

Research Paper

## Evaluation of Different Semiconductors Effect on Radio-Isotopic Battery Performance<sup>1</sup>

Najmeh Mohammadi<sup>2</sup>

Received: 2023.05.23

Revised: 2023.08.20

Accepted: 2023.09.09

### Abstract

This work aimed to theoretically investigate the operation of the beta voltaic battery with the <sup>14</sup>C radio isotopic source and several semiconductors in the p-n junction structure. For this purpose, the saturated thickness of the <sup>14</sup>C beta source and energy deposition distribution of beta particles emitted from this source is simulated and calculated in the various semiconductors including the GaAs, GaN, SiC, and diamond using the Monte Carlo code of MCNPX. Regarding the results obtained, the optimized <sup>14</sup>C thickness was achieved by 30 micrometers. Then, applying the analytical and numerical model, the relationships between the doping concentration, short circuit current density, open circuit voltage, and output power density were evaluated. The results showed that with  $N_a = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  and  $N_d = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  with the diamond as semiconductor, the output power density of designed battery was increased to  $9.68 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  among the other considered semiconductors.

**Keywords:** *Beta-voltaic Battery, Semiconductor, <sup>14</sup>C Source, p-n Junction.*

---

<sup>1</sup> DOI: 10.22051/ijap.2023.44175.1334

<sup>2</sup>Assistant Professor, Physics Department, Faculty of Science, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran. Email: n\_mohammadi@sut.ac.ir

## بررسی اثر نیمه رساناهای مختلف بر عملکرد باتری رادیوایزوتوپی<sup>۱</sup> نجمه محمدی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۲  
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۲۹  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۸

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران  
دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا  
سال سیزدهم، پیاپی ۳۵، زمستان ۱۴۰۲  
صص ۹۳ - ۱۱۱

### چکیده:

هدف از این پژوهش بررسی نظری عملکرد باتری بتاولتائیک با چشمه رادیوایزوتوپی  $^{14}\text{C}$  و نیمه رساناهای مختلف بر پایه اتصال  $p-n$  است. برای این منظور ابتدا ضخامت اشباع چشمه  $^{14}\text{C}$  و توزیع انرژی ذخیره شده ناشی از ذرات بتای گسیل شده در نیمه رساناهای مختلف شامل  $\text{SiC}$ ،  $\text{GaN}$ ،  $\text{GaAs}$  و الماس با استفاده از کد مونت کارلوی MCNPX شبیه سازی و محاسبه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، ضخامت بهینه چشمه  $^{14}\text{C}$ ، ۳۰ میکرومتر تعیین گردید. سپس با به کارگیری روابط تحلیلی و الگوی عددی، ارتباط بین چگالی ناخالصی های اضافه شده به نیمه رساناها و پارامترهای عملکرد باتری هسته ای بتاولتائیک از جمله چگالی جریان مدار کوتاه، ولتاژ مدار باز و چگالی توان خروجی باتری ارزیابی شده است. نتایج نشان دادند که در بهترین حالت، با قرار دادن الماس به عنوان نیمه رسانا در چیدمان باتری و با وارد کردن ناخالصی با چگالی  $N_d = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  و  $N_a = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  توان خروجی باتری به میزان  $9.68 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  افزایش می یابد.

**واژگان کلیدی:** باتری بتاولتائیک، نیمه رسانا، چشمه  $^{14}\text{C}$ ، اتصال  $p-n$

<sup>1</sup> DOI: 10.22051/ijap.2023.44175.1334

<sup>2</sup> استادیار، گروه فیزیک دانشکده علوم پایه، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران. Email: n\_mohammadi@sut.ac.ir



## ۱. مقدمه

با توجه به پیشرفت‌های سریع در سامانه‌های میکروالکترومکانیکی، تقاضای زیادی برای باتری‌های هسته‌ای و کاربرد آن‌ها در زمینه‌های تجاری، نظامی، پزشکی و غیره وجود دارد. چرا که، باتری‌های هسته‌ای با طول عمر طولانی، جایگزینی مناسب برای باتری‌های شیمیایی به ویژه در کاربردهای از راه دور می‌باشند. روش‌های متفاوتی برای تبدیل انرژی ذرات گسیل شده به انرژی الکتریکی وجود دارد که در این بین، استفاده از قطعات نیمه‌رسانا جهت تبدیل انرژی ذرات بتا به انرژی الکتریکی از جمله روش‌های کاربردی رایج در این زمینه است. در این باتری‌ها از انرژی پرتوهای گسیل شده از مواد پرتوزا، انرژی الکتریکی تولید می‌شود.

از مزیت‌های باتری‌های هسته‌ای می‌توان به قدرت بالا، طول عمر بالا، وزن کم، سازگاری بهتر با محیط و قابلیت طراحی در مقیاس کوچک‌تر نسبت به باتری‌های فسیلی، خورشیدی و شیمیایی اشاره نمود [۱]. این نوع باتری‌ها در هر شرایط دمایی، رطوبتی و غیره توانایی تولید توان را دارند. افزون بر این، باتری‌های هسته‌ای می‌توانند در مکان‌هایی که امکان شارژ باتری وجود ندارد، مانند حسگرهای داخل چاه نفت، زیر دریایی‌های پژوهشی و کاوشگرهای فضایی نیز مورد استفاده قرار گیرند.

یکی از انواع باتری‌های هسته‌ای، باتری بتا ولتائیک است که متشکل از یک چشمه بتا و نیمه‌رسانا می‌باشد. این باتری‌ها انرژی ذرات بتا را از راه تولید جفت الکترون-حفره در حین عبور ذرات بتا از مواد نیمه‌رسانا به جریان الکتریکی تبدیل می‌کنند. این نوع باتری‌ها با دو ساختار اتصال  $p-n$  [۲]، و شاتکی<sup>۱</sup> [۳] ساخته و مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در مواد نیمه‌رسانا الکترون‌های ظرفیت، نوارهای انرژی موسوم به نوار ظرفیت را پر می‌کنند. نوار انرژی بعدی به نام نوار رسانش به اندازه انرژی شکاف از نوار ظرفیت فاصله دارد. انرژی شکاف مواد نیمه‌رسانا کمتر از مواد عایق است و در نتیجه در دمای اتاق برخی از الکترون‌ها با دریافت انرژی گرمایی به نوار رسانش رفته و در رسانایی الکتریکی شرکت می‌کنند. در اثر این انتقال، در نوار ظرفیت یک حفره ایجاد می‌گردد. پس از این، حفره با استفاده از باقی الکترون‌های ظرفیت پر شده و حفره دیگری به جای آن الکترون‌ها ایجاد می‌شود. بدین ترتیب حفره در نوار ظرفیت حرکت می‌کند. در کاربردهای عملی با افزودن ناخالصی می‌توان تراکم الکترون‌ها یا حفره‌ها را افزایش داد. دو نیمه‌رسانای نوع  $n$  و  $p$  به کمک افزودن تعدادی مشخص از اتم‌های ناخالصی به نیمه‌رسانا تهیه می‌شوند. نیمه‌رسانای نوع  $n$  با افزودن اتم‌های ناخالصی دارای ۵ الکترون در نوار ظرفیت مانند

<sup>1</sup> Schottky



آنتیموان، آرسنیک و فسفر ساخته می‌شود. الکترون باقی مانده از اتم ناخالصی به هیچ پیوندی مقید نیست و در نیمه رسانای نوع n حرکت نسبتاً آزادی دارد. ناخالصی اضافه شده اتم‌های دهنده نامیده می‌شوند. نیمه‌رسانای نوع p از وارد کردن ناخالصی دارای ۳ الکترون ظرفیت مانند بور، گالیوم و ایندیوم ساخته می‌شود. در این صورت برای تکمیل پیوندهای اشتراکی کمبود الکترون یا حفره وجود دارد. ناخالصی تزریق شده اتم‌های پذیرنده نامیده می‌شوند.

با اتصال دو نوع نیمه‌رسانای نوع n و p، که آن را اتصال p-n می‌نامند، الکترون و حفره‌های موجود در ناحیه اتصال ترکیب شده و ناحیه‌ای بدون حامل‌های بار مثبت و منفی ایجاد کرده که ناحیه تهی نامیده می‌شود. ناحیه تهی دارای عرض محدودی است. چرا که در اثر وجود یون‌های ثابت مثبت و منفی در طرفین آن، یک میدان الکتریکی داخلی در ناحیه تهی به وجود می‌آید. با توجه به این که جهت میدان الکتریکی از مثبت به منفی است، جهت این میدان داخلی از سمت یون‌های مثبت به سمت یون‌های منفی می‌باشد.

در باتری‌های بتاولتائیک، ذرات بتا وارد ناحیه تهی شده و اگر انرژی آن از انرژی شکاف بیشتر باشد زوج الکترون-حفره ایجاد شده و جریان الکتریکی در یک جهت ایجاد خواهد شد. جفت الکترون-حفره با استفاده از میدان الکتریکی ایجاد شده در اتصال p-n از هم جدا می‌شوند. منشا اصلی تولید جریان در این باتری‌ها، الکترون-حفره‌ای است که مستقیماً در داخل ناحیه تهی تولید می‌شود.

عملکرد باتری‌های هسته‌ای به نوع چشمه رادیوایزوتوپی و نیمه‌رسانا وابسته است. از این رو پژوهشگران عملکرد باتری‌ها را با توجه به نوع چشمه بتا از نظر طیف انرژی بتا و همچنین نیمه‌رساناهای مختلف با انرژی شکاف متفاوت مورد بررسی قرار داده تا ساختار بهینه‌ای برای باتری بدست آید. برای این منظور از کد مونت کارلو به منظور ترابرد ذرات بتا و ضخامت بهینه چشمه بتا استفاده می‌شود. در دهه‌های گذشته، مطالعات گسترده‌ای در زمینه باتری‌های هسته‌ای انجام شده است. ویژگی‌های الکتریکی نیمه‌رساناها، طراحی بهینه باتری‌های بتاولتائیک برای رسیدن به توان خروجی بالاتر از جنبه‌های مهم پژوهش‌های نظری بر روی باتری‌های هسته‌ای می‌باشد. چشمه‌های رادیو ایزوتوپی  ${}^3\text{H}$ ،  ${}^{63}\text{Ni}$  و  ${}^{147}\text{Pm}$  از جمله چشمه‌هایی هستند که در ساخت باتری‌های هسته‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۴-۹]. در بین رادیو ایزوتوپ‌های گسیلنده بتا، چشمه  ${}^{14}\text{C}$  با توجه به انرژی بتا، نیمه‌عمر بالا و نبود محصولات واپاشی نامطلوب، می‌تواند انتخاب مناسبی به عنوان چشمه بتازای مورد استفاده در ساخت باتری‌های هسته‌ای باشد. این رادیو ایزوتوپ یکی از پسماندهای هسته‌ای تولید شده در رآکتورها می‌باشد، که در صورت استفاده از آن در ساخت باتری‌های

هسته‌ای، می‌توان استفاده بهینه‌ای از آن داشت. رادیو ایزوتوپ  $^{14}\text{C}$  تولید شده در رآکتور آلوده به سایر ایزوتوپ‌های کربن نیست. هر چند فرآیند جداسازی آن نیازمند فناوری پیچیده‌ای است، اما فرایند استخراج آن نسبت به چشمه‌ای مانند  $^{63}\text{Ni}$  از دیدگاه اقتصادی مقرون به صرفه‌تر است [۱۰-۱۲]. این رادیو ایزوتوپ از راه واپاشی بتا با نیمه‌عمر ۵۷۳۰ سال به  $^{14}\text{N}$  تبدیل شده، و انرژی بیشینه و انرژی میانگین بتای گسیل شده به ترتیب برابر با  $0.156\text{ MeV}$  و  $0.497\text{ MeV}$  است. البته از معایب این چشمه می‌توان به توان گسیلی پایین آن اشاره نمود. چرا که توان گسیلی با عکس نیمه‌عمر متناسب است. اما از سوی دیگر، نیمه عمر بالای این رادیو ایزوتوپ موجب افزایش عمر باتری نیز خواهد شد [۱۳]. با این حال، تاکنون محاسباتی برای عملکرد باتری بتاولتائیک بر اساس این چشمه گزارش نشده است.

از سوی دیگر، مطالعات نظری نشان داده‌اند که هر چه انرژی شکاف نیمه‌رسانا بیشتر باشد، بازده تبدیل انرژی باتری نیز بیشتر خواهد بود [۱۴]. از این رو، نیمه‌رساناهایی همچون  $\text{GaN}$ ،  $\text{GaAs}$  و  $\text{SiC}$  و الماس به صورت موفقیت‌آمیزی در طراحی و ساخت باتری‌های هسته‌ای به کار رفته‌اند [۱۵-۲۲]. به عنوان مثال، Zheng و همکاران طراحی بهینه باتری بتاولتائیک بر پایه نیمه‌رسانای  $\text{GaAs}$  و چشمه  $^{63}\text{Ni}$  را از راه محاسبات عددی انجام داده و بیشینه توان خروجی  $0.135\text{ }\mu\text{W}/\text{cm}^2$  را برای باتری با اتصال p-n گزارش نموده‌اند [۲۳]. Lin و همکاران نیز باتری بتاولتائیک بر پایه  $\text{SiC}$  با چشمه  $^{147}\text{Pm}$  را بهبود بخشیده‌اند. آن‌ها برای افزایش بازده باتری، استفاده از دو لایه دهنده الکترون با چگالی ناخالصی متفاوت را پیشنهاد داده‌اند [۲۴].

بنابراین، در این پژوهش، عملکرد باتری بتاولتائیک با ساختار اتصال p-n با چشمه  $^{14}\text{C}$  و نیمه-رساناهای مختلف  $\text{SiC}$ ،  $\text{GaN}$ ،  $\text{GaAs}$  و الماس مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، ضخامت اشباع چشمه و انرژی ذخیره شده در نیمه‌رساناها با استفاده از کد مونت کارلو MCNPX 2.6 محاسبه شده است [۲۵]. سپس با استفاده از روابط تحلیلی و عددی، پارامترهای مربوط به عملکرد باتری بتاولتائیک محاسبه و مقایسه شد. نتایج بدست آمده می‌تواند اطلاعات مفیدی در اختیار سازندگان باتری‌های هسته‌ای قرار دهد.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۲ خودجذبی و ضخامت اشباع

تعدادی از ذرات بتا گسیل شده از چشمه پیش از رسیدن به سطح توسط خود چشمه جذب می‌شوند. این پدیده خود جذب چشمه نامیده می‌شود. ذرات بتای تولید شده از واپاشی چشمه رادیو ایزوتوپی



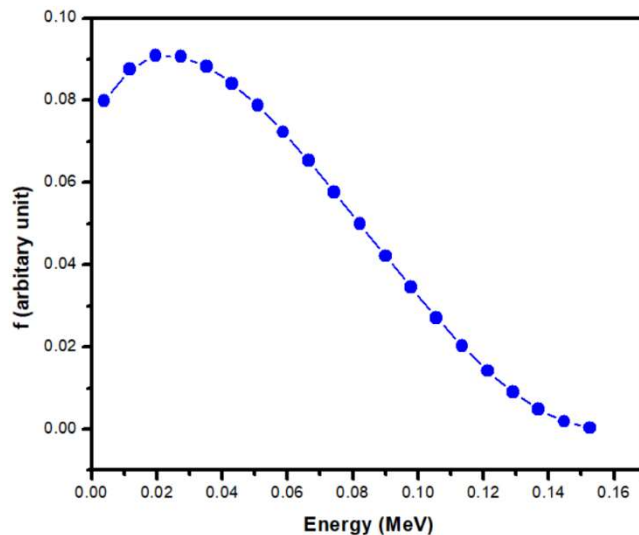
انرژی خود را در فرآیند انتقال از دست داده و در نتیجه فعالیت در سطح چشمه و قدرت انتشار کاهش می‌یابد. هر چه ضخامت چشمه بتازا بیشتر باشد، ذرات گسیل شده از چشمه افزایش می‌یابد. اما با افزایش بیشتر ضخامت چشمه، برخی ذرات بتا که انرژی خود را در عبور از چشمه از دست داده‌اند در داخل ماده چشمه جذب می‌شوند. در نتیجه این اثر، افزایش ذرات بتای خروجی پس از یک ضخامت مشخص متوقف شده و تعداد ذرات خروجی به اشباع می‌رسد. با افزایش ضخامت چشمه، میزان خود جذبی بیشتر شده و روند افزایش شار بتا کاهش می‌یابد. به صورتی که افزایش بیشتر ضخامت چشمه، هیچ تاثیر آشکاری در بهبود اکتیویته و قدرت انتشار چشمه نداشته و تنها سبب هدر رفتن مواد چشمه شده و هزینه ساخت باتری را افزایش می‌دهد.

اثر خود جذبی ذرات بتا در چشمه رادیوایزوتوپی اغلب در الگوسازی نظری طراحی باتری بتاولتائیک، نادیده گرفته می‌شود. اما در حقیقت، کارایی یک باتری بتاولتائیک به کمک اثر خود جذبی چشمه پرتوزا محدود شده است. از این رو، در نظر گرفتن اثر خود جذبی تخمین بهتری از خروجی باتری بتاولتائیک چون جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز و جریان نشتی خواهد داشت [۲۶]. بنابراین لازم است، برای دستیابی به بازده بیشتر باتری بتاولتائیک ضخامت بهینه چشمه بتازا مشخص شود.

## ۲.۲ شبیه‌سازی مونت کارلو

برای تعیین ضخامت اشباع چشمه  $^{14}\text{C}$ ، از کد مونت کارلوی MCNPX 2.6 استفاده شده است. برای این منظور سلول مکعبی با سطح مقطع  $1\text{cm} \times 1\text{cm}$  و ضخامت‌های مختلف، از ماده  $^{14}\text{C}$  با چگالی  $25/25\text{ gr/cm}^3$  شبیه‌سازی گردید. سپس این سلول به عنوان چشمه بتا، با طیف انرژی  $^{14}\text{C}$  رسم شده در شکل (۱) تعریف شد. برنامه ورودی در حالت الکترون و فوتون اجرا شده و با استفاده از تالی F1 شار بتای خروجی از مکعب برای ضخامت‌های مختلف از ۱ میکرومتر تا ۶۰۰ میکرومتر محاسبه شد. توزیع انرژی ذخیره شده ناشی از بتا در عمق نیمه‌رساناهای مختلف GaAs، SiC، GaN و الماس نیز با استفاده از مش تالی نوع ۳ محاسبه شد. برای این منظور مش‌هایی مستطیلی با سطح مقطع  $1\text{cm} \times 1\text{cm}$  و ضخامت ۱ میکرومتر تعریف شده است.

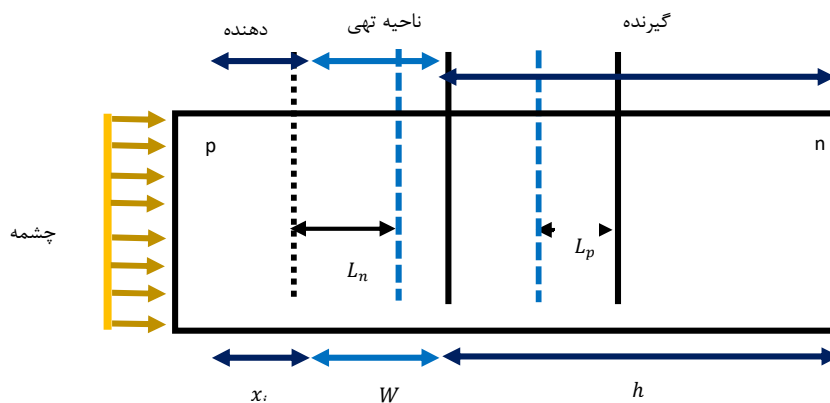




شکل ۱ طیف انرژی بتای گسیل شده از چشمه  $^{14}\text{C}$ .

### ۳.۲ محاسبه پارامترهای مربوط به عملکرد باتری هسته‌ای بتاولتائیک

نمایی از ساختار باتری هسته‌ای بتاولتائیک بر پایه اتصال p-n در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲ نمایی از باتری بتاولتائیک با اتصال p-n.

در این شکل  $x_i$  عمق اتصال،  $h$  ضخامت لایه پایه (بستر)،  $L_n$  طول پخش الکترون‌ها در ناحیه نیمه- رسانای نوع p، و  $L_p$  طول پخش حفره‌ها در ناحیه نیمه‌رسانای نوع n می‌باشد. در این ساختار، ناحیه



نوع p به دلیل طول پخش بیشتر الکترون‌ها به عنوان ناحیه گسیلنده در نظر گرفته شده است. زیرا در این صورت الکترون-حفره‌ها در خارج ناحیه تهی نیز جمع آوری خواهند شد. طول پخش حامل‌های بار بر اساس رابطه زیر بدست می‌آید:

$$L_n = \sqrt{\frac{kT}{q} \frac{9400}{1 + \left(\frac{N_a}{1.7}\right)^{0.5}} \left(\frac{1.3 \times 10^9}{N_a}\right)^{0.9}} \quad (1)$$

$$L_p = \sqrt{\frac{kT}{q} \frac{1}{2.5 \times 10^{-3} + 4 \times 10^{-11} \times N_d} \left(\frac{4 \times 10^9}{N_d}\right)^{0.92}} \quad (2)$$

که در آن، q بار الکترون، kk ثابت بولتزمن، T دما بر حسب کلوین (در این مطالعه ۳۰۰ درجه کلوین)،  $N_a$  چگالی اتم‌های پذیرنده و  $N_d$  چگالی اتم‌های دهنده بر حسب  $\frac{1}{cm^3}$  است. پهنای ناحیه تهی نیز از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$W = \sqrt{\frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \frac{r \epsilon_r \epsilon_0}{q} \left( \frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right)} \quad (3)$$

که در این رابطه،  $\epsilon_r$  ثابت دی الکتریک نیمه رسانا،  $\epsilon_0$  ثابت دی الکتریک خلا و  $n_i$  چگالی حامل‌های ذاتی است.

در این نوع ساختار باتری بتاولتائیک، چگالی جریان القایی در لایه گسیلنده ( $J_E$ )، در بستر ( $J_B$ ) و ناحیه تهی ( $J_D$ ) به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$J_E = \frac{q}{E_{ehp}} \frac{G \cdot L_n}{\alpha^2 L_n^{r-1}} \left[ \frac{\frac{S_n L_n}{D_n} + \alpha L_n - e^{-\alpha x_j} \left( \frac{S_n L_n}{D_n} \cosh \left( \frac{x_j}{L_n} \right) + \sinh \left( \frac{x_j}{L_n} \right) \right)}{\frac{S_n L_n}{D_n} \sinh \left( \frac{x_j}{L_n} \right) + \cosh \left( \frac{x_j}{L_n} \right)} - \alpha L_n e^{-\alpha x_j} \right] \quad (4)$$

$$J_B = \frac{q}{E_{ehp}} \frac{G \cdot L_p}{\alpha^2 L_p^{r-1}} e^{-\alpha(x_j + W)} \left[ \alpha L_p - \frac{\frac{S_p L_p}{D_p} \left( \cosh \left( \frac{h}{L_p} \right) - e^{-\alpha h} \right) + \sinh \left( \frac{h}{L_p} \right) + \alpha L_p e^{-\alpha h}}{\frac{S_p L_p}{D_p} \sinh \left( \frac{h}{L_p} \right) + \cosh \left( \frac{h}{L_p} \right)} \right] \quad (5)$$

$$J_D = \frac{G_0}{\alpha} e^{-\alpha x_j} (1 - e^{-\alpha W}) \frac{q}{E_{ehp}} \quad (6)$$

که در آن، S سرعت باز ترکیب سطحی حامل‌های بار می‌باشد.  $E_{ehp}$  میانگین انرژی یونش در نیمه‌رسانا است که با توجه به انرژی شکاف  $E_g$  از رابطه  $E_{ehp} = 2.78 E_g + 0.5 eV$  بدست می‌آید.

آهنگ ذخیره انرژی بتا با افزایش عمق نیمه‌رسانا به صورت نمایی کاهش می‌یابد و می‌توان رابطه  $\frac{dE}{dx} = G \cdot e^{-\alpha x}$  را بر آن قرار داد. در این رابطه،  $\alpha$  عمق نفوذ ذرات بتا در نیمه‌رسانا و ضریب



جذب می‌باشد. برای بدست آوردن ضریب  $G$  مقدار انرژی ذخیره شده ناشی از گسیل بتا در نیمه‌رسانا با استفاده از مش تالی نوع ۳ در سلول‌هایی به ضخامت ۱ میکرومتر محاسبه شده و سپس منحنی نمایی فیت شده و ضریب  $G$  و  $\alpha$  محاسبه شده است. در نهایت چگالی جریان مدار کوتاه از مجموع این سه چگالی جریان بدست می‌آید:

$$J_{SC} = J_E + J_B + J_D \quad (7)$$

با توجه به اینکه آهنگ ذخیره انرژی در نیمه‌رسانا به صورت نمایی با ضخامت ماده کاهش می‌یابد، هرچه ناحیه تهی نزدیک به چشمه باشد زوج الکترون-حفره بیشتری در تولید جریان نقش خواهند داشت، به همین دلیل کمینه عمق اتصال یعنی ۰/۰۵ میکرومتر در محاسبات در نظر گرفته شده است. همچنین ضخامت لایه (بستر) نیز ۲۰۰ میکرومتر در نظر گرفته شده است. همچنین، ولتاژ مدار باز که وابسته به چگالی جریان مدار کوتاه و جریان نشتی ( $J_0$ ) است به صورت زیر بیان می‌شود:

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{J_{SC}}{J_0} + 1 \right) \quad (8)$$

که در آن،  $J_0$  از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$J_0 = q \frac{n_i^r D_n}{N_a L_n} \left[ \frac{D_n \sinh \left( \frac{h}{L_n} \right) + S_n \cosh \left( \frac{x_j}{L_n} \right)}{D_n \cosh \left( \frac{x_j}{L_n} \right) + S_n \sinh \left( \frac{x_j}{L_n} \right)} \right] + q \frac{n_i^r D_p}{N_d L_p} \left[ \frac{D_p \sinh \left( \frac{h}{L_p} \right) + S_p \cosh \left( \frac{h}{L_p} \right)}{D_p \cosh \left( \frac{h}{L_p} \right) + S_p \sinh \left( \frac{h}{L_p} \right)} \right] \quad (9)$$

بیشینه توان خروجی  $P_m$  نیز پارامتر مهمی برای ارزیابی عملکرد باتری بتا ولتائیک می‌باشد که تابعی از ولتاژ و چگالی جریان مدار کوتاه و فاکتور پرکننده (FF) است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_m = FF \times V_{OC} \times J_{SC} \quad (10)$$

همچنین، فاکتور پرکننده به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$FF = \frac{\frac{q}{kT} V_{OC} - \ln \left( \frac{q}{kT} V_{OC} + 0.72 \right)}{\frac{q}{kT} V_{OC} + 1} \quad (11)$$

پارامترهای مربوط به نیمه‌رساناهای متفاوت بکار رفته در محاسبات، در جدول (۱) آمده است.



جدول ۱ ویژگی‌های نیمه‌رساناهای متفاوت بررسی شده در این مطالعه.

S(cm/s)	$\alpha(\frac{1}{cm})$	G.( $\mu W. \mu m^{-1}. cm^{-1}$ )	$\epsilon_r$	$n_i(\frac{1}{cm^3})$	$E_g(eV)$	
$1,00 \times 10^7$ [۲۳]	$10^4$ $0,16 \times$	۱۹,۵۰	۱۳,۱ [۲۳]	$2,25 \times 10^6$ [۲۳]	۱,۴۲ [۲۳]	GaAs
$1,00 \times 10^4$ [۳۰]	$10^4$ $0,19 \times$	۲۳,۳۹	۸,۹ [۲۹]	$3,26 \times 10^{-10}$ [۲۸]	۳,۳۹ [۲۷]	GaN
$1,00 \times 10^6$ [۳۴]	$10^4$ $0,08 \times$	۱۲,۳۶	۹,۸ [۳۳]	$8,20 \times 10^{-9}$ [۳۲]	۳,۲۳ [۳۱]	SiC
$1,00 \times 10^3$ [۳۸]	$10^4$ $0,08 \times$	۱۲,۸۲	۵,۶ [۳۷]	$1,00 \times 10^{-27}$ [۳۶]	۵,۷۸ [۳۵]	Diamond

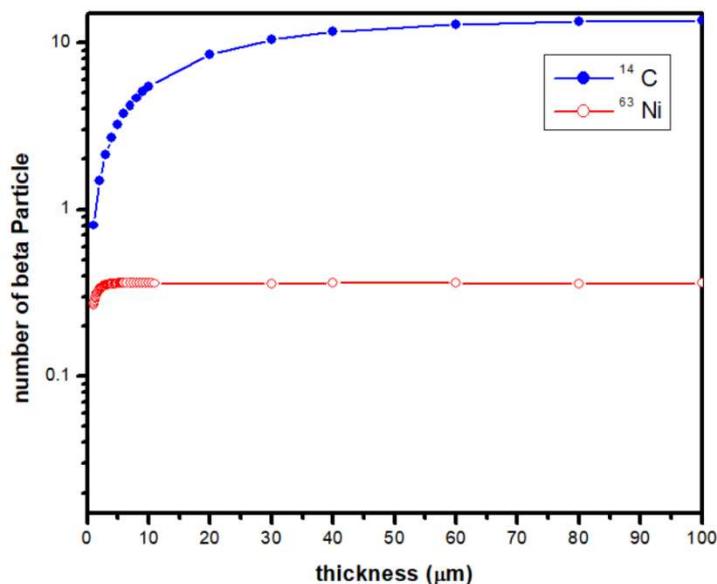
### ۳. نتایج و بحث

#### ۱.۳ ضخامت اشباع چشمه بتازای $^{14}C$

برای طراحی بهینه یک باتری بتا و لثائیک لازم است مقدار بهینه‌ای از چشمه بتازا در ساخت باتری به کار گرفته شود. برای تعیین ضخامت بهینه چشمه  $^{14}C$ ، تعداد ذرات بتای خروجی پس از ضخامت‌های مختلف چشمه  $^{14}C$  در شکل (۳) رسم شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت چشمه رادیوایزوتوپی ابتدا تعداد ذرات خروجی از ماده چشمه افزایش می‌یابد، اما پس از ضخامتی معین به دلیل اثر خودجذبی، روند افزایش شار ذرات خروجی متوقف شده و تعداد ذرات خروجی به اشباع می‌رسد. به صورتی که افزایش بیشتر ضخامت چشمه، موجب افزایش توان خروجی و بازده باتری نخواهد شد. با توجه به شکل (۳)، ضخامت ۳۰ میکرومتر از چشمه  $^{14}C$ ، که در آن تعداد ذرات خروجی به ۸۰٪ مقدار اشباع رسیده است، به عنوان ضخامت اشباع در نظر گرفته شده است. همچنین برای اطمینان از درستی محاسبات انجام شده، ذرات بتا پس از ضخامت‌های مختلف چشمه  $^{63}Ni$  نیز محاسبه و رسم شده است. با توجه به نتایج بدست آمده ملاحظه می‌شود که پس از ضخامت حدود ۳ میکرومتر شار بتای مربوط به چشمه  $^{63}Ni$  به مقدار اشباع خود می‌رسد، که این مقدار در هماهنگی با مقدار گزارش شده توسط دیگر پژوهشگران است [۲۳].

لازم به یادآوری است که در ادامه‌ی شبیه‌سازی‌ها و برای محاسبه توزیع عمقی انرژی ذخیره شده ناشی از بتا در نیمه‌رساناهای متفاوت، چشمه  $^{14}C$  با ضخامت اشباع ۳۰ میکرومتر در برنامه‌های ورودی MCNPX قرار داده شده است.



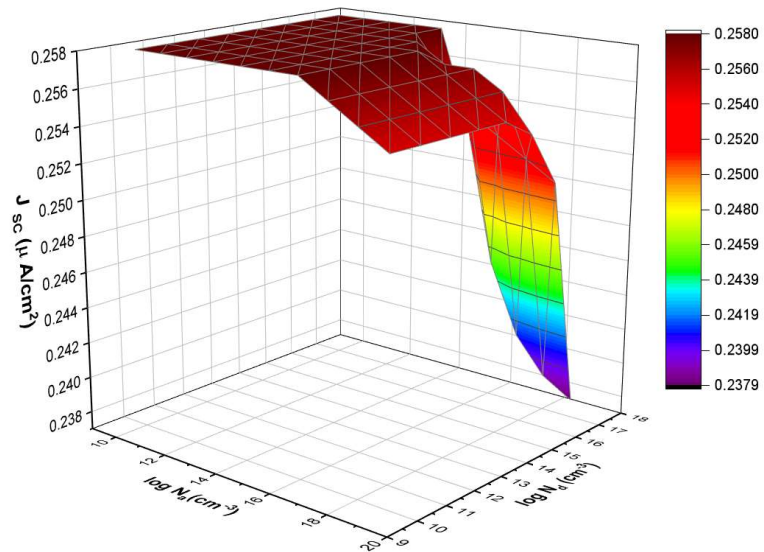


شکل ۳ شار بتای خروجی بر حسب ضخامت‌های مختلف چشمه <sup>۱۴</sup>C و <sup>۶۳</sup>Ni.

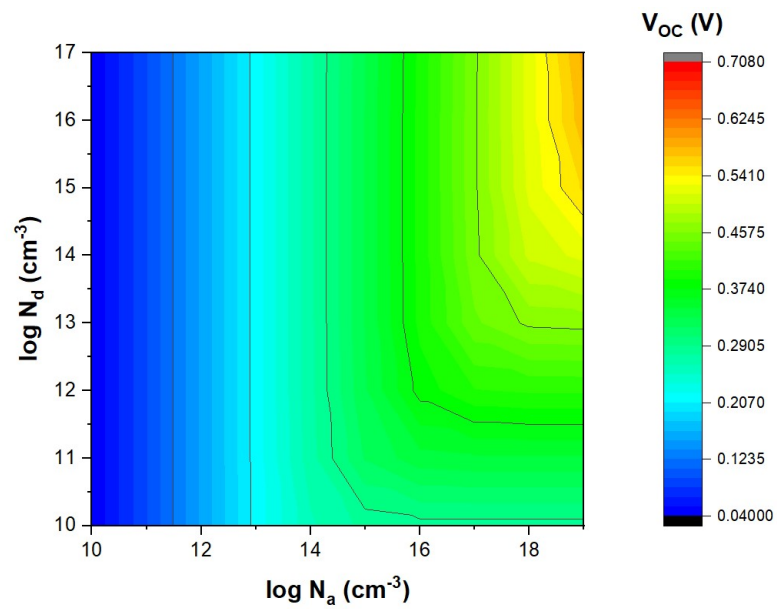
### ۲.۳ اعتبارسنجی محاسبات باتری بر پایه اتصال p-n و چشمه <sup>۶۳</sup>Ni

برای اعتبارسنجی محاسبات و شبیه‌سازی‌های انجام شده، ابتدا عملکرد باتری بتاولتائیک با نیمه‌رسانای GaAs و چشمه <sup>۶۳</sup>Ni بررسی شده و با مقادیر گزارش شده توسط دیگران مقایسه شده است. در شکل (۴)، چگالی جریان مدار کوتاه برای این باتری بر حسب چگالی اتم‌های ناخالصی  $N_d$  و  $N_a$  رسم شده است. ملاحظه می‌شود که چگالی جریان مدار کوتاه با کاهش چگالی اتم‌های ناخالصی افزایش می‌یابد. به صورت کلی، چگالی کمتر ناخالصی‌ها موجب افزایش پهنای ناحیه تهی شده و طول پخش حامل‌های بار افزایش می‌یابد که موجب بهبود بازده جمع‌آوری الکترون-حفره‌ها خواهد شد. زمانی که  $N_a$  کمتر از  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  یا  $N_d$  کمتر از  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  باشد، مقدار چگالی جریان مدار کوتاه به  $0.258 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  نزدیک و به اشباع می‌رسد.

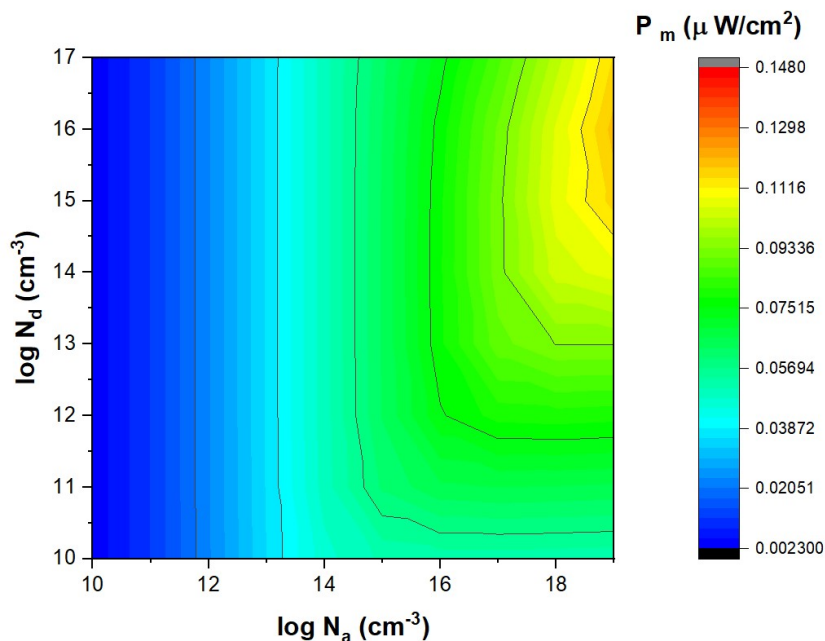




شکل ۴ چگالی جریان مدار کوتاه در باتری با نیمه رسانای GaAs و چشمه  $^{63}Ni$  بر حسب  $N_d$  و  $N_a$ .



شکل ۵ ولتاژ مدار باز در باتری با نیمه رسانای GaAs و چشمه  $^{63}Ni$  بر حسب  $N_d$  و  $N_a$ .



شکل ۶ چگالی توان خروجی باتری با نیمه‌رسانای GaAs با چشمه  $^{63}\text{Ni}$  بر حسب  $N_d$  و  $N_a$ .

همچنین مقدار ولتاژ مدار باز که توسط مقادیر  $J_{SC}$  و  $J_0$  مشخص می‌شود، با افزایش ناخالصی کاهش می‌یابد. اما بر اساس معادله (۸) مقدار  $J_0$  با شدت بیشتری کاهش می‌یابد. به صورتی که محاسبات نشان می‌دهند، اگر  $N_d = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  باشد و مقدار  $N_a$  از  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$  تا  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  افزایش یابد، مقدار  $J_0$  از  $6.71 \times 10^{-6} \text{ μA/cm}^2$  تا  $4.2 \times 10^{-10} \text{ μA/cm}^2$  کاهش می‌یابد. در حالی که اگر  $N_a = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  باشد، با افزایش میزان  $N_d$  از  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$  تا  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ، مقدار  $J_0$  از  $6.72 \times 10^{-6} \text{ μA/cm}^2$  تا  $6.71 \times 10^{-6} \text{ μA/cm}^2$  کاهش می‌یابد. به بیان دیگر، مقدار  $J_0$  حساسیت بیشتری به تغییرات  $N_a$  دارد. بنابراین، همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده، بیشینه ولتاژ مدار باز  $5.88 \times 10^{-1} \text{ V}$  زمانی مشاهده می‌شود که نیمه‌رسانای نوع p چگالی  $N_a$  برابر با  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  داشته باشد.

در شکل (۶)، نتایج چگالی توان خروجی بر حسب چگالی اتم‌های ناخالصی رسم شده است. ملاحظه می‌شود که هرچه چگالی ناحیه نوع p بیشتر باشد، چگالی توان خروجی نیز افزایش می‌یابد. بر اساس گزارشات منتشر شده، برای آسیب نرسیدن به GaAs، چگالی نباید بیشتر از  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  باشد.



بنابراین اگر  $N_a$  برابر با  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  و  $N_d$  نیز برابر با  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  باشد، مقدار چگالی توان خروجی  $1,07 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  بدست می‌آید. در این حالت مقادیر  $V_{oc}$ ،  $J_{sc}$  و  $FF$  به ترتیب برابر با  $0,517 \text{ V}$ ،  $0,562 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  و  $80,8\%$  خواهد بود. برای  $N_d = N_a = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  مقادیر محاسبه شده در این مطالعه و گزارش Zheng در جدول (۲) مقایسه شده‌اند [۲۳]. بر اساس نتایج بدست آمده توافق خوبی بین محاسبات این مطالعه و منبع بیان شده وجود دارد.

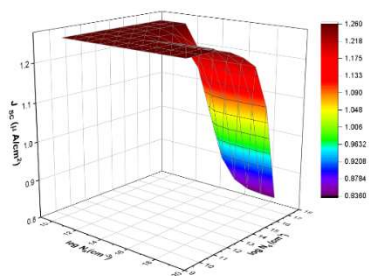
**جدول ۲** مقایسه مقادیر جریان مدار کوتاه، ولتاژ مدار باز، توان خروجی و فاکتور پرکننده برای باتری بر پایه اتصال p-n با نیمه‌رسانای GaAs و چشمه  $^{63}\text{Ni}$ .

FF (%)	Voc (V)	Jsc ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	P <sub>m</sub> ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )	
۸۰٫۹	۰٫۵۱۹	۰٫۲۵۵	۰٫۱۰۷	این مطالعه
۸۳٫۳	۰٫۶۳۸	۰٫۲۵۴	۰٫۱۳۵	Zheng et al.
۲٫۹	۱۸٫۶	۰٫۴	۲۰٫۷	تفاوت نسبی (%)

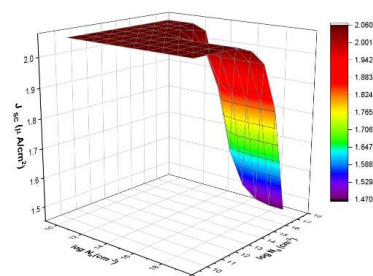
### ۳.۳ عملکرد باتری هسته‌ای با چشمه $^{14}\text{C}$

#### ۱.۳.۳ اثر نیمه‌رساناهای مختلف بر چگالی جریان مدار کوتاه

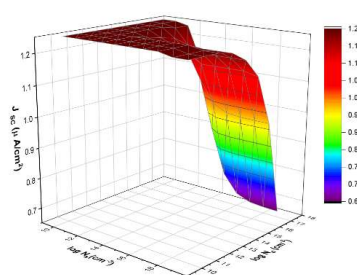
در شکل (۷) چگالی جریان مدار کوتاه برای نیمه‌رساناهای مختلف GaN، GaAs، SiC و الماس رسم شده است. مشاهده می‌شود با قرار دادن نیمه‌رسانای GaAs و GaN زمانی که  $N_a$  کمتر از  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  یا  $N_d$  کمتر از  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  باشد، مقدار چگالی جریان مدار کوتاه به ترتیب به مقدار  $1,260 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  و  $2,060 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  نزدیک و به اشباع می‌رسد. همچنین ملاحظه می‌گردد که اگر  $N_d$  و  $N_a$  کمتر از  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  باشد مقدار چگالی جریان مدار کوتاه در باتری با نیمه‌رسانای SiC و الماس به ترتیب به مقدار  $1,250 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  و  $2,55 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  نزدیک و به اشباع می‌رسد.



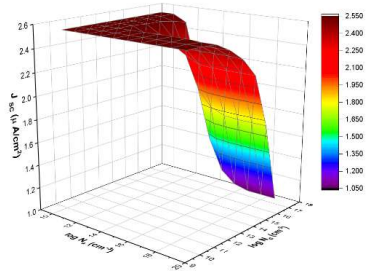
GaAs



GaN



SiC



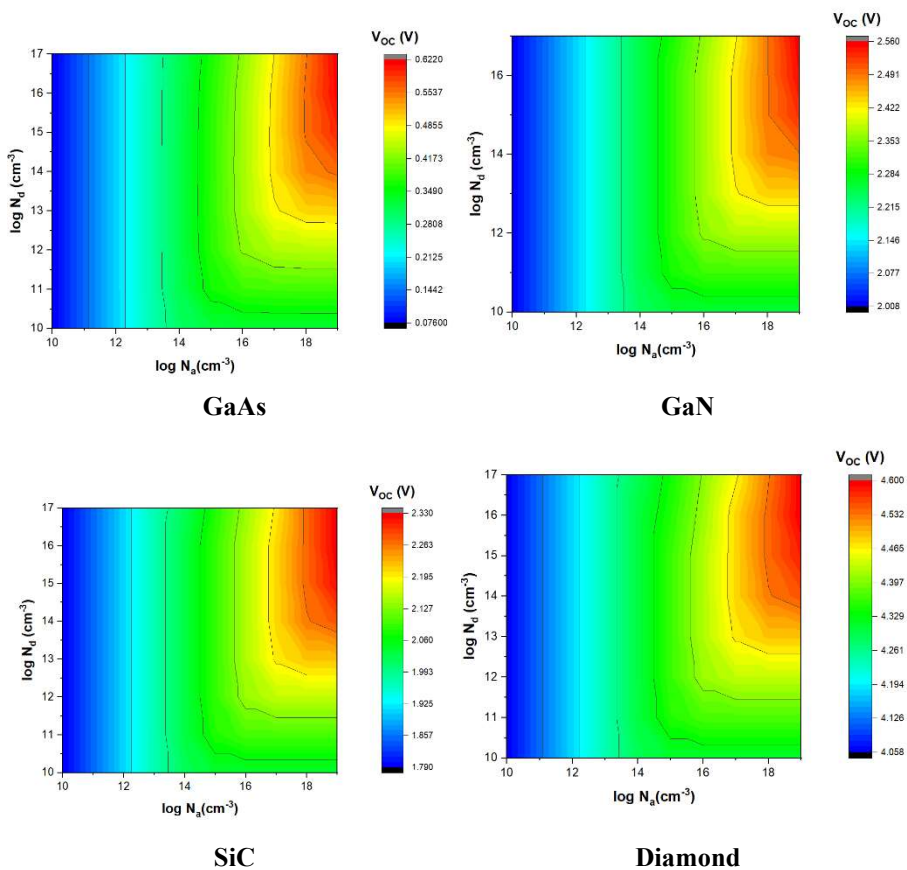
Diamond

شکل ۷ چگالی جریان مدار کوتاه در باتری با نیمه رساناهای مختلف بر حسب  $N_a$  و  $N_d$ .

### ۲.۳.۳ اثر نیمه رساناهای مختلف بر ولتاژ مدار باز

در شکل (۸) مقدار ولتاژ مدار باز برای نیمه رساناهای مختلف GaAs، GaN، SiC و الماس رسم شده است. با توجه به شکل مشاهده می شود که برای  $N_d > 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  و  $N_a > 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  ولتاژ مدار باز مقدار بیشتری دارد. به صورتی که برای نیمه رسانای GaAs و GaN به ترتیب به بیشینه مقدار  $0.622 \text{ V}$  و  $2.560 \text{ V}$  رسیده است. همچنین ملاحظه می شود ولتاژ مدار باز با قرار دادن نیمه رسانای SiC در  $N_d > 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  و  $N_a > 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  مقدار بیشتری دارد و به بیشینه مقدار  $2.330 \text{ V}$  رسیده است. از طرفی مقدار این کمیت برای نیمه رسانای الماس در  $N_d > 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  و  $N_a > 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  به بیشینه مقدار  $4.600 \text{ V}$  رسیده است.





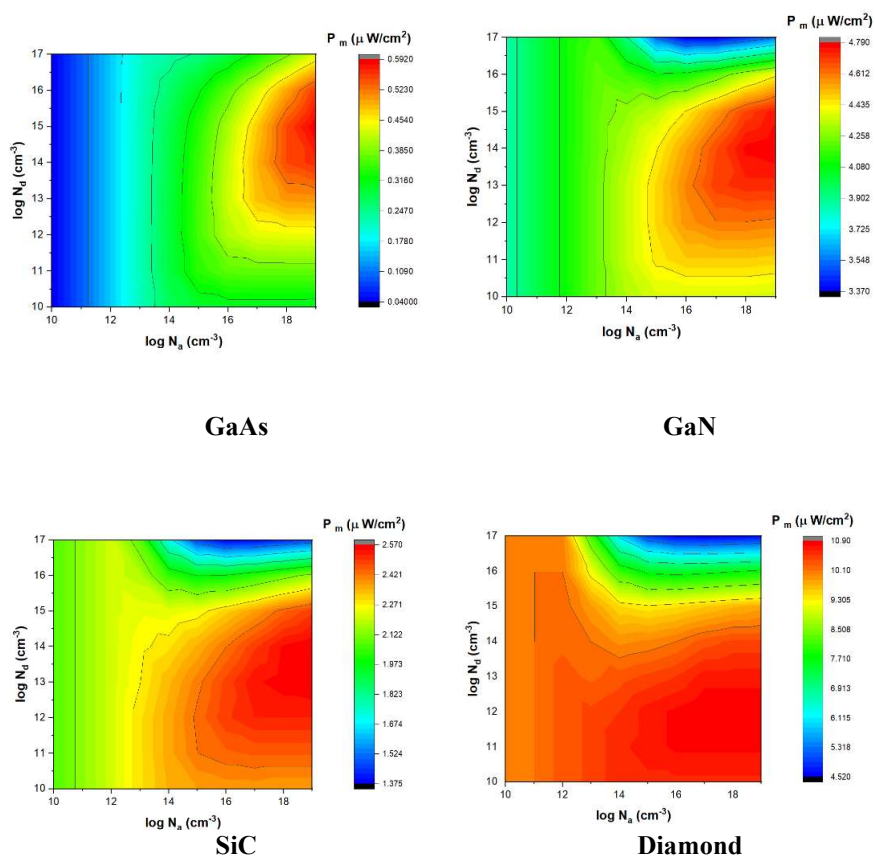
شکل ۸ ولتاژ مدار باز در باتری با نیمه رساناهای مختلف بر حسب  $N_d$  و  $N_a$ .

### ۳.۳.۳ اثر نیمه رساناهای مختلف بر توان خروجی باتری

در شکل (۹) مقدار چگالی توان خروجی باتری برای نیمه رساناهای مختلف GaAs, GaN, SiC و الماس رسم شده است. بر اساس نتایج رسم شده در این شکل مشاهده می شود که برای نیمه رسانای GaAs، در صورتی که  $N_a > 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  و  $N_d > 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  باشد، توان خروجی باتری دارای بیشینه مقدار  $0,592 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  می باشد. همچنین، توان خروجی برای نیمه رسانای GaN نیز برای  $N_a > 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  و  $N_d > 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  به بیشینه مقدار  $4,790 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  رسیده است. توان خروجی با قرار دادن نیمه رسانای SiC نیز برای  $10^{14} < N_a < 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  و  $N_d < 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  به مقدار اشباع  $2,570 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  رسیده است. همچنین بر اساس شکل



ملاحظه می‌گردد که توان خروجی باتری با نیمه‌رسانای الماس نیز برای  $N_d < 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  دارای بیشینه مقدار  $10.90 \mu\text{W/cm}^2$  است.



شکل ۹ توان خروجی باتری با نیمه‌رساناهای مختلف بر حسب  $N_d$  و  $N_a$ .

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، عملکرد باتری بتاولتائیک با چشمه رادیوایزوتوپی  $^{14}\text{C}$  در ساختار اتصال p-n مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان دادند عملکرد باتری به نوع نیمه‌رسانا و مقدار چگالی ناخالصی‌های افزوده شده به شدت وابسته است. به صورتی که با توجه به نوع کاربرد باتری و توان خروجی مورد نیاز می‌توان نیمه‌رسانای مناسب را برای ساخت باتری با چشمه رادیوایزوتوپی  $^{14}\text{C}$  انتخاب نمود. بر اساس نتایج بدست آمده در باتری با نیمه‌رسانای GaAs، در  $N_a = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$



و  $N_d = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  مقادیر  $J_0$ ،  $J_{sc}$ ،  $V_{oc}$ ،  $FF$  و توان خروجی به ترتیب برابر با  $1.2 \mu\text{A/cm}^2$ ،  $5.19 \times 10^{-12} \mu\text{A/cm}^2$ ،  $0.557 \text{ V}$ ،  $81.8\%$  و  $0.547 \mu\text{W/cm}^2$  است.

همچنین، اگر در این نوع باتری GaN به عنوان نیمه‌رسانا قرار داده شود، در  $N_a = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  و  $N_d = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  مقادیر  $J_0$ ،  $J_{sc}$ ،  $V_{oc}$ ،  $FF$  و توان خروجی به ترتیب برابر با  $1.99 \mu\text{A/cm}^2$ ،  $2.66 \times 10^{-44} \mu\text{A/cm}^2$ ،  $2.49 \text{ V}$ ،  $94.3\%$  و  $4.77 \mu\text{W/cm}^2$  است.

با استفاده از نیمه‌رسانای SiC، در  $N_a = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  و  $N_d = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  مقادیر  $J_0$ ،  $J_{sc}$ ،  $V_{oc}$ ،  $FF$  و توان خروجی به ترتیب برابر با  $1.15 \mu\text{A/cm}^2$ ،  $6.9 \times 10^{-41} \mu\text{A/cm}^2$ ،  $2.27 \text{ V}$ ،  $93.8\%$  و  $2.44 \mu\text{W/cm}^2$  است.

در نهایت اگر الماس به عنوان نیمه‌رسانا در ساخت باتری بکار برده شود، در  $N_a = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  و  $N_d = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  مقادیر  $J_0$ ،  $J_{sc}$ ،  $V_{oc}$  و  $FF$  به ترتیب برابر با  $2.21 \mu\text{A/cm}^2$ ،  $1.03 \times 10^{-78} \mu\text{A/cm}^2$ ،  $4.54 \text{ V}$ ،  $96.5\%$  است. در این حالت بیشترین توان خروجی به میزان  $9.68 \mu\text{W/cm}^2$  در بین نیمه‌رساناهای مورد بررسی قابل دستیابی است.

## ۵. تقدیر و تشکر

از حمایت‌های معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی سهند تبریز قدردانی و تشکر می‌گردد.

## منابع

- [1] Prelas Mark A, Weaver Charles L, Watermann L Matthew, Lukosi Eric D, Schott Robert J, Wisniewski Denis A, "A review of nuclear batteries", *Progress in Nuclear Energy* **75**, 117-148, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.04.007>.
- [2] Krasnov A A, Starkov V V, Legotin S A, Rabinovich O I, Didenko S I, Murashev V N, Cheverikin V V, Yakimov E B, Fedulova N A, Rogozev B I, Laryushkin A S, "Improvement of Si-betavoltaic batteries technology", *Advanced Materials Research* **1070**, 585-588, 2015. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1070-1072.585>.
- [3] 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", *Chinese Physics Letters* **25**, 3799-3800, 2008. <https://doi.org/10.1088/0256-307X/25/10/076>.
- [4] Xi S, Li H, Li L, Wu K, Huang G, Wang Z, Zhang Y, Zhou C, "Research on the Performance of Nuclear Battery with SiC-Schottky and GaN-PIN Structure", *Nuclear Technology* **208**, 1-13, 2021. <https://doi.org/10.1080/00295450.2021.1982361>.
- [5] Jahangiri MH, Tavakoli-Anbaran H, "Optimization and Minimization of Dimensions of Direct Charging Nuclear Battery Based on 90 Sr Radioactive Source for Use in MEMS", *Arabian Journal for Science and Engineering* **46**, 5921-5932, 2021. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-05068-3>.



- [6] San H, Yao S, Wang X, Cheng Z, Chen X, "Design and simulation of GaN based Schottky betavoltaic nuclear micro-battery", *Applied Radiation and Isotopes* **80**, 17-22, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.05.010>.
- [7] Kovalev IV, Zelenkov PV, Brezitskaya VV, Lelekov AT, Karaseva MV, "On the analysis of semiconductor materials suitable for the development of a radiation-stimulated power supply based on the nickel-63 radio isotope", *Journal of Physics: Conference Series*, 2019. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/2/022040>.
- [8] Chandrashekhar MVS, Christopher I Thomas, Li Hui, Spencer M G, Lal Amit, "Demonstration of a 4H SiC betavoltaic cell", *Applied Physics Letters* **88**, 033506, 2006. <https://doi.org/10.1063/1.2166699>.
- [9] Wang Y, Lu J, Zheng R, Li X, Liu Y, Zhang X, Zhang Y, Chen Z, "Theoretical study of a high-efficiency GaP-Si heterojunction betavoltaic cell compared with metal-Si Schottky barrier betavoltaic cell", *AIP Advances* **11**, 065110, 2021. <https://doi.org/10.1063/5.0053917>.
- [10] Tsvetkova LA, Tsvetkova SL, Pustovalovb AA, Verbetskiib VN, Baranovc NN, Mandrugind AA, "Radionuclides for Betavoltaic Nuclear Batteries: Micro Scale, Energy-Intensive Batteries with Long-Term Service Life", *Radiokhimiya* **64**, 281-288, 2022. <https://doi.org/10.1134/S1066362222030134>.
- [11] Akimchenko A, Chepurinov V, Dolgopolov M, Gurskaya A, Kuznetsov O, Mashnin A, Radenko V, Radenko A, Surnin O, Zanin G, "Betavoltaic device in por-SiC/Si C-Nuclear Energy Converter", *EPJ Web of Conferences* **158**, 06004, 2017. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201715806004>.
- [12] Kumar Katiyar N, Goel S, "Recent progress and perspective on batteries made from nuclear waste", *Nuclear Science and Techniques* **34**, 1-8, 2023. <https://doi.org/10.1007/s41365-023-01189-0>.
- [13] Petrovskaya AS, Surov SV, Kadkov AY, Tsyganov AB, "New Thermo-Plasma Technology for Selective 14C Isotope Extraction from Irradiated Reactor Graphite", *AIP Conference Proceedings* **2179**, 020020, 2019. <https://doi.org/10.1063/1.5135493>.
- [14] Bower KE, Barbanel YA, Shreter YG, Bohnert GW, Polymers, "Phosphors and Voltaics for Radioisotope Microbatteries", *CRC Press, Boca Raton* **352**, 27, 2002.
- [15] Wang H, Tang X B, Liu Y P, Xu Z H, Liu M, Chen D, "Temperature effect on betavoltaic microbatteries based on Si and GaAs under 63Ni and 147Pm irradiation", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **359**, 36-43, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.07.046>.
- [16] Gui G, Zhang K, Blanchard JP, Ma ZQ, "Prediction of 4H-SiC betavoltaic microbattery characteristics based on practical Ni-63 sources", *Applied Radiation and Isotopes* **107**, 272-7, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2015.11.001>.
- [17] Cheng ZJ, San HS, Li YF, Chen XY, "The design optimization for GaN-based betavoltaic microbattery", *IEEE 5th Int. Conf. on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems NEMS*, 582-6, 2010. <https://doi.org/10.1109/NEMS.2010.5592469>.
- [18] Cheng ZJ, San HS, Chen XY, Liu B, Feng ZH, "Demonstration of a high open-circuit voltage GaN betavoltaic microbattery", *Chinese Physics Letters* **28**, 078401, 2011. <https://doi.org/10.1088/0256-307X/28/7/078401>.
- [19] Lu M, Zhang GG, Fu K, Yu GH, Su D, Hu JF, "Gallium nitride Schottky betavoltaic nuclear batteries", *Energy Convers Manage* **52**, 1955-8, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.10.048>.
- [20] Liu YM, Lu JB, Li XY, Xu X, He R, Zheng RZ, Wei GD, "Theoretical prediction of diamond betavoltaic batteries performance using 63Ni", *Chinese Physics Letters* **35**, 072301, 2018. <https://doi.org/10.1088/0256-307X/35/7/072301>.
- [21] Liu YP, Tang XB, Xu ZH, Hong L, Wang H, Liu M, Chen D, "Influences of planar source thickness on betavoltaics with different semiconductors", *Radioanalytical and Nuclear chemistry* **304**, 517-25, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3879-2>.



- [22] Prelas MA, Weaver CL, Watermann ML, Lukosi ED, Schott RJ, Wisniewski DA, "A review of nuclear batteries", *Progress in Nuclear Energy* **75**, 117-48, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.04.007>.
- [23] Zheng R, Lu J, Li X, Wang Y, Liu Y, Xu X, Chen Z, Zhang X, "Optimization design of GaAs-based betavoltaic batteries with p-n junction and Schottky barrier structures", *Journal of Physics D: Applied Physics* **55**, 1-11, 2022. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac526a>.
- [24] Zhang L, Cheng H, Hu X, Xu X, "Model and Optimal Design of 147Pm SiC-based Betavoltaic Cell", *Superlattices and Microstructures* **123**, 60-70, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2018.01.007>.
- [25] Pelowitz DB, MCNPXTM user's manual. version 2.6.0. Los Alamos National Laboratory Report LA-CP-07-1473. 2008.
- [26] Hao L, Yebing L, Rui H, Yuqing Y, Guanquan W, Zhengkun Z, Shunzhong L, "Simulations about self-absorption of tritium in titanium tritide and the energy deposition in a silicon Schottky barrier diode", *Applied Radiation and Isotopes* **70**, 2559-2563, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2012.07.012>.
- [27] Dong L, Yadav SK, Ramprasad R, Alpay SP, "Band gap tuning in GaN through equibiaxial in-plane strains", *Applied Physics Letters* **96**, 202106, 2010. <https://doi.org/10.1063/1.3431290>.
- [28] Gachovska TK, Hudgins J L, "SiC and GaN Power Semiconductor Devices", *Power Electronics Handbook, Fourth Edition*, 95-155, 2018.
- [29] Bougrov V, Levinshtein ME, Rumyantsev SL, Zubrilov A, "Properties of Advanced Semiconductor Materials GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe", Eds. Levinshtein ME, Rumyantsev SL, Shur MS, *John Wiley & Sons, Inc.*, New York, 1-30, 2001.
- [30] Scajev P, Jarasiunas K, Okur S, Ozgur U Morkoc H, "Carrier dynamics in bulk GaN", *Journal of Applied Physics* **111**, 023702, 2012. <https://doi.org/10.1063/1.3673851>.
- [31] Bouzid F, Saeed MA, Carotenuto R, Pezzimenti F, "Design considerations on 4H-SiC-based p-n junction betavoltaic cells", *Applied Physics A* **128**, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00339-022-05374-7>.
- [32] Harris GL, "Properties of SiC EMIS Data reviews Series, no. 13", *INSPEC, IEE, UK*, 1995.
- [33] Patrick L, Choyke WJ, "Static Dielectric Constant of SiC", *Physics Review B* **2**, 2255-2256, 1970. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.2.2255>.
- [34] Gulbinas K, Grivickas V, Mahabadi HP, Usman M, Hallen A, "Surface Recombination Investigation in Thin 4H-SiC Layers", *Materials Science* **17**, 119-124, 2011. <https://doi.org/10.5755/j01.ms.17.2.479>.
- [35] Kittel C, "Introduction to Solid State Physics", 8th Edition, *Wiley*, 2004.
- [36] Lawrence S, Don R K, "Diamond: Electronic Properties and Applications", *Springer New York, NY*, 1995.
- [37] Spear KE, Dismukes JP, "Synthetic Diamond: Emerging CVD Science and Technology", *John Wiley & Sons*, 1994.
- [38] Grivickas P, Scajev P, Kazuchits N, Mazanik A, Korolik O, Voss LF, Conway AM, Hall DL, Bora M, Subacius L, Bikbajevs V, Grivickas V, "Carrier recombination parameters in diamond after surface boron implantation and annealing", *Applied Physics* **127**, 245707, 2020. <https://doi.org/10.1063/5.0004881>.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

