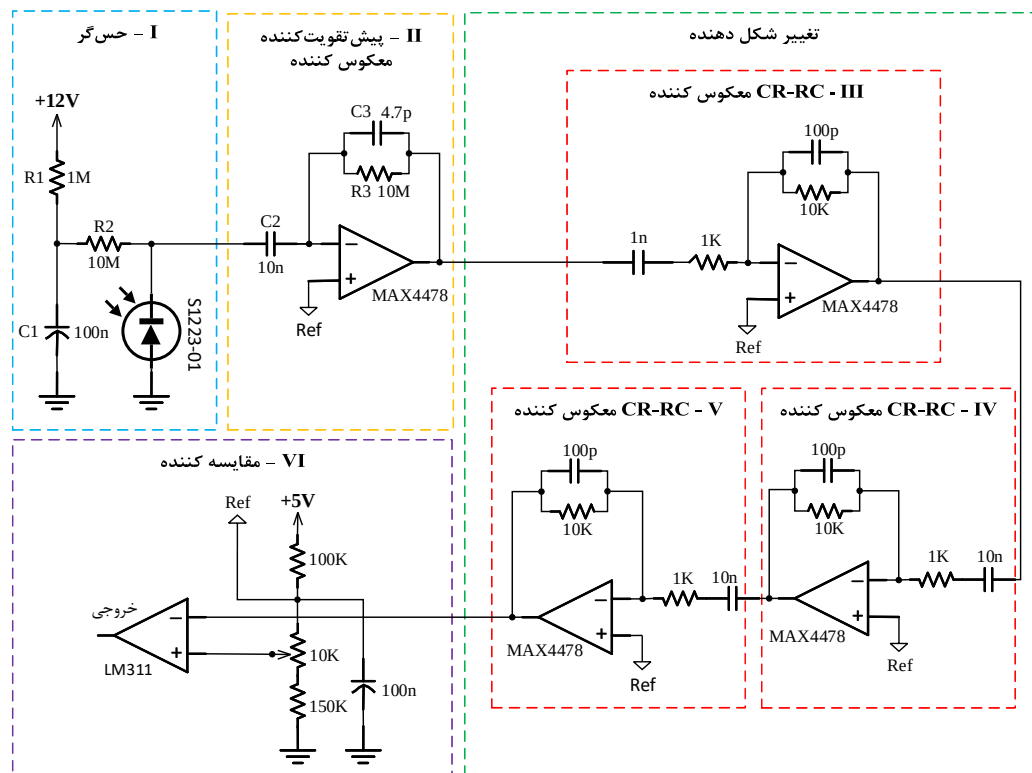
نتایج شبیه‌سازی به نتایج عملی نزدیک بوده و هردو در راستای تحلیل نظری هستند. تفاوت جزئی آن به دلیل ایده‌آل فرض کردن تقویت‌کننده عملیاتی و خطای آزمایش است.

۳-۳-۴ مدار دوم

مدار شکل ۱۱-۴ که از مرجع [۱۲] استفاده شده است، برای آشکارسازی در حالت پالسی به کار می‌رود. این مدار از حس‌گر و پنج طبقه مجزا شامل پیش‌تقویت‌کننده، طبقات مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر و مقایسه‌گر تشکیل شده است. به دلیل بار اندک ایجاد شده از حس‌گر و امپدانس خروجی زیاد آن، طبقه اول این مدار نقش مهمی را ایفا می‌کند. به همین دلیل این طبقه باید دارای نویز کم باشد.

۱-۳-۳-۴ عملکرد مدار و قطعات انتخابی

این مدار هم مانند مدار اول، برای حالت پالسی طراحی شده است. در مدار شکل ۱۱-۴، حس‌گر (طبقه I) در حالت تزویج AC متصل شده است، یعنی ولتاژ DC طبقه اول از طبقه دوم مجزا می‌شود. این نحوه اتصال مانع از رسیدن جریان نشتی دیود نوری به پیش‌تقویت‌کننده شده و در نتیجه آفست خروجی کاهش می‌یابد [۲۴].



شکل ۱۱-۴: طرح کلی مدار شماره دو [۱۲]

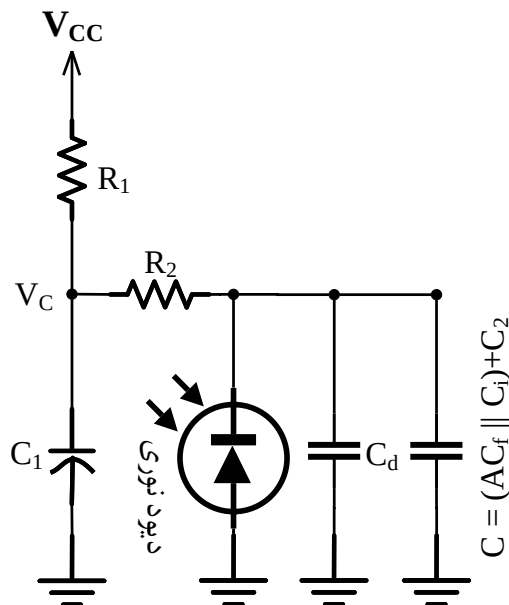
در این ساختار امپدانس دیده شده در ورودی تقویت کننده عملیاتی طبقه دوم شامل مقاومت R_2 ، مقاومت شبکه بازخورد (R_3) که با اثر میلر در ورودی ظاهر می شود، خازن معادل حس گر، خازن دیده شده از ورودی تقویت کننده عملیاتی MAX4478، خازن C_2 و خازن شبکه بازخورد (C_3) که با اثر میلر در ورودی ظاهر می شود، است. سیگنال حاصل از دیود نوری با ثابت زمانی $R_{eq}C_{eq}$ وارد پیش تقویت کننده می شود.

مقاومت R_2 در طبقه I جهت تبدیل بار حاصل از دیود نوری به ولتاژ مورد نیاز طبقه بعدی و تعیین ثابت زمانی آن (بخش ۲-۳-۲-۵ فصل ۲) است. همچنین به دلیل مشارکت مستقیم آن در ایجاد نویز، باید از کیفیت ساخت خوبی برخوردار باشد. پس می توان نتیجه گرفت مقدار آن باید بزرگ انتخاب شود تا جریان نویز مدار کاهش یابد.

شکل ۴-۱۲ بایاس دیود نوری را نشان می دهد. در این شکل تقویت کننده تفاضلی طبقه دوم ایده آل فرض شده است. مقاومت R_1 و خازن C_1 نقش یک فیلتر پایین گذر برای کاهش نویزات ولتاژ تغذیه را ایفا می کنند. مقاومت R_2 نقش مبدل جریان حاصل از دیود نوری به ولتاژ، برای طبقه بعدی را دارد.

رابطه بین ولتاژ اعمال شده بر دیود نوری و ولتاژ تغذیه در حوزه فرکانس با توجه به شکل ۴-۱۲ عبارت است از:

$$\frac{v_{diode}}{v_{cc}}(s) = \frac{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 s + R_1 + R_2}}{\frac{1}{R_2} + (C_d + C)s - \frac{1}{R_2^2 C_1 s + \frac{R_2^2}{R_1} + R_2}} \quad (4-14)$$



شکل ۴-۱۲: طرح کلی طبقه اول مدار شماره دو

با توجه به این رابطه و شکل ۴-۱۲، C_d و C_i به ترتیب خازن‌های حس‌گر و ورودی پیش‌تقویت کننده بوده و A بهره حلقه باز پیش‌تقویت کننده است. با قرار دادن مقادیر مقاومت‌ها و خازن‌های شکل ۴-۱۱، در رابطه ۴-۱۴، مقدار فرکانس قطع برابر ۱ هرتز خواهد شد. در نتیجه نوسانات فرکانس بالای ولتاژ تغذیه به خوبی تضعیف می‌شوند.

جریان نویز ورودی مستقیماً در مسیر سیگنال قرار دارد پس بهتر است تقویت کننده آن را حداقل کند. برای این کار، ظرفیت خازنی ورودی تقویت کننده بایستی در مقایسه با ظرفیت خازنی حس‌گر کوچک باشد. تقویت کننده MAX4478 برای این طراحی انتخاب مناسبی است. زیرا دارای جریان نویز ناچیز و ولتاژ نویز بسیار کم ($3/5$ تا $4/5$ نانو ولت بر مجذور هرتز در بازه حیاتی 10 تا 200 کیلوهرتز) می‌باشد. همچنین ظرفیت خازنی ورودی آن در حدود 10 پیکوفاراد است.

مقاومت R_3 هم مانند مقاومت R_2 در شکل ۴-۱۱، در مسیر سیگنال قرار دارد که مستقیماً در ایجاد نویز مشارکت می‌کند. جریان نویز مقاومت با ریشه دوم مقدار مقاومت نسبت معکوس دارد. پس مقدار این مقاومت‌ها را تا حدی که امکان دارد، باید بزرگ در نظر گرفت. در حالت عملی میزان جریان ناشی (تاریک) دیود نوری، مقدار بزرگی این مقاومت‌ها را به گونه‌ای تعیین کرده تا ولتاژ آفست قابل توجهی به وجود نیاید.

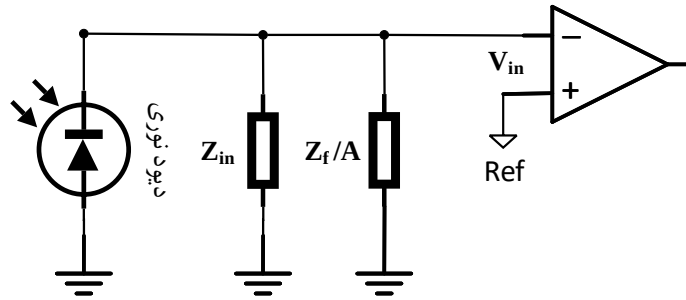
طبقه II شکل ۴-۱۱ پیش‌تقویت کننده را در ساختار حساس به بار نشان می‌دهد. با استفاده از این ساختار همانطور که در بخش ۲-۳-۳-۱ فصل ۲ گفته شد، ولتاژ خروجی کاملاً به خازن بازخورد وابسته می‌شود. زیرا طبق قضیه میلر با توجه به شکل ۴-۱۳ امیدانس بازخورد با نسبت عکس بهره به ورودی منتقل شده و امیدانس جدید بسیار از امیدانس معادل ورودی^۱ کوچکتر شده و جریان بیش‌تری به سمت آن سرازیر می‌شود. پس می‌توان نتیجه گرفت که حاصل ضرب ثابت زمانی R_3C_3 در بهره تقویت کننده از ثابت زمانی سیگنال ورودی باید خیلی بزرگ‌تر باشد. از طرفی بیش‌ترین جریان ناشی تقویت کننده MAX4478، 150 پیکوآمپر است. این امر، دلیل بزرگ انتخاب شدن مقاومت R_3 به اندازه 10 مگا اهم است. زیرا ولتاژ آفست قابل توجهی ایجاد نمی‌شود. همچنین خازن C_3 برای ایجاد بهره است. کوچک بودن آن موجب افزایش بهره و کاهش نویز خواهد شد (رابطه ۴-۱۷). این خازن باید دارای ضریب دمایی پایین باشد تا در تغییرات دمایی، بهره تقریباً ثابت بماند. در ادامه به تحلیل نظری این مدار پرداخته می‌شود.

ظرفیت خازن معادل ورودی طبقه دوم شکل ۴-۱۱ با توجه به شکل ۴-۱۳ عبارت است از:

$$\tau = R_3C_3 \quad (4-15)$$

در ادامه به تحلیل فرکانسی طبقه دوم پرداخته می‌شود. شکل ۴-۱۴ یک فیلتر بالاگذر فعال است. تابع تبدیل این فیلتر در صورت ایده‌آل فرض کردن پیش‌تقویت کننده برابر است

^۱ امیدانس ورودی بدون در نظر گرفتن امیدانس بازخورد است.



شکل ۴-۱۳: مدار معادل دو طبقه حس گر و پیش تقویت کننده

با:

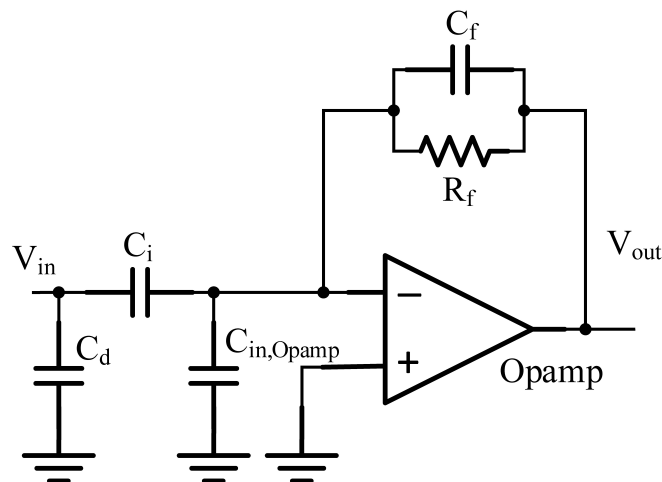
$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = -\frac{Z_f}{Z_i} = -\frac{R_f}{1 + R_f C_f s} \times C_i s = -\frac{C_i}{C_f} \frac{R_f C_f s}{(1 + R_f C_f s)} \quad (۴-۱۶)$$

حال کافیت تابع تبدیل ۴-۱۶ را به صورت استاندارد مرتب کرد:

$$H(s) = -\frac{C_i}{C_f} \frac{s}{s + \omega_0} \quad (۴-۱۷)$$

این تابع تبدیل نشان دهنده یک فیلتر بالا گذر بوده که به ترتیب دارای فرکانس قطع پایین و بهره بالاگذری به صورت زیر است.

$$\omega_0 = \frac{1}{R_f C_f} \quad (۴-۱۸)$$



شکل ۴-۱۴: طرح کلی طبقه دوم مدار شماره دو

$$k = \frac{C_i}{C_f} \quad (۱۹-۴)$$

طبقات IV ، III و V شکل ۱۱-۴ از یک شبکه CR-RC معکوس کننده تشکیل شده اند. این فیلتر میان گذر از ترکیب یک فیلتر بالا گذر، تقویت کننده معکوس کننده و یک فیلتر پایین گذر تشکیل شده است. دلیل استفاده این نوع فیلتر وجود پایداری و جلوگیری از ایجاد نویز بوده که در بخش ۲-۳-۴-۱ فصل ۲ بحث شده است.

شکل ۱۵-۴ یک فیلتر میان گذر فعال است. تابع تبدیل این فیلتر برابر است با:

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = -\frac{Z_f}{Z_i} = -\frac{R_f}{R_i} \frac{R_i C_i s}{(1 + R_f C_f s)(1 + R_i C_i s)} \quad (۲۰-۴)$$

حال کافیسیت تابع تبدیل ۲۰-۴ را به صورت استاندارد مرتب کنیم:

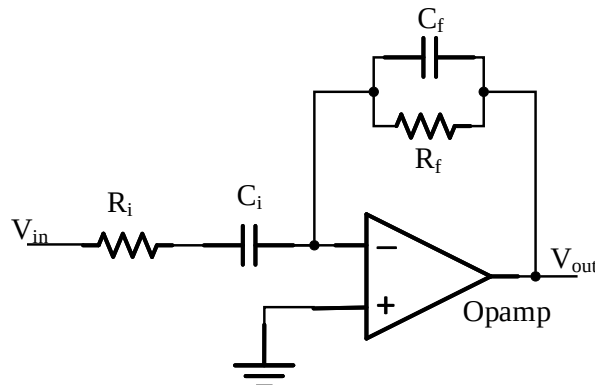
$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = -\frac{R_f}{R_i} \frac{\omega_2 s}{(s + \omega_2)(s + \omega_1)} \quad (۲۱-۴)$$

این تابع تبدیل نشان دهنده یک فیلتر میان گذر با فرکانس قطع پایین و بالا و بهره میان گذری به صورت زیر است:

$$\omega_1 = \frac{1}{R_i C_i} \quad (۲۲-۴)$$

$$\omega_2 = \frac{1}{R_f C_f} \quad (۲۳-۴)$$

$$k = \frac{R_f}{R_i} \frac{\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \quad (۲۴-۴)$$



شکل ۱۵-۴: طرح کلی طبقات سوم تا پنجم مدار شماره دو

طبق این روابط، ω_1 فرکانس قطع پایین، ω_2 فرکانس قطع بالا و k بهره میان گذر است. همچنین فرکانس مرکزی و پهنای باند فیلتر برابر می شود با:

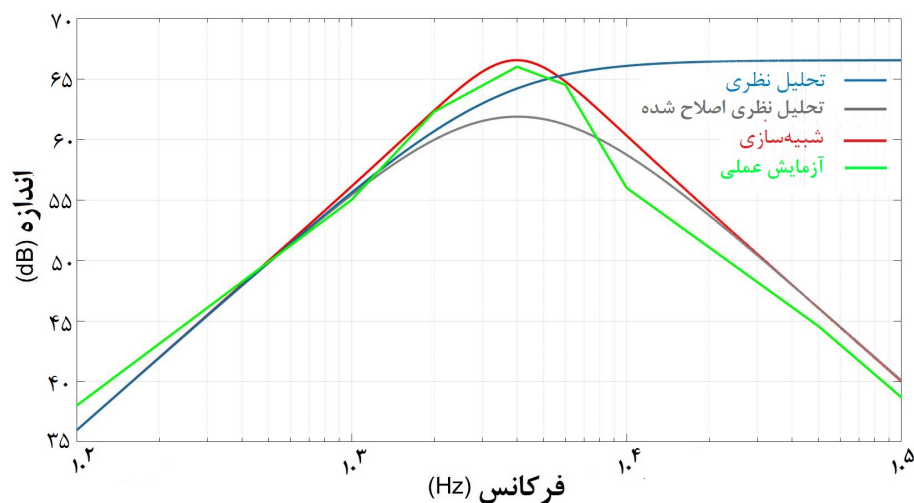
$$\omega_0 = \sqrt{\omega_1 \omega_2} \quad (۲۵-۴)$$

$$BW = \omega_2 - \omega_1 \quad (۲۶-۴)$$

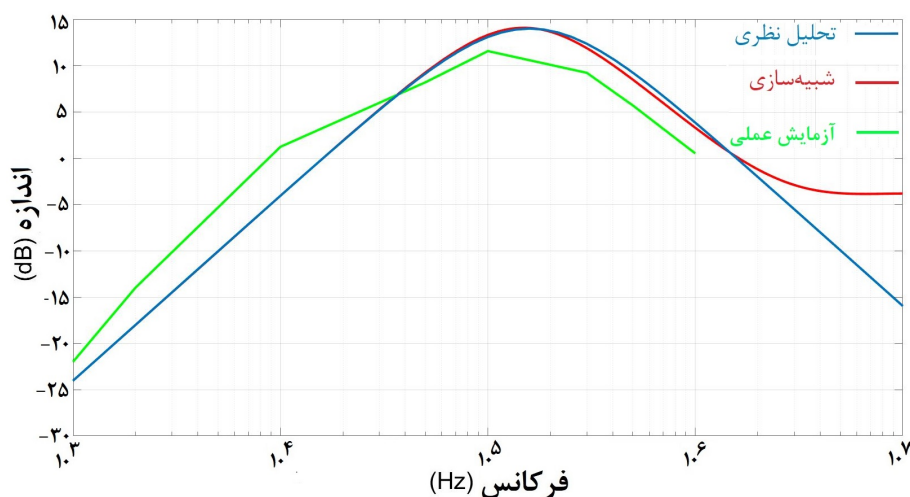
در طبقه آخر (قسمت VI شکل ۴-۱۱) مقایسه کننده LM311 با سرعت پاسخ بالا جهت مقایسه خروجی با یک حد آستانه قابل تنظیم، استفاده شده است. مقادیر مقاومت ها و مقاومت متغیر به گونه ای انتخاب شده که اولاً بتوان تمام سیگنال را مشاهده کرد و دوماً تغییرات اعمال شده بسیار کوچک باشد.

۲-۳-۳-۴ شبیه سازی طبقات

با قرار دادن مقادیر در تابع تبدیل هر طبقه، پاسخ فرکانسی قابل رسم است. با استفاده از نرم افزار متلب و Pspice، پاسخ فرکانسی طبقات دوم، سوم و چهارم و پنجم مدار ۴-۱۱ به ترتیب در شکل های ۴-۱۶، ۴-۱۷ و ۴-۱۸ در حالت تحلیل نظری، شبیه سازی و ساخت قابل مشاهده است. با مقایسه بهره و فرکانس های قطع بدست آمده از تحلیل تئوری و شبیه سازی در طبقه دوم، اختلاف قابل ملاحظه ای دیده می شود. این امر به دلیل عدم در نظر گرفتن فرکانس قطع بالای پیش تقویت کننده MAX4478 در پاسخ فرکانسی است. پس باید اثر تقویت کننده را در فرکانس های بالا در نظر گرفت. در نهایت اختلاف ایجاد شده در نتایج تحلیل نظری و شبیه سازی کاهش یافته و نتایج به یکدیگر نزدیک شده اند. همچنین این نتایج، نتایج حاصل از آزمایش عملی را تأیید می کنند.



شکل ۴-۱۶: پاسخ فرکانسی طبقه دوم شکل ۴-۱۱ در حالت تحلیل نظری، تحلیل نظری اصلاح شده، شبیه سازی و ساخت



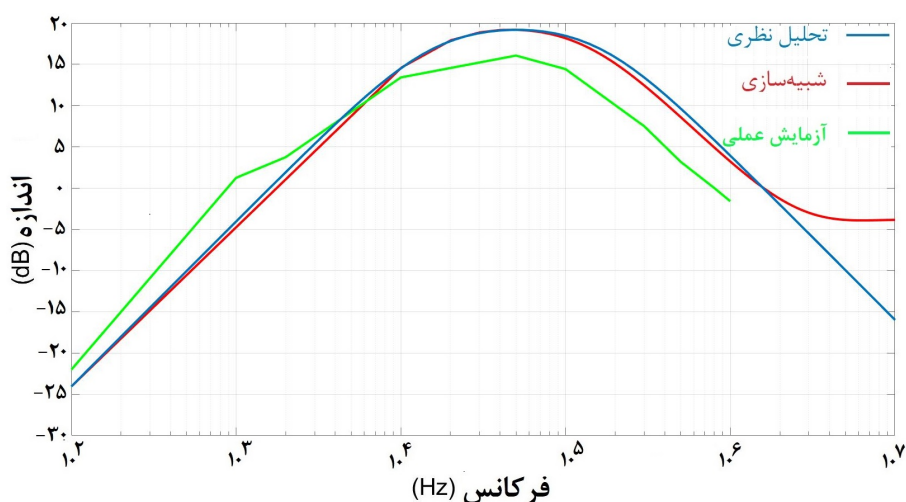
شکل ۴-۱۷: پاسخ فرکانسی طبقه سوم شکل ۴-۱۱ در حالت تحلیل نظری، شبیه‌سازی و ساخت

۴-۳-۴ مدار سوم

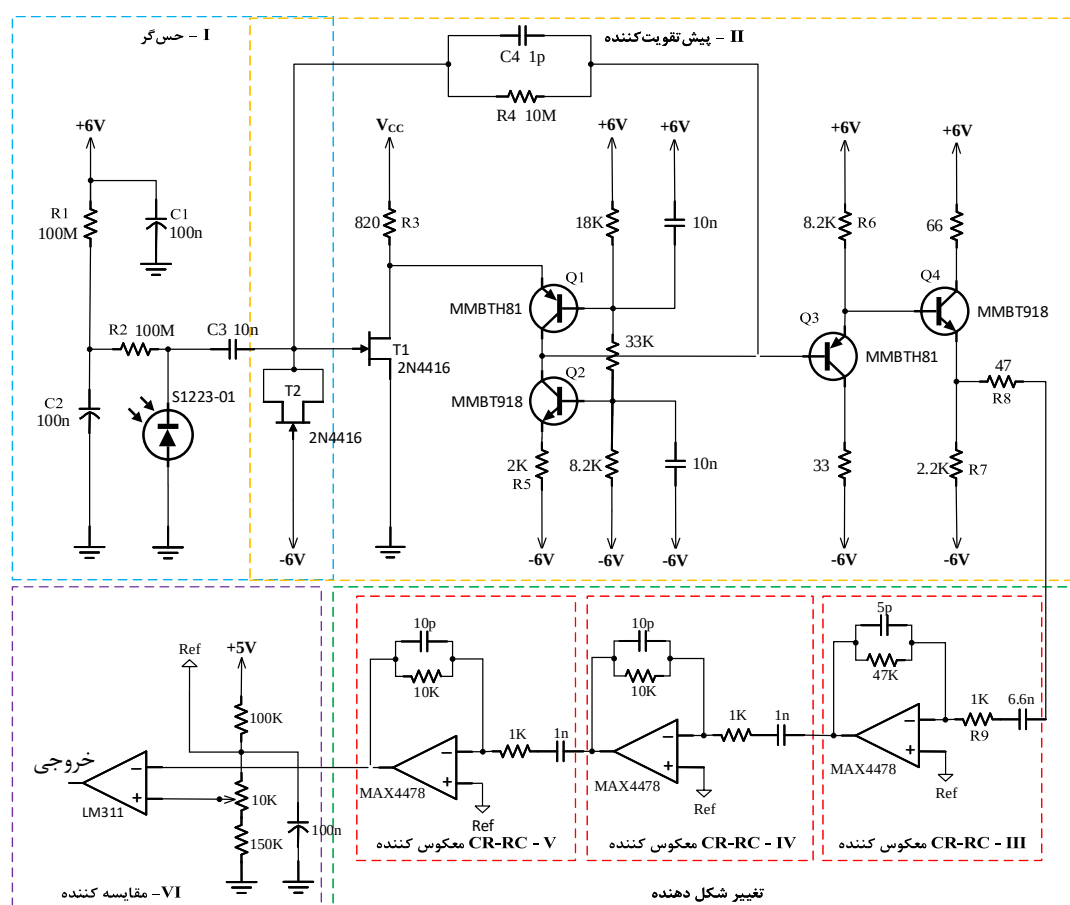
مدار شکل ۴-۱۹ که از مرجع [۲] استفاده شده است، برای آشکارسازی در حالت پالسی به کار می‌رود. این مدار از حس‌گر و پنج طبقه مجزا شامل پیش‌تقویت‌کننده، طبقات مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر و مقایسه‌گر تشکیل شده است.

۴-۳-۴-۱ عملکرد مدار و قطعات انتخابی

این مدار همانند دو مدار قبل، برای حالت پالسی طراحی شده است. ساختار قرارگیری حس‌گر (طبقه I) دقیقاً مانند مدار دوم است. مقاومت R_1 و خازن C_1 به عنوان یک فیلتر پایین‌گذر برای کاهش نوسانات ولتاژ تغذیه به کار می‌روند. تحلیل این طبقه مشابه طبقه اول



شکل ۴-۱۸: پاسخ فرکانسی طبقه چهارم و پنجم شکل ۴-۱۱ در حالت تحلیل نظری، شبیه‌سازی و ساخت



شکل ۴-۱۹: طرح کلی مدار شماره سه [۲]

مدار دوم است. با توجه به مقادیر مقاومت‌ها و خازن‌های طبقه اول شکل ۴-۱۹، ظرفیت ورودی ترانزیستورهای T_1 و T_2 مقدار فرکانس قطع این فیلتر طبق رابطه ۴-۱۴، برابر ۰/۰۲ هرتز بدست می‌آید. پس می‌توان گفت، نوسانات فرکانس بالای ولتاژ تغذیه در ورودی مدار کاهش می‌یابد.

بلوک پیش تقویت کننده در این مدار کاملاً با دو مدار قبل متفاوت است. این بلوک از چهار طبقه مجزا شامل طبقات سورس مشترک، بیس مشترک با بار فعال و دو طبقه دنبال کننده امیتر تشکیل شده است. طبقات سورس مشترک و بیس مشترک با بار فعال، سیگنال را تقویت کرده سپس برای قابلیت جریان دهی از طبقات دنبال کننده امیتر استفاده شده است. امپدانس معادل دیده شده در گیت ترانزیستور T_1 شامل مقاومت‌های R_1 و R_2 به همراه خازن C_3 ، خازن دیده شده از خروجی حس گر و خازن دیده شده از ترانزیستورهای T_1 و T_2 است. ترانزیستور T_1 در ناحیه قطع بوده که به دلیل اتصال پایه‌های درین و سورس آن به یکدیگر، نقش یک خازن را بازی می‌کند^۱. با در نظر گرفتن اثر میلر، امپدانس شبکه بازخور با عکس بهره پیش تقویت کننده در ورودی ظاهر شده و ثابت زمانی سیگنال ورودی پیش تقویت کننده

^۱MOSCAP

با توجه به شکل ۴-۱۳ به آن وابسته می‌شود. در ادامه به تحلیل تئوری این طبقه پرداخته خواهد شد.

مقدار بهره ولتاژ طبقات سورس مشترک و بیس مشترک با بار فعال پیش تقویت کننده، با تحلیل سیگنال کوچک این طبقات بدست می‌آید. این تقویت کننده دو طبقه شامل بازخورد ولتاژ-جریان است. مجموع امپدانس‌های دیده شده از طبقات دنبال کننده سورس و اثر بارگذاری شبکه بازخورد پیش تقویت کننده شکل ۴-۱۹ را می‌توان با امپدانس Z_L نشان داد. این امپدانس برابر است با:

$$Z_L = \frac{1}{C_4 s} || R_4 || [r_{\pi, Q3} + (\beta_{Q3} + 1)(R_6 || [r_{\pi, Q4} + (\beta_{Q4} + 1)(R_7 || (R_8 + R_9))])] \quad (4-27)$$

برای تحلیل طبقات سورس مشترک و بیس مشترک شکل ۴-۱۹، ابتدا باید معادل نورتون ورودی پیش تقویت کننده را بدست آورد. مقدار جریان و امپدانس معادل نورتون به ترتیب در روابط ۴-۲۸ و ۴-۲۹ آمده است.

$$I_{in} = \frac{C_3}{C_3 + C_d} \times I_d \quad (4-28)$$

$$Z_n = [\frac{1}{(C_{T1} + C_{T2} + C_4)s} || R_4 || [\frac{1}{C_3 s} + \frac{1}{C_d s}]] \quad (4-29)$$

در این روابط I_{in} جریان معادل نورتون بوده که به عنوان منبع جریان ورودی پیش تقویت کننده در نظر گرفته می‌شود. همچنین C_d ظرفیت دیود نوری تحت ولتاژ بایاس ۶ ولت، C_{T1} و C_{T2} به ترتیب ظرفیت معادل ترانزیستور T_1 و T_2 هستند. در ادامه مقدار بهره ولتاژ به جریان حلقه باز پیش تقویت کننده با در نظر گرفتن اثر بارگذاری شبکه بازخورد محاسبه شده است.

$$R_{ol}(s) = \frac{V_{out}(s)}{I_{in}(s)} = \frac{-gm_{T1} \times gm_{Q1} \times Z_L \times Z_n}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{r_{\pi, Q1}} + gm_{Q1}} \quad (4-30)$$

که در این رابطه R_{ol} ، بهره ولتاژ به جریان حلقه باز است. با توجه به آن، بهره ولتاژ به جریان حلقه بسته برابر می‌شود با:

$$R_{cl}(s) = \frac{R_{ol}(s)}{1 - \frac{R_{ol}(s)}{Z_f}} \quad (4-31)$$

در این معادله R_{cl} همان بهره ولتاژ به جریان حلقه بسته طبقات سورس مشترک و بیس مشترک پیش تقویت کننده شکل ۴-۱۹ با اثر بارگذاری شبکه بازخورد و طبقات بعدی است. همچنین Z_f امپدانس شبکه بازخورد بوده که از رابطه ۴-۳۲ بدست می‌آید.

$$Z_f(s) = R_4 || \frac{1}{C_4 s} \quad (4-32)$$

در نهایت بهره ولتاژ حلقه بسته پیش تقویت کننده را می توان از رابطه زیر بدست آورد:

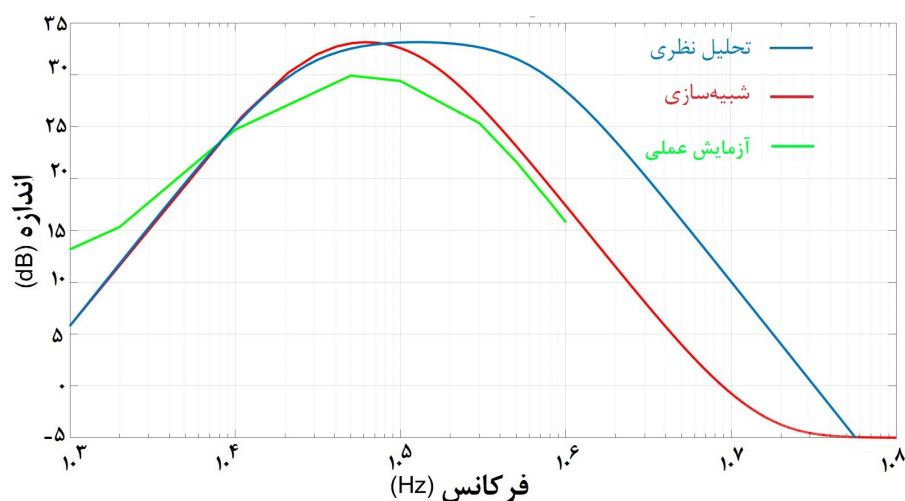
$$A_{V,cl}(s) = \frac{R_{cl}}{Z_n} \quad (۳۳-۴)$$

تحلیل فرکانسی طبقات IV و V مدار ۱۹-۴ همانند تحلیل فرکانسی طبقات III و IV ، و مدار ۱۱-۴ است.

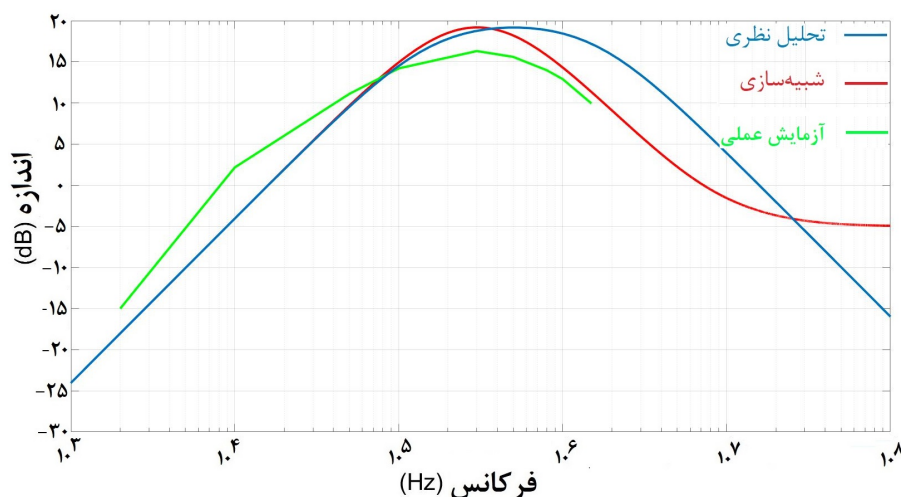
در طبقه آخر (قسمت VI شکل ۱۹-۴) مقایسه کننده LM311 با سرعت پاسخ بالا جهت مقایسه خروجی با یک حد آستانه قابل تنظیم، استفاده شده است. در انتخاب مقادیر مقاومت ها و مقاومت متغیر، مانند دو مدار قبل باید دقت شود تا اطلاعات از بین نرود.

۲-۴-۳-۴ شبیه سازی طبقات

ابتدا با قرار دادن مقادیر در تابع تبدیل هر طبقه، پاسخ فرکانسی قابل رسم است. حال با استفاده از نرم افزار متلب و Pspice، پاسخ فرکانسی طبقات سوم، چهارم و پنجم مدار سوم به ترتیب در شکل های ۲۰-۴ و ۲۱-۴ در حالت تحلیل نظری، شبیه سازی و ساخت قابل مشاهده است. با مقایسه نمودارها، اختلاف قابل ملاحظه ای در فرکانس های بالا دیده می شود. این امر به دلیل ایده آل فرض کردن تقویت کننده عملیاتی در تحلیل تئوری به وجود آمده است. تابع تبدیل این طبقات همچون یک فیلتر میان گذر ایده آل عمل کرده که در فرکانس کاری مدار، بیشترین بهره را دارند. اما با توجه به مشخصات فرکانسی تقویت کننده عملیاتی، مشخصات پاسخ فرکانسی تغییر کرده و تابع تبدیل در فرکانس های بالا محدود شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، پاسخ حاصل از ساخت و شبیه سازی مشابه شده است.



شکل ۲۰-۴: پاسخ فرکانسی طبقه سوم شکل ۱۹-۴ در حالت تحلیل نظری، شبیه سازی و ساخت



شکل ۴-۲۱: پاسخ فرکانسی طبقه چهارم و پنجم شکل ۴-۱۹ در حالت تحلیل نظری، شبیه‌سازی و ساخت

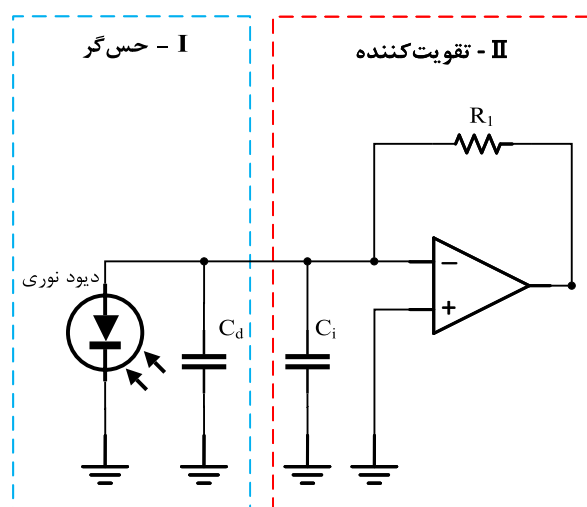
۴-۳-۵ مدار چهارم

این مدار که از مرجع [۱۵] انتخاب شده، برای آشکارسازی امواج یونیزان در حالت جریانی در یک طبقه طراحی شده است. حالت جریانی زمانی کاربرد دارد که تعداد زیادی از تابش‌های پرنرژی وجود داشته باشد. مانند اتاق‌های عکس برداری پزشکی. در این حالت حس‌گر بایاس نمی‌شود زیرا تجمع فوتون‌ها آنقدر زیاد بوده که بدون بایاس دیود نوری، پیوندهای زیادی در معرض شکستن قرار گرفته و جریان قابل ملاحظه‌ای از آن به وجود می‌آید.

۴-۳-۵-۱ عملکرد مدار و قطعات انتخابی

با توجه به شکل ۴-۲۲ یک طبقه تقویت‌کننده عملیاتی حساس به جریان، جریان حاصل از دیود نوری را به ولتاژ تبدیل کرده و پس از تقویت آن را به خروجی می‌برد. محدوده جریان حاصل از دیود نوری بین ۱۰ pA تا ۱۰۰ nA است. پس برای داشتن ولتاژ قابل ملاحظه در خروجی، مقدار مقاومت بازخورد باید در حدود چند صد مگا اهم باشد. اما نکته‌ی قابل توجه ولتاژ آفستی است که به دلیل این مقاومت بزرگ در خروجی ایجاد می‌شود و تقویت‌کننده را ناپایدار می‌کند. به همین دلیل باید از تقویت‌کننده‌ای استفاده کرد که ولتاژ آفست و جریان بایاس ورودی آن به شدت پایین باشد. همچنین جریان نشتی دیود نوری هم باید کوچک باشد.

در این ساختار جریان مستقیم حاصل از دیود نوری در امپدانس معادل ورودی تقویت‌کننده و خروجی دیود نوری تخلیه شده و به ولتاژ تبدیل می‌شود. سپس از طریق مقاومت بازخورد تقویت شده و به خروجی می‌رود. با توجه به شکل ۴-۲۲ با قرار دادن مقاومت بازخورد به اندازه ۱۰۰ مگا اهم، بهره تبدیلی مدار به ۱۶۰ دسی‌بل می‌رسد. مقدار بهره این تقویت‌کننده از

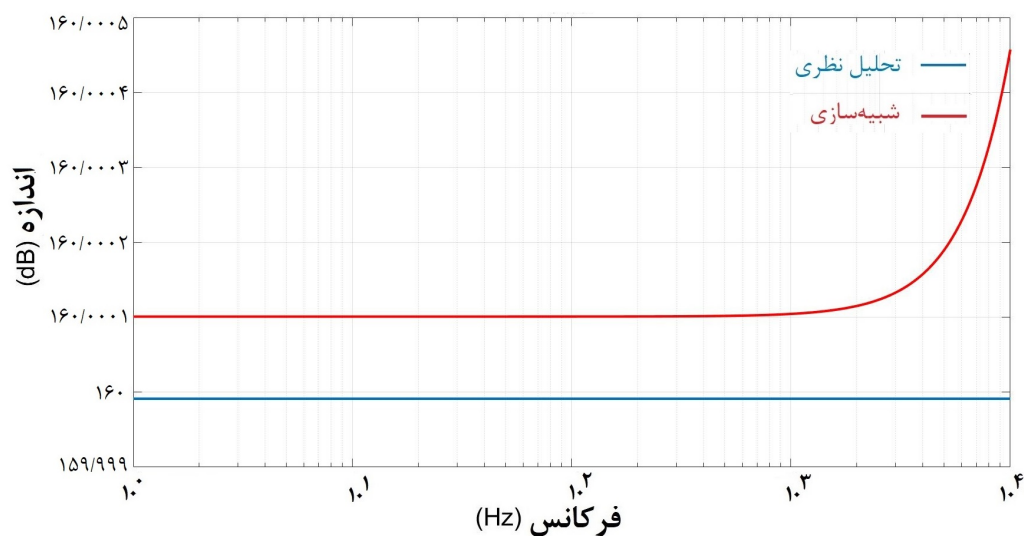


شکل ۴-۲۲: طرح کلی مدار شماره چهار (حالت جریانی)

رابطه ۴-۳۴ محاسبه می‌شود. در این رابطه، تقویت کننده ایده‌آل فرض شده است. به همین دلیل خازن‌های C_d و C_i که به ترتیب ظرفیت‌های حس گر و ورودی تقویت کننده هستند اتصال کوتاه می‌شوند.

$$A = \frac{V_{out}}{I_{in}} = R_1 \quad (۴-۳۴)$$

همچنین در این مدار از تقویت کننده AD8605 با جریان بایاس ورودی 200 fA و ولتاژ آفست ورودی $20 \mu\text{V}$ استفاده شده است. بهره در حالت تحلیل نظری و شبیه‌سازی در شکل ۴-۲۳ آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار بهره در هر دو حالت تقریباً یکسان بدست



شکل ۴-۲۳: مقایسه بهره تحلیل نظری و شبیه‌سازی

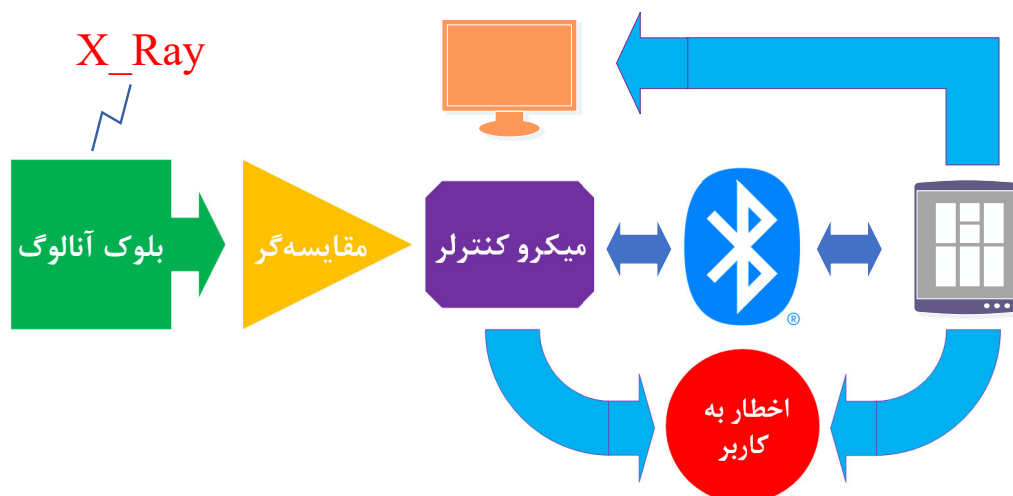
آمده است. به دلیل بهره بالای این تقویت کننده، بدست آوردن بهره در حالت ساخت قابل انجام نیست.

۶-۳-۴ مدار دیجیتال

برای مشاهده راحت تر نتایج خروجی و هموار کردن راه جهت تکمیل تحقیق در حوزه های طیف سنجی، دزسنجی و ... می توان از مدار دیجیتال بهره گرفت. این مدار شامل قسمت های مقایسه گر، میکرو کنترلر، ماژول بلوتوث و نرم افزار گوشی های هوشمند اندرویدی است. شکل ۴-۲۴ نمودار بلوکی قسمت دیجیتال را نشان می دهد. این برد شامل بلوک مقایسه کننده، برد آردوینو و ماژول بلوتوث به همراه LED مرتبط و بازر است. سیگنال پس از برخورد به حسگر ظاهر و توسط بلوک آنالوگ تقویت می شود. در قسمت دیجیتال بلوک مقایسه گر سیگنال را با استفاده از یک حد آستانه قابل تنظیم به دو سطح منطقی صفر و یک تبدیل می کند. سیگنال دیجیتال ایجاد شده به وسیله میکرو کنترلر شناسایی شده و از طریق ماژول بلوتوث به تلفن همراه منتقل و نمایش داده می شود.

۱-۶-۳-۴ بلوک مقایسه گر

مدار مقایسه کننده که در بخش های قبلی توضیح داده شد، جهت تعیین حد آستانه برای ایجاد دو سطح منطقی مختلف است. در واقع مقایسه کننده سطح سیگنال خروجی را با سطح تنظیم شده توسط کاربر، مقایسه کرده و اگر سطح سیگنال بالاتر از سطح آستانه باشد خروجی یک منطقی و در غیر این صورت صفر منطقی می شود. این قسمت برای تعیین میزان حساسیت دستگاه به تابش های یونیزان با انرژی مشخص است.



شکل ۴-۲۴: نمودار بلوکی پیشنهادی قسمت دیجیتال سامانه آشکارساز

۴-۳-۶ برد کنترلی

در این قسمت می‌توان از آردوینو Pro Mini به عنوان میکروکنترلر استفاده کرد. جدول ۴-۱۰ مشخصات این میکروکنترلر را نشان می‌دهد. توضیحات مربوط به برد آردوینو و محیط برنامه‌نویسی آن در پیوست ب آمده است.

سیگنال بعد از تبدیل شدن به سطح منطقی صفر یا یک توسط مقایسه‌گر، به وسیله پایه دیجیتال شماره دو آردوینو که مجهز به وقفه خارجی است، خوانده می‌شود. وقفه خارجی میکروکنترلر در حالت بالا رونده تنظیم می‌شود. به عبارت دیگر در هر بار که یک پالس بالا رونده که نشان از وجود تابش یونیزان است؛ به این پایه میکروکنترلر اعمال شود، این رخداد توسط یک متغیر ثبت می‌شود. همزمان با ثبت رخداد، LED متصل به پایه شماره ۱۱ و بازر متصل به پایه شماره ۱۰ آردوینو فعال شده و کاربر را از وجود تابش یونیزان در آستانه مورد دلخواه او آگاه می‌سازد. همچنین این رخداد توسط مازول بلوتوث به گوشی همراه هوشمند منتقل می‌شود. در کنار این امور، مقدار ولتاژ آستانه مقایسه‌کننده برای تنظیم راحت‌تر، توسط پایه شماره یک آنالوگ آردوینو خوانده شده و به گوشی همراه هوشمند منتقل می‌شود.

آردوینو علاوه بر این وظایف، می‌تواند تعداد رخدادها یا شمارش در دقیقه را که با واحد CPM شناخته می‌شود، حساب کرده و مقدار آن را توسط مازول بلوتوث به گوشی همراه هوشمند ارسال کند. این امر توسط قابلیت تایمر موجود در میکروکنترلر صورت می‌گیرد.

مشخصه CPM یا شمارش در دقیقه، یک روش برای اندازه‌گیری تابش‌های یونیزان است. در واقع این مشخصه نرخ ثبت رخدادها را توسط دستگاه اندازه‌گیری نشان می‌دهد و از نرخ پرتوآیی منبع تابش اطلاعاتی نمی‌دهد.

پس از کدنویسی موارد بالا در محیط Sketch آردوینو به زبان C++، فایل مربوطه توسط مبدل USB to TTL از طریق رایانه در برد آردوینو Pro Mini برنامه‌ریزی می‌شود.

جدول ۴-۱۰: مشخصات آردوینو Pro Mini

پردازنده	فرکانس کاری (MHz)	تعداد I/O	پورت آنالوگ	ولتاژ کاری (V)	جریان I/O (mA)	حافظه (kB)
8 bit ATmega328P	16	14x DI/O	6x 10bit	5	40	32

جدول ۴-۱۱: مشخصات مازول بلوتوث HC05

نسخه بلوتوث	نرخ انتقال (Mbps)	نوع ارتباط با میکرو	ولتاژ کاری (V)	حداکثر جریان (mA)	Baud rate
V2.0+EDR	3	SPP serial protocol	3.3	50	8bit 9600 to 460800

۳-۶-۳-۴ مازول بلوتوث

در این سامانه برای انتقال داده‌ها بین برد آردوینو و گوشی همراه هوشمند، می‌توان از مازول بلوتوث HC05 با Baud rate ۱۱۵۲۰۰ بیت در ثانیه استفاده کرد. مشخصات این مازول در جدول ۱۱-۴ آمده است.

به دلیل پروتکل ارتباطی سریال در این مازول به راحتی می‌توان آن را به میکروکنترلر متصل کرد و با استفاده از دستورات AT^۱ قابل برنامه ریزی است.

۴-۶-۳-۴ تلفن هوشمند

همانطور که گفته شد داده‌های تحلیل شده در آردوینو توسط مازول بلوتوث HC05 به تلفن هوشمند منتقل می‌شوند. برای تحقق این امر نیاز به یک تلفن هوشمند دارای سیستم عامل و سخت‌افزار بلوتوث است. می‌توان از سیستم عامل اندروید برای نوشتن نرم‌افزار نمایش داده‌های برد آردوینو استفاده کرد. این نرم‌افزار نوشته شده، «آشکارساز رادیواکتیویته» نام دارد. نرم‌افزار شامل سه قسمت مهم ارتباط با سخت‌افزار بلوتوث، نمایش داده‌ها و تنظیمات برد کنترلی است. در پیوست ب به توضیحاتی مربوط به پیش‌نیازهای برنامه‌نویسی اندروید و طریقه نوشتن برنامه «آشکارساز رادیواکتیویته» پرداخته شده است.

نرم‌افزار توسط Android Studio نسخه ۳/۶/۰/۲۱ سیستم‌عامل ویندوز ۱۰ نوشته شده است. API استفاده شده، API سطح ۲۱ معادل با Android 5.0.1 Lollipop است. شکل ۴-۲۵ نمایشی از صفحه‌های طراحی شده نرم‌افزار آشکارساز رادیواکتیویته را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۵: (الف) صفحه ابتدایی نرم‌افزار آشکارساز رادیواکتیویته، (ب) صفحه درباره ما نرم‌افزار آشکارساز رادیواکتیویته، (ج) صفحه نمایش داده‌ها نرم‌افزار آشکارساز رادیواکتیویته، (د) صفحه تنظیمات بلوتوث نرم‌افزار آشکارساز رادیواکتیویته

^۱ AT Commands

فصل ۵

نتایج و پیشنهادها

۵-۱ مقدمه

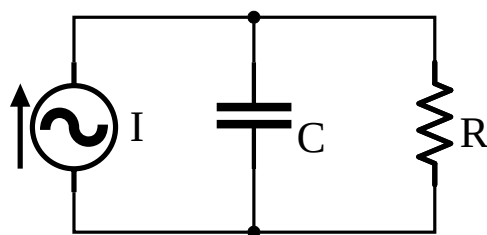
در این فصل ابتدا مدل دیود نوری برای انجام شبیه‌سازی ترسیم شده است. سپس به معرفی مدل آزمایشگاهی پرداخته شده، و در ادامه آن نتایج شبیه‌سازی و ساخت مدارهای فصل قبل، ارائه می‌گردد. در انتهای فصل نتیجه‌گیری و پیشنهادات قابل اجرا برای ادامه این تحقیق بیان خواهد شد.

۵-۲ مدل سازی دیود نوری PIN

برای شبیه‌سازی مدارهای بحث شده در فصل ۴، باید از مدل دیود نوری PIN در طبقه اول استفاده کرد. این مدل باید به گونه‌ای باشد که وضعیت برخورد یک تابش X را شبیه‌سازی کند. به همین منظور در حالت پالسی، دیود نوری طبق شکل ۵-۱ 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 [۲۴]. این مقادیر را با توجه به مشخصات برگه فنی هر دیود نوری می‌توان بدست آورد.

۵-۳ مدل آزمایشگاهی

همانطور که در تحقیقات انجام شده در فصل ۳ تأکید شده، مهم‌ترین نکته برای رسیدن به نتیجه مطلوب و مشاهده خروجی مورد نظر، محافظت مدار از نویز و نور مرئی است. به سبب این امر و نتایج تحقیق [۹]، 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



شکل ۵-۱: مدل دیود نوری برای شبیه‌سازی برخورد تابش X [۲۴]

را به حداقل برساند. همچنین برای به حداقل رساندن برخورد نور مرئی با حس گر، قسمت داخلی قوطی پوشش سیاه رنگی قرار گرفته تا از انعکاس نور در داخل آن جلوگیری شود. با قرار دادن درب قوطی هیچ گونه نوری نمی تواند 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 می گیرد. خروجی مدار از طریق یک جک ۳/۵ میلی متری با دنیای بیرون قوطی ارتباط برقرار کرده است. برای مشاهده خروجی در اسیلوسکوپ کافیت خروجی جک را به آن متصل کرد. همچنین می توان مدار را به وسیله این جک به قسمت دیجیتال پیشنهاد شده متصل نمود. شکل ۲-۵ مدل آزمایشگاهی استفاده شده در این پایان نامه را نشان می دهد.

۴-۵ نتایج

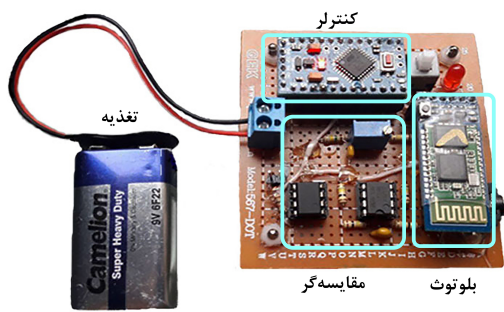
در این بخش ابتدا نتایج حاصل از تحلیل نظری، سپس نتایج شبیه سازی و در نهایت نتایج آزمایش های عملی به همراه پاسخ مدارهای حالت پالسی و مدار حالت جریانی ارائه می شود. همچنین با تحلیل نتایج بدست آمده، مزایا و معایب هر کدام از مدارهای حالت پالسی شرح داده شده است.

۱-۴-۵ نتایج تحلیل نظری

پس از انجام تحلیل نظری بر روی مدارهای اول، دوم و سوم، تابع تبدیل طبقات مختلف آن ها محاسبه شد. روابط ۸-۴، ۱۷-۴، ۲۱-۴ و ۳۱-۴ نتایج این تحلیل بودند. با جایگذاری مقادیر عناصر هر مدار که به ترتیب در شکل های ۶-۴، ۱۱-۴ و ۱۹-۴، مشخص شده اند، مقدار بهره هر مدار در فرکانس کاری مدار بدست می آید. این مقادیر بهره برای آشکارسازهای اول، دوم و سوم به ترتیب برابر ۶، ۹۲/۳۲ و ۶۳/۱۴ دسی بل است. این نتایج نشان می دهد که بهره بزرگ مدار دوم سبب بزرگتر شدن دامنه خروجی این آشکارساز نسبت به دو آشکارساز دیگر خواهد شد. همچنین مدار اول کوچکترین بهره را تولید می کند.

۲-۴-۵ نتایج شبیه سازی

برای شبیه سازی مدارها آشکارساز کافیت از نرم افزارهای شبیه ساز مدارهای الکترونیک استفاده کرد. در این تحقیق برای بررسی کارکرد درست مدارهای آنالوگ سامانه آشکارساز، از نرم افزار OrCAD PSpice Designer استفاده شده است. در فصل ۴، هر طبقه از مدارها با تحلیل AC بررسی و نتایج آن قرار گرفت. همچنین برای دیدن پاسخ مدار به ورودی مورد نظر، از تحلیل زمانی استفاده شده است. برای این کار مدل دیود نوری در حالت پالسی که در بخش ۲-۵ توضیح داده شد، به کار رفته است. شکل موج خروجی این مدل در شکل ۳-۵ آمده



(ب)

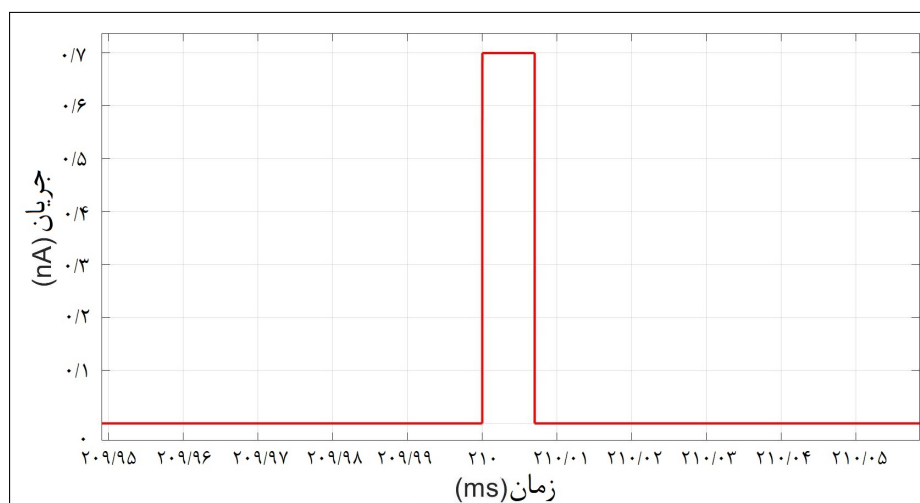


(الف)



(ج)

شکل ۵-۲: (الف) قسمت دیجیتال سامانه همراه با قاب ، (ب) قسمت دیجیتال سامانه بدون قاب ، (ج) قسمت های آنالوگ و دیجیتال سامانه آشکارساز همراه با پوشش ضد نور



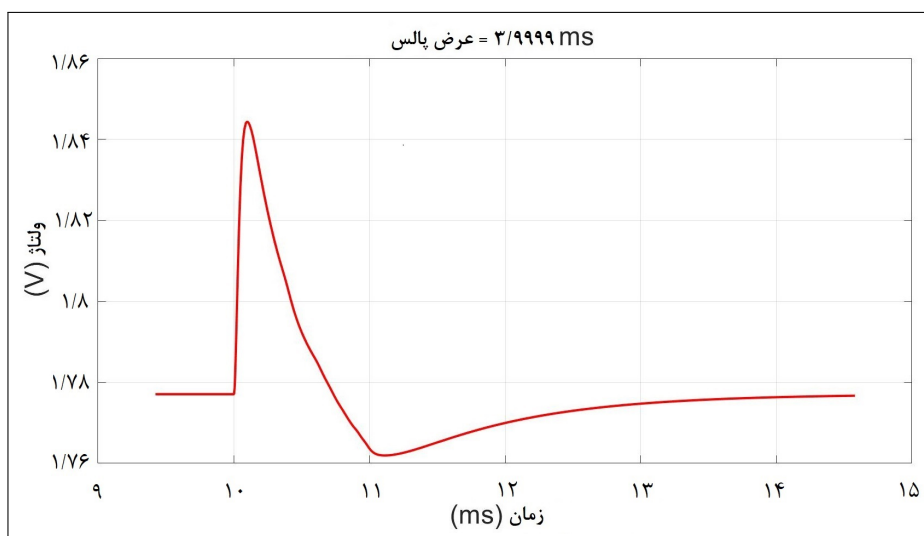
شکل ۵-۳: شکل موج مدل شده، برای شبیه‌سازی تابش یونیزان در حوزه زمان

است. در شکل ۵-۴ به ترتیب پاسخ مدارهای اول، دوم و سوم به این ورودی، در حوزه زمان رسم شده است.

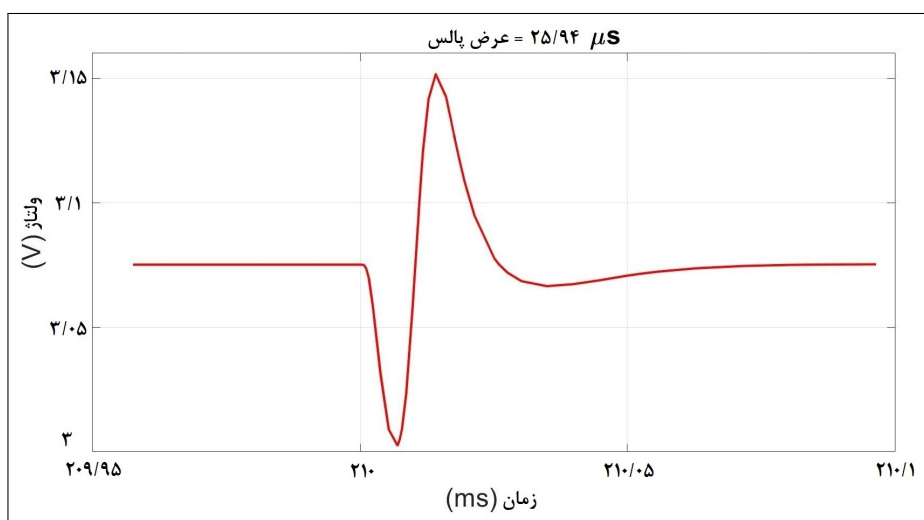
شکل ۵-۴، پاسخ هر مدار به یک پالس جریانی که حالت شبیه‌سازی شده یک برخورد تابش X است، را نمایش می‌دهد. قله‌ها در هر شکل نمایانگر وجود یک فوتون X هستند. به این نوع پالس‌ها، پالس‌های دوقطبی می‌گویند. پالس‌های دوقطبی دارای دو لوب بالایی و پایینی هستند. اما پالس‌های تک‌قطبی تنها شامل لوب مثبت هستند. دلیل دوقطبی شدن، 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 به سبب انباشتگی پالس، موجب تغییر خط پایه (متوسط سیگنال) شده و اطلاعات را از بین می‌برد^۱.

زمانی که نرخ برخورد تابش‌ها بالا بوده و بار زیادی در ورودی پیش‌تقویت‌کننده جمع شود، متوسط پالس خروجی پیش‌تقویت‌کننده هم افزایش می‌یابد. این امر ممکن است سبب خارج شدن پیش‌تقویت‌کننده از ناحیه خطی خود شود. این پالس‌های انباشته باعث اشباع پیش‌تقویت‌کننده شده و در نتیجه دچار اعوجاج جدی خواهند شد. به بیان دیگر قبل از آن که زمان به صفر رسیدن پالس قبلی تمام شود، رویداد جدید رخ داده و این امر اولاً سبب بالا آمدن متوسط سیگنال و به دنبال آن اشباع تقویت‌کننده شده و دوماً از آن‌جا که اطلاعات سیگنال بر روی دامنه است، قسمتی از اطلاعات سیگنال از بین می‌رود (زیرا پالس دوم از صفر شروع نشده است). این اتفاق در پالس‌های تک‌قطبی رخ می‌دهد. اما در پالس‌ها دو قطبی، پایین‌زدگی سیگنال موجب می‌شود که اگر به سبب انباشتگی پالس، خط پایه تغییر کند، اطلاعات سیگنال بعدی حفظ شود [۵، ۲۴]. ارتفاع پالس‌ها در هر سه مدار قابل توجه بوده و نشان دهنده آن است که هر سه مدار قابلیت خوبی در آشکارسازی تابش X دارند.

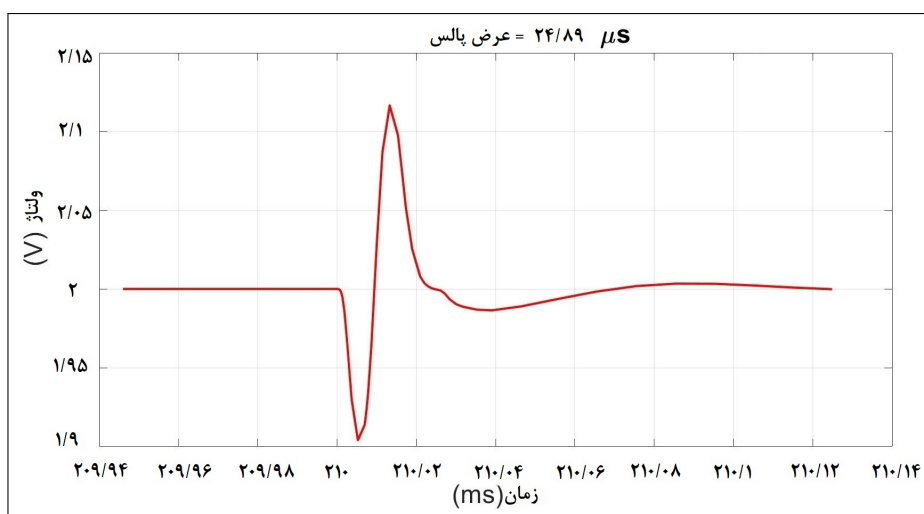
^۱ زیرا پالس‌های خروجی حس‌گر، علاوه بر آن که ارتفاع متفاوت دارند، فاصله بینشان هم متفاوت است.



(الف)



(ب)

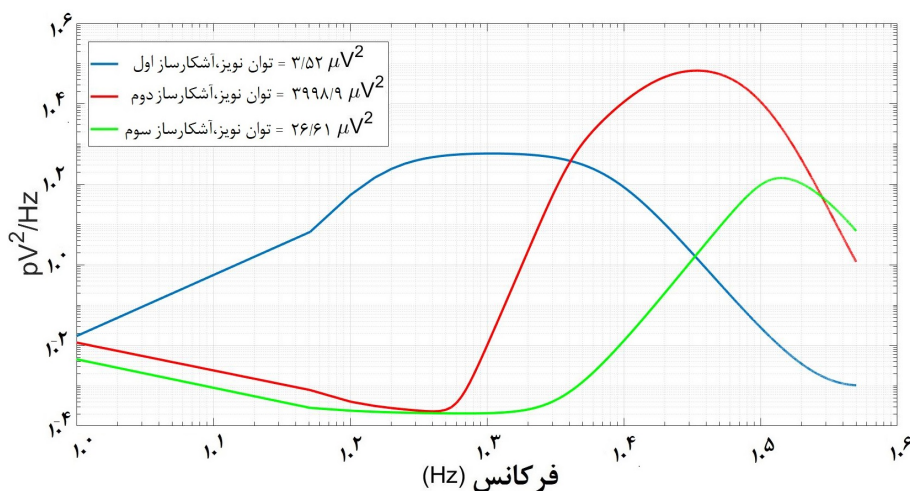


(ج)

شکل ۴-۵: (الف) شبیه‌سازی شکل موج خروجی مدار اول (حالت پالسی)، (ب) شبیه‌سازی شکل موج خروجی مدار دوم (حالت پالسی)، (ج) شبیه‌سازی شکل موج خروجی مدار سوم (حالت پالسی)

مقدار بهره تبدیلی در هر مدار با استفاده از تحلیل AC شبیه‌ساز، اندازه‌گیری شده است. در این اندازه‌گیری یک منبع AC با اندازه واحد اعمال شده و پاسخ فرکانسی هر مدار رسم شده است. مقدار بهره برای آشکارسازهای اول تا سوم در فرکانس کاری مدار به ترتیب برابر ۵۷، ۸۵/۷ و ۵۷/۹ دسی‌بل بدست آمده است. این امر نشان می‌دهد که ارتفاع پالس‌های مدار دوم، بلندتر از دو مدار دیگر می‌شود. تحلیل نویز مدارها را می‌توان همراه با تحلیل AC شبیه‌سازی کرد. این تحلیل در حالتی انجام شده که یک منبع AC در ورودی مدار قرار گرفته است. با استفاده از تحلیل AC، مقدار توان نویز در خروجی سه مدار حالت پالسی در شکل ۵-۵ ترسیم شده است. همچنین با توجه به توان نویز خروجی و بهره، کل توان نویز ارجاع داده شده به ورودی آشکارسازهای اول، دوم و سوم به ترتیب برابر با $7/64 nV^2$ ، $137/48 nV^2$ و $88/53 nV^2$ بدست آمده است. این نتایج نشان می‌دهد آشکارساز دوم بیش‌ترین توان نویز و آشکارساز اول کم‌ترین توان نویز را تولید می‌کنند. با توجه به این مقادیر توان نویز، نسبت سیگنال به نویز در هر سه مدار قابل محاسبه است. SNR برای سه آشکارساز به ترتیب برابر ۷۸/۱۶، ۶۵/۶۱ و ۶۷/۵۲ دسی‌بل شده است. با توجه به این نتایج می‌توان گفت آشکارساز اول بهترین آشکارسازی را نسبت به دو آشکارساز دیگر انجام می‌دهد.

با مقایسه دوره زمانی پاسخ‌های سه آشکارساز می‌توان گفت آشکارساز اول در نرخ‌های بالای شمارش خوب عمل نکرده و احتمال انباشتگی پالس و از بین رفتن اطلاعات وجود دارد. طول زمانی پالس، علت این رخداد است. در آشکارساز اول این مدت زمان به اندازه تقریبی ۴ میلی‌ثانیه بوده در حالی که در آشکارساز دوم و سوم به ترتیب ۲۵/۹۴ و ۲۴/۸۹ میکروثانیه است. توان تلفاتی DC هر مدار به ترتیب ۳۶/۸۶، ۱۸۰/۷ و ۱۵۷/۷۸ میلی‌وات اندازه‌گیری شده است. در نتیجه آشکارساز اول نسبت به دو آشکارساز دیگر توان مصرفی کم‌تری دارد. از دلایل آن می‌توان به پیچیدگی کم‌تر و انتخاب قطعات با توان تلفاتی کم‌تر اشاره کرد. خلاصه نتایج شبیه‌سازی در جدول ۱-۵ قابل مشاهده است.



شکل ۵-۵: شبیه‌سازی توان نویز خروجی آشکارسازهای اول، دوم و سوم

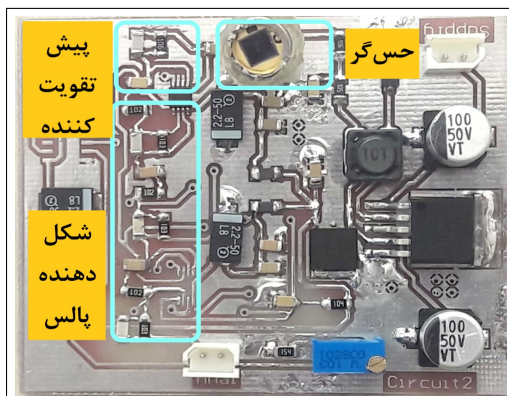
جدول ۵-۱: مقایسه نتایج شبیه‌سازی مدارهای اول، دوم و سوم

نام مدار	بهره تبدیلی (dB)	SNR (dB)	دوره پالس (μs)	توان تلفاتی (mW)
مدار اول	۵۷	۷۸/۱۶	۴۰۰۰	۳۶/۸۶
مدار دوم	۸۵/۷	۶۵/۶۱	۲۵/۹۴	۱۸۰/۷
مدار سوم	۵۷/۹	۶۷/۵۲	۲۴/۸۹	۱۵۷/۷۸

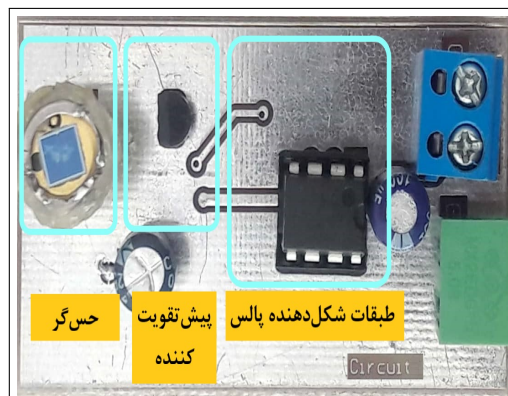
۵-۴-۳ نتایج ساخت

پس از ساخت مدارهای بحث شده، قطعات بر روی آن‌ها جایگذاری شدند. برد مدار چاپی آن‌ها را می‌توان در شکل ۵-۶ مشاهده کرد.

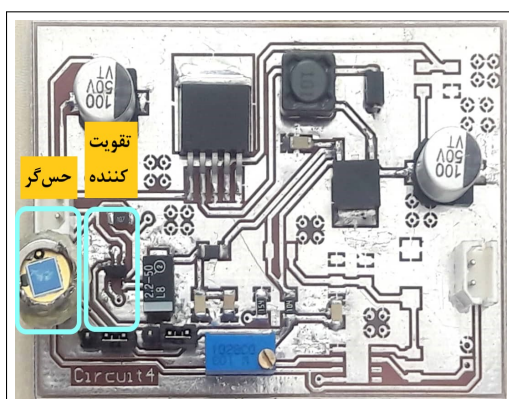
برای آزمایش عملی از مدل شکل ۵-۲ (ج) به همراه مدارهای ساخته شده شکل ۵-۶ و دیود نوری به عنوان حس‌گر استفاده شده است. برای کاهش نویز و اغتشاشات، نکاتی در



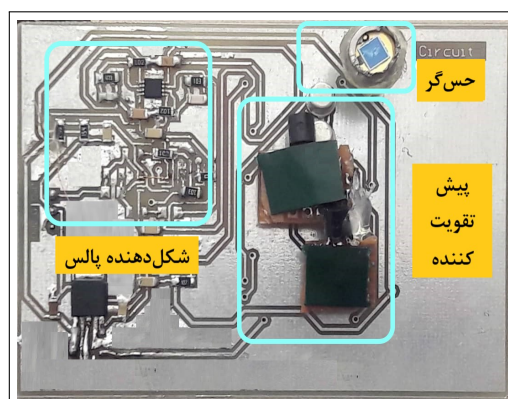
(ب)



(الف)



(د)

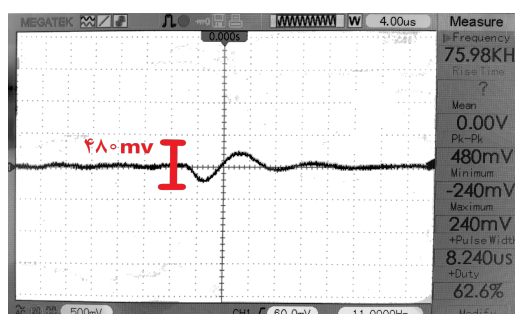


(ج)

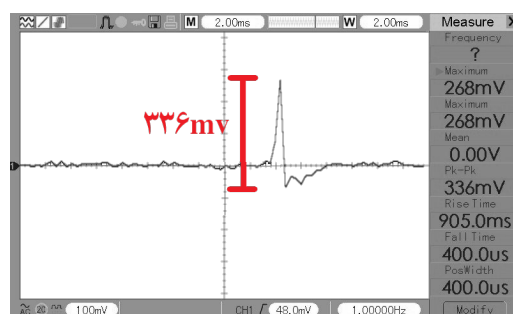
شکل ۵-۶: (الف) مدار ساخته شده اول، (ب) مدار ساخته شده دوم، (ج) مدار ساخته شده سوم و (د) مدار ساخته شده چهارم

طراحی برد مدارچاپی رعایت شده است. از جمله این اقدامات، پلیگان^۱ کردن سطح مدار، اتصال پلیگان به زمین مدار و زمین کردن قطعات مدار با کوتاه‌ترین مسیر است. این عوامل سبب جلوگیری از ایجاد حلقه زمین و در نتیجه کاهش نویز برد مدارچاپی می‌شوند. همچنین از اتصال مشترک میان زمین مدار و بدنه مدل آزمایش شکل ۵-۲ (ج) هم استفاده شده است. برای انجام آزمایش‌ها، منابع حاوی ^{232}Th و ^{241}Am که در بخش ۴-۲-۱ طیف سنجی شدند؛ به کار رفته است. همچنین برای آزمایش‌های تکمیلی از منابع ^{137}Cs و ^{60}Co بهره گرفته شده است. طیف‌سنجی این منابع در پیوست الف آمده است.

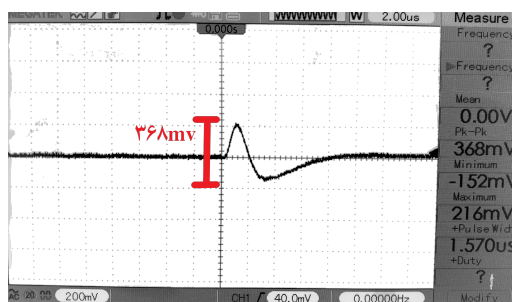
برای مقایسه مدارها اول تا سوم از حس گر S1223-01 و منبع ^{232}Th استفاده شده است. این حس گر با توجه به روش SMART که در قسمت ۴-۳-۱-۱ فصل ۴ صورت گرفت، بالاترین رتبه را در میان حس گرهای دیگر بدست آورد. همچنین منبع ^{232}Th انرژی بالاتری داشته و تفاوت آشکارسازی توسط سه مدار را به خوبی نشان می‌دهد. نتایج در شکل ۵-۷ قابل مشاهده است. این خروجی‌ها مطابق با نتایج شبیه‌سازی، دارای قله ولتاژ بالای ۱۰۰ میلی‌ولت در چند میکروثانیه هستند. همانطور که انتظار می‌رود هر سه شکل مانند حالت شبیه‌سازی، یک پالس گوسی شکل دو قطبی به ازاء هر برخورد تابش یونیزان را نشان می‌دهند. مقدار بهره آشکارسازهای اول تا سوم در حالت عملی به ترتیب برابر ۵۵/۸، ۶۶/۷۵ و ۵۶/۵۱



(ب)



(الف)



(ج)

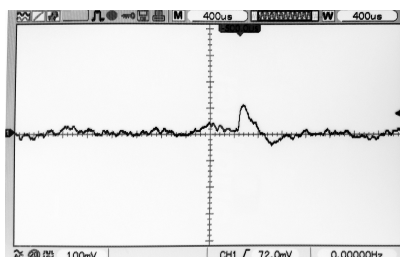
شکل ۵-۷: پاسخ (الف) مدار شماره یک، (ب) مدار شماره دو، (ج) مدار شماره سه به منبع توریم-۲۳۲ با حس گر S1223-01

¹Polygon

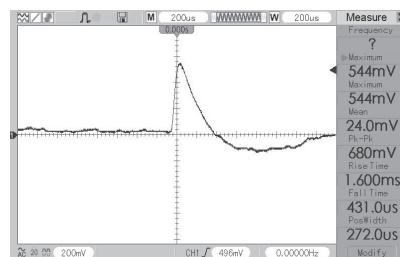
دسی بل بدست آمده است. دوره زمانی پالس‌ها با توجه به نتایج شکل ۵-۷ به ترتیب برابر ۴۴۰۰، ۱۲ و ۸/۲ میکروثانیه اندازه‌گیری شده است. این اعداد، نتایج حاصل از شبیه‌سازی را اعتبار بخشیده و در حالت عملی هم می‌توان فهمید که در نرخ‌های بالای شمارش آشکارسازهای دوم و سوم بهتر عمل می‌کنند. موضوع دیگری که برای مقایسه سه آشکارساز می‌توان مطرح کرد، توان تلفاتی در مدار آشکارسازها است. برای اندازه‌گیری توان تلفاتی مدارها، جریان گذرنده اندازه‌گیری شد و با توجه به ولتاژ تغذیه، توان تلفاتی بدست آمد. توان تلفاتی DC آشکارسازها که در حالت عملی اندازه‌گیری شده، برای آشکارسازهای اول تا سوم به ترتیب برابر با ۳۶/۶، ۱۵۶/۲۴ و ۱۰۷/۷ میلی‌وات است. توان تلفاتی در مدار آشکارساز اول کم‌تر از دو مدار دیگر بوده و علت این امر یک طبقه بودن بلوک پیش‌تقویت‌کننده آن و کم‌تر بودن توان تلفاتی ترانزیستور BF245B نسبت به ترانزیستورهای استفاده شده در سه طبقه پیش‌تقویت‌کننده آشکارساز سوم و تقویت‌کننده عملیاتی MAX4478 در پیش‌تقویت‌کننده آشکارساز 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 [۲، ۸، ۱۲] استفاده شده‌اند.

شکل‌های ۵-۸، ۵-۹ و ۵-۱۰ به ترتیب واکنش مدارهای اول، دوم و سوم را به چشمه‌های ^{232}Th و ^{241}Am نشان می‌دهند. در هر سه مدار از حسگر BPW34 استفاده شده است. با توجه به این نتایج می‌توان گفت مدار اول با حسگر BPW34 منبع ^{232}Th را بهتر از منبع ^{241}Am آشکارسازی کرده است. مدار دوم برای هر دو منبع بهترین آشکارسازی را در بر داشته و مدار سوم هم آشکارسازی را مانند مدار دوم برای هر دو منبع، با دامنه پالس کوتاه‌تر انجام داده است.

به دلیل استفاده از نیمه‌هادی در ساخت مدارهای مجتمع و دیودهای به کار رفته در آشکارسازها، دما در کارکرد این قطعات تأثیرگذار است. به همین دلیل آشکارسازها در سه دمای ۵، ۲۷ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از دیود نوری BPW34 و منبع ^{232}Th مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج در شکل ۵-۱۱ آمده است. طبق نتایج حاصله، آشکارسازها در دمای پایین (۵ درجه) نسبت به دمای معمول (۲۷ درجه) دامنه کوچکتري تولید کرده‌اند.

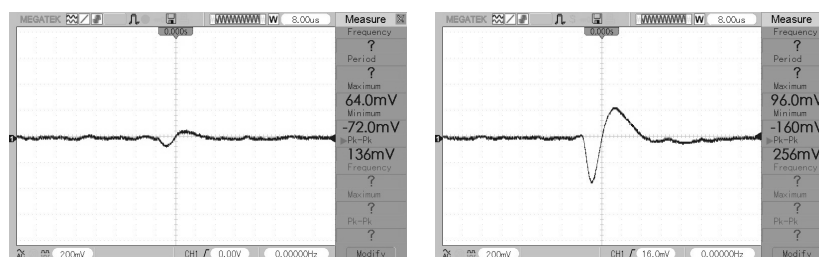


(ب)



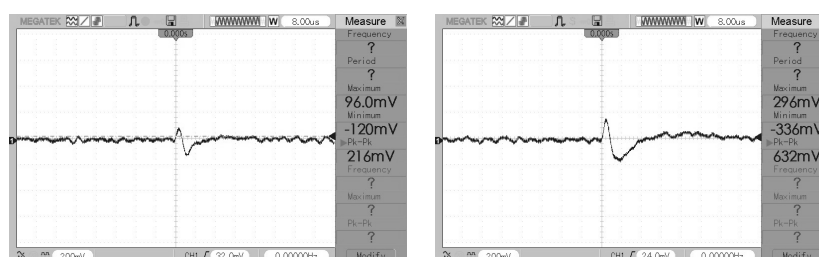
(الف)

شکل ۵-۸: پاسخ مدار شماره یک با حسگر BPW34 به (الف) منبع توریم-۲۳۲ و (ب) منبع آمرسیوم-۲۴۱



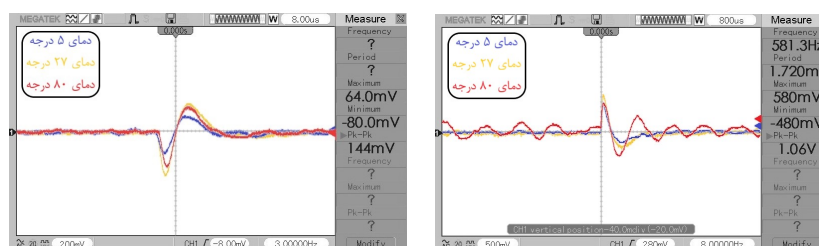
(الف) (ب)

شکل ۵-۹: پاسخ مدار شماره دو با حس گر BPW34 به (الف) منبع توریم-۲۳۲ و (ب) منبع آمرسیوم-۲۴۱

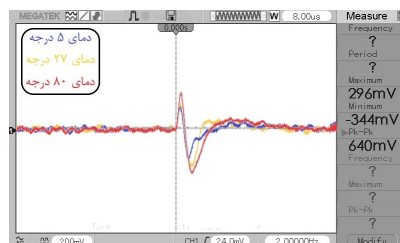


(الف) (ب)

شکل ۵-۱۰: پاسخ مدار شماره سه با حس گر BPW34 به (الف) منبع توریم-۲۳۲ و (ب) منبع آمرسیوم-۲۴۱



(الف) (ب)



(ج)

شکل ۵-۱۱: پاسخ (الف) مدار شماره یک ، (ب) مدار شماره دو ، (ج) مدار شماره سه در سه دمای ۵، ۲۷ و ۸۰ درجه سانتی گراد

همچنین در دماهای بالا آشکارسازهای دوم و سوم تغییرات محسوسی نداشته اما شکل موج آشکارساز اول دچار اعوجاج شده است.

هفت حس گر انتخاب شده در فصل ۴ بخش ۴-۳-۱، تحت آزمایش با مدار شماره یک و منبع ^{241}Am ($59/54\text{keV}$) موجود در آزمایشگاه هسته‌ای قرار گرفتند که نتایج آن در شکل ۵-۱۲ دیده می‌شود.

این منبع کمینه انرژی را در آزمایش‌ها داشته که مدار شماره یک به سختی به آن واکنش نشان داده است. نتایج این آزمایش، رتبه‌بندی دیودهای نوری در بخش ۴-۳-۱-۱ فصل ۴ را تایید می‌کند. طبق نتایج حاصل از آزمایش عملی، دیودهای S1223-01 و BPV10 که طبق روش SMART به ترتیب رتبه‌های اول و دوم را کسب کرده بودند (شکل ۵-۴)، قله‌های بزرگتری را ایجاد کرده‌اند.

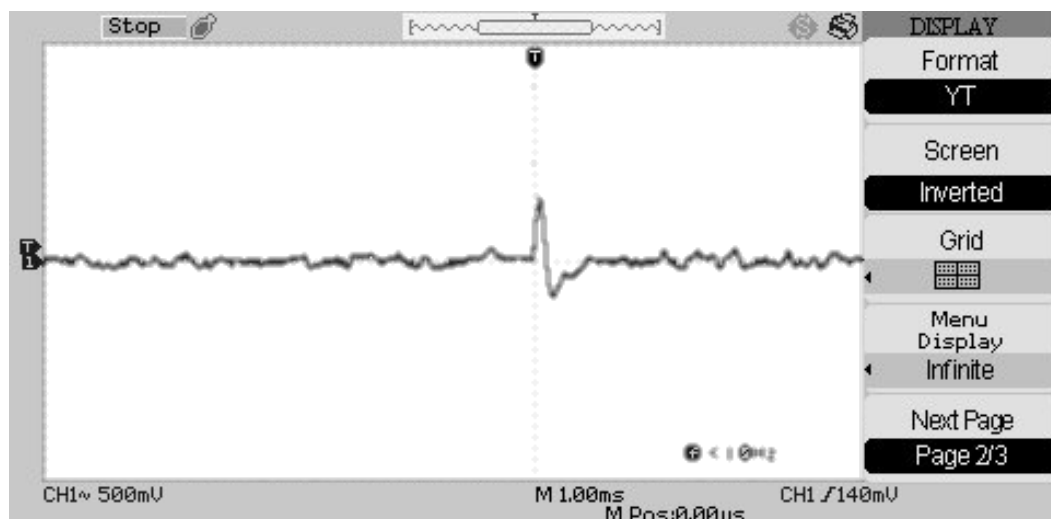
در بررسی دیگر، مدار شماره یک با استفاده از حس گر PD438C تحت سه منبع تابش ^{241}Am ، ^{137}Cs و ^{60}Co به ترتیب با انرژی‌های گاما $59/54\text{keV}$ ، $661/7\text{keV}$ و $1,332/5\text{keV}$ در آزمایشگاه هسته‌ای قرار گرفت. نتایج در شکل ۵-۱۳ آمده است. طبق این تصاویر می‌توان نتیجه گرفت که این سامانه تابش‌هایی با انرژی $59/54\text{keV}$ را به سختی آشکار کرده و دامنه آن به سطح نویز نزدیک است. اما انرژی‌های بالاتر، دامنه پالس مناسبی دارند. با توجه به نتیجه‌گیری که از شکل‌های ۵-۸، ۵-۹ و ۵-۱۰ انجام شد، نتایج شکل ۵-۱۳ برای مدارهای حالت پالسی شماره دو و سه قابل انتظار است و تنها تفاوت بین مدارها در نرخ‌های پایین شمارش، آشکارسازی با ارتفاع بیش‌تر و عرض پالس کوچک‌تر است.

برای مقایسه مشخصه‌های الکترونیکی مدارها و خلاصه نتایج ذکر شده، جدول ۵-۲ آماده شده است. این جدول حاصل مشاهدات نتایج حاصل از مدارها هنگام آزمایش عملی است. باید متذکر شد که بازه‌های ذکر شده برای انرژی تشخیصی با توجه به منابع موجود جهت آزمایش بوده است.

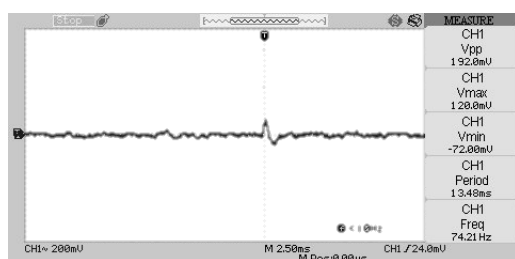
جدول ۵-۳ بهره تبدیلی بدست آمده از هر سه مدار را در سه حالت تحلیل نظری، شبیه‌سازی و ساخت نشان می‌دهد. نتایج حاصل از تحلیل تئوری مؤید نتایج شبیه‌سازی بوده و نشان می‌دهد شبیه‌سازی مدارها و به دنبال آن نتایج حاصل از ساخت، قابل اطمینان هستند. در خصوص مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و عملی باید گفت که در حالت شبیه‌سازی از مدل ایده‌آل دیود نوری (منبع جریان ایده‌آل) برای شبیه‌سازی استفاده شده است. این امر سبب اختلاف در نتایج شبیه‌سازی و عملی شده است. در مجموع می‌توان گفت هر سه حالت

جدول ۵-۲: مقایسه نتایج عملی آشکارسازهای اول، دوم و سوم

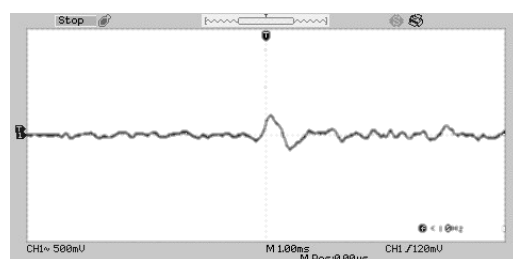
نام مدار	بهره تبدیلی (dB)	دوره پالس (μs)	توان تلفاتی (mW)	انرژی تشخیصی (keV)
مدار اول	۵۵/۸	۴۴۰۰	۳۶/۶	[۵۹/۵۴، ۱۳۳۲/۵]
مدار دوم	۶۶/۷۵	۱۲	۱۵۶/۲۴	[۵۹/۵۴، ۱۳۳۲/۵]
مدار سوم	۵۶/۵۱	۸/۲	۱۰۷/۷	[۵۹/۵۴، ۱۳۳۲/۵]



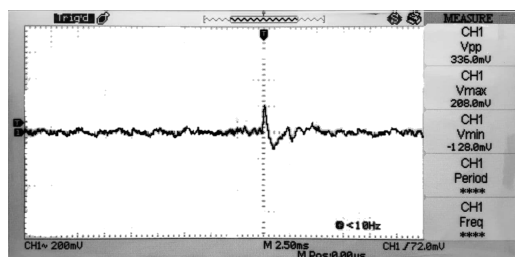
(الف)



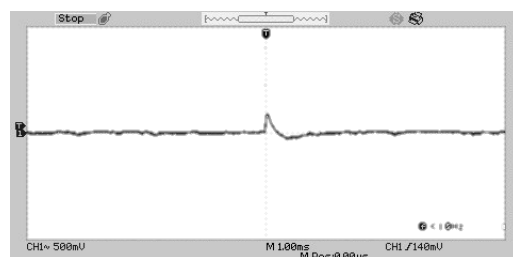
(ب)



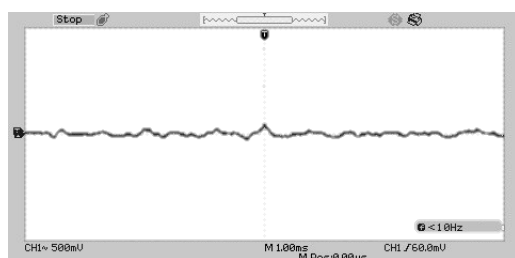
(ج)



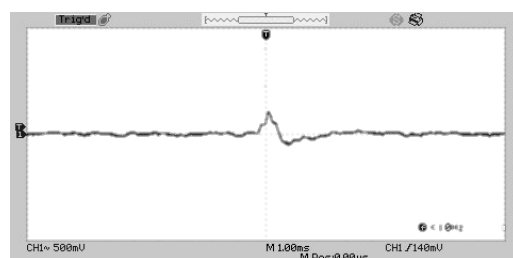
(د)



(ه)

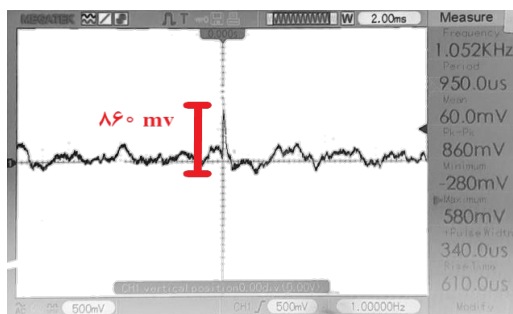


(و)

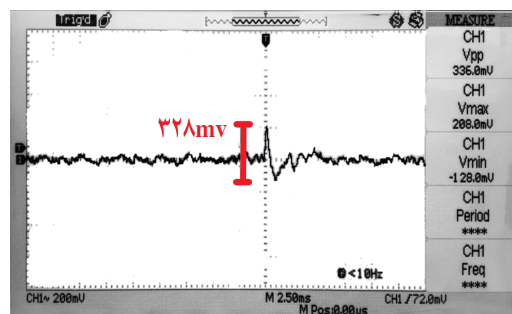


(ز)

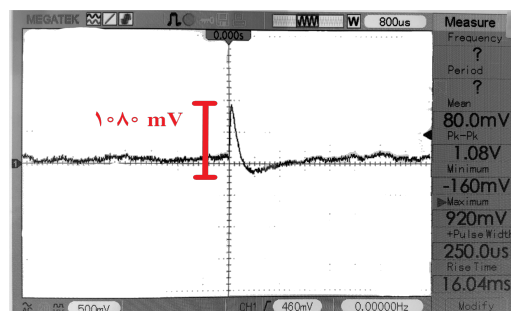
شکل ۵-۱۲: پاسخ مدار شماره یک با حس گرهای (الف) S1223-01 ، (ب) BPV10 ، (ج) BPW34 ، (د) S186P ، (ه) PD438C ، (و) PH320 و (ز) BPV23NF به منبع آمرسیوم-۲۴۱



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۵-۱۳: پاسخ مدار شماره یک با استفاده از حس گر PD438C برای منبع (الف) آمرسیوم-۲۴۱ (۵۹/۵۴keV) ، (ب) سزیم-۱۳۷ (۶۶۱/۷keV) ، (ج) کبالت-۶۰ (۱۳۳۲/۵keV)

تحلیل تئوری، شبیه‌سازی و ساخت، نتایج نزدیکی به ارمغان آورده‌اند. مراجع استفاده شده برای ساخت مدار آشکارسازها، به اهداف مختلف از جمله طیف‌نگاری ([۸، ۱۲]) و تصویر برداری ([۲]) پرداخته و از این مدارها برای کاربرد خود استفاده کرده‌اند. جزئیات مدارها از جمله تحلیل زمانی، فرکانسی، نویز و همچنین مشخصه‌های سیگنال خروجی به روشنی بیان نشده است. در این تحقیق تمامی این نکات مد نظر قرار گرفته شد و از نگاهی دیگر، آشکارسازها بررسی و مقایسه شدند.

بعد از آزمایش مدارهای حالت پالسی نوبت به آزمایش مدار حالت جریانی می‌رسد. برای آزمایش این حالت نیاز به منبع تولید تابش یونیزان به صورت پیوسته است. به همین دلیل از یک دستگاه پرتونگاری دندان مدل XGENUS شرکت DEGOTZEN استفاده شده است. آزمایش به ترتیب تحت ولتاژ و جریان آند ۷۰ کیلو ولت و ۸ میلی‌آمپر در مدت زمان ۱ ثانیه انجام شده

جدول ۵-۳: مقایسه بهره تبدیلی بدست آمده از تحلیل نظری، شبیه‌سازی و آزمایش عملی

نام مدار	بهره تحلیل نظری (dB)	بهره شبیه‌سازی (dB)	بهره آزمایش عملی (dB)
مدار اول	۶۰	۵۷	۵۵/۸
مدار دوم	۹۲/۳۲	۸۵/۷	۶۶/۷۵
مدار سوم	۶۳/۱۴	۵۷/۹	۵۶/۵۱

است. این ولتاژ تابش X با حداکثر انرژی ۷۰keV تولید می‌کند. برای آزمایش شدت‌های جذب مختلف، فاصله آشکارساز از تیوب تابش X تغییر داده شده و ولتاژ تولید شده توسط آشکارساز اندازه‌گیری شده است. برای انجام این آزمایش، حس گر S1223-01 انتخاب شده است. زیرا این حس گر طبق رتبه‌بندی انجام شده در بخش ۴-۳-۱-۱ فصل ۴ رتبه اول را به خود اختصاص داده است. نتایج این اندازه‌گیری در جدول ۴-۵ آمده است.

با رسم نقاط بدست آمده از جدول ۴-۵، نمودار ولتاژ خروجی آشکارساز بر حسب تغییرات فاصله از منبع تابش X در شکل ۱۴-۵ بدست می‌آید. هر فاصله نشان‌دهنده یک نرخ دز است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله آشکارساز از منبع، میزان ولتاژ تولید شده در خروجی آشکارساز کاهش می‌یابد. و این امر نشان‌دهنده دز جذب شده کم‌تر آشکارساز در فواصل بیش‌تر است. برای اطمینان از تکرار پذیری آزمایش، دو بار تکرار در شرایط یکسان صورت گرفته است. با توجه به شباهت دو نمودار، می‌توان گفت آزمایش تکرارپذیر است.

در مرحله بعد برای تنظیم سامانه دزسنج (مدار حالت جریانی)، از دزسنج تجاری مدل RAD DIGI 3000C که یک نوع دزسنج گایگر-مولر است، استفاده شده است. ولتاژ قرائت شده از سامانه دزسنج (مدار حالت جریانی) بر حسب نرخ دز معادل اندازه‌گیری شده توسط دزسنج تجاری، در شکل ۱۵-۵ رسم شده است. رابطه بدست آمده یک رابطه خطی بوده که نزدیکترین نمودار خط توصیف‌کننده آن برابر است با:

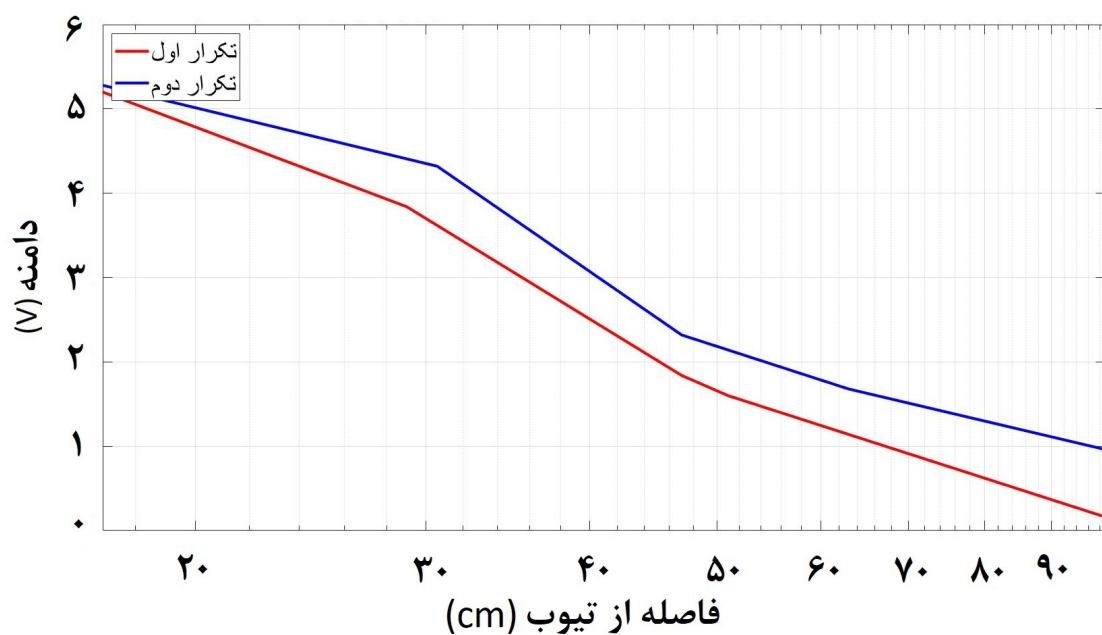
$$D = 219.298 \times (V - 0.4886) \quad (۱-۵)$$

طبق این رابطه، D دز معادل بر حسب میکرو سیورت بر ساعت و V ولتاژ ایجاد شده در خروجی آشکارساز بر حسب ولت است. این معادله را می‌توان برای تنظیم سامانه دزسنج به کار برد. با توجه به شکل ۱۵-۵، ولتاژ خروجی آشکارساز در بازه ۳۰ تا ۸۰۰، میکرو سیورت بر ساعت تغییر کرده و در نرخ دزهای پایین‌تر مقدار ولتاژ خروجی صفر و در دزهای بالاتر تقویت‌کننده به اشباع می‌رود. پس می‌توان نتیجه گرفت این سامانه به عنوان سنجش دز جذب شده در این بازه عمل می‌کند.

لازم به ذکر است قطعات انتخابی در این مدار مشابه قطعاتی که در مرجع [۱۵] استفاده

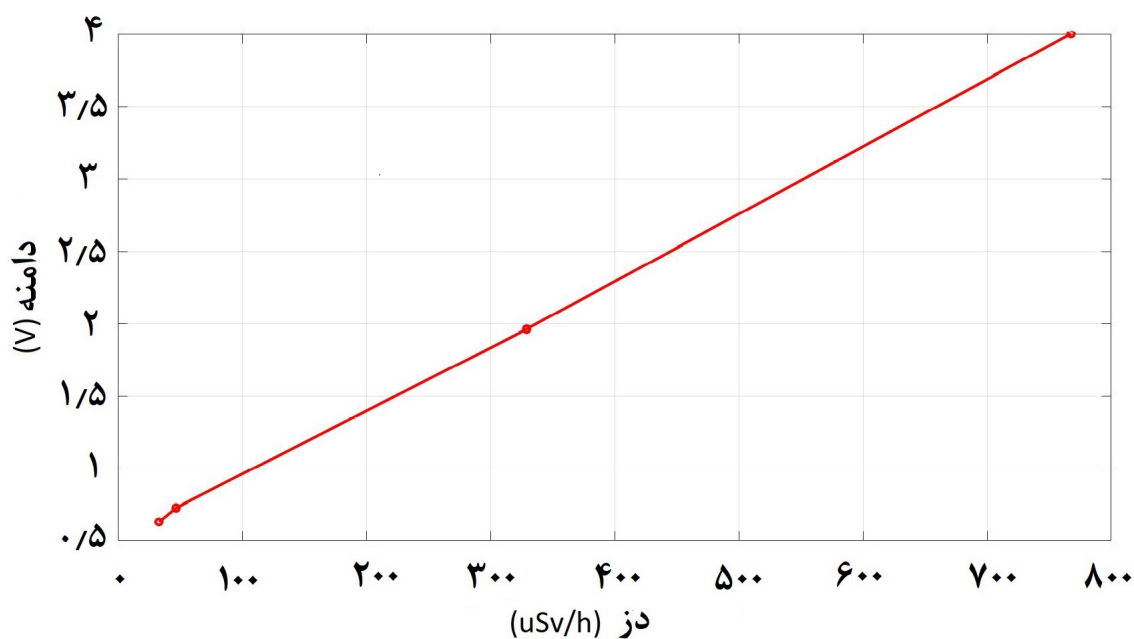
جدول ۴-۵: نتایج حاصل از آزمایش مدار چهارم در فواصل مختلف از تیوب تابش X

ولتاژ خروجی آشکارساز (V)	فاصله آشکارساز از تیوب تابش X (cm)
۵/۲	۱۷
۳/۸۴	۲۹
۱/۸۴	۴۷
۱/۶	۵۱
۰/۱۶	۹۹



شکل ۵-۱۴: پاسخ مدار حالت جریانی (حالت جریانی) با حس گر S1223-01 به دستگاه پرتونگاری دندان XGENUS در فواصل مختلف

شده است، نیست و به دلیل محدودیت بازار و ولتاژ تغذیه تک، از قطعات با مشخصه‌های مشابه استفاده شده است.



شکل ۵-۱۵: تنظیم مدار حالت جریانی با دزسنج تجاری RAD DIGI 3000C

۵-۵ تحلیل ساختارها و بحث در خصوص نتایج

۵-۵-۱ طبقه حس گر

در مدار اول، حس گر در تزویج DC و در مدارهای دوم و سوم به صورت تزویج AC قرار دارد. در تزویج AC یک طرف آشکارساز می تواند به زمین متصل شود، اما در تزویج DC آشکارساز باید از زمین جدا باشد [۲۴، ۵]. به همین دلیل نمی توان جای مقاومت بار را در این دو ساختار تغییر داد (مقاومت R_2 در شکل های ۷-۴ و ۱۲-۴). از مشکلات تزویج DC می توان به ایجاد ولتاژ آفست در پیش تقویت کننده اشاره کرد. زیرا جریان نشتی دیود نوری بر روی مقاومت معادل ورودی، ولتاژ آفست تولید کرده که سبب خطا در اندازه گیری می شود. وجود تزویج DC در مدارهای دوم و سوم که پیش تقویت کننده دارای خازن بازخورد بوده، اصلاً توصیه نمی شود. زیرا در این حالت، جریان نشتی باعث شارژ خازن بازخورد شده و این امر سبب ایجاد یک شیب مثبت در قسمت افقی ولتاژ پله ایجاد شده در دو سر خازن بازخورد می شود. در نهایت زمان نشست پالس خروجی پیش تقویت کننده افزایش می یابد [۵]. مشکل جریان نشتی به دلیل تزویج AC، در مدارهای دوم و سوم به وجود نخواهد آمد. زیرا خازن تزویج از عبور این جریان جلوگیری می کند.

جریان نشتی ایجاد شده در تزویج DC، نویز این طبقه را نیز افزایش می دهد. این نویز از نوع ساچمه ای^۱ بوده که ناشی از جریان نشتی دیود نوری است [۲۴]. پس می توان نتیجه گرفت، مدار اول برای حس گرهایی که دارای جریان نشتی زیاد هستند، مناسب نیست. حال اگر از دیود نوری با جریان نشتی کوچک استفاده شود، اثر نویز ساچمه ای 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 می یابد. دلیل کاهش SNR در تزویج AC، طبق مرجع [۲۴]، ایجاد خازن پارازیتی تا زمین است.

از مزایای دیگر تزویج AC در مدارهای دوم و سوم، عدم تأثیر تغییرات مقاومت معادل در سمت حس گر، بر روی پیش تقویت کننده است. گاهی ممکن است به دلیل اتصالات نامرغوب حس گر و پیش تقویت کننده، تغییرات مقاومت حس گر به دلیل دما، تعویض دیود نوری که موجب تغییر مقاومت موازی^۲ آن می شود و تغییر مقاومت بار، مقاومت معادل سمت حس گر تغییر کند. این امر در تزویج DC، بایاس پیش تقویت کننده را تحت تأثیر قرار می دهد.

با توجه به توضیحات فوق می توان گفت، ساختار به کار رفته در طبقه حس گر مدارهای دوم و سوم، از نظر ولتاژ آفست و تثبیت بایاس پیش تقویت کننده بهتر عمل کرده اما نویز بیش تری را ایجاد می کند.

^۱Shot noise

^۲Shunt Resistor

۵-۲ طبقه پیش تقویت کننده

هرچه ثابت زمانی دیده شده از حس گر بزرگتر باشد، زمان میرایی پالس خروجی پیش تقویت کننده زیاد شده و مشکل انباشتگی پالس را در نرخ های بالای شمارش، افزایش می دهد. زیرا افزایش زمان میرایی سبب شده تا اگر پالس جدیدی رخ دهد، با پالس قبلی همپوشانی ایجاد شده و قسمتی از دامنه سیگنال از بین برود. شکل ۲-۱۰ (الف) فصل ۲ این انباشتگی را نشان می دهد.

این مشکل در مدارهای دوم و سوم به خوبی حل شده است. در ساختار پیش تقویت کننده مدارهای دوم و سوم از امپدانس بازخورد استفاده شده است. در صورت بزرگ بودن امپدانس ورودی پیش تقویت کننده، جریان ناشی از حس گر به سمت امپدانس بازخورد روانه می شود. در نتیجه ثابت زمانی سیگنال پیش تقویت کننده به خازن و مقاومت بازخورد بستگی پیدا می کند. در بخش ۲-۳-۱ فصل ۲، هم این امر توضیح داده شده است. پس می توان گفت که اگر مقدار خازن و مقاومت بازخورد در مدارهای دوم و سوم کوچک انتخاب شود، اثر انباشتگی پالس در نرخ های بالای شمارش کاهش می یابد. البته باید توجه داشت که کوچک کردن زیاد مقاومت بازخورد، جریان نویز را افزایش می دهد. اما مدار اول به دلیل استفاده نکردن از خازن و مقاومت بازخورد، زمان نشست سیگنال ورودی آن به خازن و مقاومت ورودی پیش تقویت کننده وابسته می شود. از آن جا که در مدار اول مقدار این خازن به دلیل مجموع خازن های حس گر، مسیر ارتباطی و خازن ورودی پیش تقویت کننده بزرگ شده است، ثابت زمانی سیگنال افزایش پیدا کرده است. نتایج حاصل از شبیه سازی و ساخت مدارها اول تا سوم، این تحلیل را اثبات می کنند. طبق شکل های ۵-۴ و ۵-۷، عرض پالس در مدارهای دوم و سوم در مقیاس میکرو بدست آمده در حالی که در مدار اول، این مقیاس هزار برابر افزایش داشته است.

از جمله مزایای دیگر ساختار پیش تقویت کننده با خازن بازخورد در مدارهای دوم و سوم، بزرگ شدن اثر این خازن در ورودی پیش تقویت کننده بوده^۱ و طبق شکل ۵-۱۶ تأثیر زیادی در خازن معادل ورودی می گذارد. بنابراین چون مقدار خازن و بهره پیش تقویت کننده ثابت است^۲، ولتاژ خروجی تنها با بار ورودی متناسب می شود. رابطه ۵-۲ ولتاژ خروجی پیش تقویت کننده را نشان می دهد.

$$V_{out} = -A \frac{Q_{strike}}{C_i + C_s + C_d + (A + 1)C_f} \quad (2-5)$$

در این رابطه A بهره حلقه باز پیش تقویت کننده، Q_{strike} بار ایجاد شده در دیود نوری، C_i خازن ورودی پیش تقویت کننده، C_s ظرفیت حاصل از اتصالات، C_d ظرفیت دیود نوری و C_f خازن شبکه بازخورد است. در صورتی که بهره حلقه باز پیش تقویت کننده بزرگ انتخاب شود، رابطه

^۱ به دلیل اثر میلر
^۲ در صورت تزویج AC

۲-۵ به صورت رابطه ۳-۵ تقریب می‌خورد.

$$V_{out} = -\frac{Q_{strike}}{C_f} \quad A \gg \frac{C_i + C_f}{C_f} \quad (3-5)$$

طبق رابطه ۳-۵ 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 ۵٪ تا ۳ پیکوفاراد می‌تواند باشد [۲۴]. زیرا در صورت کوچک کردن بیش از حد آن، زمانی که این خازن با اثر میلر به ورودی می‌آید، ممکن است با خازن معادل ورودی قابل مقایسه شده و تقریب معادله ۳-۵ انجام نشود. نتایج حاصل از آزمایش عملی سه مدار نشان دادند که مدار اول انرژی پایین (۵۹/۵۴ keV) را به سختی آشکار کرده، اما مدارهای دوم و سوم 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 ۴-۵ خازن ورودی دیده شده از دیود نوری در مدار اول را نشان می‌دهد.

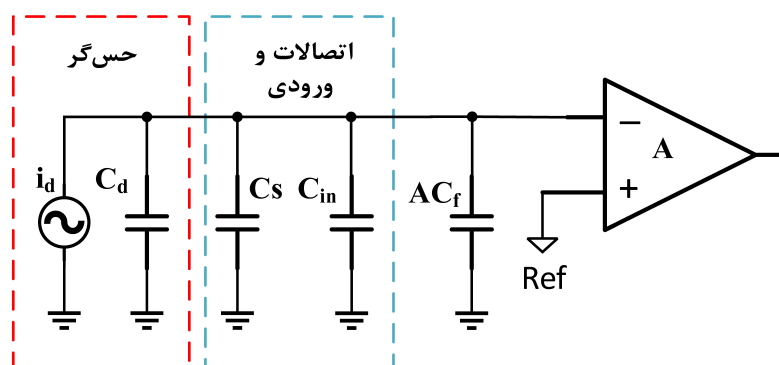
$$C_{in} = C_d + C_{in,T1} + C_s \quad (4-5)$$

با توجه به این رابطه $C_{in,T1}$ ظرفیت معادل ورودی ترانزیستور طبقه دوم شکل ۴-۶ است. ولتاژ خروجی پیش‌تقویت‌کننده در این آشکارساز از رابطه ۵-۵ محاسبه می‌شود.

$$V_{out} = \frac{Q_{strike}}{C_{in}} \quad (5-5)$$

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 ۵-۵ 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 آشکارسازهای دوم و سوم به ترتیب در روابط ۶-۵ و ۷-۵ آمده است.

$$C_{in} = C_d + C_s + (C_2 || [C_{in,MAX4478} + A \times C_3]) \quad (6-5)$$



شکل ۵-۱۶: تأثیر خازن بازخورد، در ورودی پیش‌تقویت‌کننده

$$C_{in} = C_d + C_s + (C_3 || [C_{T1} + C_{T2} + A \times C_4]) \quad (۷-۵)$$

در این روابط A همان بهره حلقه باز پیش تقویت کننده شکل های ۴-۱۱ و ۴-۱۹ است. خازن ورودی تقویت کننده عملیاتی مدار دوم با $C_{in,MAX4478}$ نشان داده شده و C_{T1} و C_{T2} خازن های ترانزیستورهای ورودی پیش تقویت کننده مدار سوم هستند. با توجه به روابط فوق، خازن حس گر و پیش تقویت کننده در برابر اثر خازن بازخورد در ورودی بسیار ناچیز شده و در نتیجه بهره را تحت تأثیر قرار نمی دهند. همچنین به دلیل بزرگتر بودن بهره حلقه باز پیش تقویت کننده مدار دوم از مدار سوم، تقریب معادله ۵-۳ بهتر صورت گرفته و تقویت کننده پایدار تر می شود. در نتیجه پالس های خروجی مدار دوم بلندتر از مدار سوم ظاهر شده اند.

وجود امپدانس بازخورد معایبی را هم به همراه دارد. مقاومت بازخورد و ایجاد خازن پارازیتی در این نوع ساختار پیش تقویت کننده، نویز مدار را افزایش می دهد [۲۴]. نتایج شبیه سازی، گواه این تحلیل هستند. طبق نتایج شبیه سازی، نویز مدار اول به دلیل عدم وجود خازن و مقاومت بازخورد در ساختار پیش تقویت کننده، 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 پیش تقویت کننده آن ها باز می گردد. رابطه ۵-۸، SNR سیگنال خروجی پیش تقویت کننده را نشان می دهد [۶].

$$SNR = \frac{V_{out}}{V_n} = \frac{Q_{strike}}{C_f \times V_n} \quad (۸-۵)$$

در این رابطه، V_n ولتاژ نویز است. طبق آن می توان گفت، نسبت سیگنال به نویز با ظرفیت دیده شده از دیود نوری رابطه عکس دارد. پس هر چه این ظرفیت بزرگتر شود، نویز پیش تقویت کننده بیش تر می شود. که در مدار دوم ظرفیت خازن بازخورد بیشتر از مدار سوم است. همچنین تقویت کننده 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 می شود. با توجه به آن که چگالی طیف توان نویز خروجی پیش تقویت کننده با حاصل ضرب مربع اندازه بهره حلقه بسته در جریان نویز ورودی برابر است، بنابراین نویز پیش تقویت کننده مدار دوم از سوم بیشتر شده است. پس می توان نتیجه گرفت که ساختار پیش تقویت کننده مدار دوم و سوم در نرخ های بالای شمارش بهتر از مدار اول عمل کرده و انرژی های کوچکتری را آشکار می کنند، اما در مقابل نویز بیش تری تولید می کنند. و این نویز در مدار دوم بیش تر است.

۳-۵-۵ طبقات شکل دهنده پالس

همانطور که در فصل ۲ بیان شد، این طبقات وظایف افزایش دامنه پالس خروجی، کاهش نویز و ایجاد پالس گوسی برای شمارش راحت تر را بر عهده دارند. هر سه مدار از چند طبقه CR-RC در این بلوک استفاده کرده اند. طبق نتایج بدست آمده از شبیه سازی و ساخت، شکل پالس خروجی هر سه مدار به صورت دو قطبی ظاهر شدند (شکل ۵-۴ و ۵-۷). همانطور که

در بخش‌های قبل گفته شد، پالس‌های دوقطبی نسبت به پالس‌های تک قطبی، اثر انباشتگی پالس را کاهش می‌دهند. در مدار اول پالس دوقطبی ایجاد شده دارای دو لوب با مساحت غیر یکسان است. این امر در نرخ‌های بالای شمارش احتمال انباشتگی پالس را افزایش می‌دهد [۵، ۲۴]. 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 دوقطبی با لوب‌های هم مساحت ظاهر شده‌اند. این امر اثر انباشتگی و جابه‌جایی خط پایه را کاهش می‌دهد [۵، ۲۴]. هزینه اضافه کردن این طبقه، افزایش نویز است. زیرا پالس‌های دوقطبی هم‌مساحت، SNR ضعیف‌تری دارند. دلیل این امر وجود مشتق‌گیر بوده که فرکانس‌های بالا را عبور می‌دهد و موجب افزایش نویز مدار می‌شود [۵]. به همین دلیل در نتایج حاصل از شبیه‌سازی نویز، مدار اول به دلیل داشتن دو طبقه CR-RC بهتر از دو مدار دیگر عمل کرده، اما در نرخ‌های بالای شمارش اثر انباشتگی بیش‌تری دارد. افزایش تعداد طبقات CR-RC علاوه بر کاهش اثر انباشتگی، بهره را بزرگ‌تر کرده که سبب آشکارسازی راحت‌تر پالس خروجی می‌شود. افزایش بیش از حد تعداد این طبقات، سبب اشباع سیگنال خروجی و همچنین افزایش نویز مدار می‌شود [۵، ۱۲، ۲۴].

۵-۴-۵ جمع بندی

با توجه به اطلاعات بدست آمده از نتایج مدارهای ساخته شده در این تحقیق و تحلیل‌های صورت گرفته در بخش قبل، آشکارساز 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 کاهش می‌یابد و این امر موجب شده تا انرژی‌های کم‌تر ($59/54\text{ keV}$) را نتواند آشکار کند. با مقایسه مدار ساخته شده با مرجع [۸]، مدار ساخته شده توانسته همچون مرجع، انرژی‌های بالا مانند گاما حاصل شده از منبع ^{232}Th را به خوبی و با دامنه نزدیک یک ولت آشکارسازی کند.

از مزایای آشکارساز دوم می‌توان به بهره بزرگ آن اشاره کرد، که تابش‌ها با انرژی بسیار کوچک ($59/54\text{ keV}$) 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 تلفاتی بالاتر و توان نویز زیاد است. این مدار همانند مرجع [۱۲] توانسته منبع ^{241}Am با سطح انرژی پایین را به خوبی آشکار کند.

آشکارساز سوم نسبت به دو آشکارساز دیگر دارای معایب کم‌تر و مزایای بیش‌تر است. با توجه به نتایج، بهره نسبتاً بزرگ، توان نویز کوچک و دوره پالس کوتاه از مزایای این آشکارساز

به حساب می‌آیند. اما پیچیدگی آن نسبت به دو آشکارساز دیگر و توان تلفاتی بیش‌تر آن نسبت به آشکارساز اول از معایب آن به حساب می‌آید. مدار ساخته شده در مقایسه با مرجع [۲] تابش‌هایی با انرژی‌های پایین همچون منبع ^{241}Am را به خوبی آشکار می‌کند.

۵-۶ نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه به بررسی انواع آشکارسازهای نیمه‌هادی پرداخته شد. سپس با استفاده از چند حس‌گر ارزان‌قیمت، سامانه آشکارساز تابش‌های پرانرژی به خصوص X و گاما در چندین ساختار مختلف ساخته شد. پاسخ هر مدار در حالت شبیه‌سازی و عملی بررسی شد. در حالت شبیه‌سازی مدل دیود نوری در ورودی هر مدار قرار گرفت. همچنین در حالت عملی، پاسخ مدار توسط اسیلوسکوپ برای چندین نمونه حس‌گر و برای چندین نمونه چشمه از جمله ^{137}Cs ، ^{60}Co و ^{232}Th بدست آمد. حس‌گرها با استفاده از الگوریتم SMART که یکی از الگوریتم‌های روش تصمیم‌گیری چندشاخصه است، مورد ارزیابی و رتبه‌بندی قرار گرفتند. در این رتبه‌بندی حس‌گرها به ترتیب به صورت S1223-01، BPV10، BPW34، S186P، PH320، PD438C و BPV23NF مرتب شدند. در نهایت مدار حالت جریانی نیز ساخته و توسط دستگاه پرتونگاری دندان مدل XGENUS شرکت DEGOTZEN مورد آزمایش قرار گرفت.

پاسخ آشکارسازها در حالت شبیه‌سازی و عملی بررسی شد. پاسخ‌ها به شکل پالس‌های گوسی شکل به صورت دو قطبی ظاهر شدند. همچنین مشخصات الکترونیکی آن‌ها از جمله بهره تبدیلی، نویز الکتریکی، دوره پالس و توان تلفاتی مدارها در حالت شبیه‌سازی و عملی مورد مقایسه قرار گرفت. برای تضمین این نتایج، تحلیل نظری مدارها صورت گرفت و تابع تبدیل هر مدار بدست آمد. با توجه به مشاهدات انجام شده، آشکارساز دوم با بهره ۶۶/۷۵ دسی‌بل بیش‌ترین بهره تبدیلی و آشکارساز اول با بهره ۵۵/۸ دسی‌بل کم‌ترین بهره تبدیلی را در اختیار قرار داد. همچنین مدارها از نظر محدوده آشکارسازی انرژی تابش یونیزان مورد ارزیابی قرار گرفتند. با توجه به آن، مدار دوم و سوم انرژی‌های پایین ($59/54\text{ keV}$) را بهتر از مدار اول شناسایی کرده و تمامی آن‌ها انرژی‌های بالا ($1332/5\text{ keV}$) را به خوبی آشکار کردند. این امر با مقایسه بهره بدست آمده از هر مدار تضمین می‌شود. در ادامه، توان نویز الکتریکی با استفاده از تحلیل AC در حالت شبیه‌سازی برای هر سه آشکارساز اندازه‌گیری شد و SNR بدست آمد. مقدار SNR در آشکارساز اول $78/16\text{ dB}$ ثبت شد که در مقایسه با دو آشکارساز دیگر بیش‌تر بوده و آشکارساز دوم با $65/61\text{ dB}$ SNR، بیش‌ترین نویز را دارد. آشکارساز دوم و سوم به دلیل داشتن دوره زمانی ۱۲ و $8/2$ میکروثانیه، عملکرد بهتری در نرخ‌های بالای شمارش داشتند. همچنین آشکارساز اول با توان تلفاتی $36/6$ میلی‌وات، کم‌ترین مصرف انرژی را در میان دو آشکارساز دیگر داشته و آشکارساز دوم با توان تلفاتی $156/24$ میلی‌وات، بیش‌ترین مصرف انرژی را در میان سه آشکارساز به ثبت رسانده است.

در بین حس‌گرها، به ترتیب حس‌گر S1223-01 و BPV10 با توجه به نتایج رتبه‌بندی و نتایج

عملی، شناسایی تابش‌ها را بهتر انجام دادند. در نتیجه گزینه مناسبی برای سامانه آشکارساز هستند.

نتایج مدار چهارم (حالت جریان) نشان داد که دز معادل در بازه ۳۰ تا ۸۰۰ میکرو سیورت بر ساعت، متناسب با ولتاژ خروجی آشکارساز تغییر کرده و این بازه از دزها را می‌تواند تشخیص دهد.

۷-۵ پیشنهادها

با توجه به تحلیل‌های انجام شده در بخش ۵-۵، مدار اول در نرخ‌های پایین شمارش بهتر عمل کرده و تنها انرژی‌های بالا را می‌تواند آشکار کند. اما مدارهای دوم و سوم در نرخ‌های بالای شمارش عملکرد بهتری داشته و توانایی آشکارسازی انرژی‌های پایین را هم دارند. همچنین مدار سوم به دلیل نویز کمتر، در انرژی‌های پایین‌تر بهتر از مدار دوم عمل می‌کند. اما هر دو آن‌ها توان مصرفی بالاتری دارند.

برای داشتن مداری بهینه‌تر در نرخ‌های پایین شمارش، می‌توان از طبقه حس‌گر مدار سوم با تزویج AC تا حس‌گرهایی با جریان نشی بزرگتر بتوانند در این مدار استفاده شوند. پیش تقویت‌کننده بدون بازخورد برای این کاربرد مناسب‌تر بوده به شرطی که ظرفیت ورودی کوچکی داشته باشد تا بهره برای انرژی‌های پایین‌تر افزایش یابد و نویز کمینه شود. همچنین افزایش تعداد طبقات بلوک پیش تقویت‌کننده، همچون مدار سوم توان مصرفی را زیاد می‌کند. در بلوک شکل‌دهنده پالس، با داشتن دو طبقه شبکه CR-RC، همچون مدار اول، شکل موج خروجی حالت دو قطبی پیدا کرده و SNR مدار افزایش می‌یابد. در نرخ‌های بالای شمارش می‌توان از مدار سوم که بهینه‌ترین مدار منتخب بوده، استفاده کرد. استفاده از تقویت‌کننده‌های عملیاتی با توان مصرفی کمتر، راه‌کاری برای بهینه‌تر کردن این مدار است. همچنین طبق معادله ۵-۳، افزایش بهره حلقه باز پیش تقویت‌کننده موجب افزایش پایداری مدار و آشکارسازی انرژی‌های پایین می‌شود. البته باید در نظر داشت که نویز افزایش یافته که می‌توان با کاهش خازن بازخورد تا ۵/۰ پیکوفاراد، آن را کنترل کرد.

در ادامه این تحقیق کارهای فراوانی از جمله تحلیل دقیق‌تر پالس‌ها با استفاده از بلوک دیجیتال، طیف سنجی ارزان قیمت بر روی تلفن همراه هوشمند، تصویر برداری با قرار دادن آرایه حس‌گرها، ساخت دزسنج ارزان قیمت و ... می‌توان انجام داد.

پیوست الف

عملکرد و ساختار آشکارساز تجاری
شرکت نوین طیف



شکل الف-۱: تقویت کننده آشکارساز HVMCA [۲۷]



شکل الف-۲: حس گر سوسوزن یدور سزیم (CSI) مدل NT-811 شرکت نوین [۲۷]

این آشکارساز از دو بخش اصلی حس گر و تقویت کننده تشکیل شده است. تقویت کننده از ۱۰۲۴ کانال مختلف استفاده کرده تا سیگنال های ایجاد شده توسط حس گر سوسوزن یدور سزیم را بعد از برخورد امواج یونیزان تشخیص دهد. شکل های الف-۱ و الف-۲ نمایی از حس گر و تقویت کننده این آشکارساز را نشان می دهد. مشخصات تقویت کننده در جدول الف-۱ آمده است [۲۷].

همانطور که گفته شد حس گر از نوع سوسوزن می باشد و مشخصات آن به صورت :

۱. کریستال یدور سزیم با ابعاد مختلف 1×1 ، $1 \times 1/5$ ، 1×2 و...

جدول الف-۱: مشخصات تقویت کننده آشکارساز شرکت نوین طیف [۲۷]

تعداد کانال	های ولتاژ (kV)	بهره	نرم افزار اختصاصی	Ethernet	رزولوشن (FHWME)
۴۰۰۰ تا ۱۰۰۰	۰ تا ۲	۱۰۰ تا ۲	NTMCA	دارد	۰/۰۰۲۵

۲. دارای لوله تکثیرکننده نوری^۱ حساس به طول‌موج‌های ناحیه سبز

۳. دارای بیس و پیش تقویت کننده

۴. بدنه آلومینیومی و پنجره نازک آلومینیومی

۵. قدرت تفکیک انرژی حدود ۱۰٪ برای ۶۶۲ keV و ۷٪ برای ۱۱۷۳ keV

است. این حس‌گر به دلیل لایه محافظ نوری در مقابل آن، فقط به گاما و X حساس است. در قسمت بعدی عملکرد آن بررسی می‌شود [۲۷].

زمانی که تابش یونیزه کننده از داخل سوسوزن عبور می‌کند، فوتون‌هایی را به وجود می‌آورد. تکثیرکننده نوری دارای لایه‌ای با خاصیت فوتوالکتریک است. وقتی نور با این لایه برخورد کند، الکترون از آن خارج می‌شود. تعداد الکترون‌های خارج شده تابع شمار فوتون‌هایی است که با فوتوکاتد برخورد می‌کنند. الکترون‌های گسیل شده توسط سطح فوتوکاتد، در میدان الکتریکی شتاب می‌گیرند و به طرف دینود^۲ رانده می‌شوند.

دینود صفحه‌ای است با رویه خاص که الکترون‌ها به آسانی از آن جدا می‌شوند. هر الکترونی که به دینود می‌رسد، بسته به انرژی که در میدان الکتریکی دریافت می‌کند، حدود سه یا چهار الکترون از دینود جدا خواهد کرد. سپس الکترون‌هایی که از دینود گسیل می‌شوند، به طرف دومین دینود شتاب گرفته و هر یک از الکترون‌ها چندین الکترون دیگر را از آن دینود جدا می‌کنند و این فرآیند چندین بار با تعداد الکترون‌هایی که در هر دینود سه یا چهار برابر شده‌اند، تکرار می‌شود.

تکثیرکننده‌های نوری موجود، ۶ تا ۱۴ مرحله‌ای هستند. الکترون‌های آخرین دینود (بار کل) توسط یک صفحه (که آند نامیده می‌شود) جمع می‌شوند و از آن‌جا الکترون‌ها به طرف خازن جریان پیدا می‌کنند. در نتیجه ولتاژ خروجی بدست می‌آید. نمودار بلوکی عملکرد این آشکارساز در شکل الف-۳ آمده است.

الف-۱ طیف‌سنجی با آشکارساز تجاری شرکت نوین طیف

همانطور که قبلاً گفته شد، برای صحت سنجی آزمایشات این پایان‌نامه از آشکارساز تجاری شرکت نوین طیف همراه با نرم‌افزار اختصاصی NTMCA در آزمایشگاه هسته‌ای دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود استفاده شده است. در طول تمام آزمایشات، چشمه‌ها داخل محفظه سربی با قطر زیاد برای محافظت در برابر تابش، قرار گرفته‌اند. هر آزمون در مدت زمان مشخص و قابل تنظیم انجام می‌شود. نمودارهای خروجی، نمودار هیستوگرام بوده که محور

¹Photomultiplier

²Dynode

عمودی شمارش انجام شده در هر کانال و محور افقی شماره کانال و بعد از کالیبراسیون، اندازه انرژی خواهد بود.

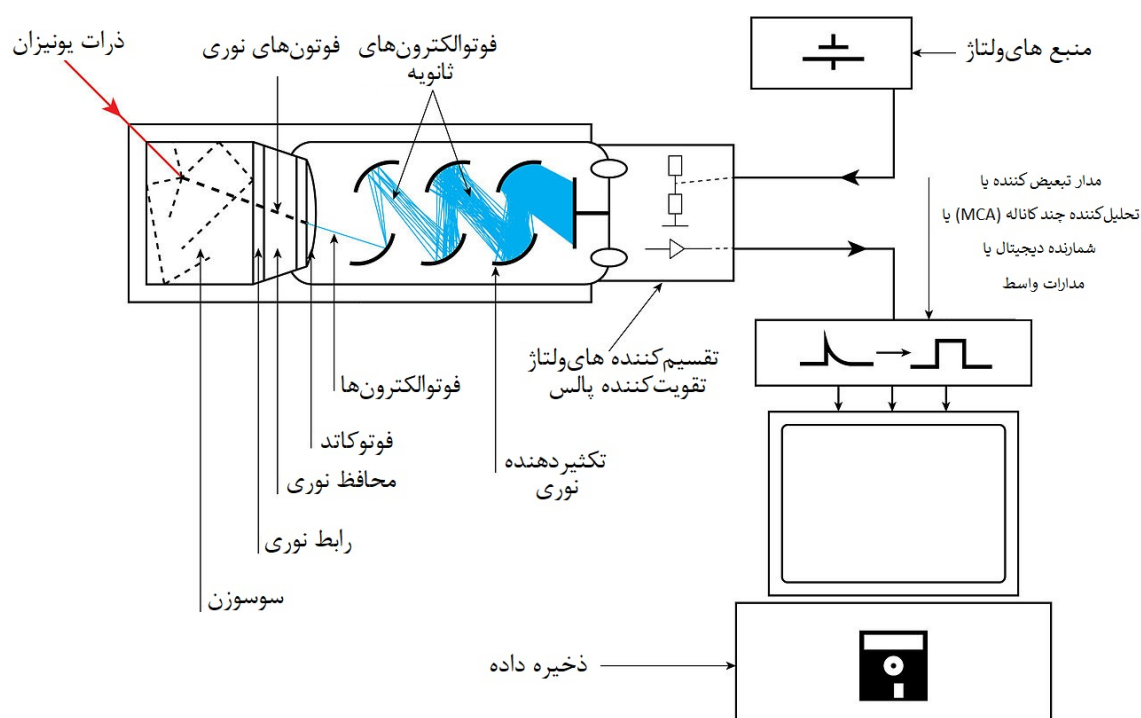
هدف این آزمایشات پی بردن به یونیزان بودن چشمه‌های استفاده شده در تایید عملکرد سامانه آشکارساز طراحی شده در این پایان نامه است.

الف-۲ راهنمای استفاده از دستگاه HVMCA مدل NT-

124

برای استفاده از دستگاه مراحل زیر به ترتیب انجام می‌شود:

۱. ابتدا کابل تغذیه ولتاژ به اتصال ورودی ۲۲۰ ولت دستگاه متصل شده و طرف دیگر آن به برق شهر وصل می‌شود.
۲. کابل USB از یک طرف به درگاه شماره ۹ دستگاه و از طرف دیگر به رایانه متصل می‌شود. (باید توجه کرد که قبلاً نرم افزار NTMCA روی رایانه نصب شده باشد).
۳. اتصالات مربوط به آشکارساز یدور سزیم وصل شود.
۴. قبل از روشن کردن دستگاه باید مطمئن شد که مقدار های ولتاژ صفر باشد.



شکل الف-۳: نمودار بلوکی آشکارساز سوسوزن

۵. در صورتی که اتصالات کامل باشد، می‌توان دستگاه را با استفاده از کلید روشن-خاموش اصلی روشن کرد. در این حالت نمایشگر دستگاه، های‌ولتاژ صفر را نشان می‌دهد.
۶. با استفاده از ولوم تنظیم‌کننده ولتاژ می‌توان مقدار ولتاژ را بالا برد و آن را با توجه به های‌ولتاژ مورد نیاز آشکارساز خود تنظیم کرد. در صورتی که از آشکارساز یدور سزیم (ساخت شرکت نوین طیف) استفاده می‌شود، می‌توان مقدار ولتاژ را بین ۷۰۰ تا ۷۲۰ ولت (با توجه به گواهی ساخت آشکارساز) تنظیم کرد.
۷. حال چشمه در فاصله مناسبی از آشکارساز قرار گرفته می‌شود.
۸. رایانه را روشن و برنامه NTMCA اجرا را کرده تا صفحه اصلی مربوط به برنامه ظاهر شود.
۹. با فشردن کلید Start در نرم‌افزار، دستگاه شروع به جمع‌آوری طیف می‌کند.
۱۰. در صورتی که کلید Pause در نرم‌افزار کلیک شود، جمع‌آوری طیف به طور موقت متوقف می‌شود و اگر کلید Stop فشرده شود، طیف‌گیری قطع خواهد شد.
۱۱. با استفاده از کلید Clear MCA در نرم‌افزار می‌توان طیف جمع‌آوری شده را پاک کرد.
۱۲. با استفاده از ولوم تنظیم‌کننده Lower Level بر روی دستگاه می‌توان کانال‌های پایین MCA را بست. اینکار مانع از ورود نویز به سیستم می‌شود.
۱۳. با استفاده از ولوم‌های تنظیم بهره می‌توان ارتفاع پالس خروجی را تنظیم کرد. ولوم Coarse Gain برای تغییرات بزرگ و ولوم Fine Gain برای تغییرات کوچک استفاده می‌شود. بدین صورت بهره اعمالی برابر می‌شود با:

$$\text{ضریب تقویت} = \text{CoarseGain} \times \text{FineGain}$$

۱۴. برای ذخیره کردن طیف می‌توان از کلید Save در نرم‌افزار استفاده کرد تا طیف در فایل مورد نظر ذخیره شود. همچنین می‌توان اطلاعات ذخیره شده را با استفاده از نرم‌افزار های دیگر (مانند Aptec) اجرا و تجزیه و تحلیل کرد.

الف-۳ طیف‌سنجی امواج پس‌زمینه

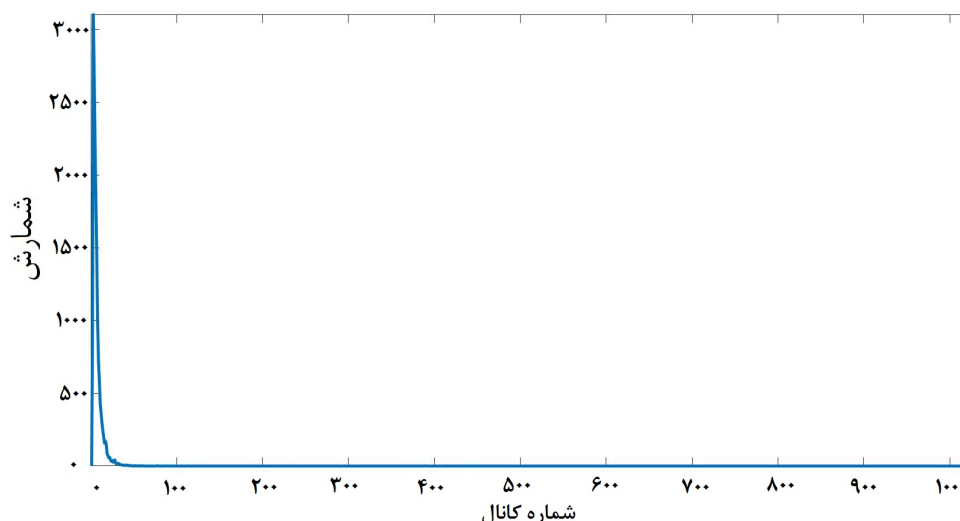
در ابتدا آزمایشی که باید انجام شود، در مورد تابش‌های پس‌زمینه است تا اگر چشمه‌ای ناخواسته در محیط باشد، شناسایی شود. این آزمایش در مدت زمان ۱۰۰۰ ثانیه انجام شد و نتیجه در شکل الف-۴ نشان داده شده است. در این آزمایش تعداد شمارش‌ها در واحد زمان محدود به ۱۸ شمارش بوده و تعداد شمارش‌های کل ۱۷۱۱۷ است. با توجه به شکل هیچ قله‌ای مشاهده نمی‌شود و تعداد شمارش‌های موجود در زمان ۱۰۰۰ ثانیه که بسیار اندک بوده،

به دلیل وجود نویز است. زیرا معمولاً نویز در کانال‌های ابتدایی ظاهر می‌شود. همچنین باید خاطر نشان شد که اندازه‌گیری در یک سوم کانال‌های ابتدایی و انتهایی به صورت غیر خطی بوده و نمی‌توان به آن‌ها اطمینان کرد. این امر خود گواه از عدم وجود چشمه تابش‌های یونیزان در اطراف آشکارساز است.

الف-۴ تنظیم دستگاه

برای تنظیم دستگاه باید از یک چشمه مشخص استفاده کرد. در این پایان‌نامه برای تنظیم دستگاه از چشمه‌های ^{60}Co و ^{137}Cs استفاده شده است. در این قسمت برای افزایش دقت و همچنین دو مرحله‌ای شدن آزمایش (در دو روز متفاوت آزمایش انجام شد)، دو مرتبه تنظیم صورت گرفت. مرتبه اول دستگاه توسط چشمه سزیم و در مرحله دوم توسط چشمه‌های سزیم و کبالت به صورت هم‌زمان کالیبره شد.

برای کالیبره کردن با سزیم، دستگاه روی زمان 84° ثانیه تنظیم شده و طیف‌گیری آغاز می‌شود. پس از اتمام طیف‌گیری، نشانگر روی قله‌هایی که انرژی آن‌ها معلوم است قرار داده می‌شود. نشانگر را می‌توان توسط کلیدهای جهت‌نمای صفحه کلید و یا توسط ماوس حرکت داد. با استفاده از گزینه Calibration موجود در نوار ابزار، درجه تنظیم انتخاب می‌شود. در صورتی که درجه تنظیم یک باشد باید دو نقطه انتخاب کرد و در صورتی که درجه تنظیم دو باشد، باید سه نقطه انتخاب شود. در اینجا درجه تنظیم را یک انتخاب کرده و از دو قله سزیم و پس پراکندگی (Backscattering)^۱ آن که به ترتیب دارای انرژی‌های 662keV و 184keV است،



شکل الف-۴: طیف‌سنجی تابش‌های پس‌زمینه

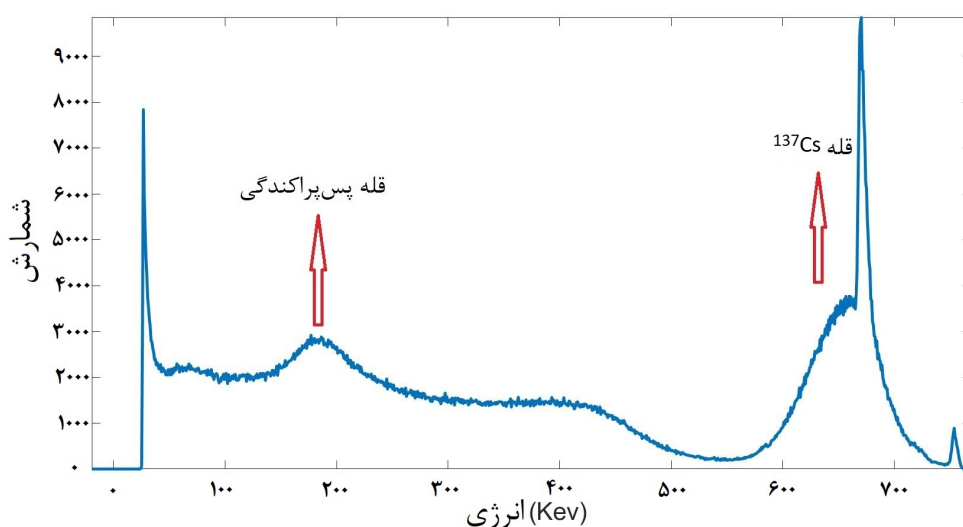
^۱ مجموعه تابش‌هایی است که در جهت مخالف آشکارساز از چشمه ساطع شده و بعد از برخورد به محفظه چشمه تضعیف شده و به سمت آشکارساز باز می‌گردند. از این پدیده به عنوان اثر کامپتون 18° درجه هم یاد می‌شود.

استفاده می‌شود. پس از قرار دادن نشانگر روی هر قله، گزینه Add Calibration Point را کلیک کرده و انرژی قله موردنظر وارد می‌شود. نتیجه این تنظیم در شکل الف-۵ آمده است. تعداد شمارش‌ها در واحد زمان ۲۹۴۹ شمارش بوده و تعداد شمارش‌های کل ۱۳۵۴۹۱۷ است. در این شکل قله‌های سزیم و پس‌پراکندگی آن که از تابع ریاضی لورنتس تبعیت می‌کنند، به خوبی قابل مشاهده هستند. در نگاه اول می‌توان فهمید قدرت تفکیک^۱ دستگاه پایین است. زیرا نسبت پهنای نیم ارتفاع (FWHM) به انرژی وسط قله، عددی بزرگ می‌شود و این نیز تعریف کمیت قدرت تفکیک دستگاه‌های طیف‌سنج می‌باشد. به زبان ساده‌تر پهنای قله در برابر انرژی وسط قله، بزرگ است.

قله کوچک انتهایی که انرژی آن بیش از ۷۰۰ keV بوده، مجموع تمام انرژی‌هایی است که در کانال‌های بالاتر وجود داشته و در کانال آخر دستگاه ذخیره شده اند. به دلیل بستن کانال‌های پایین برای جلوگیری از نویز، شکل موج به سمت جلو حرکت کرده و کانال‌های بالاتر نشان داده نمی‌شوند.

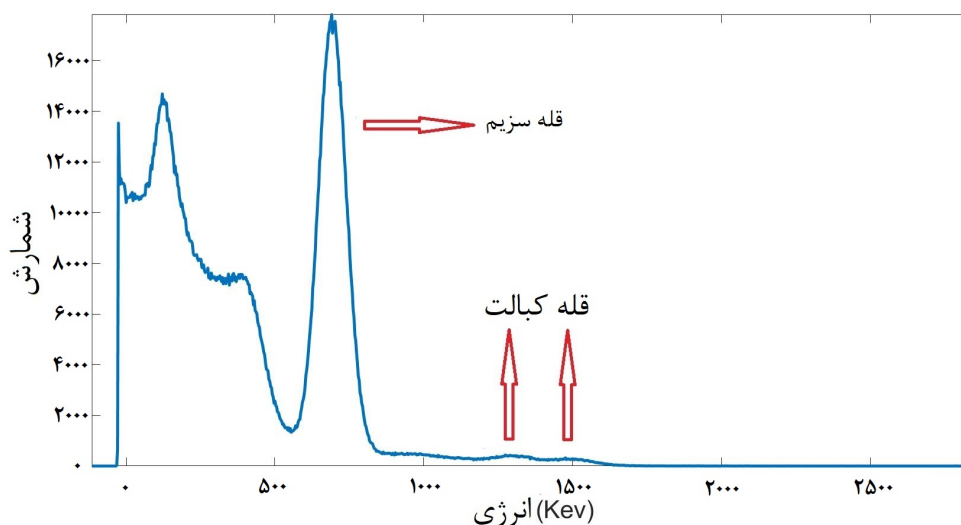
قسمت تیزی که بر روی قله سزیم مشاهده شده، به علت خطای دستگاه اندازه‌گیری بوده و این قله می‌بایست کاملاً متقارن بدست می‌آمد.

قسمت‌هایی از نمودار که انرژی‌شان بین ۲۵۰ keV تا ۵۰۰ keV است، به دلیل پدیده پراکندگی کامپتون ناشی از قله سزیم می‌باشد. همچنین انرژی‌های بین ۵۰ keV و ۱۵۰ keV، مجموع اثرات پراکندگی کامپتون قله‌های سزیم و پس‌پراکندگی می‌باشند. قسمت اول نمودار هم که معرف نویز است. این تنظیم برای طیف‌سنجی چشمه مجهول حس‌گر دود استفاده شده است. در دومین جلسه آزمایشگاه هسته‌ای، از چشمه‌های ^{137}Cs و ^{60}Co به صورت هم‌زمان برای تنظیم استفاده شده است. در این آزمایش از تنظیم درجه دوم استفاده کرده و یک قله سزیم



شکل الف-۵: تنظیم دستگاه با چشمه سزیم-۱۳۷

^۱Resolution



شکل الف-۶: تنظیم دستگاه با چشمه سزیم-۱۳۷ و کبالت-۶۰

و دو قله کبالت که به ترتیب دارای انرژی‌های 662 keV ، $1173/2\text{ keV}$ و $1332/5\text{ keV}$ هستند، مبنای عمل قرار گرفته اند. نتیجه تنظیم در شکل الف-۶ آمده است. تعداد شمارش‌ها در واحد زمان 3107 شمارش بوده و تعداد شمارش‌های کل 2518132 در مدت زمان 848 ثانیه است. در این شکل قله سزیم به سادگی قابل تشخیص است^۱. اما از آن جا که از نیمه عمر چشمه کبالت زیاد گذشته و این چشمه ضعیف شده است^۲، قله‌های مربوط به آن به سختی یافت می‌شوند. قله‌های مربوط به انرژی‌های زیر 500 keV مربوط به اثر پراکندگی کامپتون قله‌های سزیم و کبالت است. این تنظیم برای طیف‌سنجی چشمه مجهول توری گازی استفاده شده است.

^۱ نیمه عمر ^{137}Cs ، 30 سال بوده که از این چشمه موجود یک نیمه عمر هم نگذشته است.
^۲ نیمه عمر ^{60}Co ، 5 سال بوده که از این چشمه موجود که دارای اکتیویته 4 میلی کوری بوده، حداقل دو نیمه عمر گذشته است.

پیوست **ب**

مفاهیم برنامه‌نویسی اندروید و
میکروکنترلرها

ب-۱ میکروکنترلر

میکرو کنترلر نوعی ریزپردازنده است که دارای حافظه دسترسی تصادفی (RAM)^۱، حافظه فقطخواندنی (ROM)^۲، تایمر، پورت‌های ورودی و خروجی (I/O)^۳ و درگاه ترتیبی یا پورت سریال^۴ درون خود تراشه است، و می‌تواند به تنهایی ابزارهای دیگر را کنترل کند. به عبارت دیگر یک میکروکنترلر، مدار مجتمع کوچکی است که از یک واحد پردازنده مرکزی (CPU)^۵ کوچک و اجزای دیگری مانند تایمر، درگاه‌های ورودی-خروجی آنالوگ و دیجیتال و حافظه تشکیل شده است. در این تحقیق از برد آردوینو^۶ که یک پلتفرم سخت‌افزاری و نرم‌افزاری متن‌باز است، استفاده شده است. پلتفرم آردوینو شامل یک میکروکنترلر تک بردی متن‌باز است. آردوینوها دارای سری‌های مختلفی اند که دارای امکانات متفاوتی هستند.

ب-۲ برنامه‌نویسی آردوینو

محیط برنامه‌نویسی آردوینو یک محیط توسعه‌ی یکپارچه یا IDE^۷ است که به زبان جاوا نوشته شده و به آن Sketch^۸ می‌گویند. Sketch از اصول زبان برنامه‌نویسی Processing پیروی می‌کند و فایل اصلی زبان برنامه که با پسوند .ino در Filing System سیستم عامل شناخته می‌شود؛ شبیه به زبان Processing می‌باشد. زبان Processing مشتق شده از زبان جاوا می‌باشد. اصول نوشتاری یا Syntax زبان جاوا بسیار شبیه به زبان برنامه‌نویسی C++ Ansi است.

ب-۳ سیستم عامل اندروید

گوگل در سال ۲۰۰۵ شرکت اندروید واقع در شهر پالوآلتو کالیفرنیا را خرید. شرکت کوچک اندی رابین و دیگر همکارانش در زمینه تولید برنامه‌های کاربردی برای تلفن همراه فعالیت می‌کرد. اندی پس از پیوستن اندروید به گوگل بعنوان مسئول پروژه اندروید در گوگل منسوب شد. اندروید منبع باز و سیستم عامل آن مبتنی بر لینوکس است و جهت تلفن‌های هوشمند و تبلت‌ها ارائه گردید. نسخه ۱/۰، اولین نسخه بتا و کیت توسعه نرم‌افزاری اندروید یا SDK^۹ در سال ۲۰۰۷ توسط گوگل ارائه شد [۳۳، ۳۴].

¹Random Access Memory

²Read Only Memory

³Input/Output Port

⁴Serial Port

⁵Central Processing Unit

⁶Arduino

⁷Integrated Development Environment

^۸ به معنی طرح و یا نقشه بوده و نامی است که به فایل اصلی برنامه‌ی Arduino نسبت داده می‌شود.

⁹Software development kit

SDK شامل مجموعه‌ای از ابزارها (مثلا کتابخانه‌ها و توابع کامپایل شده و ...) جهت سهولت برنامه‌نویسی در یک محیط توسعه یکپارچه یا IDE خاص طراحی شده و در اختیار برنامه‌نویس قرار داده شده است. Android SDK نام SDK است که گوگل در اختیار توسعه دهندگان اندروید قرار داده که با استفاده از ابزارهای موجود در آن می‌توانند نرم‌افزارهای دلخواه مورد نظر را راحت‌تر و سریع‌تر بسازند. کیت توسعه جاوا یا JDK نام SDK دیگری است که توسط شرکت اوراکل برای توسعه دهندگان جاوا منتشر شده است [۳۳، ۳۴].

برنامه‌نویسی اندروید اغلب توسط زبان‌های جاوا، Visual Basic و سی‌شارپ انجام می‌شود که در میان آن‌ها زبان جاوا متداول‌تر است. IDE هایی که معمولاً بیش‌تر بین برنامه‌نویسان ایرانی متداول هستند، Android Studio و Eclipse می‌باشد [۳۳، ۳۴].

یکی دیگر از مفاهیم مورد نیاز برای آشنایی با برنامه‌نویسی اندروید، رابط برنامه‌نویسی نرم‌افزار یا API^۱ می‌باشد. یکی از ابزارهای موجود در Android SDK است که نقش یک رابط میان توسعه‌دهنده و امکانات پلتفرم می‌باشد. به عنوان مثال زمانی که لازم باشد با بلوتوث، وایفای، موقعیت یاب و ... ارتباط برقرار کرده و از آن‌ها در کدنویسی استفاده شود، از API ها استفاده می‌شود. هر نسخه از API ها در اندروید دارای امکانات ویژه‌ای است. به عنوان مثال قابلیت بلوتوث نسخه ۲/۱ در API سطح ۵ (معادل اندروید نسخه ۲/۱) برای اولین بار اضافه شد. در میان توسعه‌دهندگان برای نشان دادن نسخه اندروید به جای اشاره به نسخه پلتفرم (مثلا اندروید ۵/۰) از سطح API (اندروید API سطح ۲۱) استفاده می‌شود [۳۳، ۳۴].

نکته‌ای که باید مد نظر داشت آن است که همواره برای ساختن نرم‌افزار اندروید اگر از API های نسخه بالا استفاده شود، قابلیت های بیش‌تری برای ساختن نرم‌افزار در دسترس خواهد بود اما در مقابل نرم‌افزار بر روی نسخه‌های اندروید قدیمی‌تر از نسخه انتخاب شده، قابل نصب و اجرا نخواهد بود [۳۳، ۳۴].

برای نوشتن یک برنامه اندرویدی ابتدا باید نرم‌افزار Android Studio را بر روی سیستم عامل ویندوز، مک یا لینوکس نصب کرد. سپس Android SDK را با توجه به API مورد نظر بارگیری و نصب می‌شود. از آنجا که زبان برنامه نویسی JAVA برای برنامه‌نویسی اندروید در محیط Android Studio انتخاب شده است، باید JDK مربوطه را نیز بارگیری و نصب کرد [۳۳، ۳۴].

ب-۴ توضیحات برنامه آشکارساز رادیواکتیویته

برای ساخت نرم‌افزار آشکارساز رادیواکتیویته از چهار layout صفحه ابتدایی، تنظیمات بلوتوث، نمایش داده‌ها و صفحه درباره‌ها استفاده شده است. هر کدام از این ها کلاس جاوا مربوط به خود را دارند. صفحه اصلی برای رفتن به صفحه درباره ما و صفحه نمایش داده ها و همچنین برای معرفی کلی نرم‌افزار طراحی شده است. با اضافه کردن toolbar در این صفحه

¹Application Programming Interface

می‌توان به صفحه درباره ما راه پیدا کرد. همچنین کاربر با لمس دکمه «شروع» با استفاده از کلاس Intent به صفحه نمایش داده‌ها هدایت می‌شود.

صفحه نمایش داده‌ها از سه قسمت مختلف تشکیل شده است. قسمت میانی صفحه شکل پالسی را نشان می‌دهد که در هنگام یک رویداد یا برخورد تابش یونیزان، این شکل موج فعال شده و عمل می‌کند.

دو کادر پایین آن داده‌های مربوط به ولتاژ آستانه و مشخصه CPM که از برد آردوینو ارسال می‌شود، را به نمایش درمی‌آورد.

در قسمت زیرین آن‌ها دو کلید به شکل LED و بلندگو وجود دارد. این کلیدها برای فعال و غیر فعال کردن LED و بازر روی برد کنترلی است. تا کاربر هر زمان تشخیص دهد آن‌ها را قطع و یا وصل کند.

قسمت انتهایی، کلیدهایی برای برقراری ارتباط و عدم آن با سخت‌افزار بلوتوث و به دنبال آن، برد کنترلی است. کاربر با لمس کلید «اتصال» به صفحه تنظیمات بلوتوث هدایت می‌شود. سخت‌ترین قسمت کار کدنویسی ارتباط با سخت‌افزار بلوتوث است. در این صفحه ابتدا وجود یا عدم وجود سخت‌افزار بلوتوث در پلتفرم مربوطه بررسی می‌شود. سپس عملکرد تک تک کلیدهای این صفحه اعم از روشن یا خاموش کردن سخت‌افزار بلوتوث، پیدا کردن دستگاه بلوتوث دار جدید و نمایش دستگاه‌های متصل شده، تعریف می‌شود.

زمانی که بر روی دستگاه پیدا شده لمس شود، آدرس آن دستگاه به همراه اسم آن در یک متغیر ذخیره شده و با کلاس Intent دوباره به صفحه نمایش داده‌ها منتقل می‌شود. در این صفحه در صورت وجود دستگاه جدید؛ یک راه ارتباطی به نام Socket بین پلتفرم و برد کنترلی ایجاد می‌شود. در نهایت با استفاده از توابع Run و handle Message اطلاعات موجود در بافر بلوتوث، که از برد آردوینو دریافت شده است، بارگیری می‌شود. همچنین با استفاده از تابع Send Data اطلاعات از پلتفرم به آردوینو ارسال می‌شود.

با لمس بر روی کلید «قطع ارتباط» در صفحه نمایش داده‌ها، کانال ارتباطی (Socket) بسته شده و ارتباط پلتفرم با برد کنترلی قطع می‌شود.

مراجع

- [1] M. A. Khazhmuradov, N. A. Kochnev, and D. V. Fedorchenko, "PIN Photodiodes For Gamma Radiation Measurements," *Радиоэлектроника и информатика*, pp.74–77, 2012.
- [2] E. Emirhan, A. Bayrak, E. B. Yücel, M. Yücel, and C. S. Ozben, "A low cost X-ray imaging device based on BPW-34 Si-PIN photodiode," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol.819, pp.1–5, 2016.
- [3] J. Mika, L. Martin, and Z. Barnea, "X-ray attenuation of silicon in the energy range 25-50 keV," *Journal of Physics C: Solid State Physics*, vol.18, no.26, p.5215, 1985.
- [4] "Low energy X-rays (LEX)," <https://www.arpansa.gov.au/our-services/testing-and-calibration/calibration/psdl/low-energy-x-rays>, Mar 2019. [Online; accessed 1. Jan. 2021].
- [5] G. Knoll. *Radiation detection and measurement*. Hoboken, N.J: John Wiley, 2010.
- [6] H. Spieler, "Analog and digital electronics for detectors," *Proceedings of the 2003 ICFA School on Instrumentation, Itacuruca, Brazil*, 2003.
- [7] B. Kainka, "Measure gamma rays with a photodiode, radiation detector using a bpw34," *Elektor*, pp.22–26, Jun 2011.
- [8] B. Kainka, "Improved radiation meter, counter for alpha, beta and gamma radiation," *Elektor*, pp.20–25, November 2011.
- [9] T. Beckers, "Radiation meter," *Elektor*, pp.44–45, January 2012.
- [10] A. Bayrak, E. Barlas, E. Emirhan, Ç. Kutlu, and C. S. Ozben, "A complete low cost radon detection system," *Applied Radiation and Isotopes*, vol.78, pp.1–9, 2013.

- [11] M. S. Andjelković and G. S. Ristić, "Feasibility study of a current mode gamma radiation dosimeter based on a commercial PIN photodiode and a custom made auto-ranging electrometer," *Nuclear Technology and Radiation Protection*, vol.28, no.1, pp.73–83, 2013.
- [12] J. Rodriguez, "Build And Test of A Gamma Radiation Detector," Master's thesis, Texas Tech University, 2016.
- [13] M. Nazififard, K. Y. Suh, and A. Mahmoudieh, "Experimental analysis of a novel and low-cost pin photodiode dosimetry system for diagnostic radiology," *Review of Scientific Instruments*, vol.87, no.7, p.073502, 2016.
- [14] C. N. Oliveira, H. J. Khoury, and E. J. Santos, "PiN photodiode performance comparison for dosimetry in radiology applications," *Physica Medica*, vol.32, no.12, pp.1495–1501, 2016.
- [15] P. Mitra, S. Srivastava, S. K. Singh, D. Akar, H. Patni, A. Topkar, and A. V. Kumar, "Optimum energy compensation for current mode application of silicon pin diode in gamma radiation detection," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol.63, no.6, pp.2777–2781, 2016.
- [16] B. Kainka, "Radiation meter reloaded," *Elektor*, pp.54–58, October 2012.
- [17] D.Liu, F.Gao, and C.Jin, "High linearity 32-channel cmos x-ray readout integrated circuit," *Procedia Engineering*, vol.7, pp.213 – 216, 2010. 2010 Symposium on Security Detection and Information Processing.
- [۱۸] امین عساکره و غلامرضا اکبری زاده، "طراحی و شبیه سازی آشکارسازهای فلت پنل اشعه X در سیستم های رادیولوژی دیجیتال"، در سومین کنگره بین المللی کامپیوتر، برق و مخابرات، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۹۵.
- [19] R. Novelline. *Squire's fundamentals of radiology*. Cambridge, Mass: Harvard University Press, 1997.
- [20] D. Attwood. *Soft x-rays and extreme ultraviolet radiation : principles and applications*. Cambridge New York: Cambridge University Press, 2000.
- [21] J. Cameron. *Medical physics*. Chichester: John Wiley, 1978.
- [22] H. Paul and J. Muhr, "Review of experimental cross sections for k-shell ionization by light ions," *Physics Reports*, vol.135, no.2, pp.47–97, 1986.

- [23] H. Spieler. *Semiconductor detector systems*. Oxford New York: Oxford University Press, 2005.
- [24] M. Nakhostin. *Signal processing for radiation detectors*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2018.
- [25] امین عساکره و غلامرضا اکبری زاده، ”نحوه ی عملکرد انواع آشکارسازهای اشعه X،“ در سومین کنگره بین المللی کامپیوتر، برق و مخابرات، دانشگاه تربت حیدریه، ۱۳۹۵.
- [26] “Mouser electronics,” <https://www.mouser.com>, 2020. [Online; accessed 30. Dec. 2020].
- [27] “Novin teif,” <http://www.novinteyf.ir/>. (Accessed on 03/15/2020).
- [28] اکبر اسلامی، محمدحسین ساقی، و ایوب رستگار، ”بررسی آهنگ دوز گامای محیطی و برآورد خطر مازاد ابتلا به سرطان ناشی از دریافت پرتو گاما در ساکنان شهر سبزوار در سال ۱۳۹۳،“ دانشکده پزشکی، جلد ۷۳، شماره ۱۰، صفحات ۷۵۱-۷۵۵، ۲۰۱۶.
- [29] علیرضا علی نژاد، احمد ماکوئی، و نیما اسفندیاری. تکنیک های نوین در تصمیم گیری های چندشاخصه (MADM). تهران، خیابان حافظ: جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۵.
- [30] M. Patel, B. Bhatt, and M. Vashi, “Smart-multi-criteria decision-making technique for use in planning activities,” 03 2017.
- [31] N. Tsoulfanidis. *Measurement and detection of radiation*. CRC press, 2010.
- [32] “Rad pro calculator,” <http://www.radprocalculator.com/>. (Accessed on 11/15/2020).
- [33] “Download android studio and sdk tools | android developers,” <https://developer.android.com>. (Accessed on 03/13/2020).
- [34] “Android,” <https://android-studio.ir>. (Accessed on 03/13/2020).
- [35] “Physical Measurement Laboratory,” <https://www.nist.gov/pml>, Dec 2020. [Online; accessed 12. Jan. 2021].
- [36] G. Chabot, “hps.org,” <https://hps.org/publicinformation/ate/q7153.html>, Feb 2021. [Online; accessed 3. Feb. 2021].

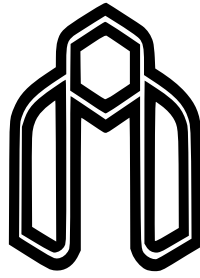
Abstract

For many decades, detecting of high ionizing radiation like X and Gama-ray attracted many attentions to researches in this field. Since, the effects of these radiation on the human body's tissue can cause devastation and genetic mutation so that it should be minimized as low as possible. The detectors can be used to measure the amount of radiation of the environment especially in the medical application such as fluoroscopy, CT-Scan and etc. One of the first detectors that can be considered to analyze the amount of radioactivity in the environment is Geiger counter. Geiger counter cannot be accessed due to the reasons like being rare, cost, and high-voltage operation. In this thesis, firstly, the detectors based on PIN photodiode are investigated and then three samples of X-ray detector structures based on photodiode are simulated and implemented.

The second and third pulse mode detectors have preamplifier structures with feedback impedance, while the first detector has a different structure in the preamplifier. Moreover, the three detectors also differ in the number of pulse shape stages. By comparing the electrical characteristics of the pulse mode detectors' responses, three parameters are investigated like conversion gain, pulse duration, and power dissipation. Among the proposed structures, the second architecture has a conversion gain of 66.75-dB which is the best performance among the other detectors. Moreover, the noise spectral density of the first detector is measured 7.64-nV^2 which is the minimum amount. As a matter of fact, the second and third detectors have a pulse duration of 12 and $8.2\text{ }\mu\text{s}$, respectively. Consequently, it can be inferred that they have a better performance in high count rate. Also, the first detector with a minimum power consumption of 36.6-mW has a better performance among other detectors. It should be noted that the first detector has a simple structure which can lead to decrease the production cost. According to the experimental results, the second and third detectors detect toward the minimum energy (59.54-KeV) and the pulse amplitude of the detectors is recognizable than the noise. It should be noted that the first detector does not detect the minimum energy and it cannot be a suitable candidate for this range of the energy. The experimental results of the fourth detector are shown that the amount of the equivalent dose has a relationship with the measured voltage of the circuit in the range of 30 to 800 micro sievert per hour.

The SMART technique as one of the multiple-attribute decision-making methods has been used in this research to enable initial decision-making for ranking the photodiodes which are used in this thesis. Using this method, S1223-01, BPV10, BPW34, S186P, PH320, PD438C and BPV23NF were ranked first to seventh, respectively. Also, the mentioned detectors have the ability to be used as a low-cost ionization detector.

keywords: Ionization radiation detection, X-Ray, gamma Ray, PIN Photodiode, Pulse Mode.



Shahrood University of Technology

Faculty Of Electrical and Robotics Engineering

MSc Thesis in: Electronic Integrated Circuits Engineering

**Design and implementation of a direct
detector system for low energy X-rays in
current-mode and pulse-mode using
photodiode**

By: Amirreza Mousazadeh Moghaddam

Supervisors

Dr. Mohammadreza Ashraf

Dr. Mahdi Kafaee

February 2021