



## شبیه‌سازی عملکرد حسگر کم‌بهره بهمنی در آشکارسازی اشعه ایکس

محمد دانسی، محمد باقر فتحی\*

گروه ماده چگال، دانشکده فیزیک، دانشگاه خوارزمی، صندوق پستی: ۳۷۵۵۱-۳۱۹۷۹، تهران - ایران

\*Email: fathi@khu.ac.ir

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۹/۲۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱/۱۹

### چکیده

در ارتقاء آشکارسازهای کارآمد برای آشکارسازی اشعه ایکس در تصویربرداری، تفکیک انرژی و اتلاف زمانی و هزینه ساخت از جمله ویژگی‌هایی است که ما را به طراحی آشکارساز نیمه‌هادی سوق می‌دهد. دیود با بهره داخلی کم (LGAD) با داشتن تقویت‌کنندگی داخلی این امکان را می‌دهد که در میدان کافی، فرایند تکثیر داخلی را با شتاب دادن به حامل‌ها، انرژی لازم برای یونیزاسیون و تولید حامل‌های ثانویه برای تولید بهره بهتر (نسبت سیگنال به نویز بیشتر) و همچنین بازده زمانی بیشتر (در محدوده نانوثانیه) فراهم کند. در این مقاله، آشکارساز سیلیکونی LGAD را با نرم‌افزار سیلوآکو با اعمال ولتاژ بایاس معکوس و تابش در محدوده نور مرئی تا اشعه ایکس شبیه‌سازی کردیم. در این شبیه‌سازی، روش نیوتن و گامبل به کار رفت؛ در روش نیوتن، یکی از سازوکارهای برهم‌کنش اشعه با ماده را متغیر و باقی آن‌ها را ثابت در نظر می‌گیرند ولی در روش گامبل، تمامی سازوکارها به‌طور هم‌زمان حل می‌شود. در بازه طول موج در محدوده اشعه ایکس، جریان الکترونی در این آشکارساز از مرتبه  $10^{-4}$  آمپر است و با افزایش انرژی این جریان کاهش می‌یابد. جریان تاریک از مرتبه  $10^{-6}$  آمپر است. با اعمال نور مرئی با طول موج  $0.45$  میکرومتر و شدت  $1 \text{ V/cm}^2$ ، جریان آشکارساز در حدود  $6.5 \times 10^{-4}$  آمپر به دست آمد. به ازای طول موج اشعه ایکس  $1.0 \times 10^{-5}$  میکرومتر و شدت  $108 \text{ V/cm}^2$ ، جریان آشکارساز  $3.5 \times 10^{-4}$  آمپر به دست آمد. با توجه به زمان پاسخ سریع این آشکارساز و جریان در محدوده میکروآمپر، آشکارساز مزبور گزینه مناسبی برای آشکارسازی اشعه ایکس است. همچنین این آشکارساز عملکرد خوبی در محدوده نور مرئی نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: اشعه ایکس، تصویربرداری، آشکارساز، حسگر کم‌بهره بهمنی

## Simulation of avalanche low-gain sensor performance in X-ray detection

M. Dansi, M.B. Fathi\*

Condensed Matter Department, Faculty of Physics, Kharazmi University, P.O.Box: 31979-37551, Tehran - Iran

Research Article

Received 19.12.2022, Accepted 8.4.2023

### Abstract

X-ray applications in imaging and beyond require efficient and optimal detectors. Energy separation, time loss, and manufacturing cost are among the features that led us to design a semiconductor detector. A low-gain avalanche diode (LGAD) with internal amplification allows, in a sufficient field, the internal propagation process by accelerating the carriers, the energy required for ionization, and the generation of secondary carriers to produce a better gain (higher signal-to-noise ratio) and also provide more time efficiency (in the range of nanoseconds). In this article, we simulate the LGAD silicon detector with Silvaco software by applying reverse bias voltage and radiation in the range of visible light to X-ray. Newton and Gummel's methods were used. In Newton's method, one of the mechanisms of radiation interaction with matter is considered variable and the rest are fixed. However, in Gummel's method, all mechanisms are solved simultaneously. In the X-ray wavelength range, the electron current in this detector is 10-4 amperes, and this current decreases with increasing energy. The dark current is 10-6 amperes. By applying visible light with 0.45-micrometer wavelength and  $1 \text{ V/cm}^2$  intensity, the detector current was obtained about  $6.5 \times 10^{-4}$  amperes. For  $1.0 \times 10^{-5}$  x-ray wavelength and  $108 \text{ V/cm}^2$  intensity, detector current was obtained about  $3.5 \times 10^{-4}$  amperes. Considering the quick response time of this detector and the current in the range of microamps, this detector is a suitable option for X-ray detection. Also, this detector shows superior performance in the visible light range.

**Keywords:** X-ray, Radiography, Detector, Low gain avalanche sensor

Journal of Nuclear Science and Technology

Vol. 45 (2), Serial Number 107, 2024, P 37-45

مجله علوم و فنون هسته‌ای

دوره ۴۵، شماره ۱، جلد ۱۰۷، بهار ۱۴۰۳، ص ۳۷-۴۵



## ۱. مقدمه

نیاز به قدرت تفکیک انرژی بسیار بالا، پاسخ خطی در گستره وسیعی از انرژی، تنوع در هندسه ساخت و زمان سریع، از جمله ویژگی‌هایی است که آشکارساز اشعه ایکس را منحصربه‌فرد می‌کند. در این بین، آشکارسازهای نیمه‌هادی امکان تشخیص عالی را در موقعیت و با انرژی و وضوح زمانی، اغلب به صورت ترکیبی، فراهم می‌کند. سیلیکون و ژرمانیم از نیمه‌هادی‌های پرکاربرد در آشکارسازی اشعه ایکس هستند [۱، ۲]. سیلیکون ( $Z=14, A=28$ ) یک نیمه‌هادی با رسانندگی  $10^2$  اهم‌متر و پهنای نوار  $1.12 \text{ eV}$  که انرژی مورد نیاز برای ایجاد یک جفت یون الکترون در آن،  $2.6 \text{ eV}$  است. ویژگی مهم دیگر سیلیکون، تحرک زیاد حامل‌های بار است که امکان جمع‌آوری سریع بار را فراهم می‌کند [۳]. در نیمه‌هادی دیویدهای سیلیکونی تاکنون بهترین عملکرد را در آشکارسازی اشعه ایکس داشته‌اند. آشکارسازهای سیلیکونی دارای لایه‌های فعال در حدود  $100$  تا  $300$  میکرومتر ضخامت، سیگنال‌های بزرگ و سریع (در حد نانوثانیه) را تولید می‌کنند. اشعه ایکس در آشکارسازهای نیمه‌هادی بایاس معکوس در ناحیه تخلیه متوقف می‌شود و جفت الکترون-حفره تولید شده توسط میدان تخلیه از هم جدا می‌شود و الکترون‌ها به ورودی تقویت‌کننده کم‌نویز هدایت می‌شود [۴]. آشکارسازها معمولاً از ساختار نامتقارن استفاده می‌کنند، برای مثال، از الکتروند  $p$  بسیار آلیبده و ناحیه  $n$  کم آلیبده، یا بالعکس، گسترش می‌یابد، به طوری که منطقه تخلیه عمدتاً به حجم توده‌ای که کمی آلیبده شده است [۵].

با توجه به اهمیت زمان سریع بودن آشکارساز، برای زمان‌بندی دقیق (کم‌تر از  $100 \text{ ps}$ ) افزایش شدید سیگنال به نوبه کم ضروری است. آشکارسازهای نازک با میدان‌های الکتریکی شدید و زمان‌های افزایش تقویت‌کننده کوتاه برای رسیدن به زمان‌های جمع‌آوری کوتاه مورد نیاز و تقویت سریع، ضروری هستند [۶].

در حسگر دیودی معمولاً لایه  $N$  به‌عنوان لایه مُرده در نظر گرفته می‌شود. این لایه که به پتانسیل زمین وصل است، به عنوان پنجره ورودی دیود تلقی می‌شود. لایه  $P$  به یک پتانسیل منفی بایاس می‌شود [۷].

در سیلیکون در دمای اتاق، انرژی لازم برای تولید جفت الکترون و حفره  $\omega=3.62 \text{ eV}$  است [۸]. برای تقویت جریان در حسگر دیودی از ایجاد یک تقویت داخلی در حسگر استفاده می‌کنند [۹، ۱۰].

طرح مفهومی LGAD را اولین بار مرکز ملی میکروالکترونیک<sup>۱</sup> با هدف ایجاد حسگرهایی ارائه کرد، که قادر به حفظ عملکرد خود در هنگام تابش شدید باشند. در LGADها با استفاده از یک لایه بهره یک میدان الکتریکی بالایی در ناحیه محدود در داخل حسگر ایجاد می‌کند. این تقویت میدان امکان تولید بهمینی الکترون را فراهم می‌کند [۱۱].

سازوکار تکثیر که در لایه بهره آن‌ها اتفاق می‌افتد، توسط چگالی ناخالصی‌ها تنظیم می‌شود و سازوکارهای بهمینی را به یک منطقه محلی در بستر محدود می‌کند. هندسه‌های الکتروند مسطح که شامل یک ساختار تقویت با بهره کم کاشته شده در سمت الکتروند بالا یا پایین برای به حداکثر رساندن نواخت پراکندگی ( $dS/dt$ )، با "سیگنال"  $S$ ، برای مثال جریان القایی یا ولتاژ، در LGADها به کار می‌رود. الکترون‌های تولید شده از ذرات عبوری یونیزه‌کننده در میدان قوی به سمت لایه تقویت‌کننده در نزدیکی الکتروند بالایی شتاب می‌گیرند، جایی که تعداد زیادی جفت الکترون-حفره ایجاد می‌کنند. آن‌ها سیگنال بسیار سریع و بزرگ را القا می‌کنند که عمدتاً توسط حرکت حفره‌ها به دور از لایه تقویت محدود می‌شود. بهره تقویت بسیار کوچک، سهم نوبه اضافی را به حداقل رسانده و از ایجاد بهمین‌های ناشی از حفره که در جهت مخالف بهمین‌های الکترونی حرکت می‌کنند، جلوگیری می‌کند.

الکترون‌های اولیه که به سمت الکتروند  $n^{++}$  حرکت می‌کنند، از لایه بهره عبور کرده و جفت‌های الکترون-حفره اضافی تولید می‌کنند. الکترون‌های بهره به آسانی جذب کاتد می‌شوند در حالی که حفره‌های بهره به سمت آند حرکت می‌کنند و جریان زیادی تولید می‌کنند. بهره بطرز چشمگیری دامنه سیگنال را افزایش می‌دهد و نواخت حرکت بسیار بزرگ‌تری را تولید می‌کند.

مقدار جریان تولید شده توسط بهره  $G$  را می‌توان به این روش تخمین زد: (الف) در بازه زمانی معین  $dt$ ، تعداد الکترون‌هایی که وارد ناحیه بهره می‌شوند  $75U dt$  است (با فرض  $75$  جفت الکترون-حفره در هر میکرومتر) و (ب) این الکترون‌ها تعداد  $dN_{\text{gain}} v dt G$  جفت الکترون-حفره جدید تولید می‌کنند. جریان القا شده توسط این بارهای جدید از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$\frac{di_{\text{gain}}}{dt} = \frac{dN_{\text{gain}} q v_{\text{sat}} G}{dt} = \frac{75 q v_{\text{gain}} G}{d} dt \quad (1)$$



که به رابطه (۲) برای نواخت جریان می‌انجامد:

$$\frac{di_{\text{gain}}}{dt} = \frac{\gamma \Delta q v_{\text{gain}} G}{d} \quad (2)$$

این معادله ویژگی بسیار مهم آشکارساز سیلیکونی فوق سریع را نشان می‌دهد: افزایش نواخت جریان به دلیل سازوکار بهره، متناسب با نسبت مقدار بهره بر ضخامت حسگر است، بنابراین آشکارسازهای نازک با بهره عالی، بهترین وضوح زمانی را ارائه می‌دهند.

بهره  $G$  برای الکترون‌ها با فاصله  $x$  که توسط الکترون اولیه  $G = \exp(\alpha x)$  حرکت می‌کند، به‌طور نمایی افزایش می‌یابد، که  $\alpha$  ضریب یونیزاسیون الکترون است و به‌طور نمایی به میدان رانش در منطقه بهمین بستگی دارد. این فرایند با استفاده از تقویت‌کننده خارجی متفاوت است، که در آن تقویت به‌طور یکسان روی سیگنال و نویز بدون بهبود خالص کار می‌کند [۱۲]، بهره، وابستگی نمایی به میدان الکتریکی [۱۳].  $N(l) = N_0 e^{\alpha(E)l}$  دارد که در آن  $\alpha(E)$  تابعی قوی از میدان الکتریکی و  $l$  طول مسیر در داخل ناحیه میدان زیاد است [۱۰]. مقدار جریان تولیدشده توسط بهره  $G$  با رابطه (۳) بیان می‌شود [۱۴].

$$d \frac{di_{\text{gain}}}{dt} = \gamma \Delta q v_{\text{sat}} \frac{G}{d} \quad (3)$$

این معادله نشان می‌دهد که آشکارسازهای نازک با بهره عالی بهترین وضوح زمانی را ارائه می‌دهند [۱۵].

حسگرهای سیلیکونی استاندارد توانایی رسیدن به وضوح زمانی خوب را دارند، اما با توجه به سیگنال کوچک آن‌ها رسیدن به وضوح بهتر از  $\sigma_t \approx 80-100$  ps بسیار دشوار است. یکی از ویژگی‌های منطقه میدان قوی این است که زمان‌های جمع‌آوری بار بسیار سریع است و بنابراین می‌توان با آن‌ها در زمان‌های پردازش بسیار کوتاه و به دور از جریان نویز و در صورت لزوم با نواخت‌های بسیار زیاد کار کرد [۱۶].

برای حسگر LGAD، یافتن ولتاژ بایاس کاری مناسب برای وضوح زمان‌بندی خوب مهم است و از طرفی، بهره مناسب حسگر LGAD برای وضوح زمان‌بندی خوب مهم است. LGAD این امکان را می‌دهد که حسگرهای سیلیکونی تقسیم‌بندی شده با قابلیت‌های زمان‌بندی اضافی، به اصطلاح آشکارسازهای سیلیکونی فوق‌العاده سریع، با وضوح زمانی  $\sigma_t \sim 35$  ps طراحی شود [۱۷].

در این مقاله، یک نمونه از آشکارسازهای دیودی کم‌بهره به‌منی را که قبلاً اثبات شده است که در ناحیه نور مرئی عملکرد خوبی دارد، در ناحیه اشعه ایکس شبیه‌سازی می‌کنیم. ابتدا، آن را در ناحیه مرئی شبیه‌سازی می‌کنیم تا نتایج کارهای قبل را در [۱۷] تصدیق کرده، سپس عملکرد آن را در اشعه ایکس بررسی می‌کنیم. خواهیم دید که آشکارساز مزبور عملکرد فوق‌العاده‌ای در ناحیه اشعه ایکس دارد و از آن می‌توان برای تصویربرداری سریع در رادیولوژی و تصویربرداری از اشیاء نهفته در بافت‌ها با وضوح و کیفیت عالی بهره برد. نرم‌افزار به‌کاررفته در این تحقیق، TCAD است و کتابخانه‌های اطلس (ATLAS) و آتینا (ATENA) را برای شبیه‌سازی ابزار مذکور به کار گرفته‌ایم [۱۸].

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۲ هندسه و مواد

دیود LGAD در ابعاد مختلف و حتی ضخامت‌های مختلف قابل طراحی است. بسته به کاربرد آن در ضخامت‌های ۱۰ میکرومتر تا ۳۰۰ میکرومتر اجرا شده است [۱۹]. سیلیکون با توجه سرعت حرکت حامل بالای آن از لحاظ زمانی در آشکارساز زمان سریع گزینه مناسبی می‌باشد و از لحاظ ضخامت هر چه نازک‌تر باشد از لحاظ زمان سریع مناسب‌تر است. از طرفی، ضریب جذب رابطه مستقیم با ضخامت دارد. در آشکارسازی اشعه ایکس استفاده از طرح ۳۰۰ میکرومتر با توجه به ضریب جذب اشعه ایکس در سیلیکون مناسب می‌باشد. پهنای حسگر LGAD معمولاً در محدوده ۷ میلی‌متر است، که ناحیه حساس آن تقریباً ۵ میلی‌متر می‌باشد. البته در ابعاد دیگر هم طراحی می‌شود. معمولاً در ضخامت‌های کم از پهنای کم‌تر استفاده می‌شود که حتی در محدوده چند صد میکرومتری ولی به‌صورت پیوسته که با کانال‌های ایست (جداکننده) از هم جدا می‌شوند.

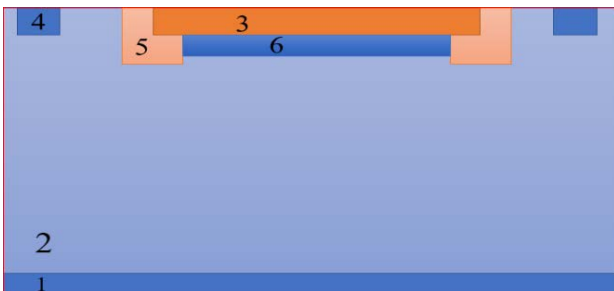
ماده پایه حسگر از سیلیکون تشکیل می‌شود. سیلیکون نوع  $n$  ترجیح دارد، زیرا با ولتاژ بایاس کم‌تری نسبت به سیلیکون نوع  $p$  تخلیه می‌شود. اما سیلیکون نوع  $p$  به دلیل مقرون به صرفه بودن تولید و سختی تابش بالا به دلیل جمع‌آوری الکترون در مناطق با میدان الکتریکی و وزنی بالا در الکترودهای قطعه‌بندی‌شده  $n+$ ، انتخاب آرجح برای حسگرهایی است که در محیط‌های پرتابش کار می‌کنند. در این مورد از نوع مدل  $n++$  و  $p+$  و  $p$  استفاده شد. بستر حسگر دوپ شده نوع  $p$  می‌باشد، که بستری با مقاومت حدودی  $10 \text{ k}\Omega$  با ناخالصی نوع  $p$  در حدود  $10^{12} \text{ (atom/cm}^3\text{)}$  است. برای ناخالصی از عناصر



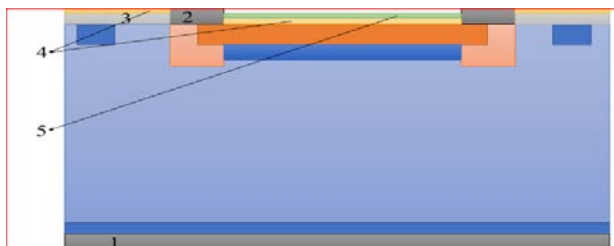
خطوط رخ ندهد یا این‌که نقاط انتهایی را با دز کم‌تر به‌صورت کانالی گسترش داد تا به عنوان بازویی برای کنترل خطوط میدان در آن نقاط عمل کند. با انتشار عمیق‌تر کانال نوع n با دز کم‌تر از انتشار محدوده الکتروند  $n^{++}$  (منطقه ۳) نقاط انتهایی گسترش می‌یابد که به یکنواختی بهتر توزیع میدان الکتریکی در اتصالی که با JTE ختم شده منجر می‌شود. بیشینه میدان الکتریکی در نقاط انتهایی کاتد به زیر مقدار بحرانی کاهش می‌یابد تا اثر یونیزاسیون ضربه‌ای ایجاد شود و از تکثیر در انتهای لبه حتی برای بالاترین بایاس ولتاژ جلوگیری شود. اگر لبه JTE با گسترش صفحه میدان از فلز الکتروند محافظت شود، ارتفاع بیشینه بیش‌تر کاهش می‌یابد.

منطقه ۶ (آبی پررنگ) به ضخامت ۴ میکرومتر ناخالصی نوع p به اندازه  $10^{18}$  (atom/cm<sup>3</sup>)؛ این منطقه که ویژگی اصلی این حسگر (حسگر با بهره کم: LGAD) می‌باشد برای ایجاد میدان قوی‌تر و به دست آوردن سود جریان برای جریانی بهتر تعبیه می‌شود. در واقع، اثر تکثیر بار در این ناحیه رخ می‌دهد. در این ناحیه با دز بالای ناخالصی، میدانی بزرگ ایجاد می‌شود. این ناحیه نقش تقویت‌کننده را در حسگر انجام می‌دهد.

از لایه آلومینیمی به عنوان الکتروند در این حسگر استفاده شد. در شکل ۲، مناطق الکتروند و لایه‌های محافظ مشخص شده است.



شکل ۱. رنگ‌بندی حسگر بر اساس ناخالصی اعمال شده رنگ‌های آبی بیانگر ناخالصی نوع p (بور) می‌باشد و رنگ‌های قرمز هم بیانگر ناخالصی نوع n (فسفر).



شکل ۲. نمای دوبعدی حسگر همراه با لایه محافظ و الکترونها.

بور و فسفر به ترتیب برای ناخالصی نوع n و p استفاده شد. از آلومینیم به‌عنوان الکتروند استفاده شد و از اکسید سیلیکون و نیتريد سیلیکون هم به عنوان محافظ پنجره در مقابل تابش اشعه بهره برده شد تا از حسگر در مقابل گرمای تابش حفاظت کند [۱۵]. میدان در راستای طول (ضخامت) اهمیت دارد (میدان رانشی)، بنابراین با ابعاد کوچک‌تر و با حفظ ضخامت آن شبیه‌سازی شد. برای ایجاد ناحیه مناسب برای تولید الکترون-حفره باید یک میدان قوی هم برای تولید و هم برای هدایت حامل بار به سمت آند باید صورت بگیرد. برای این کار از ولتاژ بایاس معکوس استفاده شد.

شکل ۱ زیر طرحی از حسگر مورد نظر را نشان می‌دهد. با توجه به این‌که از حسگر با بهره داخلی کم استفاده شده نحوه ناخالصی اعمال شده با یک پدیودی p-i-n فرق دارد.

ناخالصی‌های اعمال شده با توجه به شکل ۱ عبارت است از:

- منطقه ۱ (آبی پررنگ) به ضخامت ۱ میکرومتر ناخالصی نوع p به اندازه  $10^{20}$  (atom/cm<sup>3</sup>).
- منطقه ۲ (آبی کم‌رنگ) به ضخامت ۲۹۹ میکرومتر ناخالصی نوع p به اندازه  $10^{12}$  (atom/cm<sup>3</sup>).
- منطقه ۳ (قرمز رنگ) به ضخامت ۱ میکرومتر ناخالصی نوع n به اندازه  $10^{20}$  (atom/cm<sup>3</sup>)؛ این ناحیه به عنوان کاتد عمل می‌کند و توسط منطقه ۵ محاصره می‌شود تا میدان ایجاد شده را کنترل کند.
- منطقه ۴ (آبی پررنگ) به ضخامت ۱ میکرومتر ناخالصی نوع p به اندازه  $10^{18}$  (atom/cm<sup>3</sup>)؛ تعبیه این کانال برای این است که وقتی چندین پدی به صورت پیوسته کنار هم قرار گیرند از اتصال میدان بین دو پدی مجاور جلوگیری کند، به عبارتی دیگر، برای کنترل میدان در نقاط انتهایی پدی استفاده می‌شود.

- منطقه ۵ (قرمز رنگ) به ضخامت ۷ میکرومتر ناخالصی نوع n به اندازه  $10^{17}$  (atom/cm<sup>3</sup>)؛ این منطقه (JTE) به صورت کانالی با انتشار ناخالصی نوع n با غلظت کم که در انتهای منطقه ۳ بستگی به ابعاد حسگر در پهنا و عمق حدوداً ۷ میکرومتر تعبیه شد. منطقه ۳ همان‌طور که در ادامه ذکر خواهیم کرد، به علت ضخامت کم، میدانی که در مرز آن وجود دارد دارای تجمع خطوط میدانی می‌باشد و یکنواختی میدان را از دست می‌دهد و به عبارت دیگر، شکست میدان رخ خواهد داد. برای جبران این مشکل یا باید ضخامت کاتد را افزایش داد تا در نقاط انتهایی تجمع

#### 1. Junction Termination Extension (JTE)



برخورد فوتون اشعه ایکس به الکترون و برانگیختن و کندن الکترون، جفت الکترون حفره تولید می‌شود یا باز ترکیب می‌شود یا به کمک میدان خارجی، الکترون و حفره در جهت مخالف هم هدایت می‌شوند.

تابش اشعه در بازه نور مرئی تا اشعه ایکس صورت گرفت. برای این کار پارامترهای طول موج، قدرت و شدت را مشخص کرده و هر یک (از نور مرئی تا اشعه ایکس) به صورت تک‌مقدار جداگانه تابیده شد. با جاروب حسگر با ولتاژ بایاس معکوس ناحیه مناسب برای ایجاد و هدایت جریان صورت گرفت. کاتد را به زمین اتصال داده و آند در ولتاژ بایاس جاروب شد.

### ۳. نتایج

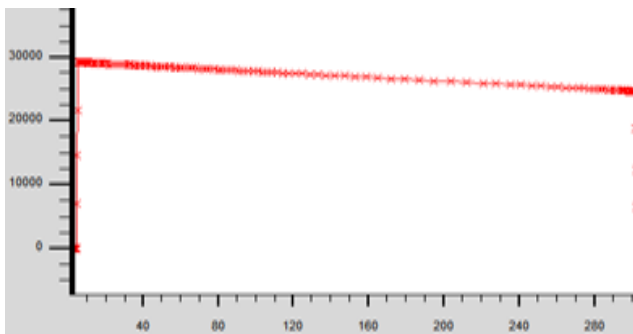
در ابتدا یک دیود ساده را شبیه‌سازی کردیم تا نحوه توزیع میدان مشاهده شود. نحوه توزیع میدان در دیود ساده، همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده‌ایم، در کل بستر حسگر یکدست است.

#### ۱.۳ دیود ساده

میدانی تقریباً یکنواخت و یکدست در حجم میانی کپه برقرار شد. این در صورتی است که در ولتاژ مدنظر میدانی قوی برای انتقال جریان برقرار است ولی در ادامه همان‌طور که خواهید دید نحوه توزیع میدان در دیود با بهره فرق دارد.

#### ۲.۳ دیود با بهره کم بهمنی (LGAD)

در دیود با بهره با اعمال ولتاژ در ناحیه محدود که بهره در آن اعمال شده یک قله بزرگ و نازک از میدان مشاهده می‌شود. در ولتاژهای خیلی زیاد، علاوه بر وجود قله قوی، میدان قوی در بستر حسگر هم ایجاد می‌شود. ولی در ولتاژهای کم، یکنواختی میدان در بستر حسگر مشاهده نمی‌شود، بلکه توزیع میدان همانند شکل ۴ صورت می‌گیرد. در ناحیه الکترون آند، قله آنی میدان مشاهده می‌شود و ناگهان کاهش می‌یابد و بعد شاهد اوج‌گیری میدان تا به مقدار بیشینه می‌رسد و در ادامه کاهش یافته و در مرز اتصال با الکترون یک قله کوچک ایجاد کرده و به صفر می‌رسد.



شکل ۳. نمودار توزیع میدان در حجم دیود ساده.

در شکل ۲، مناطق ۱ و ۲ (خاکستری) الکترودها به ضخامت در محدوده ۱ الی ۲ میکرومتر، مناطق ۳، ۴ و ۵ لایه‌های اکسید سیلیکون و نیتريد سیلیکون به ضخامت ۱ میکرومتر؛ از لایه اکسید سیلیکون و نیتريد سیلیکون به‌عنوان لایه محافظ در مقابل گرمای ناشی از تابش و همچنین کاهش شدت تابش استفاده می‌کنند. گرمای ناشی از تابش و همچنین شدت زیاد آن ممکن است به حسگر آسیب برساند و باید از این موارد محافظت شود.

#### ۲.۲ مدل‌ها و روش‌های حل

در واکنش تابش با ماده، مدل‌ها و معادلات فیزیکی دخیل و سازوکار اندرکنش‌های درون ماده را توصیف می‌کنند و فرایند شبیه‌سازی را صورت‌بندی می‌کنند. نرم‌افزار TCAD به‌عنوان یکی از افزاره‌های مهم شبیه‌سازی الکترودها و نیمه‌هادی‌ها، گزینه مناسبی برای شبیه‌سازی دیود و حسگرهای نوری و ترانزیستورها و ... است. این نرم‌افزار را شرکت سیلوکا در سال ۱۹۸۴ برای خودران‌سازی<sup>۱</sup> طراحی الکترونیکی توسعه داده است است [۲۰]. هم‌چنین، در افزاره سیلوکا از زیر مجموعه TCAD با در نظر گرفتن عامل‌ها و فرایندهای دخیل در اندرکنش تابش با ماده حسگر هم‌چون دما، غلظت ناخالصی، تحرک حامل‌های بار و ... دقت شبیه‌سازی افزایش می‌یابد.

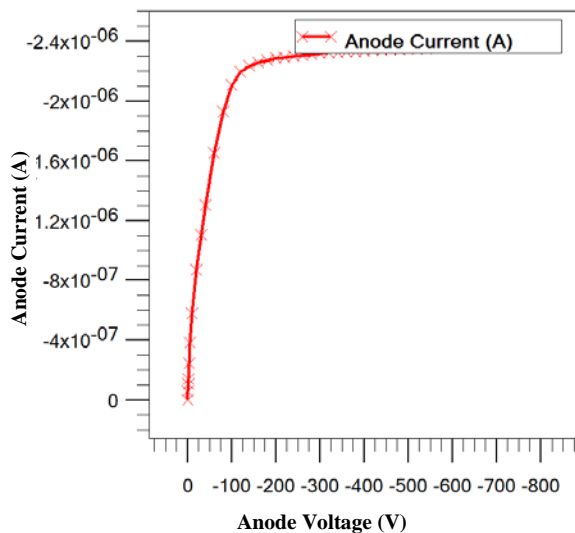
از جمله مدل‌ها و روش‌ها که غالباً استفاده می‌شود، این‌هاست: مدل‌های نو ترکیبی (SRH, CONSRH, AUGER) و یونیزاسیون ضربه‌ای (IMACT SELB)، قابلیت تحرک (CONMOB, CCSMOB, FLDMOB)، میزان حامل و اثرات و فرایندهای کوانتومی.

در بهره‌گیری از روش‌های حل بر اساس دقت و کاربردی بودن می‌توان از ترکیبی از روش‌های مختلف حل استفاده کرد. از روش‌های حل در شبیه‌سازی با TCAD می‌توان به روش حل NEWTON و GUMMEL اشاره کرد.

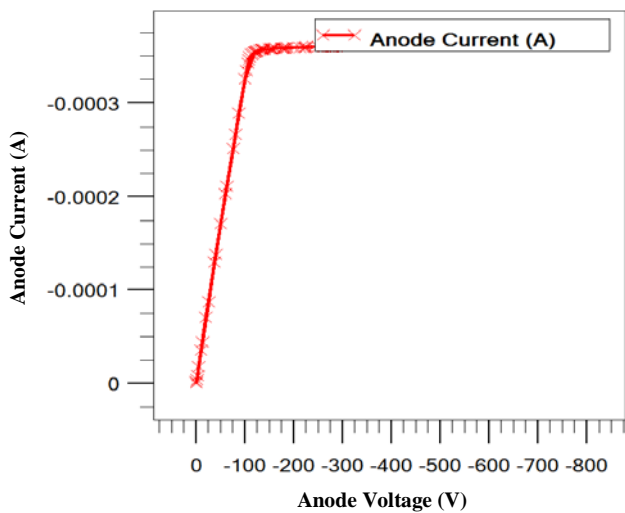
برای شرایط مرزی با توجه به میزان ناخالصی و نوع ناخالصی در مرز و هم‌چنین نوع جنس الکترودها از تابع کار و اتصال اهمی استفاده شد.

برای تعریف اشعه در سیلوکا با گنجاندن ویژگی‌های اشعه ایکس در کلیدواژه باریکه (beam) استفاده می‌کنیم. اشعه با مختصات تعریف‌شده در نرم‌افزار مختصات‌دهی می‌شود. با تابش اشعه به حسگر با توجه به این‌که برای تولید بار الکتریکی سازوکارهای مختلفی وجود دارد، از مدلهایی استفاده می‌کنیم که سازوکار تولید بار (در این‌جا جفت الکترون حفره) از تولید، باز ترکیبی، انتقال و ... را صورت‌بندی می‌کند. با اعمال تابش و

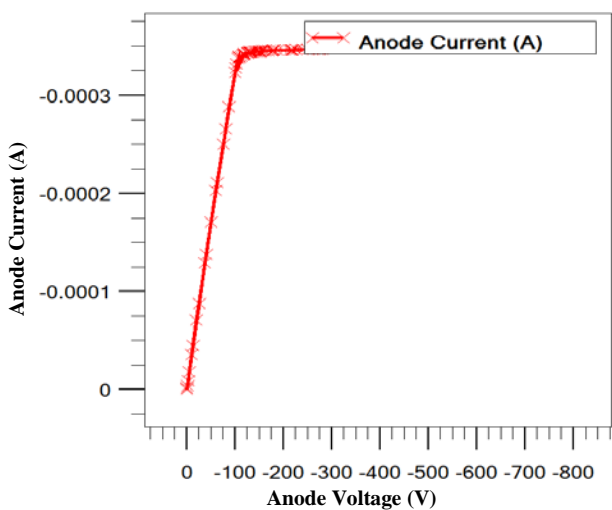




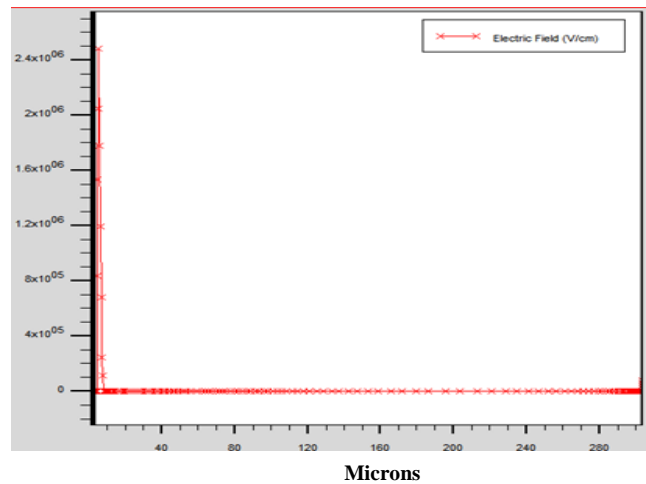
شکل ۵. نمودار جریان تاریک برای یک دیود LGAD



شکل ۶. نمودار جریان در تابش ۰/۴۵ میکرومتر در دیود LGAD



شکل ۷. نمودار جریان در تابش ۰/۰۰۱ میکرومتر در دیود LGAD



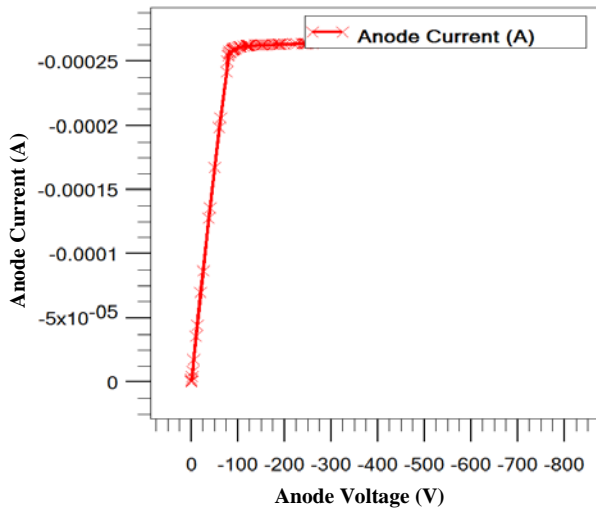
شکل ۴. نحوهٔ توزیع میدان در حجم حسگر دیود LGAD.

وجود قلّهٔ بزرگ در داخل دیود این امکان را می‌دهد که با برخورد تابش به حسگر و انجام فرایند یونیزاسیون و ایجاد جفت الکترون-حفره، الکترون اولیه آن‌قدر انرژی و شتاب بگیرد که بتواند یونیزاسیون ثانویه را صورت دهد. در واقع، با این قلّهٔ بزرگ در این ناحیهٔ محدود الکترون-حفره به صورت بهمینی تولید می‌شود. این تولید بهمینی عامل تقویت جریان خواهد شد. در اعمال ولتاژ بدون اعمال تابش ورودی، جریان ایجادشده فقط ناشی از ولتاژ اعمالی می‌باشد (جریان تاریک). بر اساس مدل‌های استفاده‌شده، جریان تاریک متغیر می‌باشد. در کامل‌ترین مدل‌های حل، محدودهٔ جریان تاریک در حدود  $2 \times 10^{-6}$  A می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، جریان تاریک تا مقادیر ۱۵۰ ولت حالت تقریباً خطی دارد. از ۱۵۰ ولت به بعد به حالت اشباع می‌رسد و با افزایش ولتاژ افزایش جریان ناچیز می‌باشد.

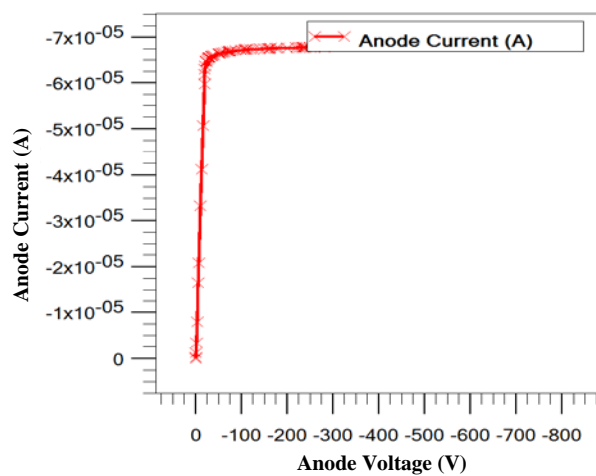
با اعمال تابش در طول موج‌های مختلف جریان تابشی مشاهده شد. با اعمال تابش طول موج در محدودهٔ نور مرئی ۰/۴۵ میکرومتر با قدرت ۱ وات و شدت واحد (در محدودهٔ تابش نور خورشید) جریان به دست آمد. نمودار جریان-ولتاژ در شکل ۶ نمایش داده شد. در این نمودار جریان در حدود ۲۰۰ ولت به اشباع می‌رسد. در این محدوده، جریان به صورت خطی افزایش می‌یابد. از محدودهٔ ۲۰۰ ولت بیش‌تر به حالت اشباع می‌رسد. به ازای تابش نور مرئی، تقریباً در حدود  $6.5 \times 10^{-4}$  A به اشباع می‌رسد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود جریان تابش ۰/۴۵ میکرومتر و ۰/۰۰۱ میکرومتر نزدیک به هم است ولی دو مرتبه از جریان تاریک بیش‌تر می‌باشد.

در تابش اعمال شده در طول موج ۰/۰۰۱ میکرومتر با توان ۱ وات و شدت  $1 \times 10^8$  W/cm<sup>2</sup> اعمال شد. نمودار جریان-ولتاژ این طول موج تابشی در شکل ۷ نشان داده شد. جریان در حدود ۵۰ ولت به اشباع می‌رسد و تا رسیدن به حالت اشباع حالت خطی دارد و به صورت خطی افزایش می‌یابد. جریان تقریباً در حدود ۲۰۰ ولت به اشباع می‌رسد.

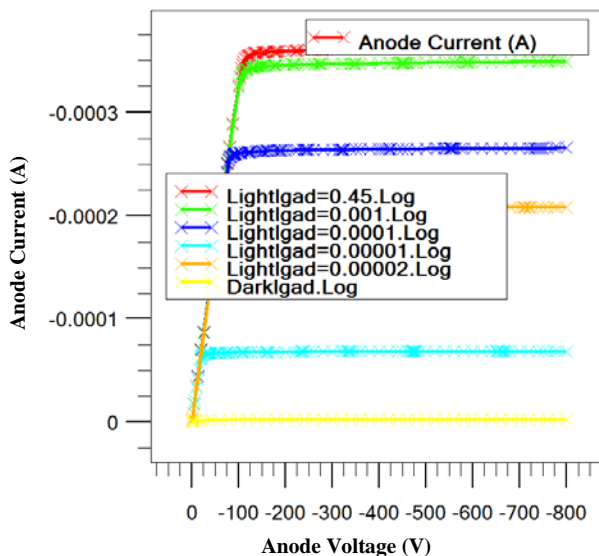




شکل ۸. نمودار جریان در تابش  $0.0001$  میکرومتر در دیود LGAD



شکل ۹. نمودار جریان در تابش  $0.0001$  میکرومتر در دیود LGAD



شکل ۱۰. مقایسه جریان‌های تابشی نسبت به هم در دیود LGAD جریان تاریک از مرتبه ۶- می‌باشد.

چنان‌که در شکل‌های ۸ و ۹ مشهود است، در تابش‌های اشعه ایکس با طول موج های  $0.0001$  و  $0.0001$  میکرومتر جریان یکسان نیست. در طول موج  $0.0001$  میکرومتر جریان نزدیک به جریان با طول موج  $0.001$  میکرومتر می‌باشد. هر چند اندکی زودتر به اشباع می‌رسد و مقدار جریان اشباع آن کم‌تر است ولی نزدیک هم هستند. ولی برای طول موج  $0.0001$  میکرومتر جریان خیلی زودتر به اشباع می‌رسد هر چند مرتبه جریانی یکی می‌باشد ولی در ولتاژ پایین‌تر به اشباع می‌رسد. جریان اشباع در طول موج  $0.0001$  تقریباً نصف جریان در طول موج  $0.0001$  است.

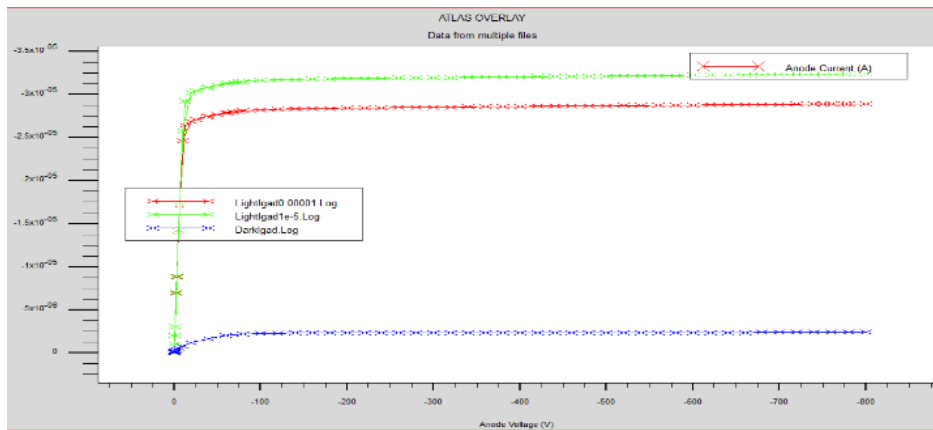
تا این‌جا کار تمامی نمودارها با شرایط یکسان از لحاظ حل و روش حل و شرایط اتصال و مرزی و شرایط ناخالصی یکسان به دست آمده است. در شکل ۱۰، تمامی این نتایج را در یک نمودار نمایش داده و مقایسه کرده‌ایم. جریان به دست آمده در شرایط خاص، از جمله ناخالصی، به دست آمده است، در حالی که اگر ناخالصی اعمال شده تغییر یابد و مقاومت یا بهره تغییر کند این جریان تغییر می‌یابد. به عبارت دیگر، این جریان بهینه‌سازی نشده است.

حتی تغییر در نحوه اعمال تابش در ایجاد جریان مؤثر می‌باشد. به طوری که در شکل ۱۱ با تغییر شدت به نسبت کم شاهد تغییر در سطح اشباع جریان هستیم.

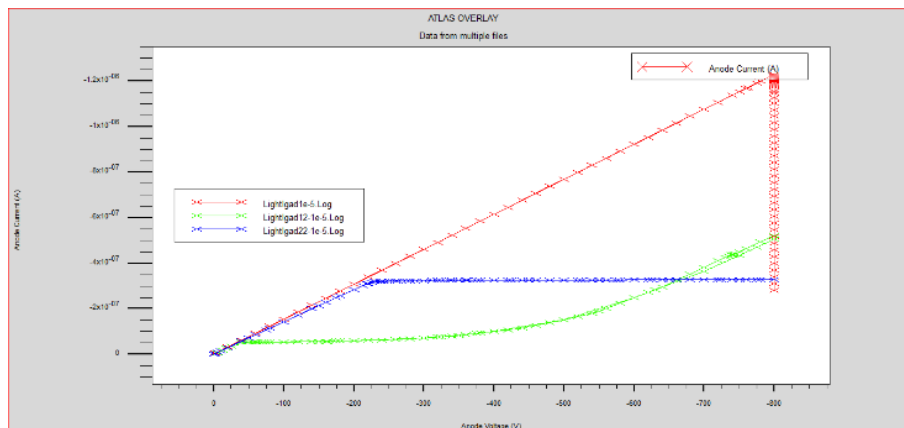
با تغییر در نحوه اعمال ناخالصی در حسگر، هم نحوه ایجاد میدان در حجم حسگر و هم جریان تابشی به صورت چشمگیری تغییر می‌کند. از جمله عمق ناخالصی، اندازه بهره، میزان ناخالصی بستر که تغییرات شدیدی علاوه بر انتخاب روش حل و مدل‌ها در میزان جریان دریافتی دارد. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ این تفاوت‌ها را نشان داده‌ایم.

از مشاهدات جالب در این شبیه‌سازی این بود که در بعضی موارد با اعمال تابش با این‌که تابش در شبیه‌سازی وارد حسگر نمی‌شد ولی تغییر در میزان جریان حتی با تغییر طول موج دریافت می‌شد. بازه ولتاژی که در آن جریان به صورت خطی تغییر می‌کند مهم است زیرا تناسب خطی را که مهم است حفظ می‌کند. در این شبیه‌سازی با تغییرات مختلف، داده‌های مختلف دریافت می‌شد که بیانگر این نکته می‌باشد که برای یافتن بهترین نمونه حسگر، نیاز به بهینه‌سازی در ابعاد و میزان ناخالصی و دقت در استفاده از مدل‌ها داریم.

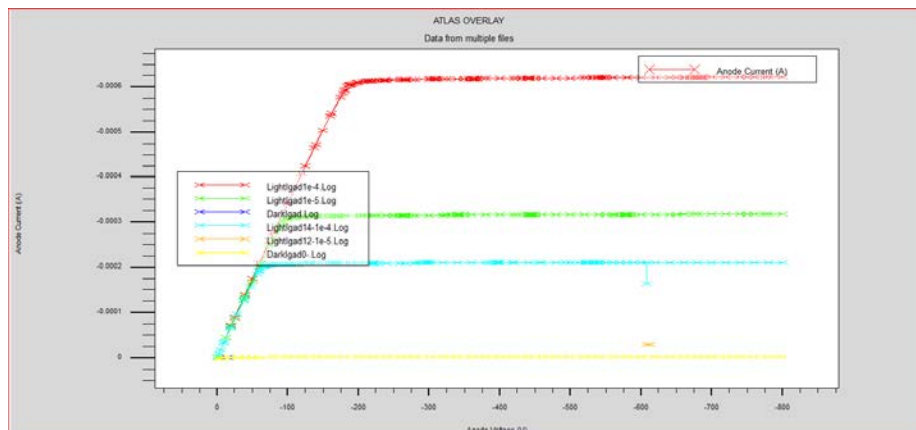




شکل ۱۱. نمودار جریان با تغییر شدت برای یک طول موج در دیود LGAD.



شکل ۱۲. نمودار جریان با اعمال سه دسته مدل مختلف برای یک طول موج در دیود LGAD.



شکل ۱۳. نمودار جریان با تغییر در لایه بهره برای یک طول موج در دیود LGAD.

#### ۴. جمع‌بندی

رسیدن به حالت اشباع از ویژگی‌های دیگر این حسگر دیودی است، که حتی در بازه چند صد ولت پاسخ خطی دریافت شد. از طرفی، به دلیل زمان سریع پاسخ‌دهی، این نوع آشکارساز مزیتی مهم بر دیگر آشکارسازها در این زمینه دارد. جریان نسبتاً بالا به علت وجود تقویت‌کننده داخلی، زمان سریع به دلیل نوع ماده و ضخامت کم و میدان قوی، انتخاب مناسب علاوه بر آشکارسازی در محدوده نور مرئی، برای آشکارسازی در بازه اشعه ایکس سخت و نرم است.

دیود LGAD یک آشکارساز با بهره داخلی و زمان سریع می‌باشد که علاوه بر کارایی در محدوده نور مرئی و اشعه ایکس نرم در اشعه ایکس سخت هم کارایی تشخیص خوبی دارد. هرچند با افزایش انرژی جریان کاهش می‌یابد ولی جریان در محدوده چند میکروآمپر است، که نسبت به دیگر تشخیص‌دهنده‌های اشعه ایکس که جریان آن‌ها از مرتبه نانو است جریان درخور ملاحظه‌ای است. پاسخ‌دهی در ولتاژ تا

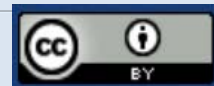




1. Moy J.P. Recent developments in X-ray imaging detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2000;442(1-3):26-37.
2. Kasap S.O, Kabir M.Z, Rowlands J.A. Recent advances in X-ray photoconductors for direct conversion X-ray image detectors. *Current Applied Physics*. 2006;6(3):288-292.
3. Zhang H, Wang F, Lu Y, Sun Q, Xu Y, Zhang B.B, Jie W, Kanatzidis M.G. High-sensitivity X-ray detectors based on solution-grown caesium lead bromide single crystals. *Journal of Materials Chemistry C*. 2020;8(4):1248-1256.
4. Ferrero M, Arcidiacono R, Borghi G, Boscardin M, Cartiglia N, Costa M, Dalla Betta G.F, Ficorella F, Mandurrino M, Obertino M.M, Pancheri L, Paternoster G, Siviero F, Sola V, Staiano A, Tornago M, Centis Vignali M. Evolution of the design of ultra fast silicon detector to cope with high irradiation fluences and fine segmentation. *Journal of Instrumentation*. 2020;15(04):C04027.
5. Rizzo G, Comotti D, Fabris L, Grassi M, Lodola L, Malcovati P, Manghisoni M, Ratti L, Re V, Traversi G, Vacchi C, Batignani G, Bettarini S, Casarosa G, Forti F, Morsani F, Paladino A, Paoloni E, Dalla Betta G.-F., Pancheri L, Verzellesi G, Xu H, Mendicino R, Benkechache M.A. The PixFEL project: development of advanced X-ray pixel detectors for application at future FEL facilities. *Journal of Instrumentation*. 2015;10(02):C02024.
6. Knoll G.F. Radiation detection and measurement. *John Wiley & Sons*. 2010.
7. Ahmed S.N. Physics and engineering of radiation detection. *Academic Press*. 2007.
8. Attwood D. Soft x-rays and extreme ultraviolet radiation: principles and applications. *Cambridge university press*. 2000.
9. Nabipour J.S, Khorshidi A. Spectroscopy and optimizing semiconductor detector data under X and  $\gamma$  photons using image processing technique. *Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences*. 2018;49(2):194-200.
10. Zhou X, Li X.Q, Xie Y.N, Liu C.Z, Zhang S, Wu J.J, Zhang J, Li X.F, Zhang Y.F, Li B, Hu H.L, Chen Y.P, Jiang W, Li Z. Introduction to a calibration facility for hard X-ray detectors. *Experimental Astronomy*. 2014;38(3):433-441.
11. Zhongming Z, Linong L, Xiaona Y, Wangqiang Z, Wei L. Introduction to a calibration facility for hard X-ray detectors. 2014.
12. Atak H, Shikhaliev P.M. Photon counting x-ray imaging with K-edge filtered x-rays: A simulation study. *Medical Physics*. 2016;43(3):1385-1400.
13. Shimizu Y, Takamizawa H, Inoue K, Yano F, Kudo S, Nishida A, Toyama T, Nagai Y. Impact of carbon co-implantation on boron distribution and activation in silicon studied by atom probe tomography and spreading resistance measurements. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2016;55(2):026501.
14. Endo K, Yanaga M, Yoshikawa H, Horiuchi K, Nakahara H, Murakami Y. Determination of radon concentration in spring gases with a portable semiconductor detector. *The International Journal of Applied Radiation and Isotopes*. 1985;36(3):197-201.
15. Endo K, Yanaga M, Yoshikawa H, Horiuchi K, Nakahara H, Murakami Y. Determination of radon concentration in spring gases with a portable semiconductor detector. *The International Journal of Applied Radiation and Isotopes*. 1985;36(3):197-201.
16. Hansen J.S, McGeorge J.C, Fink R.W. Efficiency calibration of semiconductor detectors in the X-ray region. *Nuclear Instruments and Methods*. 1973;112(1-2):239-241.
17. Parker C.J. Realization of planar silicon sensors for fast timing experiments. *University of California. Santa Cruz*. 2013.
18. Manual A.U. Silvaco International. *Santa Clara. CA*. 2000;95054:23.
19. Pellegrini G, Fernández-Martínez P, Baselga M, Fleta C, Flores D, Greco V, Hidalgo S, Mandić I, Kramberger G, Quirion D, Ullan M. Technology development and first measurement of low gain avalanche detector (LGAD) for high energy physics applications. *Journal of Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 2014.
20. Maiti C.K. Introducing Technology Computer-Aided Design (TCAD): Fundamentals, Simulations, and Applications. *CRC Press*. 2017.

**COPYRIGHTS**

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

دانسی، محمد، فتحی، محمدباقر. (۱۴۰۳)، شبیه‌سازی عملکرد حسگر کم‌بهرهٔ بهمنی در آشکارسازی اشعهٔ ایکس. *مجله علوم و فنون هسته‌ای*. ۱۰۷(۱)، ۳۷-۴۵.

DOI: 10.24200/nst.2023.1274.1827

Url: [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1560.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1560.html)