

طراحی، شبیه‌سازی و ساخت یک نمونه آزمایشگاهی باتری

نیمه‌هادی فوتو-بتا ولتائیک

حسین صادقی^۱، سید مجتبی مستجاب‌الدعواتی^۲، اکبر اسحاقی^۳، داوود رهی^۴، حسین ذکی دیزجی^{۵*}

۱-۳- دانشیار دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر اصفهان، ۲- دانشیار، ۴- دانشجوی دکتری دانشگاه اصفهان، ۵- استادیار دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۵/۱۱/۲۶، پذیرش: ۹۶/۰۳/۰۹)

چکیده

روش‌های متعددی برای تبدیل انرژی ذرات واپاشی بتا به انرژی الکتریکی وجود دارد. تبدیل انرژی ذرات بتا به انرژی الکتریکی با استفاده از قطعات نیمه‌هادی، یکی از روش‌های مهم تبدیل انرژی واپاشی است که در باتری‌های رادیوایزوتوپی به کار برده می‌شود. در این تحقیق، یک باتری نیمه‌هادی فوتو-بتا ولتائیک طراحی و ساخته شده است. این باتری ساخته شده، انرژی خورشیدی و انرژی پرتوهای بتا را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. فرآیند آرایش سیلیکون برای ساخت دیود p-i-n بررسی و انجام شده که شامل نفوذ آلاینده‌ها در دمای 1000°C ، آنالیز SEM، محاسبه میزان آرایش، محاسبه عمق نفوذ و بررسی مقاومت الکتریکی سطح سیلیکون آلاینده شده است. در حضور پرتوهای بتای گسیلی از چشمه $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ($58 \mu\text{Ci}$)، جریان بتا ولتائیک اندازه‌گیری شده برابر با 50 pA گردید. باتری مورد استفاده در آزمایشگاه، با کد مونت کارلو MCNP5 شبیه‌سازی شد و جریان الکتریکی 45.2 pA به دست آمد. نتایج شبیه‌سازی و تجربی توافق بسیار خوبی دارند. همچنین این باتری ساخته شده به نور مرئی هم پاسخ می‌دهد و حساسیت آن قابل قیاس با سلول‌های نوری است.

کلید واژه‌ها: ذرات بتا، باتری فوتو-بتا ولتائیک، آرایش نیمه‌هادی، رادیوایزوتوپ، شبیه‌سازی

Design, Simulation and Fabrication of Photo-Betavoltaic Semiconductor Battery

H. Sadeghi, S.M. Mostajabbodavati, A. Eshaghi, D. Rahi, H. Zaki Dizaji*

Imam Hossein University

(Received: 14/02/2017; Accepted: 30/05/2017)

Abstract

There are many methods for converting the beta particle energy to electrical energy. Conversion of the beta particle energy to the electrical energy using semiconductors, is one of the important methods that can be used in radioisotopic batteries. In this work, a photo-betavoltaic semiconductor battery has been designed and constructed. The battery produce electric energy by converting photon energy from the sun or kinetic energy of beta particles. Doping process of silicon to fabrication of the p-i-n diode has been investigated. Thus, diffusion of dopants in 1000°C , SEM analysis, calculation of doping concentration, calculation of the diffusion depth and electric resistance of the doped silicon have been investigated. The measured betavoltaic current was 50 pA for a $58 \mu\text{Ci}$ $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$. The photo-betavoltaic battery has been simulated by Monte-Carlo MCNP5 code and 45.2 pA electric current has been obtained. A fairly good agreement was observed between experimental and numerical results. Also, this battery is responds to visible light, sensitivity of which is comparable with the sun cells.

Keyword: Beta Particles, Photo-Betavoltaic Battery, Doping of Semiconductor, Radioisotope, Simulation

* Corresponding Author E-mail: kpzaki@ihu.ac.ir

۱. مقدمه

شرایط بسیار سخت بدون هیچ مشکلی برای مدت زمان بسیار طولانی (در حدود چند سال) کار می‌کنند.

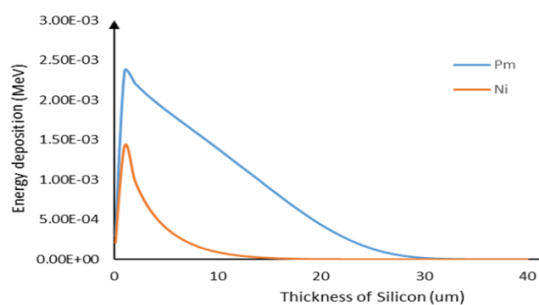
۳- این باتری‌های رادیوایزوتوپی در زیردریایی‌ها کاربرد داشته و نسبت به موتورهای دیزلی هیچ‌گونه سروصدایی تولید نمی‌کنند و هیچ نویزی در محیط پخش نمی‌شود.

۴- باتری‌های بتاولتائیک می‌تواند در قطعات میکروالکترونیک مثل حسگرهای دما، فشار و لرزش استفاده شوند.

۵- باتری‌های بتاولتائیک در مقایسه با باتری‌های سربی و لیتیومی دارای وزن پایین‌تر و چگالی انرژی بسیار بالاتر بوده و تحت هر شرایط محیطی تولید توان می‌نمایند. بنابراین این باتری‌ها در بیشتر موارد می‌تواند جایگزین بهتری برای باتری‌های معمول شوند.

۶- استفاده از باتری‌های بتاولتائیک در ضربان‌سازهای قلب که سابقه زیادی دارد.

نحوه کارکرد باتری بتاولتائیک به این صورت است که ذرات بتا بخشی از انرژی خود را در ناحیه تهی شده نیم‌رسانا ذخیره کرده و جفت الکترون-حفره تولید می‌شود. سپس این جفت الکترون-حفره‌ها، توسط میدان الکتریکی داخلی بین ناحیه n و p جمع‌آوری می‌شود [۷-۱۰]. انرژی ذخیره شده و جفت الکترون-حفره به انرژی ذره بتا و نوع ماده نیم‌رسانا بستگی دارد. در شکل (۱) انرژی واگذاشته شده از بتاهای چشمه نیکل-۶۳ و پرومیتیم-۱۴۷ بر حسب ضخامت ماده سیلیکون نشان داده شده است [۴].



شکل ۱. انرژی واگذاشته شده توسط چشمه نیکل-۶۳ و پرومیتیم-۱۴۷

در نیم‌رسانا سیلیکون بر حسب ضخامت نیم‌رسانا به منظور افزایش بازده و عملکرد پایدار، مواد و ساختارهای مختلفی برای باتری‌های رادیوایزوتوپی بتاولتائیک استفاده می‌شود [۱۱-۱۳]. با توجه به محدودیت تجهیزات داخل کشور، ساختار تخت دیود نیمه‌هادی سیلیکونی انتخاب شده است. در این تحقیق، فناوری باتری نیمه‌هادی فوتو-بتاولتائیک در داخل کشور اثبات شده است. یک دیود $p-i-n$ سیلیکونی طراحی شده و بعد از شبیه‌سازی هسته‌ای، نمونه آزمایشگاهی باتری ساخته شده و عملکرد آن ارزیابی شده است. این باتری نیمه‌هادی ساخته شده هم به نور مرئی و هم به ذرات بتا حساس بوده و توان الکتریکی تولید می‌نماید.

استفاده از قطعات و ابزارهای الکترونیکی در حوزه‌های مختلف، رشد و توسعه زیادی داشته و امروزه اغلب جوانب زندگی بشر به تجهیزات الکترونیکی وابسته بوده و انتظار می‌رود این وابستگی در آینده هم بیشتر شود. حیات و عملکرد تجهیزات الکترونیکی به یک منبع توان الکتریکی مناسب وابسته است. مشخصات یک منبع توان مناسب با توجه به نوع کاربرد آن مشخص می‌شود. گستردگی کاربردها منجر به تنوع منابع توان شده است.

با توجه به فناوری کوچک‌سازی ابزارها و تجهیزات و دائمی بودن استفاده از آن‌ها، تقاضا برای باتری‌هایی با حجم و وزن کم و توان پایین، روز به روز در حال افزایش است. بسیاری از فعالیت‌های علمی بر روی باتری‌هایی با وزن پایین و چگالی انرژی بالا تمرکز یافته‌اند. بنابراین منبع توان با چگالی انرژی بالا که برای مدت طولانی ولتاژ و جریان پایدار فراهم کرده و در ضمن حجم و وزن کمی داشته باشد، اولویت زیادی دارد. از بین منابع توان مختلف، باتری‌های رادیوایزوتوپی گزینه مناسبی برای این منظور هستند [۱].

در دنیا باتری‌های رادیوایزوتوپی سابقه زیادی داشته و باتری بتاولتائیک اولین نمونه از این نوع باتری‌ها است. در این باتری، یک قطعه فوتوسل سلنیومی را در معرض تابش ذرات بتا قرار داده شده و انرژی الکتریکی تولید شد [۲]. باتری‌های بتاولتائیک از کنار هم قرار دادن یک چشمه بتا و یک پیوند نیمه‌رسانای شاکتی، $p-i-n$ یا $p-n$ تشکیل می‌شود. در داخل کشور فعالیت‌های در چند سال اخیر در این زمینه صورت گرفته است که در قالب پروژه تحقیقاتی و پایان‌نامه‌های دانشجویی بوده و بیشتر شامل شبیه‌سازی و طراحی بوده و به بلوغ نرسیده است [۳ و ۴]. در این مقاله به ساخت نمونه آزمایشگاهی و کار تجربی پرداخته می‌شود. یک سلول باتری بتاولتائیک دارای توانی از مرتبه نانووات یا میکرووات و چگالی انرژی ۱۰ تا ۱۰۰ برابر باتری‌های لیتیومی است. مزایای باتری‌ها بتاولتائیک شامل چگالی انرژی و طول عمر بالا، دوام‌پذیری در شرایط محیطی سخت، حجم و وزن کم هستند. برای مثال چند مورد از کاربردهای باتری‌های بتاولتائیک در زیر بیان شده است [۱، ۵ و ۶]:

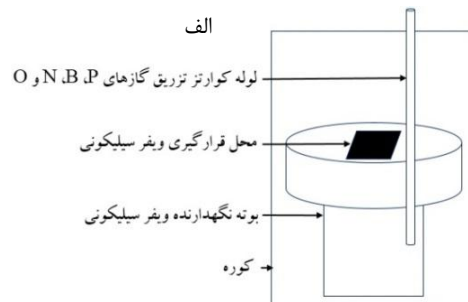
۱- فضاپیماهایی که در فاصله بسیار زیادی از خورشید قرار دارند و سلول‌های خورشیدی آن‌ها قادر به تولید توان الکتریکی کافی نمی‌باشند و یا سلول‌های خورشیدی در اثر تابش‌های کیهانی تخریب شده و دچار افت توان شده‌اند، می‌توان از باتری‌های رادیوایزوتوپی به عنوان یک منبع انرژی جایگزین استفاده نمود.

۲- از اینگونه باتری‌ها می‌توان به عنوان شنود کننده در کف دریا و در عمق‌های بسیار زیاد یا سامانه‌های دارای اتصال بی‌سیم که به عنوان هشدار دهنده است، استفاده کرد. اینگونه باتری‌ها در

۲. روش تحقیق

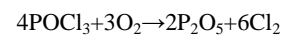
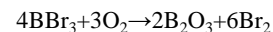
۲-۱. آلیش سیلیکون با فسفر و بور

در این مرحله، آلیش ویفر سیلیکونی مطابق شکل های (۲-الف) و (۲-ب) انجام پذیرفت. ویفر سیلیکونی مورد استفاده تک کریستال و با درجه خلوص ۹۹/۹۹۹٪ و جهت (۱۰۰) است. ویفر سیلیکونی به مدت ۱۲۰ دقیقه برای هر بار آلیش فسفر یا بور، در دمای ۱۰۰۰ °C نگه داشته شده است.



شکل ۲. الف) نحوه قرارگیری ویفرهای سیلیکونی در کوره اتمسفر کنترل استوانه‌ای و آلیش آن‌ها با بور و فسفر (ب) نمایی از داخل کوره برای آلیش سیلیکون

هنگامی که دما به ۸۰۰ °C می‌رسد، گاز فسفر یا بور در هر مرحله همراه با گاز N_2 و O_2 از طریق لوله کوارتزی وارد بوتله نگه دارنده ویفر سیلیکونی می‌شود. در زیر محل قرارگیری ویفر سیلیکونی، یک حفره در حد و اندازه خود ویفر قرار دارد که بور و فسفر بتواند روی سطح سیلیکون بنشیند و فرآیند آلیش سیلیکون انجام شود. در داخل بوتله با دمای بسیار بالا، فرآیندهای شیمیایی زیر انجام می‌شود:

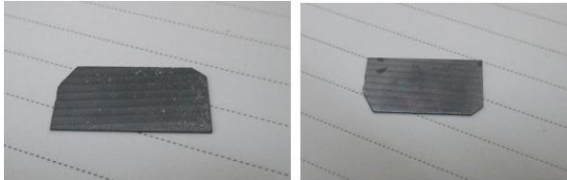


گاز N_2 به عنوان یک حامل عمل می‌نماید. فسفر و بور هم به خاطر دمای بسیار بالای محیط، به داخل سیلیکون کریستالی نفوذ می‌کند. گاز کلر و برم هم به همراه گاز نیتروژن از محیط خارج می‌شود. زیرا دو بوتله مورد استفاده برای نگه داشتن ویفر سیلیکونی به طور عمد به خوبی آب‌بندی نشده است تا گازهای

اضافی بتواند از سامانه خارج شود. آنالیز تأثیر B_2O_3 و P_2O_5 بر روی سطح سیلیکون، در ادامه آورده شده است.

۲-۲. آنالیز SEM

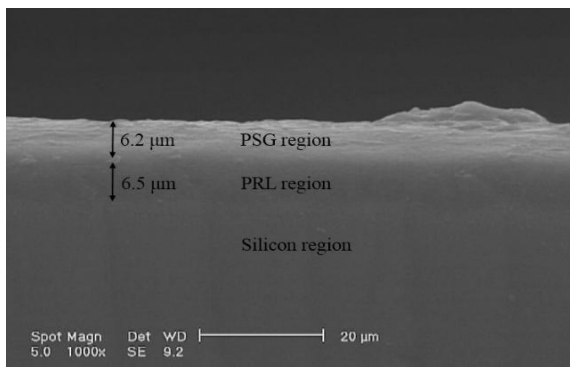
در شکل (۳) ویفرهای سیلیکونی پس از آلیش با فسفر و بور در کوره نشان داده شده‌اند. برای درک بیشتر از سطح سیلیکون آلییده شده، از آن آنالیز SEM گرفته می‌شود.



شکل ۳. ویفر سیلیکونی سمت راست آلییده با بور و ویفر سیلیکونی سمت چپ آلییده با فسفر است

برای بررسی عمقی ویفر سیلیکونی نمایش داده شده در شکل (۳)، ویفر از وسط شکسته شد و از لبه‌های شکسته شده هر دو سطح نمایش داده شده در شکل (۳) آنالیز SEM گرفته شد و لایه‌های جدید اضافه شده قبل از لایه آلییده شده با فسفر و بور، بررسی شد. در شکل (۴)، لایه اول که بسیار روشن‌تر است، فسفر و سیلیکات‌گلاس ($SiO_2-P_2O_5$)^۱ است که شامل فسفر، سیلیکون و اکسیژن است [۱۲]. لایه دوم تیره‌تر از لایه اول و سوم است، لایه غنی از فسفر، PRL^۲ است که شامل فسفر و سیلیکون است. لایه سوم هم ابتدای آن سیلیکون آلییده شده با فسفر و بعد از آن هم سیلیکون خالص است [۱۴].

همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، ضخامت ناحیه‌های PSG و PRL به ترتیب ۶/۲ و ۶/۵ میکرومتر اندازه‌گیری شده است.



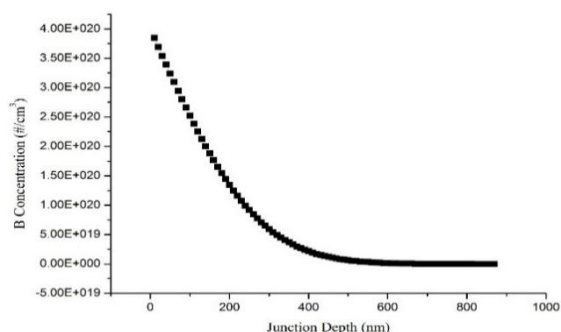
شکل ۴. ضخامت لایه‌های PSG و PRL به ترتیب ۶/۲ μm و ۶/۵ μm

از طرفی دیگر برای نمونه آلییده شده با بور (شکل ۵)، وجود سه ناحیه به خوبی مشهود است. ناحیه اول که به شدت سبک‌تر از دو ناحیه دیگر به نظر می‌رسد، همان بورسیلیکات‌گلاس

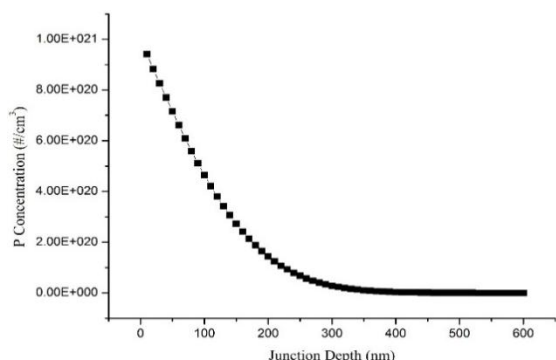
^۱ Phosphorus Silicate Glass

^۲ Phosphorus Rich Layer

هستند. مقدار D برای فسفر و بور به ترتیب برابر با 10^{-14} (cm^2/s) و 1.1×10^{-14} (cm^2/s) است. همچنین مقادیر C_s برای فسفر و بور به ترتیب برابر با 10^{21} (atom/cm^3) و 4×10^{20} (atom/cm^3) است. میزان عمق نفوذ آلاییده برابر است با مکانی که کمیت C برابر با 10^{16} atom/cm^3 می‌شود. بنابراین، عمق نفوذ برای بور برابر با $0.78 \mu\text{m}$ و برای فسفر $0.6 \mu\text{m}$ خواهد بود. البته به این نکته توجه شود که ویفر سیلیکونی ابتدا با بور آلاینده شده و سپس با فسفر آلاینده شده است، مدت زمان نفوذ برای بور ۴ ساعت و برای فسفر ۲ ساعت است.



شکل ۶. پروفایل تغییرات میزان آلیش B بر حسب عمق در سیلیکون در مدت زمان ۴ ساعت در دمای 1000°C



شکل ۷. پروفایل تغییرات میزان آلیش P بر حسب عمق در سیلیکون در مدت زمان ۲ ساعت در دمای 1000°C

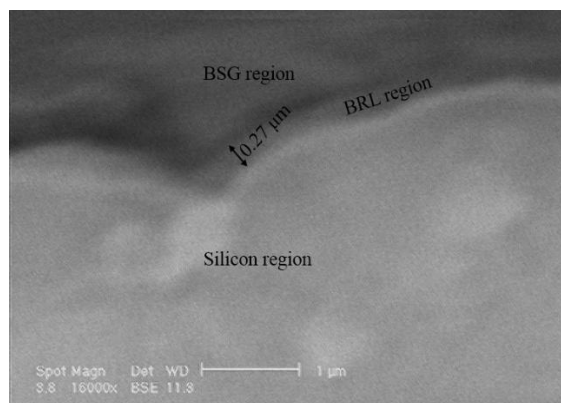
۴-۲. بررسی کیفی مقاومت الکتریکی

یکی از راه‌های تخمین میزان آلیش سیلیکون با بور و فسفر، اندازه‌گیری کیفی مقاومت الکتریکی سطح آلاینده شده است. زیرا با افزایش میزان آلیش، رسانندگی آن سطح افزایش می‌یابد.

برای این منظور ابتدا یک ویفر خام سیلیکونی با اسید HF و غلظت ۲٪ به مدت ۲۵ دقیقه شستشو و سونش داده و سپس با گاز نیتروژن خالص خشک شد. مقاومت الکتریکی سطحی $k\Omega$ ۷۰ اندازه‌گیری شد. فرآیند سونش به این خاطر انجام شد که لایه اکسید SiO_2 برداشته شود. چون یک عایق بسیار خوبی است.

($\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$) یا BSG^۱ است. این ناحیه شامل بور، اکسیژن و سیلیکون است. لایه دوم هم لایه غنی از بور یا BRL^۲ است [۱۴]. لایه سوم هم سیلیکون خالص است که ابتدای آن با بور آلاینده شده است.

ضخامت لایه BRL فقط قابل اندازه‌گیری است و حدوداً برابر با $0.27 \mu\text{m}$ است. به علت نازکی لایه BSG، ضخامت آن قابل اندازه‌گیری نبود.



شکل ۵. ضخامت لایه BRL برابر با $0.27 \mu\text{m}$

۳-۲. میزان آلیش و عمق نفوذ

ابعاد ویفر مورد استفاده در این تحقیق برابر با $1.75 \times 1.33 \text{ cm}^2$ و ضخامت بیش از $200 \mu\text{m}$ است.

میزان نفوذ یا پخش در یک ماده، از قانون فیک به‌دست می‌آید [۱۵].

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

جواب معادله (۱) برابر است با:

$$C(x,t) = C_s \operatorname{erfc} \left\{ \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right\} \quad (2)$$

که در آن، t زمان بر حسب ثانیه، x عمق نفوذ بر حسب cm ، D ، C_s و C هم به ترتیب ضریب پخش، میزان انحلال‌پذیری جامد^۳ و میزان آلیش زمینه^۴ از قبل موجود در سیلیکون است که حدوداً از مرتبه $10^{16} \text{ atom}/\text{cm}^3$ برای انواع تجاری موجود در بازار می‌باشد.

در معادله (۲)، نمودار C بر حسب x ترسیم می‌شود (شکل های ۶ و ۷). زیرا کمیت‌های t ، D و C_s دارای مقادیر ثابتی

^۱ Boron Silicate Glass

^۲ Boron Rich Layer

^۳ Solid Solubility

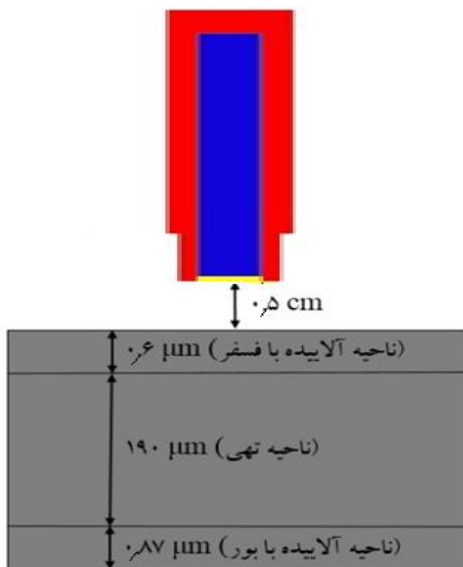
^۴ Background Doping

دو ناحیه p و n افزایش می‌یابد. این به معنای برداشته شدن نواحی آلاینده شده است. بنابراین مدت زمان مناسب برای اسیدشویی حداقل ۳ دقیقه و حداکثر ۷ دقیقه است.

البته ذکر یک نکته لازم است که مقاومت الکتریکی سطوح آلاینده شده به طور کیفی بررسی شد. بنابراین رابطه بین میزان آلاینش و مقاومت سطحی را در اینجا به طور دقیق نمی‌توان تخمین زد.

۲-۵. شبیه‌سازی

کد مونت کارلو MCNP5 برای شبیه‌سازی هسته‌ای استفاده شد. ضخامت ویفر سیلیکونی در ابتدا بیش از $200 \mu\text{m}$ بود که در حین فرآیند اسیدشویی ضخامت آن به $191 \mu\text{m}$ رسیده بود. بنابراین با احتساب نواحی آلاینده شده ضخامت ناحیه تهی به $190 \mu\text{m}$ می‌رسد. چشمه بتا $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ و دیود p-i-n سیلیکونی به مساحت یک سانتی‌متر مربع و ضخامت ناحیه تهی $190 \mu\text{m}$ شبیه‌سازی شد (شکل (۱۰)). برای محاسبه انرژی جذب شده از تالی F8* در کد MCNP5 استفاده شد. اندازه‌های نواحی مختلف دیود که در قسمت تجربی به‌دست آمده بود در بخش شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت.



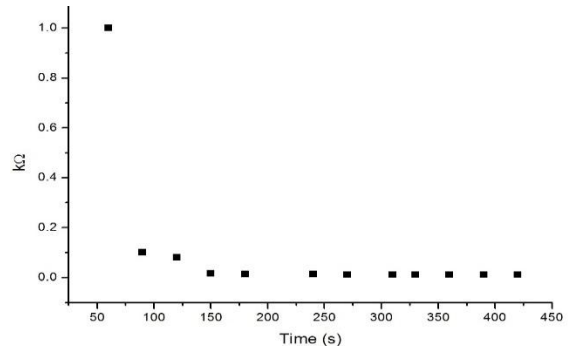
شکل ۱۰. هندسه مورد استفاده در شبیه‌سازی بتاولتائیک شامل چشمه و دیود

۳. نتایج و بحث

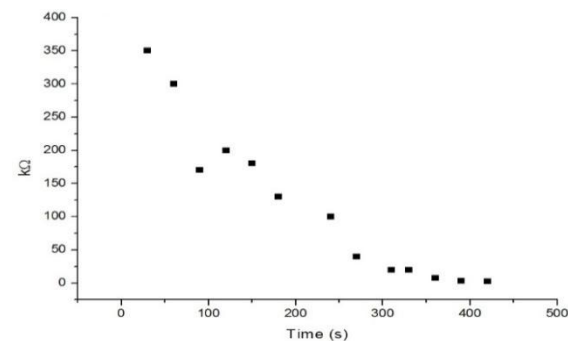
۳-۱. مشاهده اثر فوتوولتائیک در p-i-n ساخته شده

اتصالات الکتریکی با استفاده از چسب نقره به ویفر سیلیکونی آلاینده شده در شکل (۳) پس از شستشو در اسید HF با غلظت ۲٪، چسبانده شد. ولتاژ و جریان الکتریکی سلول فوتوولتائیک ساخته شده در اثر جذب نور سفید مرئی حاصل از یک LED

در ادامه، ویفر آلاینده شده با فسفر و بور، با اسید HF با همان غلظت شستشو داده و با گاز نیتروژن خشک شده و مقاومت سطحی آن اندازه‌گیری شد (شکل های ۸ و ۹).



شکل ۸. بررسی کیفی مقاومت الکتریکی سطحی ویفر سیلیکونی آلاینده شده با بور در اثر شستشو با اسید HF با غلظت ۲٪



شکل ۹. بررسی کیفی مقاومت الکتریکی سطحی ویفر سیلیکونی آلاینده شده با فسفر در اثر شستشو با اسید HF با غلظت ۲٪

شکل‌های (۸) و (۹) همبستگی بسیار خوبی با نتایج آنالیز SEM دارد. برای سطح آلاینده شده با بور مشاهده می‌شود که در ابتدای اسیدشویی مقاومت الکتریکی بسیار بالا است و با اسیدشویی‌های مداوم، لایه‌های BSG و BRL برداشته می‌شود. در ادامه، رسانندگی لایه افزایش می‌یابد و به مقدار ثابتی می‌رسد. این رسانندگی حتی بعد از ۷ دقیقه اسیدشویی هم حفظ می‌شود. همچنین برای لایه آلاینده شده با فسفر مشاهده می‌شود که در ابتدا مقاومت الکتریکی به خاطر لایه‌های PSG و PRL بسیار بالا است. با اسیدشویی‌های مداوم لایه PSG برداشته می‌شود. نکته جالب این است که با اسیدشویی‌های مداوم، مقاومت الکتریکی لایه آلاینده شده با فسفر در مقایسه با لایه آلاینده شده با بور خیلی آهسته و با شیب کند کاهش می‌یابد. علت آن هم در نتایج SEM به خوبی مشهود است. زیرا در مورد آلاینده شده با فسفر، لایه‌های PSG و PRL بسیار ضخیم هستند. بنابراین برداشته شدن این دو لایه بسیار زمانبر است.

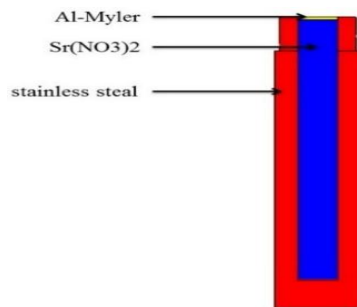
همچنین بعد از اتمام کامل آزمایش‌ها و حصول تمام نتایج، برای اطمینان از صحت و دقت اسیدشویی، دیود ساخته شده برای مدت زمان ۲۰ دقیقه اسیدشویی شد و مشاهده شد که اگر اسیدشویی بیش از این ادامه یابد، مقاومت الکتریکی سطحی هر

بازده ذاتی به‌دست آمده برای سامانه با استفاده از شبیه‌سازی MCNP5 برابر با ۱/۴۶٪ به‌دست آمد. البته بازده به‌دست آمده برای یک کار مشابه با یک دیود به مراتب بزرگ‌تر از دیود ساخته شده و چشمه‌ای با فعالیت ۵۰ mCi یعنی ۸۶۰ برابر قوی‌تر از چشمه موجود و به صورت تخت، برابر با ۰/۲٪ گزارش شده است [۲].

در مقایسه با یک کار مشابه [۲]، بازده مطلق کمتری به‌دست آمده است، علت آن هم استفاده از یک دیود کوچک‌تر و یک چشمه بتازای بسیار ضعیف‌تر است. همچنین، یک عامل بسیار تأثیرگذار در بالا بردن بازده مطلق باتری بتاولتائیک، استفاده از یک چشمه تخت است که چشمه مورد استفاده در آزمایشگاه به صورت میله‌ای بود که در مقایسه با نوع تخت، شار بتای خروجی مؤثر بسیار کمتری دارد. زیرا در هندسه تخت برای چشمه بتازا، کمترین تضعیف برای پروتوهای بتا رخ می‌دهد، ولی برای چشمه بتازا با هندسه میله‌ای، تضعیف پروتوهای بتا قابل توجه است.

۳-۳. نتایج شبیه‌سازی هسته‌ای

در فرآیند شبیه‌سازی، طیف انرژی حاصل از چشمه $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ استوانه‌ای به طول ۹ mm، قطر ۱ mm و با فعالیت $58 \mu\text{Ci}$ را با استفاده از کد MCNP5 به‌دست آمد که هندسه آن در شکل (۱۲) نمایش داده شده است.



شکل ۱۲. نمایی از مدل چشمه $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ با فعالیت $58 \mu\text{Ci}$

توزیع طیف انرژی ذرات بتاهای تولید شده توسط این چشمه در دیگر مراجع بحث شده است که خواننده محترم می‌تواند برای مطالعات بیشتر به مرجع مربوطه رجوع کند [۱۶].

آهنگ جذب انرژی بتای گسیلی از چشمه توسط دیود p-i-n سیلیکونی در ناحیه تهی، برابر با 1068 MeV/S به‌دست می‌آید. انرژی لازم برای تولید هر الکترون حفره برابر با $3/78$ الکترون‌ولت است. بنابراین جریان تولیدی برابر است با [۱۶]:

$$I = \frac{1068(\text{MeV}) * 1.6e-19(\text{A})}{3.78(\text{eV})} = 4.52e-11(\text{A}) \quad (4)$$

اگر فرض شود که تمام الکترون‌های تولیدی بدون هیچ‌گونه بازترکیبی توسط میدان الکتریکی داخلی جمع‌آوری شوند،

تجاری، در حدود 160 mV و $3/5 \mu\text{A}$ مشاهده شد. یک سلول خورشیدی تجاری ساخت شرکت Chron با مساحت ۳ برابر و اتصالات الکتریکی بسیار مناسب‌تر و تحت همان شرایط نوری، با اندازه‌گیری‌های انجام شده، ولتاژ 500 mV تولید می‌کند (شکل (۱۱)). مساحت نمونه تجاری سه برابر نمونه ساخته شده بوده و نسبت ولتاژ خروجی آن‌ها نیز در این حدود است. یعنی ولتاژ خروجی به ازای واحد سطح برای سلول فوتولتائیک تجاری و سلول ساخته شده نزدیک هم هستند. بنابراین در میدان تابش نور مرئی، بازده دیود p-i-n ساخته شده، قابل مقایسه با دیودهای تجاری موجود در بازار است.



شکل ۱۱. ولتاژ تولیدی حاصل از نمونه آزمایشگاهی دیود p-i-n ساخته شده

۳-۲. مشاهده اثر بتاولتائیک

برای بررسی اثر بتاولتائیک، از یک تقویت کننده آنالوگ با بهره تقویت ولتاژ 10^6 ولت و جریان الکتریکی 10^{12} آمپر (ساخت شرکت Leybold) و یک چشمه $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ با فعالیت $58 \mu\text{Ci}$ استفاده شد. چشمه بتازای $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ جلوی قطعه نیمه‌های ساخته شده قرار داده شد و ولتاژ و جریان بتاولتائیک خالص اندازه‌گیری شده به ترتیب $100 \mu\text{V}$ و 50 pA گردید. همچنین بدون حضور چشمه، ولتاژ و جریان الکتریکی به ترتیب برابر با $20 \mu\text{V}$ و 10 pA ثبت شد. میزان خطای اندازه‌گیری‌ها با چند بار تکرار، ۸٪ است. اندازه‌گیری‌ها در تاریکی بسیار خوبی انجام شد و امکان عکس‌برداری از اندازه‌گیری‌ها وجود نداشت. اگر نور مرئی در محیط برای عکس‌برداری وجود داشته باشد، جریان فوتولتائیک ایجاد می‌شود که با جریان بتاولتائیک همراه شده و امکان اندازه‌گیری دقیق جریان بتاولتائیک از بین می‌رود.

توان خروجی این باتری بتاولتائیک برابر با 5 fW به‌دست می‌آید. از طرف دیگر، آهنگ انرژی خروجی از چشمه $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ، $0/245 \text{ nW}$ است که با استفاده از روش مونت‌کارلو محاسبه شده است. برای محاسبه بازده مطلق سامانه، آهنگ انرژی خروجی را به توان خروجی باتری بتاولتائیک نسبت داده می‌شود.

$$\text{Efficiency}(\%) = \left(\frac{5(\text{fW})}{0.245(\text{nW})} \right) \times 100 = 2.04 \times 10^{-3} \% \quad (3)$$

۵. مراجع

- [1] Wolff, P. A. "Theory of Electron Multiplication in Silicon and Germanium"; *Phys. Rev.* 1954, 95, 1415-1420.
- [2] Olsen, L. C. "Review of Betavoltaic Energy Conversion"; N94-11407, 1993, 94, 94-114.
- [3] Amirmazlaghani, M.; Zaki Dizaji, H. "Design and Simulation of the Radioisotopic Battery Based on the PtSi/Si Schottky Diode"; In Proc. of the Iranian Nuclear Conf. 2015, University of Esfahan, (In Persian)
- [4] Mirahmadi, J. "Study of Radiation-Electrical Converter Based on the Semiconductor Materials"; M.Sc. Thesis, University of Zanjan, 2015 (In Persian).
- [5] D Bao, R.; Brand, P. J.; Chrisey, D. B. "Betavoltaic Performance of Radiation-Hardened High-Efficiency Si Space Solar Cells"; *IEEE Trans. Electron. Dev.* 2012, 59, 1286-1294.
- [6] Wacharasindhu, T.; Nullmeyer, B. R.; Kwon, J. W.; Robertson J. D.; Garnov, A. Y. "Mechanisms Leading to Losses in Conventional Betavoltaics and Evolution: Utilizing Composite Semiconductor with Infused Radioisotope for Efficiency Improvement"; *J. Microelectromech. Sys.* 2014, 23, 56-65.
- [7] Flicker, N.; Loferski, J. J.; Elleman, T. S. "Construction of a Promethium-147 Atomic Battery"; *IEEE Trans. Electron Dev.* 1964, 11, 2-8.
- [8] Da-Yong, Q.; Wei-Zheng, Y.; Peng, G.; Xian-Wang, Y.; Bo, Z.; Lin, Z.; Hui, G.; Hong-Jian, Z. "Demonstration of a 4H SiC Betavoltaic Nuclear Battery Based on Schottky Barrier Diode"; *Chin. Phys. Lett.* 2008, 25, 37-48.
- [9] Wu, K.; Dai, C.; Guo, H. "A Theoretical Study on Silicon Betavoltaics Using Ni-63 In Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS)"; *IEEE Int. Conf.* 2011, 20, 724-727.
- [10] Trucchi, D. M.; Cappelli, E.; Lisi, N.; Ascarelli, P. "Feasibility of CVD Diamond Radiation Energy Conversion Devices"; *Diam. Relat. Mater.* 2006, 31, 1980-1985.
- [11] Bower, K. E.; Barbanel, Y. A.; Shreter, Y. G.; Bohnert G. W. "Polymers, Phosphors, and Voltaics for Radioisotope Microbatteries"; CRC Press, Florida, 2002
- [12] Kyuhak, O. "Modeling and Maximum Theoretical Efficiencies of Linearly Graded Alpha Voltaic Cells"; MSc Thesis, University of Missouri, 2011.
- [13] Yakubova, G. N. "Nuclear Batteries with Tritium and Promethium-147 Radioactive Sources"; Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana-Champaign, 2010
- [14] Phang, S. P.; Liang, W.; Wolpensinger, B.; Kessler, M. A.; Macdonald, D. "Tradeoffs between Impurity Gathering, Bulk Degradation, and Surface Passivation of Boron-Rich Layers on Silicon Solar Cells"; *IEEE J. Photovoltaics* 2013, 3, 261-266.
- [15] Doering, R.; Nishi, Y. "Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology"; Second Ed., CRC Press, 2008.
- [16] Sadeghi, H.; Mostajabodavati, S. M.; Eshaghi, A.; Rahi, D. "Design and Simulation of a Spherical Semiconductor to Construct a Beta-Voltaic Battery Using c-Si and a-Si:H Materials with Different Doping Concentration"; *J. Comput. Electr.* 2016, 15, 1577-1599.

حداکثر جریان الکتریکی تولیدی حاصل از جذب انرژی ذرات بتا در ناحیه تهی شده دیود طراحی شده، $45/2 \mu A$ به دست می‌آید. نکته جالب توجه این است که جریان الکتریکی شبیه‌سازی شده دارای توافق بسیار خوبی با جریان الکتریکی اندازه‌گیری شده است.

۴. نتیجه‌گیری

هدف اصلی از این تحقیق، اثبات فناوری فوتو-بتاولتائیک در مقیاس آزمایشگاهی، در ایران بود. با ساخت باتری نیمه‌هادی فوتو-بتاولتائیک، دانش فنی آن حداقل در این سطح کار در دسترس است. با توجه به نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی که با یکدیگر همخوانی خوبی دارند، دانش فنی و کار آزمایشگاهی به دست آمده را می‌توان برای دیگر مواد نیم‌رسانا با گاف انرژی بزرگ‌تر انجام داد و باتری هسته‌ای با توان و بازده بیشتری ساخت. زیرا با افزایش گاف انرژی، جریان نشستی دیود ساخته شده کاهش می‌یابد و در نتیجه بازده افزایش می‌یابد. همچنین توان تولیدی به طور مستقیم در ارتباط با ولتاژ است و ولتاژ تولیدی هم به طور مستقیم مرتبط با اندازه گاف انرژی نیمه‌رسانا است. علت بازده بسیار پایین باتری ساخته شده، به خاطر پرتوهای پرنانرژی خروجی از چشمه بتا است. زیرا انرژی میانگین بتاهای خروجی از این چشمه در حدود 580 keV است. برای توقف کامل ذره بتایی با این انرژی، سیلیکونی به ضخامت در حدود $1/2 \text{ mm}$ باید استفاده گردد. در حالی که ضخامت ویفر برابر با $0/2 \text{ mm}$ است و این ضخامت برای توقف پرتوهای بتا با انرژی حدود 180 keV مناسب است. این دیود با ناحیه حساسی در حدود $180 \mu m$ در حدود 15% از کل انرژی خروجی از چشمه به طرف باتری بتاولتائیک را می‌تواند جذب کند. از طرفی دیگر هم، چشمه به صورت میله‌ای است و از یک سر نازک به قطر 1 mm خارج می‌شود. بنابراین سهم بسیار کمی از بتاهای گسیلی از چشمه، شانس این را دارند تا به سمت باتری بتاولتائیک رفته و الکترون-حفره تولید نمایند. البته بازده ذاتی به دست آمده ($1/46\%$) برای سامانه با استفاده از شبیه‌سازی MCNP5 این نکته را تأیید می‌کند که کیفیت باتری ساخته شده مناسب است. ولی علت این که بازه مطلق بسیار پایین به دست آمد، وجود یک چشمه نامناسب است. نتایج به دست آمده از نمونه تجاری و نمونه ساخته شده در آزمایشگاه نشان می‌دهد کارایی و عملکرد فوتولتائیکی نمونه ساخته شده قابل قبول است. مدت زمان مناسب برای اسیدشویی دیود بعد از خروج از کوره، در حدود ۳ تا ۵ دقیقه می‌باشد. اتصالات استفاده شده در این باتری بسیار ساده و از نوع اهمی بود. در اتصالات اهمی سعی بر این بود که به طور مطلق در مسیر پرتوهای بتا نباشند. بنابراین در شبیه‌سازی باتری بتاولتائیک، اتصالات الکتریکی منظور نشده‌اند.