

## طراحی و ساخت آشکارساز تابش آلفای سیلیکونی با ساختار P-I-N

محمد دارایی\*<sup>۱</sup>، محمد اسماعیل عظیم عراقی<sup>۲</sup>، مهدی صادقی<sup>۳</sup>، سید علی هاشمی زاده<sup>۱</sup>

۱. گروه فیزیک، مرکز تحصیلات تکمیلی دانشگاه پیام نور، صندوق پستی: ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵، تهران - ایران

۲. گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه خوارزمی تهران، صندوق پستی: ۳۵۸۷-۱۵۸۱۵، تهران - ایران

۳. گروه فیزیک پزشکی، دانشکده علوم پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی ایران، صندوق پستی: ۶۱۸۳-۱۴۱۵۵، تهران

- ایران

دریافت: ۱۳۹۸/۴/۲۳ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۶

### چکیده

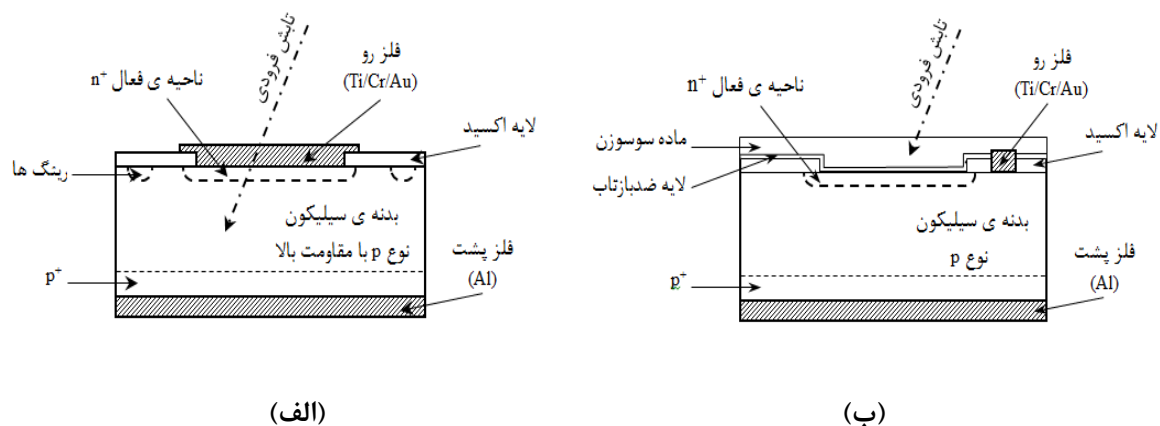
در این مقاله به فرآیند طراحی و ساخت فوتودیود سیلیکونی با ساختار PIN برای آشکارسازی تابش آلفا پرداخته شده است. قدرت تفکیک انرژی یکی از پارامترهای مهم در اینگونه آشکارسازها می باشد، افزایش قدرت تفکیک انرژی آشکارساز منوط به کاهش جریان نشتی فوتودیود ساخته شده می باشد. لذا یکی از اهداف بسیار مهم در این تحقیق، طراحی و انجام فرآیند ساخت فوتودیودی می باشد که دارای جریان نشتی پایین و قدرت تفکیک انرژی بالا باشد. آشکارسازهای مورد مطالعه در این مقاله پس از اتمام فرآیند ساخت، مورد اندازه گیری مشخصات الکترونیکی نظیر جریان - ولتاژ و خازن - ولتاژ و همچنین تست تابش ذرات آلفا از چشمه ی  $^{241}\text{Am}$  قرار گرفتند که طیف پاسخ به تابش آلفای بسیار عالی از آن استخراج گردید.

واژگان کلیدی: آشکارساز تابش، فوتودیود سیلیکونی با ساختار PIN، مشخصات I-V و C-V، طیف آلفا

### مقدمه

از زمانی که ون هردن (Van Heerden) موفق به تشخیص ذرات آلفا و تشعشعات گاما با کریستال های  $\text{AgCl}$  شد [۱]، علاقه به توسعه سنسورهای تابش با نیمه هادی ها به سرعت افزایش یافته است [۲]. تاکنون مطالعات فراوانی درخصوص استفاده از مواد نیمه هادی مختلف و ساختارهای گوناگون به منظور آشکارسازی تابش انجام شده است [۳ و ۴]. تحقیقات بسیاری نیز بر روی نواقص ایجاد شده از برخورد تشعشع بر آشکارساز و مکانیزمهای حرارتی ترمیم اثرات آن انجام شده است [۵ و ۶].

استفاده از فوتودیودهای نیمه‌هادی سیلیکونی با ساختار PIN یکی از رایج‌ترین روشهای آشکارسازی و اندازه‌گیری تابش‌های یونیزه می‌باشد [۸ و ۷]. فوتودیودهای PIN در آشکارسازی کارآمدتر از فوتودیودهای پیوند PN هستند و پیشنهادی خوب برای آشکارسازی انواع مختلف تابش می‌باشند [۹]. عملکرد این فوتودیودها مشابهی سایر آشکارسازهای تابش نظیر آشکارسازهای سوسوزن، تیوبهای گازی و اتافک یونیزاسیون می‌باشد ولی دارای عملکرد و کیفیت بهتر، هزینه‌ی ساخت بسیار ارزان‌تر، ابعاد بسیار کوچک، سرعت پاسخ‌دهی بالاتر، قدرت تفکیک انرژی بهتر و قابلیت کار در دمای اتاق و ولتاژهای پایین و سازگاری با سایر تکنولوژی‌های ساخت ماژولهای سیلیکونی مدارات مجتمع (CMOS) جهت قرائت پالسه‌ها، می‌باشند. همچنین با فناوری ساخت این آشکارسازها امکان ساخت آشکارسازهای تابش آرایه‌ای خطی و صفحه‌ای جهت انجام انواع تصویر برداری‌های پزشکی، صنعتی و فضایی فراهم آورده شده است [۱۰]. از انواع مختلف فوتودیودهای PIN با سطوح ناحیه‌ی حساس و شکلهای گوناگون در مراکز و آزمایشگاههای هسته‌ای و پزشکی هسته‌ای به عنوان دزیمر و شمارنده‌ی ذرات استفاده می‌گردد. آشکارسازهای تابش سیلیکونی PIN یا بصورت مستقیم و بدون استفاده از پوشش ماده‌ی سوسوزن ساخته می‌شوند و یا به صورت غیرمستقیم که از ماده‌ی سوسوزن در سطح آشکارساز استفاده شده است، ساخته می‌شوند [۱۱]. شماتیکی از سطح مقطع این دو مدل در شکل (۱) مشاهده می‌شود.



شکل ۱. سطح مقطع آشکارساز سیلیکونی PIN (الف) آشکارسازی تابش مستقیم (ب) آشکارسازی تابش غیرمستقیم.

طراحی آشکارساز تابش سیلیکونی نوع مستقیم به نحوی است که تمام ضخامت بستر سیلیکون در ولتاژ کاری بالا تخلیه می‌شود و از چندین حلقه‌ی محافظ<sup>۱</sup> برای بهبود مشخصات ولتاژ شکست دیود استفاده می‌شود [۱۲]. در حالی که آشکارساز تابش غیر مستقیم در ولتاژ معکوس کم و یا حتی صفر ولت به کار گرفته می‌شود و عمق ناحیه‌ی فعال  $n^+$  باید بسیار کم باشد (Shallow Junction) تا تعداد بیشتری از نور مرئی ساطع شده از ماده‌ی سوسوزن<sup>۲</sup> را جذب نماید. طول موج مرئی منتشر شده از ماده‌ی سوسوزن در این نوع آشکارسازها حدود ۵۰۰ تا ۶۰۰ نانومتر می‌باشد و عمق ناحیه‌ی فعال در حد میکرون برای جذب آن کافی است.

<sup>1</sup> Guard Ring

<sup>2</sup> Scintillator

هر چند کاربرد هر دو نوع آشکارساز فوق مشابه و برای تشخیص تابشهای یونیزه‌ی  $\alpha$ ، الکترونها، اشعه‌ی X و  $\gamma$  مناسب می‌باشند [۱۳]، با این وجود فرآیند طراحی و مشخصات اولیه‌ی ویفرهای بکار رفته در دو نوع آشکارساز با هم متفاوت است. در گذشته طراحی و ساخت آشکارساز سد پتانسیل سطحی با زیرلایه‌ی نیمه هادی گالیوم آرسناید (GaAs) برای آشکارسازی ذرات آلفا توسط این تیم انجام شده بود [۱۴]، در این کار آشکارساز تابش نوع مستقیم با استفاده از ویفر سیلیکونی مقاومت بالای نوع p (تقریباً ذاتی) و با نواحی حساس دایروی به قطر ۱۴/۴ mm ساخته شده است و تستهای الکتریکی I-V و C-V و تست تابش آلفا از چشمه‌ی  $^{241}\text{Am}$  بر روی آن انجام گردیده است.

## فرآیند طراحی و ساخت

مشخصات ویفرهای سیلیکونی مورد استفاده به شرح جدول (۱) می‌باشد که از شرکت Semiwafer تهیه گردیده است.

جدول ۱. مشخصات ویفرهای سیلیکونی مورد استفاده در فرآیند ساخت

Wafer	FZ p-type Si
Orientation	<100>
Resistivity (K $\Omega$ .cm)	1-2
Carrier Life Time (ms)	> 1
Dopant	Boron
Diameter (mm)	100 $\pm$ 0.2 (4 inch)
Thickness ( $\mu\text{m}$ )	525 $\pm$ 5

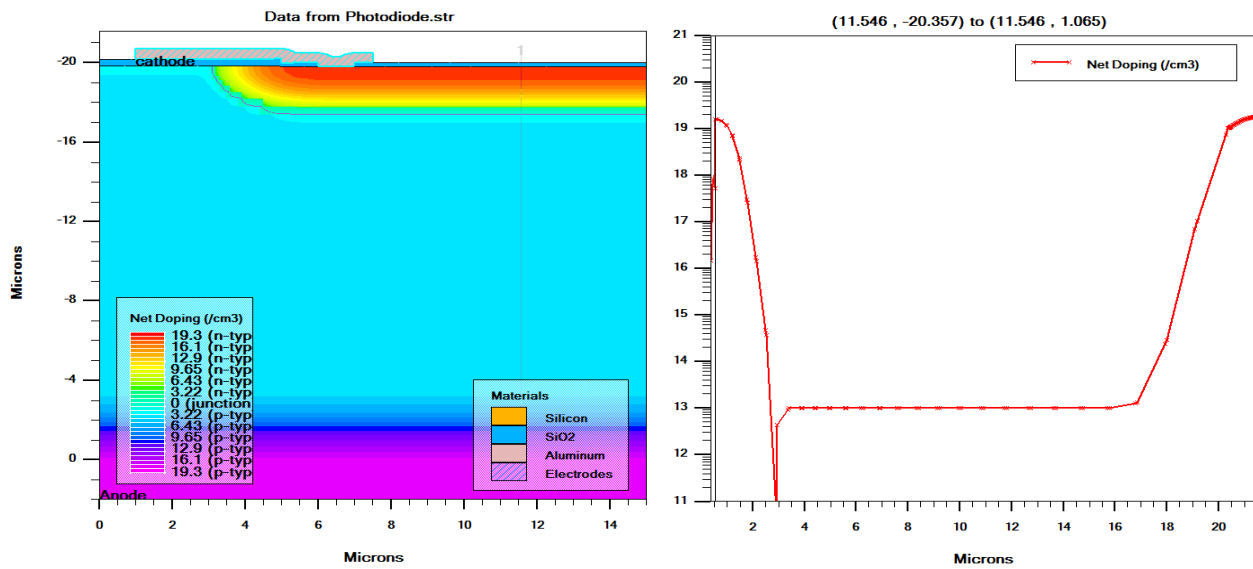
در ابتدا پارامترهای مختلف فرآیند ساخت فوتودیودهای سیلیکونی PIN نظیر میزان تراکم سطحی<sup>۴</sup>، عمق نفوذ<sup>۵</sup> و پروفایل نفوذ ناخالصی<sup>۶</sup>، توسط نرم افزار SILVACO مورد شبیه سازی قرار می‌گیرند. پارامترهای فرآیند ساخت به منظور رسیدن به مشخصات الکتریکی مورد نیاز نظیر جریان نشتی پایین، ولتاژ شکست بالا و طیف پاسخدهی بهتر، بهینه‌سازی شدند. پروفایل نفوذ ناخالصی و طرحواره‌ی سطح مقطع فوتودیود سیلیکونی PIN شبیه سازی شده در شکل (۲) نشان داده شده‌اند.

<sup>3</sup> intrinsic

<sup>4</sup> surface concentration

<sup>5</sup> junction depth

<sup>6</sup> doping profile



شکل ۲. پرو فایل و عمق نفوذ شبیه سازی شده ی فوتودیود سیلیکونی PIN.

همانگونه که مشاهده می شود، عمق نفوذ ناخالصی نوع n بعد از فرآیند کاشت یون و انجام تمام عملیاتهای حرارتی مورد نیاز به  $3 \mu\text{m}$  می بایست برسد. فرآیند ساخت فوتودیودها، با انجام پروسه ی تمیزکاری استاندارد ویفرهای سیلیکونی (RCA) به شرح جدول (۲) آغاز می گردد [۱۵].

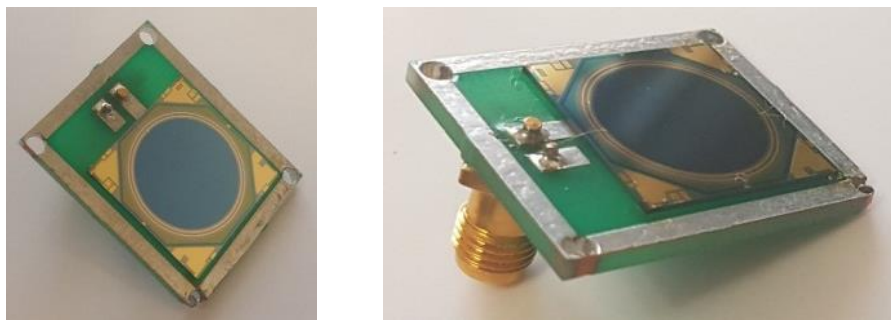
جدول ۲. فرآیند استاندارد تمیزکاری ویفرهای سیلیکونی

مرحله	فرآیند	دما	زمان
۱	$\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{DI Water} (1:1:3)$	$70^\circ\text{C}$	۱۰min
۲	شستشو با آب DI	محیط	۱۰min
۳	$\text{HF} : \text{H}_2\text{O} (1:10)$	محیط	۲۰S
۴	شستشو با آب DI	محیط	۱۰min
۵	$\text{HCl} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{DI Water} (1:1:3)$	$80^\circ\text{C}$	۱۰min
۶	شستشو با آب DI	محیط	۱۰min
۷	$\text{HF} : \text{H}_2\text{O} (1:10)$	محیط	۲۰S
۸	شستشو با آب DI	محیط	۱۰min
۹	$\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 (3:1)$	$100^\circ\text{C}$	۱۰min
۱۰	شستشو با آب DI	محیط	۱۰min
۱۱	$\text{HF} : \text{H}_2\text{O} (1:10)$	محیط	۲۰S
۱۲	شستشو با آب DI	محیط	۱۰min

سپس بر روی ویفرها یک لایه اکسید ذاتی حرارتی به ضخامت  $0.5 \mu\text{m}$  در دمای  $1000^\circ\text{C}$  رشد داده می‌شود. اکسید روی ویفر توسط فوتورزیست محافظت شده و پس از زدایش اکسید پشت، فرآیند کاشت یونهای بورون<sup>۷</sup> (B) برای ایجاد لایه‌ی  $p^+$  انجام می‌شود. به منظور فعال سازی یونهای ناخالصی و بازیابی ساختار کریستالی بعد از کاشت یون، ویفرها مورد عملیات حرارتی در دمای  $800^\circ\text{C}$  قرار می‌گیرند. بدین ترتیب یک لایه‌ی  $p^+$  در سطح پشت ویفرها ایجاد می‌گردد، مقاومت سطحی<sup>۸</sup> سمت  $p^+$  ویفرها بعد از اتمام فرآیند حدود  $70-80 \Omega/\text{sq}$  (or  $\Omega/\square$ ) می‌گردد. با عنایت به مقاومت بالای ویفرهای مورد استفاده در ساخت فوتودیودهای با ساختار PIN، کیفیت انجام این فرآیند به ایجاد یک اتصال اهمیک مناسب از پشت نمونه‌ها کمک می‌نماید.

برای شکل‌دهی ناحیه‌ی حساس  $n^+$  روی ویفر، به کمک فرآیند لیتوگرافی طرحهای دایره‌ای شکل به قطر  $14/4 \text{ mm}$  ایجاد می‌نماییم و پس از زدایش اکسید توسط محلول بافر آمونیوم فلوراید، فرآیند کاشت یون فسفر (P) برای ایجاد ناحیه‌ی  $n^+$  در زیرلایه‌ی نوع p سیلیکون انجام می‌گردد. این فرآیند در دمای محیط و خلا و یون‌های با انرژی  $100 \text{ keV}$  و شار  $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  انجام می‌گردد. عملیات حرارتی بعد از کاشت یون در این مرحله در دمای  $800^\circ\text{C}$  به مدت  $30$  دقیقه در محیط نیتروژن انجام می‌گردد. طی فرآیند عملیات حرارتی<sup>۹</sup> پروفایل نفوذ ناحیه‌ی  $n^+$  تا عمق  $2-3 \mu\text{m}$  گسترش می‌یابد و مقاومت سطحی<sup>۸</sup> لایه‌ی  $n^+$  در بازه‌ی  $8-10 \Omega/\text{sq}$  قرار می‌گیرد. مشخصات جریان نشتی دیود در ولتاژ معکوس و شکست آشکارساز ارتباط مستقیمی به کیفیت انجام این فرآیند دارد.

در نهایت برای برقراری اتصال فلزی اهمیک پشت، به کمک لایه‌نشانی تبخیری فیزیکی<sup>۱۰</sup> (PVD) یک لایه آلومینیوم (Al) به ضخامت تقریبی  $1 \mu\text{m}$  بصورت سرتاسری و برای برقراری اتصال فلزی اهمیک رو، به کمک فرآیند لیتوگرافی در سمت  $n^+$  ویفر، نواحی مورد نیاز را ایجاد و پس از زدایش اکسیدهای ذاتی و تمیزکاری مجدد RCA لایه‌ی Ti/Cr/Au به ضخامت  $800 \text{ \AA} / 800 \text{ \AA} / 3000 \text{ \AA}$  نشانده می‌شود. تراشه‌ها پس از برش بر روی بردهای الکتریکی (PCB) مونتاز و وایرگیری می‌گردند. شکل (۳) تصویر نهایی آشکارساز ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۳. آشکارساز تابش سیلیکونی PIN ساخته شده با سطح ناحیه‌ی حساس  $163 \text{ mm}^2$  بعد از نصب بر روی سازه‌ی مناسب برای انجام تستها الکترونیکی و طیف سنجی تابش آلفا.

<sup>7</sup> Boron Ion Implantation

<sup>8</sup> Sheet Resistance

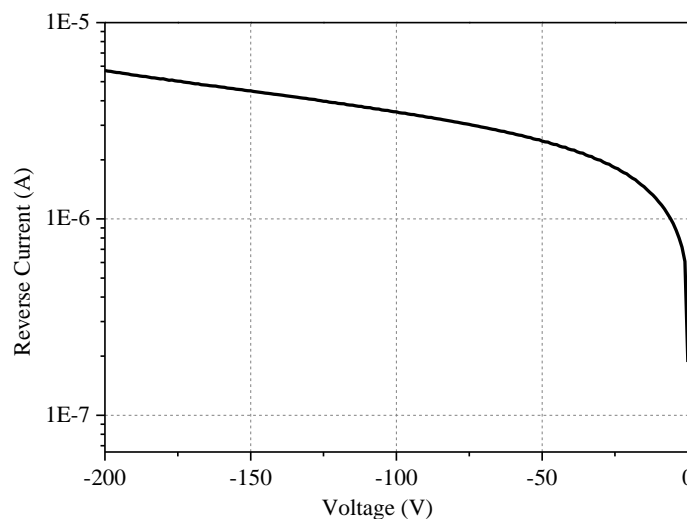
<sup>9</sup> Annealing Process

<sup>10</sup> physical vapor deposition (PVD)

## بحث و نتایج

جریان نشتی عبوری از آشکارساز، در دستگاه طیف نگار<sup>۱۱</sup> (MCA) بعنوان پالس ایجاد شده توسط یک ذره‌ی فرودی با انرژی مشخص شناخته می‌شود و این مسئله باعث بهم ریختگی شکل طیف خروجی و عدم توانایی آشکارساز در تفکیک تمام ذرات فرودی می‌گردد و در نتیجه کاهش قدرت تفکیک انرژی<sup>۱۲</sup> آشکارساز را در پی خواهد داشت. علاوه بر این، هنگامی که فوتودیود PIN سیلیکونی تحت تابش قرار می‌گیرد، جریان نشتی باید به حدی باشد که بتواند تابشهای ورودی ضعیف را نیز آشکارسازی نماید. لذا این نکته بسیار حائز اهمیت است که طراحی و ساخت آشکارساز به نحوی انجام شود که جریان نشتی آن کمترین مقدار ممکن باشد. پیش‌تر عوامل موثر بر جریان تاریک فوتودیود توسط این تیم مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته بود [۱۶].

این جریان در حالت ایده‌آل می‌بایست صرفاً نشان دهنده‌ی جریان نفوذی دیود باشد، اما در عمل جریان‌های مربوط به ناخالصی‌های ناخواسته، آلودگی‌ها، چگالی حالات سطحی<sup>۱۳</sup> بوجود آمده در مرز بین سیلیکون و اکسید سیلیکون ( $\text{Si/SiO}_2$ ) و نواقص کریستالی حاصل از فرآیندهای مختلف ساخت (علی‌الخصوص کاشت یون)، نیز بر مقدار جریان نشتی دیود می‌افزاید [۱۷]. با توجه به اینکه ویفر مورد استفاده در ساخت فوتودیودهای PIN با خلوص و مقاومت بالا می‌باشد، اهمیت تمام موارد اشاره شده بسیار بیشتر می‌شود. بنابراین تغییرات جریان - ولتاژ آشکارساز ساخته شده یکی از مواردی است که مورد بررسی قرار گرفته شده است. شکل (۴) نمودار جریان - ولتاژ فوتودیود ساخته شده را نشان می‌دهد. میزان جریان نشتی حساسه‌های ساخته شده با سطح ناحیه‌ی حساس دایره‌ای به قطر  $14/4$  mm، در حدود  $5 \mu\text{A}$  در ولتاژ  $-200$  V می‌باشد.



شکل ۴. نمودار جریان - ولتاژ فوتودیود سیلیکونی PIN با سطح ناحیه‌ی حساس دایره‌ای به قطر  $14/4$  mm در دمای اتاق و محیط تاریک.

<sup>11</sup> Multi-Channel Analyzer (MCA)

<sup>12</sup> Energy resolution

<sup>13</sup> Interface states density

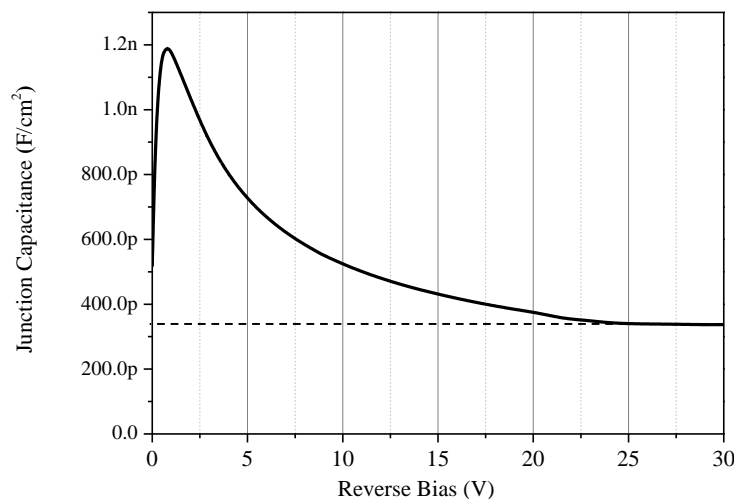
ظرفیت خازنی ( $C_j$ ) فوتودیود PIN برحسب ولتاژ معکوس توسط معادله‌ی  $C_j = \frac{dQ}{dV} = \frac{\epsilon\epsilon_0 A}{X}$  نشان داده می‌شود، که بار  $Q = qN_D AX$  و  $A$  سطح دیود،  $\epsilon$  و  $\epsilon_0$  ضریب دی الکتریک سیلیکون و  $q$  میزان بار بنیادی ( $1.6 \times 10^{-19}$ )،  $N_D$  تراکم ناخالصی موثر و  $X$  پهنای ناحیه تخلیه است که با رابطه ی زیر بیان می‌شود:

$$X = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(V_{bi} - V_b)}{qN_D}}$$

$V_{bi}$  پتانسیل درون ساخت<sup>۱۴</sup>،  $V_b$  ولتاژ اعمالی می‌باشد. لذا ظرفیت خازنی فوتودیود را می‌توان با رابطه ی زیر بیان کرد:

$$C_j = A \sqrt{\frac{\epsilon q N_D}{2(V_{bi} - V_b)}}$$

برای ولتاژهایی که شرط  $-V_b \gg V_{bi}$  برقرار باشد،  $C_j \propto \frac{1}{\sqrt{-V_b}}$  که  $V_b$  ولتاژ اعمالی معکوس می‌باشد. لذا ظرفیت خازن متناسب با  $\frac{1}{\sqrt{V_b}}$  تا زمانی که کل پهنای قطعه تبدیل به ناحیه ی تخلیه گردد، کاهش پیدا می‌کند [۱۸]. با اعمال ولتاژ بیش از این مقدار، ظرفیت خازن ثابت می‌ماند و نمودار  $C_j-V_R$  آن بصورت یکنواخت می‌گردد. ظرفیت خازنی در ولتاژی که ناحیه ی تخلیه تماماً گسترش یافته، مانند یک خازن معمولی بصورت یک خط موازی با محور ولتاژها می‌باشد. شکل (۵) نمودار ظرفیت خازنی اندازه‌گیری شده فوتودیود در ولتاژهای معکوس مختلف را نشان می‌دهد. مساحت ناحیه ی حساس فوتودیود تقریباً  $163 \text{ mm}^2$  می‌باشد. ظرفیت خازنی با افزایش مساحت ناحیه ی حساس و تا مقداری که مشخصات هندسی آن اجازه می‌دهد، افزایش می‌یابد. ظرفیت خازنی فوتودیودها در حدود  $25 \text{ V}$  به اشباع می‌رسند که بیانگر اینست که دیودها در این ولتاژ تماماً تخلیه می‌شوند. افزایش ولتاژ کاری به بیش از این مقدار منجر به افزایش میدان الکتریکی ناحیه ی تخلیه می‌گردد و سرعت پاسخدهی آشکارساز را افزایش می‌دهد. اعمال ولتاژ کاری کمتر از  $25 \text{ V}$  منجر به عدم جمع آوری برخی از زوج الکترون-حفره‌های تولید شده می‌گردد.



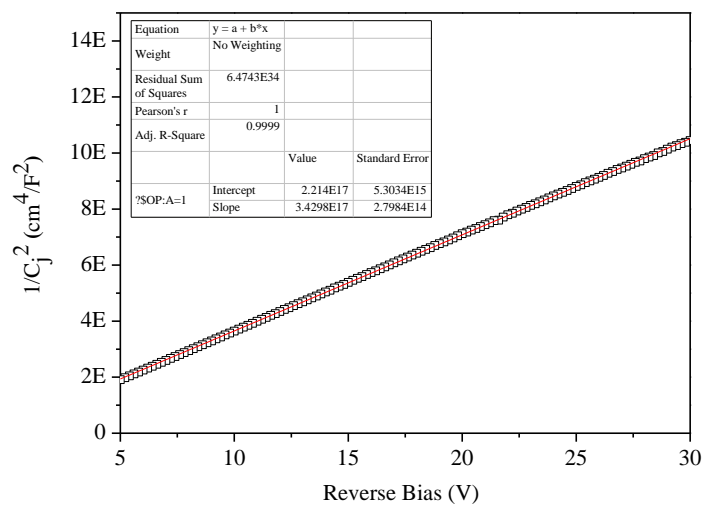
شکل ۵. نمودار ظرفیت خازنی اتصال بر حسب ولتاژ معکوس ( $C_j-V_R$ )، خط نقطه چین نشان دهنده ی ظرفیت خازنی اشباع فوتودیود می‌باشد که در ولتاژ معکوس تقریبی  $25 \text{ V}$  روی می‌دهد.

<sup>14</sup> Built-in potential

به کمک اندازه‌گیری ظرفیت خازنی دیود می‌توانیم مقاومت ویژه‌ی ویفر را نیز اندازه‌گیری نماییم، تراکم ناخالصی ویفر ( $N_D$ ) از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$C_j = \left[ \frac{q\epsilon_s}{2 \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_{bi} - V_R)} \right]^{1/2}$$

لذا شیب نمودار  $\frac{1}{C_j^2}$  برحسب  $V_R$  بیانگر  $\frac{2}{q\epsilon_s N_D}$  می‌باشد. که  $q$  بار الکترون،  $\epsilon_s$  ضریب گذردهی سیلیکون،  $N_A$  تراکم ناخالصی ناحیه‌ی فعال  $n^+$  می‌باشد ( $\sim 1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ )،  $V_{bi}$  پتانسیل درون ساخت اتصال و  $V_R$  ولتاژ معکوس است. شکل (۶) نمودار  $\frac{1}{C_j^2} - V_R$  برای آشکارساز ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۶. نمودار ظرفیت خازنی اتصال بر حسب ولتاژ معکوس  $(\frac{1}{C_j^2} - V_R)$ ، نمودار مناسب سازی شده با یک خط راست با

$$\text{شیب } 3/42983 \times 10^{17}$$

برای زیرلایه با مقاومت ویژه‌ی در بازه‌ی  $1-2 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$  با توجه به اندازه‌گیری‌های صورت گرفته، مقدار مقاومت ویژه‌ی محاسبه شده بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\text{شیب نمودار} = \frac{2}{q\epsilon_s N_D}$$

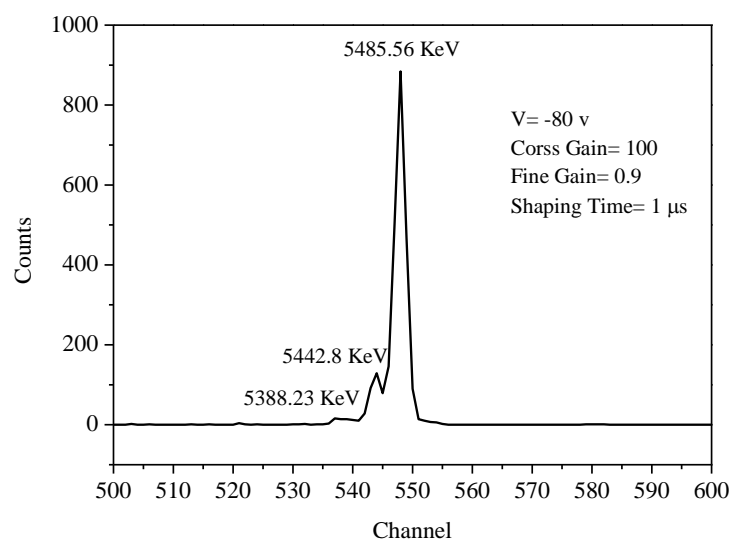
$$3.42983E17 = \frac{2}{q\epsilon_s N_D} \rightarrow N_D = \frac{2}{1.62E-19 \times 3.42983E17 \times 11.9 \times 8.85E-14} = 3.4178433E13 \text{ 1/cm}^3$$

و لذا:

$$\rho = \frac{1}{N_a q \mu_p} = \frac{1}{3.4178433E13 \times 1.62E-19 \times 450} = 401.35 \Omega \cdot \text{cm}$$

که همخوانی قابل توجهی با مشخصات اولیه‌ی ویفر دارد، اینکه میزان مقاومت ویژه‌ی استخراج شده از مشخصات الکترونیکی دیود ساخته شده در حد پایین مشخصه‌ی کارخانه‌ای ویفر (جدول (۱)) بدست آمده است، نشان دهنده‌ی ایجاد نواقص بلوری و کاهش میزان مقاومت ویژه اولیه‌ی ویفر در طی فرآیند ساخت آشکارساز می‌باشد.

به منظور آشکارسازی ذرات باردار آلفا، فوتودیود سیلیکونی PIN تحت بایاس معکوس و شرایط خلا  $10^{-4}$  Torr تحت تابش ذرات آلفا با انرژی ۵/۴۸ MeV از چشمه  $^{241}\text{Am}$  قرار گرفتند. در این حالت زوج الکترون - حفره‌هایی که بر اثر برخورد ذرات فرودی در ناحیه‌ی تخلیه ایجاد می‌شوند، توسط میدان الکتریکی موجود در این ناحیه جمع آوری شده و ایجاد یک پالس الکتریکی می‌نمایند. این پالس‌ها پس از تقویت، با توجه به شدت‌شان توسط دستگاه‌های الکترونیکی مخصوص (MCA) شمارش و نمایش داده می‌شوند. شکل (۷) طیف اندازه‌گیری شده‌ی آشکارساز سیلیکونی PIN را نشان می‌دهد.



شکل ۷. طیف ذرات آلفای ۵/۴۸ MeV از چشمه  $^{241}\text{Am}$  آشکارشده توسط آشکارساز سیلیکونی PIN دایروی با مساحت  $163 \text{ mm}^2$  تحت ولتاژ معکوس ۸۰ V.

با آنالیز طیف فوق توسط نرم افزارهای تحلیل گراف، FWHM این طیف ۱۶ keV بدست آمد که نشان دهنده‌ی قدرت تفکیک انرژی این آشکارساز در تمایز دو ذره‌ی آلفای فرودی با اختلاف انرژی ۱۶ keV از یکدیگر می‌باشد. همانگونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، آشکارساز ساخته شده ۳ پیک آلفای ساطع شده از چشمه‌ی  $^{241}\text{Am}$  با انرژی‌های ۵۴۸۵ keV و ۵۳۸۸ keV و ۵۴۴۲ keV را از یکدیگر تشخیص داده است.

### نتیجه گیری

در این مقاله نخست فرآیندهای بهینه‌ی ساخت یک فوتودیود سیلیکونی با ساختار PIN به کمک نرم افزار Silvaco استخراج گردید. در شبیه سازی‌ها سعی بر آن بود تا به فرآیند ساختی دست بیابیم که پروفایل نفوذ ناخالصی نهایی آن، نشان دهنده‌ی حداقل عمق نفوذ باشد. پس از انجام فرآیند ساخت، فوتودیودهای سیلیکونی PIN مورد اندازه‌گیریهای I-V و C-V

قرار گرفتند. جریان نشتی اندازه‌گیری شده برای یک فوتودیود با سطح ناحیه‌ی حساس دایره‌ای به قطر  $14/4$  mm حدود  $5 \mu A$  در ولتاژ  $200$  V - بدست آمد. با اندازه‌گیری ظرفیت خازنی فوتودیودها در ولتاژهای معکوس مشخص گردید که پهنای ناحیه‌ی تخلیه در ولتاژ  $25$  V - در تمام ضخامت دیودها گسترده می‌شوند و ولتاژ کاری آشکارسازهای طراحی شده می‌بایست بالای این مقدار انتخاب گردد. همچنین مقدار نهایی مقاومت ویژه‌ی بستر سیلیکونی مورد استفاده در ساخت این فوتودیودها با کمک اندازه‌گیری C-V محاسبه گردید، این مقدار معادل  $401/35 \Omega.cm$  بدست آمد که با توجه به مشخصات اولیه‌ی ویفر مورد استفاده، نشان دهنده‌ی افزایش نواقص و آلودگی‌های ایجاد شده طی فرآیند ساخت می‌باشد. در آشکارسازی تابش آلفا با انرژی  $5/48$  Mev از چشمه‌ی  $^{241}Am$  قدرت تفکیک انرژی آشکارسازهای ساخته شده  $16$  keV بدست آمد.

## منابع

- [1] Van Heerden, P.J., The Crystal Counter, Dissertation, Utrech University, (1945).
- [2] Frame PW., "A History of Radiation Detection Instrumentation", Health Phys., 88(2005)613-37.
- [3] Owens, A., Peacock, A., "Compound Semiconducto Radiation Detectors", Nucl. Instr. And Meth. A, 531 (2004) 18-37.
- [4] J. Kemmer, "Fabrication of Low Noise Sillicon Radiation Detectors by the Planar Process", Nucl. Instr. And Meth., 169 (1980) 499-502.
- [5] C. Fleta et al., "Simulation and test of 3D silicon radiation detectors", Nucl. Instr. and Meth. A, 579 (2007) 642-647.
- [6] Zheng Li, H.W.Kraner, "Studies of Dependence on Oxidation Thermal Processes of Effects on the Electrical Properties of Silicon Detectors by Fast Neutron Radiation", IEEE Nucl. Sci. Sym., (1991).
- [7] Han Soo Kim, Se Hwan Park and Jang Ho Ha, "Design and Fabrication of a Si PIN-type Radiation Detector for Alpha Spectroscopy", J. Korean Phys. Soc., 55 (2009) 454-458.
- [8] D. Nikolić, A. Vasić, I. Fetahović, K. Stanković, P. Osmokrović, "Photodiode Behavior in Radiation Environment", Appl. Math. Inform. and Mech. 3 (2011) 27-34.
- [9] G. Hall, "Semiconductor particle tracking detectors", Rep. Prog. Phys. 57 (1994) 481-531.
- [10] Michael R. Squillante, James F. Christian, Mickel McClish, "Recent Advances in Large Area Silicon Avalanche Photodiodes for Particle Detection", Quarterly Physics Review, 4 (2018) 1-13.
- [11] Kwang Hyun KIM, Jin-Hyoung BAI, Joo Ho WHANG, In sub JUN, "Development of Alpha Detector Module based on Large Area PIN Photodiode", Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, 5 (2008) 417-420.

[12] V. Mishra, V. D. Srivastava, S. K. Kataria, "Role of Guard Rings in Improving the Performance of Silicon Detectors", Indian Academy of Sciences, 65 (2005) 259-272.

[13] Sangeeta Das, Arghya Chakraborty et al, "Silicon PIN Diode for detection of electrons, alphas, X-rays and gamma rays", Proceedings of the DAE-BRNS Symp. on Nucl. Phys. 60 (2015) 976-977.

[۱۴] محمد دارایی، محمداسماعیل عظیم عراقی، ماهیار نوشیروانی، "بررسی عملکرد آشکارساز نیم عایق گالیوم آرسناید (GaAs) برای آشکارسازی ذرات آلفا"، نشریه علوم دانشگاه خوارزمی تهران، جلد ۶، شماره ۳، ۴، (۱۳۸۵)، ۸۲۷-۸۳۴.

[15] G. K. Celler, D. L. Barr, J. M. Rosamilia, "Etching of Silicon by RCA Standard Cleaning", Electrochem. Solid-State Lett., 3 (2000) 47-49.

[16] M. Moradi, M. Daraee, et al, "Optimum Concentration of InSb Photodiode for Minimum Low Reverse Bias Leakage Current ", Ukr. J. Phys. 55 (2010) 422-425.

[17] S. Srivastava, R. Henry, A. Topka R, "Characterization of Pin Diode Silicon Radiation Detector", Journal on Intelligent Electronic Systems, 1 (2007) 47-51.

[18] Glenn F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement", Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., (2000), chapter 11, page 375.

# Design and Fabrication of a Silicon PIN Diode for Alpha Radiation Detection

M. Daraee\*<sup>1</sup>, M.A. Azim Araghi<sup>2</sup>, M. Sadeghi<sup>3</sup>, A. Hashemizadeh<sup>1</sup>

1. Faculty of Science, Physics Department, Payame Noor University, P.O.Box: 19395-3697, Tehran-Iran

2. Faculty of Science, Physics Department, Kharazmi University, P.O.Box: 14115-175, Tehran-Iran

3. Department of Medical Physics, School of Medicine, Iran University of Medicine Science, P.O.Box: 14155-6183, Tehran-Iran

## Abstract:

In this article, The silicon-based PIN-type photodiode were designed and fabricated for alpha radiation detection. The energy resolution is one of the most important parameters in this type of detectors; the increase in energy resolution depends on the reduction of the fabricated photodiode dark leakage current. So one of the most important goals in this research is Design and Fabrication of photodiode with low leakage current and high energy resolution. The C-V and I-V electrical tests and the <sup>241</sup>Am alpha spectrum measurement are carried out after the completion of the manufacturing process and an excellent spectral response was observed.

**Keywords:** Radiation detector, Silicon PIN photodiode, I-V, C-V characteristics, Spectral response