طراحی و ساخت یک آشکارساز پرتو بتا با استفاده از فوتودیود BPW34

INC29-1194

احسان پارسا زاده، کمال حداد، محمدرضا محمدیان بهبهانی*، احمد پیروزمند

بخش مهندسی هسته‌ای - دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه شیراز - ۷۱۹۳۶۱۶۵۴۸ - شیراز - ایران

چکیده:

توسعه فناوری نیمه‌هادی‌ها در سال‌های اخیر، امکان تولید انبوه دیودها و ترانزیستورهای نیمه‌هادی را برای کاربردهای عمومی صنعت الکترونیک تسهیل کرده است. با توجه به شباهت منطق عملکردی این تراشه‌ها با آشکارسازهای نیمه‌هادی پرتو، می‌توان از آن‌ها برای آشکارسازی و دزیمتری پرتوها نیز بهره برد. هدف اصلی از انجام این پژوهش، طراحی و ساخت یک آشکارساز پرتو بتا با استفاده از تراشه فوتودیود BPW34 است. در طراحی این آشکارساز، یک تقویت‌کننده ترانزیستوری دوطبقه با بهره حدود ۱۰۰۰ و یک سیستم شمارنده مناسب با برنامه‌ریزی میکروکنترلر ATmega32A ساخته شد. در آزمایش تجربی عملکرد آشکارساز، وقتی در معرض پرتوهای بتای یک چشمه $Cl^{۳۶}$ قرار می‌گیرد، پالس‌هایی از مرتبه چند صد میلی ولت و پهنای حدود 50 µs تولید می‌شوند. بازده ذاتی آشکارساز برای اندازه‌گیری ذرات بتا نیز نزدیک به ٪۱۰۰ محاسبه شد. با توجه به عملکرد مناسب آشکارساز و در دسترس بودن فوتودیود BPW34، ساخت این نمونه آشکارساز برای سنجش ذرات بتا و همچنین پرتوگاما امکان‌پذیر و مفید به نظر می‌رسد.

کلیدواژه‌ها: آشکارساز پرتو بتا، تراشه فوتودیود BPW34، میکروکنترلر ATmega32A

Design and construction of a beta ray detector using BPW34 photodiode

Ehsan Parsa Zadeh, Kamal Hadad, Mohammad-Reza Mohammadian-Behbahani*, Ahmad Pirouzmand

Department of Nuclear Engineering, School of Mechanical Engineering, Shiraz University, P. O. BOX: 7193616548, Shiraz, Iran.

Abstract:

Recent developments in semiconductor technology has facilitated the mass-production of semiconductor diodes and transistors for general electronics applications. As their performance is similar to application-specific semiconductor radiation detectors, these chips can also be used for radiation detection and dosimetry. The main purpose of this study is to design and construct a beta particle detector by using a BPW34 photodiode. A two-stage transistor amplifier with a gain of about 1000, as well as a counter system based on ATmega32A microcontroller are made. In the experimental test of the detector performance, when exposed to the beta particles of a 36Cl source, pulses of the order of several hundred millivolts and a width of about 50 µs are produced. The intrinsic efficiency of the detector for measuring beta particles was calculated to be close to 100%. Due to the appropriate performance of the detector and the availability of the BPW34 photodiode, it seems to be a suitable choice for counting beta particles as well as gamma-rays.

Keywords: Beta radiation detector, BPW34 photodiode chip, ATmega32A microcontroller

۱. مقدمه

برای آشکارسازی و دزیمتری پرتوها، با توجه به نوع و انرژی پرتو می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده نمود. برای اندازه‌گیری الکترون‌های پرانرژی و یا پرتوگاما می‌توان از آشکارسازهای نیمه‌هادی استفاده کرد. به دلیل تراکم بسیار بیشتر جامد نسبت به گاز، ابعاد آشکارساز می‌تواند بسیار کوچک‌تر از معادل گازی آن باشد. همچنین در نیمه‌هادی، به ازای هر واحد انرژی برجای گذاشته، تعداد بسیار زیادی حامل بار تولید می‌شود. از مواد نیمه‌هادی موجود، سیلیکون گزینه متداولی برای ساخت آشکارسازهای دیودی محسوب می‌شود [۱]. در مطالعه O. Keller و همکاران، از پین-دیودهای[۱] سیلیکونی کم‌هزینه BPX61 و BPW34 (که در اصل برای آشکارسازی فوتون‌های نور طراحی‌شده‌اند) به‌عنوان شمارنده مد پالسی استفاده شد (شکل ۱). این حسگرها به دلیل قابلیت حمل و کم‌هزینه بودن، به‌عنوان جایگزینی برای شمارنده‌های گایگر یا سایر تجهیزات تخصصی، جهت استفاده توسط شهروندان و گروه‌های علمی در کاربردهای سلامت و محیط‌زیست یا در محیط‌های آموزشی قابل‌استفاده هستند [۲]. در مطالعه دیگری که توسط C. Bueno و همکاران انجام شد، پاسخ انرژی آشکارسازهای فوتودیود سیلیکونی کم‌هزینه برای الکترون‌های تبدیل داخلی، اشعه ایکس، ذرات آلفا و پاره‌های شکافت موردمطالعه قرار گرفت. عملکرد طیف‌نگاری این آشکارساز با آشکارسازهای سد سطحی قابل‌مقایسه ارزیابی شد [۳]. همچنین در مطالعه M. Nazififard و همکاران، یک فوتودیود BPW34 به‌صورت تجربی برای دزیمتری در کاربرد رادیولوژی تشخیصی آزمایش شد. با مزیت‌هایی همچون امکان خوانش فوری مقادیر دز، هزینه کم و قابلیت حمل، این سیستم به‌عنوان جایگزین سیستم‌های دزیمتری غیرفعال (مانند دزیمتر ترمولومینسانس) برای اندازه‌گیری دوز در رادیولوژی تشخیصی پیشنهاد شد [۴]. عملکرد تراشه BPW34 برای یک سیستم پایش گاز رادون نیز بررسی‌شده است [۵]. مطالعه حاضر بر طراحی و ساخت یک آشکارساز ذرات بتا با استفاده از فوتودیود BPW34 تمرکز دارد.

(الف) (ب)

شکل ۱. (الف) فوتودیود BPW34 و (ب) فوتودیود BPX61 با حذف شیشه ورودی آن جهت آشکارسازی ذرات باردار سنگین نظیر آلفا [۶].

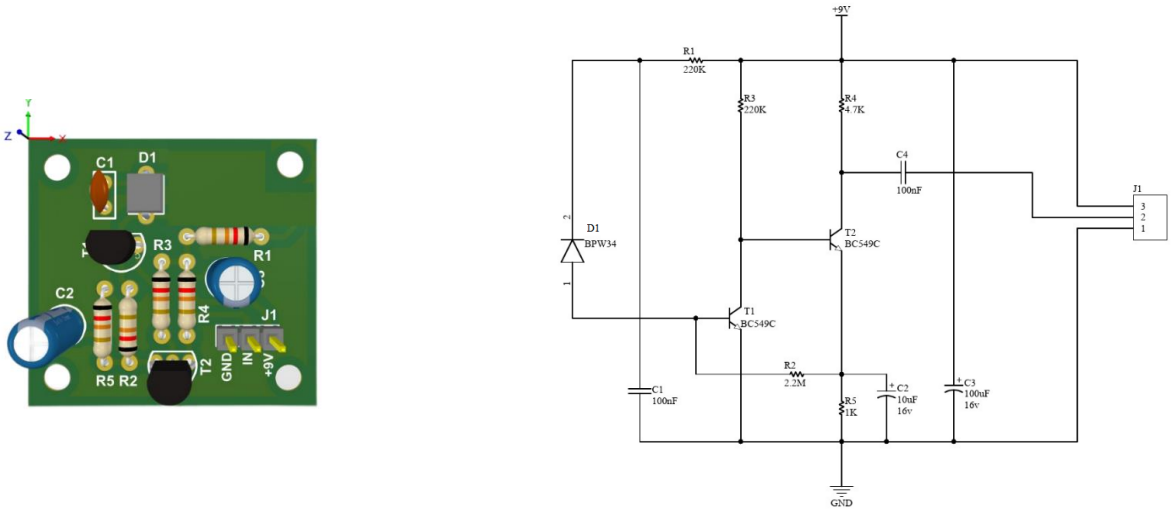
۲. روش کار

ابتدا با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی مدارهای الکترونیکی Altium Designer، یک مدار تقویت‌کننده برای قرائت و تقویت مناسب پالس‌های خروجی حسگر طراحی شد (شکل ۲)[۷]. این مدار شامل دوطبقه تقویت‌کننده ترانزیستوری (ترانزیستورهای BC549C) بوده و پالس‌های ولتاژ را درمجموع با بهره حدود ۱۰۰۰ تقویت می‌کند. سپس یک سیستم شمارنده برای ثبت نرخ پالس‌های خروجی تقویت‌کننده نیز طراحی و ساخته شد. شکل ۳ طراحی این سیستم را در محیط شبیه‌سازی Altium Designer نشان می‌دهد. یک تبعیض گر[۲] مناسب جهت تفکیک پالس‌های خروجی از سطح نویز زمینه طراحی‌شده است. به این منظور، یک مدار مقایسه‌گر ولتاژ[۳] با امکان تنظیم سطح آستانه طراحی شد (شکل ۳-د). به‌این‌ترتیب به ازای برخورد هر ذره با حسگر، یک پالس منطقی ۵ ولتی در خروجی تبعیض گر تولید خواهد شد. سپس پالس منطقی تولیدشده برای شمارش به میکروکنترلر ATmega32A ارسال می‌شود (شکل ۳-ه). میکروکنترلر به نحوی برنامه‌ریزی شد که نرخ

---

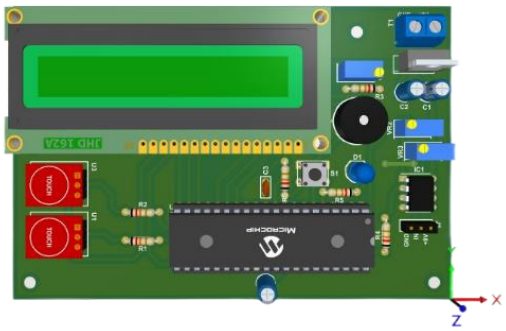
[۱] PIN-Diode
[2] Discriminator
[3] Voltage Comparator

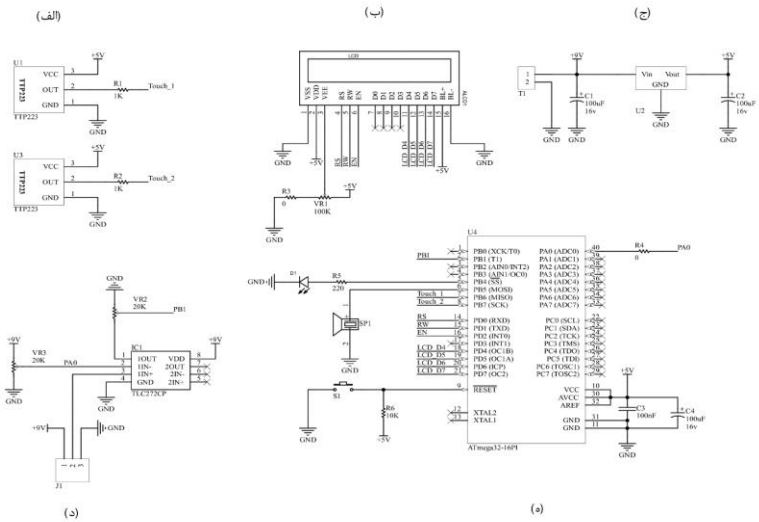
شمارش پالس در ثانیه را محاسبه و بر روی یک نمایشگر کاراکتری LCD نشان دهد (شکل ۳-ب). برنامه‌نویسی و بررسی عملکرد موردنظر در محیط CodeVisionAVR و Proteus انجام شد. تغذیه کل مدار از یک باتری کتابی ۹ ولتی تأمین می‌شود، درحالی‌که میکروکنترلر و LCD مورداستفاده، حداکثر با ولتاژ ۵/۵ ولت کار می‌کنند. لذا از تنظیم‌کننده ولتاژ (رگولاتور) ۷۸۰۵ برای تثبیت ولتاژ خروجی منبع تغذیه در مقدار ثابت ۵+ ولت استفاده گردید (شکل ۳-ج). از دو کلید لمسی خازنی TTP223 نیز به‌منظور نمایش مقدار ولتاژ آستانه و شروع شمارش پالس استفاده‌شده است (شکل ۳-الف).



شکل ۲. تصویر راست: طراحی مدار تقویت‌کننده در نرم‌افزار Altium Designer. تصویر چپ: نمای سه‌بعدی مدار تقویت‌کننده در نرم‌افزار Altium Designer.

نمونه ساخته‌شده آشکارساز در شکل ۴ نمایش داده‌شده است. مدار الکترونیکی تقویت‌کننده به همراه فوتودیود، جهت جلوگیری از تابش نور به حسگر و همچنین پیشگیری از تداخل امواج الکترومغناطیسی، در یک جعبه فلزی دربسته قرار داده می‌شوند. سپس به‌منظور آزمایش تجربی سیستم ساخته‌شده، از چشمه بتازای سطحی ^{36}Cl استفاده شد. چشمه درون محفظه فلزی و نزدیک به حسگر قرار داده شد تا اثرات جذب و تضعیف پرتو بتا به حداقل برسد. سپس پالس‌های خروجی توسط یک کارت اسیلوسکوپ USB مدل InstruStar-ISDS205A روی رایانه مشاهده و بررسی شد. به‌این‌ترتیب یک مقدار آستانه مناسب برای قرائت پالس‌ها تعیین و توسط یک ماژول پتانسیومتر تعبیه‌شده روی برد سیستم شمارنده (شکل ۵-الف-۳)، تنظیم شد. در هنگام تنظیم ولتاژ آستانه، امکان مشاهده آن روی نمایشگر نیز تعبیه‌شده است (شکل ۵-الف). پس از تنظیم ولتاژ آستانه و جدا کردن اتصال اسیلوسکوپ، خروجی آشکارساز مستقیماً به سیستم تقویت‌کننده و شمارنده متصل شد. مقادیر شمارش برای ۵ ثانیه ثبت و به زمان اندازه‌گیری تقسیم و به‌صورت نرخ شمارش روی صفحه نمایشگر رؤیت می‌شود. برای تکرار اندازه‌گیری‌ها، کاربر باید کلید لمسی مربوطه (شکل ۵-الف-۲) را لمس کند.





شکل ۳. (الف) تا (ه): طراحی مقایسه‌گر ولتاژ و سیستم شمارنده در محیط شبیه‌سازی Altium Designer. شکل بالا(صفحه قبل): نمای سه‌بعدی از سیستم شمارنده طراحی‌شده در محیط شبیه‌سازی Altium Designer.

شکل ۴. (الف) تصویر مدار تقویت‌کننده به همراه حسگر BPW34 و (ب) شمارنده ساخته‌شده. سیستم نهایی با یک باتری کار می‌کند، اما در تصویر فوق، به‌منظور نمایش بهتر، آشکارساز و شمارنده از هم جداشده و به هرکدام یک باتری جداگانه متصل است.

(ب) (الف)

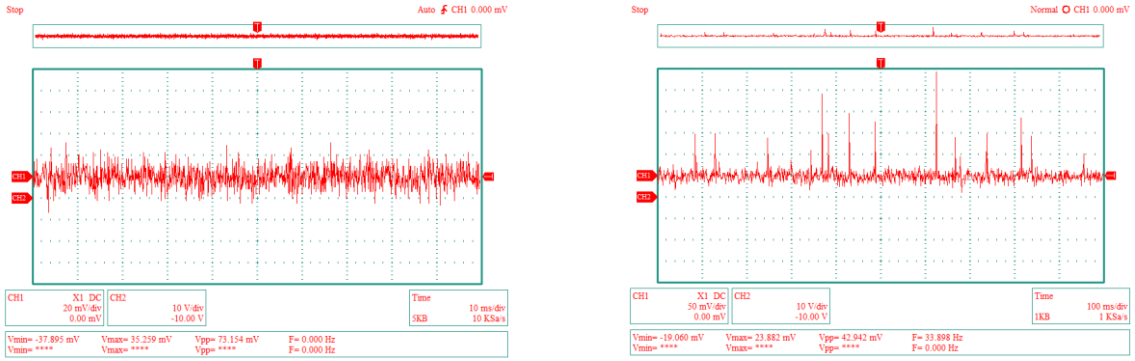
شکل ۵. (الف) مشخصات ولتاژ آستانه برای شمارش رویدادهای ناشی از برخورد پرتو. (ب) نمایش نرخ شمارش پالس. LED قرمزرنگ در حالت روشن، نشان‌دهنده کار کردن مدار است.

۳. نتایج

در این مطالعه از یک فوتودیود BPW34 به‌عنوان حسگر ذرات بتا استفاده گردید. پالس‌های خروجی حسگر توسط مدار تقویت‌کننده‌ای با بهره حدود ۱۰۰۰ تقویت‌شده و به سیستم شمارنده ارسال شد. بهره تقویت‌کننده از شبیه‌سازی مدار در ORCAD و تقسیم دامنه ولتاژ خروجی شبیه‌سازی به سطح ولتاژ منبع سیگنال پالسی در ورودی به‌دست‌آمده است:

$$A_v = \frac{v_o}{v_{in}} \qquad (۱)$$

که A_v بهره ولتاژ، v_o دامنه ولتاژ خروجی و v_{in} دامنه ولتاژ ورودی است. سطح آستانه مدار تبعیض گر به‌صورت تجربی با مشاهده خروجی مدار روی اسیلوسکوپ، در حالت بدون چشمه تعیین شد (در اینجا ۳۹ میلی ولت) که نمونه‌ای از آن در شکل ۶-ب دیده می‌شود. سپس با قرار دادن چشمه ^{36}Cl با پرتوزایی ۷۹۱ Bq و مد غالب گسیل پرتو بتا (با بیشینه انرژی ۷۱۰ keV)، پالس‌ها پدیدار می‌شوند. تصویر یک‌شکل موج نمونه در شکل ۶-الف و تصویر یک‌پالس منفرد نمونه نیز در شکل ۷-الف ارائه‌شده است.



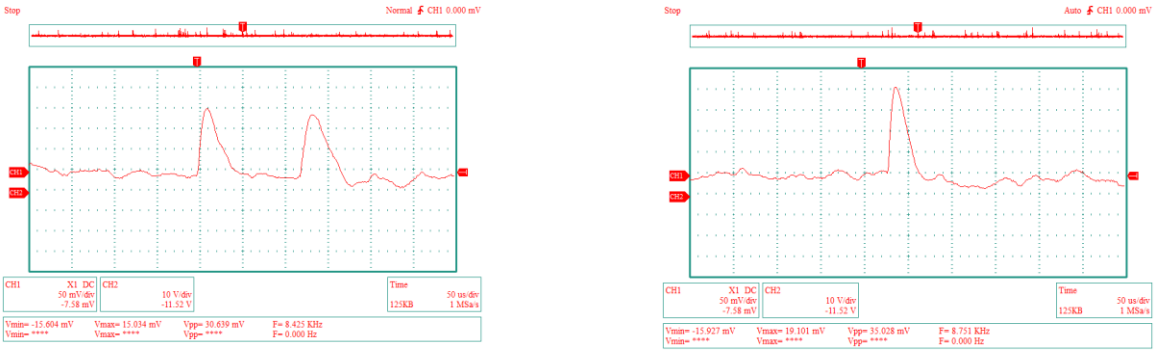
(ب) (الف)

شکل ۶. (الف) شکل موج خروجی کارت اسیلوسکوپ مدل InstruStar-ISDS205A، شامل پالس‌های ناشی از برخورد ذرات بتا با آشکارساز. (ب) سطح زمینه خروجی آشکارساز بدون قرار دادن چشمه.

درنهایت، متوسط نرخ شمارش ثبت‌شده برای یک چشمه در سه بار تکرار اندازه‌گیری برابر ۱±۱۹ به دست آمد. با توجه به سطح پرتوزایی ۷۹۱ Bq چشمه، می‌توان در نظر گرفت که این چشمه سطحی در هر ثانیه ۷۹۱ ذره بتا گسیل می‌کند. از طرفی چشمه سطحی دارای مساحت ۳/۱۴ cm^2 است و حسگر مساحت حساس ۷/۵ mm^2 دارد. لذا نرخ پرتوهای رسیده به آشکارساز از نسبت مساحت حسگر و چشمه به‌صورت زیر قابل‌محاسبه خواهد بود که با نرخ شمارش تجربی همخوانی بسیار خوبی دارد:

$$\frac{7.5 \times 0.01 cm^2}{3.14\ \ cm^2} \times 791 \approx 19 \frac{count}{s} \qquad (۲)$$

باید توجه داشت که آشکارساز طراحی‌شده می‌تواند به‌عنوان حسگر فوتون نیز استفاده شود. به‌منظور بررسی، یک چشمه پرتوگاما ^{137}Cs با پرتوزایی ۱۳۴ kBq نیز روبروی آشکارساز قرار داده شد. نمونه‌ای از دو پالس منفرد خروجی سیستم در این اندازه‌گیری، در شکل ۷-ب قابل‌رؤیت است.



شکل ۷. (الف) یک پالس منفرد خروجی از آشکارسازی ذرات بتای چشمه ^{36}Cl با ارتفاع حدود ۲۰۰ mV و پهنای ۵۰ µs. (ب) دو پالس منفرد خروجی از آشکارسازی فوتون‌های چشمه ^{137}Cs با ارتفاع حدود ۱۵۰ mV.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه نرخ پرتوهای رسیده به آشکارساز (محاسبه‌شده در رابطه ۲) و نرخ شمارش تجربی ثبت‌شده (۱±۱۹) یکسان هستند، لذا بازده ذاتی آشکارساز که عبارت است از نسبت شمارش‌های ثبت‌شده به تعداد پرتوهای رسیده به آشکارساز، برابر ٪۱۰۰ محاسبه می‌شود. بازده مطلق آشکارسازی نیز که عبارت است از نسبت شمارش پرتوهای ثبت‌شده به‌کل پرتوهای گسیل‌شده از چشمه، برابر ٪۲/۴ محاسبه می‌شود. برای افزایش بازده مطلق آشکارسازی می‌توان تعداد بیشتری فوتودیود را باهم موازی کرده و در معرض چشمه قرار داد. همچنین با توجه به سازوکارهای متفاوت برهمکنش پرتوگاما (عمدتاً پراکندگی کامپتون با لایه‌نازک سیلیکون یا اساساً بدون برهمکنش)، انتظار می‌رود نرخ برهمکنش ثبت‌شده و ارتفاع پالس‌های آشکارسازی گاما نسبت به بتا به‌طورکلی کمتر باشد که در اندازه‌گیری‌های تجربی نیز این مهم مشاهده گردید.

درمجموع، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش، ساخت شمارنده‌های پرتو با استفاده از حسگرهای نیمه‌هادی در دسترس، پیشنهاد مناسبی برای اندازه‌گیری‌های ذرات بتا و فوتون‌ها به نظر می‌رسد. کم‌هزینه بودن، قابلیت حمل، مصرف باتری کم، امکان ساخت در ابعاد کوچک و استحکام حسگر مورداستفاده، از مزایای قابل‌توجه این سیستم‌ها محسوب می‌شوند. در مطالعات آینده، کالیبراسیون این آشکارساز برای بررسی امکان دوزیمتری پرتوها با سیستم طراحی‌شده نیز در دستور کار قرار دارد.

۵. مراجع

1. G. F Knoll, (2010). Radiation detection and measurement. John Wiley & Sons.
2. O. Keller, M. Benoit, A. Müller, & S. Schmeling, (2019). Smartphone and tablet-based sensing of environmental radioactivity: Mobile low-cost measurements for monitoring, citizen science, and educational purposes. Sensors, 19(19), 4264.
3. C. Bueno, J. Gonçalves, & M. Santos, (1996). The performance of low-cost commercial photodiodes for charged particle and X-ray spectrometry. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 371(3), 460-464.
4. M. Nazififard, K. Suh, & A. Mahmoudieh, (2016). Experimental analysis of a novel and low-cost pin photodiode dosimetry system for diagnostic radiology. Review of Scientific Instruments, 87(7), 073502.

۵. ثابتان، بهاره، (۱۳۹۳). طراحی و پیاده‌سازی سیستم پایش رادون با استفاده از فتودیود BPW34 و ارسال اطلاعات پایش از طریق سیستمGSM. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، (In Persian).

6. CERN DIY Particle detector, (2022). PhysicsOpenLab, Accessed June 13, 2022:
1. https://physicsopenlab.org/2020/06/15/cern-diy-particle-detector/
7. B. Kainka, (2011). Measure gamma rays with a photodiode. Radiation detector using a BPW34. Elektor Magazine, (6), 22-26.