

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



پردیس بین‌المللی خوارزمی
رساله دکتری فیزیک هسته‌ای

طراحی و بهینه‌سازی باتری هسته‌ای بتا‌لتائیک ^{90}Sr به منظور ساخت و

استفاده در ادوات MEMS

نگارنده: محمد حسین جهانگیری

استاد راهنما

دکتر حسین توکلی عنبران

اسفند ۱۴۰۰

صفحه صورت جلسه دفاع

تقدیم اثر

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه
درخت پر بار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان
در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم.

والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم چرا
که این دو وجود پس از پروردگار مایه هستی‌ام بوده‌اند دستم را گرفتند و راه رفتن
را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند.

تشکر و قدردانی

پروردگار را سپاسگزارم که بار دیگر به من فرصت آموختن داد. از پدر و مادر عزیز و مهربانم به خاطر زحماتی که در طول زندگی برای پیروزی و شادکامی من به جان خریدند، تشکر می‌کنم. بدون روحیه بخشی ایشان، بخش مهمی از این رساله میسر نمی‌شد. لذا از حسن سلوک و حمایت بی دریغ ایشان سپاسگزارم. از همسر مهربان و پسر عزیزم مهزیار، به خاطر همکاری‌ها و دلگرمی‌هایشان قدردانم.

برخود واجب می‌دانم از استاد فرزانه جناب آقای دکتر حسین توکلی عنبران که به عنوان استاد راهنما در مراحل مختلف این رساله همواره با سعه صدر و گشاده رویی در کنار من بودند و در طول تحصیل از رهنمایی‌های اخلاقی و علمی ایشان بهره‌جسته‌ام تشکر و قدردانی نمایم.

لازم است از آقایان دکتر ابراهیمی، دکتر حسن آبادی و دکتر محمدی که زحمت داوری این رساله را متقبل شدند نیز تشکر نمایم.

تهدنامه

اینجانب محمد حسین جهانگیری دانشجوی دوره دکتری رشته فیزیک هسته‌ای دانشکده فیزیک و مهندسی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه طراحی و بهینه‌سازی باتری هسته‌ای بتاولتائیک ^{90}Sr به منظور ساخت و استفاده در ادوات MEMS تحت راهنمایی دکتر حسین توکلی عنبران متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

امضای دانشجو



تاریخ

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

امروزه فناوری MEMS (میکروالکترومکانیک سیستم) در زندگی روزمره انسان نقش مهمی را ایفا می‌کند. یکی از موارد اصلی در طراحی ادوات MEMS، استفاده از یک باتری با ابعاد کوچک و طول عمر بالا است. در مقایسه با سیستم های خورشیدی و نیروگاهی فسیلی، استفاده منبع انرژی بر پایه انرژی هسته‌ای دارای مزایای بسیاری از جمله سازگاری بهتر با محیط زیست، عمر طولانی‌تر، چگالی انرژی بالاتر و قابلیت طراحی در اندازه کوچک است. از این رو باتری‌های هسته‌ای با طول عمر بالای ۱۰ سال بهترین گزینه برای استفاده در ادوات MEMS هستند. در این تحقیق رادیوایزوتوپ ^{90}Sr با نیمه عمر ۲۸/۶ سال به عنوان چشمه‌ی رادیواکتیو در نظر گرفته شد.

ابتدا، چشمه استوانه‌ای ^{90}Sr با زیرلایه طلا و پوشش سطح جانبی آنتیموان طراحی شد. سپس شعاع و ارتفاع بهینه‌ی چشمه مورد بررسی قرار گرفت. سپس این چشمه بهینه شده به عنوان منبع باتری هسته‌ای شارژ مستقیم در نظر گرفته شد. بعد از آن اثر موقعیت‌های مختلف قرارگیری کلکتور، پوشش سطح جانبی و زیرلایه نسبت به یکدیگر بر روی بازده کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم مورد مطالعه، بررسی شدند. در مرحله‌ی بعد نیز تأثیر جنس کلکتور بر روی بازده کلکتور مورد بررسی قرار گرفت. سرانجام مشخص شد که بهترین پارامترها برای این باتری هسته‌ای شارژ مستقیم استفاده از Be به عنوان کلکتور، فاصله بین چشمه و کلکتور $25\text{ }\mu\text{m}$ و ضخامت کلکتور $1400\text{ }\mu\text{m}$ است. تحت این پارامترها، جریان اتصال کوتاه آن 0.8997 nA است. چنانچه در این باتری هسته‌ای شارژ مستقیم در فاصله‌ی بین چشمه و کلکتور به جای خلاء ماده نیمرسانا قرار بگیرد، این باتری به یک باتری بتاولتائیک تبدیل می‌شود. بنابراین در ابتدا باتری هسته‌ای شارژ مستقیم بهینه شد. سپس در حجم ثابت، در فاصله‌ی بین چشمه و کلکتور ماده نیمرسانا در نظر گرفته شد. در مرحله بعد پارامترهای باتری مربوط به حالتی که ماده نیمرسانا بین چشمه و کلکتور قرار دارد (بتاولتائیک) محاسبه شد و با حالتی که بین چشمه و کلکتور خلاء است (شارژ مستقیم) مقایسه شد.

در ادامه مشخص شد که جریان اتصال کوتاه باتری هسته‌ای بتاولتائیک 3920 nA است. این در حالی که در باتری هسته‌ای شارژ مستقیم مقدار جریان اتصال کوتاه برابر 0.8997 nA است. حجم باتری هسته‌ای بتاولتائیک با حجم باتری هسته‌ای شارژ مستقیم یکسان است اما جریان اتصال کوتاه آن 44000 مرتبه بزرگتر از جریان اتصال کوتاه باتری هسته‌ای شارژ مستقیم است. می‌توان دریافت که با ثابت بودن مواردی از قبیل حجم، اکتیویته چشمه و ابعاد چشمه، استفاده از نیمرسانا در فاصله‌ی بین چشمه و کلکتور، مقدار جریان اتصال کوتاه را افزایش می‌دهد.

همچنین مشخص شد در یک باتری هسته‌ای شارژ مستقیم که بین چشمه و کلکتور خلاء قرار دارد مواردی از قبیل: تغییر شعاع و ارتفاع کلکتور، تغییر فاصله کلکتور از چشمه، تغییر ارتفاع پوشش سطح جانبی چشمه، تغییر ارتفاع زیرلایه، تغییر فاصله سطح بالایی کلکتور از چشمه، تغییر فاصله سطح جانبی کلکتور از چشمه و تغییر فاصله سطح پایینی کلکتور از چشمه موجب تغییر قابل ملاحظه‌ای در جریان اتصال کوتاه و بازده کلکتور نمی‌شود. لذا در این شرایط آنچه که بر بازده کلکتور اثر می‌گذارد تغییر در جنس کلکتور و ضخامت آن است.

کلمات کلیدی: باتری هسته‌ای شارژ مستقیم، باتری هسته‌ای بتاولتائیک، کد MCNPX، رادیوایزوتوپ

^{90}Sr ، نیمرسانا، ادوات MEMS

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- جهانگیری م.ح، توکلی عنبران ح، (۱۳۹۸)، "بهینه‌سازی چشمه‌ی ^{90}Sr برای استفاده در باتری هسته‌ای بتا ولتائیک"، کنفرانس فیزیک ایران، دانشگاه تبریز، تبریز.

- جهانگیری م.ح، توکلی عنبران ح، (۱۳۹۸)، "بهینه‌سازی کلکتور منبع تغذیه هسته‌ای شارژ مستقیم بر پایه چشمه‌ی رادیواکتیو ^{90}Sr به منظور استفاده در ادوات نانو الکترومکانیک سیستم (NEMS)", هفتمین کنفرانس فناوری نانو در صنعت برق، پژوهشگاه نیرو، تهران.

- Jahangiri M.H and Tavakoli-Anbaran H, (2020) "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*, DOI: 10.1007/s13369-020-05068-3.
- Jahangiri M.H, Tavakoli-Anbaran H and Movahedian Z, (2021) "Design and optimization of ^{90}Sr -Si betavoltaic nuclear battery and its comparison with a direct charge nuclear battery based on ^{90}Sr radioactive source" *Materials Science in Semiconductor Processing*, 128, DOI: 10.1016/j.mssp.2021.105743

فهرست مطالب

ص	فهرست جداول
س	فهرست اشکال
۱	فصل ۱: آشنایی با ممز و باتری‌های هسته‌ای
۲	۱-۱ مقدمه‌ای بر ممز (MEMS)
۳	۱-۱-۱ ممز چیست
۳	۱-۱-۲ تاریخچه فناوری ممز
۴	۱-۱-۳ کاربردهای ممز
۴	۱-۳-۱-۱ میکروسنسورها و میکرومحرک‌های پزشکی
۶	۱-۳-۱-۲ صنعت
۶	۱-۳-۱-۳ صنایع هوافضا
۷	۱-۳-۱-۴ صنایع ارتباطات
۷	۲-۱ مقدمه‌ای بر مبدل‌های رادیوایزوتوپ
۸	۱-۲-۱ مبدل‌های حرارتی
۸	۱-۱-۲-۱ مبدل‌های گرمایونی
۸	۲-۱-۲-۱ مبدل‌های ترموالکتریک رادیوایزوتوپی
۹	۳-۱-۲-۱ سلول‌های ترموفوتوولتائیک
۹	۲-۲-۱ مبدل‌های غیر حرارتی
۹	۱-۲-۲-۱ باتری هسته‌ای شارژ مستقیم
۱۰	۲-۲-۲-۱ باتری بتاولتائیک

- ۱-۲-۳-۳ باتری آلفولتائیک ۱۱
- ۱-۲-۳-۴ باتری اپتوالکتریک ۱۲
- ۱-۲-۳-۵ باتری هسته‌ای نوع اتصال ۱۲
- ۱-۲-۳-۶ باتری هسته‌ای اختلاف پتانسیل تماسی ۱۲
- ۱-۲-۳-۷ باتری هسته‌ای تبدیل غیر مستقیم ۱۳
- ۱-۳-۳ کاربرد مبدل‌های حرارتی و غیر حرارتی ۱۴
- ۱-۳-۱ مأموریت‌های فضایی ۱۴
- ۱-۳-۲ مریخ نورد ۱۵
- ۱-۳-۳ مأموریت‌های نظامی ۱۵
- ۱-۳-۴ هواپیماهای بدون سرنشین ۱۵
- ۱-۳-۵ دستگاه تنظیم کننده ضربان قلب ۱۶
- ۱-۴-۴ مزیت استفاده از باتری‌های هسته‌ای در ممز ۱۷
- ۱-۴-۱ باتری‌های لیتیومی ۱۷
- ۱-۴-۲ سلول خورشیدی ۱۸
- ۱-۵-۵ رنج ولتاژ مورد استفاده در ادوات ممز ۱۹
- ۱-۶-۶ رنج ولتاژ تولید شده توسط باتری‌های هسته‌ای ۲۰
- ۱-۶-۱ باتری‌های هسته‌ای شارژ مستقیم ۲۰
- ۱-۶-۲ باتری‌های هسته‌ای بتاولتائیک ۲۰
- فصل ۲: مبانی نظری استفاده شده در باتری‌های هسته‌ای ۲۱
- ۲-۱ مقدمه ۲۲
- ۲-۲ اتلاف انرژی توسط ذرات باردار ۲۲

۲-۳ برد الکترون	۲۴
۲-۴ تراگسیل ذرات بتا	۲۴
۲-۵ برهمکنش پرتوهای گاما و ایکس با ماده	۲۵
۲-۶ آشکارسازی انرژی مواد رادیواکتیو با استفاده از مواد حالت جامد	۲۵
۲-۶-۱ دسته بندی مواد از نظر رسانش	۲۶
۲-۶-۱-۱ نارسانا	۲۶
۲-۶-۱-۲ رسانا	۲۶
۲-۶-۱-۳ نیمرسانا	۲۷
۲-۷ نیمرساناهای ذاتی و غیرذاتی	۲۸
۲-۸ پیوند p-n به عنوان یک آشکارساز	۳۰
۲-۹ آسیب شناسی ناشی از تابش بر نیمرساناها	۳۲
فصل سوم: بررسی عوامل مؤثر در طراحی چشمه با استفاده از کد MCNPX	۳۳
۳-۱ مقدمه	۳۴
۳-۲ ویژگی های کد MCNP	۳۴
۳-۳ فایل ورودی	۳۴
۳-۳-۱ کارت سلول	۳۵
۳-۳-۲ کارت سطوح	۳۵
۳-۳-۳ کارت داده	۳۶
۳-۴ فایل خروجی کد MCNP	۳۶
۳-۵ تخمین خطا	۳۶
۳-۶ روش های کاهش خطا	۳۶
۳-۷ انتخاب یک رادیوایزوتوپ مناسب برای استفاده در باتری هسته ای	۳۷

۴۰.....	۸-۳ بازده چشمه
۴۱.....	۱-۸-۳ اثر خود جذبی چشمه
۴۱.....	۲-۸-۳ اثر زیرلایه
۴۴.....	۹-۳ بررسی تأثیر عوامل مختلف بر بازده چشمه
فصل چهارم: بهینه‌سازی باتری هسته‌ای شارژ مستقیم بر پایه‌ی چشمه رادیواکتیو ^{90}Sr و مقایسه‌ی آن با باتری هسته‌ای بتاولتائیک $^{90}\text{Sr-Si}$	
۵۱.....	مقایسه‌ی آن با باتری هسته‌ای بتاولتائیک $^{90}\text{Sr-Si}$
۵۲.....	۱-۴ مقدمه
۵۳.....	۲-۴ باتری هسته‌ای شارژ مستقیم
۵۳.....	۳-۴ بازده کلکتور
۵۳.....	۱-۳-۴ پس پراکندگی الکترون‌ها
۵۳.....	۲-۳-۴ الکترون‌های ثانویه
۵۴.....	۴-۴ بررسی عوامل مؤثر بر بازده کلکتور
۵۴.....	۱-۴-۴ اثر حالت‌های مختلف قرارگیری چشمه، زیرلایه، پوشش سطح جانبی و کلکتور نسبت به هم بر بازده کلکتور
۶۰.....	۲-۴-۴ بررسی تأثیر جنس کلکتور بر بازده آن
۶۱.....	۳-۴-۴ بررسی اثر فاصله‌ی کلکتور از چشمه بر بازده آن
۶۳.....	۴-۴-۴ بررسی اثر ضخامت کلکتور بر بازده آن
۶۶.....	۵-۴ خصوصیات و طرز کار باتری هسته‌ای بتاولتائیک
۶۷.....	۱-۵-۴ احتمال جمع‌آوری
۶۸.....	۲-۵-۴ تعریف طول پخش
۷۰.....	۳-۵-۴ غلظت ناخالصی
۷۱.....	۴-۵-۴ جریان، ولتاژ و توان در باتری هسته‌ای بتاولتائیک

۶-۴	انجام شبیه‌سازی مربوط به باتری هسته‌ای بتاولتائیک	۷۲
۷-۴	مقایسه‌ی باتری هسته‌ای شارژ مستقیم با باتری هسته‌ای بتاولتائیک در حجم ثابت	۷۷
فصل پنجم: بررسی عواملی که در افزایش جریان اتصال کوتاه و بازده کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم بر پایه چشمه رادیواکتیو ^{90}Sr تأثیر چندانی ندارند		
۱-۵	مقدمه	۸۰
۲-۵	بررسی حالت ۱	۸۰
۱-۲-۵	نتایج حاصل از بررسی حالت ۱	۸۳
۳-۵	بررسی حالت ۲	۸۳
۱-۳-۵	نتایج حاصل از بررسی حالت ۲	۸۵
۴-۵	بررسی حالت ۳	۸۶
۵-۵	نتایج کلی	۸۷
فصل ششم: شرح نتایج		
۱-۶	مقدمه	۹۰
۲-۶	عوامل مؤثر در طراحی باتری هسته‌ای	۹۰
۱-۲-۶	انتخاب رادیوایزوتوپ مناسب	۹۰
۲-۲-۶	عوامل مؤثر بر بازده چشمه	۹۰
۳-۲-۶	عوامل مؤثر بر بازده کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم	۹۰
۴-۲-۶	انتخاب یک نیم‌رسانای مناسب جهت استفاده در باتری هسته‌ای بتاولتائیک	۹۱
۵-۲-۶	طول پخش در باتری هسته‌ای بتاولتائیک	۹۱
۳-۶	شبیه‌سازی باتری هسته‌ای بتاولتائیک و مقایسه آن با باتری هسته‌ای شارژ مستقیم در حجم ثابت	۹۲

۴-۶ عواملی که در افزایش جریان اتصال کوتاه و بازده کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم بر پایه چشمه

رادیواکتیو ^{90}Sr تأثیر زیادی ندارند ۹۳

مراجع ۹۴

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ مبدل رادیوایزوتوپی به کار رفته در مأموریت‌های ناسا ۹
- شکل ۲-۱ نمایی از باتری هسته‌ای شارژ مستقیم ۱۰
- شکل ۳-۱ نمایی از تولید جریان در باتری‌های بتاولتائیک ۱۱
- شکل ۴-۱ طرح شماتیکی از یک باتری هسته‌ای اختلاف پتانسیل تماسی ۱۳
- شکل ۵-۱ طرحی از یک باتری تبدیلی غیر مستقیم با ^{147}Pm به عنوان رادیوایزوتوپ و فسفر به عنوان منبع تولید فوتون ۱۴
- شکل ۶-۱ باتری هسته‌ای ترموالکتریک به کار رفته در دستگاه تنظیم کننده ضربان قلب ۱۷
- شکل ۷-۱ طرحی از یک باتری لیتیومی ۱۸
- شکل ۱-۲ از راست به چپ نوارهای انرژی در اجسام رسانا، نیمرسانا و نارسانا ۲۸
- شکل ۲-۲ آلایش نیمرساناها با اتم‌های پنج ظرفیتی و سه ظرفیتی ۲۹
- شکل ۳-۱ طیف انرژی بتای ^{90}Sr ، ^{90}Y و $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ ۳۹
- شکل ۲-۳ نمای دو بعدی شکل هندسی چشمه‌ی مورد مطالعه ۴۴
- شکل ۳-۳ مقایسه‌ی بازده چشمه ^{90}Sr با شعاع‌های مختلف به همراه پوشش سطح جانبی آنتیموان و زیرلایه طلا ۴۵
- شکل ۴-۳ مقایسه‌ی بازده چشمه ^{90}Sr با ارتفاع‌های مختلف به همراه پوشش سطح جانبی آنتیموان و زیرلایه طلا ۴۵
- شکل ۵-۳ مقایسه‌ی بازده چشمه ^{90}Sr با شعاع‌های مختلف زیرلایه طلا ۴۶
- شکل ۶-۳ مقایسه‌ی بازده چشمه ^{90}Sr با ارتفاع‌های مختلف زیرلایه طلا ۴۶
- شکل ۷-۳ مقایسه‌ی بازده چشمه ^{90}Sr با شعاع‌های مختلف پوشش سطح جانبی آنتیموان ۴۷
- شکل ۸-۳ مقایسه‌ی بازده چشمه ^{90}Sr با ارتفاع‌های مختلف پوشش سطح جانبی آنتیموان ۴۸

- شکل ۳-۹ مقایسه‌ی بازده چشمه ^{90}Sr با پوشش سطح جانبی آنتیموان، زیرلایه طلا و بدون سطح جانبی آنتیموان و زیرلایه طلا ۵۰
- شکل ۴-۱ چشمه با زیرلایه و پوشش سطح جانبی در مقابل کلکتور صفحه‌ای ۵۴
- شکل ۴-۲ چشمه با زیرلایه در مقابل کلکتور صفحه‌ای ۵۵
- شکل ۴-۳ چشمه با زیرلایه و پوشش سطح جانبی در مقابل کلکتور صفحه‌ای ۵۵
- شکل ۴-۴ چشمه با زیرلایه و پوشش سطح جانبی داخل کلکتور استوانه‌ای ۵۵
- شکل ۴-۵ چشمه بدون زیرلایه و پوشش سطح جانبی در مقابل کلکتور صفحه‌ای ۵۶
- شکل ۴-۶ چشمه بدون زیرلایه و پوشش سطح جانبی داخل کلکتور استوانه‌ای ۵۶
- شکل ۴-۷ چشمه بدون زیرلایه و پوشش سطح جانبی داخل کلکتور استوانه‌ای ۵۶
- شکل ۴-۸ چشمه با زیرلایه و بدون پوشش سطح جانبی داخل کلکتور استوانه‌ای ۵۶
- شکل ۴-۹ چشمه با زیرلایه و بدون پوشش سطح جانبی داخل کلکتور استوانه‌ای ۵۷
- شکل ۴-۱۰ چشمه با زیرلایه و پوشش سطح جانبی داخل کلکتور استوانه‌ای ۵۷
- شکل ۴-۱۱ چشمه با زیرلایه و پوشش سطح جانبی داخل کلکتور استوانه‌ای ۵۷
- شکل ۴-۱۲ چشمه با زیرلایه و پوشش سطح جانبی داخل کلکتور استوانه‌ای ۵۸
- شکل ۴-۱۳ چشمه با زیرلایه و پوشش سطح جانبی داخل کلکتور استوانه‌ای ۵۸
- شکل ۴-۱۴ چشمه با زیرلایه و پوشش سطح جانبی در مقابل کلکتور صفحه‌ای ۵۸
- شکل ۴-۱۵ بازده کلکتور در مقابل موقعیت‌های مختلف قرارگیری پوشش سطح جانبی، زیرلایه، چشمه و کلکتور نسبت به هم ۵۹
- شکل ۴-۱۶ بررسی اثر مواد با عدد اتمی متفاوت بر بازده کلکتور ۶۰
- شکل ۴-۱۷ بررسی اثر فاصله کلکتور از چشمه بر جریان اتصال کوتاه باتری هسته‌ای شارژ مستقیم ۶۲
- شکل ۴-۱۸ بررسی اثر ضخامت کلکتور بر بازده کلکتور در باتری هسته‌ای شارژ مستقیم ۶۳
- شکل ۴-۱۹ نمای دو بعدی از باتری هسته‌ای شارژ مستقیم ۶۴

شکل ۴-۲۰ طرح شماتیک باتری هسته‌ای شارژ مستقیم..... ۶۴

شکل ۴-۲۱ (الف) نمای دو بعدی از باتری هسته‌ای شارژ مستقیم بهینه شده. (ب) نمای دو بعدی از باتری هسته‌ای بتاولتائیک تحت مطالعه ۷۳

شکل ۴-۲۲ نمای دو بعدی باتری هسته‌ای بتاولتائیک با حداکثر ضخامت سیلیکون $1400 \mu m + 25 \mu m$ ۷۴

شکل ۴-۲۳ اثر ضخامت سیلیکون بر جریان اتصال کوتاه باتری هسته‌ای بتاولتائیک ۷۵

شکل ۴-۲۴ اثر ضخامت سیلیکون بر ولتاژ مدار باز باتری هسته‌ای بتاولتائیک..... ۷۶

شکل ۴-۲۵ اثر ضخامت سیلیکون بر توان خروجی باتری هسته‌ای بتاولتائیک ۷۶

شکل ۵-۱ تغییرات جریان اتصال کوتاه باتری هسته‌ای شارژ مستقیم با چشمه ^{90}Sr نسبت به تغییرات شعاع کلکتور ۸۱

شکل ۵-۲ تغییرات جریان اتصال کوتاه باتری هسته‌ای شارژ مستقیم با چشمه ^{90}Sr نسبت به تغییرات ارتفاع کلکتور ۸۱

شکل ۵-۳ تغییرات جریان اتصال کوتاه باتری هسته‌ای شارژ مستقیم با چشمه ^{90}Sr نسبت به تغییرات فاصله کلکتور از چشمه ۸۲

شکل ۵-۴ تغییرات بازده کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم با چشمه ^{90}Sr نسبت به تغییرات ارتفاع پوشش سطح جانبی چشمه ۸۴

شکل ۵-۵ تغییرات بازده کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم با چشمه ^{90}Sr نسبت به تغییرات شعاع پوشش سطح جانبی چشمه ۸۴

شکل ۵-۶ تغییرات بازده کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم با چشمه ^{90}Sr نسبت به تغییرات ارتفاع زیرلایه چشمه ۸۵

شکل ۵-۷ تغییرات بازده کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم با چشمه ^{90}Sr نسبت به تغییرات فاصله سطح بالایی کلکتور از چشمه ۸۶

شکل ۵-۸ تغییرات بازده کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم با چشمه ^{90}Sr نسبت به تغییرات فاصله

سطح جانبی کلکتور از چشمه ۸۶

شکل ۵-۹ تغییرات بازده کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم با چشمه ^{90}Sr نسبت به تغییرات فاصله

سطح پایینی کلکتور از چشمه ۸۷

فهرست جداول

جدول ۱-۳ راهنمای تفسیر خطای مونت کارلو ۳۶

جدول ۲-۳ ویژگی رادیوایزوتوپ‌های بتازا ۳۸

جدول ۴-۱ تغییرات L_p و L_n در غلظت‌های مختلفی از ناخالصی ۶۹

جدول ۴-۲ مقایسه‌ی پارامترهای دو باتری هسته‌ای تحت مطالعه در حجم ثابت ۷۷

فصل اول

آشنایی با مفروضاتری های هسته ای

۱-۱ مقدمه‌ای بر ممز (MEMS)

امروزه با پیشرفت فناوری‌های نوین، نیازمند داشتن لوازم دقیق‌تر در بخش‌های صنعتی، پزشکی، کشاورزی و سایر علوم هستیم. ممز^۱ و نمز^۲ این امکان را برای تحول در زندگی انسان فراهم ساخته‌اند [۱]. ممز به عنوان یکی از فناوری‌های قرن ۲۱ به شمار می‌رود که پتانسیل لازم برای متحول ساختن تولیدات مصرفی و صنعتی را دارد. با ترکیب کردن میکرومکانیک و میکروالکترونیک و تکنیک‌های به کار رفته به طور شگفت‌انگیزی بر زندگی ما تأثیر دارد. اگر ساخت در ابعاد میکرو^۳ در نیمه هادی‌ها را اولین انقلاب در تولیدات میکرو در نظر بگیریم، ممز دومین انقلاب در این زمینه است. امروزه در کشورهای پیشرفته جهان، توسعه تلفیق سیستم‌های مکانیکی و الکترونیکی در ابعاد بسیار کوچک مطالبه می‌شود، زیرا این بخش مهم علمی موجب افزایش سرعت و کم حجم شدن ابعاد صنایع در بخش صنعت خواهد شد. امروزه لزوم توسعه این فناوری باعث شده است تا بسیاری از کشورهای جهان برای توسعه این فناوری و تولید این محصول اقداماتی انجام داده و در این راستا سرمایه‌گذاری کنند. کشورهای ژاپن و کره جنوبی که از پیشگامان این فناوری در جهان بودند امروزه تولیدات بسیاری در زمینه خودروسازی و محصولات الکترونیکی (ریز فناوریانه) دارند [۲]. یک گزارش قابل توجه توسط شرکت یوئل^۴ نشان می‌دهد که بازار سنسورهای ممز به شدت در آینده پیشرفت خواهد کرد. درآمد کلی سنسورهای اینرسی^۵ ممز در سال ۲۰۱۱ از ۳/۴ میلیارد دلار فراتر رفته و این رکورد در سال ۲۰۱۷ از ۵ میلیارد دلار هم عبور کرده است [۳].

نکته قابل تأمل مشارکت تنها چند کشور در صادرات محصولات این فناوری است. همچنین یکی از موارد برجسته در این موضوع نیاز روز افزون به این فناوری است، با توجه به این مسأله که بشر دریافته است باید نیازهای خود را بدون ایجاد آلودگی و اشغال فضای بیهوده توأم با سرعت بیش‌تر بر طرف کند. به طور کلی

۱- MEMS = میکرو الکترو مکانیک سیستم

۲- NEMS = نانو الکترو مکانیک سیستم

۳- Micro fabrication = میکرو ساخت فرآیند ساخت سازه‌های منیاتوری در مقیاس میکرو و کوچکتر

۴- Yole

۵- سنسور اینرسی وسیله‌ای است که با آن نیروی اینرسی سیستم را به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌کند-5

مطالعه و ارزیابی عملکرد برای توسعه‌ی تولید و تجاری‌سازی محصولات بر پایه ریز فناوریانه می‌تواند الگویی بهینه‌ای برای شکل‌دهی یک مدل توسعه در کشور ما باشد. زیرا تجارت پرسود این فناوری و آینده صنعتی دنیا و ارتباط آن با این فناوری اجتناب ناپذیر است [۴].

۱-۱-۱ ممز چیست

ممز مخفف میکرو الکترومکانیک سیستم؛ تکنولوژی است که برای به وجود آوردن سیستم‌ها و وسایل یکپارچه مجتمع خیلی کوچک بکار می‌رود که از عناصر الکتریکی و مکانیکی ترکیب می‌شوند. آن‌ها با استفاده از تکنیک‌های خاص در اندازه‌های کمتر از میکرومتر تا میلی‌متر طبقه بندی می‌شوند. در واقع سیستم‌های میکروالکترومکانیکی تلفیقی از اجزای الکتریکی و بازوهای مکانیکی هستند؛ که بر روی لایه‌ای از ماده استراتژیک سیلیکون قرار دارند. این ساختار مکانیکی بسیار کوچک بر پایه تکنولوژی تراشه-های الکترونیکی در ابعاد میکرو استوار است [۵].

سیستم‌های ممز از دو بخش تشکیل می‌شوند:

- ۱- مکانیکی: برای حس کردن یک کمیت از محیط اطراف (فشار، شتاب، تغییرات سرعت زاویه‌ای و....)
- ۲- الکتریکی: برای تبدیل واکنش مکانیکی به سیگنال الکتریکی و پردازش آن به کمک فناوری مشابه آنچه در ساخت قطعات نیمه هادی معمول است [۶].

۱-۱-۲ تاریخچه‌ی فناوری ممز

در سال ۱۹۵۰ فناوری ممز کشف و پژوهش‌ها پیرامون آن شروع شد. در سال 1954 سیلیکون و ژرمانیوم و ویژگی‌های آنها کشف شد. در سال ۱۹۶۱ اولین فشارسنج سیلیکونی معرفی شد. نمونه اولیه دستگاه MEMS توسط هاروی سی ناتانسون^۱ در سال ۱۹۶۵ ساخته شد [۷]. نمونه اولیه دیگر، تشدید کننده یکپارچه الکترومکانیکی است که توسط ریموند جی ویلفینگر^۲ بین سال‌های ۱۹۶۶ و ۱۹۷۱ به ثبت رسیده

۱- Harvey C. Nathanson

۲- Raymond J. Wilfinger

است [۸ و ۹]. طی دهه ۱۹۷۰ تا اوایل ۱۹۸۰، تعدادی میکرو سنسور MOSFET برای اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و محیطی تولید شد [۱۰].

در سال‌های ۱۹۸۳ و ۱۹۸۲ فرایند لیگا^۱ ابداع شد. سنسور فشار یکپارچه و ماشین آلات بینهایت کوچک در سال ۱۹۸۵ تولید شد. در سال ۱۹۸۶ پیوند ویفر سیلیکونی انجام شد. در سال ۱۹۸۸ اولین کنفرانس ممز برگزار شد و ساخت سنسور فشار از طریق پیوند ویفر انجام شد. در سال ۱۹۹۱ کشف لوله‌های نانو کربنی و در سال ۱۹۹۲ تولید اولین لولای میکروماشین‌کاری شده انجام شد. در سال ۲۰۰۰ اجزاء ارتباط نوری ممز رونق یافت.

۱-۱-۳ کاربردهای ممز

معماری‌ها و پیکربندی‌های مختلف می‌توانند کاربردهای متفاوتی از ادوات ممز را فراهم آورند که در این بخش به معرفی برخی کاربردهای ممز اشاره می‌کنیم.

۱-۱-۳-۱ میکرو سنسورها و میکرو محرک‌های پزشکی

تکنولوژی‌های میکرو ماشین‌کاری^۲ می‌توانند در تولید سازه‌ها و وسایل و سیستم‌های پیچیده الکتریکی، مکانیکی، سیالات، گرمایی، نوری و مغناطیسی در مقیاس وسیعی از اندام تا ارگان‌های زیر سلولی به کار روند. همین موضوع امکان کاربرد در زمینه‌های متنوع زیست پزشکی و مهندسی پزشکی به طور عام بنام بیوممز^۳ را فراهم کرده است. در آینده انتظار می‌رود که از بیوممز در زمینه‌های زیر استفاده شود.

- آرایه‌های میکرو سنسور که به عنوان بینی و یا زبان الکترونیکی کار می‌کنند.
- میکرو سیستم‌های عصبی با قابلیت کنترل وسایل پروتزی حسی یا حرکتی.
- میکرو تجهیزات جراحی بدون درد.
- سیستم‌های کامل میکروسیال برای آنالیز ژنتیکی یا شیمیایی.

۱- LIGA = یک روش برای تولید قطعات در ابعاد میکرو است

۲- Micromachining

۳- BioMEMS = قطعات میکرو الکترو مکانیک در حوزه زیست پزشکی

بیشتر استفاده ممز در مهندسی پزشکی در زمینه سنسورها است که از این جمله می‌توان به سنسورهای مهم حین جراحی (مثلا برای اندازه‌گیری فشار درون رگ) سنسورهای بلند مدت برای وسایل پروتزی و آرایه‌های سنسوری و پیشرفته برای تشخیص آزمایشگاهی در خانه اشاره کرد. در اینجا به معرفی تعدادی از انواع میکرو سنسورها و کاربردهای آن می‌پردازیم.

- میکروسنسورها در بیومکانیک که برای مطالعات نیروهای تولیدی و اعمالی بدن با استفاده از حساسیت سنسورها به تنش و کرنش در اندازه‌های کوچک ساخته و استفاده می‌شوند. اندازه‌گیری-های کرنش برای درک ساختمان و عملکردهای عضله که می‌تواند به توسعه درمان‌های حرکتی و وسایل پروتزی انجامد.

- شتاب‌سنج‌ها^۱ برای تعیین درجه ضربه و فشار و طرز ایستادن بیمار.
- میکروسنسورهای مربوط به بیوسیستم‌های شیمیایی^۲ در ساخت وسایل تشخیص پزشکی نمایش داروها سنسورهای قابل کاشت برای پروتزا و پایش محیطی به کار می‌روند.
- سنسورهای امپدانسی^۳ که به شناسایی گازها، کمی‌سازی تجمع گازها، حساسیت به بخار آب و تغییرات دمایی کمک می‌کند.

- سنسورهای خاص مولکولی^۴ که با استفاده از تکنولوژی‌های رزونانس^۵ در حساسیت به منحنی مکانیکی و تعیین چگالی ویسکوزیته مایع و بخار گازهای معین استفاده می‌شود.

- سنسورهای سلول محور که در سیگنال دهی سلولی و تقویت و پایش آن کاربرد دارد.

میکرو محرک‌های پزشکی^۶ این دسته در مقیاس‌های میکروسکوپی برای کنترل اشیاء زیستی و محیط آن‌ها

۱- Accelerometers

۲- Chemical Bio Systems

۳- Impedance Sensors

۴- Molecular Specific Sensors

۵- ISFETion_sensitive field effect Transistor, Resonant Sensors

۶- Biomedical Micro actuators

به کار می‌روند که می‌توان به این موارد اشاره کرد.

- وسایل میکرو منیپولار^۱ که برای تعامل با نمونه در زیر میکروسکوپ برای دسترسی به سلول‌ها و بافت‌ها استفاده می‌شود.
- میکرو ابزار جراحی با قابلیت حمل در مقیاس ۱nm مانند میکرو هیتر میکروسنسر و...
- میکروسوزن‌ها به طور عمده برای استفاده بیماران دیابتی ساخته می‌شود.
- میکروفیلترها برای نمایش اشیاء در مقیاس میکرون و عبور اشیاء خاص از این فیلتر.

۱-۳-۲ صنعت

در صنعت خودرو از فشارسنج برای اندازه‌گیری فشار روغن موتور، فشار خلاء، فشار تزریق سوخت، فشار خط ترمز ABS و فشار هوای ذخیره شده برای کیسه هوا استفاده می‌شود. شتاب‌سنج‌های ساخته شده با فناوری ممز به سرعت با شتاب‌سنج‌های رایج که در سیستم‌های کیسه هوا به کار می‌رفتند جایگزین شدند. در روش سنتی و مرسوم چندین شتاب‌سنج بزرگ ساخته شده با مؤلفه‌های مکانیکی گسسته در جلوی خودرو با سیستم الکترونیک جداگانه و نزدیک کیسه هوا نصب می‌شد و برای هر خودرو افزون بر 50 دلار هزینه داشت. فناوری مجتمع سازی ممز، ساخت شتاب‌سنج‌ها و مدارهای الکترونیکی را روی یک تراشه سیلیکونی با هزینه‌های بین 5 تا 10 دلار ممکن ساخت. شتاب‌سنج‌های ممز کوچک‌تر و دقیق و قابل اطمینان‌تر بوده و با کسری از هزینه شتاب‌سنج‌های مقیاس بزرگ ساخته شده‌اند. از کاربرد شتاب‌سنج‌ها می‌توان (۱) سیستم ترمز ضد قفل (۲) سیستم تعلیق (۳) سیستم کیسه هوای خودروها را نام برد.

۱-۳-۳ صنایع هوافضا

در نشانگر کابین خلبان، ابزارهای پرش اضطراری، اندازه‌گیری‌های تونل هوا و میکرو ماهواره‌ها کاربرد دارند.

۱-۳-۴ صنایع ارتباطات

از دو نوع ممز در این صنایع به طور متداول استفاده می‌شود: آراف. ممزها^۱ (رادیو فرکانس-ممز) امروزه کاربردهای بسیار وسیعی در صنعت موبایل دارند به طوری که با پیشرفت آن‌ها موبایل‌ها ارزان‌تر شده و اندازه‌های کوچک‌تر پیدا کرده‌اند. موئمز^۲ به دلیل وجود فوتون نیاز به نیروی کمی دارند مکان کوچکی را اشغال می‌کنند و تکنولوژی ساخت آن‌ها مانند نیمه هادی‌ها است. موئمز ترکیبی از سیستم های میکرو الکترو مکانیک با سیستم های میکرو اپتیکال است. [۱۱].

۱-۲ مقدمه‌ای بر مبدل‌های رادیوایزوتوپ

دستگاه‌هایی که انرژی واپاشی هسته‌ای را به الکتریسیته تبدیل می‌کنند مبدل‌های رادیوایزوتوپ نامیده می‌شوند. این مبدل‌ها مشابه راکتورهای هسته‌ای انرژی اتمی را به الکتریسیته تبدیل می‌کنند با این تفاوت که به جای واکنش‌های زنجیره‌ای از انتشار رادیواکتیو مستمر برای تولید برق بهره می‌برند. ویژگی اصلی مبدل‌های رادیوایزوتوپ، تولید الکتریسیته برای سالیان دراز است که بستگی به نیمه عمر رادیوایزوتوپ دارد. همچنین مبدل‌های رادیوایزوتوپ چگالی انرژی بالایی نسبت به سلول‌های سوختی هیدروژنی و باتری-های شیمیایی دارند و به شرایط محیطی نیز وابسته نمی‌باشند. عملکرد آن‌ها فراتر از یک محدوده دمایی و فشار می‌باشد، که این ویژگی‌ها باعث کار کردن آن‌ها در فضا یا زیر آب می‌شود. به علت واپاشی رادیوایزوتوپی مداوم که توسط خود ماده انجام می‌گیرد این باتری‌ها نیازی به سوخت‌گیری یا شارژ ندارند [۱۲].

۱- RFMEMS

۲- MOEMS

روش‌هایی که برای تولید الکتریسیته از مبدل‌های رادیوایزوتوپ‌ها وجود دارد به دو گروه دسته بندی می‌شود.

مبدل‌های حرارتی (مبدل هایی که توان خروجی آنها ناشی از اختلاف حرارتی است که منبع تابش بین دو الکتروود ایجاد می کند و از اختلاف دما اختلاف پتانسیل ایجاد می‌باشد).

مبدل‌های غیر حرارتی (مبدل هایی که سیستم کارکرد آنها تابع دمای بین منبع تابش نمی‌باشد).

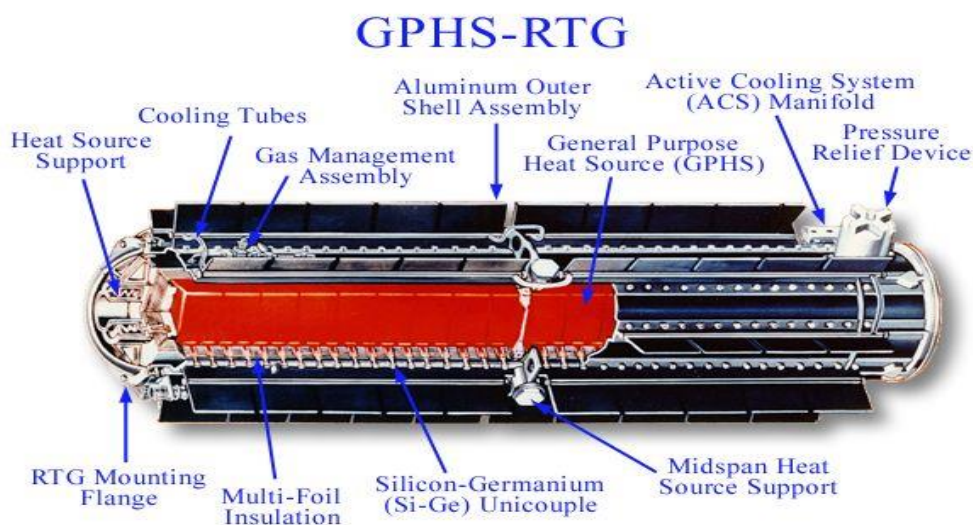
۱-۲-۱ مبدل‌های حرارتی

۱-۱-۲-۱ مبدل‌های گرمایونی

یک مبدل گرمایونی شامل یک الکتروود گرم (کاتد) است که الکترون‌ها را به صورت گرمایونی به الکتروود سرد (آند) ساطع می‌کند. در این مبدل آند باید در دماهای پایین‌تر نگهداری شود تا از تابش مجدد الکترون‌های آن جلوگیری شود. اگر فاصله میان دو الکتروود خلاء باشد به آن دیود خلاء و اگر شامل بخار باشد به آن دیود پلاسما می‌گویند [۱۳].

۲-۱-۲-۱ مبدل‌های ترموالکتریک رادیوایزوتوپی

یک مبدل ترموالکتریک رادیوایزوتوپی گرمای حاصل از واپاشی را به الکتریسیته تبدیل می‌کند. مبدل‌های ترموالکتریک رادیوایزوتوپی در مأموریت‌های متعدد فضایی مورد استفاده قرار گرفتند. دو ویژگی مهم باعث ناسازگاری آن‌ها با سیستم‌های الکتریکی جدید که مقیاس کوچکی داشتند، وجود داشت. این مبدل‌ها بازدهی کمی حدود ۶٪ داشتند و دارای اندازه‌های بسیار بزرگی بودند [۱۴]. در این مبدل‌ها حداقل یک گرم یا بیش از این مقدار مواد رادیواکتیو آلفا یا بتا گسیل با انرژی صدها یا هزاران کیلو الکترون ولت مورد نیاز است تا توانی از مرتبه میلی یا حتی میکرووات تامین گردد. در عوض مبدل‌های غیر حرارتی به طور مؤثری با مقدار کمی از مواد رادیواکتیو که از مرتبه میلی گرم می‌باشد توانی در حدود میلی وات را تولید می‌کنند. شکل زیر نمونه‌ای از مبدل‌های رادیوایزوتوپی است که در مأموریت‌های ناسا مورد استفاده قرار گرفته است [۱۵].



شکل ۱-۱. مبدل رادیوایزوتوپی به کار رفته در مأموریت‌های ناسا. [74]

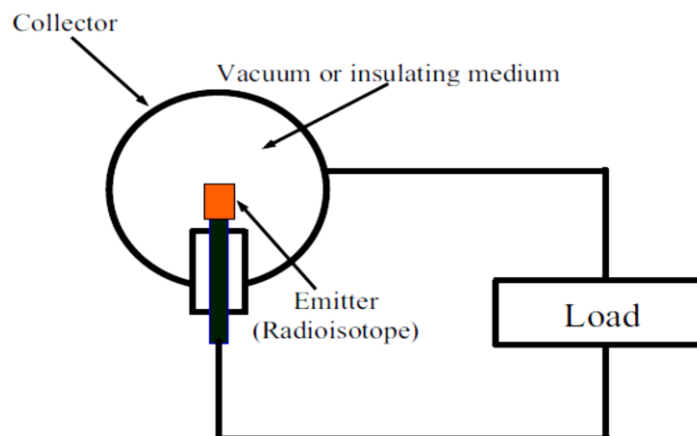
۳-۱-۲-۱ سلول‌های ترموفتوولتائیک

سلول‌های ترموفتوولتائیک اصول مشابهی با سلول‌های فتوولتائیک دارند جز اینکه آن‌ها نور مادون قرمز (به جای نور مرئی) ساطع شده از سطح گرم شده را به برق تبدیل می‌کنند. سلول‌های ترموفتوولتائیک بازدهی بیشتری نسبت به جفت‌های ترموالکتریکی دارند و می‌توان با قرار دادن آن‌ها روی جفت‌های ترموالکتریکی بازده را تا دو برابر افزایش داد.

۲-۲-۱ مبدل‌های غیر حرارتی

۱-۲-۲-۱ باتری هسته‌ای شارژ مستقیم

در باتری‌های شارژ مستقیم ذرات آلفا، بتا، پوزیترون و یا پاره‌های شکافت به طور مستقیم باعث ایجاد جریان می‌شوند. اولین مولد رادیوایزوتوپی که یک باتری هسته‌ای شارژ مستقیم می‌باشد در سال ۱۹۱۳ توسط موزلی ساخته شد [۱۶]. باتری موزلی از یک منبع رادیوایزوتوپ که به عنوان الکتروود مرکزی و الکتروود رسانای خارجی دیگری که ذرات باردار ساطع شده از منبع را جمع‌آوری می‌کند، تشکیل شده است. این دو الکتروود تشکیل یک خازن می‌دهند و فضای بین آن دو توسط خلاء یا مواد دی‌الکتریکی که بیشتر ذرات باردار را جذب نکند، پر می‌شود. این باتری توانست ولتاژ ۱۵۰ کیلوولت و جریان ۰/۱ نانو آمپر را تولید کند [۱۷ و ۱۸].

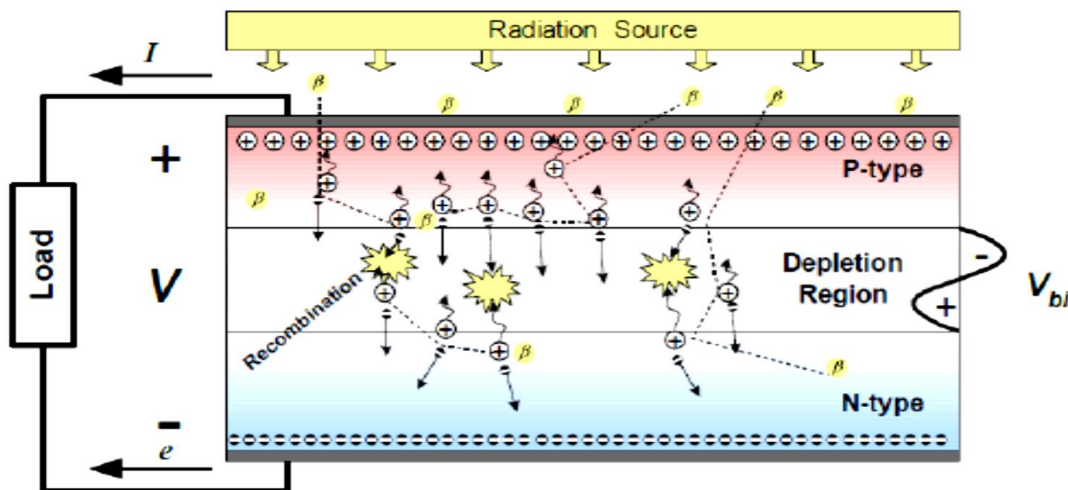


شکل ۱-۲. نمایی از باتری هسته‌ای شارژ مستقیم [۱۸].

۱-۲-۲-۲ باتری بتاولتائیک

در سال ۱۹۵۴ برای اولین بار راپاپورت در فناوری تبدیل مستقیم، سلول‌های بتاولتائیک را گسترش داد. در یک سلول خورشیدی یک فوتون رسیده از خورشید جذب نیمه هادی می‌شود تا زوج الکترون-حفره تولید کند. در یک مبدل بتاولتائیک زوج الکترون-حفره‌های تولید شده ناشی از یونیزاسیون پی در پی الکترون‌های پرانرژی ساطع شده از یک ایزوتوپ رادیواکتیو که دارای واپاشی بتا است، می‌باشند. یک فوتون خورشیدی حداکثر یک زوج الکترون-حفره تولید می‌کند ولی عبور یک الکترون پر انرژی از میان نیمه هادی‌ها باعث یونیزاسیون مداوم شده و هزاران زوج الکترون-حفره با توجه به انرژی الکترون ایجاد می‌شود. باتری‌های بتاولتائیک اولیه از پرمیتیوم-۱۴۷ با نیمه عمر ۲/۶ سال ساخته شد. این فناوری به عنوان منابع توانی با عمر طولانی برای کاشت تنظیم کننده ضربان قلب در حدود سال‌های ۱۹۶۸ و ۱۹۷۴ توسعه یافت. باند گپ دستگاه‌های بتاولتائیک نیازی به مطابقت با طیف خورشیدی ندارد زیرا بتاهای انرژی بالا (بیش از کیلو الکترون ولت) در هر باند گپی قادر به تولید یونیزاسیون در نیمه هادی‌ها می‌باشند. در مقایسه با دستگاه‌های خورشیدی، دستگاه‌های بتاولتائیک در چگالی جریان بسیار کم کار می‌کنند که به طور معمول کسری از میکرو آمپر در هر سانتی متر مربع می‌باشد. برای کاهش جریان نشتی، باند گپ نیمه هادی‌ها باید پهنای

بیش‌تری داشته باشد. پهنای باند بیش‌تر به معنای عملکرد مستقل از دما می‌باشد، یعنی در منبع توان‌های بتاولتائیکی که از نیمه هادی‌هایی با پهنای بیش‌تر استفاده می‌شود به خوبی در سطح سیاره زهره که دمایی حدود ۴۵۰ درجه سانتیگراد دارد، کار می‌کنند.



شکل ۱-۳. نمایی از تولید جریان در باتری‌های بتاولتائیک [۱۹].

۱-۲-۳ باتری آلفاولتائیک

مبدل‌های آلفاولتائیک تکنولوژی مشابهی با مبدل‌های بتاولتائیک دارند با این تفاوت که در این مبدل‌ها یونیزاسیون بیشتر توسط ذرات آلفا انجام می‌گیرد و الکتریسیته تولید می‌شود. علت استفاده از آلفا گسیل‌ها سهولت نسبی و کم وزن بودن سپر محافظتی مورد نیاز، می‌باشد. مهمترین مسئله در مبدل‌های آلفاولتائیک آسیب‌های تابشی ناشی از ذرات آلفا می‌باشد. برای به حداقل رساندن این آسیب در نیمه هادی‌ها، ترکیبات حاوی فسفر یا سلول‌های خورشیدی نقاط کوانتومی به کار می‌رود. در این مبدل‌ها به طور غیر مستقیم و با فسفر رادیولومینسانس، می‌توان نور ساطع شده را به طول موجی که باعث راندمان بهینه است تنظیم کرد تا انرژی فروپاشی به الکتریسیته تبدیل شود. روشی دیگر برای کاهش آسیب‌های تابشی و کاهش فاصله مجموعه به کار بردن لایه‌های چندگانه پیوندگاه در ساختار باتری است [۲۰].

۱-۲-۴ باتری اپتوالکتریک

در این باتری بتای حاصل از واپاشی رادیونوکلئیدها تبدیل به نور شده و سپس نور تبدیل به انرژی الکتریکی می‌شود. رادیونوکلئیدها در داخل گازی معلق هستند که قابلیت برانگیخته شدن به وسیله الکترون‌های منتشر شده را دارد. سپس گازهای اگزایمر (دیمر تحریک شده) نور را در طول موج مشخصی که باعث برانگیخته شدن پیوندگاه موجود در سلول فوتوالکتریک می‌شود، ساطع می‌کنند و جریان الکتریکی ایجاد می‌شود. تکنسیم-۹۹ و استرانسیوم-۹۰ هر دو به عنوان رادیوایزوپ و ترکیبی از گازهای آرگون، زنون و کریپتون در این باتری به کار می‌روند [۲۱].

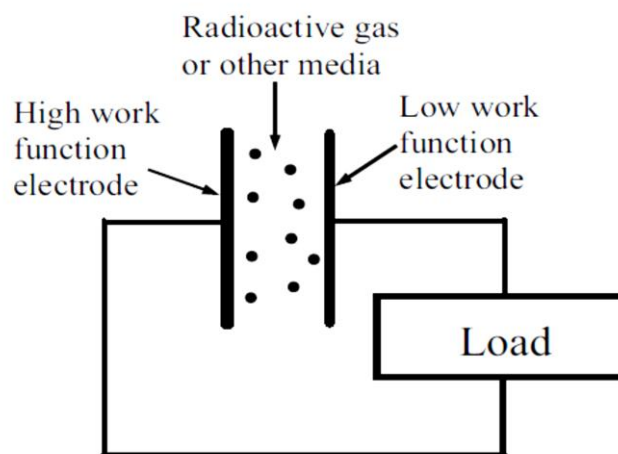
۱-۲-۵ باتری هسته‌ای نوع اتصالی

در این باتری‌ها ذرات باردار با عبور از ناحیه تهی پیوندگاه $p-n$ ، جفت الکترون-حفره‌های زیادی ایجاد می‌کنند. تحت تاثیر میدان الکتریکی ناحیه تهی جریان و ولتاژ شکل می‌گیرد. هر جفت الکترون-حفره از برخورد ذرات باردار با پیوندگاه $p-n$ سیلیکون حدود ۳ الکترون ولت انرژی کسب می‌کنند. یک ذره بتای ناشی از پرتوزایی ^{90}Sr تعداد بسیار زیادی زوج الکترون-حفره تولید می‌کند. بنابراین باتری‌های اتصالی در مقایسه با باتری‌های تبدیل مستقیم جریان بیشتر و ولتاژ خروجی کمتری دارند که توسط باند گپ نیمه هادی تعیین می‌شود. ولتاژ مدار باز باتری اتصالی نوع سیلیکونی حدود چند دهم ولت است که برای ایجاد یک ولتاژ مناسب چندین سلول به صورت سری بسته می‌شوند. مهم‌ترین مشکل در این باتری‌ها بیشتر بودن انرژی ذرات باردار از یک آستانه خاص می‌باشد که باعث آسیب در ساختار شبکه می‌شود.

۱-۲-۶ باتری هسته‌ای اختلاف پتانسیل تماسی

این نوع باتری از دو الکتروود فلزی مختلف تشکیل شده است. منطقه بین دو الکتروود می‌تواند با گاز یا رادیوایزوتوپ تریتیوم به عنوان رادیوایزوتوپ گازی پر شود. فضای بین دو فلز غیر مشابه تحت تابش رادیوایزوتوپ قرار گرفته و یون‌های به دست آمده به علت اختلاف ناشی از پتانسیل‌های تماسی بین دو

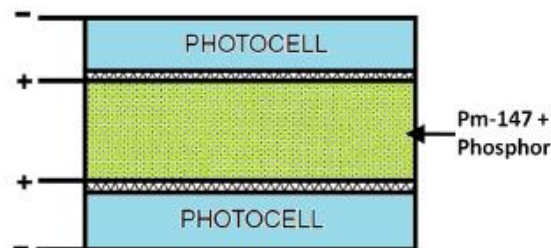
الکتروود، جدا می‌شوند. ولتاژ مدار باز در این باتری برابر است با اختلاف ولتاژ تماسی که کمتر از ۱ ولت است. در این باتری هم نسبت به باتری‌های تبدیل مستقیم جریان بیشتری تولید می‌شود. به علت افزایش بازده یونیزاسیون گاز به کار رفته در این باتری‌ها اندازه باتری بزرگتر خواهد شد. امپدانس الکتریکی بسیار زیاد باتری منجر به تشکیل یک خازن توسط دو الکتروود می‌شود [۲۲].



شکل ۴-۱. طرح شماتیکی از یک باتری هسته‌ای اختلاف پتانسیل تماسی [۲۳].

۷-۲-۲-۱ باتری هسته‌ای تبدیل غیر مستقیم

در این باتری تابش‌ها تا حدی در فوسفور جذب می‌شوند تا نور ساطع کنند. سپس نور توسط سلول‌های خورشیدی اطراف جذب و تبدیل به الکتریسیته می‌شود. از آنجایی که برای دستیابی به الکتریسیته دو مرحله انجام می‌شود، در مجموع باتری کارایی نسبتاً بالایی خواهد داشت. در مرحله اول فرآیند تبدیل انرژی رادیواکتیو به نور، چالشی برای افزایش جذب ذرات ساطع شده در فوسفور وجود دارد تا تبدیل انرژی هسته‌ای به نور بهبود یافته و میزان جذب نور در فوسفور به حداقل برسد. به کارگیری سلول خورشیدی به علت ولتاژ خروجی محدود و توان وابستگی منطقه‌ای عامل محدود کننده دیگری در این باتری‌ها می‌باشد. همچنین برای کاهش جذب نور در فوسفور، نباید فوسفور بیش از حد ضخیم باشد. در نتیجه سلول خورشیدی در معرض تابش‌هایی قرار می‌گیرد که باعث آسیب و تنزل عملکرد می‌شود [۲۴].



شکل ۱-۵. طرحی از یک باتری تبدیلی غیر مستقیم با ^{147}Pm به عنوان رادیوایزوتوپ و فسفر به عنوان منبع تولید فوتون [۱۲].

۳-۱ کاربرد مبدل‌های حرارتی و غیر حرارتی

ویژگی بارز رادیوایزوتوپ‌ها میزان انرژی ذخیره شده بالا در واحد جرم و طول عمر طولانی آن‌ها می‌باشد. این ویژگی‌ها باعث توسعه باتری‌های هسته‌ای محور با رادیوایزوتوپ‌ها شده است. در این قسمت طرح‌های موفق باتری‌های هسته‌ای و کاربردهای آن‌ها بیان شده است.

۱-۳-۱ مأموریت‌های فضایی

برای اکتشافات فضایی فراتر از مریخ جریان خورشیدی مورد نیاز برای توان کاوشگرهایی که دارای سلول خورشیدی بودند، کافی نبود. بدین منظور، مبدل‌های گرمایی رادیوایزوتوپ به موفقیت‌های بیشتری دست یافتند. در ۲۶ مأموریت فضایی از مبدل‌های گرمایی به عنوان منبع توان استفاده گشت. مبدل‌های گرمایی با وجود اینکه بازدهی کمی در حدود ۴ الی ۱۰ درصد داشتند اما استفاده از آن‌ها به عنوان منبع قابل اعتماد و آزمایش شده در پروازهای طولانی ثابت شد. به عنوان مثال کاوشگر ویجر که ۴۰ سال قبل راه اندازی شده بود هنوز هم در حال ارسال سیگنال می‌باشد. بررسی‌ها نشان داده است که ایزوتوپ بالقوه برای باتری‌های هسته‌ای که منبع رادیوایزوتوپی دارد بسیار محدود است. کلید فناوری مبدل‌های گرمایی رادیوایزوتوپی، ایزوتوپ پلوتونیوم-۲۳۸ است. در مأموریت‌های ناسا از این رادیوایزوتوپ استفاده شده است.

۱-۳-۲ مریخ نورد

در تمام مریخ نوردهای پیشین که مأموریت نسبتاً کوتاهی داشته‌اند، از سلول‌های خورشیدی و باتری‌هایی برای تولید برق استفاده شده است. مریخ نورد شامل ابزارهای پیچیده بررسی مانند کروماتوگرافی گاز می‌باشد. مبدل‌های ترموالکتریک رادیوایزوتوپی چندگانه برای این مأموریت‌ها به کار رفته و بازدهی حدود ۶ تا ۷ درصد دارند.

۱-۳-۳ مأموریت‌های نظامی

نیاز به منبع توان قابل حمل در مأموریت‌های نظامی مختلف وجود دارد. یک میدان جنگ دیجیتال با فناوری‌های پیچیده‌ای از قبیل: جی پی اس^۱، دید در شب، رادیو، گوشی‌های هوشمند، تبلت‌ها، صفحه نمایش، سلاح‌های هدایت لیزری، آرایه‌ای از سنسورها، هواپیماهای بدون سرنشین، ربات‌ها و دستگاه‌های بی سیم رشد کرده است. موضوع مشترک در این سلاح‌های پیشرفته نیاز به توان الکتریکی است. برای بهبود بازده الکترونیکی تکنولوژی‌های در حال گسترش توان همواره از عوامل محدود کننده به شمار می‌رود. در میدان‌های جنگ باتری‌های هسته‌ای سبک، قابل حمل و دارای طول عمر زیاد به کار می‌رود.

۱-۳-۴ هواپیماهای بدون سرنشین

هواپیماهای بدون سرنشین کاربردهای نظامی و غیر نظامی بسیاری دارند. این هواپیماها به وسیله یک خلبان بر روی زمین و به صورت خودگردان بر اساس طرح‌های پرواز از پیش تعیین شده یا با سیستم‌های خودکار متحرک پیچیده پرواز می‌کنند. هواپیماهای بدون سرنشین نسبتاً سنگین و نیازمند توان‌های قابل توجهی می‌باشند. مفهوم وسایل نقلیه هوایی میکرو (ماو^۲) و نانو (ناو^۳) باعث کاهش در اندازه و جرم پهپادها می‌شود، بنابراین کاهش توان مورد نیاز به اندازه جنبه‌های دیگر سودمند می‌باشد.

ماوها وسایل نقلیه هوایی کوچکی هستند که حدود ۱۰ کیلومتر را در مدت زمان ۱ ساعت و بیشترین جرم

۱- GPS

۲- MAV

۳- NAV

در حال پرواز ۵ کیلوگرم طی می کنند.

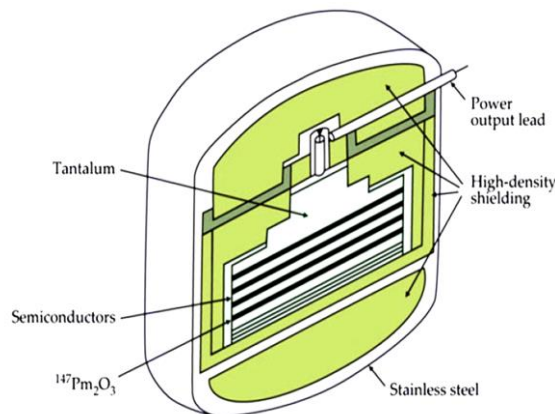
ناوها در محدوده ۱ کیلومتر و ارتفاع ۱۰۰ متر و در مدت زمان ۱ ساعت و بیشترین جرم در حال پرواز ۲۵ گرم عمل می کنند.

با وزن سبک و یک منبع توان طولانی مدت زمان عملیاتی وسایل نقلیه هوایی میکرو و نانو به طور قابل توجهی افزایش می یابد. یک ناو ۱۵ گرمی حدود ۵۸۵ میلی وات برای توان پروانه هواپیما، ۵۰۰ میلی وات برای توان دستگاه ارتباطی آراف^۱ و ۵۰ میلی وات برای توان یک دوربین نیاز دارد. که مجموع توان باتری به کار رفته در آن باید ۱/۱۳۵ وات باشد. باتری های هسته ای در مقایسه با باتری های لیتیومی به علت چگالی انرژی بالا یک منبع تغذیه ایده آل می باشند.

۱-۳-۵ دستگاه تنظیم کننده ضربان قلب

در قرن حاضر، حدود ۴۰ درصد از مرگ انسان ها، مربوط به بیماری های قلبی عروقی است. آمار بالای مبتلایان به این بیماری باعث شده هر ساله بیش از ۲۵۰ هزار ضربان ساز قلب دائمی کاشته شود و در واقع ضربان سازها به یک ابزار درمانی تبدیل شده اند؛ اما با مشاهده رشد روز افزون استفاده از ضربان سازها، پایین آمدن سن بیماران نیازمند به ضربان ساز و کوتاه بودن عمر باتری های متداول که بین ۵ تا ۱۰ سال است می توان به لزوم پرداختن به این موضوع پی برد. در این وسیله نیاز به داشتن منبع توانی با چگالی انرژی بالا که برای مدت طولانی ولتاژ و جریان پایداری داشته باشد و در ضمن حجم کمی را نیز اشغال کند، ضروری است. ضربان سازهای مصنوعی قلب، سیستم های الکترونیکی ای هستند که سعی در جبران نارسایی های قلبی دارند و عملکرد ذاتی قلب را تقلید می کنند. در واقع وقتی قلب عملکرد طبیعی خود را از دست می دهد یا دامنه پتانسیل های تحریک عضلات قلبی ضعیف می شود، این وسیله به طور خودکار به تقویت سیستم الکتریکی ذاتی قلب پرداخته یا در مواردی ضربان قلب نامنظم یا کند را تنظیم می کند. چندین باتری هسته ای در سال ۱۹۷۰ برای دستگاه تنظیم کننده ضربان قلب ساخته شد. مبدل های

ترموالکتريک و بتاولتائیک به عنوان باتری در این دستگاه‌ها قرار گرفت. باتری‌های هسته‌ای ترموالکتريک کوچک برای کاهش اتلاف گرما و محافظت در برابر تابش‌ها نیاز به عایق حرارتی دارند. سلول بتاولتائیک McDonnell-Douglas 400 حاوی لایه‌های انباشته از سیلیکون است و منبع متصل به آن ^{147}Pm می‌باشد. در طراحی این باتری دو طرف لایه ^{147}Pm به کار رفته و توان الکتریکی آن ۴۰۰ میکرووات و بازده آن ۴٪ می‌باشد. از سلول بتاولتائیک ۴۰۰ در آزمایش‌های بالینی دستگاه تنظیم کننده ضربان قلب استفاده شد [۲۵].



شکل ۱-۶. باتری هسته‌ای ترموالکتريک به کار رفته در دستگاه تنظیم کننده ضربان قلب [۲۵].

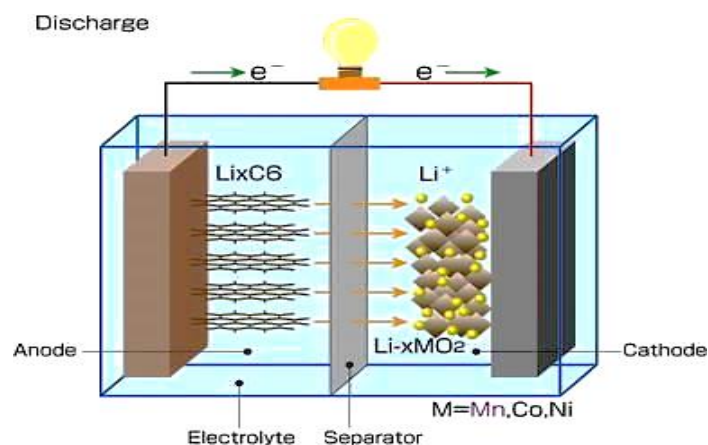
۴-۱ مزیت استفاده از باتری‌های هسته‌ای در ممز

در ساخت سیستم‌های میکروالکترومکانیکی (MEMS) در بیست سال اخیر گام‌های بلندی برداشته شده است. واکنش‌های شیمیایی متداول در فناوری باتری‌ها، نمی‌تواند اندازه کوچک و چگالی انرژی بالا برای استفاده در ممز را برآورده سازد [۲۶]. همچنین چندین شکل انرژی مانند سوخت خورشیدی، باتری‌های لیتیومی، سوخت فسیلی و غیره در نظر گرفته شده است، اما هیچ یک به اندازه باتری‌های هسته‌ای گزینه مناسبی از نظر چگالی توان و طول عمر بالا نمی‌باشند.

۱-۴-۱ باتری‌های لیتیومی

در میان تمام فناوری باتری‌هایی مانند باتری‌های سرب-اسید، روی-هوا و باتری‌های قلیایی، در حال حاضر

باتری‌های لیتیومی بهترین عملکرد را در چگالی انرژی دارند. اخیراً به علت کاهش اندازه و توان مورد نیاز در دستگاه‌های الکترونیکی، محققان باتری‌های لیتیومی را به صورت فیلم نازک ساخته اند. در فیلم نازک لیتیومی فیلم نازک آند، الکترولیت و کاتد بکار رفته است و در مجموع باتری ضخامتی در حدود ده میکرومتر دارد. برای به دست آوردن ظرفیت بالاتر، توان خروجی بیشتر و چرخه‌ی شارژ بالاتر تحقیق بر روی آند، الکترولیت و کاتد صورت می‌گیرد. در این باتری‌ها به علت وزن بالای مواد سازنده، چگالی انرژی عملی بسیار پایین و کمتر از ۵۰٪ است. ابعاد کوچک میکرو الکترونیک‌ها باعث کاهش چگالی انرژی باتری می‌شود. در دستگاه‌های قابل حمل و گره‌های حسگر منبع توانی با چگالی انرژی بالا مطلوب است. یکی دیگر از محدودیت‌های باتری‌های لیتیومی محدوده دمای کاری آنهاست که خارج از آن محدوده باتری عملکرد مناسبی نخواهد داشت.



شکل ۱-۷. طرحی از یک باتری لیتیومی

۱-۴-۲ سلول خورشیدی

سلول‌های خورشیدی بر اساس جذب نور یک انتخاب دیگر به عنوان منبع تغذیه‌های مناسب برای قطعات ممز می‌باشند. در پروژه Smart Dust که اقدام به سنجش کاملاً مستقل و سیستم عامل‌های ارتباطی شده است، سلول‌های خورشیدی در حجم میلی‌متر مکعب به عنوان منبع تغذیه به کار رفته اند. مزیت استفاده از سلول‌های خورشیدی این است که به سوختی نیاز ندارند و بازده تبدیل نسبتاً بالایی دارند. نقطه ضعف

آشکار سلول‌های خورشیدی در وابستگی عملکرد آن‌ها به شدت نور قابل دستیابی است. نقطه ضعف دیگر آن‌ها وابستگی توان خروجی سلول‌ها به مساحت است که محدودیتی برای کوچک کردن اندازه آن‌ها می‌باشد. علاوه بر این به علت محدود شدن ولتاژ مدار باز یک سلول واحد، به کار بردن چندین سلول سری در برنامه‌های کاربردی ضروری است.

چگالی انرژی در باتری‌های رادیوایزوتوپی بر اساس انرژی جنبشی ذرات باردار ساطع شده محاسبه می‌شود. رادیوایزوتوپ‌ها به وضوح چگالی انرژی بیشتری نسبت به سایر منابع انرژی دارند. علاوه بر این چگالی انرژی بالا، رادیوایزوتوپ‌ها را قادر می‌سازد، اندازه‌ای مطابق با دستگاه‌های میکرو داشته باشد.

در میکرو سلول‌های سوختی، حجم سوخت ذخیره شده چگونگی عملکرد منبع تغذیه را تعیین می‌کند و شارژ مجدد سوخت ممکن است نیاز به عملیات طولانی مدتی داشته باشد. در باتری‌های هسته‌ای عملکرد طولانی مدت با انتخاب رادیوایزوتوپ‌هایی با نیمه عمر بالا دست یافتنی است. مزیت دیگر باتری‌های هسته‌ای این است که فروپاشی هسته‌ای تحت تأثیر درجه حرارت و فشار قرار نمی‌گیرد و عملکرد منبع تغذیه تحت شرایط دمایی و فشار شدید امکان پذیر است. برای دستیابی به توان خروجی بالاتر، باید از مقدار زیادی رادیوایزوتوپ استفاده کرد. با وجود این مزیت‌ها، نیاز به تجزیه و تحلیل ایمنی از نقطه نظر مواجهه با عوامل خطر ساز برای محیط زیست وجود دارد [۱۸ و ۲۴].

۱-۵ رنج ولتاژ مورد استفاده در ادوات MEMS

طبق بررسی‌ها صورت گرفته در مورد ولتاژ ۳۳ قطعه ممز مشتمل بر سنسورهای شتاب سنج، فشار سنج، سویچ‌های نوری، سنسورهای اینرسی، سویچ‌های چند حالتی رنج ولتاژ مورد استفاده در این ادوات بین ۰/۳ ولت تا ۲۶/۴ ولت بوده است.

۱-۶ رنج ولتاژ تولید شده توسط باتری‌های هسته‌ای

۱-۶-۱ باتری‌های هسته‌ای شارژ مستقیم

طبق بررسی‌های صورت گرفته در مورد ولتاژ ۲۴ باتری هسته‌ای شارژ مستقیم رنج خروجی این باتری بین

۰/۳ کیلوولت تا ۳۶۵ کیلوولت بوده است؛ که با استفاده از یک ماده رادیواکتیو گسیلنده‌ی آلفا و یا بتا که اغلب عناصر ^{۸۵}Kr ، ^{۲۲۶}Ra ، ^{۹۰}Sr ، ^{۱۴۷}Pm و ^{۲۱۰}Po هستند، طراحی شده‌اند.

۱-۶-۲ باتری‌های هسته‌ای بتاولتائیک

طبق بررسی‌های صورت گرفته در مورد ولتاژ ۱۷ باتری بتاولتائیک رنج خروجی این باتری بین ۰/۲ ولت تا ۴/۹ ولت بوده است؛ که با استفاده از یک ماده مؤثر نیمرسانا اغلب Si یا Ge و همچنین ماده رادیواکتیو Kr ^{۸۵}Ni ، ^{۶۳}Sr ، ^{۹۰}Pm و ^{۳۳}P طراحی شده‌اند.

به کار بردن میکرو باتری‌های هسته‌ای در قطعات ممز به علت پردازش و عملکرد بالای آن‌ها، تحت شرایط ویژه می‌باشد. این باتری‌ها به عنوان منبع توان مناسب قطعات ممز، به اندازه کافی کوچک ساخته شده و در درون ممز قرار می‌گیرند. مناسب‌ترین گزینه در بین باتری‌های هسته‌ای، رادیوایزوتوپ‌های بتا گسیل هستند. زیرا نیمه هادی‌ها نسبت به تابش ذرات آلفا بسیار آسیب پذیرند.

در این پژوهش هدف شبیه‌سازی باتری هسته‌ای شارژ مستقیم و باتری هسته‌ای بتاولتائیک با استفاده از یک ماده نیمرسانا در جهت افزایش جریان اتصال کوتاه و در نتیجه افزایش بازده باتری است. در گام بعد نیز مقایسه دو باتری شبیه‌سازی شده مطرح می‌شود. طراحی باتری هسته‌ای به گونه انجام می‌شود که رنج ولتاژ و جریان آن مناسب استفاده در ادوات ممز باشد.

در فصل دوم مبانی نظری استفاده شده در باتری‌های هسته‌ای ارائه می‌شود. فصل سوم آشنایی مختصری با کد استفاده شده در شبیه‌سازی‌های این پژوهش است و در ادامه عوامل مؤثر در طراحی چشمه را بررسی می‌نماید. فصل چهارم ابتدا به مراحل بهینه‌سازی باتری هسته‌ای شارژ مستقیم می‌پردازد و سپس عوامل مؤثر در طراحی و بهینه‌سازی باتری هسته‌ای بتاولتائیک را بیان می‌کند و در انتها به تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها و مقایسه‌ی دو باتری هسته‌ای طراحی شده می‌پردازد. فصل پنجم به بررسی عواملی می‌پردازد که بر جریان اتصال کوتاه و بازده کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم تأثیر چندانی ندارند. مرور کلی نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نیز در فصل ششم ارائه می‌شود.

فصل دوم

مبانی نظری استفاده شده در باتری های هسته ای

۲-۱ مقدمه

در فیزیک، تابش به معنای انتقال یا انتشار انرژی امواج یا ذرات از طریق فضا یا محیط مادی می‌باشد. یک ذره باردار به هنگام حرکت در ماده از طریق نیروهای کولنی با الکترون‌های منفی و هسته‌های مثبت اتم‌های سازنده ماده برهم‌کنش می‌کند. بر اثر این برهم‌کنش‌ها ذره باردار به طور پیوسته انرژی از دست می‌دهد و پس از طی مسافت معینی موسوم به برد، متوقف می‌شود. برد به انرژی ذره و ماده‌ای که ذره از آن عبور می‌کند، وابسته است. اما احتمال غیر صفری وجود دارد که یک نوترون یا گاما بدون هیچ برهم‌کنشی از هر ضخامت ماده بگذرد. در نتیجه هیچ برد محدودی را برای نوترون و گاما نمی‌توان تعریف کرد.

۲-۲ اتلاف انرژی توسط ذرات باردار

ذرات باردار هنگام عبور از ماده، بر اثر عوامل زیر انرژی از دست می‌دهند.

۱- **برهم‌کنش‌های کولنی با الکترون‌ها و هسته‌ها:** ذره بارداری که در ماده مشخصی حرکت می‌کند، ممکن است با الکترون‌های اتمی و هسته‌های اتم برهم‌کنش کند. برخوردهای الکترونی مهم‌تر از برخوردهای هسته‌ای است. نیروی کولنی ممکن است باعث انتقال انرژی از ذره متحرک به الکترون مقید اتمی می‌شود و باعث یونش و برانگیزش آن می‌شود. هر اتم دارای تعداد زیادی الکترون با پتانسیل‌های یونش و برانگیزش متفاوت است. هر برهم‌کنش، احتمال رخداد و اتلاف انرژی خاص خود را دارد. از آنجایی که محاسبه اتلاف انرژی با بررسی تک تک برخوردها غیر ممکن و غیر ضروری است، لذا اتلاف انرژی میانگین در واحد طول بررسی و با معادلات زیر بیان می‌شود [۲۷].

توان توقف ناشی از یونش - برانگیزش برای پروتون، آلفا و دوترون

(۱-۲)

$$\frac{dE}{dx} \left(\frac{\text{Mev}}{m} \right) = 4\pi r_0^2 z^2 \frac{mc^2}{\beta^2} NZ \left[\ln \left(\frac{2mc^2}{I} \beta^2 \right) - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right]$$

توان توقف ناشی از یونش - برانگیزش برای الکترون

$$\frac{dE}{dx} \left(\frac{\text{Mev}}{m} \right) = 4\pi r_0^2 z^2 \frac{mc^2}{\beta^2} NZ \left\{ \ln \left(\frac{\beta \gamma \sqrt{\gamma-1} mc^2}{I} \right) + \frac{1}{2\gamma^2} \left[\frac{(\gamma-1)^2}{8} + 1 - (2\gamma^2 + 2\gamma - 1) + \right. \right.$$

$$\ln 2 \} \quad (2-2)$$

توان توقف ناشی از یونش - برانگیزش برای پوزیترون

$$\frac{dE}{dx} \left(\frac{Mev}{m} \right) = 4\pi r_0^2 z^2 \frac{mc^2}{\beta^2} NZ \left\{ \ln \left(\frac{\beta\gamma\sqrt{\gamma-1} mc^2}{I} \right) - \frac{\beta^2}{24} \left[\frac{10}{(1+\gamma)^2} + \frac{4}{(1+\gamma)^3} \right] + \ln 2 \right\} \quad (3-2)$$

در فرمول‌های فوق $r_0 = e^2 / mc^2$ شعاع کلاسیک الکترون، $mc^2 = 0.511$ انرژی جرم سکون الکترون، N تعداد اتم‌ها برای ماده‌ای که ذره در آن حرکت می‌کند، Z عدد اتمی ماده، z بار ذره فرودی و I پتانسیل برانگیزش متوسط ماده می‌باشد.

۲- گسیل تابش‌های الکترومغناطیسی (تابش ترمزی): هر ذره باردار که شتاب بگیرد یا شتاب خود را از دست بدهد بخشی از انرژی جنبشی‌اش را از طریق گسیل تابش الکترومغناطیسی از دست می‌دهد. این تابش، به تابش ترمزی معروف است. تابش ترمزی تک انرژی نیست، بلکه از فوتون‌هایی با انرژی‌هایی از صفر تا یک مقدار بیشینه‌ای برابر با انرژی جنبشی ذره تشکیل شده است. محاسبه اتلاف انرژی ناشی از گسیل تابش ترمزی پیچیده است. در این جا تنها یک معادله تقریبی برای الکترون و پوزیترون بیان می‌شود، زیرا اتلاف انرژی ناشی از تابش فقط برای این ذرات اهمیت دارد که به شکل زیر است [۲۸].

$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{rad}} = \frac{Z T (\text{Mev})}{750} \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{ion}} \quad (4-2)$$

۳- برهم‌کنش‌های هسته‌ای: این برهم‌کنش‌ها زمانی رخ می‌دهند که ذره‌ی باردار دقیقاً به هسته برخورد کند.

۴- گسیل تابش چرنکوف: تابش چرنکوف، تابش الکترومغناطیس مرئی است که وقتی ذرات باردار در یک محیط با سرعتی بیش‌تر از سرعت نور در آن محیط حرکت کنند، ایجاد می‌شود. (که در این پژوهش

برهمکنش از جنس چرنکوف داریم)

۲-۳ برد الکترون

ذره بارداری که درون یک ماده معین حرکت می‌کند، انرژی جنبشی خود را بر اثر برهم‌کنش با الکترون‌ها و هسته‌های آن ماده از دست می‌دهد. ضخامت از ماده که ذره در آن متوقف می‌شود برد ذره نامیده می‌شود. برد الکترون به وسیله فرمول نیمه تجربی تاباتا-ایتو-اکا که برای گستره انرژی ۰/۳ تا ۳۰ MeV به کار می‌رود، محاسبه می‌شود، که به صورت زیر است.

$$R \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right) = a_1 \left\{ \frac{\ln[1 + a_2(\gamma - 1)]}{a_2} - \frac{a_3(\gamma - 1)}{1 + a_4(\gamma - 1)^{a_5}} \right\} \quad (۵-۲)$$

$$a_1 = \frac{2.335 A}{Z^{1.209}}$$

$$a_4 = 1.468 - (1.180 \times 10^{-2} Z)$$

$$a_2 = 1.78 \times 10^{-4} Z$$

$$a_5 = \frac{1.232}{Z^{0.109}}$$

$$a_3 = 0.9891 - (3.01 \times 10^{-4} Z)$$

$$\gamma = \frac{T + mc^2}{mc^2}$$

۲-۴ تراگیل ذرات بتا

ذرات بتا دارای طیف پیوسته‌ای از انرژی هستند که از صفر تا انرژی جنبشی $E_{\max}$ بیشینه گسترش دارد. تعداد ذرات بتا $N(t)$ که از ضخامت t تراگیل می‌شوند به صورت تقریبی به شکل زیر هستند.

$$N(t) = N_0 e^{-\mu t} \quad (۶-۲)$$

در معادله فوق μ ضریب ثابت جذب جرمی است و به طور تجربی تعیین می‌شود که به صورت تابعی از انرژی بیشینه بتا عبارت است از [۲۹]:

$$\mu = 1.7 E_{\max}^{-1.14} \quad (۷-۲)$$

در بالا $E_{\max}$ انرژی جنبشی بیشینه ذره بتا گسیل شونده از چشمه بر حسب MeV است. [76]

۲-۵ برهم کنش پرتوهای گاما و ایکس با ماده

پرتوهای گاما در گذارهای هسته‌ای گسیل می‌شوند، اما پرتوهای ایکس تابش‌های الکترومغناطیسی هستند که عموماً در اثر گذارهای اتمی مانند یونش و برانگیزش ایجاد می‌شوند. هر دوی این پرتوها دارای جرم سکون و بار صفر بوده و با سرعت نور حرکت می‌کنند، بنابراین می‌توان نام مشترک فوتون را برای تمامی آن‌ها در نظر گرفت. برهم کنش‌های ممکن فوتون‌ها زیاد است ولی سه مورد از برهم کنش‌های غالب عبارت‌اند از:

۱- **اثر فوتوالکتریک:** اثر فوتوالکتریک برهم کنشی است که بین فوتون و الکترون اتمی صورت می‌گیرد و در اثر آن فوتون ناپدید شده و یکی از الکترون‌های اتمی به صورت یک الکترون آزاد به نام فوتوالکترون به بیرون رانده می‌شود. [۳۰].

۲- **پراکندگی کامپتون:** برخورد فوتون و یک الکترون آزاد پراکندگی کامپتون نامیده می‌شود. پس از پراکندگی فوتون ناپدید نمی‌شود، بلکه راستای حرکت و انرژی آن تغییر می‌یابد. [۳۱].

۳- **تولید زوج:** برهم کنش بین فوتون و هسته، تولید زوج نامیده می‌شود. بر اثر این برهم کنش، فوتون ناپدید و یک زوج الکترون-پوزیترون ایجاد می‌شود. [۳۲].

۲-۶ آشکارسازی انرژی مواد رادیواکتیو با استفاده از مواد حالت جامد

آشکارسازهای نیم‌رسانا وسیله‌های حالت جامدی هستند که تقریباً مانند اتاقک‌های یونش کار می‌کنند. حامل‌های بار در نیم‌رساناها، بر خلاف شمارنده‌های گازی الکترون و یون نیستند، بلکه از الکترون و حفره تشکیل می‌شوند. در حال حاضر کارسازترین آشکارسازهای نیم‌رسانا از سیلیسیوم و ژرمانیوم ساخته می‌شوند. با این همه از مواد دیگری مثل، CdTe و HgI₂ استفاده شده است که تا حدودی موفقیت آمیز بوده‌اند. مهمترین برتری آشکارسازهای نیم‌رسانا در مقایسه با دیگر شمارنده‌های تابشی، قدرت تفکیک انرژی بالای آن‌هاست. یعنی آن‌ها توانایی تفکیک انرژی ذرات از میان یک طیف چند-انرژی را دارند. برتری‌های دیگر

آشکارسازهای نیمرسانا عبارتند از: پاسخ خطی (ارتفاع تپ بر حسب انرژی ذره) در گستره وسیعی از انرژی، بازده بالاتر به ازای یک اندازه معین به علت چگالی بالای ماده‌ی جامدی که در ساختمان آن به کار می‌رود، امکان ساختن آن‌ها به شکل‌های هندسی خاص، زمان خیزش سریع تپ، توانایی کار در خلاء و حساس نبودن به میدان مغناطیسی می‌باشد. سرشت‌های آشکارسازهای نیمرسانا نه تنها به نوع ماده‌ی به کار رفته بلکه به نحوه شکل دهی و آماده سازی نیمرسانا نیز بستگی دارد. نوع، اندازه، شکل و نحوه آماده سازی بلور نقش تعیین کننده‌ای در عملکرد آشکارسازهای نیمرسانا دارد.

جامدها بر اساس رسانندگی الکتریکی به رسانا، نارسانا و نیمرسانا تقسیم می‌شوند. اگر قطعه‌ای از جسم جامد در میدان الکتریکی قرار گیرد، شارش یا عدم شارش جریان در آن بستگی به نوع ماده دارد. اگر جریان شارش کند، جسم رسانا است. اگر در دماهای پایین جریان صفر اما در دماهای بالاتر بزرگتر از صفر باشد جسم نیمرسانا است. اگر در تمام دماها جریان صفر باشد، جسم نارسانا است. در یک اتم آزاد الکترون‌ها فقط مجاز به حضور در حالت‌های انرژی گسسته می‌باشند. در جامدها حالت‌های انرژی پهن گشته و به نوارهای انرژی تبدیل می‌شوند [۳۳].

۲-۶-۱ دسته بندی مواد از نظر رسانش

۲-۶-۱-۱. نارسانا

در نارساناها بالاترین نوار مجاز موسوم به نوار ظرفیت کاملاً پر است. نوار مجاز بعدی موسوم به نوار رسانش کاملاً خالی می‌باشد. گاف بین نوار ظرفیت و نوار رسانش چنان پهن است که تعداد حالت‌های پر شده در نوار رسانش همیشه صفر است. هیچ میدان الکتریکی یا افزایش دمایی نمی‌تواند انرژی کافی برای الکترون به منظور پیمودن گاف و رسیدن به نوار رسانش را فراهم نماید. از این رو در نارساناها، الکترون هرگز به نوار رسانش نمی‌رسد و جریان الکتریکی تولید نمی‌کند.

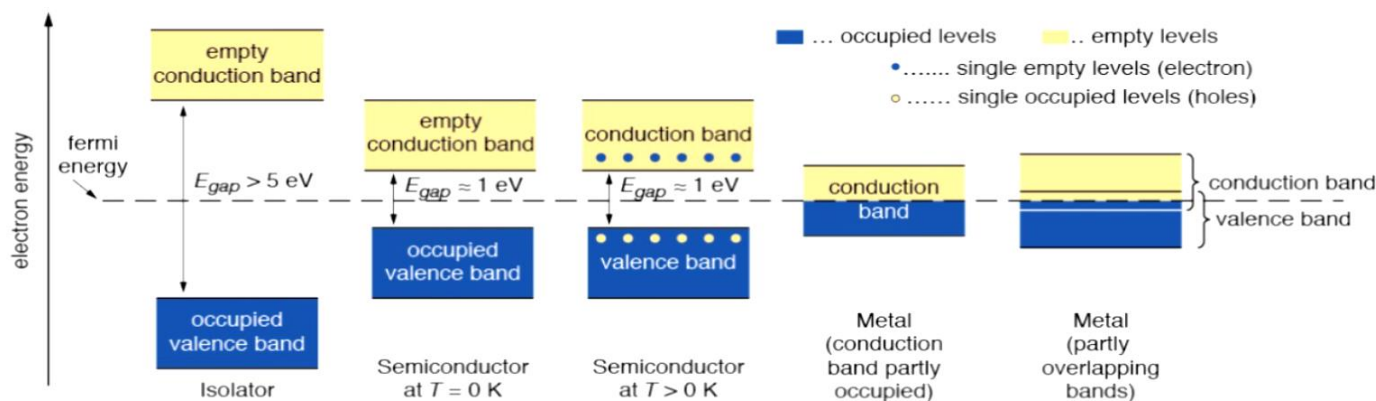
۲-۶-۱-۲. رسانا

در رساناها بخشی از نوار رسانش پر است. الکترونی که در نزدیکی قسمت بالایی بخش پر شده این نوار قرار دارد قادر خواهد بود که تحت تأثیر یک میدان الکتریکی غیر صفر به بخش خالی برود. بنابراین به علت نبود گاف ممنوع هیچ آستانه‌ای برای شدت میدان الکتریکی وجود ندارد که الکترون‌ها نتوانند در میدان کمتر از آن حرکت نمایند. حرکت حامل‌های بار و در نتیجه رسانندگی همیشه به ازای هر میدان الکتریکی، هر چند ناچیز امکان پذیر است.

۲-۶-۱-۳. نیمرسانا

در نیمرساناها، نوار ظرفیت پر و نوار رسانش خالی می‌باشد. اما گاف انرژی بین نوار ظرفیت و نوار رسانش کوچک است. در دماهای خیلی پایین، نزدیک $T = 0$ ، رسانندگی نیمرساناها صفر است و تصویر نوار انرژی مشابه نارساها است. ولی وقتی دما بالا می‌رود، توزیع فرمی تعدادی الکترون را به درون نوار رسانش می‌آورد و رسانندگی افزایش می‌یابد. یعنی با افزایش دما، بعضی از الکترون‌ها انرژی کافی برای رفتن به نوار رسانش را پیدا می‌کنند. در آن جا، این الکترون‌ها درست مثل الکترون‌های اجسام رسانا تحت تأثیر یک میدان الکتریکی حرکت خواهند کرد. وقتی یک الکترون به نوار رسانش می‌رود یک جای خالی در نوار ظرفیت به نام حفره را به جای می‌گذارد. حفره به معنای غیاب یک الکترون است. حفره‌ها به صورت ذرات با بار مثبت تلقی می‌شوند و حرکت آن‌ها در خلاف جهت الکترون‌ها می‌باشد. نقش حفره‌ها در رسانندگی درست همانند الکترون‌ها است. در نیمرساناهای خالص و از نظر الکتریکی خنثی، تعداد الکترون‌ها و حفره‌ها برابر است. افزایش دما تنها راه انرژی دادن به الکترون نیست. جذب تابش یا برخورد با یک ذره باردار پر انرژی ممکن است همان اثر را تولید کند. مقدار گاف انرژی در نیمرساناها ثابت نیست و با دما تغییر می‌کند. در سیلیسیوم و ژرمانیوم گاف انرژی نخست با کاهش دما به طور خطی افزایش می‌یابد، اما در دماهای خیلی پایین مقدار آن تقریباً ثابت باقی می‌ماند. مقدار انرژی میانگین مورد نیاز برای تولید یک زوج الکترون-حفره تغییر مشابهی را با دما دنبال می‌کند.

در شکل زیر نوارهای انرژی به ترتیب از راست به چپ برای اجسام رسانا، نیمرسانا و نارسانا نشان داده شده است.



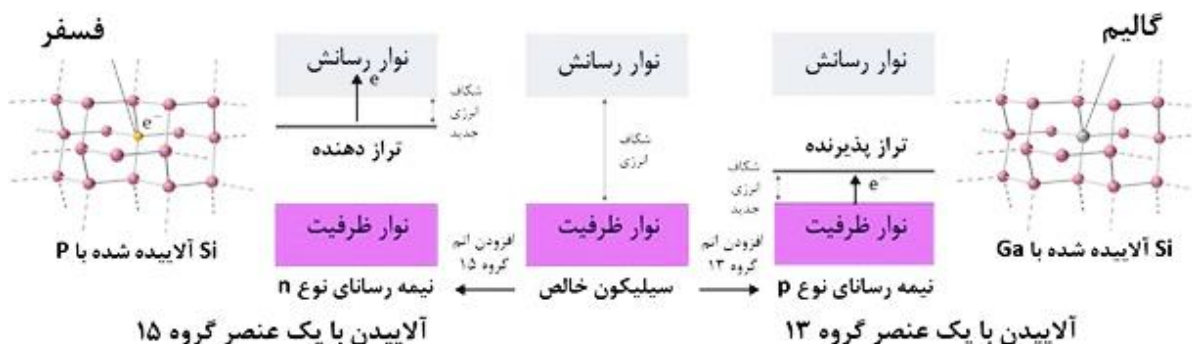
شکل ۲-۱. از راست به چپ نوارهای انرژی در اجسام رسانا، نیمرسانا و نارسانا

۲-۷ نیمرساناهای ذاتی و غیر ذاتی

ویژگی‌های یک نیمرسانای خالص در صورتی که ناخالصی‌هایی وارد آن شوند تغییر می‌کنند. با ورود ناخالصی‌ها، حالت‌های جدیدی به وجود می‌آیند و نیمرسانا صاحب الکترون‌ها یا حفره‌های بیشتری می‌شود، که رسانندگی جسم را افزایش می‌دهند. در واقع هیچ نیمرسانای خالصی وجود ندارد. همه مواد شامل مقداری ناخالصی هستند و به این دلیل ناخالص یا غیر ذاتی خوانده می‌شوند. در بیشتر موارد، مقدار کنترل شده‌ای از ناخالصی‌ها را با فرآیندی موسوم به آلاش، به نیمرسانا تزریق می‌کنند. این فرایند رسانندگی ماده را چندین مرتبه افزایش می‌دهد.

سیلیسیوم دارای چهار الکترون ظرفیت است و در یک بلور خالص هر الکترون ظرفیت یک پیوند کووالانسی با یک اتم همسایه تشکیل می‌دهد. اگر در ساختار بلور Si به جای یکی از اتم‌ها، اتم آرسنیک که دارای پنج الکترون ظرفیت است، جایگزین شود، چهار عدد از الکترون‌های ظرفیت آن با چهار اتم همسایه Si تشکیل پیوندهای کووالانسی می‌دهند اما الکترون پنجم به هیچ پیوند شیمیایی‌ای تعلق ندارد. این الکترون

به گونه ضعیفی مقید است و فقط مقدار کمی انرژی برای آزاد کردن آن، یعنی فرستادن آن به نوار رسانش لازم است. طبق مدل نواری انرژی، الکترون پنجم متعلق به یک حالت انرژی است که خیلی نزدیک به نوار رسانش قرار دارد. این حالت‌ها را حالت‌های بخشنده می‌نامند و اتم‌های ناخالصی که آن‌ها را می‌آفرینند اتم‌های بخشنده خوانده می‌شوند. نیمرسانایی که دارای اتم‌های بخشنده است تعداد زیادی الکترون و تعداد کمی حفره دارد و چون رسانندگی آن‌ها ناشی از الکترون‌هاست، آن‌ها را نیمرسانای نوع n می‌نامند. چنانچه ناخالصی یک اتم سه ظرفیتی مانند گالیوم باشد، به این ترتیب فقط سه پیوند Si برقرار می‌شود. الکترون‌های اتم‌های دیگر Si می‌توانند خود را به اتم گالیوم بچسبانند و یک حفره بر جای گذارند. اتم گالیوم پس از پذیرفتن الکترون اضافی شبیه یک یون منفی رفتار می‌کند. در واقع حضور اتم گالیوم نزدیک به نوار ظرفیت حالت‌های جدیدی می‌آفریند که این حالت‌ها را پذیرنده و ناخالصی را اتم پذیرنده می‌نامند [۳۴]. در اینجا حامل‌های بار اساساً مثبت هستند و این نیمرسانا را نیمرسانای نوع p می‌نامند. شکل زیر آرایش نیمرساناها توسط اتم‌های پنج ظرفیتی و سه ظرفیتی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱. آرایش نیمرساناها با اتم‌های پنج ظرفیتی و سه ظرفیتی

از آن جا که افزودن ناخالصی، حالت‌های جدیدی را به وجود می‌آورد که حرکت حامل‌ها را آسان می‌کند، می‌توان انتظار داشت که رسانندگی یک نیمرسانا با غلظت ناخالصی افزایش می‌یابد. نیمرسانای نوع n دارای یک حامل الکترونی اضافی است، در حالی که نیمرسانای p حفره‌ی اضافی دارد. اگر یک نیمرسانای نوع p

و یک نیمرسانای نوع n به یکدیگر پیوندند، الکترون‌ها و حفره‌ها به دو دلیل حرکت می‌کنند:

- الکترون‌ها و حفره‌ها، هر دو از نواحی با غلظت بالا به نواحی با غلظت پایین حرکت خواهند کرد، که همان پدیده پخش است.

- تحت اثر یک میدان الکتریکی، الکترون‌ها و حفره‌ها در خلاف جهت هم حرکت خواهند کرد. اگر پتانسیل خارجی که قطب مثبت آن به ناحیه n و قطب منفی آن به ناحیه p بسته شود، پتانسیل دو سر پیوند بیشتر از حالت بدون منبع خارجی می‌شود. این پتانسیل پیش ولت وارون خوانده می‌شود که حرکت الکترون و حفره‌ها را مشکل‌تر می‌کند. کاربست یک پتانسیل منفی در طرف n و پتانسیل مثبت در طرف p اثری مخالف خواهد داشت. که این پتانسیل را پیش ولت رو به جلو می‌نامند.

۲-۸ پیوند $p-n$ به عنوان یک آشکارساز

اساس کار یک آشکارساز نیمرسانا مبتنی بر ویژگی‌های $p-n$ با پیش ولت وارون بنا شده است. تابشی که بر پیوند فرود می‌آید بر اثر گذر از آن زوج‌های الکترون-حفره تولید می‌کند. الکترون‌ها و حفره‌ها تحت اثر میدان الکتریکی جاروب می‌شوند و با الکترونیک مناسب، بار جمع‌آوری شده یک تپ تولید می‌کند که می‌توان آن را ثبت کرد. عملکرد آشکارسازهای نیمرسانا به ناحیه تهی پیوند $p-n$ که در آن میدان الکتریکی وجود دارد بستگی دارد. در آشکارسازهای یونشی یا نیمرسانا همیشه هدف این است که تمام بارهای تولید شده از ذره ورودی جمع‌آوری شوند. این هدف با کاربست یک میدان الکتریکی در آشکارساز عملی می‌شود، به گونه‌ای که هیچ باز ترکیبی از الکترون‌ها و یون‌ها پیش از جمع‌آوری آن‌ها صورت نمی‌گیرد. در آشکارسازهای نیمرسانا حتی اگر باز ترکیب صفر باشد، بعضی از حامل‌های بار ممکن است در دام‌های بلوری از قبیل کاستی‌های شبکه‌ای، مکان‌های تهی و در رفتگی‌ها از دست بروند. تابش فرودی ناراستی‌هایی در بلور ایجاد می‌کند که کارایی آن را خراب کرده و در نتیجه طول عمر آن را کاهش می‌دهند. همچنین ظرفیت پیوند $p-n$ بر قدرت تفکیک انرژی آشکارساز تأثیر می‌گذارد.

خلاصه اینکه ماده‌ای که برای ساختن یک آشکارساز به کار می‌رود باید ویژگی‌های معینی داشته باشد که

مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از:

- مقاومت ویژه بالا: این عامل اصلی است، زیرا در غیر این صورت جریان تحت تأثیر میدان الکتریکی شارش خواهد یافت و بار تولید شده از ذرات منجر به تپی خواهد شد که ممکن است تحت الشعاع جریان دائمی قرار گیرد.
- تحرک بالای حامل‌ها: الکترون‌ها و حفره‌ها باید بتوانند به سرعت حرکت کنند و پیش از اینکه شانس بازترکیب یا گیر افتادن را پیدا کنند گردآوری شوند. این در تعارض با مورد فوق است زیرا در اجسام با مقاومت ویژه بالا، تحرک حامل‌ها پایین است. ثابت شده است که مواد نیمرسانایی که با ناخاصی آلائیده شده‌اند دارای ترکیب مناسب مقاومت ویژه و تحرک حامل‌ها هستند.
- توانایی تحمل میدان‌های الکتریکی قوی: این ویژگی در ارتباط با مورد ۱ است. اهمیت آن ناشی از این واقعیت است که هر چه میدان قوی‌تر باشد، جمع‌آوری بار سریع‌تر و بهتر خواهد شد. همچنین، وقتی میدان الکتریکی افزایش می‌یابد عمق ناحیه حساس برای برخی آشکارسازها زیاد می‌شود.
- شبکه بلوری کامل: علاوه بر ناخالصی‌هایی که از بیرون تزریق می‌شود، ماده آشکارساز نیمرسانا باید متشکل از یک شبکه بلوری کامل بدون هیچگونه ناراستی، اتم حذف شده یا اتم‌های میانی باشد. هر یک از این ناراستی‌ها ممکن است به صورت یک دام برای بارهای در حال حرکت عمل کنند. آشکارسازهای نیمرسانایی که در حال حاضر وجود دارند به علت ماده‌ای که در ساختمان آن‌ها به کار می‌رود یا روشی که ماده در ساختمان آن‌ها به کار می‌رود یا روشی که ماده از طریق آن آماده می‌شود با یکدیگر متفاوت‌اند.
- آشکارسازهای نیمرسانا شامل: آشکارسازهای سد سطحی، آشکارسازهای پیوند-بخشیده، آشکارسازهای سیلیسیومی لیتیوم دار Ge(Si) ، آشکارسازهای کلا تهی شده، آشکارسازهای ژرمانیومی فوق خالص (HPGe) ، آشکارسازهای CdTe و HgI_2 می‌باشند.

۹-۲ آسیب شناسی ناشی از تابش بر نیمرساناها

یک کریستال خالی از نقص، اساس کار برای بهترین عملکرد در یک نیمرسانا می‌باشد. اما هنگامی که نیمرسانا در معرض تابش قرار می‌گیرد، آسیب می‌بیند. دلیل اصلی آسیب ناشی از تابش به علت برخورد ذرات فرودی با اتم‌های نیمرسانا می‌باشد. ذره باردار پر انرژی ضمن عبور از کریستال، علاوه بر ایجاد زوج الکترون-حفره ممکن است در بعضی نقاط کریستال، نقص و کاستی ایجاد کند. این حالت زمانی ایجاد می‌شود که ذره برای جابجایی یک اتم در شبکه کریستال و قرار دادن آن در موقعیت بین شبکه‌ای، به اندازه کافی انرژی در اختیار بگذارد. جای خالی که به علت جابجا شدن یک اتم ایجاد می‌شود به ناراستی فرنکل یا زوج فرنکل معروف است. کاستی‌های بلوری به عنوان مراکز گیرنده الکترون و حفره بر عملکرد نیمرساناها تأثیر منفی دارند. هرگاه ذرات فرودی الکترون یا فوتون باشند، در مقایسه با ذرات باردار دیگر و نوترون آسیب تابشی ناچیزی وارد می‌کنند [۳۵ و ۳۶].

فصل سوم

بررسی عوامل مؤثر در طراحی چشمه با استفاده از کد $MCNTPX$

۱-۳ مقدمه

بهینه‌سازی یک باتری هسته‌ای از اهمیت بالایی برخوردار است. در این راستا اولین قدم، بهینه‌سازی چشمه‌ی بکار رفته در ساختمان این باتری‌ها است. به عبارت دیگر یکی از راه‌های افزایش بازده یک باتری هسته‌ای، افزایش بازده چشمه‌ی رادیواکتیو به کار رفته در آن می‌باشد.

لذا در این فصل بعد از آشنایی با شبیه‌سازی به روش مونت کارلو کد MCNPX، ابتدا ویژگی‌های یک رادیوایزوتوپ کاربردی و مناسب برای استفاده در ساختمان یک باتری هسته‌ای شرح داده شد و سپس با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو کد MCNPX تأثیر عواملی از قبیل تغییرات ارتفاع و شعاع چشمه، تغییرات ارتفاع و شعاع زیرلایه و همچنین تغییرات ارتفاع و شعاع پوشش سطح جانبی بر روی بازده چشمه بررسی شد.

۲-۳ ویژگی‌های کد MCNP

از این کد می‌توان برای ترابرد نوترون، الکترون، فوتون و در نظر گرفتن پدیده‌هایی همچون تولید زوج، نابودی زوج، پراکندگی همدوس^۱ و ناهمدوس^۲ و تابش ترمزی استفاده نمود. از جمله ویژگی‌های دیگر این کد امکان رسم هندسه‌ی ورودی و خروجی مسئله و روش‌های کاهش واریانس می‌باشد [۳۷].

۳-۳ فایل ورودی

برای استفاده از این کد باید یک فایل ورودی تعریف نمود. این فایل ورودی از سه قسمت اصلی به نام‌های کارت سلول، کارت سطوح و کارت داده تشکیل می‌شود که در ادامه به توضیح هر کدام از آن‌ها پرداخته می‌شود [۳۸].

۱- Coherent

۲- Incoherent

۳-۳-۱ کارت سلول

در کد فضای مسئله شامل تعداد متعددی سلول است. هر کدام از این سلول‌ها توسط شماره سلول، شماره ماده و چگالی ماده‌ی تشکیل‌دهنده‌ی آن و شماره سطوحی که آن سلول را تشکیل داده‌اند تعیین می‌شوند. هر سلول به صورت زیر تعریف می‌شود.

j m d g p

j = شماره سلول

m = شماره ماده‌ای تشکیل‌دهنده‌ی سلول

d = چگالی ماده

g = سطوح تشکیل‌دهنده‌ی سلول

p = پارامترهای مشخص‌کننده‌ی سلول

۳-۳-۲ کارت سطوح

کارت سطوح^۱ برای مشخص نمودن سلول‌های تعریف شده در مسئله می‌باشد. حداکثر تعداد سطوحی که در فایل ورودی تعریف می‌شوند ۹۹۹۹۹ عدد می‌باشد. هر سطح به صورت زیر تعریف می‌شود.

J a list

J = شماره سطح

a = مشخص‌کننده‌ی نوع سطح (تخت، کروی، استوانه‌ای و ...)

List = پارامترهای مشخص‌کننده‌ی سطح (بعد، شعاع و ... برحسب سانتی متر) [۳۹].

۳-۳-۳ کارت داده

آخرین بخش از فایل ورودی، کارت داده^۱ است.

این کارت شامل بخش‌های مختلفی از قبیل چشمه‌ی پرتو، نوع مواد، روش‌های کاهش واریانس و تالی مناسب مسئله می‌باشد.

۳-۴ فایل خروجی کد MCNP

فایل خروجی شامل فایل ورودی، فرآیند انجام محاسبات آماری و نتایج حاصل از محاسبات است.

این اطلاعات در قالب ۳۲ جدول در فایل خروجی نمایش داده می‌شوند [۴۰].

۳-۵ تخمین خطا

نتایج ثبت شده در فایل خروجی به ازای یک ذره خروجی از چشمه می‌باشند. خطای نسبی R متناسب

است با $\frac{1}{\sqrt{N}}$ که N تعداد تاریخچه است [۴۱].

جدول (۳-۱) راهنمای خطای نسبی است.

جدول ۳-۱. راهنمای تفسیر خطای مونت کارلو [۴۱].

کیفیت تالی	R
بی اعتبار	۱ - ۰/۵
تا حدود ناچیزی معتبر	۰/۵ - ۰/۲
به اعتبار آن باید شک کرد	۰/۲ - ۰/۱
عموماً معتبر	> ۰/۱
معمولاً برای آشکارسازهای نقطه‌ای معتبر است	> ۰/۰۵

۳-۶ روش‌های کاهش خطا

اگر در خروجی برنامه خطای تالی مورد استفاده، در بازه قابل قبول نباشد، می‌توان برای کم کردن خطا

پهنای انرژی را زیاد کرد، زیرا هرچه پهنای بازه بیش‌تر باشد تعداد ذرات در آن بازه بیش‌تر شده و بنابراین خطا در آن بازه کم می‌شود. منظور از پهنای انرژی در واقع همان بازه بندی انرژی است. چنانچه بازه انرژی گسترده‌تر شود تعداد ذراتی که انرژی آن‌ها شامل بازه مورد نظر می‌شود بیش‌تر شده و در نتیجه خطای آن بازه کم‌تر می‌شود. همچنین می‌توان زمان اجرای برنامه و یا تعداد تاریخچه‌های مورد استفاده را بر اساس رابطه‌ای که بین خطای نسبی و تاریخچه‌ی ذرات وجود دارد، افزایش داد.

۳-۷ انتخاب یک رادیوایزوتوپ مناسب برای استفاده در باتری هسته‌ای

یکی از مواردی که در طراحی یک باتری هسته‌ای نقش مهمی ایفا می‌کند، انتخاب یک رادیوایزوتوپ مناسب و کاربردی است.

از جمله عواملی که در انتخاب منبع رادیواکتیو در نظر گرفته می‌شود، توان خروجی باتری با توجه به زمینه‌ی کاربردی آن است. سایر عوامل از قبیل هزینه، در دسترس بودن و حفاظ گذاری هم مورد توجه قرار می‌گیرند [۴۲].

میزان حفاظ مورد نیاز برای یک باتری هسته‌ای توسط مقدار انرژی واپاشی رادیوایزوتوپ به کار رفته در ساختمان آن تعیین می‌شود. همچنین طول عمری که ما از باتری انتظار داریم باید با نیمه عمر رادیوایزوتوپ انتخابی مطابقت داشته باشد.

یک مورد که خاص این رساله می‌بایست به آن توجه شود ابعاد باتری و چشمه است. با توجه به اینکه این باتری برای ادوات ممز طراحی می‌شود می‌بایست حداکثر راندمان را در کنار حداقل ابعاد (در حدود میکرومتر) داشت. لذا در محاسبات این دو پرامتر به صورت همزمان بررسی و ایده آل ترین حالت لحاظ خواهد شد.

در ساخت باتری‌های هسته‌ای از گذشته تا به امروز، رادیوایزوتوپ‌های بتازا نقش بیش‌تری داشته‌اند. جدول (۳-۲) نشان دهنده‌ی خواص و ویژگی برخی از رادیوایزوتوپ‌های بتازای مورد استفاده در باتری‌های هسته‌ای می‌باشد.

در برخی آزمایش ها از ذره آلفا به عنوان چشمه استفاده شده است. به طور مثال در آزمایش battele national با استفاده از گسیلنده‌ی هسته‌ای آلفا باتری هسته‌ای شارژ مستقیم با ولتاژ ۱۰۰ Kv ساخته شد، اما به علت استفاده از گسیلنده آلفا با دو بار و انرژی زیاد، منجر به تولید بیش از حد مجاز الکترون ثانویه با انرژی بالا شد. این ذره موجب اختلال در سیستم و آسیب رسان به نیمه رسانای استفاده شده در باتری و باعث جابجا شدن یک اتم و ایجاد نقصان فرنکل خواهد شد. برای متوقف کردن الکترون های ثانویه مازاد در باتری آلفا ولتاییک نیازمند به یک توری با پتانسیل منفی بوده که این از معایب استفاده از گسیلنده ی آلفا در این نوع باتری است. زیرا به علت حضور توری با پتانسیل منفی به استفاده از یک مولد دیگر نیاز دارد و در نتیجه دیگر نمی توان آن را یک مولد مستقل نامید و در ابعاد کوچک طراحی کرد. این مش بندی با پتانسیل منفی باعث کاهش بازده باتری می شود.[43]

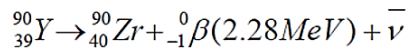
در میان رادیوایزوتوپ های مطرح شده در جدول (۲-۳) رادیوایزوتوپ ^{90}Sr دارای بیش ترین نیمه عمر است و مناسب ترین اکتیویته برای استفاده در باتری، متناسب با محدودیت های حجم باتری برای ادوات ممزاست و بنابراین برای انجام شبیه سازی ها در این پژوهش از ^{90}Sr استفاده شد.

جدول ۲-۳. ویژگی رادیوایزوتوپ های بتازا [۷۱ و ۷۲ و ۷۳ و ۴۴].

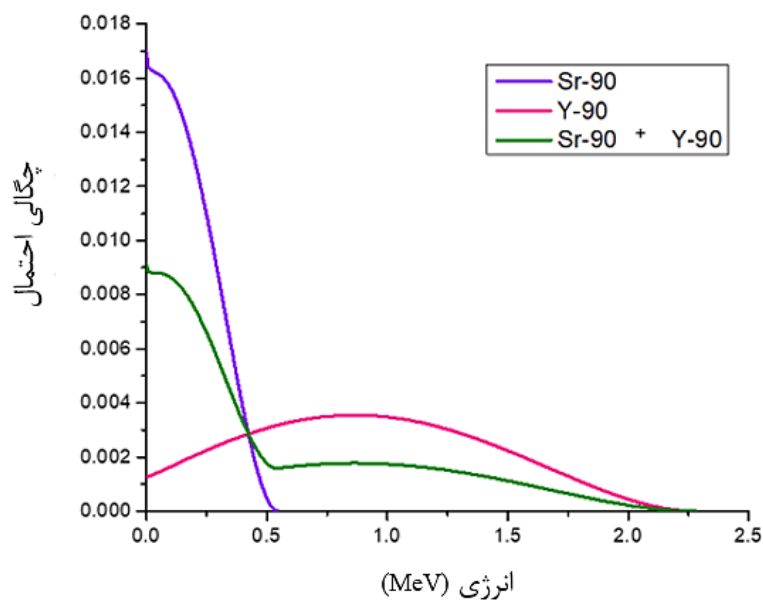
منبع رادیواکتیو	انرژی متوسط (keV)	حداکثر انرژی (keV)	اکتیویته (GBq/g)	نیمه عمر (سال)
^3H	۵/۷	۱۸/۶	۳۵۷۰۰۰	۱۲/۳
^{147}Pm	۷۳	۲۲۵	۳۴۳۳	۲/۶۲۴
^{90}Sr	۱۹۶	۵۴۶	۵۰۵۰	۲۸/۶
^{35}S	۵۳/۱	۱۶۷/۴۷	۱۵۹۸۰۸۹	۰/۲۳۹

نیمه عمر ^{90}Sr ۲۸/۶ سال است. پس از این مدت تحت واپاشی بتا با حداکثر انرژی ۰/۵۴۶ MeV به

^{90}Y تبدیل می‌شود. نیمه‌عمر ^{90}Y کوتاه و در حد ۶۴ ساعت است و با حداکثر انرژی ۲/۲۸ MeV به ^{90}Zr که پایدار است تبدیل می‌شود [۴۵].



شکل (۱-۳) نشان دهنده‌ی طیف انرژی بتای ^{90}Sr ، ^{90}Y و $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ می‌باشد.



شکل ۱-۳. طیف انرژی بتای ^{90}Sr ، ^{90}Y و $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$

در تمام مراحل شبیه‌سازی از طیف انرژی بتای $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ استفاده شد.

در شکل (۱-۳) طیف انرژی بتای ^{90}Sr ، ^{90}Y و $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ با استفاده از قاعده طلایی فرمی رابطه‌ی (۲)-

(۳)، و برنامه‌نویسی فرترن محاسبه شد.

$$\lambda(W)dW = \text{const}(W_0 - W)^2 \rho W F(Z, W) C(Z, W) dW \quad (2-3)$$

که هر کدام از پارامترهای این رابطه به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$W = \frac{E_\beta}{m_0 c^2} = 1 + \frac{T_e}{m_0 c^2} \quad (3-3)$$

$$W_0 = \frac{E_\beta^{\max}}{m_0 c^2} = 1 + \frac{T_e^{\max}}{m_0 c^2} \quad (4-3)$$

$$F(Z, W) = 4L(Z, W) \left(2R\sqrt{W^2 - 1} \right)^{2(\gamma-1)} e^{\pi\eta} \frac{|\Gamma(\gamma+i\eta)|^2}{|\Gamma(2\gamma+1)|^2} \quad (5-3)$$

$$\eta = \pm Z\alpha W / \sqrt{W^2 - 1} \quad (6-3)$$

$$\gamma = \sqrt{1 - (\alpha Z)^2} \quad (7-3)$$

$$L(Z, W) = 1 + \frac{13}{60} (\alpha Z)^2 - \frac{\alpha Z R W (41 - 26\gamma)}{15(2\gamma - 1)} - \frac{\alpha Z R \gamma (17 - 2\gamma)}{30W(2\gamma - 1)} \quad (8-3)$$

$$C(Z, W) = 1 + C_0 + C_1 W + C_2 W^2 \quad (9-3)$$

$$C_0 = -\frac{233}{630} (\alpha Z)^2 - \frac{(W_0 R)^2}{5} + \frac{2}{35} W_0 R \alpha Z \quad (10-3)$$

$$C_1 = -\frac{21}{35} R \alpha Z + \frac{4}{9} W_0 R^2 \quad (11-3)$$

$$C_2 = -\frac{4}{9} R^2 \quad (12-3)$$

۸-۳ بازده چشمه

بازده چشمه عبارت است از نسبت تعداد ذرات بتایی که از سطح چشمه گسیل می‌شوند به تعداد ذرات

بتایی که از کل چشمه گسیل می‌شوند.

تعداد ذرات بتای گسیل شده از سطح چشمه با تعداد ذرات بتای گسیل شده از کل چشمه متفاوت است.

این تفاوت ناشی از اثر خودجذبی چشمه و اثر زیرلایه است.

۳-۸-۱ اثر خود جذبی چشمه

برخی از ذرات بتایی که از درون چشمه گسیل می‌شوند تا قبل از رسیدن به سطح چشمه توسط خود چشمه متوقف می‌شوند، به این پدیده اثر خودجذبی چشمه می‌گویند. ضریب خود جذبی را با f_a نشان می‌دهند به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$f_a = \frac{\text{تعداد ذراتی که چشمه‌ی خود جاذب را ترک می‌کنند}}{\text{تعداد ذراتی که چشمه‌ی نا خود جاذب را ترک می‌کنند}} \quad (۳-۱۳)$$

با استفاده از موارد بیان شده و شبیه‌سازی توسط کد MCNPX ضریب خود جذبی چشمه‌ی ^{90}Sr محاسبه شد. این مقدار برابر با ۹۷/۹۶٪ می‌باشد. یعنی ۹۷/۹۶٪ از شار گسیل شده از چشمه خارج می‌شود.

۳-۸-۲ اثر زیر لایه

اثر زیر لایه در افزایش بازده چشمه نقش به سزایی دارد. زیر لایه در واقع سطحی است که چشمه بر روی آن سطح قرار می‌گیرد. هر چه این سطح میزان پس‌پراکندگی بالاتری داشته باشد، اثر زیر لایه بیش‌تر است و در نتیجه بازده چشمه بیش‌تر خواهد بود.

پس پراکندگی به معنای بازتاب یک ذره از سطح یک ماده پس از برخورد با آن است. ضریب پس پراکندگی را با f_b نشان می‌دهند و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$f_b = \frac{\text{تعداد ذرات خروجی از چشمه با زیر لایه}}{\text{تعداد ذرات خروجی از چشمه بدون زیر لایه}} \quad (۳-۱۴)$$

همچنین این ضریب به سه عامل انرژی جنبشی ذره (T)، عدد اتمی زیر لایه (Z) و ضخامت زیر لایه (b) وابسته است.

- انرژی جنبشی ذره: با استفاده از قانون سطح مقطع پراکندگی کلاسیک رادرفورد برای الکترون‌ها از هسته‌ی اتم‌های هدف در زاویه‌ی اصلی ϑ و زاویه‌ی فضایی دیفرانسیلی $d\omega$ در سیستم آزمایشگاه می‌توان نوشت:

$$d\sigma = \frac{z^2}{4} \left(\frac{e^2}{m_0 c^2} \right)^2 \left(\frac{1 - \beta^2}{\beta^4} \right) \frac{1}{\sin^4 \left(\frac{\vartheta}{2} \right)} d\omega \quad (۱۵-۳)$$

که؛

$$m_0 = \text{جرم سکون الکترون}$$

$$z = \text{عدد اتمی هدف}$$

$$\beta = \text{نسبت سرعت الکترون به سرعت نور}$$

افزایش انرژی جنبشی الکترون موجب کاهش سطح مقطع دیفرانسیلی پراکندگی ($d\sigma$) می‌شود. به این صورت که افزایش انرژی جنبشی الکترون موجب افزایش سرعت آن و در نتیجه افزایش β می‌شود و مطابق با رابطه‌ی (۱۵-۳)، با افزایش β سطح مقطع دیفرانسیلی پراکندگی کاهش می‌یابد. به عبارتی دیگر با افزایش انرژی جنبشی ذرات، احتمال پس پراکندگی کاهش می‌یابد [۴۶].

- **عدد اتمی زیرلایه:** برای یک ذره‌ی باردار سبک همانند الکترون هنگامی پس پراکندگی رخ می‌دهد که این ذره توسط اتم‌های جسم هدف منحرف شود. شتاب ناشی از نیرویی که هسته‌ی یک اتم بر الکترون فرودی وارد می‌شود به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$a = \frac{Ze^2}{r^2 m_e} \quad (۱۶-۳)$$

بر اساس رابطه‌ی (۱۶-۳)، چنانچه ذره‌ای در محیطی با عدد اتمی بالا حرکت کند شتاب آن بیش‌تر از زمانی است که در محیطی با عدد اتمی پایین حرکت کند، پس احتمال پس پراکندگی با افزایش عدد اتمی افزایش می‌یابد.

- **ضخامت زیرلایه:** از آنجایی که ذرات باردار درون ماده برد معینی را طی می‌کنند باید انتظار

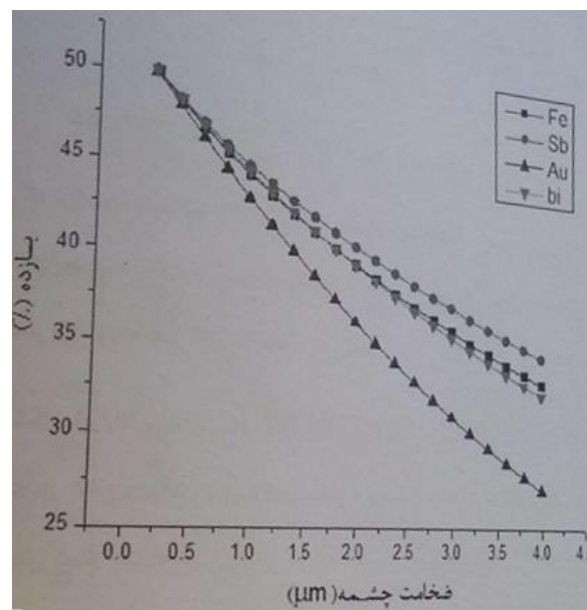
داشت که وقتی ضخامت زیر لایه به سمت صفر میل می‌کند، پس پراکندگی چشمه (f_b) به ۱ میل کند و با افزایش ضخامت زیر لایه پس پراکندگی به یک مقدار اشباع برسد. حد بالای این ضخامت هست:

$$b = \frac{R}{2} \quad (۱۷-۳)$$

R برد ذرات می‌باشد، اما نتایج تجربی نشان می‌دهند که اثر زیر لایه مطابق با رابطه‌ی (۱۸-۳) به حد اکثر مقدار خود می‌رسد.

$$b_s = b(\text{saturation}) \approx 0.2R \quad (۱۸-۳)$$

در بررسی انجام شده برای استفاده از آهن، طلا، بیسموت و آنتیموان به عنوان زیر لایه و پوشش سطح جانبی، ابتدا هر چهار ماده در ضخامت‌ها و شعاع‌های یکسان در نرم افزار MCNP برای چشمه مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند که در نهایت طلا به عنوان زیر لایه و آنتیموان به عنوان پوشش سطحی بیشترین راندمان را برای باتری حاصل کردند. [75]



شکل ۳-۲. مقایسه‌ی محاسبه بازده برای ضخامت‌های مختلف آهن، طلا، بیسموت و آنتیموان [75]

بنابراین با توجه به الکترون های ثانویه پر انرژی طلا در این پژوهش از طلا به عنوان زیرلایه استفاده شد. زیرا در میان مواد مناسب برای زیرلایه، طلا بیشترین مقدار پس پراکندگی و گسیل الکترون های ثانویه را دارد و این امر موجب افزایش بازده چشمه می شود.

همچنین در این پژوهش برای بررسی دقیق تر عوامل مؤثر بر بازده چشمه، نقش پوشش سطح جانبی چشمه هم لحاظ شد. برای پوشش با توجه به اینکه تعداد الکترون های ثانویه آنتیموان نسبت به سایر مواد بیشتر است، سطح جانبی از آنتیموان استفاده شد. علت انتخاب آنتیموان به عنوان پوشش سطح جانبی آن است که این عنصر دارای الکترون های ثانویه ی زیادی می باشد ولی انرژی آن ها در حد چند ده الکترون ولت است و اگر به عنوان زیرلایه به کار گرفته شود این الکترون های ایجاد شده نمی توانند از چشمه بگذرند. در نتیجه تأثیر مثبتی روی بازده چشمه نخواهد داشت. ولی انرژی الکترون های ثانویه طلا بیشتر است ولی تعداد آن کمتر است. بنابر این با توجه به برد الکترون های ثانویه طلا می توان به عنوان زیر لایه استفاده شود.

۹-۳ بررسی تأثیر عوامل مختلف بر بازده چشمه

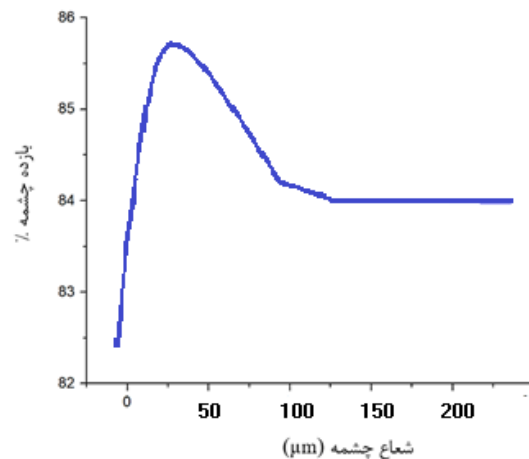
ابتدا یک چشمه استوانه ای شامل رادیوایزوتوپ ^{90}Sr ، زیرلایه طلا و پوشش سطح جانبی آنتیموان طراحی شد. نمای دو بعدی شکل هندسی چشمه ی مورد مطالعه در شکل (۳-۲) نشان داده شده است.



شکل ۳-۲. نمای دو بعدی شکل هندسی چشمه ی مورد مطالعه

سپس تأثیر شعاع و ارتفاع چشمه و همچنین تأثیر شعاع و ارتفاع زیرلایه و پوشش سطح جانبی بر روی بازده چشمه مورد بررسی قرار گرفت.

در مرحله‌ی اول شعاع چشمه از $1\text{ }\mu\text{m}$ تا $10000\text{ }\mu\text{m}$ گام به گام افزایش یافت و در هر مرحله بازده چشمه محاسبه شد. نتایج حاصل در شکل (۳-۳) قابل مشاهده است.

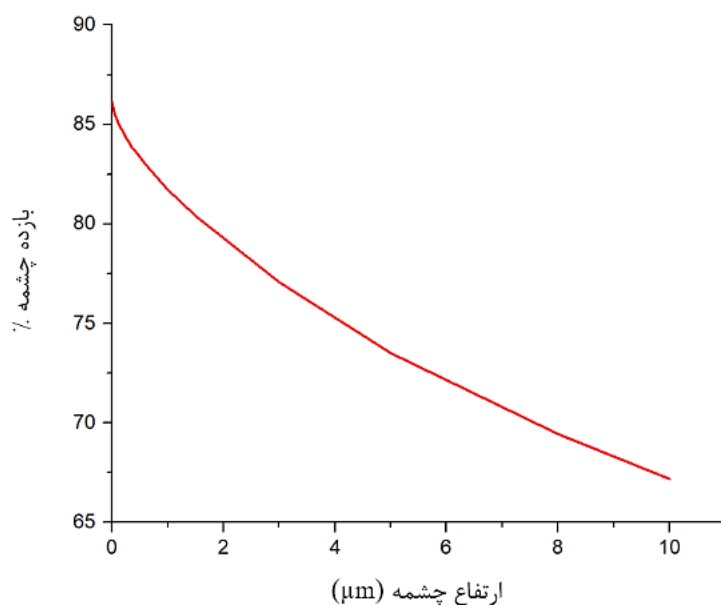


شکل ۳-۳. مقایسه‌ی بازده چشمه ^{90}Sr با شعاع‌های مختلف به همراه پوشش سطح جانبی آنتیموان و زیرلایه طلا.

با توجه به شکل (۳-۳) در شعاع $37.5\text{ }\mu\text{m}$ چشمه دارای بیش‌ترین بازده است، و پس از آن به دلیل افزایش اثر خود جذبی چشمه، بازده چشمه کاهش می‌یابد.

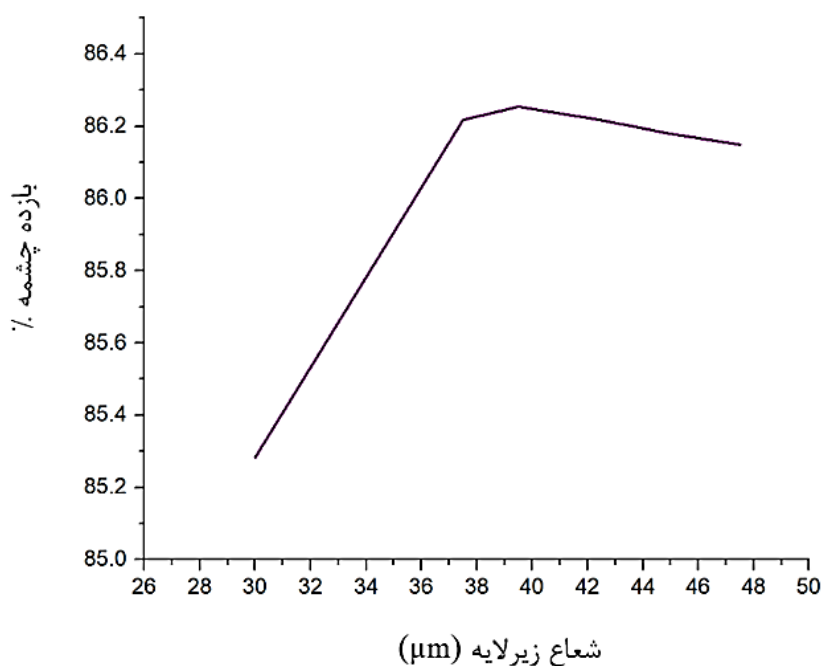
در مرحله‌ی بعد نیز برای بررسی اثر ارتفاع چشمه بر بازده چشمه، ابتدا مقدار $10\text{ }\mu\text{m}$ برای ارتفاع در نظر گرفته شد. سپس گام به گام از این ارتفاع کاسته شد و در هر مرحله بازده چشمه محاسبه شد.

شکل (۴-۳) نشان دهنده‌ی این بررسی می‌باشد.



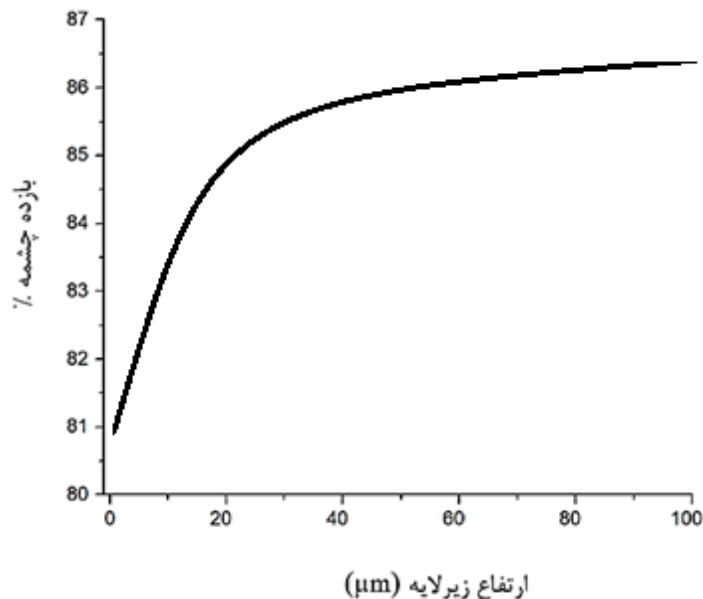
شکل ۳-۴. مقایسه‌ی بازده چشمه ^{90}Sr با ارتفاع‌های مختلف به همراه پوشش سطح جانبی آنتیموان و زیرلایه طلا.

بر اساس شکل (۳-۴) با کاهش ارتفاع چشمه از $10\text{ }\mu\text{m}$ تا $0.1\text{ }\mu\text{m}$ بازده چشمه از مقدار $67/19\%$ به مقدار 86% افزایش می‌یابد. به عبارتی دیگر کاهش ارتفاع چشمه موجب افزایش بازده آن می‌گردد. شکل‌های (۳-۵) و (۳-۶) به ترتیب نشان دهنده‌ی تأثیر شعاع و ارتفاع زیرلایه‌ی طلا بر بازده چشمه هستند.



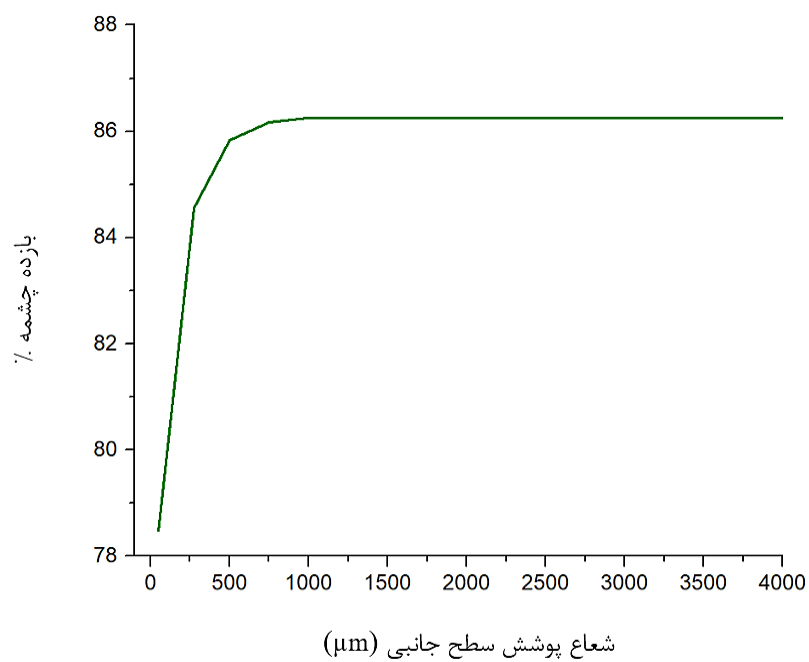
شکل ۳-۵. مقایسه‌ی بازده چشمه ^{90}Sr با شعاع‌های مختلف زیرلایه طلا.

بر اساس شکل (۳-۵) هنگامی که شعاع زیرلایه طلا $39/5 \mu\text{m}$ است بازده چشمه دارای بیش‌ترین مقدار (۸۶/۲۵٪) است و بعد از آن افزایش شعاع زیرلایه تأثیر چندانی بر بازده چشمه ندارد.

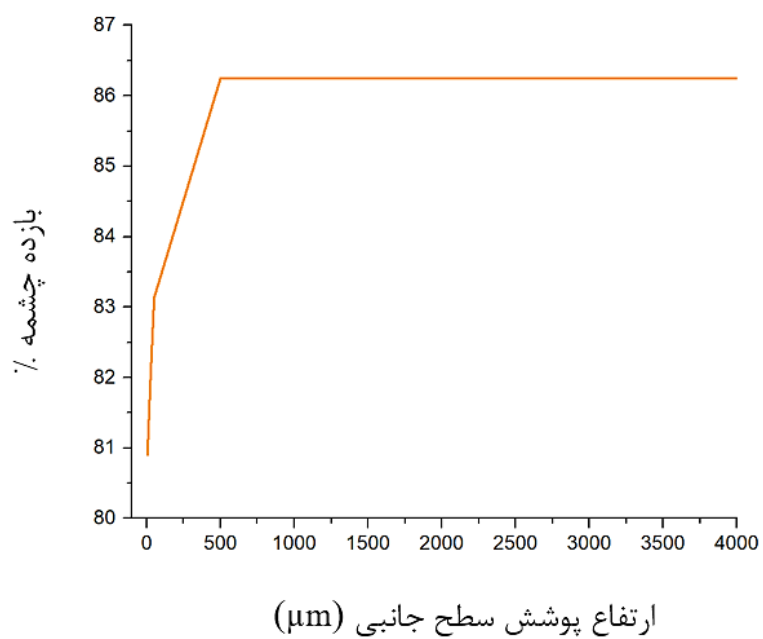


شکل ۳-۶. مقایسه‌ی بازده چشمه ^{90}Sr با ارتفاع‌های مختلف زیرلایه طلا.

با توجه به شکل (۳-۶) هنگامی که ارتفاع زیرلایه طلا حدود $50 \mu\text{m}$ است بازده چشمه دارای بیش‌ترین مقدار حدود (۸۶/۲۲٪) است و بعد از آن افزایش ارتفاع زیرلایه تأثیر چندانی بر بازده چشمه ندارد. در بررسی اثر شعاع و ارتفاع پوشش سطحی آنتیموان بر بازده چشمه مشخص شد زمانی که شعاع این پوشش $750 \mu\text{m}$ و ارتفاع آن $500 \mu\text{m}$ است، چشمه دارای بیش‌ترین بازده است. شکل‌های (۳-۷) و (۳-۸) به ترتیب نشان دهنده‌ی این نتایج هستند.



شکل ۳-۷. مقایسه‌ی بازده چشمه ^{90}Sr با شعاع‌های مختلف پوشش سطح جانبی آنتیموان.



شکل ۳-۸. مقایسه‌ی بازده چشمه ^{90}Sr با ارتفاع‌های مختلف پوشش سطح جانبی آنتیموان.

به طور کلی با توجه به نتایج حاصل از شکل‌های (۳-۳) تا (۳-۸)، هنگامی که چشمه استوانه‌ای ^{90}Sr دارای

شعاع قاعده $37/5 \mu\text{m}$ ، ارتفاع $0/01 \mu\text{m}$ ، شعاع زیرلایه $39/5 \mu\text{m}$ ، ارتفاع زیرلایه $50 \mu\text{m}$ ، شعاع پوشش سطح جانبی آنتیموان $750 \mu\text{m}$ و ارتفاع پوشش سطح جانبی آنتیموان $500 \mu\text{m}$ است بازده چشمه در بیشینه مقدار خود است.

مقدار اکتیویته ویژه چشمه ^{90}Sr برابر است با $10^2 \times 1/4 \text{ Ci/g}$ [۷۰]، برای محاسبه‌ی مقدار اکتیویته این چشمه با ابعاد گزارش شده در بالا، ابتدا جرم سلول چشمه را با استفاده از فایل خروجی کد MCNP تعیین نموده و سپس آن را در مقدار اکتیویته ویژه چشمه ^{90}Sr ضرب می‌کنم. در نهایت مقدار اکتیویته این چشمه با مشخصات گزارش شده $0/016328 \mu\text{Ci}$ است.

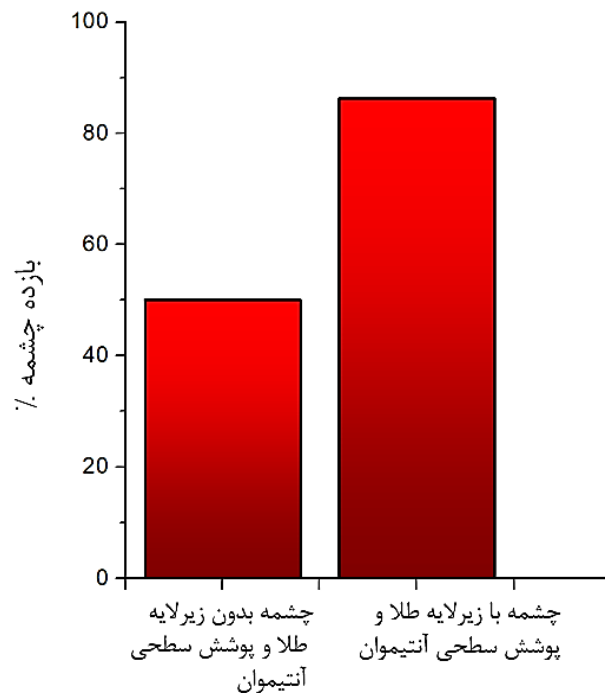
همچنین با توجه به نتایج حاصل از شکل‌های (۳-۳) تا (۳-۸)، مقادیری که در بالا برای شعاع و ارتفاع چشمه، شعاع و ارتفاع زیرلایه و شعاع و ارتفاع پوشش سطح جانبی ذکر شد مقادیر حدی هستند. به عبارتی دیگر می‌توان شعاع و ارتفاع چشمه، زیرلایه و پوشش سطح جانبی را از این مقادیر بیان شده بیش‌تر در نظر گرفت در حالی که بازده چشمه تغییر چندانی ندارد. به عنوان مثال اگر شعاع قاعده‌ی چشمه $3750 \mu\text{m}$ و ارتفاع آن $1 \mu\text{m}$ در نظر گرفته شود مقدار اکتیویته‌ی چشمه برابر مقدار $16/328 \text{ mCi}$ خواهد بود. این در حالی است که بازده چشمه نسبت به حالت قبل (شعاع قاعده‌ی چشمه $37/5 \mu\text{m}$ و ارتفاع آن $0/01 \mu\text{m}$) حدود $2/92\%$ کاهش یافته است. اما میزان اکتیویته‌ی چشمه 10^6 برابر شده است.

بنابراین ابتدا در فصل چهارم این پژوهش چشمه استوانه‌ای ^{90}Sr با شعاع قاعده $3750 \mu\text{m}$ ، ارتفاع $1 \mu\text{m}$ و مقدار اکتیویته‌ی $16/328 \text{ mCi}$ هم در طراحی باتری هسته‌ای شارژ مستقیم و هم در طراحی باتری هسته‌ای بتاولتائیک در نظر گرفته شد. سپس هر دو باتری بهینه شده و پارامترهای مربوط به آن‌ها با یکدیگر مقایسه شدند.

در فصل پنجم این پژوهش نیز چشمه استوانه‌ای ^{90}Sr با همان ابعاد اولیه به دست آمده از بهینه سازی یعنی شعاع قاعده $37/5 \mu\text{m}$ ، ارتفاع $0/01 \mu\text{m}$ و مقدار اکتیویته‌ی $0/016328 \mu\text{Ci}$ در طراحی باتری

هسته‌ای شارژ مستقیم در نظر گرفته شد و پارامترهای مربوط به آن مورد محاسبه قرار گرفت.

در مرحله‌ی بعد بازده چشمه محاسبه و با حالتی که چشمه بدون زیرلایه و پوشش سطح جانبی است مقایسه گردید. شکل (۹-۳) نشان دهنده‌ی این بررسی می‌باشد.



شکل ۹-۳. مقایسه‌ی بازده چشمه ^{90}Sr با پوشش سطح جانبی آنتیموان، زیرلایه طلا و بدون پوشش سطح جانبی آنتیموان و زیرلایه طلا.

همان‌طور که شکل (۹-۳) نشان می‌دهد، بازده چشمه با زیرلایه طلا و پوشش سطح جانبی آنتیموان ۸۶/۲۵٪ و بازده چشمه بدون زیرلایه طلا و پوشش سطح جانبی آنتیموان ۵۰/۰۷٪ است. تفاوت میان این دو حالت در حدود ۳۶/۱۸٪ می‌باشد. به عبارتی دیگر در این بررسی مشخص شد که بازده چشمه نسبت به حالت اولیه (بدون زیرلایه و پوشش سطح جانبی) ۳۶/۱۸٪ افزایش یافته است.

فصل چهارم

بهینه سازی باتری هسته ای شارژ مستقیم بر پایه ی چشمه رادیو اکتیو ^{90}Sr و مقایسه ی آن با باتری هسته ای

بتا و تکنیک $^{90}\text{Sr}-\text{Si}$

۴-۱ مقدمه

هدف این فصل بهینه‌سازی باتری هسته‌ای شارژ مستقیم بر پایه‌ی چشمه‌ی رادیواکتیو ^{90}Sr و مقایسه‌ی آن با باتری هسته‌ای بتاولتائیک Sr-Si 90 در حجم ثابت است. در این مقایسه حجم هر دو باتری، ابعاد چشمه و اکتیویته‌ی چشمه ثابت است.

معمولاً در بهینه‌سازی یک باتری هسته‌ای، ملاک بهینه‌سازی یکی از موارد زیر است:

- افزایش جریان اتصال کوتاه باتری هسته‌ای
- افزایش ولتاژ مدار باز باتری هسته‌ای
- افزایش بازده تبدیل انرژی باتری هسته‌ای

در اینجا ملاک بهینه‌سازی باتری هسته‌ای شارژ مستقیم، افزایش جریان اتصال کوتاه آن است. یکی از راه‌های افزایش جریان اتصال کوتاه یک باتری هسته‌ای شارژ مستقیم، افزایش بازده چشمه و بازده کلکتور به کار رفته در ساختمان آن باتری است.

بازده چشمه در فصل قبل مورد بررسی قرار گرفت. لذا همان چشمه‌ی بهینه شده در فصل قبل در ساختمان این باتری هسته‌ای شارژ مستقیم لحاظ شد. در مرحله بعد، تأثیر حالت‌های مختلف قرارگیری پوشش سطح جانبی، زیرلایه، چشمه و کلکتور بر بازده کلکتور بررسی شد.

در ادامه نیز تأثیر عواملی همچون جنس کلکتور، فاصله‌ی کلکتور از چشمه و ضخامت کلکتور بر بازده کلکتور و جریان اتصال کوتاه باتری مذکور بررسی شد.

چنانچه در این باتری هسته‌ای شارژ مستقیم در فاصله‌ی بین چشمه و کلکتور به جای خلاء ماده نیمرسانا قرار بگیرد، این باتری به یک باتری بتاولتائیک تبدیل می‌شود. بنابراین در این فصل ابتدا باتری هسته‌ای شارژ مستقیم بهینه شد. سپس در حجم ثابت، در فاصله‌ی بین چشمه و کلکتور ماده نیمرسانا در نظر گرفته شد و نتایج حاصل با هم مقایسه شدند.

۴-۲ باتری هسته‌ای شارژ مستقیم

همان‌طور که در فصل اول اشاره شد، این باتری از یک منبع رادیوایزوتوپ به عنوان الکتروود مرکزی و الکتروود خارجی دیگری که ذرات باردار ساطع شده از منبع را جمع آوری می‌کند، تشکیل شده است. این دو الکتروود با هم تشکیل یک خازن داده و فضای بین آن دو توسط خلاء یا مواد دی‌الکتریکی که ذرات باردار را جذب نکنند، پر می‌شود.

۴-۳ بازده کلکتور

بازده کلکتور را می‌توان نسبت جریان ذراتی که توسط کلکتور جذب می‌شوند به جریان ذراتی که به کلکتور برخورد می‌کنند بیان کرد.

در صورتی که تعداد ذرات برخوردی به کلکتور برابر با تعداد ذراتی باشد که توسط آن جذب می‌شوند، بازده کلکتور برابر با صد درصد خواهد بود، اما دو عامل پس پراکندگی و تابش الکترون‌های ثانویه سبب کاهش بازده کلکتور می‌شوند.

۴-۳-۱ پس پراکندگی الکترون‌ها

این پدیده به انرژی ذرات گسیلی از چشمه، عدد اتمی ماده هدف و ضخامت ماده هدف بستگی دارد، به طوری که هرچه انرژی ذرات گسیلی از چشمه کمتر و عدد اتمی هدف بزرگتر و ضخامت آن بیشتر باشد، پس پراکندگی بیشتر خواهد بود [۴۷ و ۴۸].

۴-۳-۲ الکترون‌های ثانویه

این الکترون‌ها بر اساس برخورد غیرالاستیک بین الکترون‌های فرودی اولیه با الکترون‌های باند رسانش و گاهی با الکترون‌های باند ظرفیت به دست می‌آیند [۴۹]. میزان انتشار الکترون ثانویه در مواد مختلف متفاوت است [۵۰]. بازده بر اساس بار انباشته شده روی الکتروودها و ولتاژ بین آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. ولتاژ با جمع شدن بار منفی بر روی الکتروود افزایش می‌یابد که این به مرور منجر به افزایش دافعه ذرات بتا ورودی می‌شود. اگر انرژی ذرات بتا که از میدان الکتریکی در حال افزایش بین الکتروودهای باتری برابر یا کمتر از آن میدان الکتریکی باشد، آن ذرات بتا نمی‌توانند به کلکتور برسند و بر اثر میدان الکتریکی حاصل،

از مسیر اولیه خود منحرف می‌شود. هر چشمه بتا توزیع انرژی خاص خود را دارد.

در این راستا برای کاهش پس پراکندگی باید از موادی که دارای عدد اتمی کوچکی هستند برای روکش کلکتور استفاده شود. مقدار الکترون‌های ثانویه نیز به انرژی ذرات گسیلی از چشمه بستگی دارد یعنی هر چه انرژی ذره بیشتر باشد الکترون‌های ثانویه‌ی بیشتری تولید می‌کند [۵۱].

۴-۴ بررسی عوامل مؤثر بر بازده کلکتور

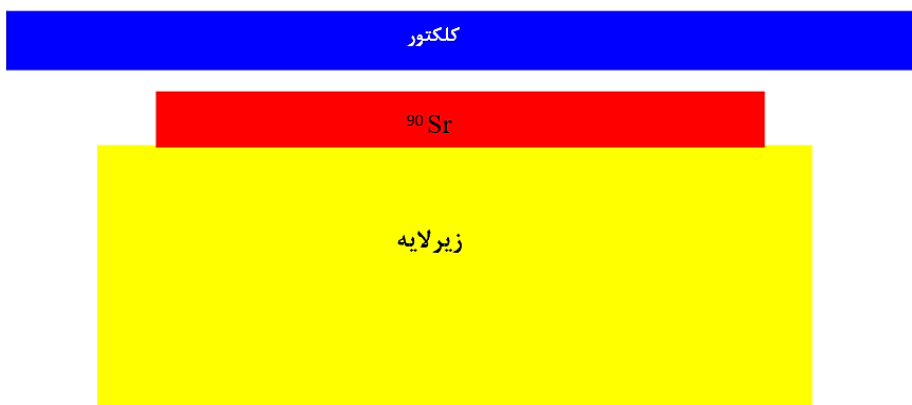
۴-۴-۱ اثر حالت‌های مختلف قرارگیری چشمه، زیرلایه، پوشش سطح جانبی و کلکتور نسبت به

هم بر بازده کلکتور

ابتدا در شکل‌های (۴-۱) تا (۴-۱۴)، موقعیت‌های مختلفی برای قرارگیری پوشش سطح جانبی، زیرلایه، چشمه و کلکتور نسبت به هم در نظر گرفته شد سپس در شکل (۴-۱۵) تأثیر هر حالت بر بازده کلکتور مورد بررسی قرار گرفت.



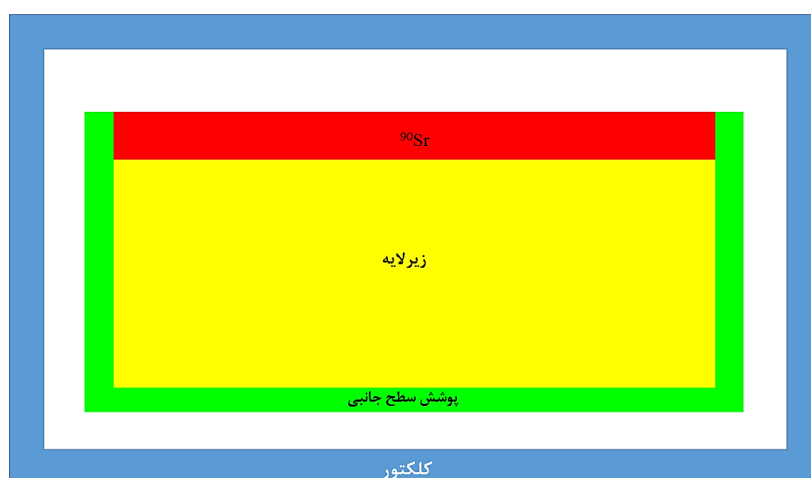
شکل ۴-۱. چشمه با زیرلایه و پوشش سطح جانبی در مقابل کلکتور صفحه‌ای



شکل ۴-۲. چشمه با زیرلایه در مقابل کلکتور صفحه‌ای



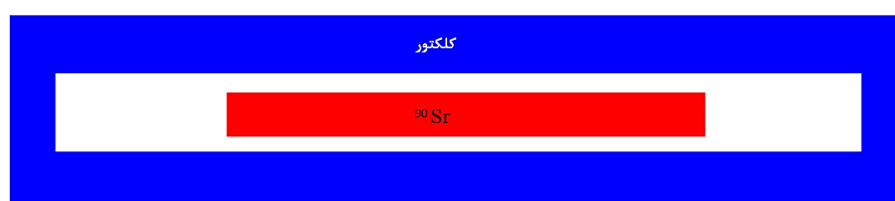
شکل ۴-۳. چشمه با زیرلایه و پوشش سطح جانبی در مقابل کلکتور صفحه‌ای



شکل ۴-۴. چشمه با زیرلایه و پوشش سطح جانبی داخل کلکتور استوانه‌ای



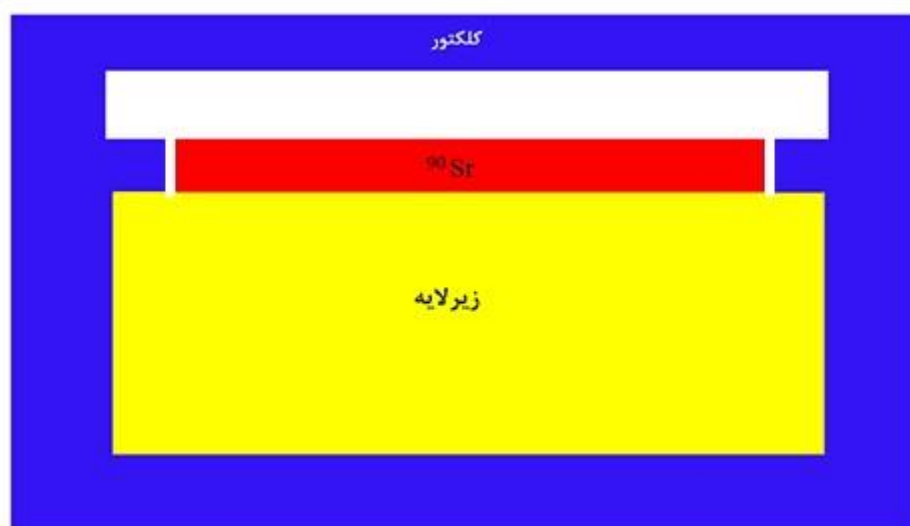
شکل ۴-۵. چشمه، بدون زیرلایه و پوشش سطح جانبی در مقابل کلکتور صفحه‌ای



شکل ۴-۶. چشمه، بدون زیرلایه و پوشش سطح جانبی داخل کلکتور استوانه‌ای



شکل ۴-۷. چشمه، بدون زیرلایه و پوشش سطح جانبی داخل کلکتور استوانه‌ای



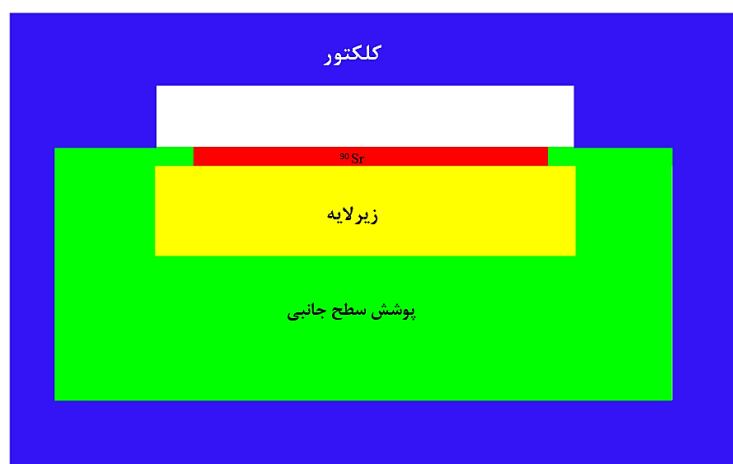
شکل ۴-۸. چشمه با زیرلایه و بدون پوشش سطح جانبی داخل کلکتور استوانه‌ای



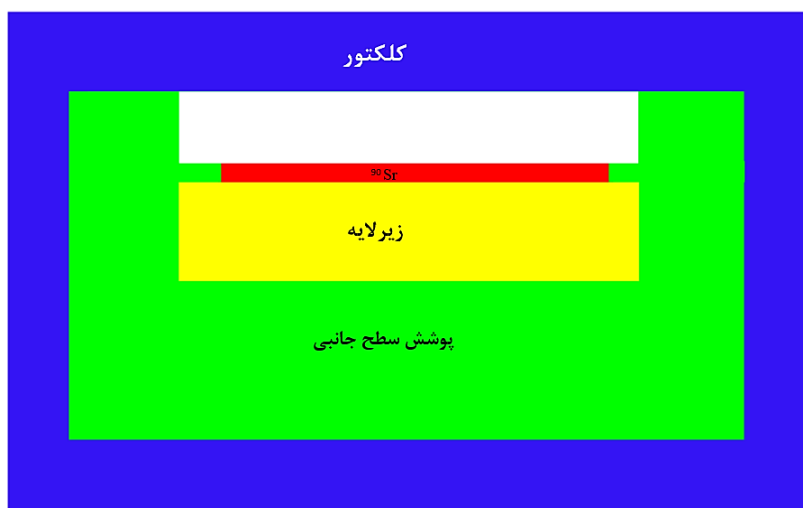
شکل ۴-۹. چشمه با زیرلایه و بدون پوشش سطح جانبی داخل کلکتور استوانه‌ای



شکل ۴-۱۰. چشمه با زیرلایه و پوشش سطح جانبی داخل کلکتور استوانه‌ای



شکل ۴-۱۱. چشمه با زیرلایه و پوشش سطح جانبی داخل کلکتور استوانه‌ای



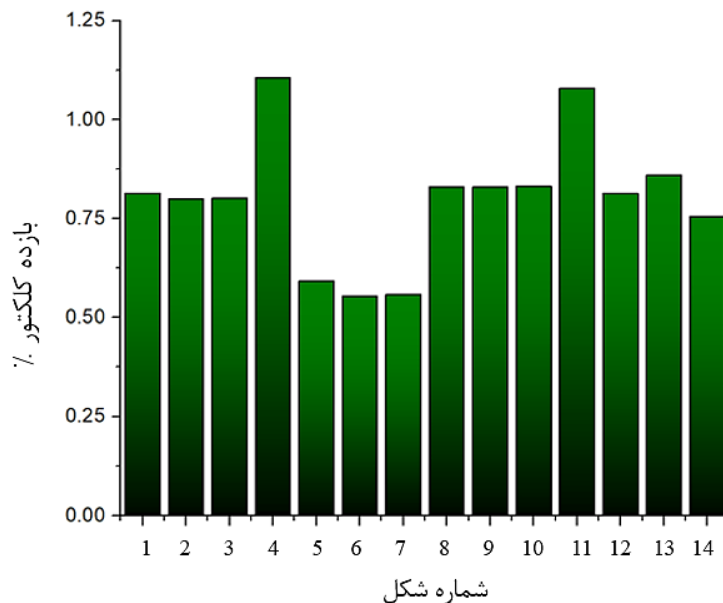
شکل ۴-۱۲. چشمه با زیرلایه و پوشش سطح جانبی داخل کلکتور استوانه‌ای



شکل ۴-۱۳. چشمه با زیرلایه و پوشش سطح جانبی داخل کلکتور استوانه‌ای



شکل ۴-۱۴. چشمه با زیرلایه و پوشش سطح جانبی در مقابل کلکتور صفحه‌ای



شکل ۴-۱۵. بازده کلکتور در مقابل موقعیت‌های مختلف قرارگیری پوشش سطح جانبی، زیرلایه، چشمه و کلکتور نسبت به هم.

در کلیه حالت های فوق به دلیل جلوگیری از تخلیه الکتریکی، طراحی به گونه ای انجام شده است که کلکتور و چشمه بدون تماس با یکدیگر باشند و دست کم یک میکرومتر فاصله داشته باشند .
با توجه به شکل (۴-۱۵) هنگامی که چشمه، زیرلایه، پوشش سطح جانبی و کلکتور مطابق شکل (۴-۴) نسبت به هم قرار دارند کلکتور دارای بازده بیشتری است.

در شکل (۴-۴) چشمه، زیرلایه، پوشش سطح جانبی داخل کلکتور استوانه‌ای قرار دارند.

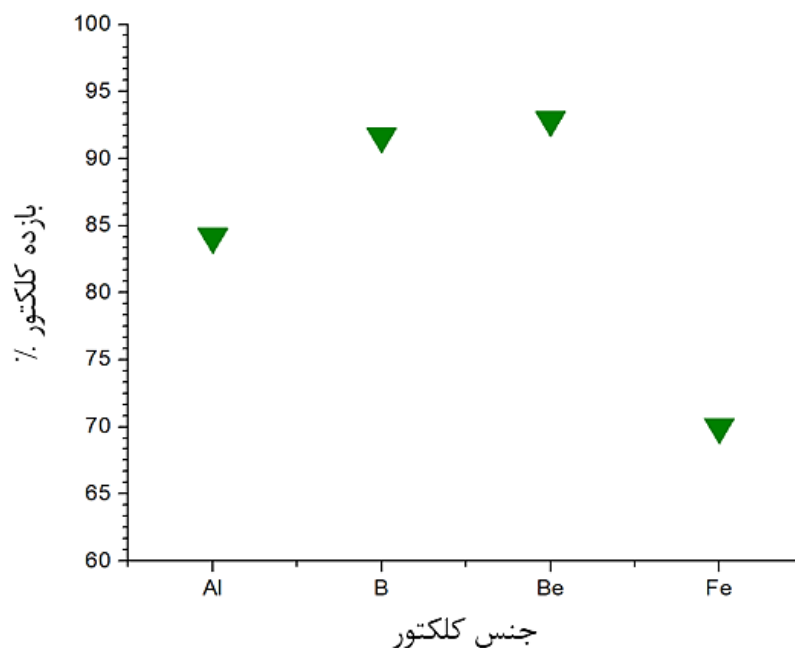
همچنین از بررسی شکل‌های (۴-۱) تا (۴-۱۴) می‌توان به نتایج زیر دست یافت.

- بازده کلکتور در حالتی که چشمه داخل کلکتور استوانه‌ای است نسبت به حالتی که کلکتور به صورت صفحه‌ای و موازی چشمه است بیش‌تر است.
- در مقایسه حالتی که امتداد ارتفاع پوشش سطح جانبی تا نزدیک کلکتور (شکل (۴-۱۲)) است با حالتی که ارتفاع پوشش سطح جانبی فقط تا کنار چشمه (شکل (۴-۱۱)) است، حالت دوم بازده بیش‌تری برای کلکتور حاصل می‌کند.
- فاصله کلکتور از چشمه بر بازده آن اثر گذار است.

- وجود زیرلایه بازده کلکتور را افزایش می‌دهد.
- وجود پوشش سطح جانبی بازده کلکتور را افزایش می‌دهد.

۴-۴-۲ بررسی تأثیر جنس کلکتور بر بازده آن

جنس کلکتور بر بازده آن مؤثر است. همان‌طور که در قبل بیان شد، بازده کلکتور به عنوان نسبت تعداد ذرات جذب شده توسط کلکتور به تعداد ذراتی که به کلکتور برخورد می‌کنند تعریف می‌شود. بهتر است از ماده‌ای با عدد اتمی کم به عنوان کلکتور استفاده شود. استفاده از یک ماده با تعداد اتمی کم، ممکن است میزان پس‌پراکندگی را کاهش دهد. در این مرحله، هدف تعیین یک ماده مناسب برای کلکتور است. بنابراین، چندین عنصر با تعداد اتمی متفاوت به عنوان کلکتور در نظر گرفته شدند. نتیجه این بررسی در شکل (۴-۱۶) نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۶. بررسی اثر مواد با عدد اتمی متفاوت بر بازده کلکتور

بر اساس شکل (۴-۱۶)، هنگامی که Al، B، Be و Fe به عنوان پوشش کلکتور در نظر گرفته شوند، بازده

کلکتور به ترتیب ۸۴/۱۸۰٪، ۹۱/۶۷۵٪، ۹۲/۸۹۲٪ و ۶۹/۹۹۴٪ است. بازده کلکتور (ξ) از معادله ($\xi =$)
 ۱- ξ بدست می‌آید. در اینجا ξ ضریب پس‌پراکندگی است. با افزایش ضریب پس‌پراکندگی، بازده کلکتور
 کاهش می‌یابد. ضریب پس‌پراکندگی به ضخامت (b) ماده، تعداد اتمی ماده (Z) و انرژی جنبشی ذرات
 (T) بستگی دارد. ضریب پس‌پراکندگی تابعی پیچیده از انرژی است [۵۲-۵۴]. به دلیل همین پیچیدگی،
 در این بررسی از روش مونت کارلو استفاده شد. در بین عناصر مورد مطالعه، Be دارای کم‌ترین اتمی و
 بیش‌ترین بازده برای کلکتور است. بنابراین، Be به عنوان جنس مناسب برای کلکتور در نظر گرفته شد.

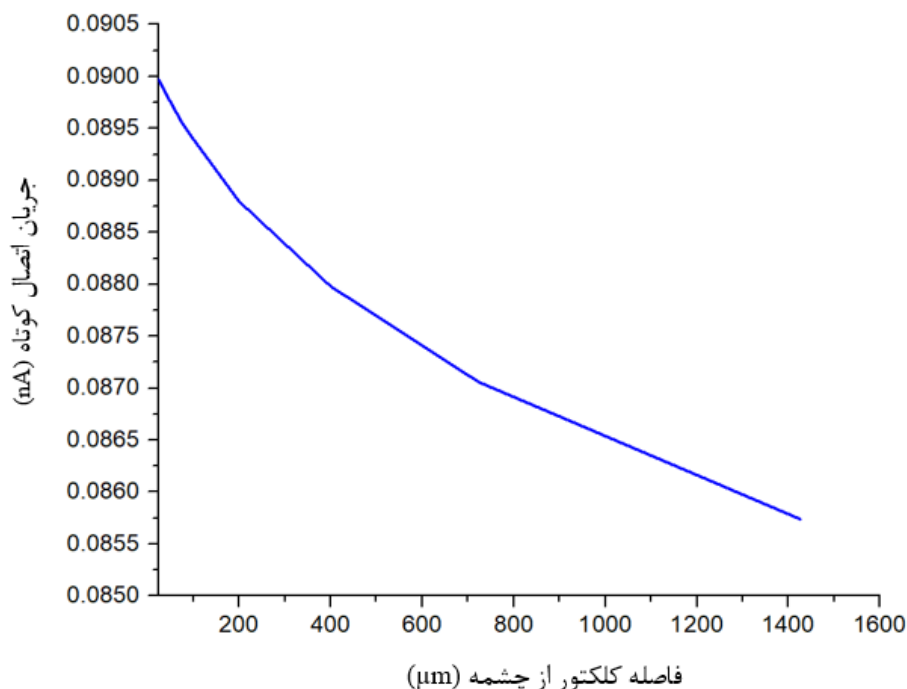
۴-۳ بررسی اثر فاصله‌ی کلکتور از چشمه بر بازده آن

هدف از این کار یافتن تأثیر فاصله کلکتور از چشمه بر جریان اتصال کوتاه باتری هسته‌ای شارژ مستقیم
 است. در یک باتری هسته‌ای شارژ مستقیم در صورت ثابت بودن مواردی از قبیل میزان اکتیویته‌ی چشمه،
 جنس کلکتور و دی‌الکتریک می‌توان گفت که افزایش جریان اتصال کوتاه نشان دهنده‌ی افزایش بازده
 کلکتور به کار رفته در ساختمان آن است.

با استفاده از رابطه‌ی (۴-۱) می‌توان جریان اتصال کوتاه را محاسبه نمود.

$$I_{sc} = AF_1e \quad (4-1)$$

که I_{sc} جریان اتصال کوتاه، e بار الکترون، A فعالیت رادیوایزوتوپ و F_1 تعداد کل الکترون‌هایی است که به
 ازای یک الکترون ساطع شده از چشمه به سطح کلکتور می‌رسند و توسط کد MCNPX بدست می‌آید.
 شکل (۴-۱۷) نتیجه‌ی این بررسی را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۷. بررسی اثر فاصله کلکتور از چشمه بر جریان اتصال کوتاه باتری هسته‌ای شارژ مستقیم

در شکل (۴-۱۷) فاصله‌ی بین کلکتور و چشمه از $25 \mu\text{m}$ تا $1425 \mu\text{m}$ تغییر کرد و در هر فاصله میزان جریان اتصال کوتاه باتری هسته‌ای شارژ مستقیم محاسبه شد. در این نمودار فاصله‌ی $25 \mu\text{m}$ کوچک‌ترین فاصله‌ای است که مورد بررسی قرار گرفته و معنای فیزیکی ندارد.

بر اساس شکل (۴-۱۷)، هنگامی که فاصله بین چشمه و کلکتور $25 \mu\text{m}$ باشد، جریان اتصال کوتاه باتری هسته‌ای شارژ مستقیم 0.08997 nA است. هنگامی که فاصله بین چشمه و کلکتور $1425 \mu\text{m}$ باشد، جریان اتصال کوتاه 0.08574 nA است. مقدار متوسط جریان اتصال کوتاه این باتری در محدوده $25 \mu\text{m}$ تا $1425 \mu\text{m}$ برابر است با مقدار 0.08832 nA . اختلاف بین مقدار متوسط جریان اتصال کوتاه و حداکثر مقدار جریان اتصال کوتاه هنگامی که فاصله بین چشمه و کلکتور در محدوده‌ی $25 \mu\text{m}$ تا $1425 \mu\text{m}$ است محاسبه شد. بنابراین، با حداکثر خطای نسبی $1/8$ ، می‌توان گفت که جریان اتصال کوتاه در باتری مورد مطالعه مستقل از فاصله بین چشمه و کلکتور است.

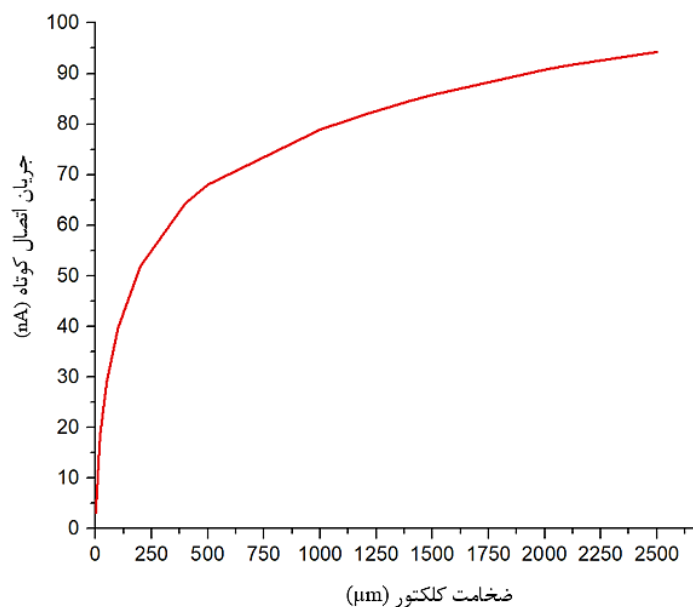
همچنین، هنگامی که فاصله بین چشمه و کلکتور کم است، الکترون‌هایی که از سطح چشمه برگشت

می‌کنند ممکن است توسط کلکتور جذب شوند. در نتیجه با کاهش فاصله بین چشمه و کلکتور جریان اتصال کوتاه افزایش می‌یابد.

از آنجا که در این فصل هدف بهینه‌سازی و مطالعه دقیق پارامترهای دو باتری هسته‌ای شارژ مستقیم و بتاولتائیک در حجم ثابت است، فاصله $25\text{ }\mu\text{m}$ به عنوان بهترین فاصله بین چشمه و کلکتور در باتری هسته‌ای شارژ مستقیم در نظر گرفته شد. زیرا در این فاصله جریان اتصال کوتاه باتری هسته‌ای شارژ مستقیم دارای بیش‌ترین مقدار است.

۴-۴-۴ بررسی اثر ضخامت کلکتور بر بازده آن

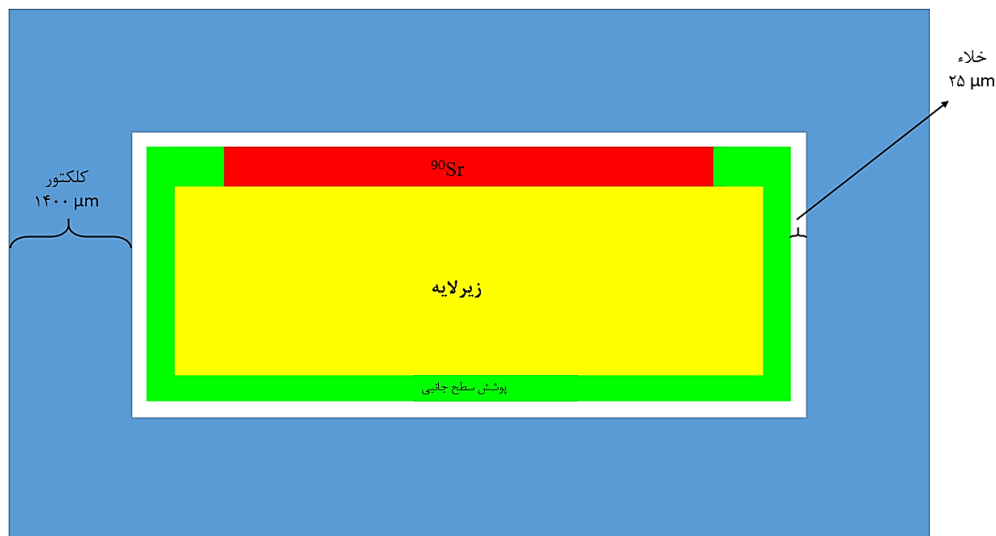
در این قسمت ضخامت مطلوب کلکتور مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام این بررسی ابتدا ضخامت‌های مختلف برای کلکتور در نظر گرفته شد و سپس در هر مرحله، بازده کلکتور محاسبه شد. نتایج محاسبه در شکل (۱۸-۴) نشان داده شده است.



شکل ۱۸-۴. بررسی اثر ضخامت کلکتور بر بازده کلکتور در باتری هسته‌ای شارژ مستقیم

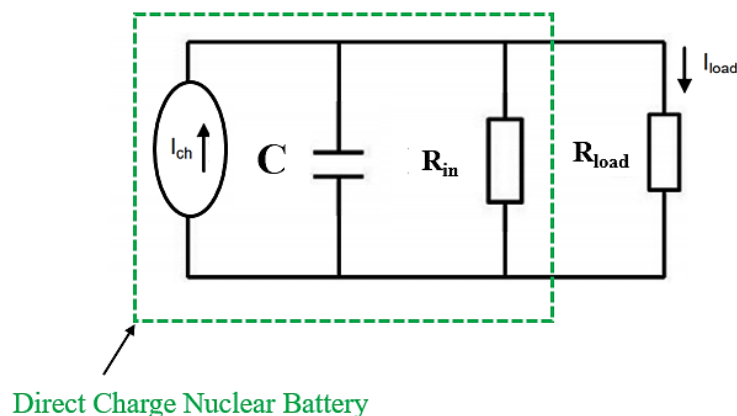
مطابق شکل (۱۸-۴)، در ضخامت $1400\text{ }\mu\text{m}$ ، بازده کلکتور تقریباً به $84/60\%$ می‌رسد. در ضخامت‌های

بیشتر از $1400\ \mu\text{m}$ ، افزایش ضخامت کلکتور تأثیر زیادی بر بازده کلکتور ندارد. بنابراین، ضخامت $1400\ \mu\text{m}$ را می‌توان به عنوان ضخامت مطلوب کلکتور در نظر گرفت. سرانجام مشخص شد که بهترین پارامترها برای این باتری هسته‌ای شارژ مستقیم استفاده از Be به عنوان کلکتور، فاصله بین چشمه و کلکتور $25\ \mu\text{m}$ و ضخامت کلکتور $1400\ \mu\text{m}$ است. تحت این پارامترها، جریان اتصال کوتاه آن $0.8997\ \text{nA}$ است. نمای دو بعدی از باتری هسته‌ای شارژ مستقیم بهینه شده در شکل (۴-۱۹) نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۹. نمای دو بعدی از باتری هسته‌ای شارژ مستقیم.

باتری هسته‌ای شارژ مستقیم در واقع شامل یک خاصیت خازنی و یک مقاومت داخلی است، که می‌توان آن را به صورت شکل (۴-۲۰) نشان داد.



شکل ۴-۲۰ طرح شماتیک باتری هسته‌ای شارژ مستقیم.

در شکل (۴-۲۰) C خازن ذاتی بین الکترودها، R_{in} مقاومت ذاتی، R_{load} مقاومت بار و I_{ch} جریان بارهایی است که به صفحه خازن اضافه می‌شوند.

برخی از ذرات گسیل شده از چشمه که به سمت کلکتور هدایت می‌شوند، توسط آن جمع‌آوری می‌شوند. بقیه از طریق مقاومت نشت R_{leak} از بین می‌روند [۵۵].

$$R_{leak} = \frac{R_{in} \cdot R_{load}}{R_{in} + R_{load}} \quad (۲-۴)$$

همچنین، بار ساطع شده از چشمه در راستای کلکتور در هر فاصله زمانی از t تا $t + dt$ ، با استفاده از رابطه‌ی (۳-۴) محاسبه می‌شود.

$$dQ = I_{Ch} \cdot dt \quad (۳-۴)$$

در باتری هسته‌ای شارژ مستقیم ولتاژ انباشته شده با زمان، $V(t)$ است. در ابتدای چرخه انباشت بار داریم:

$$V(t) = I_{Ch} \cdot R_{leak} [1 - \exp(-\frac{t}{R_{leak} \cdot C})] \quad (۴-۴)$$

با توجه به رابطه‌ی (۴-۴) هنگامی که $t \ll R_{leak} \cdot C$ می‌توان نوشت:

$$V(t) = \frac{I_{ch} \cdot t}{C} \quad (۵-۴)$$

و هنگامی که $t \gg R_{leak} \cdot C$ داریم:

$$V_{sat} = I_{Ch} \cdot R_{leak} \quad (۶-۴)$$

اگر $R_{load} \gg R_{in}$ و $R_{leak} = R_{in}$ باشد (مدار باز)، ولتاژ اشباع V_{sat} را می‌توان V_{oc} در نظر گرفت.

اگر $R_{load} = 0$ باشد (اتصال کوتاه)، I_{sc} برابر I_{ch} خواهد بود.

همچنین در این نوع باتری هسته‌ای، توان مفید را می‌توان توسط رابطه‌ی (۷-۴) محاسبه نمود.

$$P = V_{sat} \cdot I_{load} = \left(\frac{I_{ch} \cdot R_{in}}{R_{in} + R_{load}} \right)^2 \cdot R_{load} \quad (۷-۴)$$

چنانچه $R_{load} = R_{in}$ باشد $\frac{R_{in} \cdot R_{load}}{(R_{in} + R_{load})^2} = 0.25$ خواهد بود. بنابراین مقدار توان مفید این باتری در

این حالت از رابطه (۸-۴) به دست می‌آید.

$$P = 0.25 \cdot V_{oc} \cdot I_{sc}$$

(۸-۴)

در این رابطه I_{sc} جریان اتصال کوتاه و V_{oc} ولتاژ مدار بار است.

در شرایط ایده آل، پتانسیل الکتریکی خروجی در باتری هسته‌ای شارژ مستقیم با دی‌الکتریک خلاء از معادله ($V = E / q$) بدست می‌آید. در اینجا E متوسط انرژی ذرات بتای ساطع شده از چشمه است و q واحد بار الکتریکی است. حداکثر انرژی طیف بتا $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ $2/28 \text{ MeV}$ و متوسط انرژی طیف بتا $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ حدود $0/549 \text{ MeV}$ است. طبق معادله فوق، پتانسیل الکتریکی خروجی V برای این باتری هسته‌ای شارژ مستقیم، می‌تواند $0/549 \text{ MV}$ باشد. اما لازم به ذکر است که طیف ساطع شده از منبع یک طیف پیوسته است و الکترون‌هایی با انرژی‌های مختلف ساطع می‌کند. بنابراین، برای محاسبه پتانسیل الکتریکی، باید متوسط انرژی ذرات ساطع شده از منبع در نظر گرفته شود. همچنین وجود زیرلایه و پوشش سطح جانبی در اطراف منبع بر انرژی ذرات بتا ساطع شده از آن تأثیر می‌گذارد. بنابراین مقدار پتانسیل الکتریکی کمتر از مقدار به دست آمده در بالا است.

۴-۵ خصوصیات و طرز کار باتری هسته‌ای بتاولتائیک

همان‌طور که در فصل اول نیز اشاره شد، یک باتری هسته‌ای بتاولتائیک با استفاده از یک پیوند $p-n$ ذرات باردار ساطع شده از چشمه را به جریان الکتریکی تبدیل می‌کند.

وقتی دو نیم‌رسانای نوع n (نیم‌رسانایی که دارای الکترون اضافی است) و p (نیم‌رسانایی که دارای حفره اضافی است) در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند و میدان الکتریکی حضور نداشته باشد، الکترون‌ها از نیم‌رسانای نوع n به نوع p و حفره‌ها در جهت مخالف پخش خواهند شد. این پخش، تعادلی در غلظت‌های الکترون و حفره به وجود خواهد آورد، اما تعادل بار اولیه را بر هم خواهد زد. در آغاز، نیم‌رساناهای نوع n و نوع p هر دو از نظر الکتریکی خنثی هستند، اما بر اثر پخش ناحیه n به طور مثبت و ناحیه p به طور منفی باردار خواهد شد. پس از برقراری تعادل بین دو ناحیه اختلاف پتانسیلی ایجاد می‌شود که پیوند $p-n$ را شکل می‌دهد. در صورت ورود یک تابش رادیواکتیو به این ناحیه و اندرکنش آن با اتم‌های نیم‌رسانا، زوج

الکترون - حفره تشکیل می‌شود. سپس این ناحیه همانند یک خازن الکترون‌ها و حفره‌های ایجاد شده را در جهت صفحات با بار مخالف سوق می‌دهد. بر اثر قرار گرفتن این قطعه در یک مدار خارجی، الکترون‌ها جمع‌آوری شده و یک جریان الکتریکی تولید می‌شود.

در ساختار یک باتری هسته‌ای بتاولتائیک، از نیم‌رساناهایی همچون سیلیکون، ژرمانیوم، گالیم و ترکیبات آن‌ها استفاده می‌شود [۵۶ و ۵۷]. در این میان، سیلیکون از لحاظ فنی پیشرفته‌تر است. همچنین، در برابر آسیب تابش نیز بسیار مقاوم است [۵۸]. بنابراین، در کار حاضر سیلیکون به عنوان ماده نیم‌رسانا در نظر گرفته شد.

۴-۵-۱ احتمال جمع آوری

زوج الکترون - حفره‌هایی که درون ناحیه‌ی تهی تشکیل می‌شوند با یک احتمال ۱۰۰٪ جمع‌آوری می‌شوند. اما احتمال جمع‌آوری زوج الکترون - حفره‌هایی که در خارج از ناحیه‌ی تهی تشکیل می‌شوند، با توجه به اینکه در چه فاصله‌ی از ناحیه‌ی تهی تشکیل شده‌اند و طول پخش حامل‌های اقلیت آن‌ها چقدر است، متفاوت اند. بنابراین برای به دست آوردن احتمال جمع‌آوری زوج الکترون - حفره‌هایی که در خارج از ناحیه‌ی تهی تشکیل می‌شوند می‌توان از رابطه‌ی (۴-۸) استفاده نمود [۵۹ و ۶۰].

$$CE = 1 - \tanh(d/L) \quad (4-9)$$

در این رابطه CE احتمال جمع‌آوری زوج الکترون - حفره، L طول پخش حامل اقلیت^۱ در نیم‌رسانا و d فاصله از ناحیه‌ی تهی است.

با توجه به رابطه‌ی (۴-۹) احتمال جمع‌آوری زوج الکترون - حفره‌هایی که خارج از ناحیه‌ی تهی تشکیل می‌شوند اندک است؛ در صورتی که طول پخش حامل‌های اقلیت در نیم‌رسانا کم‌تر از فاصله‌ی این زوج الکترون - حفره‌های تشکیل شده تا ناحیه‌ی تهی باشد.

^۱ - minority carrier diffusion length

۴-۵-۲ تعریف طول پخش

به متوسط فاصله‌ای که توسط حامل اقلیت در داخل نیم‌رسانا طی می‌شود قبل از اینکه فرآیند بازترکیب^۱ رخ دهد، طول پخش حامل اقلیت یا به اختصار طول پخش می‌گویند.

طول پخش حامل اقلیت به طول عمر حامل اقلیت (τ) و تحرک حامل اقلیت (μ) بستگی دارد و از رابطه‌ی (۴-۱۰) به دست می‌آید.

$$L = \sqrt{\frac{KT}{q} \mu \tau} \quad (۴-۱۰)$$

روابط (۴-۱۱) و (۴-۱۲) روابط تجربی هستند که برای به دست آوردن طول پخش حامل اقلیت در نیم‌رسانای سیلیکون نوع N و نوع P از آن‌ها استفاده می‌شود [۶۱]. در اینجا L_p طول پخش حفره در نیم‌رسانای نوع N و N_d غلظت ناخالصی در آن است. L_n طول پخش الکترون در نیم‌رسانای نوع P و N_a غلظت ناخالصی در آن است.

$$L_p = \sqrt{\frac{KT}{q} \left[130 + \frac{370}{1 + \left(\frac{N_d}{8 \times 10^{17}} \right)^{1.25}} \right] \frac{1}{7.8 \times 10^{-13} N_d + 1.8 \times 10^{-31} N_d^2}} \quad (۴-۱۱)$$

$$L_n = \sqrt{\frac{KT}{q} \left[232 + \frac{1180}{1 + \left(\frac{N_a}{8 \times 10^{16}} \right)^{0.9}} \right] \frac{1}{3.45 \times 10^{-12} N_a + 9.5 \times 10^{-32} N_a^2}} \quad (۴-۱۲)$$

جدول (۴-۱) نشان دهنده‌ی تغییرات L_p و L_n در غلظت‌های مختلفی از ناخالصی است.

جدول ۴-۱. تغییرات L_p و L_n در غلظت‌های مختلفی از ناخالصی

$L_n (\mu m)$	$N_a (cm^{-3})$	$L_p (\mu m)$	$N_d (cm^{-3})$
۱۰۲۱	1×10^{15}	۱۲۸۸	1×10^{15}
۸۳۱	$1/5 \times 10^{15}$	۱۰۵۲	$1/5 \times 10^{15}$
۷۱۷	2×10^{15}	۹۱۰	2×10^{15}
۴۴۵	5×10^{15}	۷۴۳	3×10^{15}
۱۶۳	3×10^{16}	۶۸۸	$3/5 \times 10^{15}$
۲۲	6×10^{17}	۱۶۳	6×10^{16}
۱۷	9×10^{17}	۳۰	9×10^{17}
۶	5×10^{18}	۷	5×10^{18}
۵	7×10^{18}	۵	7×10^{18}
۴	1×10^{19}	۴	1×10^{19}
۲	3×10^{19}	۱	3×10^{19}
۰/۸	8×10^{19}	۰/۵	8×10^{19}
۰/۷	1×10^{20}	۰/۴	1×10^{20}

با توجه به روابط (۴-۱۱)، (۴-۱۲) و جدول (۴-۱) افزایش غلظت ناخالصی در نیمرسانای سیلیکون نوع N و نوع P باعث کاهش طول پخش حامل اقلیت در آن‌ها می‌شود.

۴-۵-۳ غلظت ناخالصی

برای تعیین بهترین مقدار غلظت ناخالصی در هر کدام از نیمرساناهای نوع N و نوع P، باید توجه داشت زمانی بازده تبدیل پیوند p-n بالا است که طول پخش حامل‌های اقلیت در نیمرساناهای نوع N و نوع P بیش‌تر از فاصله‌ای باشد که زوج الکترون-حفره‌های تشکیل شده خارج از ناحیه‌ی تهی تا ناحیه‌ی تهی دارند. در این صورت احتمال جمع‌آوری زوج الکترون-حفره‌هایی که در خارج از ناحیه‌ی تهی تشکیل

می‌شوند بیش‌تر می‌شود و در نتیجه بازده تبدیل افزایش می‌یابد. بنابراین باید غلظت‌هایی از ناخالصی را در نظر گرفت که در آن غلظت‌ها طول پخش حامل اقلیت در نیمرسانا بیش‌تر از برد ذرات باردار در نیمرسانا باشد.

با استفاده از رابطه‌ی (۴-۱۳) می‌توان برد الکترون‌ها با انرژی معین را در ماده تعیین کرد [۶۲].

$$R \text{ (kg/m}^2\text{)} = a_1 \left\{ \frac{\ln[1 + a_2 (\gamma - 1)]}{a_2} - \frac{a_3 (\gamma - 1)}{1 + a_4 (\gamma - 1)^{a_5}} \right\} \quad (۴-۱۳)$$

در این رابطه:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{2.335 A}{Z^{1.209}} & a_4 &= 1.468 - (1.180 \times 10^{-2} Z) \\ a_2 &= 1.78 \times 10^{-4} Z & a_5 &= \frac{1.232}{Z^{0.109}} \\ a_3 &= 0.9891 - (3.01 \times 10^{-4} Z) & \gamma &= \frac{T + mc^2}{mc^2} \end{aligned}$$

T انرژی جنبشی الکترون، A عدد جرمی ماده و Z عدد اتمی ماده می‌باشد.

در این پژوهش در تمام مراحل شبیه‌سازی از طیف انرژی بتای $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ با متوسط انرژی MeV

۰/۵۴۹ استفاده شد. با استفاده از رابطه‌ی (۴-۱۳) برد الکترون‌ها با متوسط انرژی MeV ۰/۵۴۹ در

سیلیکون برابر $728 \mu\text{m}$ است.

براساس مطالب بیان شده و جدول (۴-۱) چنانچه غلظت ناخالصی در سیلیکون نوع P از $10^{15} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$

۱/۵ و در سیلیکون نوع N از $10^{15} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ کمتر باشد، طول پخش حامل اقلیت از برد الکترون‌ها با

انرژی متوسط در سیلیکون بیش‌تر است و لذا بازده تبدیل پیوند p-n افزایش می‌یابد.

۴-۵-۴ جریان، ولتاژ و توان در باتری هسته‌ای بتاولتائیک

جریان در باتری هسته‌ای بتاولتائیک از رابطه‌ی (۴-۱۴) به دست می‌آید. در این رابطه q بار الکترون، A

اکتیویته چشمه، ε حداقل انرژی لازم برای ایجاد یک زوج الکترون-حفره در نیمرسانا است که این مقدار

برای سیلیکون $\varepsilon = 3/64 \text{ eV}$ می‌باشد. K تعداد لایه‌ها در نیمرسانا، E (n) انرژی به جا گذاشته شده در

لایه‌ی n ام نیمرسانا است و با استفاده از کد MCNPX به دست می‌آید. CE (n) همان احتمال جمع آوری

زوج الکترون - حفره‌ها است که توسط رابطه‌ی (۹-۴) محاسبه می‌شود [۶۳].

$$I_{sc} = I_R = \frac{qA}{\varepsilon} \sum_{n=1}^k CE(n) \times E(n) \quad (۱۴-۴)$$

برای به دست آوردن ولتاژ مدار باز یک باتری هسته‌ای بتاولتائیک می‌توان از رابطه‌ی (۱۴-۴) استفاده نمود [۶۴ و ۶۵].

$$V_{oc} = \frac{kT}{q_e} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (۱۵-۴)$$

در این رابطه T دمای مطلق، k ثابت بولتزمن، I_{sc} جریان اتصال کوتاه و I_0 جریان اشباع معکوس است و با استفاده از رابطه‌ی (۱۶-۴) محاسبه می‌شود.

$$I_0 = Sq n_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_d} + \frac{D_n}{L_n N_a} \right) \quad (۱۶-۴)$$

که در این رابطه (S) مساحت پیوند $p-n$ ، (n_i) تراکم ذاتی حامل‌ها در نیمرسانا، D_p و D_n ثابت پخش حامل اقلیت در نیمرسانای نوع N و نوع P است. L_p و L_n طول پخش حامل اقلیت در نیمرسانای نوع N و نوع P است. (N_d) چگالی ناخالصی دهنده^۱ و (N_a) چگالی ناخالصی پذیرنده^۲ می‌باشد [۶۶].

بیشینه توان خروجی در این باتری به جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز و ضریب پرشدگی^۳ (FF) وابسته است و بر اساس رابطه‌ی (۱۷-۴) قابل محاسبه است [۶۷-۶۹].

$$P_m = FF \cdot V_{oc} \cdot I_{sc} \quad (۱۷-۴)$$

$$FF = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)}{v_{oc} + 1} \quad (۱۸-۴)$$

در رابطه (۱۸-۴) که مربوط به ضریب پرشدگی است، v_{oc} ولتاژ مدار باز بهنجار شده^۴ می‌باشد و از رابطه‌ی (۱۹-۴) به دست می‌آید.

$$v_{oc} = \frac{qV_{oc}}{KT} \quad (۱۹-۴)$$

۱- donor concentration

۲- acceptor concentration

۳- Fill Factor

۴- normalized open-circuit voltage

بازده این باتری در واقع نسبت بیشینه توان خروجی به توان وابسته به ذرات بتا است. بیشینه توان خروجی از رابطه‌ی (۴-۱۷) به دست می‌آید. اما برای محاسبه توان وابسته به ذرات بتا می‌توان از رابطه‌ی (۴-۲۰) استفاده نمود. در این رابطه A اکتیویته چشمه، E انرژی متوسط ذرات بتا و q بار الکترون است.

$$P_{in} = AEq \quad (۴-۲۰)$$

بنابراین بازده باتری هسته‌ای بتاولتائیک با استفاده از رابطه‌ی (۴-۲۱) محاسبه می‌شود

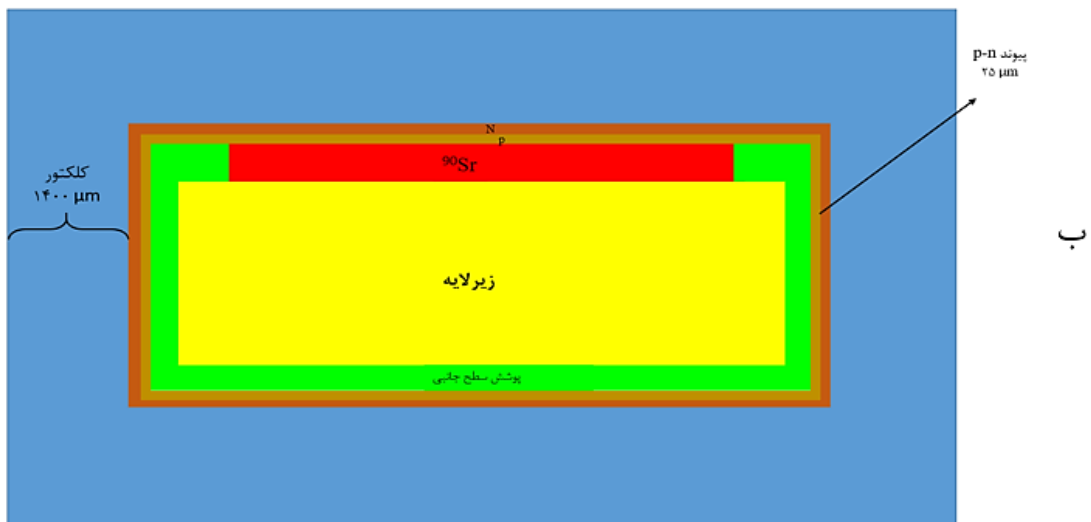
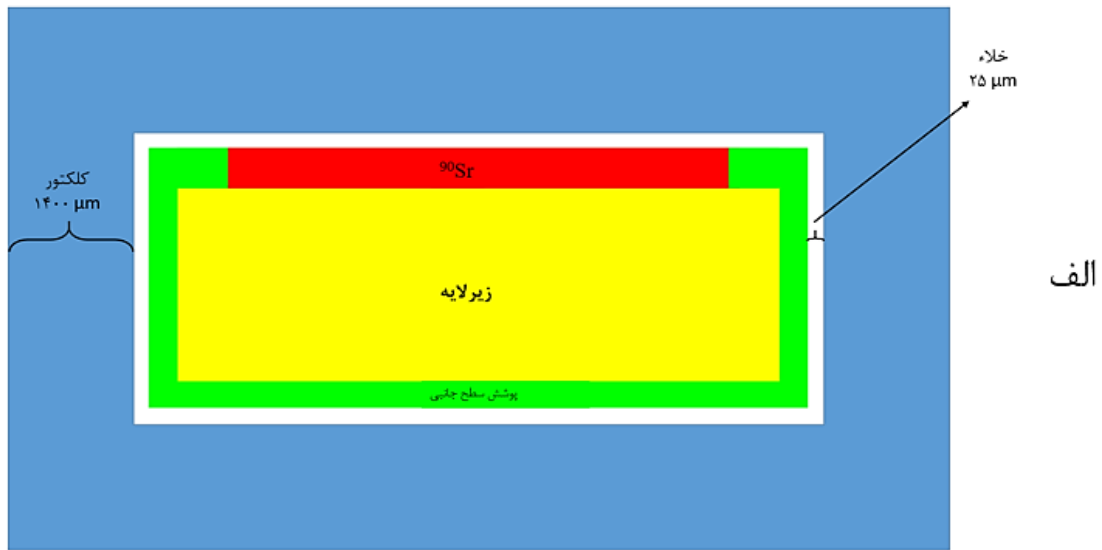
$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \times Voc \times I_{sc}}{AEq} \quad (۴-۲۱)$$

۴-۶ انجام شبیه‌سازی‌های مربوط به باتری هسته‌ای بتاولتائیک

در این فصل هدف مقایسه‌ی باتری هسته‌ای شارژ مستقیم بر پایه چشمه رادیواکتیو ^{90}Sr با باتری هسته‌ای بتاولتائیک $^{90}\text{Sr} - \text{Si}$ در حجم ثابت است. بنابراین نخست باتری هسته‌ای شارژ مستقیم بهینه شد. سپس در فاصله‌ی بین چشمه و کلکتور این باتری به جای خلاء ماده نیمرسانای سیلیکون قرار داده شد. در ادامه پارامترهای باتری مربوط به حالتی که سیلیکون بین چشمه و کلکتور قرار دارد (بتاولتائیک) محاسبه شد و با حالتی که بین چشمه و کلکتور خلاء است (شارژ مستقیم) مقایسه شد.

در بخش ۴-۴-۴ مشخص شد که بهترین پارامترها برای باتری هسته‌ای شارژ مستقیم مورد مطالعه، استفاده از Be به عنوان کلکتور، فاصله بین چشمه و کلکتور $25 \mu\text{m}$ و ضخامت کلکتور $1400 \mu\text{m}$ است.

حال در این مرحله در فاصله بین چشمه و کلکتور ($25 \mu\text{m}$) سیلیکون در نظر گرفته شد. نمای دو بعدی از باتری هسته‌ای شارژ مستقیم بهینه شده و نمای دو بعدی از باتری هسته‌ای بتاولتائیک تحت مطالعه در شکل (۴-۲۱) نشان داده شده است.

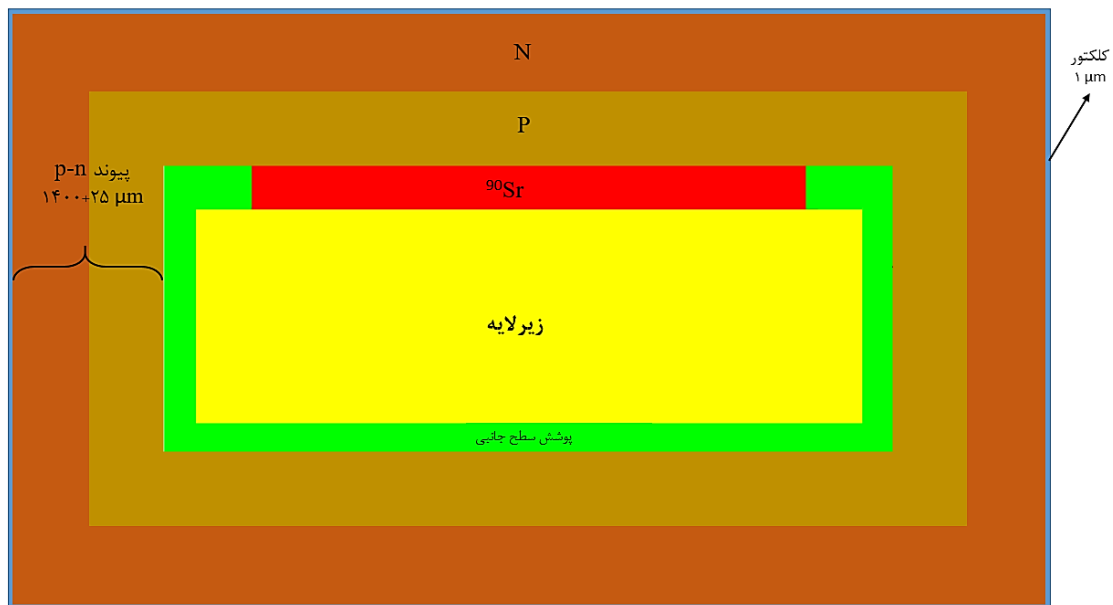


شکل ۴-۲۱. الف) نمای دو بعدی از باتری هسته‌ای شارژ مستقیم بهینه شده. ب) نمای دو بعدی از باتری هسته‌ای بتاولتائیک تحت مطالعه.

همان‌طور که در شکل (۴-۲۱) نشان داده شده است حجم هر دو باتری یکسان است. در باتری هسته‌ای بتاولتائیک یکی از مواردی که باید بررسی شود، ضخامت بهینه‌ی پیوند p-n است.

از آنجا که مقایسه باتری هسته‌ای شارژ مستقیم با باتری هسته‌ای بتاولتائیک در یک حجم ثابت انجام می‌شود، حداکثر ضخامتی که می‌توان برای پیوند p-n در باتری هسته‌ای بتاولتائیک در نظر گرفت (μm) $(1400 + 25)$ است.

شکل (۴-۲۲)، نمای دو بعدی باتری هسته‌ای بتاولتائیک را نشان می‌دهد که حداکثر ضخامت سیلیکون $1400 + 25 \mu\text{m}$ است.

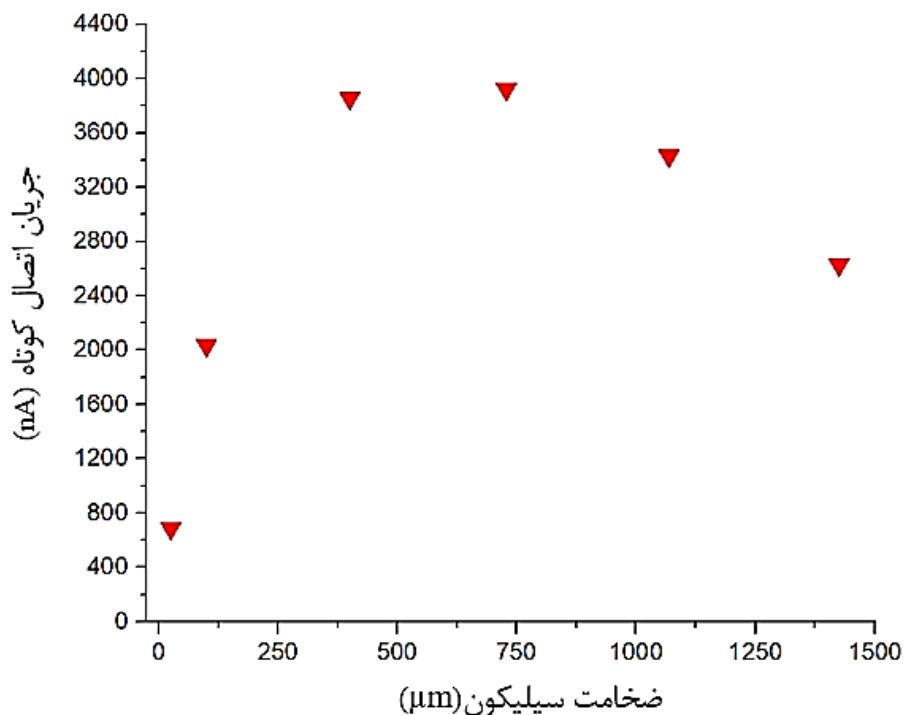


شکل ۴-۲۲. نمای دو بعدی باتری هسته‌ای بتاولتائیک با حداکثر ضخامت سیلیکون $1400 + 25 \mu\text{m}$ (چشمه با نیمه رسانا تماس مستقیم ندارد و بین دو قطعه ۱ میکرومتر فاصله در نظر گرفته شده)

در جهت تعیین یک ضخامت مناسب برای سیلیکون مراحل زیر انجام شد. بهترین ضخامت سیلیکون ضخامتی است که جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز و توان خروجی باتری هسته‌ای بتاولتائیک حداکثر باشد.

بر این اساس در ابتدا ضخامت‌های حدود $25 \mu\text{m}$ ، $100 \mu\text{m}$ ، $400 \mu\text{m}$ ، $728 \mu\text{m}$ ، $1069 \mu\text{m}$ و $1425 \mu\text{m}$ برای سیلیکون در نظر گرفته شد. سپس، در هر مرحله جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز و توان خروجی برای باتری هسته‌ای بتاولتائیک محاسبه شد.

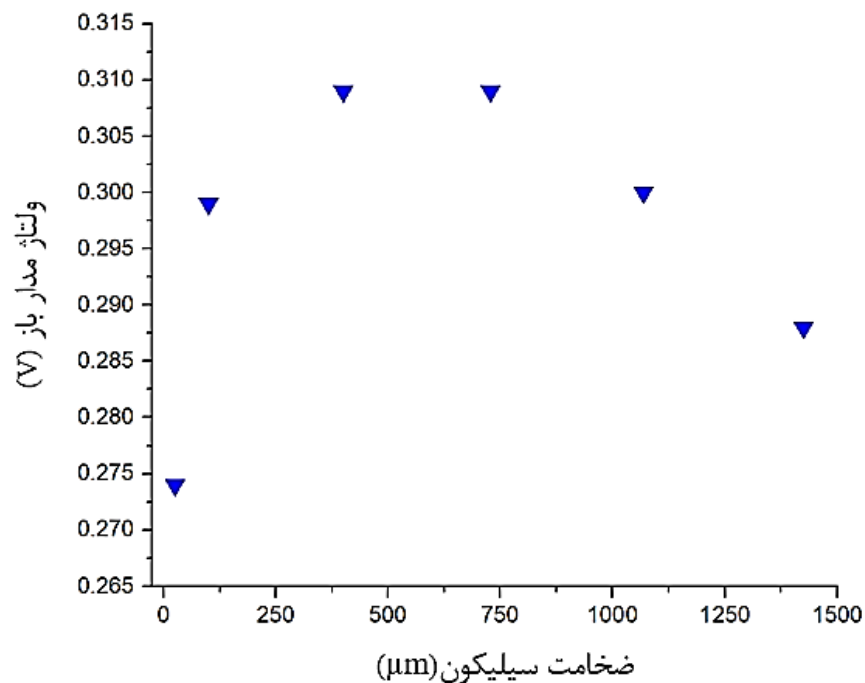
شکل (۴-۲۳)، نتیجه‌ی بررسی اثر ضخامت سیلیکون را بر مقدار جریان اتصال کوتاه نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، هدف این شکل تشخیص ضخامت مناسب برای سیلیکون است.



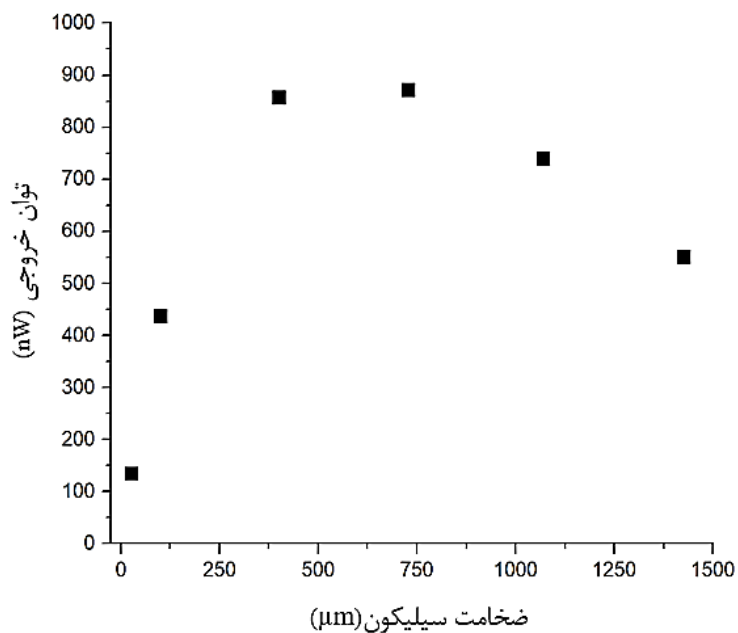
شکل ۴-۲۳. اثر ضخامت سیلیکون بر جریان اتصال کوتاه باتری هسته‌ای بتاولتائیک

در شکل (۴-۲۳) هنگامی که ضخامت سیلیکون حدود $25\ \mu\text{m}$ ، $100\ \mu\text{m}$ ، $400\ \mu\text{m}$ ، $728\ \mu\text{m}$ و $1069\ \mu\text{m}$ است مقدار جریان اتصال کوتاه باتری به ترتیب حدود $686/69\ \text{nA}$ ، $2033/8\ \text{nA}$ ، $3854/07\ \text{nA}$ ، $3920/36\ \text{nA}$ و $2628\ \text{nA}$ است. از آنجایی که ذرات باردار درون ماده برد معینی دارند، انتظار می‌رود تا ضخامت $728\ \mu\text{m}$ مقدار جریان اتصال کوتاه افزایش یابد. بر اساس شکل (۴-۲۳) و مطابق انتظار ما، با افزایش ضخامت سیلیکون تا $728\ \mu\text{m}$ مقدار جریان اتصال کوتاه افزایش می‌یابد. اما هنگامی که ضخامت سیلیکون از $728\ \mu\text{m}$ بیش‌تر می‌شود مقدار جریان اتصال کوتاه کاهش می‌یابد. ضخامت $728\ \mu\text{m}$ همان برد متوسط انرژی ذرات بتا در سیلیکون است.

شکل‌های (۴-۲۴) و (۴-۲۵) به ترتیب نشان دهنده‌ی اثر ضخامت سیلیکون بر مقدار ولتاژ مدار باز و مقدار توان خروجی باتری هسته‌ای بتاولتائیک است.



شکل ۴-۲۴. اثر ضخامت سیلیکون بر ولتاژ مدار باز باتری هسته‌ای بتاولتائیک



شکل ۴-۲۵. اثر ضخامت سیلیکون بر توان خروجی باتری هسته‌ای بتاولتائیک

با توجه به شکل‌های (۴-۲۴) و (۴-۲۵) نیز می‌توان گفت هنگامی که ضخامت سیلیکون $728 \mu\text{m}$ است، این باتری هسته‌ای بتاولتائیک دارای بیشترین مقدار ولتاژ مدار باز و توان خروجی است. بنابراین ضخامت

۷۲۸ μm به عنوان ضخامت مناسب سیلیکون در نظر گرفته شد.

۷-۴ مقایسه‌ی باتری هسته‌ای شارژ مستقیم با باتری هسته‌ای بتاولتائیک در حجم ثابت

در این بخش پارامترهای مربوط به باتری هسته‌ای بتاولتائیک محاسبه شد و نتایج حاصل با پارامترهای باتری هسته‌ای شارژ مستقیم بهینه شده مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج در جدول (۲-۴) نشان داده شده است.

جدول ۲-۴. مقایسه‌ی پارامترهای دو باتری هسته‌ای تحت مطالعه در حجم ثابت

نوع باتری هسته‌ای	حجم باتری هسته‌ای (cm^3)	چشمه رادیواکتیو		جریان اتصال کوتاه (nA)	ولتاژ مدار باز (V)	حداکثر توان خروجی (mW)
		ایزوتوپ	اکتیویته (mCi)			
شارژ مستقیم	۰/۳۹	^{90}Sr	۱۶/۳۲۸	۰/۰۸۹۹۷	۵۴۹×۱۰^{-۳}	$۱۲/۳۵ \times ۱۰^{-۳}$
بتاولتائیک	۰/۳۹	^{90}Sr	۱۶/۳۲۸	۳۹۲۰	۰/۳۰۹	۸۷۲

همان‌طور که در قبل بیان شد در این پژوهش ملاک بهینه‌سازی در هر دو مدل باتری هسته‌ای، افزایش جریان اتصال کوتاه است. بر اساس جدول (۲-۴) جریان اتصال کوتاه باتری هسته‌ای بتاولتائیک ۳۹۲۰ nA است در حالی که در باتری هسته‌ای شارژ مستقیم مقدار جریان اتصال کوتاه برابر ۰/۰۸۹۹۷ nA است. حجم باتری هسته‌ای بتاولتائیک با حجم باتری هسته‌ای شارژ مستقیم یکسان است اما جریان اتصال کوتاه آن ۴۴۰۰۰ مرتبه بزرگتر از جریان اتصال کوتاه باتری هسته‌ای شارژ مستقیم است. می‌توان دریافت که با ثابت بودن مواردی از قبیل حجم، اکتیویته چشمه و ابعاد چشمه، استفاده از نیمرسانا در فاصله‌ی بین چشمه و کلکتور، مقدار جریان اتصال کوتاه را افزایش می‌دهد.

همچنین ولتاژ شکست خلاء $\frac{G V}{m}$ ۳۰ است. در باتری هسته‌ای شارژ مستقیم فاصله‌ی بین چشمه و کلکتور $25 \mu\text{m}$ است. بنابراین این باتری می‌تواند حداکثر ولتاژ $V \times 10^5 \times 7/5$ را تحمل نماید قبل از اینکه تخلیه الکتریکی رخ دهد.

فصل پنجم

بررسی عواملی که در افزایش جریان اتصال کوتاه و بازده کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم بر پایه چشمه رادیواکتیو

Sr^{90} تأثیر چندانی ندارند

۵-۱ مقدمه

همان‌طور که در قبل نیز اشاره شد، هدف این فصل در نظر گرفتن چشمه استوانه‌ای ^{90}Sr با شعاع قاعده $37/5\mu\text{m}$ ، ارتفاع $0/01\mu\text{m}$ و اکتیویته $0/016328\mu\text{Ci}$ به عنوان چشمه باتری هسته‌ای شارژ مستقیم و بررسی عواملی است که بر جریان اتصال کوتاه و بازده کلکتور این باتری تأثیر چندانی ندارند. بنابراین حالت‌های زیر برای باتری هسته‌ای شارژ مستقیم بر پایه چشمه رادیواکتیو ^{90}Sr مورد بررسی قرار گرفت.

- **حالت ۱:** بررسی اثر تغییرات شعاع کلکتور استوانه‌ای، تغییرات ارتفاع کلکتور استوانه‌ای و تغییر

فاصله‌ی بین چشمه و کلکتور بر جریان اتصال کوتاه باتری هسته‌ای شارژ مستقیم مورد مطالعه.

- **حالت ۲:** بررسی اثر تغییرات ارتفاع پوشش سطح جانبی، تغییرات شعاع پوشش سطح جانبی و

تغییر در ارتفاع زیرلایه بر بازده کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم مورد مطالعه.

- **حالت ۳:** بررسی اثر تغییرات در فاصله بین سطح بالایی کلکتور از چشمه، سطح جانبی کلکتور از

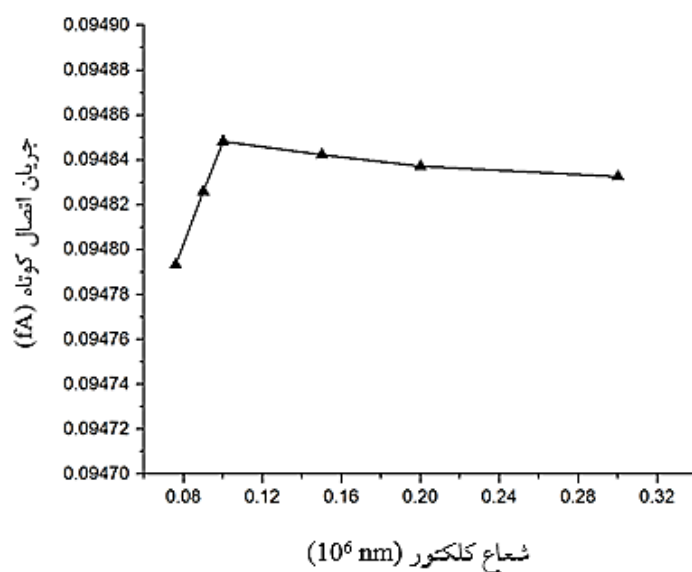
چشمه و سطح پایینی کلکتور از چشمه بر بازده کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم مورد مطالعه.

۵-۲ بررسی حالت ۱

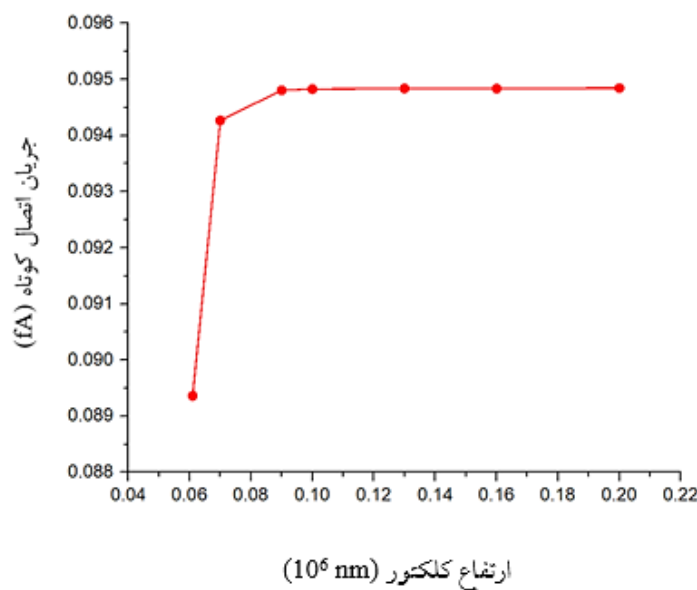
در هر کدام از حالت‌ها چشمه استوانه‌ای ^{90}Sr با شعاع قاعده $37/5\mu\text{m}$ ، ارتفاع $0/01\mu\text{m}$ و اکتیویته $0/016328\mu\text{Ci}$ به عنوان چشمه باتری هسته‌ای شارژ مستقیم در نظر گرفته شد.

در این حالت تأثیر شعاع کلکتور، ارتفاع کلکتور و فاصله‌ی بین چشمه و کلکتور بر روی جریان اتصال کوتاه باتری هسته‌ای شارژ مستقیم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها به ترتیب در شکل‌های

(۵-۱)، (۵-۲) و (۵-۳) نشان داده شده است.



شکل ۵-۱. تغییرات جریان اتصال کوتاه باتری هسته‌ای شارژ مستقیم با چشمه ^{90}Sr نسبت به تغییرات شعاع کلکتور.



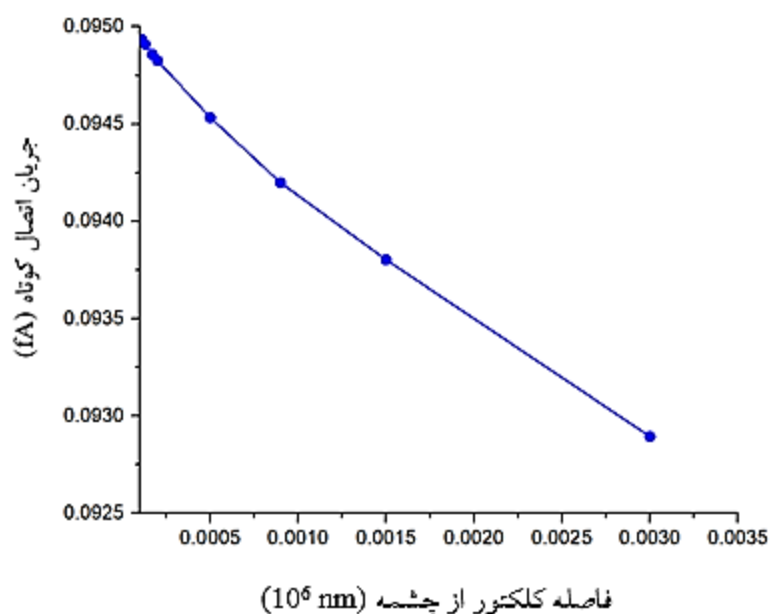
شکل ۵-۲. تغییرات جریان اتصال کوتاه باتری هسته‌ای شارژ مستقیم با چشمه ^{90}Sr نسبت به تغییرات ارتفاع کلکتور.

با توجه به شکل‌های (۵-۱) و (۵-۲) می‌توان گفت که افزایش شعاع و ارتفاع کلکتور باتری هسته‌ای تحت بررسی موجب افزایش قابل توجهی در مقدار جریان اتصال کوتاه آن نمی‌شود. بر اساس شکل (۵-۱)،

هنگامی که شعاع کلکتور $10^6 \times 0.1$ nm باشد، جریان اتصال کوتاه باتری هسته‌ای شارژ مستقیم دارای بیش‌ترین مقدار (0.09485 fA) است. مقدار متوسط جریان اتصال کوتاه این باتری در محدوده بررسی شده برابر است با مقدار 0.09483 fA. بنابراین، با حداکثر خطای نسبی حدود 0.2% ، می‌توان گفت که جریان اتصال کوتاه در باتری مورد مطالعه مستقل از شعاع کلکتور است.

در شکل (۲-۵)، هنگامی که ارتفاع کلکتور $10^6 \times 0.2$ nm باشد، جریان اتصال کوتاه باتری هسته‌ای شارژ مستقیم دارای بیش‌ترین مقدار (0.0944 fA) است. مقدار متوسط جریان اتصال کوتاه این باتری در محدوده بررسی شده برابر است با مقدار 0.0939 fA. بنابراین، با حداکثر خطای نسبی حدود 0.53% ، می‌توان گفت که جریان اتصال کوتاه در باتری مورد مطالعه مستقل از ارتفاع کلکتور است.

در شکل (۳-۵) نیز تأثیر فاصله‌ی کلکتور از چشمه بر روی جریان اتصال کوتاه باتری مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۳-۵. تغییرات جریان اتصال کوتاه باتری هسته‌ای شارژ مستقیم با چشمه ^{90}Sr نسبت به تغییرات فاصله‌ی کلکتور از چشمه.

بر اساس شکل (۳-۵)، هنگامی که فاصله بین چشمه و کلکتور 130 nm باشد، جریان اتصال کوتاه باتری هسته‌ای شارژ مستقیم دارای بیش‌ترین مقدار (0.09493 fA) است. مقدار متوسط جریان اتصال کوتاه

این باتری در محدوده بررسی شده برابر است با مقدار $fA = 0.09458$. اختلاف بین مقدار متوسط جریان اتصال کوتاه و حداکثر مقدار جریان اتصال کوتاه محاسبه شد. بنابراین، با حداکثر خطای نسبی 0.37% ، می‌توان گفت که جریان اتصال کوتاه در باتری مورد مطالعه مستقل از فاصله بین چشمه و کلکتور است.

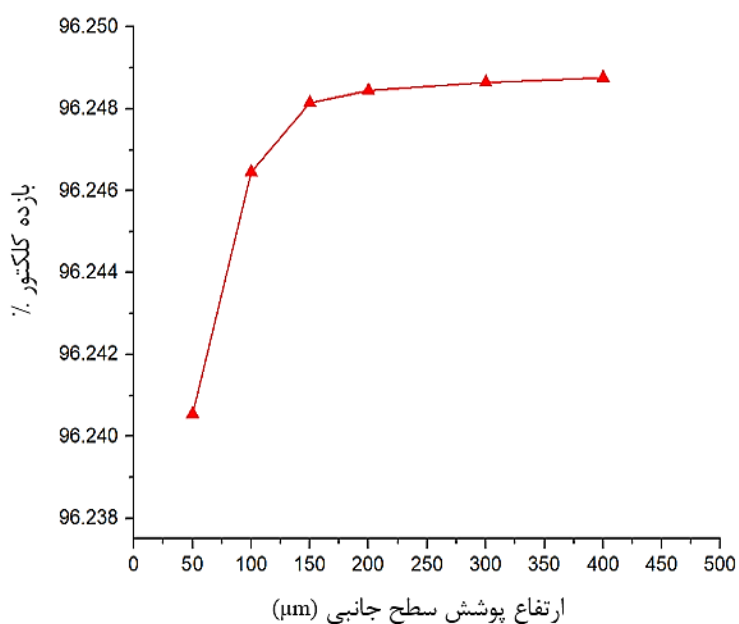
۵-۲-۱ نتایج حاصل از بررسی حالت ۱

با توجه به شبیه‌سازی‌های صورت گرفته و با توجه به این مطلب که در باتری هسته‌ای مورد مطالعه فضای بین چشمه و کلکتور خلاء است، می‌توان دریافت که تغییر در هر کدام از موارد زیر تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر جریان اتصال کوتاه باتری هسته‌ای شارژ مستقیم مورد مطالعه ندارد.

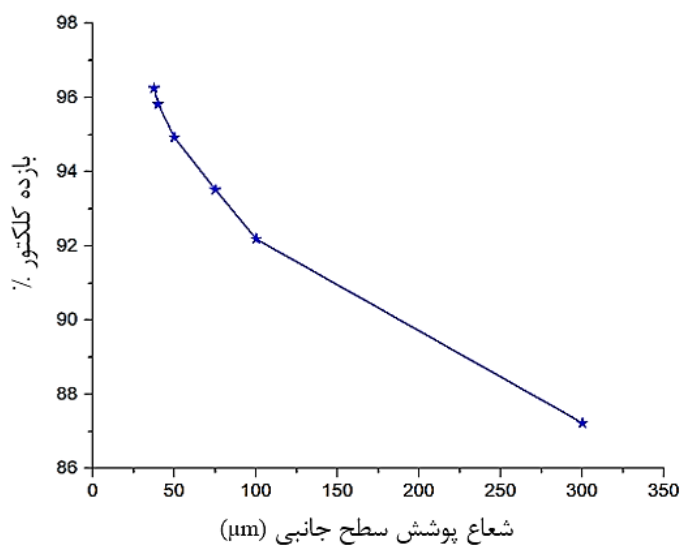
- تغییرات شعاع کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم.
- تغییرات ارتفاع کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم.
- تغییرات همزمان شعاع و ارتفاع کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم، یا به عبارتی دیگر تغییر در فاصله بین چشمه و کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم.

۵-۳ بررسی حالت ۲

در این حالت اثر تغییرات ارتفاع پوشش سطح جانبی، تغییرات شعاع پوشش سطح جانبی و تغییر در ارتفاع زیرلایه بر بازده کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم مورد مطالعه، بررسی شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها به ترتیب در شکل‌های (۵-۴)، (۵-۵) و (۵-۶) نشان داده شده است.



شکل ۴-۵. تغییرات بازده کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم با چشمه ^{90}Sr نسبت به تغییرات ارتفاع پوشش سطح جانبی چشمه.

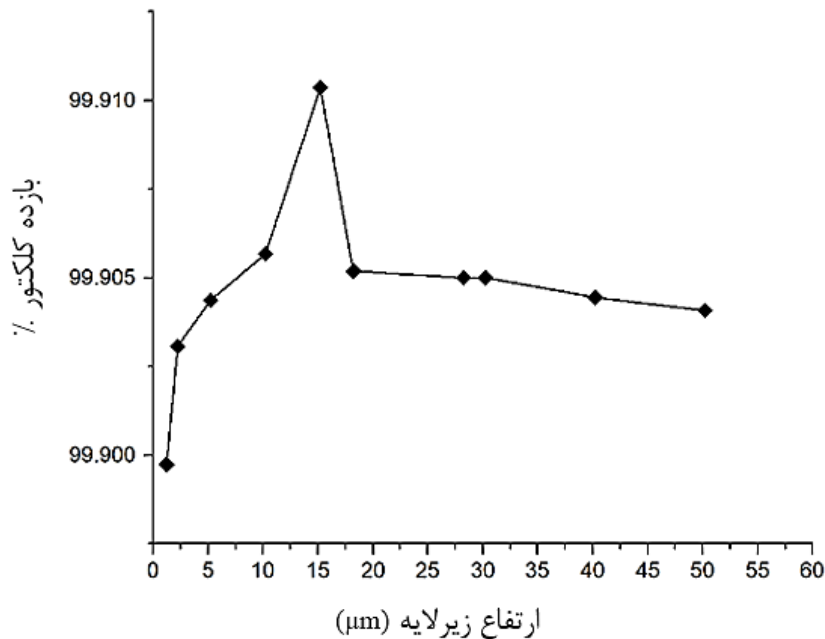


شکل ۵-۵. تغییرات بازده کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم با چشمه ^{90}Sr نسبت به تغییرات شعاع پوشش سطح جانبی چشمه.

با توجه به شکل‌های (۴-۵) و (۵-۵)، هنگامی که ارتفاع و شعاع پوشش سطح جانبی به ترتیب $400\text{ }\mu\text{m}$ و $37/53\text{ }\mu\text{m}$ است، بازده کلکتور در بیش‌ترین مقدار است.

اما در شکل (۴-۵) همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش ارتفاع پوشش سطح جانبی چشمه موجب تغییر

قابل ملاحظه‌ای در مقدار بازده کلکتور نمی‌شود. در محدوده‌ی بررسی شده مقدار متوسط بازده کلکتور ۹۶/۲۴۶٪ است، لذا با حداکثر خطای نسبی ۰/۰۴۸٪ می‌توان گفت که بازده کلکتور مستقل از ارتفاع پوشش سطح جانبی است.



شکل ۵-۶. تغییرات بازده کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم با چشمه ^{90}Sr نسبت به تغییرات ارتفاع زیرلایه چشمه.

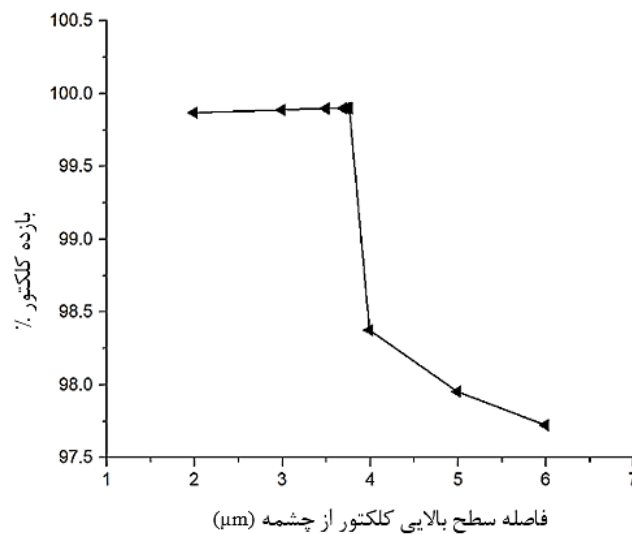
بر اساس شکل (۵-۶) هنگامی که ارتفاع زیرلایه $15/2 \mu\text{m}$ است، بازده کلکتور دارای بیش‌ترین مقدار است. اما با توجه به شکل (۵-۶) مشخص می‌شود که اختلاف بین بیش‌ترین مقدار بازده کلکتور با مقدار متوسط بازده کلکتور در محدوده مورد بررسی بسیار ناچیز است. لذا با حداکثر خطای نسبی ۰/۰۰۵٪ می‌توان گفت که بازده کلکتور مستقل از ارتفاع زیرلایه است.

۵-۳-۱ نتایج حاصل از بررسی حالت ۲

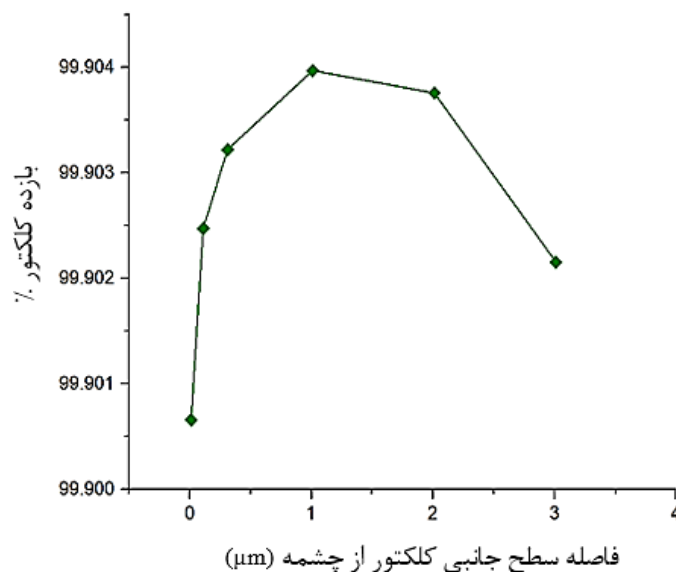
با توجه به شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، مشخص می‌شود که تغییر در ارتفاع پوشش سطح جانبی چشمه و تغییر در ارتفاع زیرلایه تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر بازده کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم مورد مطالعه ندارد.

۴-۵ بررسی حالت ۳

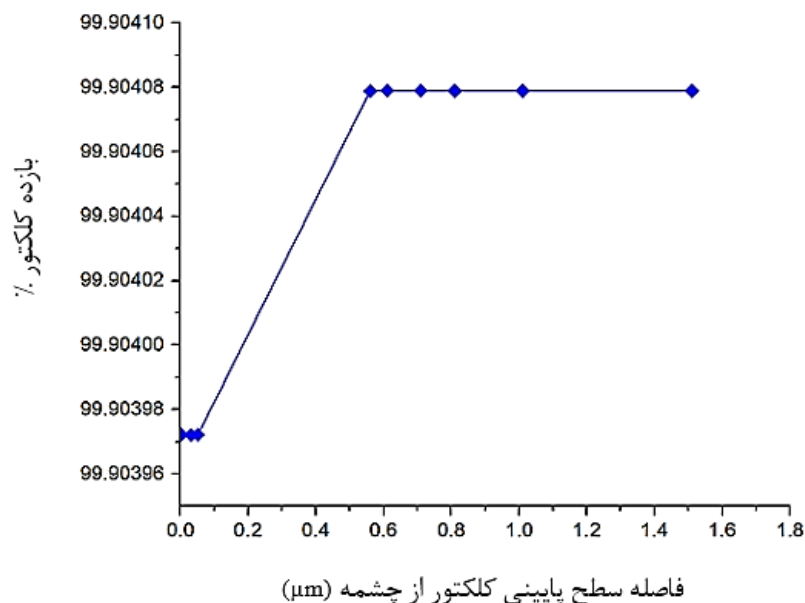
در این حالت اثر مواردی از قبیل: تغییر فاصله بین چشمه و سطح بالایی کلکتور، تغییر فاصله بین چشمه و سطح پایینی کلکتور و تغییر فاصله بین چشمه و سطح جانبی کلکتور به صورت جداگانه بر روی بازده باتری هسته‌ای شارژ مستقیم بررسی شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها به ترتیب در شکل‌های (۵-۷)، (۸) و (۹-۵) نشان داده شده است.



شکل ۵-۷. تغییرات بازده کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم با چشمه ^{90}Sr نسبت به تغییرات فاصله سطح بالایی کلکتور از چشمه.



شکل ۵-۸. تغییرات بازده کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم با چشمه ^{90}Sr نسبت به تغییرات فاصله سطح جانبی کلکتور از چشمه.



شکل ۵-۹. تغییرات بازده کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم با چشمه ^{90}Sr نسبت به تغییرات فاصله سطح پایینی کلکتور از چشمه.

با مشاهده شکل‌های (۵-۷)، (۵-۸) و (۵-۹) می‌توان دریافت که تغییر فاصله سطح بالایی، سطح جانبی و سطح پایینی کلکتور از چشمه تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر بازده کلکتور ندارد.

۵-۵ نتایج کلی

با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌ها می‌توان گفت، در یک باتری هسته‌ای شارژ مستقیم که بین چشمه و کلکتور خلاء قرار دارد مواردی از قبیل: تغییر شعاع و ارتفاع کلکتور، تغییر فاصله کلکتور از چشمه، تغییر ارتفاع پوشش سطح جانبی چشمه، تغییر ارتفاع زیرلایه، تغییر فاصله سطح بالایی کلکتور از چشمه، تغییر فاصله سطح جانبی کلکتور از چشمه و تغییر فاصله سطح پایینی کلکتور از چشمه موجب تغییر قابل ملاحظه‌ای در جریان اتصال کوتاه و بازده کلکتور نمی‌شود. لذا در این شرایط آنچه که بر بازده کلکتور اثر می‌گذارد تغییر در جنس کلکتور و ضخامت آن است که در فصل قبل بررسی شد.

فصل ششم

شرح نتیج

۶-۱ مقدمه

این فصل به مرور اقدامات انجام شده و جمع‌بندی نتایج حاصل از آن‌ها در راستای طراحی و بهینه‌سازی باتری هسته‌ای بتاولتائیک ^{90}Sr به منظور ساخت و استفاده در ادوات MEMS می‌پردازد. همچنین در ادامه عواملی که تأثیر چندانی بر افزایش جریان اتصال کوتاه و بازده کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم مورد مطالعه در این پژوهش ندارند، شرح داده می‌شود.

۶-۲ عوامل مؤثر در طراحی باتری هسته‌ای

۶-۲-۱ انتخاب رادیوایزوتوپ مناسب

انتخاب منبع رادیواکتیو از جمله مواردی است که در طراحی باتری هسته‌ای لحاظ می‌شود. در انتخاب آن باید به مواردی از قبیل در دسترس بودن، میزان توان خروجی باتری با توجه به زمینه کاربردی آن، هزینه، حفاظ گذاری و طول عمری که ما از باتری انتظار داریم توجه شود. بنابراین برای انجام شبیه‌سازی‌ها در این پژوهش از ^{90}Sr استفاده شد.

نیمه‌عمر ^{90}Sr ۲۸/۶ سال است. پس از این مدت تحت واپاشی بتا با حداکثر انرژی ۰/۵۴۶ MeV به ^{90}Y تبدیل می‌شود. نیمه‌عمر ^{90}Y کوتاه و در حد ۶۴ ساعت است و با حداکثر انرژی ۲/۲۸ MeV به ^{90}Zr که پایدار است تبدیل می‌شود.

۶-۲-۲ عوامل مؤثر بر بازده چشمه

در این مرحله نخست چشمه ^{90}Sr به شکل استوانه‌ای در نظر گرفته شد، سپس تأثیر عواملی از قبیل: تغییر شعاع و ارتفاع چشمه، تغییر شعاع و ارتفاع زیرلایه و تغییر شعاع و ارتفاع پوشش سطح جانبی بر روی بازده چشمه مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت مشخص شد که استفاده از زیرلایه و پوشش سطح جانبی با شعاع و ارتفاع مناسب می‌تواند بازده این چشمه را حدود ۳۶/۱۸٪ افزایش دهد.

۶-۲-۳ عوامل مؤثر بر بازده کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم

مواردی از قبیل حالت قرارگیری چشمه، زیرلایه، پوشش سطح جانبی و کلکتور نسبت به هم، جنس

کلکتور، و ضخامت آن از جمله مواردی هستند که بر بازده کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم اثر می‌گذارد. پس از انجام این بررسی‌ها مشخص شد که هنگامی که شکل کلکتور استوانه‌ای، جنس آن Be و ضخامت آن $1400 \mu\text{m}$ است باتری هسته‌ای شارژ مستقیم مورد مطالعه دارای بیش‌ترین بازده است.

۴-۲-۶ انتخاب یک نیم‌رسانای مناسب جهت استفاده در باتری هسته‌ای بتاولتائیک

در یک باتری هسته‌ای بتاولتائیک از نیم‌رساناهایی همچون ژرمانیوم، گالیوم، سیلیکون و ترکیبات آن‌ها استفاده می‌شود. در این پژوهش سیلیکون به عنوان ماده نیم‌رسانا در باتری هسته‌ای بتاولتائیک در نظر گرفته شد. زیرا در برابر آسیب تابش مقاوم است.

۵-۲-۶ طول پخش در باتری هسته‌ای بتاولتائیک

همان‌طور که در قبل بیان شد، متوسط فاصله‌ای که حامل اقلیت در نیم‌رسانا طی می‌کند قبل از اینکه باز ترکیب شود، طول پخش نام دارد.

طول پخش در سیلیکون به غلظت ناخالصی وابسته است و با آن نسبت عکس دارد. به عبارتی دیگر افزایش میزان ناخالصی موجب کاهش طول پخش می‌شود.

بعلاوه، طول پخش عاملی است که در احتمال جمع آوری جفت الکترون-حفره‌های تولید شده خارج از ناحیه‌ی تهی، مؤثر است.

چنانچه طول پخش در نیم‌رسانا از برد ذرات باردار در آن بیش‌تر باشد، احتمال جمع آوری زوج الکترون-حفره‌هایی که خارج از ناحیه تهی تشکیل می‌شوند بیش‌تر است. لذا بازده تبدیل پیوند p-n بهبود می‌یابد.

در این پژوهش در تمام مراحل شبیه‌سازی از طیف انرژی بتای $^{90}\text{Y} + ^{90}\text{Sr}$ با متوسط انرژی MeV

0.549 استفاده شد. برد الکترون‌ها با متوسط انرژی MeV 0.549 در سیلیکون برابر $728 \mu\text{m}$ است.

براساس مطالب بیان شده چنانچه غلظت ناخالصی در سیلیکون نوع P از 10^{15} cm^{-3} و در سیلیکون نوع N از 10^{15} cm^{-3} کم‌تر باشد، طول پخش حامل اقلیت از برد الکترون‌ها با انرژی متوسط در سیلیکون بیش‌تر است و لذا بازده تبدیل پیوند p-n افزایش می‌یابد.

۶-۳ شبیه سازی باتری هسته‌ای بتاولتائیک و مقایسه آن با باتری هسته‌ای شارژ مستقیم در

حجم ثابت

هدف مقایسه‌ی باتری هسته‌ای شارژ مستقیم بر پایه چشمه رادیواکتیو ^{90}Sr با باتری هسته‌ای بتاولتائیک $^{90}\text{Sr} - \text{Si}$ در حجم ثابت است. بنابراین همان‌طور که در قبل بیان شد باتری هسته‌ای شارژ مستقیم بهینه شد. بهترین پارامترها برای باتری هسته‌ای شارژ مستقیم مورد مطالعه، استفاده از Be به عنوان کلکتور، فاصله بین چشمه و کلکتور $25\text{ }\mu\text{m}$ و ضخامت کلکتور $1400\text{ }\mu\text{m}$ است.

سپس در فاصله‌ی بین چشمه و کلکتور این باتری به جای خلاء ماده نیمرسانای سیلیکون قرار داده شد. در ادامه پارامترهای باتری مربوط به حالتی که سیلیکون بین چشمه و کلکتور قرار دارد (بتاولتائیک) محاسبه شد و با حالتی که بین چشمه و کلکتور خلاء است (شارژ مستقیم) مقایسه شد.

از آنجایی که مقایسه دو باتری در حجم ثابت انجام می‌شود، حداکثر ضخامتی که سیلیکون می‌تواند داشته باشد $1425\text{ }\mu\text{m}$ است. در ادامه تأثیر ضخامت سیلیکون بر جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز و حداکثر توان خروجی باتری هسته‌ای بتاولتائیک مورد بررسی قرار گرفت.

در نهایت مشخص شد هنگامی که ضخامت سیلیکون $728\text{ }\mu\text{m}$ است، باتری هسته‌ای بتاولتائیک دارای بیش‌ترین مقدار جریان، ولتاژ مدار باز و توان خروجی است.

همچنین در حجم ثابت، جریان اتصال کوتاه باتری هسته‌ای بتاولتائیک 3920 nA است در حالی که در باتری هسته‌ای شارژ مستقیم مقدار جریان اتصال کوتاه برابر 0.08997 nA است. حجم باتری هسته‌ای بتاولتائیک با حجم باتری هسته‌ای شارژ مستقیم یکسان است اما جریان اتصال کوتاه آن 44000 مرتبه بزرگتر از جریان اتصال کوتاه باتری هسته‌ای شارژ مستقیم است.

به عبارتی دیگر می‌توان گفت، با ثابت بودن مواردی از قبیل حجم، اکتیویته چشمه و ابعاد چشمه، استفاده از نیمرسانا در فاصله‌ی بین چشمه و کلکتور، مقدار جریان اتصال کوتاه را افزایش می‌دهد.

۴-۶ عواملی که در افزایش جریان اتصال کوتاه و بازده کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم بر

پایه چشمه رادیواکتیو ^{90}Sr تأثیر زیادی ندارند

بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام شده، مشخص شد که در باتری هسته‌ای مورد مطالعه، بررسی عوامل زیر در

افزایش مقدار جریان اتصال کوتاه یا افزایش بازده باتری تأثیر چندانی ندارند.

- تغییر شعاع کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم
- تغییر ارتفاع کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم
- تغییر همزمان شعاع و ارتفاع کلکتور باتری هسته‌ای شارژ مستقیم یا همان تغییر فاصله بین

چشمه و کلکتور در این باتری

- تغییر در ارتفاع پوشش سطح جانبی چشمه
- تغییر در ارتفاع زیرلایه چشمه
- تغییر فاصله سطح بالایی کلکتور از چشمه
- تغییر فاصله سطح جانبی کلکتور از چشمه
- تغییر فاصله سطح پایینی کلکتور از چشمه

مراجع

- [۱] محمدیان ل، شوقیان ش، (۱۳۸۵) "Mems"، نهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی برق، تهران.
- [۲] سلیمی ر، عباس پور ثانی ا، (۱۳۹۳)، پایان نامه کارشناسی ارشد "طراحی و شبیه سازی یک سنسور زاویه سنج از طریق تکنولوژی میکروماشین"، دانشکده فنی، دانشگاه صنعتی ارومیه.
- [۳] محمدیان م، آفریده ح، (۱۳۸۶)، پایان نامه کارشناسی ارشد "طراحی مفهومی و شبیه سازی باتری هسته ای مورد استفاده در ضربان سازهای مصنوعی قلب" دانشکده مهندسی هسته ای و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [4] Bose B, (1996) "Capacitive sensor interfaces" Electronical Engineering and Computer Sciencs University of California.
- [۵] محبوب جهرمی م، ابولقاسم آزاد ع، (۱۳۸۴) "طراحی شتاب سنج خازنی MEMS" نشریه دانشکده فنی جلد ۳۹، شماره ۶، صفحه ۷۴۵ تا ۷۵۲.
- [۶] فتحی پور م، فروزنده ب، (۱۳۹۵) "ملاحظات طراحی در ابزارهای MEMS برای خودرو سازی" دانشگاه شیراز.
- [7] Nathanson H.C, Wickstrom R.A (1965) "A Resonant-Gate Silicon Surface Transistor with High-Q Band-Pass Properties" **Appl. Phys. Lett.** 7, 4, pp. 84–86.
- [8] Wilfinger R.J, (1971), US patent 3614677A, "Electromechanical monolithic resonator" **issued Oct**, assigned to International Business Machines Corp.
- [9] Wilfinger R.J, Bardell P.H, Chhabra D.S (1968), "The Resonistor: A Frequency Selective Device Utilizing the Mechanical Resonance of a Silicon Substrate". **IBM J. Res. Dev.** 12, 1, pp.113–8.
- [10] Bergveld, Piet (1985), "The impact of MOSFET-based sensors" **Sensors and Actuators.** 8, 2, pp.109–127.
- [11] <http://homepages.cae.wise.edu/blancher/res/blanchardkorea.pdf>
- [12] Kumar, S, (2015) "Atomic Batteries: Energy from Radioactivity." **arXiv preprint arXiv: 1511.07427.**

- [13] <http://www.batteryuniversity.com/partone-3.htm>.
- [14] Lazarenko Y.V, Gusev V.V, and Pystovalov A.A, (1988) "Basic parameters of radionuclide thermoelectric generator" **Atomic Energy**, 2, 64, pp.131-136.
- [15] Prelas, M. A., C. L. Weaver, et al. (2014). "A review of nuclear batteries" **Progress in Nuclear Energy**, 75, pp.117-148
- [16] Nikolayevna Yakubova G, (2010), PhD.thesis "Nuclear Batteries with tritium and Promethium-147 Radioactive Sources" Department of Nuclear, Plasma and Radiological Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [17] Thomas A, (1955) "Nuclear batteries: types and possible uses" **Nucleonics (US)** Ceased publication 13.
- [18] Li H (2005), PhD.thesis "Radioisotope-powered self-reciprocating cantilever for micro power generation" Cornell University.
- [19] Shripad T. R and Thomas E. A, (2014) " Advances in Betavoltaic Power Sources" **J. Energy Power Sources**, 1, 6, pp. 321-329
- [20] Landis G. A, Bailey S. G, et al, (2012) "Non-solar photovoltaics for small space missions" **Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)**, IEEE.
- [21] https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_battery
- [22] Kramer J, (1924) "A new electronic battery" **The Electrician**, 93, pp.497.
- [23] Nikolayevna Yakubova G, (2010), PhD.thesis "Nuclear Batteries with tritium and Promethium-147 Radioactive Sources" Department of Nuclear, Plasma and Radiological Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [24] Butler P, Eidler P, et al, (1995) "**Handbook of batteries**", ed. D. Linden and TB Reddy, 3rd edn, McGraw-Hill, 39.
- [25] Prelas M, Boraas M, et al, (2016) "**Nuclear Batteries and Radioisotopes**" Potential Applications Potential Applications for Nuclear Batteries, Springer, pp. 285-305
- [26] Blanchard J, Lal A, León R. B. Y, et al, (2001) "A nuclear microbattery for MEMS devices" **Proc. 9th International Conference on Nuclear Engineering**, Nice.

[۲۷] سولفانیدس ن، (۱۳۷۱)، "اندازه گیری و آشکار سازی تابش‌های هسته‌ای"، جلد اول، دکتر

رحیم کوهی و محمد هادی هادی زاده یزدی، چاپ اول، انتشارات کتابستان، مشهد، ص ۱۸۳.

[۲۸] سولفانیدس ن، (۱۳۷۱)، "اندازه گیری و آشکار سازی تابش‌های هسته‌ای"، جلد اول، دکتر

- رحیم کوهی و محمد هادی هادی زاده یزدی، چاپ اول، انتشارات کتابستان، مشهد، ص ۱۸۰-۱۸۱.
- [۲۹] سولفانیدس ن، (۱۳۷۱)، "اندازه گیری و آشکار سازی تابش های هسته ای"، جلد اول، دکتر رحیم کوهی و محمد هادی هادی زاده یزدی، چاپ اول، انتشارات کتابستان، مشهد، ص ۱۹۶-۲۰۱.
- [30] Knoll G. F, (1999), "**Radiation Detectibn and Measurement**" Third Edition, John Wiley & Sons, Inc, pp. 49-52.
- [31] Turner J. E, (2007) "**Atoms, Radiation, and Radiation Protection**" WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, p.177.
- [32] Brownell L, (1961) "**Radiation uses in industry and science**" THE UNIVERSITY OF MICHIGAN, p.36.
- [۳۳] سولفانیدس ن، (۱۳۷۱)، "اندازه گیری و آشکار سازی تابش های هسته ای"، جلد اول، دکتر رحیم کوهی و محمد هادی هادی زاده یزدی، چاپ اول، انتشارات کتابستان، مشهد، ص ۳۵۸-۳۵۹.
- [34] SZE S. M, LEE M. K, (2012) "**Semiconductor Devices**" 3RD EDITION, JOHN WILEY & SONS, INC, p.34.
- [35] Yisong L, Yuqing Y, Yebing L, Hao L, Guanquan W, Rui H, Xiaoling X, Shunzhong L, (2014), "The radiation damage of crystalline silicon PN diode in tritium beta-voltaic battery" **Applied Radiation and Isotopes**, 90, pp.165-169.
- [۳۶] سولفانیدس ن، (۱۳۷۱)، "اندازه گیری و آشکار سازی تابش های هسته ای"، جلد اول، دکتر رحیم کوهی و محمد هادی هادی زاده یزدی، چاپ اول، انتشارات کتابستان، مشهد، ص ۳۶۰.
- [37] X-5 Monte Carlo Team, (2008), "**MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5**", vol.1, Los Alamos National Laboratory, pp1.
- [۳۸] کاسه سازی، حسن زاده م، (۱۳۹۴)، "آموزش کد MCNPX"، جلد اول، چاپ اول، مرکز آموزش و توسعه کدهای محاسباتی، تهران، ص ۱۳-۹.
- [۳۹] کاسه سازی، حسن زاده م، (۱۳۹۴)، "آموزش کد MCNPX"، جلد اول، چاپ اول، مرکز آموزش و توسعه کدهای محاسباتی، تهران، ص ۳۰-۲۷.
- [۴۰] کاسه سازی، حسن زاده م، (۱۳۹۴)، "آموزش کد MCNPX"، جلد اول، چاپ اول، مرکز آموزش

- [41] Los Alamos National Laboratory, (2000), "**Oak ridge national laboratory rsicc data library collection mcnp Data**", New Mexico, PP194-196.
- [42] Prelas M, Weaver C, Watermann M, Lukosi E, Schott R, Wisniewski D, (2014) "A review of nuclear batteries" **Progress in Nuclear Energy**, 75, pp.117-148.
- [43] J.N.Anno, **A direct-Energy Conversion Device Using Alpha Particles**, Nucl.News. 6,3 ,1962
- [44] J.H.Hinderer, Radioisotopic Impurities in Promethium-147 Produced at the ORNL High Flux Isotope Reactor, A Thesis Presented for partial fulfillment of requirements for the Master of Science The University of Tennessee, 2010
- [45] Jahangiri M. H & Tavakoli-Anbaran H, (2021) "Optimization and minimization of dimensions of direct charging nuclear battery based on ⁹⁰Sr radioactive source for use in Micro Electro Mechanical systems (MEMS)" **Arabian Journal for Science and Engineering**, 46, pp. 5921–5932.
- [46] Robley D. Evans, (1955), "**the atomic nucleus**", published by Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New York, pp. 593.
- [47] http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_electron_microscope.
- [48] Yakubova, G.N, (2010) "nuclear battery with tritium and promethium-147 radioactive sources" University of Illinois at Urbana-Champaign, p. 54.
- [49] Kollath R, (1956) "**Encyclopedia of Physics**" 21.ed, Flügge, Springer-Verlag, Berlin, p.232.
- [50] Malyshev E.K, et al, (1993) "Effects of surface state on the yield of true secondary electrons from a metal bombarded by photons and fast electrons" **Atomic Energy**, 74, 3, 262.
- [51] Jahangiri M. H, Tavakoli–Anbaran H, Movahedian Z, (2021) "Design and optimization of ⁹⁰Sr–Si betavoltaic nuclear battery and its comparison with a direct charge nuclear battery based on ⁹⁰Sr radioactive source" **Materials Science in Semiconductor Processing**, 128, 105743.
- [52] Neubert G, Rogaschewski S, (1980) "Backscattering coefficient measurements of 15 to 60 keV electron for solids at various angles of incidence" **Phys. Status Solidi**, 59, 35. [53] Herrmann R, Reimer L, (1984) "Backscattering coefficient of multicomponent specimens",

Scanning, 6, pp.20–29

[54] Assa A.M.D, Gomati M.M, (1998) "Backscattering coefficients for low energy electrons" **Scanning Microsc**, 12, 1, pp.185–192.

[55] Nikolayevna Yakubova G, (2010), PhD.thesis "Nuclear Batteries with tritium and Promethium-147 Radioactive Sources" Department of Nuclear, Plasma and Radiological Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign, p.19.

[56] Butera S, Lioliou G, Krysa B, Barnett A.M, (2016) "Temperature dependence of an AlInP ^{63}Ni betavoltaic cell", **J. Appl. Phys**, 120, 144501.

[57] Butera S, Lioliou G, Barnett A.M, (2017) "Temperature effects on gallium arsenide ^{63}Ni betavoltaic cell" **Appl. Radiat. Isot**, 125, pp. 42–47.

[58] XiaoBin T, Ding L. D, Peng Y, Da C, Optimization Design and Analysis of Si- ^{63}Ni Betavoltaic Battery, vol. 55, Science China Press and Springer, 2012, pp. 990–996, 4.

[59] Honsberg C, William A.D, Mark A, Chris W, (2005) "GaN betavoltaic energy converters" **IEEE Xplore**, pp.102–105.

[60] Yun-Peng L, Xiao-Bin T, Zhi-Heng X, Liang H, Chang-Ran G, Da C, (2014) "Energy deposition, parameter optimization, and performance analysis of space radiation voltaic batteries" **Nucl. Sci. Tech**, 25, S010402.

[61] Anderson B.L, (2005) "Fundamentals of Semiconductor Devices" **Mc Graw- Hill Higher Education**, Boston, pp.83–120.

[۶۲] سولفانی‌دس. ن، (۱۳۷۱)، "اندازه‌گیری و آشکار سازی تابش‌های هسته‌ای"، جلد اول، دکتر

رحیم کوهی و محمد هادی هادی زاده یزدی، چاپ اول، انتشارات کتابستان، مشهد، ص ۱۹۷.

[63] Hao L, Gaofei Z, Zheng Y, (2016) "Optimization design and simulation of a multi-source energy harvester based on solar and radioisotope energy sources" **Micromachines**, 7, 228.

[64] Rappaport P, (1954) "The electron-voltaic effect in p-n junctions induced by beta-particle bombardment" **Phys. Rev. E**, 93, 246.

[65] Waris A, Kusumawati Y, Alfarobi A.S, Aji I.K, Basar K, (2016) "Preliminary design of betavoltaic battery using Co-60 and Pm-147 with GaAs substrate" **AIP Conf. Proc**, 030053.

[66] Hang G, Amit L, (2003) "Nanopower betavoltaic micro batteries", **IEEE Xplore**, pp.36–39.

- [67] Oh K, Prelas M.A, Rothenberger J.B, Lukosi E.D, Jeong J, Montenegro D.E, et al, (2011) "Optimized slab and spherical betavoltaic systems utilizing sulfur-35, strontium-90, and yttrium-90" **Nucl. Technol. Fusion**, 179, pp.234–242.
- [68] Olsen L.C, (1993) "Review of betavoltaic energy conversion" **NASA. Lewis Research Center**, pp.256–267.
- [69] Butera S, Lioliou G, Barnett A.M, (2017) "Temperature effects on gallium arsenide ^{63}Ni betavoltaic cell" **Appl. Radiat. Isot**, 125, pp.42–47.
- [70] Prelas M, Boraas M, et al, (2016) "**Nuclear Batteries and Radioisotopes**" Potential Applications Potential Applications for Nuclear Batteries, Springer, p.4.
- [71] M.Ehrlich, J.S.Pruitt, C.G.Soaes ,Standard beta-particle and monoenergetic electron source for the calibration of beta-radiation protection instrumentation,U.S,Nuclear Regulatory Commission and U.S.Department of Commerce, 1985
- [72] B.Liu, K.P.Chen, N.P. Kherani, S.Zukotynski, A.B. Antoniazzi, Betavoltaics using scandium tritide and contact potential difference, Aplied Physics Letters, 92,2008
- [73] T.N.Nguyen, Q.T.Tran,V.P.Nguyen, Activity Concentrations of Sr-90 and Cs-137 in Seawater and Sediment in the Gulf of Tonkin, Vietnam, Journal of Chemistry, 2020
- [74] X.Jiaotong, X.Shaanxi, Design and analysis of nuclear battery driven by the external neutron source, Annals of nuclear energy,72,2014

[75] م.رنجبران، امکان سنجی افزایش بازده باتری هسته ای شارژ مستقیم. پایان نامه، دانشگاه صنعتی

شاهرود، ۱۳۹۳

[76] سولفانیدس ن، (۱۳۷۱)، "اندازه گیری و آشکار سازی تابش های هسته ای"، جلد اول، دکتر

رحیم کوهی و محمد هادی هادی زاده یزدی، چاپ اول، انتشارات کتابستان، مشهد، ص ۳۸۲.

Abstract

Today, MEMS technology (micro electro mechanical system) plays an important role in everyday life. One of the main objects in the design of MEMS devices is the use of a small dimension battery and long lifetime. Compared to solar systems and fossil power plants, the use of energy-source based on nuclear power has many advantages, including better environmental compatibility, longer life, higher energy density and small size design capabilities. Hence, nuclear batteries with a lifetime over 10 years are the best option for use in MEMS devices. In this research, radioisotope ^{90}Sr with a half-life of 28.6 years was considered as a radioactive source.

First, the ^{90}Sr cylindrical source was designed with the gold substrate and cover the side surface of the antimony. Then the radius and the optimum height of the source were examined. Then this optimized source was considered as a direct charge battery source. Subsequently, the effect of different positions of collector placement, side surface coating and substrate compared to each other on the efficiency of the direct charge nuclear battery was studied. In the next step, the effect of collector genus on the collector efficiency was investigated. Finally, it was clear that the best parameters for this nuclear battery are direct charging using Be as a collector, the distance between the source and the collector 25 μm and the thickness of the collector 1400 μm . Under these parameters, its short circuit current is 0.8997 nA. If this direct charge nuclear battery at the distance between the sources and the collector instead of the vacuum of the semiconductor, this battery turns into a beta voltaic battery. So, at first, the nuclear battery was optimized. Then, in a constant volume, the distance between the sources and the semiconductor collector was considered. In the next step, the parameters of the battery related to the state of the semiconductor between the sources and the collector (beta voltaic) were

calculated and compared with the source and the vacuum collector (direct charge).

It was found that the flow of short circuit of the nuclear battery is 3920 nA. This while in the nuclear battery is a direct charge of the short circuit current rate of 08997 nA. The volume of core battery beta voltaic is the same with the direct charge of the battery, but its short circuit current is 44,000 times larger than the short circuit of the nuclear battery. It can be found that, with the constant of cases such as volume, source activation and sources dimensions, the use of semiconductor in the distance between the sources and the collector increases the amount of short circuit flow.

It was also found that in a direct charge nuclear battery, which is located between the sources and the vacuum collector, such as, changing the radius and height of the collector, changing the collector's distance from the sources, changing the height of the source surface coating, the change in the height of the substrate, changing the upper level of the collector from the source, change the distance from the chloride surface of the source and changing the lower level of the collector from the sources does not significantly change in short circuit and collector's yield. Therefore, in these conditions, what affects the collector's yield is the change in the collector's material and its thickness.

Keywords: direct charging nuclear battery, beta-voltaic nuclear battery, MCNPX code, ^{90}Sr radioisotope, semiconductor, MEMS devices



Shahrood University of
Technology

Kharazmi International Campus

Ph.D. Thesis in Nuclear Physics

Design and optimization of ^{90}Sr betavoltaic nuclear battery for manufacturing and use in MEMS devices

By: Mohammad Hossein Jahangiri

Supervisor:

Dr. Hossein Tavakoli- Anbaran

February 2021