



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

طراحی و بهینه سازی باتری بتاولتائیک سیلیکونی به منظور کاربرد در محدوده دمایی وسیع

غلامرضا قاسمی نژاد^۱، فائزه رحمانی^{۲*}

^۱دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته ای
^{۲*}دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده فیزیک

چکیده:

در این مقاله طرح باتری بتاولتائیک مبتنی بر چشمه ^{63}Ni و نیمه‌هادی Si به منظور کاربرد در محدوده دمایی وسیع و شرایط محیطی سخت ارائه شده است. ضخامت بهینه چشمه، با شبیه‌سازی با $1/5 \text{ MCNP} \mu\text{m}$ بدست آمد. برای دستیابی به بیشترین توان خروجی، چگالی ناخالصی‌ها در ناحیه تابنده و پایه به ترتیب برابر $1e19 \text{ \#/cm}^3$ و $5e17 \text{ \#/cm}^3$ محاسبه شد. برای رسیدن به کارایی بهینه باتری برای تولید توان در محدوده دمایی $200\text{K}-400\text{K}$ بر اساس تغییرات دمایی طول پخش حامل‌های اقلیت، ضخامت $1 \mu\text{m}$ برای ناحیه تابنده و $85 \mu\text{m}$ برای ناحیه پایه در نظر گرفته شد. تغییر توان خروجی با افزایش دما بررسی شد لذا بر اساس دمای کاری توان باتری قابل محاسبه است.

کلید واژه: چشمه نیکل-۶۳، سلول بتاولتائیک، نیمه‌هادی سیلیکون، کد MCNP

مقدمه

با پیشرفت سریع تکنولوژی MEMS تقاضا برای منابع انرژی در ابعاد میکرومتر برای تأمین توان ادوات بسیاری مانند حسگرهای بیسیم، تراشه‌های پزشکی و همچنین تأمین توان ادوات که در شرایط محیطی سخت و دور از دسترس مانند ارتفاعات، اعماق دریا و تجهیزات ماهواره‌ای و ... افزایش پیدا کرده است [۱-۳]. چشمه‌های بتا گسیل با نیمه‌عمر و چگالی انرژی بالا، گزینه مناسبی برای تأمین توان قطعات الکترونیکی که نیازمند کارکرد طولانی و چگالی انرژی بالا هستند، می‌باشند. سلول بتاولتائیک یکی از انواع باتری‌های هسته‌ای می‌باشد که از چشمه بتا و اتصالات دیودی تشکیل شده و عملکرد مشابه سلول خورشیدی دارد. سلول بتاولتائیک با توجه به ساختار ساده و چگالی انرژی بالا، در شرایط محیطی سخت و دور از دسترس کارآمد می‌باشد. با توجه به کارکرد در شرایط دمایی مختلف، باتری بتاولتائیک باید در محدوده دمایی وسیعی از دما توان را تأمین کند لذا باید اثر تغییرات دمایی بر کلیه عوامل تأثیرگذار بر خروجی آن مورد بررسی قرار گیرد [۱،۳]. در این تحقیق به طراحی سلول بتاولتائیک با ساختار صفحه‌ای و در نظر گرفتن تغییرات دمایی پرداخته شده است. با استفاده از کد شبیه‌سازی مونت کارلو MCNP تراپرد ذرات گسیلی، در چشمه و نیمه-



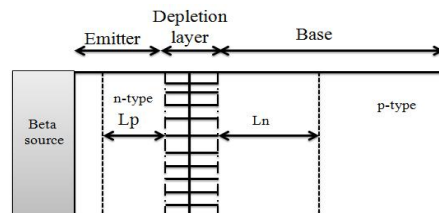
بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

هادی شبیه سازی شده و مقدار مناسب برای ضخامت چشمه محاسبه شده است. سپس با بررسی عوامل مؤثر بر توان خروجی و تغییرات دمایی این عوامل، مشخصات فیزیکی نیمه‌هادی ارائه شده است.

روش کار

در شکل ۱ ساختار سلول n^+p نشان داده شده است. n-type نشان دهنده ناحیه تابنده، p-type ناحیه پایه، L_p و L_n نشان دهنده طول پخش حامل‌ها هستند. ذرات بتا تابشی از چشمه با تخلیه انرژی خود در نیمه‌هادی باعث تولید الکترون و حفره می‌شوند. الکترون حفره‌های تولید شده در ناحیه تهی و در فاصله یک طول پخش حامل‌های اقلیت در دو طرف این ناحیه که به ناحیه تهی شده می‌رسند توسط میدان الکتریکی اتصال از یکدیگر جدا شده و باعث تولید ولتاژ و جریان الکتریکی می‌شوند.



شکل ۱- ساختار سلول بتا ولتائیک

ساخت اتصال p-n با استفاده از سیلیکون ارزان و قابل دسترس است لذا از سیلیکون با اتصال p-n در این تحقیق برای شبیه سازی استفاده شده است [۳]. یکی از موارد کلیدی در انتخاب چشمه، آستانه تخریب نیمه‌هادی است. از آنجا که انرژی بیشینه چشمه ^{63}Ni (انرژی میانگین ۱۷ keV و انرژی بیشینه ۶۶ keV) کمتر از انرژی آستانه تخریب سیلیکون است، نگرانی در مورد افت خروجی سلول در مدت زمان کارکرد وجود ندارد. همچنین ^{63}Ni با نیمه عمر برابر ۱۰۰ سال، گزینه مناسبی برای کارکرد های طولانی مدت می‌باشد. توان خروجی سلول از رابطه ۱ بدست می‌آید [۱]:

$$P = I_{sc} V_{oc} FF \quad (1)$$

که در آن V_{oc} ولتاژ مدار باز سلول، I_{sc} جریان اتصال کوتاه و FF عامل پر کننده می‌باشد. جریان اتصال کوتاه سلول از حل معادلات نفوذی حامل‌های اقلیت (رابطه ۲) در دو طرف ناحیه تهی شده و جریان تولید شده در آن ناحیه بدست می‌آید:

$$\frac{d^2(V_i)}{dx^2} = \frac{V_i}{L^2} - \frac{G_0 e^{-ax}}{eD} \quad (2)$$



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

در روابط فوق، انواع حامل اقلیت (الکترون یا حفره)، D ثابت پخش، L طول پخش حامل‌های اقلیت، Δi چگالی حامل‌های اضافی تزریق شده، G_0 انرژی تخلیه شده ذرات بتا در ضخامت صفر نیمه هادی، α ضریب جذب ذرات بتا و \square انرژی لازم برای تولید الکترون حفره می‌باشد. D از رابطه انیشتین $(D = \mu kT/q)$ بدست می‌آید که k ثابت بولتزمن q واحد بارالکتریکی T دما و μ تحرک حامل‌ها می‌باشد. تحرک به دما و چگالی ناخالصی‌ها بستگی دارد که برای تعیین آن از مدل Arora استفاده شده است [۴]. طول پخش حامل‌ها از رابطه ۳ بدست آمده است:

$$L = \sqrt{Dt} \quad (3)$$

که در آن t طول عمر حامل‌های اقلیت است که برای تعیین تغییرات دمایی طول عمر و وابستگی چگالی ناخالصی‌ها، از مدل Klaassen استفاده شده است [۵]. ولتاژ مدار باز سلول نیز از رابطه ۴ بدست می‌آید که در آن I_0 جریان نشتی اتصال می‌باشد [۲]:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(1 + \frac{I_{sc}}{I_0}\right) \quad (4)$$

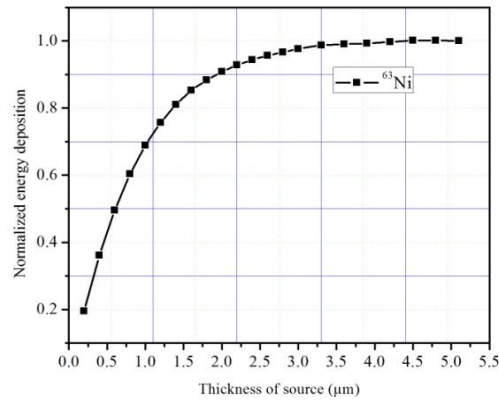
نتایج

یکی از عوامل اصلی که باید در طراحی چشمه مد نظر قرار گیرد اثر خود جذبی چشمه است. با افزایش ضخامت چشمه تعداد ذرات گسیلی افزایش می‌یابد اما با توجه به برد کم ذرات بتا، برخی از ذرات گسیلی از چشمه به سطح آن نمی‌رسند و یا بخشی از انرژی خود را در چشمه تخلیه می‌کنند، لذا باید در طراحی ضخامت مناسب با توجه به انرژی خروجی از چشمه انتخاب شود. برای بررسی اثر خود جذبی، انرژی تخلیه شده در نیمه‌هادی با هندسه صفحه‌ای با سطح مقطع مربعی با مساحت 1 cm^2 استفاده شد. انرژی تخلیه شده در سیلیکون نسبت به ضخامت‌های مختلف چشمه در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که انتظار می‌رود با افزایش ضخامت چشمه تعداد ذرات خروجی از سطح چشمه افزایش یافته، اما در ضخامت‌های بالاتر انرژی تخلیه شده در سیلیکون با تغییرات ضخامت (بیشتر از $3 \mu\text{m}$) ثابت می‌شود. در ضخامت $1/5 \mu\text{m}$ انرژی تخلیه شده در نیمه هادی برابر 80% درصد مقدار آن در ضخامت $3 \mu\text{m}$ است یعنی با نصف شدن ضخامت چشمه انرژی خروجی تنها 20% درصد کاهش یافته است، لذا از ضخامت $1/5 \mu\text{m}$ برای چشمه استفاده شده است (شکل ۲). در شکل ۳ انرژی تخلیه شده در ضخامت‌های مختلف سیلیکون ناشی از چشمه با اکتیویته واحد و ضخامت بهینه بدست آمده نشان داده شده است و ضرایب G_0 و α (رابطه ۲) با در نظر گرفتن اکتیویته 1 Ci بترتیب برابر $6/59 \times 10^7 \text{ eV/cm}^3 \text{ s}$ و $3627/04 \text{ cm}^{-1}$ بدست آمده است.

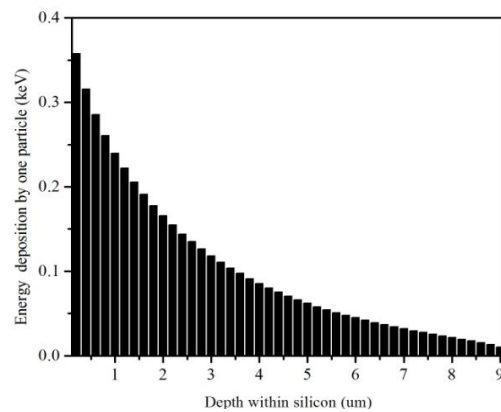


بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

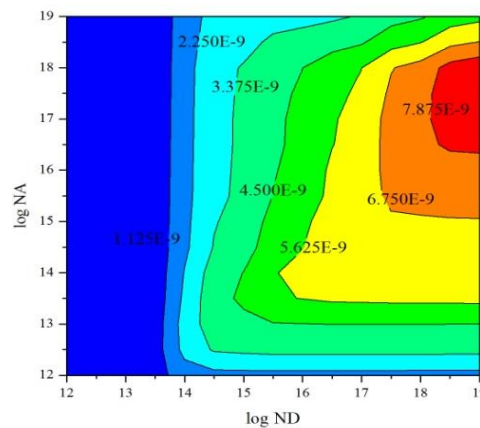
۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان



شکل ۲- انرژی انباشته شده در سیلیکون بر حسب ضخامت چشمه ^{63}Ni



شکل ۳- انرژی تخلیه شده در ضخامت‌های مختلف سیلیکون



شکل ۴- تغییرات توان خروجی (بر حسب وات) نسبت به تغییرات چگالی ناخالصی‌ها در ناحیه تابنده و پایه

به منظور بررسی تأثیر چگالی ناخالصی‌ها بر توان، ضخامت اولیه ناحیه تابنده و پایه به ترتیب برابر $0.5 \mu\text{m}$ و $150 \mu\text{m}$ (با توجه به انرژی تخلیه شده در نیمه هادی) در نظر گرفته شده و تغییرات توان خروجی نسبت به تغییرات چگالی ناخالصی با در نظر گرفتن چشمه‌ای با اکتیویته 4mCi در دمای 300K



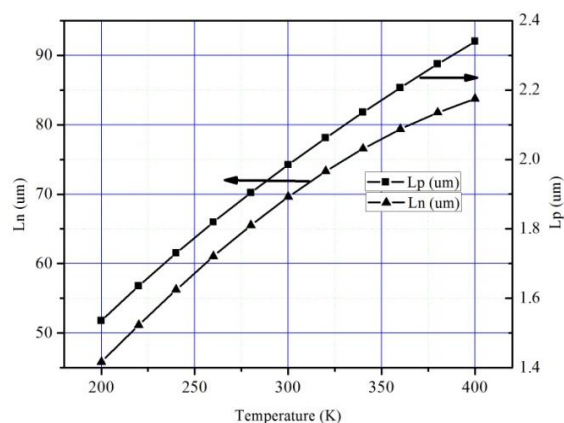
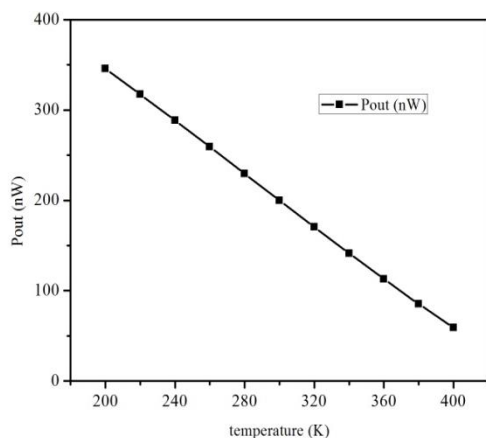
بست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

۳۰۰ در چگالی ناخالصی $1e19 \text{ #/cm}^3$ در ناحیه تابنده و $5e17 \text{ #/cm}^3$ در ناحیه پایه بدست آمده است (شکل ۴).

همانطور که ذکر شد ناحیه مؤثر سلول برابر ضخامت ناحیه تهی شده و فاصله یک طول پخش حامل اقلیت در دو طرف این ناحیه می باشد، لذا طول ناحیه تابنده و پایه باید بگونه ای انتخاب شود که بیشترین انرژی تخلیه شده در این ناحیه باشد تا توان خروجی بیشترین مقدار را داشته باشد. همچنین با توجه به اینکه سلول باید در شرایط محیطی سخت کار آمد باشد، باید تغییرات دمایی عوامل ذکر شده نیز بر خروجی مورد بررسی قرار گیرد.

مقادیر طول پخش الکترون و حفره و همچنین طول ناحیه تهی شده متناظر با مقادیر بهینه چگالی ناخالصی بدست آمده در دمای 300 K بترتیب برابر $69/61 \text{ } \mu\text{m}$ ، $1/9 \text{ } \mu\text{m}$ و $0/05 \text{ } \mu\text{m}$ می باشد. با توجه به ضخامت بسیار کم طول ناحیه تهی شده نسبت به طول پخش حامل ها، از تغییرات آن در طراحی چشم پوشی شده است. تغییرات دمایی طول پخش حامل های اقلیت، متناظر با مقادیر بدست آمده برای چگالی ناخالصی بدست آمده در شکل ۵ نشان داده شده است. طول پخش حامل های اقلیت با افزایش دما افزایش می یابد لذا با توجه به افت نمایی آهنگ تولید الکترون حفره نسبت به مکان ورودی ذرات بتا و تضعیف ذرات تابشی با نفوذ در نیمه هادی، طول ناحیه تابنده باید برابر یا کمتر از طول پخش حفره در این ناحیه در نظر گرفته شود تا بیشترین حفره های تولید شده در قسمت تابنده در ناحیه فعال سلول قرار داشته باشند. طول پخش حفره در دمای 300 K برابر $200 \text{ } \mu\text{m}$ است لذا مقدار مناسب برای ضخامت ناحیه تابنده برابر $1 \text{ } \mu\text{m}$ می باشد. همچنین با توجه به اینکه طول پخش الکترون در دمای 400 K تقریباً برابر $85 \text{ } \mu\text{m}$ این مقدار برای ضخامت ناحیه پایه در نظر گرفته شده است.





بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

شکل ۶- تغییرات دمایی توان

شکل ۵- تغییرات دمایی طول پخش حامل‌ها

خروجی

تغییرات توان خروجی سلول بر اساس مقادیر در نظر گرفته شده در محدوده دمایی ۲۰۰ K تا ۴۰۰ K با بیشینه اکتیویته قابل دسترس با توجه به حجم بهینه چشمه تقریباً برابر ۷۵ mCi است، در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود توان خروجی با افزایش دما، کاهش می‌یابد که این مساله ناشی از کاهش ولتاژ مدار باز با افزایش دما است [۲]. با معلوم بودن منحنی کالیبراسیون توان باتری، می‌توان در دماهای مختلف توان باتری را محاسبه کرد. بر اساس نتایج بدست آمده، باتری طراحی شده قابلیت کارکرد در محدوده دمایی وسیعی را دارد و می‌توان از آن در شرایط محیطی سخت مانند ارتفاعات و یا اعماق دریا و یا تجهیزات فضایی که تغییرات دما در آن شرایط زیاد است کار آمد می‌باشد.

بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق به طراحی یک باتری بتا ولتائیک مبتنی بر چشمه ^{63}Ni و نیمه‌هادی سیلیکون به منظور کاربرد در محدوده دمایی و کارکرد در شرایط محیطی سخت پرداخته شده است. بر اساس شبیه سازی با کد MCNP مقدار بهینه برای ضخامت چشمه نیکل برابر $1/5 \mu\text{m}$ بدست آمد. به منظور دست یابی به بیشترین توان خروجی چگالی ناخالصی‌ها در ناحیه تابنده و پایه به ترتیب برابر $1e19 \#/\text{cm}^3$ و $5e17 \#/\text{cm}^3$ محاسبه شد. برای بهینه و کارآمد بودن در محدوده دمایی ۲۰۰ K-۴۰۰ K با توجه به تغییرات دمایی و رفتار نمایی انرژی تخلیه شده در نیمه‌هادی طول پخش حامل‌های اقلیت مقدار $1 \mu\text{m}$ برای ناحیه تابنده و $85 \mu\text{m}$ برای ناحیه پایه در نظر گرفته شده است. با توجه به کاهش توان خروجی با افزایش دما، کاربرد آن در دماهای پایین مناسب‌تر است.

مراجع

- [1] Tang XiaoBin, Ding Ding, Liu YunPeng & Chen Da, 'Optimization design and analysis of Si63Ni betavoltaic battery', Sci China Tech Sci, Vol.55 No.4, pp.990-996, 2012
- [2] Guanquan Wang et al. The effect of temperature changes on electrical performance of the betavoltaic cell. Applied Radiation and Isotopes, 68, pp. 2214-2217, 2010
- [3] Liu, Y., et al., Optimization and temperature effects on sandwich betavoltaic microbattery. Sci China Technological Sciences, 2014. 57(1): p. 14-18
- [4] Arora, N.D., et al., Electron and Hole Mobilities in Silicon as a function of Concentration and Temperature. J. IEEE Trans Electron Devices. 29, pp. 292-295, 1982



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

[5] Klaassen D. B. M.A unified mobility model for device simulation-II. Temperature dependence of carrier mobility and lifetime. J. Solid-State Electronics. 35 (7), 961-967 1992