

شبیه سازی و طراحی باتری هسته ای بتاoltaئیک با استفاده از چشمه مایع Sr/Y90

امیر پوررستم^۱، سهیل حاجی بابا^۲، پیمان صفاپور^۳، حسین مؤیدی^{۱*}، حجت الله سلیمانی^۴، محسن مؤیدی^۵

۱. دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲. دانشکده فیزیک، دانشگاه تهران

۳. دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۴. دانشکده علوم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال

۵. دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

چکیده:

در این مقاله، یک باتری بتاoltaئیک با استفاده از رادیویزوتوپ استرانسیوم/یتریم ۹۰ (به صورت محلول) مورد مطالعه قرار گرفته و پارامترهای لایه نیمه رسانای این باتری پیشنهادی بهینه شده است. این پارامترها شامل ضخامت و غلظت ناخالصی های نیمه رسانا است. به منظور جلوگیری از آسیب رساندن محلول اسیدی به نیمه رسانا از یک لایه نازک محافظ بر روی آن استفاده شده است. برای محاسبه انرژی انباشته شده ذرات بتا و ایجاد الکترون-حفره ها در لایه نیمه رسانا، شبیه سازی توسط نرم افزار MCNP6 انجام شد و هر قسمت از ساختار پیشنهادی در شبیه سازی ها به قطعات بسیار کوچکتر تقسیم شده است. برای محاسبات خروجی نیمه رسانا از نرم افزار MATLAB استفاده شد و در نهایت انرژی انباشته شده، تعداد الکترون-حفره تولید شده در هر لایه، توان، ولتاژ مدار باز (V_{oc}) و چگالی جریان اتصال کوتاه (J_{sc}) باتری پیشنهادی در برابر تغییرات پارامتر اصلی ارائه شده است.

کلیدواژه‌ها: باتری هسته ای، بتاoltaئیک، مونت کارلو، استرانسیوم-۹۰

Simulation and Design of a betavoltaic nuclear battery using Sr/Y90 liquid source

Amir Pourrosta¹, Soheil Hajibaba², Payman Safapour³, Hosein Moayedi^{1*}, Hojjatollah Soleimani⁴, Mohsen Moayedi⁵

1. Department of Energy Engineering and Physics, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

2. Department of Physics, University of Tehran, Tehran, Iran.

3. Department of Physics, Khajeh Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

4. Faculty of Sciences, Islamic Azad University North Tehran branch, Tehran, Iran.

5. Department of Basic Science, Islamic Azad University Science and Research Branch

Abstract:

In this paper a betavoltaic nuclear battery using Sr/Y90 radioisotope (in solution form) has been investigated and the parameters of the semiconductor layer is optimized. This parameters include thickness and doping concentrations. In order to prevent acid solution from damaging the semiconductor, a thin protection layer is used. MCNP6 used for calculation of the deposited energy from beta particles and generated electron-hole pair in the semiconductor. For this purpose, each parts divided to smaller cells. MATLAB software was used for calculating the semiconductor output and as a final results the deposited energy, the number of electron-hole pairs in each layer, power, the open circuit voltage (V_{oc}) and the short circuit current density (J_{sc}) is presented versus the main parameter changes.

Keywords: Nuclear Battery, Betavoltaic, Monte Carlo, Sr90. ¹

۱. مقدمه

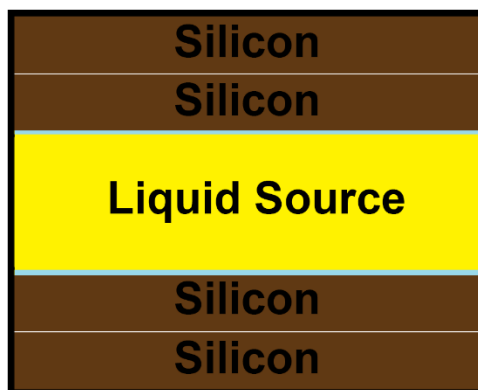
باتری های هسته ای دارای انواع مختلفی از جمله، بتاولتاییک، رادیوترموالکترونیک و رادیولومینسانس می باشد. باتری های بتاولتاییک منابع توان مستقلی هستند که انرژی پرتوی بتای گسیلی از ایزوتوپ های رادیواکتیو بتازا را به جریان الکتریکی تبدیل می کنند [۱]. یک دستگاه بتاولتاییک معمولی متشکل از یک لایه ماده گسیلنده ذرات بتا است که به آن چشمه رادیواکتیو گفته می شود و در مجاورت محل اتصال نیمه هادی P-N یا دیود شاتکی قرار گرفته است [۱، ۲]. هنگامی که مواد نیمه هادی توسط ذرات بتا با انرژی بالا بمباران می شوند، جفت الکترون حفره ها توسط اثر یونسازی ایجاد می شوند. از آنجا که میانگین انرژی جنبشی ذرات بتا مورد استفاده برای دستگاههای بتاولتاییک در مرتبه کیلو الکترون- ولت است، یک ذره بتا به تنهایی می تواند مسئول تولید چندین جفت الکترون حفره باشد. مشابه باتری فتولتاییک، جفت های الکترون حفره که در داخل ناحیه تخلیه ایجاد می شوند توسط میدان الکتریکی داخلی تفکیک شده و از هم دور می شوند. دستگاههای بتاولتاییک علی رغم شباهت عملکردی آنها با دستگاههای فتولتاییک، کاملاً محدود به کاربردهای کم مصرف هستند. در نتیجه، دستگاههای بتاولتاییک با چشمه های خالص بتا با فعالیت ۱-۱۰ میلی کوری، معمولاً جریان هایی به ترتیب نانوامپر تا میکروآمپر تولید می کنند که چندین مرتبه کوچکتر از جریان تولید شده توسط دستگاه های فتولتاییک با اندازه مشابه هستند [۳، ۴]. باتری هسته ای بتاولتاییک نوعی دستگاه تبدیل انرژی است که می تواند انرژی ذرات بتا را به انرژی الکتریکی تبدیل کند. یک باتری بتاولتاییک رایج از یک لایه چشمه پرتوزا و یک لایه نیمه رسانا تشکیل شده است که لایه نیمه رسانا توسط ذرات بتا بمباران می شود. پس از آن در لایه نیمه رسانا ذرات بتا باعث ایجاد جفت الکترون حفره ها می شوند و در آخر آن را به انرژی الکتریکی تبدیل می کند. در این مقاله محاسبه انرژی انباشته شده در لایه نیمه رسانا با استفاده از طیف کامل انرژی بتا (به جای انرژی متوسط ذرات بتا) توسط روش مونت کارلو بررسی شد. با توجه به عمر مفید باتری های بتاولتاییک (برای مثال عمر مفید باتری های بتاولتاییک با چشمه پرومیتیم-۱۴۷ ۱۰ سال می باشد [۵]) این باتری ها برای کاربردهای مختلف مانند سیستم های میکرو الکترومکانیکی (MEMS)، اکتشافات فضایی و نقاط دور از دسترس و غیره مناسب هستند. آرایش لایه نیمه رسانا، ماده رادیواکتیو، روش های آماده سازی و ساختار کلی باتری همه از عوامل موثر بر عملکرد نهایی این باتری هستند [۶، ۷]. برای این منظور، در این مطالعه ما یک باتری بتاولتاییک با استفاده از چشمه مایع طراحی می کنیم و پارامترهای آن را برای رادیوایزوتوپ استرانسیوم ۹۰ بهینه می کنیم.

۲. مواد و روش ها

ساختارهای مختلف آرایش باتری بتاولتاییک مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت، یکی از بهینه ترین ساختارها برای استفاده از چشمه مایع برای ساخت نمونه آزمایشگاهی انتخاب شد. چشمه مایع به صورت محلول استرانسیوم ۹۰ و هیدروکلرید اسید برای شبیه سازی ها انتخاب شده است که فرمول شیمیایی آن به صورت زیر می باشد.



ساختار نهایی انتخاب شده در شکل ۱ شرح داده شده است.



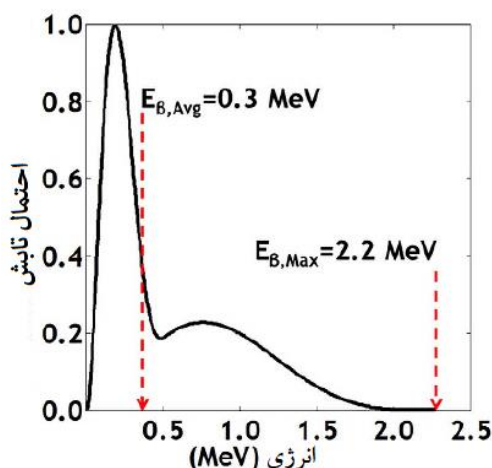
شکل ۱. ساختار کلی باتری پیشنهادی

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، این شکل مشخصات عمومی ساختار باتری بتاولتائیک است. که شامل یک چشمه بتازا و یک اتصال P-N (نیمه رسانا) است. علاوه بر آن از یک لایه سلفون (لایه آبی رنگ در شکل ۱) بر روی لایه نیمه رسانا به منظور آسیب نزدن اسید به آن، بر روی نیمه رسانا اضافه شده است. تصمیم گیری در مورد موضوعات مختلف از جمله چشمه مناسب، ترتیب لایه ها و همچنین خصوصیات نیمه هادی از جمله ضخامت و غلظت اتمهای ناخالصی از چالش های مهم در طراحی این باتری ها است. از این رو، ما برخی از این پارامترها را بررسی کرده ایم تا مورد بهینه این موارد را پیدا کنیم. رادیو ایزوتوپ استرانسیوم ۹۰ که گسیلنده خالص ذرات بتا می باشد برای این مطالعه انتخاب شد. که خصوصیات آن در جدول زیر ذکر شده است.

جدول ۱. مشخصات چشمه انتخابی

چشمه	انرژی میانگین (KeV)	انرژی بیشینه (KeV)	نیمه عمر	برد بیشینه در آب
Sr90	۱۹۶	۵۴۶	۲۸ سال	۱.۱ سانتیمتر
Y90	۹۳۹	۲۲۸۴	۶۴ ساعت	-----

برای محاسبه انرژی انباشته شده ذرات بتا در هر لایه، طیف چشمه بتازا در شبیه سازی روش مونت کارلو مورد استفاده قرار گرفت. طیف انرژی ذرات بتا مربوط به این رادیو ایزوتوپ [۸] در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. طیف انرژی ذرات بتا Sr/Y90

برای اطمینان از عدم وجود تابش گامای قابل توجه، در نظر گرفتن دو مورد مهم است. اول، ناخالصی‌های موجود در چشمه‌های خالص بتا می‌توانند پرتوهای گاما تولید کنند. از طرفی حذف ناخالصی‌ها و تولید چشمه‌های خالص بتا هم دشوار و هم گران است. در این مطالعه، چشمه مورد نظر، چشمه بتازای خالص در نظر گرفته شده است. دوم، لازم است محصولات دختر ایجاد شده پس از واپاشی رادیوایزوتوپ انتخاب شده و ناپایداری آنها (در صورت وجود) بررسی شود. اگر انرژی ذرات بتا در محدوده ۱۲۵-۸۰۰ keV باشد، می‌تواند به نیمه‌های آسیب برساند [۹].

دختر حاصل شده پس از واپاشی ایزوتوپ Sr ۹۰، Y ۹۰ است که همچنین با نیمه عمر ۶۴ ساعت دچار واپاشی β می‌شود و ایزوتوپ باقیمانده نهایی Zr ۹۰ پایدار است [۱۰]. بنابراین Sr / Y ۹۰ به عنوان یک چشمه خالص بتا شناخته می‌شود.

از نیمه‌رساناهای مختلفی می‌توان در این طراحی استفاده کرد. به طور معمول سلیکون یک نیمه‌هادی مرسوم است که در طراحی این باتری مورد استفاده قرار می‌گیرد بنابراین شبیه‌سازی‌ها برای نیمه‌رسانای سلیکون انجام شده‌اند. با اطلاعات فوق، انرژی انباشته شده در لایه نیمه‌رسانا با استفاده از کد MCNP6 (روش مونت کارلو) محاسبه شد. [۱۱]

مساحت لایه نیمه‌رسانا ۱۰ در ۱۰ سانتیمتر و ضخامت کلی آن ۳۰۰ میکرومتر قرار داده شد و بر روی آن یک لایه ۵۰ میکرومتری سلفون کشیده شده است که در ادامه برای محاسبه نرخ تولید جفت الکترون حفره‌ها، نیمه‌رسانا نیز به چندین لایه ۱۰ میکرومتری تقسیم شده و انرژی انباشته شده در این لایه‌ها با استفاده از تالی f6 برای الکترون محاسبه شد. تعداد ذرات تراپرد شده در این شبیه‌سازی 1E7 قرار داده شد که در نهایت خطای شبیه‌سازی زیر ۰.۰۵٪ به دست آمد.

بقیه محاسبات شبیه‌سازی فیزیک سلول‌های خورشیدی است: در ادامه معادله پخش حامل‌های اقلیت حل شده است. معادلات مرتبط و شرایط مرزی متناظر با آنها عبارتند از [۱۲]:

$$\begin{aligned}
 D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} + G(x) - \frac{p_n - p_{n_0}}{\tau_p} &= 0 \\
 p_n - p_{n_0} &= 0; \text{ at } x = x_n \\
 D_p \left. \frac{d(p_n - p_{n_0})}{dx} \right|_{x=0} &= S_p (p_n - p_{n_0})
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

برای ناحیه نوع N و:

$$\begin{aligned} D_n \frac{\partial^2 n_p}{\partial x^2} + G(x) - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} &= 0 \\ n_p - n_{p0} &= 0 ; \text{ at } x = x_n + W \\ D_n \left. \frac{d(n_p - n_{p0})}{dx} \right|_{x=H} &= S_n (n_p - n_{p0}) \end{aligned} \quad (3)$$

برای ناحیه نوع P.

در ناحیه نوع P، جایی که $(n_p)p_{n0}$ و $(n_p)p_n$ به ترتیب غلظت حفره (الکترون) با و بدون تابش هستند. $(D_n)D_p$ ضریب پخش حفره (الکترون)، $(S_n)S_p$ سرعت بازترکیب سطحی حفره (الکترون)، τ طول عمر حامل بار و G بیانگر نرخ تولید جفت الکترون حفره است که می‌تواند به صورت زیر بیان می‌شود [۱۳]:

$$(4) G(x) = \frac{E_{dep}(x)}{\varepsilon} = \alpha_1 e^{-\alpha_2 x}$$

که در آن E_{dep} انرژی انباشته شده در هر لایه و ε میانگین انرژی لازم برای تولید الکترون-حفره است که از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۴]

$$(5) \varepsilon = 2.8E_g + 0.5$$

عبارات چگالی جریان تولید شده در قسمت امیتر و بیس دیود نیمه رسانا را می‌توان به ترتیب از حل معادلات 6 و 7 بدست آورد [۱۵]:

$$J_p = q\alpha_1 \frac{L_p}{\alpha_2^2 L_p^2 - 1} \times \left[\frac{\left(\left(\frac{S_p L_p}{D_p} \right) + \alpha_2 L_p \right) - e^{-\alpha_2 x_n} \left(\left(\frac{S_p L_p}{D_p} \right) \cosh \left(\frac{x_n}{L_p} \right) + \sinh \left(\frac{x_n}{L_p} \right) \right)}{\left(\frac{S_p L_p}{D_p} \right) \sinh \left(\frac{x_n}{L_p} \right) + \cosh \left(\frac{x_n}{L_p} \right)} - \alpha_2 L_p e^{-\alpha_2 x_n} \right] \quad (6)$$

$$J_n = q\alpha_1 \frac{L_n e^{-\alpha_2(x_n+W)}}{\alpha_2^2 L_n^2 - 1} \times \left[\alpha_2 L_n - \frac{\left(\frac{S_n L_n}{D_n} \right) \left(\cosh \left(\frac{h}{L_n} \right) - e^{-\alpha_2 h} \right) + \sinh \left(\frac{h}{L_n} \right) + \alpha_2 L_n e^{-\alpha_2 h}}{\left(\frac{S_n L_n}{D_n} \right) \sinh \left(\frac{h}{L_n} \right) + \cosh \left(\frac{h}{L_n} \right)} \right] \quad (7)$$

چگالی جریان تولید شده در منطقه تخلیه به صورت زیر است:

$$J_d = \int_{x_n}^{x_n+W} qG(x)dx = \frac{q\alpha_1}{\alpha_2} [e^{-\alpha_2 x_n} - e^{-\alpha_2(x_n+W)}] \quad (8)$$

جریان نشت به صورت زیر بیان می‌شود [۱۶]:

$$J_0 = \frac{qn_i^2 D_p \left(\frac{D_p}{L_p} \right) \sinh \left(\frac{x_n}{L_p} \right) + S_p \cosh \left(\frac{x_n}{L_p} \right)}{N_a L_p \left(\frac{D_p}{L_p} \right) \cosh \left(\frac{x_n}{L_p} \right) + S_p \sinh \left(\frac{x_n}{L_p} \right)} + \frac{qn_i^2 D_n \left(\frac{D_n}{L_n} \right) \sinh \left(\frac{h}{L_n} \right) + S_n \cosh \left(\frac{h}{L_n} \right)}{N_a L_n \left(\frac{D_n}{L_n} \right) \cosh \left(\frac{h}{L_n} \right) + S_n \sinh \left(\frac{h}{L_n} \right)} \quad (9)$$

که در آن L_p و L_n طول پخش حاملهای اقلیت هستند. همچنین، N_a و N_d به ترتیب غلظت های اتمهای ناخالصی پذیرنده و دهنده در نیمه رسانا هستند.

جریان کل مجموع جریان ها در مناطق نوع N، نوع P و تخلیه است.

$$J_{sc} = J_n + J_p + J_d \quad (10)$$

ولتاژ مدار باز، فاکتور پرشوندگی [۱۷] و بازده تبدیل با معادلات زیر بیان می‌شود:

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(1 + \frac{J_{sc}}{J_0} \right)$$

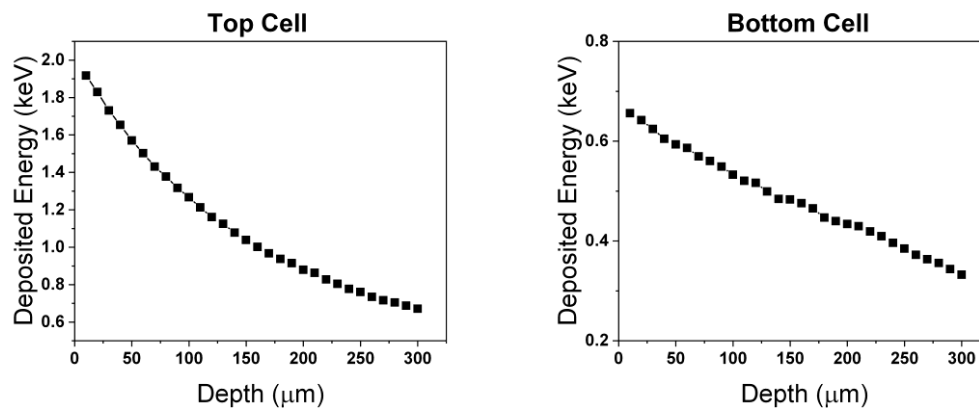
$$FF = \frac{\frac{qV_{oc}}{kT} - \ln \left(\frac{qV_{oc}}{kT} + 0.72 \right)}{\frac{qV_{oc}}{kT} + 1} \quad (11)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{J_{sc}V_{oc}FF}{AE_{avg}}$$

که در آن k ثابت بولتزمن، T دمای مطلق، FF فاکتور پرشوندگی، P_{in} توان ورودی، E_{avg} متوسط انرژی ذرات بتا و A میزان فعالیت چشمه است. برای دستیابی به جریان، ولتاژ و توان بالاتر، دو سلول بالا و دو سلول پایین به صورت موازی و مجموع آن‌ها به صورت سری به یکدیگر متصل شدند.

۳. نتایج و بحث

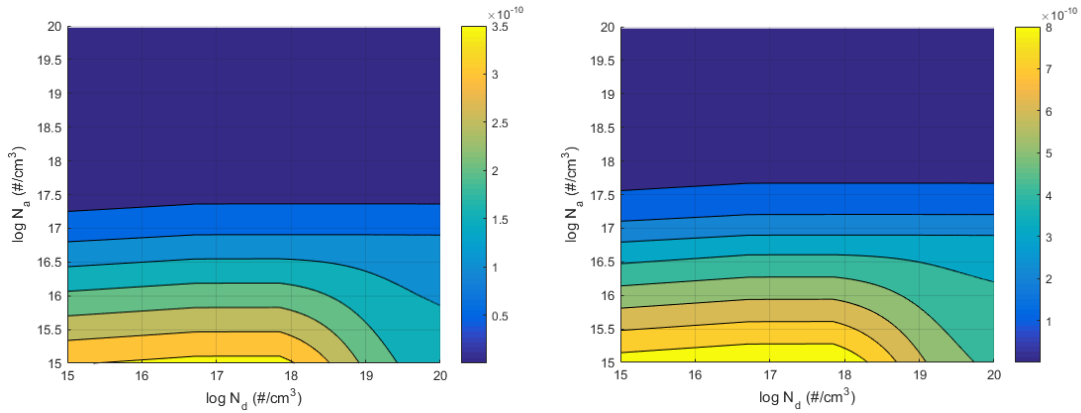
در بخش قبلی، باتری هسته‌ای پیشنهادی با ساختار و ماده رادیواکتیو پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش، نتایج بدست آمده تجزیه و تحلیل شده و پارامترهای موثر نیمه رسانا بهینه می‌شوند. برای این منظور ابتدا چشمه استرانسیوم ۹۰ با سطح فعالیت ۱۰ میلی کوری در نظر گرفته می‌شود. انرژی انباشته شده ناشی از چشمه استرانسیوم ۹۰ در لایه نیمه رسانا در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. انرژی انباشته شده ذرات بتا در لایه اول (بالایی) و دوم (زیرین) نیمه رسانا

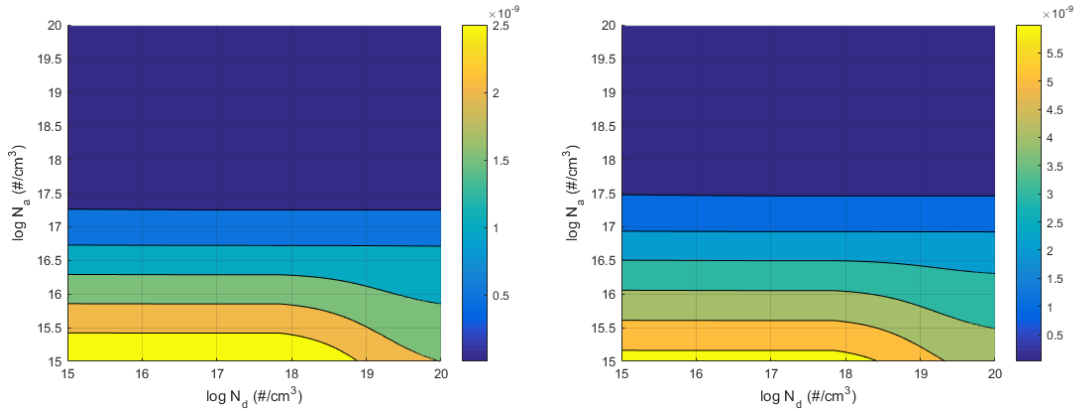
پارامترهای موثر در خروجی باتری طراحی شده شامل ضخامت لایه نیمه رسانا، نوع ماده آن و مقدار ناخالصی آن می‌باشد. در نتیجه، با بهینه سازی مقدار این پارامترها حداکثر بازده خروجی را می‌توان به دست آورد. به دلیل نبود تکنولوژی در رشد نیمه رساناهای مورد نظر، از ابعاد نیمه رساناهای سیلیکونی تجاری موجود در بازار استفاده شده است. در قدم بعد مقدار بهینه ناخالصی نوع N و نوع P (به ترتیب N_d و N_a) به دست آمد. تغییرات ناخالصی در لایه نیمه رسانا مستقیماً در خروجی باتری از جمله ولتاژ مدار باز و جریان مدار کوتاه تاثیر دارد.

توان خروجی سلول رویی و زیرین بر اساس مقادیر ناخالصی‌های مختلف به صورت زیر می‌باشد.



شکل ۴. توان خروجی لایه اول (سمت راست) و لایه دوم (سمت چپ) نیمه رسانا

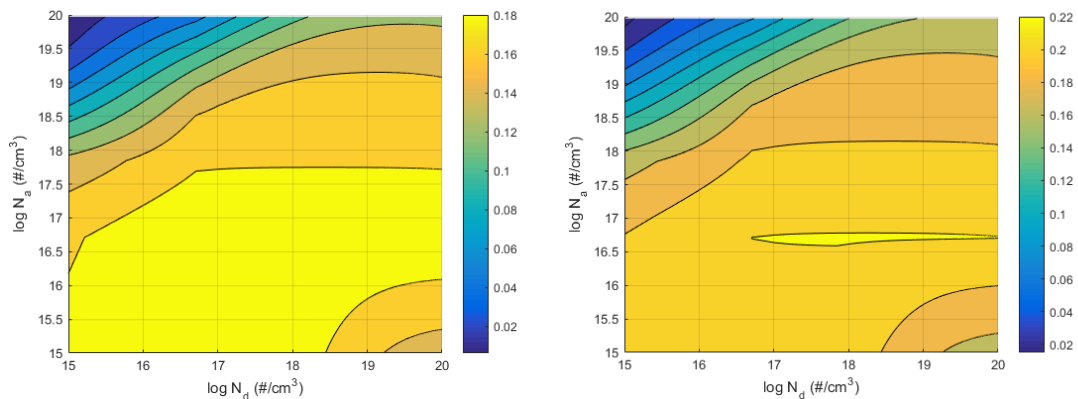
چگالی جریان مدار کوتاه بر اساس مقادیر ناخالصی های مختلف به صورت زیر می باشد.



شکل ۵. چگالی جریان مدار کوتاه خروجی لایه اول (سمت راست) و لایه دوم (سمت چپ)

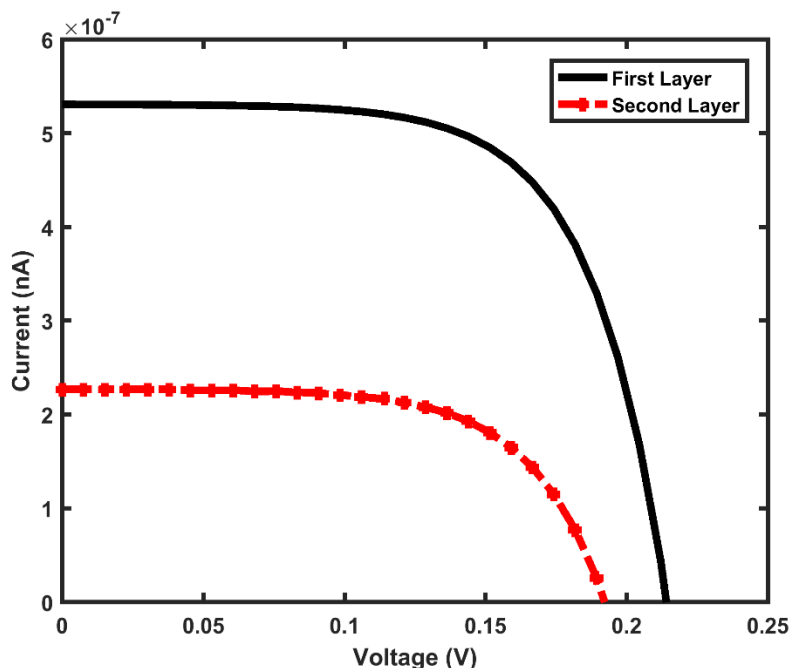
همانطور که در شکل ۵ قابل مشاهده است بیشینه مقدار چگالی جریان مدار کوتاه برای مقدار ناخالصی بهینه اتم گیرنده ها در مقیاس نانوآمپر می باشد.

ولتاژ مدار باز بر اساس مقادیر مختلف ناخالصی های مختلف به صورت زیر می باشد.



شکل ۶. ولتاژ مدار باز در لایه اول (سمت راست) و لایه دوم (سمت چپ)

همانطور که در شکل ۶ قابل مشاهده است بیشینه مقدار ولتاژ مدار باز برای ناخالصی بهینه اتمهای پذیرنده در مقیاس میلی ولت می باشد. همانطور که نشان داده شد مقدار بهینه ناخالصی های پذیرنده در حدود مقیاس ۱۰ به توان ۱۵، و مقدار بهینه ناخالصی های دهنده در حدود مقیاس ۱۰ به توان ۱۷ به دست آمد. منحنی ولتاژ - جریان خروجی در شکل ۷ رسم شده است.



شکل ۷. منحنی جریان ولتاژ لایه اول و لایه دوم

نتایج نهایی در جدول زیر قابل مشاهده می باشد.

جدول ۲. نتایج نهایی

بازده بهینه (درصد)	توان بهینه (نانوات)	ولتاژ مدار باز بهینه (میلی ولت)	چگالی جریان بهینه (نانو آمپر بر سانتیمتر مربع)	
۰.۲۲	۰.۸۸۳۷	۲۱۴	۵.۳۱	سلول رویی (یک طرف)
۰.۰۸۳	۰.۳۶۴۸	۱۹۲	۲.۲۷	سلول زیری (یک طرف)
۰.۶۰۶	۲.۴۹۷	۴۲۸	۷.۵۸	خروجی کل باتری

۴. نتیجه گیری

در این مقاله، یک باتری بتاولتاییک با بازدهی ۰.۶۰۶٪ (در حالت شکل ۱) شبیه سازی شد و پارامترهای ناخالصی نیمه رسانای آن بهینه شده است. سرانجام، توان خروجی، ولتاژ مدار باز و چگالی جریان اتصال کوتاه برای پارامترهای مختلف بدست آمد. مرحله بعدی در این



مطالعه ساخت این باتری‌ها با ساختار منحصر به فرد است که از ساختارهای پیچیده‌ای بهره می‌برد. همچنین قابلیت تغییر و تعویض چشمه رادیواکتیو در باتری طراحی شده بسیار سودمند و مناسب است، که این یک مزیت بزرگ در مدل پیشنهادی است.

۵. مراجع

- [1] S. Harrison, "Betavoltaic Devices," Retrieved October, **22** (2014).
- [2] F. Manasse, J. Pinajian, and A. Tse, "Schottky barrier betavoltaic battery," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **23**, 1, 860 (1976).
- [3] L. C. Olsen, P. Cabauy, and B. Elkind, "Betavoltaic power sources," *Physics today*, **65**, 12, 35 (2012).
- [4] C. Eiting, V. Krishnamoorthy, S. Rodgers, T. George, J. D. Robertson, and J. Brockman, "Demonstration of a radiation resistant, high efficiency SiC betavoltaic," *Applied Physics Letters*, **88**, 6, 064101 (2006).
- [5] Seeman, S. E., and C. J. Ambrose. "Design Criteria for Betavoltaic Nuclear Batteries." In *Engineering in Medicine*, pp. 425-433. Springer, Berlin, Heidelberg, 1975.
- [6] T. Jiang, Z. Xu, X. Tang, Z. Yuan, H. Wang, and M. Bian, "Comparison and study of the preparation methods for phosphor layer in nuclear battery," *International Journal of Energy Research* (2020).
- [7] Z. Xu, X. Tang, Y. Liu, Z. Zhang, W. Chen, K. Liu, and Z. Yuan, "CsPbBr₃ quantum dot films with high luminescence efficiency and irradiation stability for radioluminescent nuclear battery application," *ACS applied materials & interfaces*, **11**, 15, 14191 (2019).
- [8] Dixon, Jefferson, Aravindh Rajan, Steven Bohlemann, Dusan Coso, Ajay D. Upadhyaya, Ajeet Rohatgi, Steven Chu, Arun Majumdar, and Shannon Yee. "Evaluation of a silicon 90 Sr betavoltaic power source." *Scientific reports* 6, no. 1 (2016): 1-6.
- [9] H. Flicker, J. Loferski, and J. Scott-Monck, "Radiation defect introduction rates in n-and p-type silicon in the vicinity of the radiation damage threshold," *Physical Review*, **128**, 6, 2557 (1962).
- [10] J. K. Tuli, "Evaluated nuclear structure data file," , Brookhaven National Lab., Upton, NY (United States) (1995).
- [11] Werner, Christopher J. "MCNP Users Manual-Code Version 6.2." *Los Alamos National Laboratory, Los Alamos* (2017).
- [12] J. Nelson, *The Physics of Solar Cells*, chap. Photons In, Electrons Out: Basic Principles of PV, 17–39, Imperial College Press, London URL https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/9781848161269_0002.
- [13] Rahmani F, Khosravinia H. Optimization of Silicon parameters as a betavoltaic battery: Comparison of Si pn and Ni/Si Schottky barrier. *Radiation Physics and Chemistry*. 2016 Aug 1;125:205-12.
- [14] Klein, C.A., 1968. "Band gap dependence and related features of radiation ionization energies in semiconductors" .*J.Appl.Phys.*39(4),2029–2038.
- [15] Moayedi, Hosein, Soheil Hajibaba, Hossein Afarideh, Mitra Ghergherehchi, and Masoumeh Mohamadian. "Optimization of Beta Radioluminescent Batteries with Different Radioisotopes: A Theoretical Study." *Nuclear Science and Engineering* (2021): 1-12.



- [16] S. R. Kurtz, P. Faine, and J. M. Olson, "Modeling of two-junction, series-connected tandem solar cells using top-cell thickness as an adjustable parameter," *Journal of Applied Physics*, **68**, 4, 1890 (1990); 10.1063/1.347177., URL <https://doi.org/10.1063/1.347177>.
- [17] X. Tang, D. Ding, Y. Liu, and D. Chen, "Optimization design and analysis of Si-63Ni betavoltaic battery," *Science China Technological Sciences*, **55**, 4, 990 (2012); 10.1007/s11431-012-4752-6., URL <https://doi.org/10.1007/s11431-012-4752-6>.