

انتخاب بهینه مبدل نیمه‌هادی جهت افزایش توان و بازدهی در باتری‌های بتاولتائیک با

چشمه‌های بتازای ${}^3\text{H}$ ، ${}^{63}\text{Ni}$ و ${}^{147}\text{Pm}$

داود قاسم‌آبادی، حسین ذکی دیزجی* و مسعود عبدالله‌زاده

گروه فیزیک، دانشکده و پژوهشکده علوم پایه، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، صندوق پستی ۱۶۹۸۷۱۵۴۶۱، تهران-ایران

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۱۹)

<https://doi.org/10.47176/jame.43.3.1048>

چکیده: مواد نیمه‌هادی به‌عنوان مبدل انرژی گسیلی به انرژی الکتریکی در باتری‌های بتاولتائیک نقش مهمی را ایفا می‌کند. انتخاب بهینه آن‌ها باعث افزایش بازدهی در این باتری‌ها خواهد شد. در این پژوهش بر اساس نیمه‌هادی‌های متداول و با تکیه بر افزایش حداکثری بازدهی باتری بتاولتائیک و امکان به‌کارگیری چشمه‌های بتازای ${}^3\text{H}$ ، ${}^{63}\text{Ni}$ و ${}^{147}\text{Pm}$ ، شاخص‌ها و معیارهای انتخاب بهینه مواد نیمه‌هادی مشخص گردید. معیارهای ارزیابی شامل ضریب پس‌پراکندگی ذرات بتا از نیمه‌هادی، بازدهی تولید زوج الکترون-حفره، مشخصات و ویژگی‌های الکترونیکی، آستانه آسیب تابشی، بهره تولید تابش ترمزی، توان توقف و نفوذ ذرات بتا در نیمه‌هادی، مشخصات فیزیکی و تحمل دمایی، قابلیت دسترسی و ساخت در نظر گرفته شده است. بر اساس این معیارها و با مقایسه با نیمه‌هادی سیلیکون، نیمه‌هادی‌های متداول مورد ارزیابی کمی قرار گرفته شده است. تعداد ده نیمه‌هادی $\beta\text{-B}$ ، Diamond، 2H-SiC ، 3C-SiC ، 4H-SiC ، 6H-SiC ، C-BN ، AlN ، MgO ، B4C با عدد اتمی مؤثر کم‌تر از ۱۴ و باند گپ بالاتر از $1/12$ الکترون‌ولت در دمای اتاق (300 K) در مقایسه با نیمه‌هادی سیلیکون، مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به نتایج حاصل از شاخص‌های ارزیابی، نیمه‌هادی‌های 4H-SiC ، c-BN ، Diamond گزینه‌های مناسب‌تر از نظر بازدهی انتخاب گردید. با توجه به ارزیابی‌های انجام‌شده در این پژوهش، برای ساختارهای دو بعدی باتری بتاولتائیک نوع پیوند نیمه‌هادی برای الماس از نوع شاتکی با رادیوایزوتوپ ${}^{147}\text{Pm}$ ، همچنین برای نیمه‌هادی 4H-SiC با رادیوایزوتوپ‌های ${}^{63}\text{Ni}$ و ${}^3\text{H}$ و برای ساختارهای سه‌بعدی باتری‌های بتاولتائیک ترکیب Si با رادیوایزوتوپ‌های ${}^{147}\text{Pm}$ و ${}^{63}\text{Ni}$ پیشنهاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: نیمه‌هادی، باتری، بتاولتائیک، بازدهی، معیار ارزیابی، انتخاب بهینه.

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: kpzaki@ihu.ac.ir

The Optimal Choice of Semiconductor Converter to Increase Power and Efficiency in Betavoltaic Batteries with ^3H , ^{63}Ni , and ^{147}Pm Beta Sources

D. Ghasemabadi, H. Zaki Dizaji* and M. Abdollahzade

Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, Imam Hossein Comprehensive University, P.O.Box: 1698715461, Tehran - Iran

ABSTRACT

Semiconductor materials play an important role as transmitters of electrical energy in betavoltaic batteries. Optimal selection will increase the efficiency of these batteries. In this study, based on common semiconductors and relying on increasing the maximum efficiency of betavoltaic batteries and the possibility of using ^3H , ^{63}Ni , and ^{147}Pm beta sources, the indicators and criteria for optimal selection of semiconductor materials were determined. Evaluation criteria include backscattering coefficient of beta particles from semiconductors, efficiency of electron-hole pairs generation, electronic specifications and properties, radiation damage threshold, radiation yield, stopping power and penetration of beta particles in semiconductors, physical characteristics, and temperature tolerance, accessibility, and fabrication were considered. Based on these criteria and compared with silicon semiconductors, conventional semiconductors have been quantitatively evaluated. Ten semiconductors including β -B, Diamond, 2H-SiC, 3C-SiC, 4H-SiC, 6H-SiC, c-BN, AlN, MgO, B4C with effective atomic number less than 14 and bandgap above 1.12 eV at room temperature (300K) compared to silicon semiconductors were evaluated. Considering the results of evaluation indicators, Diamond, c-BN, and 4H-SiC were selected as more suitable semiconductors in terms of efficiency. Based on the experiments performed in this study, a betavoltaic semiconductor type junction for Schottky diamond with ^{147}Pm radioisotope, for 4H-SiC semiconductors with ^{63}Ni or ^3H radioisotopes, and for three-dimensional structures of betavoltaic batteries, Si combination with ^{147}Pm or ^{63}Ni radioisotopes is recommended for planar batteries.

Keywords: Semiconductor, Battery, Betavoltaic, Efficiency, Evaluation criteria, Optimal choice.

۱- مقدمه

باتری‌ها، انتخاب بهینه مواد نیمه‌رسانا است که می‌تواند تأثیر بسزایی در بازدهی و توان خروجی نهایی آن‌ها داشته باشد. تحقیقات اخیر بر بهبود عملکرد باتری‌های بتاولتائیک از طریق انتخاب مواد مناسب متمرکز شده‌اند و نیمه‌رساناهایی با جریان بازترکیب پایین و گاف انرژی پهن به‌عنوان کلنیدهای امیدوارکننده معرفی شده‌اند (۴). نیمه‌هادی‌های با شکاف باند وسیع مانند GaN، SiC و الماس به دلیل کارایی تبدیل بالا و مقاومت در برابر تابش برای باتری‌های بتاولتائیک مناسب تلقی شده‌اند (۵). با این حال، تحقیقات اخیر این فرضیه را که شکاف باند وسیع‌تر همیشه منجر به عملکرد بهتر می‌شود، به‌ویژه برای منابع با توان خروجی بالا، به چالش کشیده است (۶).

طراحی باتری بتاولتائیک برای اولین بار توسط راپارپورت در شرکت آمریکایی RCA در سال ۱۹۵۴ مورد بررسی قرار گرفت و بعداً یک باتری رادیواکتیو با استفاده از یک نیمه‌هادی در سال ۱۹۵۶ ثبت اختراع شد. باتری‌های آلفا و بتاولتائیک

باتری‌های بتاولتائیک یک نوع از باتری‌های هسته‌ای بوده که انرژی گسیلی از چشمه‌های رادیوایزوتوپی بتازا را با بهره‌گیری از بستر نیمه‌هادی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند (۱). این باتری‌ها دارای چندین ویژگی منحصر به فرد هستند. از قبیل تأمین ولتاژ و جریان برای مدت طولانی (چندین سال تا چندین دهه)، چگالی انرژی بالا و قابلیت کوچک‌سازی هستند (۲). این برتری باتری‌های بتاولتائیک نسبت به دیگر انواع باتری‌ها باعث شده که آن‌ها منبع انرژی جذابی برای تأمین نیازهای آینده قطعات الکترونیکی باشند. این باتری‌ها اغلب از رادیوایزوتوپ‌هایی نظیر ^3H و ^{63}Ni استفاده می‌کنند و توان خروجی آن‌ها می‌تواند از مقیاس چند نانوات تا صدها نانوات متغیر باشد (۳). با وجود پتانسیل بالای این فناوری، باتری‌های بتاولتائیک با چالش‌هایی در دستیابی به کارایی بالای تبدیل انرژی و چگالی توان مواجه هستند. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در طراحی و ساخت این

توسط پفان و اولسن در سال ۱۹۵۴ شرح داده شد که در آن پفان آسیب شبکه‌های نیمه‌هادی‌ها را به دلیل تابش آلفا با انرژی بالا و ذرات بتا مشاهده کرد. در دهه ۱۹۷۰، باتری بتاولتائیک ساخته شده از اتصالات p-n و Si در آزمایشگاه دونالد داگلاس در آزمایش‌های بالینی برای دستگاه‌های ضربان‌ساز قلب استفاده شد. در اوایل سال ۱۹۷۰، اولسن پیشنهاد کرد که باتری‌های بتاولتائیک با استفاده از نیمه‌هادی‌های شکاف بلند بزرگ و غیرمستقیم از بازدهی بالاتری برخوردار هستند. از سال ۱۹۸۹، بسیاری از محققان روی مواد نیمه‌هادی مختلف مانند: SiC, Si, GaN, GaAs, AlGaAs و ... کار کرده‌اند (۷ و ۸).

در داخل کشور در سال ۱۳۸۶ طراحی مفهومی و شبیه‌سازی باتری هسته‌ای مورد استفاده در ضربان‌سازهای مصنوعی قلب توسط محمدیان (۹)، صورت پذیرفت. در این پژوهش مدل‌سازی یک قطعه بتاولتائیک در اتصالات pn با استفاده از کد MCNP جهت استفاده در ضربان‌سازهای قلب شبیه‌سازی گردید.

در سال ۱۳۹۷، موحیدیان (۱۴)، پژوهشی در طراحی شکل هندسی بهینه و امکان‌سنجی ساخت باتری هسته‌ای شارژ مستقیم- بتاولتائیک مایع را انجام داده است. در این پژوهش استفاده از چشمه ترکیبی گوگرد ۳۵ و نیکل ۶۳ به‌عنوان چشمه بتازای مایع در کاربرد با باتری بتاولتائیک با نیمه‌هادی سیلیکون و پیوند pn ارائه شده است. در سال ۱۳۹۸، ملکی و اطاعتی (۱۵)، افزایش قابلیت‌های شبیه‌سازی میکروباتری‌های بتاولتائیک با استفاده از کد ترکیبی MCNPX-SILVACO را ارائه داده‌اند. در این مقاله با استفاده از کد MCNPX تولید فضایی الکترون-حفره‌ها به‌صورت یک فایل به‌عنوان ورودی در کد سیلواکو استفاده گردید. در سال‌های اخیر، باتری‌های بتاولتائیک به یک منبع انرژی ایده‌آل برای سیستم‌های میکروالکترومکانیکی تبدیل شده‌اند (۱۰).

در سال ۱۳۹۲، مقایسه عملکرد حسگر دمایی بتاولتائیک مبتنی بر چشمه نیکل-۶۳ و پرومیتیم-۱۴۷ توسط قاسمی‌نژاد و رحمانی (۱۰)، انجام و ارائه گردید. در این پژوهش تئوری که با کد MCNP انجام شده است؛ با توجه به وابستگی تغییرات ولتاژ مدار باز باتری با تغییرات دما، ایده استفاده از باتری به‌عنوان حسگر دمایی مورد بررسی قرار گرفته است.

در سال ۱۳۹۳ تعیین پارامترهای بهینه نیمه‌هادی سیلیکون برای کاربرد در باتری هسته‌ای بتاولتائیک توسط خسروی‌نیا و رحمانی (۱۱)، انجام گردید که در این پژوهش دو قطعه بتاولتائیک با پیوند pn و سد شاتکی با چشمه نیکل ۶۳ و نیمه‌هادی سیلیکون بررسی شده است و در آخر بازدهی باتری بتاولتائیک با پیوند pn نسبت به پیوند شاتکی در شرایط یکسان و با فعالیت چشمه ۱۰ میلی کوری ۲/۷ برابر بیش‌تر گزارش شده است.

یک سلول بتاولتائیک از دو قسمت اصلی چشمه و قطعه نیمه‌هادی تشکیل می‌شود. اتصال قطعه نیمه‌هادی از نوع پیوند pn, pin و یا شاتکی است (۱۶). پارامترهای وابسته به ماده نیمه‌هادی مانند غلظت آلاینده‌ها، عرض ناحیه تهی، طول عمر حامل اقلیت، نوع اتصال، پروفایل تخلیه انرژی ذرات بتا در نیمه‌هادی، همچنین فرآیندهای شامل توزیع، تولید، جداسازی و بازترکیب زوج الکترون-حفره، در توان خروجی و بازدهی تبدیل انرژی سلول بتاولتائیک مؤثر هستند (۱۷)؛ بنابراین انتخاب بهینه نیمه‌هادی به‌عنوان واحد مبدل در سلول

در سال ۱۳۹۳ تعیین پارامترهای بهینه نیمه‌هادی سیلیکون برای کاربرد در باتری هسته‌ای بتاولتائیک توسط خسروی‌نیا و رحمانی (۱۱)، انجام گردید که در این پژوهش دو قطعه بتاولتائیک با پیوند pn و سد شاتکی با چشمه نیکل ۶۳ و نیمه‌هادی سیلیکون بررسی شده است و در آخر بازدهی باتری بتاولتائیک با پیوند pn نسبت به پیوند شاتکی در شرایط یکسان و با فعالیت چشمه ۱۰ میلی کوری ۲/۷ برابر بیش‌تر گزارش شده است.

در همان سال امیرمزلقانی و ذکی (۱۲)، فعالیت علمی طراحی و شبیه‌سازی باتری رادیوایزوتوپی بر پایه دیود شاتکی

$$FF = \frac{\frac{q}{K_B T} V_{oc} - \ln\left(\frac{q}{K_B T} V_{oc} + 0.72\right)}{\frac{q}{K_B T} V_{oc} + 1} \quad (4)$$

در این رابطه q بار الکترون، T دما برحسب کلوین، K_B ثابت بولتزمن و V_{oc} ولتاژ مدار باز سلول بوده و از رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$V_{oc} = \frac{nK_B T}{q} \ln\left(1 + \frac{J_{sc}}{J_0}\right) \quad (5)$$

در این رابطه، J_{sc} چگالی جریان اتصال کوتاه و J_0 چگالی جریان اشباع و n ضریب ایده‌آل برای نیمه‌هادی است (۱۱). کمینه چگالی جریان اشباع در نیمه‌هادی‌ها از رابطه (۶) قابل حصول است.

$$J_0 \left(\frac{A}{cm^2}\right) = 1.5 \times 10^5 \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right) \quad (6)$$

در این رابطه E_g گاف انرژی برحسب الکترون‌ولت، $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ ثابت بولتزمن و T دما برحسب کلوین است (۲۰). حداکثر جریان خروجی سلول بتاولتائیک از رابطه (۷) قابل محاسبه است.

$$I_{max} = \frac{qAE_{av\beta}}{w} = \frac{qAE_{av\beta}}{2.8E_g + 0.5} \quad (7)$$

w متوسط انرژی برای تولید یک زوج الکترون-حفره است. این رابطه نشان می‌دهد مقدار انرژی شکاف باند نیمه‌هادی با جریان خروجی رابطه عکس دارد. اگر مقدار تجربی w برای نیمه‌هادی وجود نداشته باشد می‌توان از فرمول کلاین^۱ طبق رابطه (۸) برای محاسبه آن استفاده کرد (۲۱).

$$w = 2.8E_g + 0.5eV \quad (8)$$

به‌طور تقریبی انرژی لازم برای تولید زوج الکترون-حفره سه برابر انرژی باند گپ نیمه‌هادی است. برای مشخص شدن تأثیر قسمت‌های مختلف بر بازدهی سلول بتاولتائیک، می‌توان بازدهی تبدیل انرژی کل η_{total} یا بازدهی کلی سلول بتاولتائیک به‌صورت رابطه (۹) تعریف می‌شود (۲۲).

$$\eta_{total} = \eta_{\beta} \eta_{couble} \eta_{semi} \quad (9)$$

بتاولتائیک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هرچند باتری‌های بتاولتائیک با نیمه‌هادی‌های مختلف شبیه‌سازی و ساخته شده است (۱۸)، ولی انتخاب و استفاده ماده نیمه‌هادی برحسب معیارهای مشخص تعیین نشده و با به‌صورت کمی بررسی نگردیده است. در این پژوهش، انتخاب بهینه مدل نیمه‌هادی جهت افزایش توان و بازدهی در باتری‌های بتاولتائیک صورت گرفته است. برای این منظور، ابتدا با بررسی عوامل مؤثر در بازدهی تبدیل انرژی باتری‌های بتاولتائیک، معیارها و شاخص‌های انتخابی مرتبط با نیمه‌هادی احصاء گردیده و به‌صورت کمی ارزیابی شدند و در ادامه با توجه به نیمه‌هادی‌های متداول و قابل دسترس، مواد نیمه‌هادی بهینه تعیین و انتخاب شده است.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مبانی نظری

بازدهی کلی هر سیستم به‌صورت نسبت توان خروجی به توان ورودی سیستم تعریف می‌شود. بازدهی تبدیل انرژی کل سلول بتاولتائیک (η_{total})، به‌صورت نسبت توان بیشینه خروجی سلول به توان کل چشمه بتازا تعریف می‌شود و طبق رابطه (۱) به‌دست می‌آید.

$$\eta_{total} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (1)$$

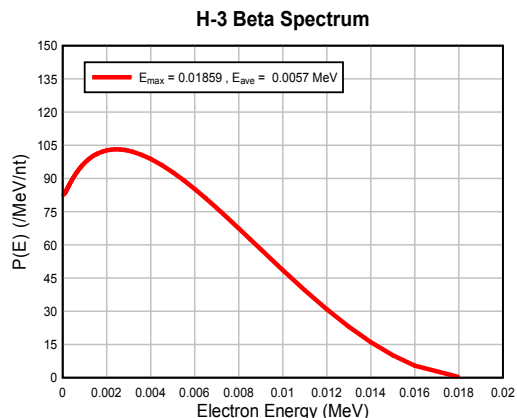
P_{in} توان کل چشمه بتازا و مطابق رابطه (۲) است. در این رابطه q بار الکترون، A اکتیویته چشمه و $E_{av\beta}$ میانگین انرژی طیف ذرات بتا است.

$$P_{in} = qAE_{av\beta} \quad (2)$$

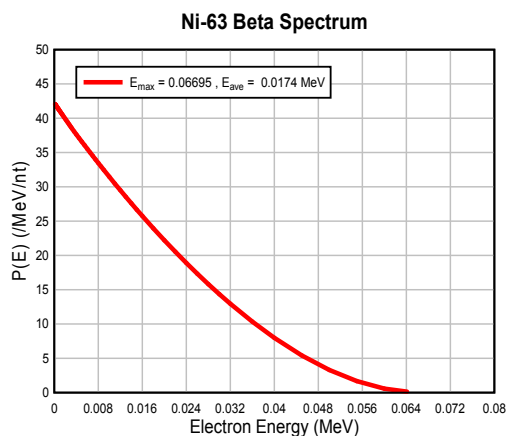
P_{out} توان خروجی سلول بتاولتائیک از رابطه (۳) به‌دست می‌آید

$$P_{out} = V_{oc} I_{sc} FF \quad (3)$$

در این رابطه V_{oc} ولتاژ مدار باز، I_{sc} جریان اتصال کوتاه و FF فاکتور پرکنندگی است که به‌صورت تجربی از رابطه (۴) به‌دست می‌آید (۱۹).



شکل ۱- طیف، میانگین و بیشینه انرژی ذرات بتای ^3H



شکل ۲- طیف، میانگین و بیشینه انرژی ذرات بتای ^{63}Ni

N_0 کل تعداد ذرات بتای گسیلی از چشمه است و N_β تعداد ذرات بتای گسیلی از چشمه که به سطح مبدل نیمه‌هادی می‌رسند. اثر خودجذبی چشمه رادیو ایزوتوپی و اتلاف جهتی به دلیل تابش همسانگرد ذرات بتا از عوامل اصلی ایجاد این بازدهی هستند (۲۳). ایزوتوپ‌های منتخب مورد استفاده در باتری بتاولتائیک در این پژوهش مطابق جدول (۱) است.

برای بررسی ایزوتوپ‌های ساطع کننده بتا برای استفاده در طراحی باتری بتاولتائیک، مرجع معتبر ICRP107 انتخاب شد (۲۴). نرم‌افزار کمکی این مرجع با نام DECDATA امکان بررسی اطلاعات هسته‌ای مربوط به هر ایزوتوپ و ترسیم طیف انرژی آن را فراهم می‌کند. طیف، میانگین و بیشینه انرژی بتای ایزوتوپ‌های ^{147}Pm ، ^{63}Ni و ^3H در شکل‌های (۱) تا (۳) استخراج و نشان داده شده است.

جدول ۱- ایزوتوپ‌های منتخب مورد استفاده در باتری بتاولتائیک (۲۴)

ایزوتوپ	نیمه‌عمر (سال)	انرژی متوسط طیف (keV)	انرژی بیشینه طیف (keV)
^{147}Pm	۲/۶۲	۲۲۴/۶	۶۱/۹
^{63}Ni	۱۰۰/۱	۶۶/۹۵	۱۷/۴
^3H	۱۲/۳۲	۱۸/۵۹	۵/۷

در رابطه (۹)، η_β بازدهی چشمه بتازا، η_{couple} بازدهی جفت‌شدگی (کوپلینگ) چشمه به نیمه‌هادی و η_{semi} بازدهی نیمه‌هادی است. بدیهی است که برای داشتن بیشینه بازدهی سلول بتاولتائیک η_{total} ، بایستی سه بازدهی η_β ، η_{couple} و η_{semi} بیشینه گردند.

پهنای شکافت باند نیمه‌هادی‌ها تا حدودی وابسته به دما است و همچنین چگالی حامل‌های ذاتی نیمه‌هادی نیز تابعی از دما است. به‌طور کلی، افزایش دما باعث کاهش این پارامترها و در نتیجه کاهش بازدهی باتری بتاولتائیک می‌گردد (۳۲)؛ بنابراین مواد نیمه‌هادی با حداقل تغییرات بازدهی با افزایش دما، گزینه انتخابی مناسب‌تری هستند.

با توجه به انرژی ذرات بتا باید نوعی از نیمه‌هادی انتخاب شود که تحمل توان تابشی متناسب با چشمه بتازا را دارا باشد. آستانه آسیب تابشی نیمه‌هادی به‌عنوان یک پارامتر در انتخاب نیمه‌هادی مناسب باید لحاظ شود. باید از نیمه‌هادی استفاده گردد که دارای تحمل تابشی بالاتری است و آستانه انرژی آسیب تابشی آن از بیشینه انرژی طیف ذرات بتا تا حد امکان بالاتر باشد. به‌خصوص این مطلب باید در ناحیه فعال نیمه‌هادی (ناحیه تهی به‌علاوه طول پخش حامل‌های اقلیت) لحاظ گردد.

۲-۲- بازدهی چشمه بتازا (η_β)

η_β کسری از الکترون‌های ساطع شده از چشمه است که به سطح مبدل می‌رسند. این بازدهی وابسته به چشمه بتازا است (رابطه ۱۰).

$$\eta_\beta = \frac{N_\beta}{N_0} \quad (10)$$

به صورت رابطه (۱۳) است.

$$\eta_0(Z, E) = \beta \left[1 - \exp\left(-6.6 \times 10^{-3} \beta \frac{5}{2Z}\right) \right], \quad (13)$$

$$\beta = 0.40 + 0.065 \ln(E)$$

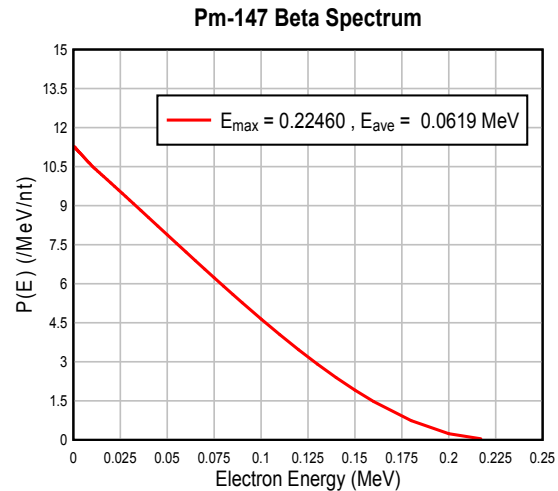
که در آن Z عدد اتمی عنصر هدف $Z \geq 4$ و E انرژی جنبشی الکترون برحسب الکترون‌ولت در بازه انرژی قابل قبول $0.5 \leq E \leq 100 \text{keV}$ می‌باشد (۱۲). برای استفاده از رابطه (۱۳) در نیمه‌هادی‌های مرکب از عدد اتمی عنصر نزدیک به عدد اتمی مؤثر آن‌ها استفاده شده است. عدد اتمی مؤثر به صورت رابطه (۱۴) قابل محاسبه است.

$$Z_{\text{eff}} = \frac{\sum_{i=1}^L \left(\frac{w_i}{A_i} \right) Z_i^2}{\sum_{i=1}^L \left(\frac{w_i}{A_i} \right) Z_i} \quad (14)$$

در رابطه (۱۴) L تعداد عناصر موجود در ترکیب نیمه‌هادی، w_i کسر وزنی عنصر i ام، A_i وزن اتمی عنصر i ام و Z_i عدد اتمی عنصر i ام است (۲۶). احتمال جمع‌آوری الکترون-حفره‌های تولیدشده در داخل ناحیه تهی در اثر اندرکنش ذرات بتا با نیمه‌هادی ۱۰۰ درصد در نظر گرفته می‌شود. در این ناحیه میدان الکتریکی، به سرعت الکترون-حفره‌ها از یکدیگر جدا می‌کند. احتمال جمع‌آوری الکترون-حفره‌هایی که خارج از ناحیه تهی ایجاد می‌شوند کمتر از یک است زیرا زوج الکترون-حفره‌ها باید به داخل ناحیه تهی نفوذ کنند. احتمال جمع‌آوری در این قسمت به فاصله حامل‌های اقلیت از ناحیه تهی و طول پخش آن‌ها بستگی دارد. احتمال جمع‌آوری در ناحیه p و n از رابطه (۱۵) به دست می‌آید (۲۷).

$$C_\beta = 1 - \tanh\left(\frac{d}{L_d}\right) \quad (15)$$

در این رابطه d فاصله از ناحیه تهی و L_d طول پخش حامل‌های اقلیت در نیمه‌هادی می‌باشند که لزوماً در دو طرف ناحیه تهی ممکن است یکسان نباشند. بر اساس رابطه (۱۵)، احتمال جمع‌آوری الکترون-حفره‌هایی که خارج از ناحیه تهی ایجاد می‌شوند و فاصله آن‌ها تا ناحیه تهی بیش‌تر از طول پخش حامل‌های اقلیت است، در نظر گرفته نمی‌شود، بنابراین



شکل ۳- طیف، میانگین و بیشینه انرژی بتای ^{147}Pm .

۳-۲- بازدهی جفت‌شدگی (η_{Couple})

بازدهی که میزان ورود ذرات بتا به نیمه‌هادی و احتمال جمع‌آوری زوج الکترون-حفره را نشان می‌دهد. بازدهی جفت‌شدگی (η_{Couple}) نامیده می‌شود و طبق رابطه (۱۱) تعریف می‌گردد.

$$\eta_{\text{Couple}} = (1 - \eta_{\text{BSE}}) C_\beta \quad (11)$$

در رابطه (۱۱) C_β احتمال جمع‌آوری الکترون-حفره و η_{BSE} ضریب پس‌پراکندگی ذرات بتا از سطح نیمه‌هادی است. ضریب η_{BSE} به عنوان یک معیار ارزیابی در انتخاب نیمه‌هادی به عنوان مدل سلول بتا ولتائیک لحاظ می‌گردد. ضریب پس‌پراکندگی ذرات بتا از نیمه‌هادی به صورت کسری از الکترون‌های بازتاب شده از سطح نیمه‌هادی به کل تعداد ذرات بتای فرودی به نیمه‌هادی تعریف می‌شود. بهره بازتاب یا ضریب پس‌پراکندگی η_{BSE} به صورت رابطه (۱۲) تعریف می‌شود.

$$\eta_{\text{BSE}} = \frac{N_{\text{BSE}}}{N_B} \quad (12)$$

در رابطه (۱۲) N_{BSE} تعداد ذرات بازتاب شده از سطح و N_B تعداد کل ذرات رسیده به نیمه‌هادی است (۲۵). روابط تحلیلی مختلفی برای محاسبه ضریب پس‌پراکندگی بیان شده است، یکی از بهترین آن‌ها که برای محاسبه ضریب پس‌پراکندگی الکترون‌ها با تابش عمودی بر هدف بیان شده، فرمول تجربی استاب^۲

ممکن باشد. بنابراین تناسب عمق نفوذ (برد) ذرات بتا در نیمه‌هادی و پروفایل انرژی ذخیره‌شده در ناحیه فعال مبدل می‌تولند به‌عنوان یک فاکتور در انتخاب نیمه‌هادی مناسب در نظر گرفته شود. هنگامی که انرژی ذره بتای فرودی افزایش می‌یابد. سهم انرژی اتلافی افزایش می‌یابد. اتلاف انرژی تابشی هنگامی است که ذرات بتا با هسته‌های اتم ماده هدف تحت نیروی کلونی برخورد می‌کنند، اتفاق می‌افتد. ذرات بتای فرودی برهمکنش‌کننده با هسته اتم‌های هدف، سرعت و جهت آن‌ها تغییر کرده و دچار اتلاف انرژی می‌شوند. این نوع اتلاف انرژی امواج الکترومغناطیسی، تابش ترمزی نام دارد. برای تخمین بهره تابش ترمزی در نیمه‌هادی از رابطه (۱۸) استفاده می‌گردد.

$$Y \cong \frac{6 \times 10^{-4} ZE}{1 + 6 \times 10^{-4} ZE} \quad (18)$$

در این رابطه Y بهره تابشی، Z عدد اتمی مؤثر جاذب نیمه‌هادی و E انرژی الکترون برحسب MeV است (۳۰). چون ذرات بتا دارای طیف پیوسته انرژی تا یک مقدار بیشینه هستند برای مقایسه بهره تابشی، متوسط انرژی و یا بیشینه انرژی ذرات بتا را در نظر گرفت. رابطه (۱۸) نشان می‌دهد بهره تابش ترمزی با افزایش عدد اتمی و انرژی ذرات بتا رابطه مستقیم دارد؛ بنابراین انرژی ذرات بتا بالاتر منجر به تولید تابش ترمزی بیش‌تری در نیمه‌هادی می‌شود.

۲-۴- بازدهی نیمه‌هادی (η_{semi})

بازدهی نیمه‌هادی (η_{semi}) به‌صورت رابطه (۱۹) تعریف می‌شود.

$$\eta_{\text{semi}} = \frac{qV_{\text{oc}}FF}{w} \quad (19)$$

q بار الکترون و V_{oc} ولتاژ مدار باز سلول بتاوتائیک و w متوسط انرژی برای تولید یک زوج الکترون-حفره و FF فاکتور پرکنندگی است. رابطه بین باند گپ و ولتاژ خروجی به‌صورت رابطه (۲۰) تعریف می‌شود که در این رابطه η_{dp} بازدهی پتانسیل خروجی^۳ است.

$$qV_{\text{oc}} = \eta_{\text{dp}} E_g \quad (20)$$

نیمه‌هادی‌های دارای تحرک حامل‌های بالاتر دارای طول پخش حامل‌های اقلیت بزرگ‌تری هستند و دارای بازدهی بهتری خواهند بود. این ویژگی به‌عنوان یکی از فاکتورهای انتخاب نیمه‌هادی تعیین می‌گردد. برد ذرات بتا باید متناسب با این طول فعال مبدل و انرژی ذخیره‌شده از آن‌ها در نیمه‌هادی در این قسمت به‌خصوص در ناحیه تهی باید بیشینه ممکن باشد.

یکی از دقیق‌ترین روابط برای محاسبه برد ذره بتای با انرژی E در ماده، رابطه کانایا و اکایاما مطابق رابطه (۱۶) است. در این رابطه Z عدد اتمی هدف، A وزن اتمی هدف برحسب گرم، ρ چگالی برحسب $\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$ و E انرژی فرودی برحسب الکترون‌ولت (eV) است (۲۸).

$$R(\text{cm}) = \frac{2.76 \times 10^{-11} A E^{\frac{5}{3}} (1 + 0.978 \times 10^{-6} E)^{\frac{5}{3}}}{\rho Z^9 (1 + 1.958 \times 10^{-6} E)^{\frac{5}{3}}} \quad (16)$$

آهنگ انرژی اتلافی یونش یا برانگیزش هنگامی که ذرات بتا از ماده نیمه‌هادی عبور می‌کند. از رابطه (۱۷) به‌دست می‌آید.

$$\frac{dE}{ds} = -\frac{78500 Z \rho}{E A} \ln \left(\frac{1.66 E}{J} \right) \quad (17)$$

در این رابطه Z عدد اتمی، A وزن اتمی، ρ چگالی جرمی، S فاصله از مسیر الکترون ورودی، E انرژی الکترون، J میانگین انرژی برای تولید یک زوج الکترون-حفره است (۲۹). برای تخمین دقیق‌تر و محاسبه اتلاف انرژی طیف انرژی ذرات بتا در نیمه‌هادی می‌توان از کدهای مونت‌کارلویی قدرتمندی نظیر GEANT4 یا MCNP بهره گرفت. طبق رابطه (۱۶)، نفوذ تابش ذرات بتا در ماده نیمه‌هادی، به چگالی آن وابسته است. عمق نفوذ تابش در مواد با چگالی کمتر، کوتاه‌تر می‌باشد و بنابراین به ضخامت بیش‌تری از آن ماده برای جذب تابش فرودی نیاز است؛ برای مثال، چگالی نیمه‌هادی Diamond تقریباً ۱/۵ برابر چگالی Si است، ضخامت لازم در شرایط یکسان برای جذب تابش فرودی کمتر و حدود دوسوم ضخامت سیلیکون خواهد بود. باید عمق نفوذ ذرات بتا و طول پخش حامل‌های اقلیت تطابق خوبی با یکدیگر داشته باشند، به‌طوری‌که پروفایل انرژی ذخیره‌شده در واحد طول نیمه‌هادی در ناحیه فعال آن، بیشینه

$$\begin{aligned} \eta_{\text{total}} &= \eta_{\beta} \eta_{\text{couble}} \eta_{\text{semi}} \\ &= \eta_{\beta} C_{\beta} (1 - \eta_{\text{BSE}}) \eta_{\text{pp}} \eta_{\text{dp}} \text{FF} \\ &= \eta_{\beta} C_{\beta} \eta_{\text{cs}} \eta_{\text{dp}} \text{FF} \end{aligned} \quad (27)$$

۲-۵- روش کار

با توجه به مبانی نظری بیان‌شده در بخش (۲-۱)، عوامل اثرگذار در کارکرد یک قطعه نیمه‌هادی برای مبدل گسیلی-الکتريکی، معیارهای اصلی برای انتخاب نیمه‌هادی مناسب شامل: ضریب پس‌پراکنندگی ذرات بتا از نیمه‌هادی، بازدهی تولید زوج الکترون-حفره، مشخصات و ویژگی‌های الکترونیکی، آستانه آسیب تابشی، بهره تولید تابش ترمزی، توان توقف و نفوذ ذرات بتا در نیمه‌هادی، مشخصات فیزیکی و تحمل دمایی و در نهایت قابلیت دسترسی و ساخت در نظر گرفته شد. بر اساس این معیارها و با مقایسه با نیمه‌هادی سیلیکون، نیمه‌هادی‌های متداول مورد ارزیابی کمی قرار گرفته‌شده است. محاسبات مربوط به هر معیار ارزیابی با توجه به روابط مربوطه انجام‌شده و نتایج به‌صورت نمودار و جدول ارائه شده است. در پایان با توجه به مقایسه کل معیارهای ارزیابی انتخاب بهینه نیمه‌هادی با چشمه رادیوایزوتوپی مناسب انتخاب می‌گردد. با توجه به این‌که نیمه‌هادی‌ها دارای عدد اتمی مؤثر کمتر از ۱۴ و شکاف بلند بالاتر از ۱/۱۲ الکترون‌ولت در دمای اتاق داشته باشند، به تعداد ده نیمه‌هادی $\beta\text{-B}$, Diamond, 2H-SiC, 3C-SiC, 4H-SiC, c-BN, AlN, MgO, B₄C انتخاب شد و مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند. مشخصات این ده نیمه‌هادی در جدول (۲) آورده شده است (۳۳).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشخصات الکترونیکی نیمه‌هادی

در این قسمت به بررسی مشخصات الکترونیکی نیمه‌هادی به‌عنوان یک شاخص ارزیابی پرداخته‌شده است.

(۱) تحرک الکترون و حفره:

همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، نیمه‌هادی‌های

با توجه به رابطه‌های (۱۹) و (۲۰)، برای بازدهی نیمه‌هادی از رابطه (۲۱) قابل حصول است.

$$\eta_{\text{semi}} = \frac{\eta_{\text{dp}} E_g \text{FF}}{w} \quad (21)$$

η_{pp} بازدهی تولید زوج الکترون-حفره به‌صورت رابطه (۲۲) تعریف می‌شود.

$$\eta_{\text{pp}} = \frac{E_g}{w} \quad (22)$$

وابستگی باند گپ به بازدهی تولید زوج به‌صورت رابطه (۲۳) است.

$$\eta_{\text{pp}} = \frac{E_g}{2.8E_g + 0.5} \quad (23)$$

بازدهی نیمه‌هادی رابطه (۲۱)، به‌صورت رابطه (۲۴) بازنویسی می‌گردد (۳۱).

$$\eta_{\text{semi}} = \eta_{\text{dp}} \eta_{\text{pp}} \text{FF} \quad (24)$$

با توجه به رابطه (۲۴) و این‌که مقادیر FF و η_{dp} کوچک‌تر از یک است؛ حداکثر بازدهی نیمه‌هادی برابر η_{pp} می‌باشد؛ بنابراین بازدهی یک سلول بتاولتائیک هرگز نمی‌تواند از η_{pp} بیش‌تر گردد.

$$\eta_{\text{semi}} \leq \eta_{\text{pp}} \Rightarrow \eta_{\text{semi}} \leq \frac{E_g}{w} \quad (25)$$

بیشینه بازدهی η_{semi} یا به‌عبارتی دیگر، حد نهایی بازدهی η_{semi} مستقل از توان و انرژی چشمه بتا است؛ بنابراین در انتخاب نیمه‌هادی بهینه، بازدهی تولید زوج الکترون-حفره η_{pp} ، به‌عنوان یک از متغیرهای مهم در انتخاب نیمه‌هادی باید مورد توجه قرار داد.

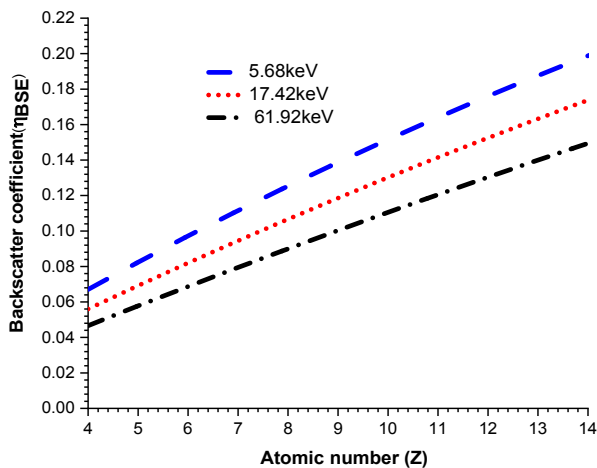
با توجه به اهمیت بازدهی تولید زوج الکترون-حفره، بیشینه بازدهی جفت‌شدگی نیمه‌هادی، در این پژوهش بازدهی ترکیبی برای مواد نیمه‌هادی به‌صورت رابطه (۲۶) تعریف‌شده است؛ و به‌عنوان یک ملاک ارزیابی در انتخاب مواد نیمه‌هادی، قرار گرفته است.

$$\eta_{\text{cs}} = (1 - \eta_{\text{BSE}}) \eta_{\text{pp}} \quad (26)$$

با توجه به مطالب بالا می‌توان بازدهی باتری بتاولتائیک را به‌صورت ضرایب دخیل در آن به‌صورت رابطه (۲۷) بازنویسی کرد:

جدول ۲- مشخصات نیمه‌هادی‌های انتخابی (۳۳)

نام نیمه‌هادی	عدد اتمی	چگالی $\frac{gr}{cm^3}$	متوسط وزن اتمی A_{av}	عدد اتمی مؤثر Z_{eff}	گاف انرژی	نوع گاف انرژی	W	تحرک الکترون $(\frac{cm^2}{Vs})$	μ_p تحرک حفره $(\frac{cm^2}{Vs})$
Si	Si(Z=14)	۲/۳۳	۲۸	۱۴	۱/۱۲	Indirect	۳/۶۶	۱۵۰۰	۴۸۰
β -B	B (Z=۵)	۲/۳۵	۱۰/۸	۵	۱/۵	Indirect	۴/۷	۱۰-۳۰۰	۲
Diamond	C (Z=۶)	۳/۵۲	۱۲	۶	۵/۴۸	Indirect	۱۳/۲	۲۰۰۰	۱۶۰۰
2H-SiC	Si (Z=۱۴) C (Z=۶)	۳/۲۱۹	۴۰/۱	۱۱/۶	۳/۲۳	Indirect	۹/۵۴۴	۹۰۰	۱۵۰
3C-SiC	Si (Z=۱۴) C (Z=۶)	۳/۲۱۵	۴۰/۱	۱۱/۶	۲/۹۳	Indirect	۸/۷۰۴	۸۰۰	۴۰
4H-SiC	Si (Z=۱۴) C (Z=۶)	۳/۲۹۰	۴۰/۱	۱۱/۶	۳/۲۶	Indirect	۷/۲۸	۱۰۰۰	۱۲۰
6H-SiC	Si (Z=۱۴) C (Z=۶)	۳/۲۱۵	۴۰/۱	۱۱/۶	۳/۰۵	Indirect	۶/۹	۴۰۰	۱۰۰
c-BN	B (Z=۵) N (Z=۷)	۳/۴۵	۲۴/۸	۶/۱۷	۶/۴	Indirect	۱۷/۶	۵۰۰	<۵۰۰
AlN	Al (Z=۱۳) N (Z=۷)	۳/۲۶	۴۱	۱۰/۹	۶/۱۹	direct	۱۵/۳	۳۰۰	۱۴
MgO	Mg (Z=۱۲) O (Z=۸)	۳/۵۸	۴۰/۳	۱۰/۴	۷/۸	direct	۲۲/۳۴	۲	۱
B ₄ C	B (Z=۵) C (Z=۶)	۲/۵۲	۵۵/۳	۵/۵۵	۲/۰۹	direct	۶/۳۵۲	۱	۲



شکل ۴- ضریب پس‌پراکندگی برای نیمه‌هادی‌های با عدد اتمی مؤثر کمتر از سیلیکون برای سه انرژی ۵/۶۸، ۱۷/۴۲ و ۶۱/۹۲ کیلوالکترون‌ولت.

کم‌ترین مقدار جریان اشباع مربوط به نیمه‌هادی c-BN و Diamond است. این نتیجه به دلیل داشتن گاف انرژی بالا در این نیمه‌هادی‌ها قابل توجیه است.

۳-۲- ضریب پس‌پراکندگی ذرات بتا از نیمه‌هادی

در شکل (۴)، ضریب پس‌پراکندگی برحسب عدد اتمی برای انرژی‌های ۵/۶۸، ۱۷/۴۲، ۶۱/۹۲ کیلوالکترون‌ولت متوسط طیف ایزوتوپ‌های بتازای ^3H ، ^{63}Ni ، ^{147}Pm به صورت تابش عمود بر سطح نیمه‌هادی برای نیمه‌هادی با اعداد اتمی کمتر از ۱۴ (شاخص عدد اتمی سیلیکون) بر اساس رابطه (۲۰)، استخراج گردید.

نمودار شکل (۴)، بیانگر این است که در شرایط یکسان انرژی و جهت، ذرات بتا با انرژی کم و ماده هدف با عدد اتمی بالا باعث بیش‌ترین اتلاف جهتی و پس‌پراکندگی ذرات، از ماده می‌گردد؛ بنابراین در انتخاب نیمه‌هادی و چشمه بتازا برای باتری بتاولتائیک این نکته لحاظ باید گردد.

با توجه به شکل (۵) بیشینه بازدهی جفت‌شدگی به ترتیب مربوط به Diamond، C-BN، 4H-SiC و Si است.

جدول ۳- محاسبه کمیته چگالی جریان اشباع در نیمه‌هادی‌های انتخابی

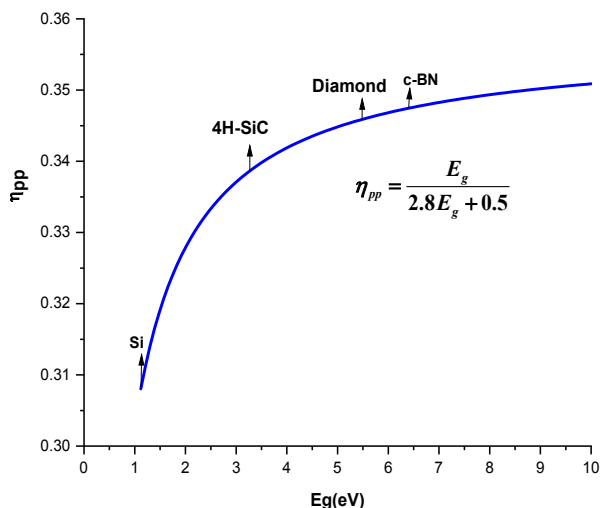
نیمه‌هادی	نوع باند گپ نیمه‌هادی	گاف انرژی (eV)	کمیته چگالی جریان اشباع J_0 ($\frac{A}{cm^2}$)
Si	Indirect	۱/۱۲	$2/29 \times 10^{-14}$
Diamond	Indirect	۵/۴۸	$1/29 \times 10^{-87}$
4H-SiC	Indirect	۳/۲۶	$2/55 \times 10^{-50}$
c-BN	Indirect	۶/۴	$4/49 \times 10^{-103}$

دارای باند گپ غیرمستقیم، دارای طول پخش بزرگ‌تری از نیمه‌هادی‌های با باند گپ مستقیم خواهند بود. با توجه به تحرک پایین الکترون و حفره نیمه‌هادی‌های β -B، MgO ، B_4C و AlN قابلیت استفاده در نیمه‌هادی به‌عنوان مبدل باتری بتاولتائیک را ندارند زیرا به دلیل تحرک الکترون و حفره بسیار پایین، قابلیت تولید جریان مناسب را نخواهند داشت بنابراین در دیگر فاکتورها مورد ارزیابی قرار نخواهند گرفت. 4H-SiC از میان نیمه‌هادی‌های 2H-SiC ، 3C-SiC ، 4H-SiC ، 6H-SiC دارای گاف انرژی بالاتر و مشخصات الکتریکی بهتری در به‌کارگیری در باتری‌های بتاولتائیک بوده و مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با توجه به قابلیت تحرک الکترون و حفره به‌ترتیب Diamond، Si، 4H-SiC، C-BN دارای قابلیت تحرک الکترون و حفره بالاتری هستند. در این میان تنها Diamond از قابلیت تحریک الکترون-حفره بیش‌تری نسبت به سیلیکون برخوردار است.

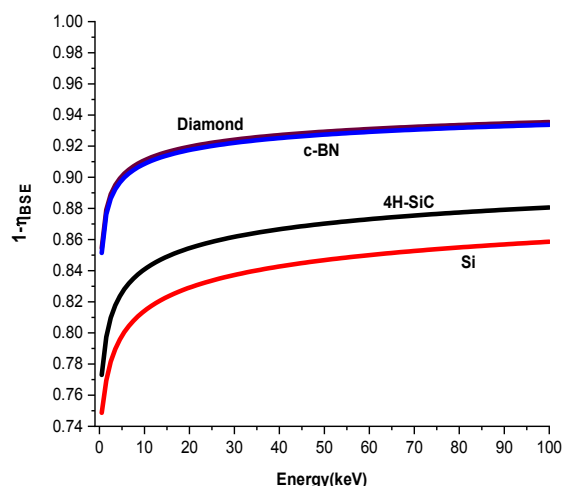
(۲) چگالی جریان اشباع تولیدی در نیمه‌هادی:

کمیته چگالی جریان اشباع در دمای ۳۰۰ کلوین با استفاده از رابطه (۶)، برای مواد نیمه‌هادی انتخابی مطابق جدول (۳)، محاسبه شده است.

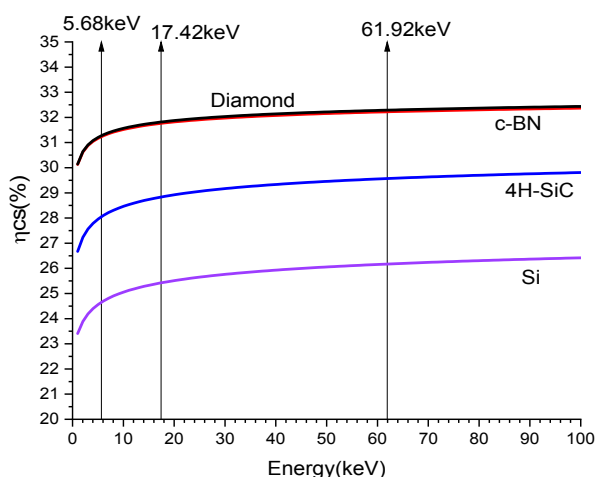
همان‌طور که جدول (۳) نشان می‌دهد نیمه‌هادی‌های با گاف انرژی بزرگ‌تر دارای جریان کمیته اشباع تولیدی کم‌تری هستند. این امر سبب می‌شود ولتاژ مدارباز بزرگ‌تری داشته باشند.



شکل ۶- بازدهی تولید زوج برای نیمه‌های انتخابی در دمای ۳۰۰ کلوین).



شکل ۵- محاسبه بیشینه بازدهی جفت‌شدگی نیمه‌های به چشمه بتازا.



شکل ۷- بازده ترکیبی برای انرژی‌های مختلف در نیمه‌های انتخابی.

در شکل (۶)، نمودار نیمه‌های انتخابی برحسب بازدهی تولید زوج الکترون-حفره رسم شده است. با توجه به نمودار بازدهی تولید زوج الکترون-حفره برای نیمه‌های c-BN بیشینه است.

بازده ترکیبی محاسبه شده برای انرژی‌های مختلف در مواد نیمه‌های انتخاب شده به صورت نمودار شکل (۷) است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بازدهی ترکیبی نیمه‌های Diamond, c-BN و 4H-SiC از سیلیکون بزرگ‌تر است. به‌طور

جدول ۴- گاف انرژی، انرژی لازم برای تولید یک زوج

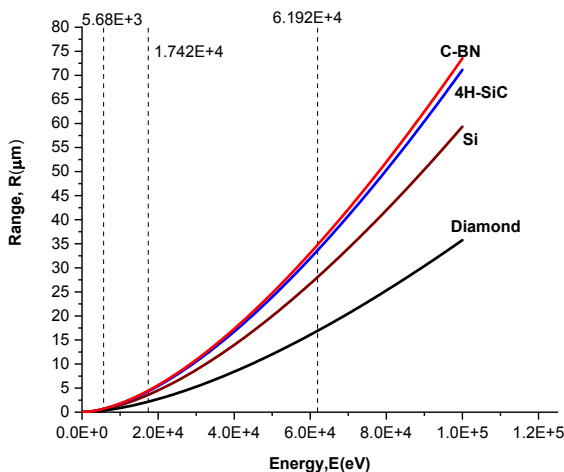
الکترون-حفره و بازدهی تولید زوج

نیمه‌های	$\eta_{pp} = \frac{E_g}{w}$	W(eV)	Eg(eV) (۳۰۰ کلوین)
Si	۳۰/۷۷	۳/۶۴	۱/۱۲
4H-SiC	۳۳/۸۵	۹/۶۳	۳/۲۶
Diamond	۳۴/۶۰	۱۵/۸۴	۵/۴۸
c-BN	۳۴/۷۴	۱۸/۴۲	۶/۴

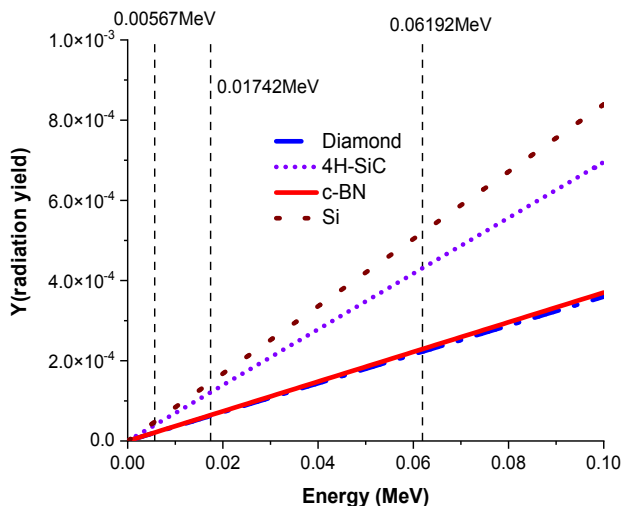
با استفاده از فرمول استاب، بیشینه بازدهی جفت‌شدگی نیمه‌های به چشمه طبق رابطه (۱۱)، با لحاظ کردن ضریب $C_\beta = 1$ بر اساس انرژی‌های مختلف برای مواد نیمه‌های انتخابی مطابق شکل (۶) محاسبه گردید.

۳-۳- بازدهی تولید زوج و ترکیبی

در جدول (۴) گاف انرژی، انرژی لازم برای تولید زوج الکترون-حفره و بازدهی تولید زوج الکترون-حفره η_{pp} برای نیمه‌های انتخابی در دمای ۳۰۰ کلوین محاسبه شده است. انرژی زوج الکترون-حفره برای نیمه‌های هابی که به صورت تجربی در مرجع (۳۲) موجود نبود، از رابطه (۸) محاسبه شده است.



شکل ۸- برد ذره بتا با انرژی‌های مختلف در نیمه‌هادی‌های انتخابی.



شکل ۹- بهره تابش ترمزی بهره تابش ترمزی محاسبه شده برای نیمه‌هادی‌های انتخابی.

نمودار شکل (۹) نشان می‌دهد که بهره تابش ترمزی با افزایش عدد اتمی و انرژی ذرات بتا رابطه مستقیم دارد؛ بنابراین نیمه‌هادی‌های با عدد اتمی مؤثر بالاتر منجر به تولید تابش ترمزی بیشتری خواهند شد. با توجه به جداول فوق، نیمه‌هادی Diamond کم‌ترین بهره تابش ترمزی و بعد از آن نیمه‌هادی c-BN قرار داشته و نیمه‌هادی 4H-SiC در اولویت سوم قرار می‌گیرد.

جدول ۵- آستانه آسیب تابشی نیمه‌هادی‌های انتخابی (۳۴)

نیمه‌هادی	$E_{th}(eV)$	$E_d(eV)$	$E_g(eV)$
Si	۱۴۰	۱۲/۹	۱/۱۲
Diamond	۲۱۵	۴۳	۳/۲۶
4H-SiC	۱۰۸	۲۸	۵/۴۸
c-BN	۱۶۴	۳۷/۸	۶/۴

مثال، برای انرژی $17/42 keV$ ، معادل انرژی متوسط طیف رادیوایزوتوپ ^{63}Ni ، بازدهی نیمه‌هادی‌های Diamond و c-BN $1/25$ برابر بیش‌تر از بازدهی سیلیکون است.

۳-۴- آستانه آسیب تابشی نیمه‌هادی

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده در بخش‌های قبلی سه نیمه‌هادی Diamond، 4H-SiC و c-BN نامزدهای مناسب برای کاربرد به‌عنوان مبدل نیمه‌هادی در سلول بتاoltaئیک انتخاب گردیدند. آستانه آسیب تابشی نیمه‌هادی‌های انتخابی مطابق جدول (۵) است.

با توجه به جدول (۵)، نیمه‌هادی Diamond بالاترین آستانه تحمل آسیب تابشی را دارد.

۳-۵- برد ذرات بتا در نیمه‌هادی

این عامل برای سنجش میزان ضخامت نیمه‌هادی موردنیاز و تعیین ابعاد سلول بتاoltaئیک حائز اهمیت است. در شکل (۸) برد ذره بتا با انرژی‌های مختلف در نیمه‌هادی‌های انتخابی با استفاده از رابطه (۱۶)، محاسبه شده است.

شکل (۸)، نشان می‌دهد برای توقف ذرات بتا به ترتیب Diamond، Si، 4H-SiC، c-BN، ضخامت کمتری از ماده نیمه‌هادی در به‌کارگیری به‌عنوان مبدل نیاز هست.

۳-۶- بهره تولید تابش ترمزی

بهره تابش ترمزی برای نیمه‌هادی‌های انتخاب شده بر اساس رابطه (۱۶) محاسبه شده و در شکل (۹) نشان داده شده است.

این حال دارای پروسه ساخت و آماده‌سازی دشوارتری هستند و دارای سرعت پیشرفت و بلوغ فن‌آوری کندتری می‌باشند. کاربرد سیلیکون (SiC)، یک نیمه‌هادی با گاف انرژی پهن، ثبات حرارتی بالا، خواص شیمیایی پایدار، انتقال الکترونی خوب، عملکرد و مقاومت در برابر اشعه و فن‌آوری رو به رشد می‌باشد (۳۷).

نیمه‌هادی الماس (Diamond):

نیمه‌هادی الماس (Diamond)، از جمله کریستال‌های با گاف انرژی پهن است که ماده‌ای بسیار سخت و از نظر مکانیکی پایدار می‌باشد و ظرفیت گرمایی بالایی نیز دارد. همچنین به دلیل مقاومت بالای این ماده در برابر آسیب‌های تابشی، دیرتر دچار افت ولتاژ شده و در نتیجه ولتاژ پایدارتری خواهد داشت. مشکلی که نیمه‌هادی الماس دارد فقط قابلیت آلودگی نوع p را به خوبی دارد. از این رو برای به‌کارگیری و ساخت پیوند pn نامناسب است. ولی در ساخت نیمه‌هادی‌های شاتکی برای کاربرد در باتری‌های بتاولتائیک گزینه خوبی است (۳۳ و ۳۴).

نیمه‌هادی نیتريد بور (c-BN):

نیتريد بور مکعبی (Cubic Boron Nitride یا c-BN) یک ماده بلوری سخت است که شباهت زیادی با الماس دارد، اما از نظر ساختار و خواص کمی متفاوت است. نیتريد بور مکعبی یکی از آلوتروپ‌های نیتريد بور است و از نظر سختی، تنها ماده‌ای است می‌تواند با الماس رقابت کند. c-BN، قابلیت آلودگی نوع n و p را دارد؛ اما امکان ساخت با ابعاد بالاتر از میلی‌متر را ندارد و فناوری آن به بلوغ کافی نرسیده است (۳۵ و ۳۶). از نظر مشخصات الکترونیکی نسبت به نیمه‌هادی Diamond طبق جدول (۲)، تقریباً یک‌چهارم برابر است. لذا در رقابت با نیمه‌هادی Diamond، در اولویت انتخاب قرار نمی‌گیرد. با توجه به بررسی و نتایج محاسبات و ارزیابی کمی، اولویت‌بندی گزینه‌های انتخابی برحسب شاخص‌های مختلف ارزیابی انجام گرفته و در جدول (۷) آورده شده است.

جدول ۶- مشخصات فیزیکی نیمه‌هادی‌های انتخابی (۳۵)

نیمه‌هادی	ثابت شبکه (nm)	عدد اتمی	چگالی gr/cm^3	دمای ذوب (K)	سختی Kg/mm^2
Si	۰/۵۴۳	۱۴	۲/۳۳	۱۶۸۷	۱۱۵۰
Diamond	۰/۳۵۷	۶	۳/۵۲	۴۱۰۰	۷۰۰۰
4H-SiC	۰/۳۰۷۳	۶ و ۱۴	۳/۲۹	۳۱۰۳	۳۹۸۰
c-BN	۰/۳۶۲	۷ و ۵	۳/۴۵	۳۲۴۶	۴۵۰۰

۳-۷- مشخصات فیزیکی و تحمل دمایی

مشخصات فیزیکی مواد نیمه‌هادی انتخابی مطابق جدول (۶) است.

همان‌طور که از جدول (۶) قابل مشاهده است نیمه‌هادی الماس از نظر استحکام و سختی، چگالی جرمی و دمای ذوب و تحمل دمایی بالاتر از نیمه‌هادی‌های دیگر قرار دارد. از این نظر در رتبه‌های بعدی نیمه‌هادی c-BN و نیمه‌هادی 4H-SiC قرار دارند.

۳-۸- قابلیت دسترسی، هزینه و ساخت

نیمه‌هادی سیلیکون (Si):

سیلیکون، اولین ماده نیمه‌هادی است که به‌عنوان مبدل مورد استفاده قرار گرفته است. قطعات سیلیسیومی جریان نشت کم‌تری دارند و خیلی ارزان‌تر از مواد نیم‌رسانای دیگر هستند. پروسه آماده‌سازی مواد نیمه‌هادی یک رابطه کلیدی در تهیه باتری‌های بتاولتائیک است. سیلیکون مونوکریستالی به دلیل هزینه کم آماده‌سازی، بلوغ فناوری، عملکرد پایدار و تولید انبوه، نظر محققان زیادی را به خود جلب کرده است. برای ساختار سه‌بعدی سیلیکون گزینه مناسب‌تری است (۳۶).

نیمه‌هادی کاربرد سیلیکون (SiC):

پیشرفت نیمه‌هادی‌های با گاف انرژی پهن پتانسیل خوبی را برای استفاده در باتری بتاولتائیک از خود نشان داده‌اند. با

جدول ۷- اولویت‌بندی گزینه‌های انتخابی برحسب شاخص‌های ارزیابی

اولویت (۴)	اولویت (۳)	اولویت (۲)	اولویت (۱)	شاخص ارزیابی
C-BN	4H-SiC	Si	Diamond	مشخصات الکترونیکی نیمه‌هادی (تحرك الكترو ن و حفره)
Si	4H-SiC	Diamond	c-BN	مشخصات الکترونیکی نیمه‌هادی (جریان اشباع) تولیدی
Si	4H-SiC	c-BN	Diamond	ضریب پس‌پراکندگی ذرات بتا از نیمه‌هادی (کم‌ترین به بیش‌ترین)
Si	4H-SiC	Diamond	C-BN	بازدهی زوج الکترون-حفره
4H-SiC	Si	C-BN	Diamond	آستانه آسیب تابشی نیمه‌هادی
Si	4H-SiC	C-BN	Diamond	بازدهی جفت‌شدگی نیمه‌هادی به چشمه
C-BN	4H-SiC	Si	Diamond	برد ذرات بتا در نیمه‌هادی ضخامت موردنیاز (کم‌ترین به بیش‌ترین)
Si	4H-SiC	C-BN	Diamond	بهره تولید تابش ترمزی (از کم‌ترین به بیش‌ترین)
Si	4H-SiC	C-BN	Diamond	مشخصات فیزیکی و تحمل دمایی
C-BN	Diamond	4H-SiC	Si	در دسترس بودن و امکان تهیه

۴- نتیجه‌گیری

عوامل متعددی در مولدهای بتاولتائیک دخیل بوده و برحسب شرایط و هدف کاربری به آن‌ها پرداخته می‌شود. برای بهره‌برداری حداکثری از توان تولیدی یک مولد، لازم است امپدانس خروجی با امپدانس ورودی مقاومت بار برابر باشد. با وجود این‌که بسته به هدف کاربری ممکن است راهکارهای مختلفی پیشنهاد شود، در بیشتر کاربردها، این روش به‌سادگی قابل اجرا نیست و در نتیجه، بخشی از توان تولید شده یا انرژی باتری هدر می‌رود. محدوده جریان و ولتاژ برای این نوع مولدهای بتاولتائیک مشخص بوده و بیشینه جریان و یا بیشینه ولتاژ برای هر نمونه‌ای از آن‌ها قابل احتساب می‌باشد و می‌تواند هدف بهینه‌سازی قرار گیرند. در این فعالیت علمی، انتخاب بهینه مبدل نیمه‌هادی جهت افزایش توان و بازدهی با سه رادیوایزوتوپ بتازای ${}^3\text{H}$ ، ${}^{63}\text{Ni}$ و ${}^{147}\text{Pm}$ بوده و سعی شده در این محدوده تمرکز گردد.

در این پژوهش با تکیه بر افزایش حداکثری بازدهی باتری بتاولتائیک و امکان به‌کارگیری با چشمه‌های بتازای ${}^3\text{H}$ ، ${}^{63}\text{Ni}$ و

${}^{147}\text{Pm}$ معیارهای انتخاب بهینه نیمه‌هادی مشخص گردید. این معیارهای ارزیابی شامل ضریب پس‌پراکندگی ذرات بتا از نیمه‌هادی، بازدهی تولید زوج الکترون-حفره، مشخصات و ویژگی‌های الکترونیکی، آستانه آسیب تابشی، بهره تولید تابش ترمزی، توان توقف و نفوذ ذرات بتا در نیمه‌هادی، مشخصات فیزیکی و تحمل دمایی، قابلیت دسترسی و ساخت، استخراج گردید. براساس این معیارها و با مقایسه با نیمه‌هادی سیلیکون، نیمه‌هادی‌های متداول مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند. با توجه به نتایج بررسی و شاخص‌های ارزیابی به‌ترتیب Diamond، c-BN، 4H-SiC نیمه‌هادی‌های مناسب‌تر از نظر بازدهی انتخاب گردید. با توجه به ارزیابی‌های انجام‌شده در جدول (۷) برای ساختارهای دوبعدی باتری بتاولتائیک برای الماس از نوع پیوند شاتکی با رادیوایزوتوپ ${}^{147}\text{pm}$ ، همچنین برای نیمه‌هادی 4H-SiC با رادیوایزوتوپ‌های ${}^{63}\text{Ni}$ و ${}^3\text{H}$ و برای ساختارهای سه‌بعدی باتری‌های بتاولتائیک ترکیب Si با رادیوایزوتوپ‌های ${}^{147}\text{pm}$ و ${}^{63}\text{Ni}$ پیشنهاد می‌گردد.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ نوع تضاد منفعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

تشکر و سپاسگزاری

این تحقیق حمایت خاصی از مؤسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

واژه‌نامه

1. Klein formula
2. Staub

3. driving potential efficiency (η_{dp})

مراجع

1. Naseem MB, Kim HS, Lee J, Kim CH, In SI. Betavoltaic nuclear battery: A review of recent progress and challenges as an alternative energy source. *J Phys Chem C*. 2023;127(16):7565–79. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.3c00684>
2. Kim HS, Lee J, Lee S, Powar NS, Naseem MB, Kim CH, et al. Multiple-year battery based on highly efficient and stable dual-site radioactive isotope dye-sensitized betavoltaic cell. *J Power Sources*. 2024; 606:234427. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.234427>
3. Guo H, Lal A. Nano power betavoltaic micro batteries. In: *Proceedings of the 12th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS '03)*; 2003 June 8-12; Boston, MA, USA. IEEE; 2003. p. 36–9. <https://doi.org/10.1109/SENSOR.2003.1215247>
4. Zhao C, Lei L, Liao F, Yuan D, Zhao Y. Efficiency prediction of planar betavoltaic batteries basing on precise modeling of semiconductor units. *Appl Phys Lett*. 2020;117 (26):263901. <https://doi.org/10.1063/5.0033052>
5. Zheng R, Lu J, Wang Y, Chen Z, Zhang X, Li X, et al. Understanding efficiency improvements of betavoltaic batteries based on 4H-SiC, GaN, and diamond. *Appl Phys Lett*. 2022;121(10): 103902. <https://doi.org/10.1063/5.0102995>
6. Zhao C, Liao F, Liu K, Zhao Y. Breaking the myth: Wide-bandgap semiconductors not always the best for betavoltaic batteries. *Appl Phys Lett*. 2021;119 (15):153904. <https://doi.org/10.1063/5.0068269>
7. Pierson MA. Principles of betavoltaic battery design. *J Energy Power Sources*. 2016; 3:11–41.
8. Adams T, Revankar S, Cabauy P, Elkind B, Cheu D. Betavoltaic performance under extreme temperatures. *Nucl Technol Radiat Prot*. 2016; 31 (4):356–60. <https://doi.org/10.2298/NTRP1604 356A>
9. Mohamadian M. Conceptual design and simulation of nuclear battery using in artificial cardiac pacemaker. Amirkabir University of Technology; 2008.
10. Ghasemi Nejad GR, Rahmani F, Abaeiani GR. Design and optimization of beta-cell temperature sensor based on $^{63}\text{Ni-Si}$. *Appl Radiat Isot*. 2014; 86: 46–51. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.12.027>
11. Rahmani F, Khosravinia H. Optimization of silicon parameters as a betavoltaic battery: Comparison of Si p-n and Ni/Si Schottky barrier. *Radiat Phys Chem*. 2016; 125: 205–12. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.04.012>
12. Amirmazlaghani M. Design and simulation of a radioisotope battery based on PtSi/Si Schottky diode. Nuclear Conference; 2014. (in Persian)
13. Mirahmadi Babaheidari J. Study of an emission-electric converter based on semiconductor materials. University of Zanjan; 2014. (in Persian)
14. Movahedian Z, Tavakoli-Anbaran H. Design and optimization of Si- ^{35}S betavoltaic liquid nuclear battery in micro dimensions in order to build. *Ann Nucl Energy*. 2020; 143:107483. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107483>
15. Maleki P. Enhancing the simulation capabilities of betavoltaic micro batteries using the combined MCNPX-SILVACO code. *J Nucl Sci Technol*. 2019 (in Persian).
16. Liu Y, Hu R, Yang Y, Wang G, Luo S, Liu N. Investigation on a radiation tolerant betavoltaic battery based on Schottky barrier diode. *Appl Radiat Isot*. 2012; 70(3): 438–41. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.10.013>
17. Alam TR, Pierson MA. Principles of betavoltaic battery design. *J Energy Power Sources*. 2016; 3(1): 11–41.

18. Krasnov AA, Legotin SA. Advances in the development of betavoltaic power sources (a review). *Instrum Exp Tech.* 2020;63(4):437–52. <https://doi.org/10.1134/S0020441220040156>
19. Tang X, Ding D, Liu Y, Chen D. Optimization design and analysis of Si-63Ni betavoltaic battery. *Sci China Technol Sci.* 2012;55(4):990–6. <https://doi.org/10.1007/s11431-012-4752-6>
20. Li XY, Lu JB, Liu YM, Xu X, He R, Zheng RZ. Exploratory study of betavoltaic battery using ZnO as the energy converting material. *Nucl Sci Tech.* 2019; 30(4):60. <https://doi.org/10.1007/11s41365-019-0577-3>
21. Klein CA. Bandgap dependence and related features of radiation ionization energies in semiconductors. *J Appl Phys.* 1968;39(4):2029–38. <https://doi.org/10.1063/1.1656484>.
22. Sachenko AV, Shkrebtii AI, Korkishko RM, Kostilyov VP, Kulish MR, Sokolovskyi IO. Efficiency analysis of betavoltaic elements. *Solid-State Electron.* 2015; 111:147–52. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2015.05.042>
23. Belghachi A, Bozkurt K, Ozdemir O, Avci O. Enhancement of Ni-63 planar source efficiency for betavoltaic batteries. *J Phys Appl Phys.* 2020;53(44): 445501. <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6463/ab9977>
24. Eckerman K, Endo A. ICRP Publication 107. Nuclear decay data for dosimetric calculations. *Ann ICRP.* 2008; 38(3): 7–96. <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2008.10.004>
25. Goldstein JI, Newbury DE, Michael JR, Ritchie NW, Scott JHJ, Joy DC. Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. Springer; 2017. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6676-9>
26. Hussain A, Yang LH, Zou YB, Mao SF, Da B, Li HM, et al. Monte Carlo simulation study of electron yields from compound semiconductor materials. *J Appl Phys.* 2020;128(1):015305. <https://doi.org/10.1063/5.0012154>
27. Wu M, Wang S, Ou Y, Wang W. Optimization design of betavoltaic battery based on titanium tritide and silicon using Monte Carlo code. *Appl Radiat Isot.* 2018; 142:22–7. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.09.017>
28. Spencer MG, Alam T. High power direct energy conversion by nuclear batteries. *Appl Phys Rev.* 2019;6(3):031305. <https://doi.org/10.1063/1.5123163>
29. Zhang L, Cheng HL, Hu XC, Xu XB. Model and optimal design of 147Pm SiC-based betavoltaic cell. *Superlattices Microstruct.* 2018; 123:60–70. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2018.01.007>
30. Rahastama S, Waris A, Viridi S, Iskandar F. Optimization of surface passivation parameters in [147Pm]-Si planar p-n junction betavoltaic based on analytical 1-D minority carrier diffusion equation approaches. *Appl Radiat Isot.* 2019; 151: 226–34. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.03.030>
31. Grushko V, Beliuskina O, Mamalis A, Lysakovskiy V, Mitskevich E, Kiriev A, et al. Energy conversion efficiency in betavoltaic cells based on the diamond Schottky diode with a thin drift layer. *Appl Radiat Isot.* 2020; 157:109017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.109017>
32. Yunpeng L, Xiao G, Zhangang J, Xiaobin T. Temperature dependence of 63Ni-Si betavoltaic microbattery. *Appl Radiat Isot.* 2018; 135:47–56. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.01.017>
33. Owens A. Semiconductor radiation detectors [Internet]. Boca Raton, Fla.: CRC Press; 2019. Available from: <https://www.routledge.com/Semiconductor-Radiation-Detectors/Owens/p/book/9780367779689>. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-71679-2>
34. Owens A. Compound semiconductor radiation detectors. CRC Press; 2012. 521 p. (Series in sensors). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.05.071>
35. Murphy JW, Voss LF, Frye CD, Shao Q, Kazkaz K, Stoyer MA, et al. Design considerations for three-dimensional betavoltaics. *AIP Adv.* 2019; 9(6): 065208. <https://doi.org/10.1063/1.5097775>
36. Liu YM, Lu JB, Li XY, Xu X, He R, Wang HD. A 4H-SiC betavoltaic battery based on a 63Ni source. *Nucl Sci Tech.* 2018;29(11):168. <https://doi.org/10.1007/s41365-018-0494-x>
37. Goss JP, Eyre RJ, Briddon PR. Theoretical models for doping diamond for semiconductor applications. *Phys Status Solidi B.* 2008;245(9):1679–700. <https://doi.org/10.1002/pspb.200744115>
38. Pinault-Thaury MA, Tillocher T, Habka N, Kobor D, Jomard F, Chevallier J, et al. n-Type CVD diamond: Epitaxy and doping. *Mater Sci Eng B.* 2011;176(17): 1401–8. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2011.02.015>
39. Izyumskaya N, Demchenko DO, Das S, Özgür Ü, Avrutin V, Morkoç H. Recent development of boron nitride towards electronic applications. *Adv Electron Mater.* 2017;3(5):1600485. <https://doi.org/10.1002/aelm.201600485>
40. Tsao JY, Chowdhury S, Hollis MA, Jena D, Johnson NM, Jones KA, et al. Ultrawide-bandgap semiconductors: Research opportunities and

- challenges. Adv Electron Mater. 2018;4(1):1600501. <https://doi.org/10.1002/aelm.201600501>
41. Tsao JY, Chowdhury S, Hollis MA, Jena D, Johnson NM, Jones KA, et al. Ultrawide-bandgap semiconductors:

Research opportunities and challenges. Adv Electron Mater. 2018;4(1):1600501. <https://doi.org/10.1002/aelm.201600501>