

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

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. ۱۰ نیمه‌هادی $\beta\text{-B}$ ، diamond، ${}^2\text{H-SiC}$ ، ${}^3\text{C-SiC}$ ، ${}^4\text{H-SiC}$ ، C-BN ، AlN ، MgO ، B_4C 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 c-BN ، Diamond ، ${}^4\text{H-SiC}$ 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 ${}^4\text{H-SiC}$ 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.

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. 10 semiconductors, diamond, 2H-SiC, 3C-SiC, 4H-SiC, AlN, MgO, B4C with effective atomic number less than 14 and bandgap above 1.12eV at room temperature (300K) compared to Silicon semiconductors were evaluated. Finally, according to the evaluation indicators, Diamond, c-BN, 4H-SiC, more suitable semiconductors in terms of efficiency were selected, respectively. Due to the experiments performed in this study, for planar batteries, a betavoltaic semiconductor type junction for Schottky diamond with ^{147}Pm radioisotope, also 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.

Keywords: semiconductor, Battery, Betavoltaic, efficiency, Evaluation criteria, optimal choice.

۱- مقدمه

در طراحی و ساخت این 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 SiC، GaN، و الماس به دلیل کارایی تلیج 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^۱ در شرکت آمریکایی RCA^۲ در سال ۱۹۵۴ مورد بررسی قرار گرفت و بعداً یک باتری رادیواکتیو با استفاده از یک نیمه‌هادی

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 جذاب 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 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 سال ۱۹۵۶ ثبت اختراع شد. باتری‌های آلفاولتائیک و بتاولتائیک توسط پفان و اولسن^۳ 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 باند بزرگ و غیرمستقیم از بازدهی بالاتری برخوردار هستند. از سال ۱۹۸۹، بسیاری از محققان روی مواد نیمه‌هادی مختلف مانند: Si, SiC, 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 صورت پذیرفت. در این پژوهش مدل‌سازی یک قطعه بتاولتائیک در اتصالات pn با استفاده از کد MCNP جهت استفاده در ضربان‌سازی‌های قلب شبیه‌سازی گردید (۹). در سال ۱۳۹۲، مقایسه عملکرد حسگر دمایی بتاولتائیک مبتنی بر چشمه نیکل-۶۳ و پرومیتوم-۱۴۷ توسط قاسمی‌نژاد و رحمانی انجام و ارائه گردید (۱۰). 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 انجام گردید 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 (۱۱).

در همان سال امیرمزلقانی و ذکی، فعالیت علمی طراحی و شبیه‌سازی باتری رادیوایزوتوپی بر پایه دیود شاتکی PtSi/Si را ارائه نموده‌اند. در این مقاله برای اولین بار کد سیلوآکو برای

استفاده در محاسبه پارامترهای الکتریکی باتری‌های بتاولتائیک از نوع پیوند شاتکی در ایران معرفی گردیده است (۱۲). در اسفند همان سال میراحمدی بلبا حیدری پژوهشی در مورد مبدل گسیلی-الکتریکی بر پایه مواد نیمه‌هادی انجام داده است. در این پژوهش قطعه بتاولتائیک با نیمه‌هادی سیلیکون با پیوند pn بررسی شده است. از دو چشمه پرومیتوم ۱۴۷ و نیکل ۶۳ به‌عنوان چشمه بتازا استفاده گردیده است. تمام محاسبات پارامترهای عملکردی باتری با استفاده از کد MCNP صورت پذیرفته است (۱۳).

در سال ۱۳۹۷ موحیدیان پژوهشی در طراحی شکل هندسی بهینه و امکان‌سنجی ساخت باتری هسته‌ای شارژر 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 باتری بتاولتائیک با نیمه‌هادی سیلیکون و پیوند pn ارائه شده است (۱۴). در سال ۱۳۹۸ ملکی و اطاعتی 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 سیلوآکو استفاده می‌گردد (۱۵). در سال‌های اخیر، باتری‌های بتاولتائیک به یک منبع انرژی ایده‌آل برای سیستم‌های میکروالکترومکانیکی تبدیل شده‌اند (۱۰).

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 بتاولتائیک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هرچند باتری‌های بتاولتائیک

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

در این رابطه q بار الکترون، T دما برحسب کلونین، K_B ثلثت 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، $k_B = 1.38 \times 10^{-23} JK^{-1}$ ثابت بولتزمن و T دما برحسب کلونین 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^۴ طبق رابطه (۸) برای محاسبه آن استفاده کرد (۲۱).

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

به‌طور تقریبی انرژی لازم برای تولید جفت الکترون حفره ۳ 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).

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

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 مبدل 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) به دست می‌آید.

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

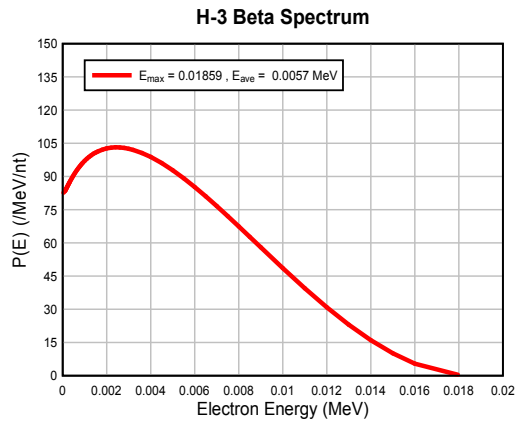
P_{in} توان کل چشمه بتازا و مطابق رابطه (۲) است. در این رابطه q بار الکترون، A اکتیویته چشمه و $E_{av\beta}$ میانگین انرژی طیف ذرات بتا است.

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

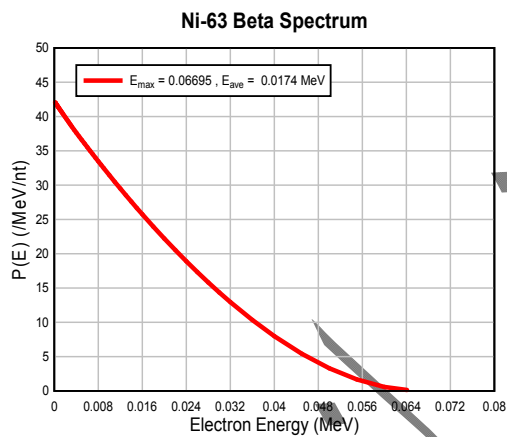
P_{out} توان خروجی سلول بتاولتائیک از رابطه (۳) به دست می‌آید

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

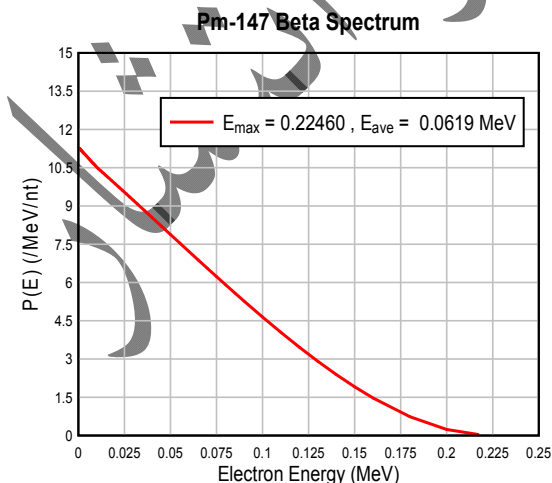
در این رابطه V_{oc} ولتاژ مدار باز، I_{sc} جریان اتصال کوتاه و FF فاکتور پرکنندگی است که به‌صورت تجربی از رابطه (۴) به دست می‌آید (۱۹).



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



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



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

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_{couple} و η_{semi} بیشینه گردند.

۱-۲- 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.

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

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 خود جذبی 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.

۲-۲- 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 (۱۰) تعریف می‌گردد.

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

در رابطه (۱۰) C_{β} احتمال جمع‌آوری الکترون-حفره و η_{BSE} ضریب پس‌پراکندگی ذرات بتا از سطح نیمه‌هادی است. ضریب η_{BSE} به‌عنوان یک معیار ارزیابی در انتخاب نیمه‌هادی به‌عنوان مبدل سلول بتاوتائیک لحاظ می‌گردد. ضریب پس‌پراکندگی ذرات بتا از نیمه‌هادی به‌صورت کسری از الکترون‌های بازتاب شده از سطح نیمه‌هادی به‌کل تعداد ذرات بتای فرودی به نیمه‌هادی تعریف می‌شود. بهره بازتاب یا ضریب پس‌پراکندگی η_{BSE} به‌صورت رابطه (۱۱) تعریف می‌شود.

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

در رابطه (۱۱) 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 بیان‌شده، فرمول تجربی استاپ^۵ به‌صورت رابطه (۱۲) است.

$$\eta_0(Z, E) = \beta \left[1 - \exp(-6.6 \times 10^{-3} \beta^{\frac{5}{2}} Z) \right] \\ \beta = 0.40 + 0.065 \ln(E) \quad (13)$$

که در آن Z عدد اتمی عنصر هدف $Z \geq 4$ و E انرژی جنبشی الکترون برحسب الکترون‌ولت در بازه انرژی قابل‌قبول $0.5 \leq E \leq 100 \text{ keV}$ 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

به‌صورت 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٪ در نظر گرفته می‌شود. در این ناحیه میدان الکتریکی به‌سرعت 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) به‌دست 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 می‌باشد 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 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

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 به‌سره 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.

۲-۳- بازدهی نیمه‌هادی (η_{semi})

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

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

q بار الکترون و V_{oc} ولتاژ مدار باز سلول شاولتائیک 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 در این رابطه η_{dp} بازدهی پتانسیل خروجی^۶ است.

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

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

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

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 $\frac{gr}{cm^3}$ و E انرژی فرودی برحسب الکترون‌ولت (eV) است (۲۸).

$$R(cm) = \frac{2.76 \times 10^{-11} AE^{\frac{5}{2}} (1 + 0.978 \times 10^{-6} E)^{\frac{5}{2}}}{\rho Z^9 (1 + 1.958 \times 10^{-6} E)^{\frac{5}{2}}} \quad (16)$$

آهنگ انرژی اتلافی یونش یا برانگیزش هنگامی که ذرات بتا از ماده نیمه‌هادی عبور می‌کنند 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 میلگین 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 C(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 ممکن باشد. بنابراین تناسب عمق نفوذ (برد) ذرات بتا در نیمه‌هادی و پروفایل انرژی ذخیره‌شده در ناحیه فعال مبدل می‌تواند 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

به صورت ضرایب دخیل در آن به صورت رابطه (۲۷) بازنویسی کرد:

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

۲-۴- تأثیر دما بر بازدهی سلول بتاولتائیک

پهنای شکاف 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، گزینه‌های انتخابی مناسب‌تری هستند.

۲-۵- آستانه آسیب تابشی نیمه‌هادی

با توجه به انرژی ذرات بتا باید نوعی از نیمه‌هادی انتخاب شود که تحمل توان تابشی متناسب با چشمه بتا 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.

۳- روش کار

با توجه به مبانی نظری بیان‌شده در بخش ۲، عوامل اثرگذار در کارکرد یک قطعه نیمه‌هادی برای مبدل گسیلی-الکتریکی، 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

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

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

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

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

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

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

اهمیت دانستن بازدهی تولید زوج الکترون-حفره این است با توجه به رابطه (۲۴) و این که مقادیر FF و η_{dp} کوچک‌تر از یک است؛ حداکثر بازدهی نیمه‌هادی برابر η_{pp} است؛ بنابراین بازدهی یک سلول بتاولتائیک هرگز نمی‌تواند از η_{pp} بیش‌تر گردد.

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

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) تعریف شده است؛ و به‌عنوان یک ملاک ارزیابی در انتخاب مواد نیمه‌هادی، قرار گرفته است.

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

با توجه به مطالب بالا می‌توان بازدهی باتری بتاولتائیک را

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) جریان اشباع تولیدی در نیمه‌های

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

همان‌طور که جدول (۳) نشان می‌دهد نیمه‌های با گاف انرژی بزرگ‌تر دارای جریان کمینه اشباع تولیدی کم‌تری هستند. این امر سبب می‌شود ولتاژ مدار باز بزرگ‌تری داشته باشند. کم‌ترین مقدار جریان اشباع مربوط به نیمه‌های c-BN و C(diamond) است. این نتیجه به دلیل داشتن گاف انرژی بالا در این نیمه‌های قابل توجیه است.

۳-۲- ضریب پس‌پراکندگی ذرات بتا از نیمه‌های

در شکل (۴) ضریب پس‌پراکندگی برحسب عدد اتمی برای انرژی‌های ۵/۶۸، ۱۷/۴۲، ۶۱/۹۲ کیلو الکترون‌ولت متوسط طیف ایزوتوپ‌های بتازای ^3H ، ^{63}Ni ، ^{147}Pm به صورت تابش عمود بر سطح نیمه‌های برای نیمه‌های 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 نیمه‌های و چشمه بتا برای باتری بتا ولتائیک این نکته لحاظ باید گردد. با استفاده از فرمول استاپ، 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.

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

دسترسی و ساخت در نظر گرفته شد. بر اساس این معیارها و با مقایسه با نیمه‌های سیلیکون، نیمه‌های متداول مورد ارزیابی کمی قرار گرفته شده است. محاسبات مربوط به هر معیار ارزیابی با توجه به روابط مربوطه انجام شده و نتایج به صورت نمودار و جدول ارائه شده است. در پایان با توجه به مقایسه کل معیارهای ارزیابی انتخاب بهینه نیمه‌های با چشمه رادیویوتوپی مناسب انتخاب می‌گردد. با توجه به این که نیمه‌های دارای عدد اتمی مؤثر کمتر از ۱۴ و بلند گپ بالاتر از ۱/۱۲ الکترون‌ولت در دمای اتاق داشته باشند، به تعداد ۱۰ نیمه‌های β -، diamond، 2H-SiC، 3C-SiC، 4H-SiC، c-BN، MgO، AIN، B_4C انتخاب شد و مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند. مشخصات این ۱۰ نیمه‌های در جدول (۲) آورده شده است (۳۳).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشخصات الکترونیکی نیمه‌های

در این قسمت به بررسی مشخصات الکترونیکی نیمه‌های به‌عنوان یک شاخص ارزیابی پرداخته شده است.

(۱) تحرک الکترون و حفره

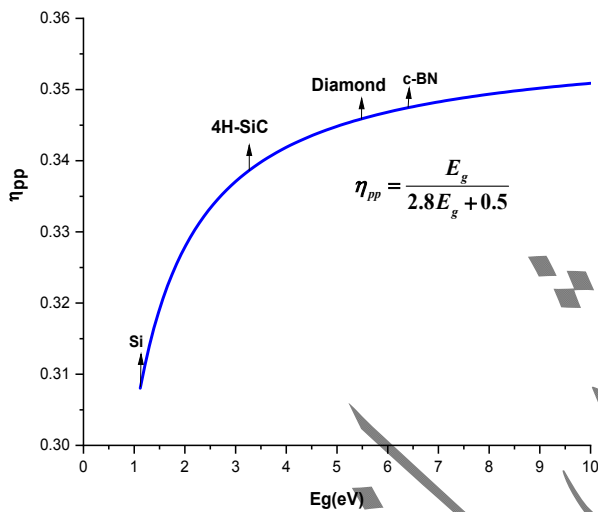
همان‌طور که از جدول (۲) مشاهده می‌شود نیمه‌های دارای بانده گپ غیرمستقیم دارای طول پخش بزرگ‌تری از نیمه‌های با بانده گپ مستقیم خواهند بود. با توجه به تحرک پایین الکترون و حفره نیمه‌های β -، MgO، B_4C و AIN قابلیت استفاده در نیمه‌های به‌عنوان مبدل باتری بتا ولتائیک را ندارند زیرا به دلیل تحرک الکترون و حفره بسیار پایین، قابلیت تولید جریان مناسب را نخواهند داشت بنابراین در دیگر فاکتورها مورد ارزیابی قرار نخواهند گرفت. 4H-SiC از میان نیمه‌های 2H-SiC، 3C-SiC، 4H-SiC، 6H-SiC دارای گاف انرژی بالاتر و مشخصات الکتریکی بهتری در به‌کارگیری در باتری‌های بتا ولتائیک بوده و مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با توجه به قابلیت تحرک الکترون و حفره به‌ترتیب

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 $(\frac{cm^2}{Vs})$	تحرک حفره H_p $(\frac{cm^2}{Vs})$
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

جدول ۴- گاف انرژی، انرژی لازم برای تولید یک زوج الکترون حفره و بازدهی تولید زوج

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



شکل ۶- بازدهی تولید زوج برای نیمه‌هادی‌های انتخابی در دمای (۳۰۰ کلوین)

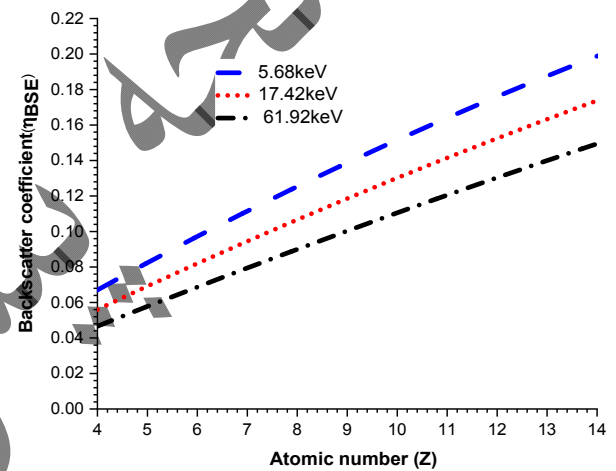
۳-۳- بازدهی تولید زوج و ترکیبی

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

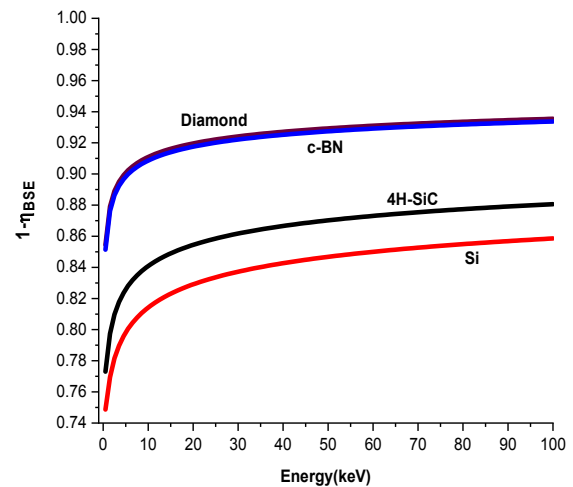
در شکل (۶) نمودار نیمه‌هادی‌های انتخابی بر حسب بازدهی تولید زوج الکترون حفره رسم شده است. با توجه به نمودار بازدهی تولید زوج الکترون حفره برای نیمه‌هادی c-BN بیشینه است.

جدول ۱- محاسبه کمینه جریان اشباع در نیمه‌هادی‌های انتخابی

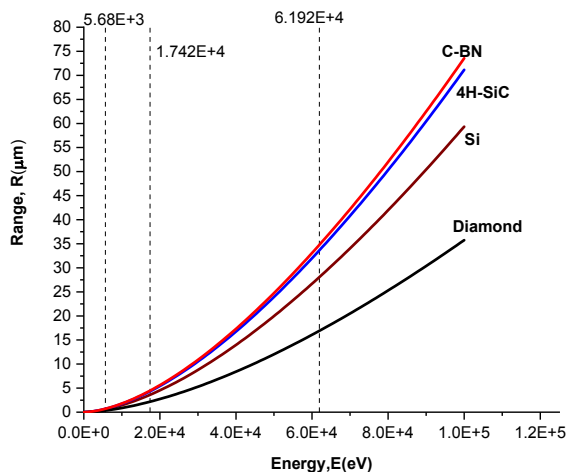
نیمه‌هادی	نوع باند گپ نیمه‌هادی	گاف انرژی (eV)	اشباع J_0 ($\frac{A}{cm^2}$)
Si	Indirect	۱/۱۲	2.29×10^{-14}
C(diamond)	Indirect	۵/۴۸	1.29×10^{-87}
4H-SiC	Indirect	۳/۲۶	2.55×10^{-50}
c-BN	Indirect	۶/۴	4.49×10^{-103}



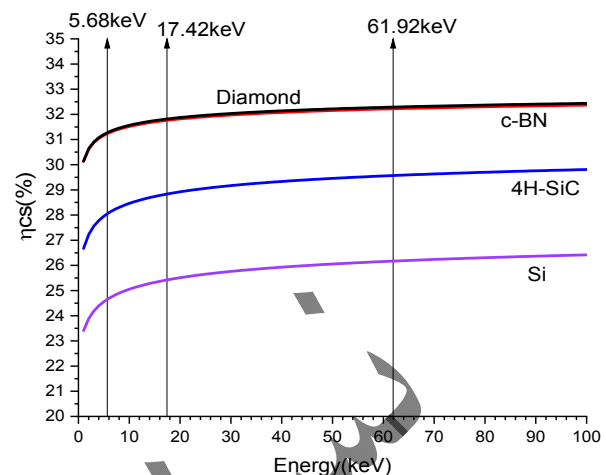
شکل ۴- ضریب پس پراکنندگی برای نیمه‌هادی‌های با عدد اتمی مؤثر کمتر از سیلیکون برای سه انرژی ۵/۶۸، ۱۷/۴۲ و ۶۱/۹۲ کیلو الکترون‌ولت



شکل ۵- محاسبه بیشینه بازدهی جفت‌شدگی نیمه‌هادی به چشمه بتا



شکل ۸- برد ذره بتا با انرژی‌های مختلف در نیمه‌های انتخابی



شکل ۷- بازده ترکیبی برای انرژی‌های مختلف برای نیمه‌های انتخابی

جدول ۵- آستانه آسیب تابشی نیمه‌های انتخابی (34)

نیمه‌های	E_g (eV)	E_d (eV)	E_{th} (eV)
Si	۱/۱۲	۱۲/۹	۱۴۰
C(diamond)	۳/۲۶	۴۳	۲۱۵
4H-SiC	۵/۴۸	۲۸	۱۰۸
c-BN	۶/۴	۳۷.۸	۱۶۴

برد ذره بتا با انرژی‌های مختلف در نیمه‌های انتخابی با استفاده از رابطه (۱۶) محاسبه شده است. شکل (۸) نشان می‌دهد برای توقف ذرات بتا به ترتیب Diamond, Si, 4H-SiC و c-BN ضخامت کمتری از ماده نیمه‌های در به کارگیری به عنوان مبدل نیاز هست.

۴-۶- بهره تولید تابش ترمزی

بهره تابش ترمزی برای نیمه‌های انتخابی شده بر اساس رابطه (۱۶) محاسبه شده و در شکل (۹) نشان داده شده است. نمودار شکل (۹) نشان می‌دهد که بهره تابش ترمزی با افزایش عدد اتمی و انرژی ذرات بتا رابطه مستقیم دارد؛ بنابراین نیمه‌های با عدد اتمی مؤثر بالاتر منجر به تولید تابش ترمزی بیش‌تری خواهند شد. با توجه به جداول بالا نیمه‌های C(diamond) کم‌ترین بهره تابش ترمزی و بعد از آن نیمه‌های

بازده ترکیبی برای انرژی‌های مختلف برای مواد نیمه‌های انتخاب شده به صورت نمودار شکل (۷) محاسبه گردید همان‌طور که مشاهده می‌شود بازدهی ترکیبی نیمه‌های Diamond, c-BN و 4H-SiC از سیلیکون بزرگ‌تر است. به‌طور مثال، برای انرژی ۱۷/۴۲keV، معادل انرژی متوسط طیف رادیوایزوتوپ ^{63}Ni ، بازدهی نیمه‌های Diamond و c-BN ۱/۲۵ برابر بیش‌تر از بازدهی سیلیکون است.

۴-۳- آستانه آسیب تابشی نیمه‌های

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

با توجه به جدول (۵) نیمه‌های C(diamond) بالاترین آستانه تحمل آسیب تابشی را دارد.

۴-۵- برد ذرات بتا در نیمه‌های

این عامل برای سنجش میزان ضخامت نیمه‌های موردنیاز و تعیین ابعاد سلول بتاoltaئیک حائز اهمیت است. در شکل (۸)

۸-۴- قابلیت دسترسی، هزینه و ساخت

نیمه‌هادی سیلیکون (Si)

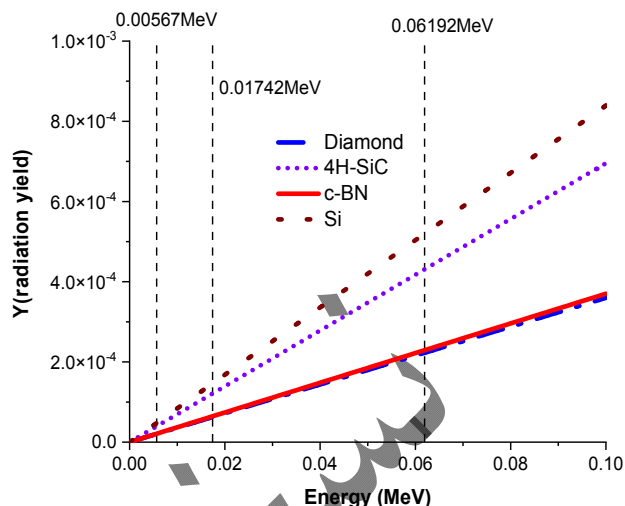
سیلیکون اولین ماده نیمه‌هادی است که به‌عنوان میدل مورد استفاده قرار گرفته است. قطعات سیلیسیومی جریان نشت کم‌تری دارند و خیلی ارزان‌تر از مواد نیم‌رسانای دیگر هستند. پروسه آماده‌سازی مواد نیمه‌هادی یک رابطه کلیدی در تهیه باتری‌های بتاولتائیک است. سیلیکون مونو کریستالی به دلیل هزینه کم آماده‌سازی، بلوغ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

نیمه‌هادی کاربید سیلیکون (SiC)

پیشرفت نیمه‌هادی‌های با گاف انرژی پهن پتانسیل خوبی را برای استفاده در باتری بتاولتائیک از خود نشان داده‌اند. با این حال دارای پروسه ساخت و آماده‌سازی دشوارتری هستند و دارای سرعت پیشرفت و بلوغ فن‌آوری کندتری می‌باشند. کاربرد سیلیکون یک نیمه‌هادی با گاف انرژی پهن با ثبات حرارتی بالا، خواص شیمیایی پایدار، انتقال الکترون خوب عملکرد و مقاومت در برابر اشعه و فن‌آوری رو به رشد می‌باشد (۳۷).

نیمه‌هادی C (diamond)

نیمه‌هادی الماس از جمله کریستال‌های با شکاف باند عریض 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 به‌خوبی دارد. از این‌رو برای به‌کارگیری و ساخت پیوند pn نامناسب است. ولی در ساخت نیمه‌هادی‌های شانتکی برای کاربرد در باتری‌های بتاولتائیک گزینه خوبی است (۳۳ و ۳۴).



شکل ۹- بهره تابش ترمزی بهره تابش ترمزی محاسبه شده برای

نیمه‌هادی‌های انتخابی

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	۵ و ۷	۳/۴۵	۳۲۴۶	۴۵۰۰

c-BN قرار داشته و نیمه‌هادی 4H-SiC در اولویت سوم قرار می‌گیرد.

۷-۴- 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 دارد.

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	ضرب 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

نیمه‌هادی c-BN

و لذا قسمتی از توان مولد یا باتری پرت می‌شود. 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 بوده و می‌تواند هدف بهینه‌سازی قرار گیرند. در این فعالیت علمی، انتخاب بهینه مدل نیمه‌هادی جهت افزایش توان و بازدهی با ^3H ، ^{63}Ni و ^{147}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 ^3H ، ^{63}Ni و ^{147}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

c-BN قابلیت آلییدگی 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.

۴- نتیجه‌گیری

عوامل متعددی در مولدهای بتاولتائیک دخیل بوده و حسب شرایط و هدف کاربری به آن‌ها پرداخته می‌شوند. برای بهره‌برداری حداکثری از توان تولیدی یک مولد، می‌بایست امپدانس خروجی با امپدانس ورودی مقاومت بار برابر باشد. هرچند بسته به هدف کاربری راه‌کارهایی نیز برای آن متصور است، ولی در بیش‌تر کاربردها، این مورد به راحتی عملی نبوده

تشکر و سپاسگزاری

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

تضاد منافع

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

توجه به نتایج بررسی و شاخص‌های ارزیابی به ترتیب Diamond, c-BN, 4H-SiC, نیمه‌هادی‌های مناسب‌تر از نظر بازدهی انتخاب گردید. با توجه به ارزیابی‌های انجام‌شده در جدول (۷) برای ساختارهای دویعدی باتری بتاولتائیک برای الماس از نوع پیوند شاتکی با رادیوایزوتوپ ^{147}pm ، همچنین برای نیمه‌هادی 4H-SiC با رادیوایزوتوپ‌های ^{63}Ni و ^3H و برای ساختارهای سه‌بعدی باتری‌های بتاولتائیک ترکیب Si با رادیوایزوتوپ‌های ^{147}pm و ^{63}Ni پیشنهاد می‌گردد.

واژه‌نامه

1. Rappaport
2. Radio Corporation of America
3. Pfann and Olsen
4. Klein formula
5. Staub
6. 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 Apr 27;127(16):7565–79.
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 Jun;606:234427.
3. Hang Guo, Lal A. Nanopower betavoltaic microbatteries. In: TRANSDUCERS '03 12th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Digest of Technical Papers (Cat No03TH8664) [Internet]. Boston, MA, USA: IEEE; 2003 [cited 2024 Aug 9]. p. 36–9. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/document/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 Dec 28;117(26):263901.
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 Sep 5;121(10):103902.
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 Oct 11;119(15):153904.
7. Mark A. Pierson TRA. 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.
9. Masoumeh Mohamadian. 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 Apr;86:46–51.
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 Aug;125:205–12.
12. امیرمزلقانی، مینا. طراحی و شبیه سازی باتری رادیوایزوتوپی PtSi/Si. ۱۳۹۳ بر پایه دیود شاتکی کنفرانس هسته ای.
13. جمال میراحمدی بابا حیدری. مطالعه مبدل گسیلی-الکتریکی بر پایه مواد نیمه‌هادی. دانشگاه زنجان; ۱۳۹۳.
14. Movahedian Z, Tavakoli-Anbaran H. Design and optimization of Si-35S betavoltaic liquid nuclear battery in micro dimensions in order to build. *Ann Nucl Energy*. 2020 Aug;143:107483.
15. ملکی پدارم. افزایش قابلیت‌های شبیه‌سازی میکروباتری‌های

MCNPX-SILVACO بتاوانائیک با استفاده از کد ترکیبی

مجله علوم و فنون هسته‌ای. ۱۳۹۸

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 Mar;70(3):438–41.
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 Oct;63(4):437–52.
19. Tang X, Ding D, Liu Y, Chen D. Optimization design and analysis of Si-63Ni betavoltaic battery. *Sci China Technol Sci.* 2012 Apr;55(4):990–6.
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 Apr;30(4):60.
21. Klein CA. Bandgap Dependence and Related Features of Radiation Ionization Energies in Semiconductors. *J Appl Phys.* 1968 Mar;39(4):2029–38.
22. Sachenko AV, Shkrebtii AI, Korkishko RM, Kostilyov VP, Kulish MR, Sokolovskiy IO. Efficiency analysis of betavoltaic elements. *Solid-State Electron.* 2015 Sep;111:147–52.
23. Belghachi A, Bozkurt K, Ozdemir O, Avci O. Enhancement of Ni-63 planar source efficiency for betavoltaic batteries. *J Phys Appl Phys.* 2020 Oct 28;53(44):445501.
24. Eckerman K, Endo A. ICRP Publication 107. Nuclear decay data for dosimetric calculations. *Ann ICRP.* 2008;38(3):7–96.
25. Goldstein JI, Newbury DE, Michael JR, Ritchie NW, Scott JHJ, Joy DC. Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. Springer; 2017.
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 Jul 7;128(1):015305.
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 Dec;142:22–7.
28. Spencer MG, Alam T. High power direct energy conversion by nuclear batteries. *Appl Phys Rev.* 2019 Sep;6(3):031305.
29. Zhang L, Cheng HL, Hu XC, Xu XB. Model and optimal design of 147Pm SiC-based betavoltaic cell. *Superlattices Microstruct.* 2018 Nov;123:60–70.
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 Sep;151:226–34.
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 Mar;157:109017.
32. Yunpeng L, Xiao G, Zhonggang J, Xiaobin T. Temperature dependence of 63 Ni-Si betavoltaic microbattery. *Appl Radiat Isot.* 2018 May;135:47–56.
33. Semiconductor Radiation Detectors - 1st Edition - Alan Owens - Routledge [Internet]. [cited 2022 Mar 4]. Available from: <https://www.routledge.com/Semiconductor-Radiation-Detectors/Owens/p/book/9780367779689>
34. Owens A. Compound semiconductor radiation detectors. Boca Raton, Fla.: CRC Press; 2012. 521 p. (Series in sensors).
35. Owens A. Semiconductor radiation detectors. CRC Press; 2019.
36. Murphy JW, Voss LF, Frye CD, Shao Q, Kazkaz K, Stoyer MA, et al. Design considerations for three-dimensional betavoltaics. *AIP Adv.* 2019 Jun 1;9(6):065208.
37. 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 Oct 13;29(11):168.
38. Goss JP, Eyre RJ, Briddon PR. Theoretical models for doping diamond for semiconductor applications. *Phys Status Solidi B.* 2008;245(9):1679–700.
39. 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.
40. 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.
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.