

## بررسی رفتار الکترونیکی یک مدار دیودی در معرض تابش برای آشکارسازی پرتوهای گاما

احمد رمضانی مقدم<sup>۱</sup> و محمد نظیفی فرد<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده فیزیک، دانشگاه کاشان، کاشان، اصفهان، ایران.

<sup>۲</sup> پژوهشکده انرژی، دانشگاه کاشان، کاشان، اصفهان، ایران.

\* اصفهان، کاشان، بلوار قطب راوندی، دانشگاه کاشان، پژوهشکده انرژی، کدپستی: ۸۷۳۱۷-۵۱۱۶۷

پست الکترونیکی: nazifi@kashanu.ac.ir

### چکیده

پرتوهای یون‌ساز می‌توانند آثار دائمی یا موقت بر عملکرد مدارهای الکترونیکی داشته باشند. آثار موقت که در حین تابش‌دهی ظاهر شوند، می‌توان به‌عنوان نشانه‌ای از وجود پرتو یون‌ساز در محیط دانست که برای آشکارسازی پرتو یون‌ساز مفید هستند. در این مطالعه، اثر فوتون‌های گاما بر جریان معکوس دیود در حالت بایاس معکوس و مقایسه آن با همان جریان در حالت بدون تابش مورد بررسی قرار گرفت تا از این طریق، امکان به‌کارگیری پیوند دیودی برای مصارف آشکارسازی بررسی شود. در مدار دیودی از یک دیود N4001 به‌صورت سری با یک مقاومت بزرگ استفاده شده است. برای تأمین پتانسیل خارجی مدار دیودی از یک منبع تغذیه ولتاژ مستقیم گردید. برای اندازه‌گیری جریان اشباع معکوس و تغییرات جریان ناشی از تابش پرتو گاما، ولتاژ در دو سر مقاومت اندازه‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهند که یک مدار ساده دیودی تحت تأثیر تابش گاما دارای اختلاف معناداری در جریان اشباع معکوس خود، نسبت به حالت بدون تابش است؛ بنابراین، می‌توان تغییرات مشاهده‌شده در جریان اشباع معکوس را در گام ساده اول، به‌عنوان علامت وجود پرتو گاما در محیط در نظر گرفت.

**کلیدواژگان:** مدار دیودی، پرتوهای گاما، کبالت ۶۰، سزیم ۱۳۷، آشکارسازی پرتو یون‌ساز.

### ۱. مقدمه

الکترونیکی در راکتورهای هسته‌ای و همچنین شتاب‌دهنده‌ها است. همچنین پس از آنکه مدارهای الکترونیکی در ماهواره‌های فضایی نیز به‌کار رفته شدند، آثار تابش‌های کیهانی بر عملکرد و همچنین ساختار اجزای الکترونیکی مشاهده شد. با توجه به اهمیت مطالعه اثر تابش‌های یون‌ساز و غیر یون‌ساز بر روی عناصر الکترونیکی، مطالعه‌های گسترده‌ای توسط کشورهای مختلف در این زمینه آغاز شده است؛ البته با توجه به تنوع بالای ادوات و مدارهای الکترونیکی و همچنین تنوع در سازوکار پرتو با مواد مختلف، تحقیقات در این زمینه در مراحل ابتدایی خود است [۳ و ۴]. به‌طور کلی، با توجه به

تأثیرات پرتوهای یون‌ساز بر عملکرد مدارهای الکترونیکی برای اولین بار، هم‌زمان با آزمایش‌های بمب هسته‌ای در سال ۱۹۵۴ کشف شد. اختلال در عملکرد مدارهای الکترونیکی و همچنین تغییر شکل و اعوجاج سیگنال‌های الکترونیکی تولیدشده در دستگاه‌های اندازه‌گیری الکترونیکی به‌کار رفته در این آزمایش‌های اتمی، از اولین آثار تابش‌های مشاهده‌شده پرتوهای هسته‌ای بر مدارهای الکترونیکی بوده است [۱-۳]. از موارد دیگر اثر پرتوهای یون‌ساز بر مدارهای الکترونیکی که می‌توان به آن اشاره کرد، رفتار مدارها و حسگرهای

میزان انرژی و نوع پرتو یونساز، پدیده‌های فیزیکی متفاوتی در رابطه با عناصر الکترونیکی قابل مشاهده است. برخورد پرتوهای یونساز با عناصر الکترونیکی ممکن است منجر به ایجاد آثار موقتی، از جمله تغییرات جریان مستقیم یا معکوس در پیوند الکترونیکی گردد یا اینکه منجر به تغییر دائمی خواص فیزیکی و الکترونیکی عنصر نیمه‌هادی شود [۵ و ۶]. در این مطالعه، به بررسی آثار موقت ناشی از تابش پرتوهای گاما پرداخته شده تا بتوان از آن به‌عنوان روشی برای آشکارسازی پرتوهای یونساز استفاده کرد. در این مطالعه، آثار تابش پرتوهای گامای ساطع شده از چشمه‌های کبالت -۶۰ و سزیم -۱۳۷ بر رفتار دیود در حالت بایاس معکوس، بررسی شد.

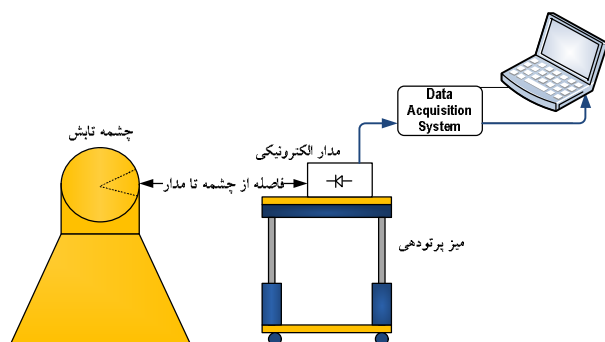
## ۲. روش انجام کار

### ۲-۱. طراحی و پیاده‌سازی مدار الکترونیکی به‌منظور بررسی

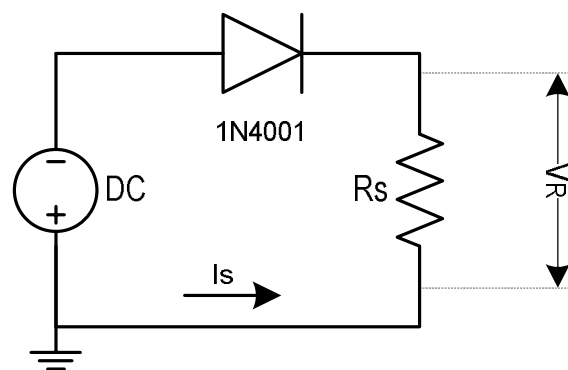
#### اثر تابش گاما

ابتدا مدار دیودی مناسب طراحی و پیاده‌سازی شد. دیود یکی از عناصر الکترونیکی پایه و پرکاربرد در میان ادوات الکترونیکی است که از اتصال دو نوع نیمه‌هادی از نوع  $n$  و  $p$  تشکیل می‌شود. از لحاظ الکترونیکی، یک دیود هنگامی جریان را از خود عبور می‌دهد که ولتاژ آستانه در جهت مستقیم دو سر آن اعمال شده باشد. در دیودهای سیلیکون ولتاژ آستانه - مقدار ولتاژی که باعث می‌شود تا دیود شروع به هدایت جریان الکترونیکی کند، حدود  $0.6$  تا  $0.7$  ولت است [۳]. دیود در بایاس معکوس، جریان بسیار کمی از خود عبور می‌دهد که به جریان نشستی معروف است و در حدود چند میکرو آمپر یا حتی کمتر است. پارامترهای مختلفی جهت بررسی اثر تابش پرتوهای یونساز بر دیود قابل بررسی هستند که شامل پارامترهایی نظیر افت ولتاژ دیود در بایاس مستقیم (ولتاژ درگاهی یا ولتاژ شروع هدایت)، حداکثر جریان در بایاس

مستقیم، ولتاژ شکست معکوس، جریان نشستی در بایاس معکوس و سرعت قطع و وصل دیود است [۴-۶]. در این پژوهش، به بررسی تجربی اثر فوتون‌های گاما بر جریان عبوری از دیود در حالت بایاس معکوس و مقایسه آن با جریان اشباع معکوس در حالت بدون تابش (قبل و بعد از تابش) پرداخته می‌شود تا از این طریق، امکان به‌کارگیری پیوند دیودی برای مصارف دزیمتری بررسی شود. برای این منظور، مطابق شکل (۱)، از یک دیود N4001 به‌صورت سری با یک مقاومت استفاده شده است. برای تأمین پتانسیل خارجی مدار دیودی از یک منبع تغذیه ولتاژ مستقیم گردید. برای اندازه‌گیری جریان دیود در حالت بایاس معکوس و تغییرات ناشی از تابش پرتو گاما، ولتاژ در دو سر مقاومت اندازه‌گیری شد که براساس قانون اهم، به جریان عبوری از دیود مرتبط است. از آنجاکه امکان حضور در اتاق پرتودهی وجود ندارد، مقادیر اندازه‌گیری شده توسط یک ثبات در حین پرتودهی ذخیره شد. مدار الکترونیکی پس از پیاده‌سازی، ابتدا مورد تست و ارزیابی قرار گرفت و پارامترهای مختلف، از جمله مقدار جریان اشباع معکوس در محیطی با دمای ثابت اندازه‌گیری شد. سپس در شرایط کاری مشابه، مطابق شکل (۲)، مدار الکترونیکی در معرض پرتودهی قرار داده شد و پارامترهای ذکر شده حین پرتودهی مدار، به‌صورت هم‌زمان با پرتودهی اندازه‌گیری شد و با مقادیر آن در حالت عادی مقایسه گردید. شایان ذکر است ولتاژ دو سر مقاومت  $R_s$  به‌عنوان متغیر وابسته به دز، با استفاده از یک اسیلوسکوپ حافظه‌دار اندازه‌گیری شد و مقدار مؤثر ولتاژ در حالت قبل و در حین تابش دهی با یکدیگر مقایسه گردید. ثبت داده‌ها برای تجزیه و تحلیل توسط یک ثبات داده‌ها انجام پذیرفته است.



شکل ۲: شماتیک سیستم پرتودهی مورد استفاده



شکل ۱: شماتیک مدار دیودی برای انجام آزمایش‌های پرتودهی

### ۲-۲. سیستم پرتودهی

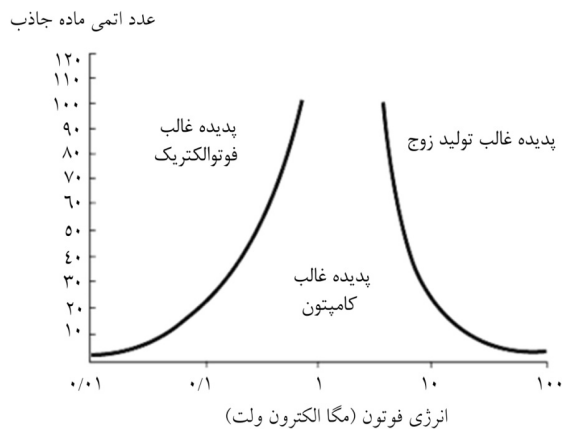
به منظور پرتودهی، از چشمه‌های کبالت  $^{60}\text{Co}$  و سزیم  $^{137}\text{Cs}$  مستقر در واحد پرتودهی دانشگاه کاشان استفاده شد. چشمه کبالت مورد استفاده در آزمایش‌های پرتودهی آهنگ دزی معادل  $222 \mu\text{G/h}$  در فاصله  $50 \text{ cm}$  دارد و پرتوهای گامایی با انرژی‌های  $1/117 \text{ MeV}$  و  $1/133 \text{ MeV}$  از خود ساطع می‌کند. چشمه سزیم نیز آهنگ دزی معادل  $293 \mu\text{G/h}$  در فاصله  $50 \text{ cm}$  دارد که پرتوهای گامایی با انرژی  $662 \text{ KeV}$  از خود ساطع می‌کند. به منظور پرتودهی نمونه، مطابق شکل (۲) مدار الکترونیکی بر روی میز پرتودهی و در کمترین فاصله از چشمه قرار گرفت تا دیود حداکثر دز ممکن را از چشمه‌ها دریافت کند. مدت زمان تابش با استفاده از زمان‌سنج سیستم پرتودهی تنظیم شد و تمامی نمونه‌ها در مدت زمان و شرایط محیطی یکسان، مورد تابش قرار گرفتند. لازم است ذکر شود برای یافتن میدان پرتو، از یک چراغ لیزر که درون کالیماطور چشمه قرار گرفته بود، استفاده شد. با روشن شدن این چراغ، پنج چشمه لیزری، محدوده پرتودهی چشمه را مشخص می‌کنند. گفتنی است پرتودهی نمونه‌ها برای هر چشمه به صورت جداگانه انجام گرفت.

### ۳. نتایج و بحث

میزان حداکثر تغییرات جریان اشباع معکوس (مقدار مؤثر جریان) در ولتاژ بایاس  $30 \text{ V}$  و مقاومت  $R_s$  برابر  $5 \text{ M}\Omega$  که در جدول (۱) نمایش داده شده است. به طور کلی، فوتون‌های یون‌ساز پس از برخورد با عناصر نیمه‌هادی می‌توانند دو اثر مختلف بر روی آن داشته باشند که شامل اثر یونیزاسیون و تخریب ناشی از جابجایی است؛ بنابراین، تابش‌های یون‌ساز می‌تواند منجر به تغییر خواص الکترونیکی یا تغییر در عملکرد مداری این عناصر شوند. با توجه به انرژی پرتو ساطع شده رخداد پدیده‌های مختلف شامل اثر فوتوالکتریک، اثر کامپتون و همچنین تولید زوج محتمل است. در واقع، هنگامی که باریکه‌ای تک‌فام از پرتوهای گاما از یک محیط عبور می‌کند، تعدادی از فوتون‌های باریکه در محیط دستخوش برهم‌کنش می‌شوند که طی آن، تمام یا بخشی از انرژی خود را به محیط تحت تابش منتقل می‌کنند. برهم‌کنش‌های مذکور باعث یک کاهش نمایی در شدت پرتوها هنگام عبور از ماده می‌شوند.

در پدیده فوتوالکتریک فوتون تمام انرژی خود را در محیط از دست می‌دهد و باعث کنده شدن الکترون مقید محیط می‌شود که آن را فوتوالکتریک می‌نامند. بخش عمده انرژی منتقل شده از فوتون به شکل انرژی جنبشی فوتوالکتریک‌های تولیدی ظاهر می‌شود. احتمال انجام این پدیده به شدت به انرژی فوتون و

در باره فوتون‌های مورد بحث در این مقاله، می‌تواند از مرتبه چند کیلو الکترون ولت باشد. فوتون‌های جدید که انرژی کمتری از انرژی فوتون‌های اولیه دارند، به نوبه خود می‌توانند پدیده فوتوالکتریک را در محیط نیمه‌رسانا به راه اندازند. این عمل موجب جدایی الکترون از قید اتم می‌شود و به دلیل داشتن انرژی جنبشی، میزان رسانش محیط را افزایش می‌دهد [۲-۴].



شکل ۳: وابستگی احتمال انجام پدیده‌های فوتوالکتریک، اثر کامپتون و همچنین تولید زوج به انرژی فوتون‌های فرودی و همچنین عدد اتمی ماده تحت تابش

همان‌طور که در جدول (۲) دیده می‌شود، انرژی لازم برای جدا کردن الکترون از نیمه‌هادی از مرتبه چند الکترون ولت است؛ بنابراین، فوتون‌هایی با انرژی بسیار زیاد، مانند تابش ایکس و گاما، (از مرتبه چند مگا الکترون ولت) در مقایسه با انرژی پیوند الکترون‌های لایه آخر، قادر به تولید حامل بار در نیمه‌رسانا می‌شوند که حاصل پدیده‌های کامپتون و فوتوالکتریک است. تابش فوتون‌هایی با انرژی بیشتر از مقدار شکاف انرژی ماده می‌تواند توسط اتم‌های شبکه نیمه‌هادی در ناحیه تخلیه جذب شود و منجر به آزاد شدن یک زوج الکترون-حفره گردد که پس از تولید به سرعت توسط میدان خارجی از هم تفکیک می‌شوند و فرصت بازترکیب را نمی‌یابند. در بایاس مستقیم زوج آزاد شده نسبت به چگالی

همچنین عدد اتمی محیط تحت تابش بستگی دارد. در پدیده کامپتون، فوتون‌ها در برخورد با الکترون‌های نسبتاً آزاد محیط تحت تابش، بخشی از انرژی خود را به الکترون منتقل می‌کنند. احتمال انجام این پدیده به صورت ضعیفی به انرژی فوتون و همچنین عدد اتمی محیط تحت تابش بستگی دارد. پدیده تولید زوج که در آن یک فوتون هنگام عبور از کنار یک هسته سنگین نابود شده و یک زوج الکترون-پوزیترون به وجود آورده، برای پرتوهای گامای با انرژی بیش از  $1.02 \text{ MeV}$  و برای محیط‌های شامل اتم‌های سنگین اهمیت پیدا می‌کند.

جدول ۱: میزان حداکثر تغییرات جریان اشباع معکوس (میکرو آمپر)

قبل و حین پرتودهی

نوع چشمه تابشی	سزیم ۱۳۷	کیالت ۶۰
جریان اشباع معکوس قبل از تابش دهی $\mu\text{A}$	$3/15 \pm 0/47$	$3/20 \pm 0/48$
جریان اشباع معکوس در حین تابش دهی $\mu\text{A}$	$3/41 \pm 0/51$	$3/43 \pm 0/52$
میزان افزایش جریان اشباع معکوس $\mu\text{A}$	$7/8/25$	$7/7/10$

شکل (۳) وابستگی احتمال انجام پدیده‌های فوتوالکتریک، اثر کامپتون و همچنین تولید زوج به انرژی فوتون‌های فرودی و همچنین عدد اتمی ماده تحت تابش بستگی را نشان می‌دهد. در مورد آزمایش انجام پذیرفته در این مقاله، با توجه به انرژی فوتون‌های گاما که از مرتبه  $1 \text{ MeV}$  هستند و با در نظر گرفتن عدد اتمی ماده تحت پرتودهی، پدیده غالب در برهم‌کنش گاما با ماده از نوع پدیده کامپتون است. در این پدیده، فوتون‌ها در برخورد با الکترون‌های آزاد محیط نیمه‌رسانا، بخشی از انرژی خود را به الکترون منتقل می‌کنند و فوتون جدیدی با انرژی کمتر از انرژی اولیه تولید می‌شود. انرژی منتقل شده به الکترون

که تابش یون ساز هنگام عبور از یک محیط نیمه‌رسانا می‌تواند حامل‌های آزاد ایجاد کند و ناحیه تهی در اتصال p-n تحت تأثیر این حامل‌ها قرار گیرد؛ به‌گونه‌ای که هدایت الکتریکی دیود افزایش یابد؛ بنابراین، افزایش جریان اشباع معکوس مشاهده شده ناشی از حامل‌های آزاد ایجاد شده در محیط نیمه‌رسانا است. با توجه به انرژی فوتون‌های گامایی و همچنین پایین بودن عدد اتمی نیمه‌رسانای مورد استفاده در این آزمایش، ایجاد حامل‌های مذکور بر اثر رخداد پدیده‌های کامپتون و فوتوالکتریک است. تغییر جریان معکوس اشباع مشاهده شده در حدود ۸ درصد است که به کمک یک مدار تقویت کننده به راحتی قابل تبدیل به پالس خروجی به شکل‌های متفاوت مانند جریان الکتریکی، نور یا صدا است؛ پس می‌توان نتیجه گرفت که با طراحی یک مدار الکترونیکی مناسب، امکان ساخت یک آشکارساز حساس نسبت به پرتو گامای بسیار ارزان قیمت و قابل دسترس فراهم است.

### سپاسگزاری

نویسندگان از حمایت‌های پژوهشکده انرژی دانشگاه کاشان و همچنین دانشکده فیزیک دانشگاه کاشان تشکر و قدردانی می‌کنند.

- [1] Chee, Fuei Pien, Abdul Amir, F. Haider, Saafie Salleh, and Azali Muhammad. "Effects of total ionizing dose on bipolar junction transistor." *American Journal of Applied Sciences* 7, no. 6 (2010): 807-810.
- [2] Johnston, A. H., G. M. Swift, and B. G. Rax. "Total dose effects in conventional bipolar transistors and linear integrated circuits." *Nuclear Science, IEEE Transactions on* 41, no. 6 (1994): 2427-2436.
- [3] Pease, R. L. "Total ionizing dose effects in bipolar devices and circuits." *Nuclear Science, IEEE Transactions on* 50, no. 3 (2003): 539-551.

جریان بسیار ناچیز و به‌سادگی قابل نظر هستند. در بایاس معکوس تنها جریان موجود جریان اقلیت ناشی از تونل‌زنی است که مقدار بسیار اندکی دارد؛ بنابراین، آزاد شدن زوج‌های الکترون-حفره در جریان کلی می‌تواند تأثیرگذار و قابل اندازه‌گیری باشد.

جدول ۲: شکاف انرژی در چند نیمه‌هادی پر مصرف [۳]

انرژی شکاف (بر حسب الکترون ولت)		نوع ماده
صفر کلون	۳۰۰ کلون	
۱/۱۷	۱/۱۱	Si
۰/۷۴	۰/۶۶	Ge
۱/۴۲	۱/۲۷	InP
۱/۵۲	۱/۴۳	GaAs

### ۴. نتیجه‌گیری

تأثیرات موقت تابش گاما بر رفتار مدار الکترونیکی ساده شامل دیود به صورت تغییر در جریان عبوری از دیود در حالت بایاس معکوس معکوس ظاهر می‌شود. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد

### ۵. مراجع

- [4] Schmidt, D. M., A. Wu, R. D. Schimpf, D. M. Fleetwood, and R. L. Pease. "Modeling ionizing radiation induced gain degradation of the lateral PNP bipolar junction transistor." *Nuclear Science, IEEE Transactions on* 43, no. 6 (1996): 3032-3039.
- [5] Li, Xingji, Hongbin Geng, Chaoming Liu, Zhiming Zhao, Dezhuang Yang, and Shiyu He. "Combined radiation effects of protons and electrons on NPN transistors." *Nuclear Science, IEEE Transactions on* 57, no. 2 (2010): 831-836.
- [6] Liu, Chaoming, Xingji Li, Hongbin Geng, Zhiming Zhao, Dezhuang Yang, and Shiyu He. "Radiation

effects on bipolar junction transistors induced by 25MeV carbon ions." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A:

Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 624, no. 3 (2010): 671-674.