



مقایسه عملکرد حسگر دمایی بتاولتائیک مبتنی بر چشمه نیکل-۶۳ و پرومتیوم-۱۴۷

غلامرضا، قاسمی نژاد؛ فائزه، رحمانی*

دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتوها

چکیده

در این تحقیق مقایسه رفتار دمایی ولتاژ مدار باز سلول بتاولتائیک (نیمه هادی $p-n$ سیلیکون) با استفاده از چشمه ^{147}Pm و ^{63}Ni ، کاربرد آن به عنوان حسگر دمایی مورد بررسی قرار گرفت. برای محاسبات ترابرد ذرات بتا از کد MCNP استفاده شد. همچنین اثر اکتیویته‌های مختلف دو چشمه و تغییرات زمانی اکتیویته بر محدوده و حساسیت دمایی سلول بررسی شد. با توجه به نتایج بدست آمده، نوع چشمه مستقل از اکتیویته تأثیر چندانی بر خروجی حسگر دمایی ندارد و در صورت استفاده از اکتیویته‌های بالاتر چشمه می‌توان محدوده دمایی بزرگتری را اندازه‌گیری کرد؛ لذا با توجه به نیمه عمر دو چشمه، خروجی حسگر نسبت به چشمه ^{63}Ni پایدارتر می‌باشد و استفاده از آن به عنوان چشمه در حسگر دمایی پیشنهاد می‌شود.
کلید واژه: سلول بتاولتائیک، پرومتیوم-۱۴۷، نیکل-۶۳، حسگر دمایی، کد مونت کارلوی MCNP

۱- مقدمه

چشمه‌های بتا با نیمه‌عمر و چگالی بالای انرژی گزینه مناسبی برای استفاده در موارد کاربردی حسگرهای بیسیم می‌باشند، که نیازمند کارکرد طولانی در شرایط دسترسی سخت هستند [۱]. یکی از چالش‌های طراحان حسگرهای بیسیم تأمین توان این حسگرها می‌باشد [۲]. یکی از خصوصیات سلول بتاولتائیک تغییرات خطی ولتاژ مدار باز (V_{oc}) آن با دما می‌باشد که باعث سهولت اندازه‌گیری دما می‌شود و می‌توان از این کمیت برای سنجش دما استفاده کرد. با توجه به کاربرد دوگانه سلول بتاولتائیک می‌توان از آن هم به عنوان تأمین‌کننده توان و هم حسگر دمایی استفاده کرد تا در انرژی مصرفی حسگر نیز صرفه‌جویی شود [۳]. حساسیت و محدوده دمایی اندازه‌گیری شده از مشخصات اصلی حسگرهای دمایی می‌باشد لذا در طراحی حسگر دمایی بتاولتائیک نیز باید عوامل اثرگذار بر این دو کمیت مانند انرژی ذرات گسیل شده، میزان اکتیویته چشمه و تغییرات آن نسبت به زمان در نظر گرفته شود.

در این مقاله برای شبیه‌سازی ترابرد ذرات بتا در نیمه‌هادی و آهنگ تولید الکترون-حفره، از کد MCNP استفاده شده است. بر اساس وابستگی دمایی عوامل تأثیرگذار بر خروجی سلول که توسط مدل‌های تجربی و تئوری مشخص شده‌اند، مقادیر بهینه چگالی ناخالصی‌ها در نیمه‌هادی برای دستیابی به بیشترین V_{oc} خروجی و بدنبال آن دستیابی به



بیشترین محدوده دمایی اندازه‌گیری، محاسبه شده است. همچنین تأثیر اکتیویته‌های مختلف و همچنین تغییرات زمانی اکتیویته بر خروجی سلول برای دو چشمه ^{63}Ni و ^{147}Pm مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- روش کار

در سلول بتا ولتائیک ذرات گسیلی از چشمه بتا انرژی خود را در نیمه‌هادی تخلیه می‌کنند و باعث تولید هزاران زوج الکترون-حفره (EHP) می‌شوند. EHP های تولید شده در ناحیه تهی و EHP های تولید شده در فاصله یک طول پخش حامل اقلیت از ناحیه تهی زمانی که به این ناحیه می‌رسند، توسط میدان الکتریکی داخلی اتصال p-n از یکدیگر جدا شده و باعث تولید ولتاژ و جریان الکتریکی می‌شوند. در این تحقیق از سیلیکون به عنوان نیمه‌هادی و از ^{147}Pm (نیمه‌عمر ۲/۶ سال، انرژی میانگین ۶۵ keV، انرژی بیشینه ۲۲۰ keV) و چشمه ^{63}Ni (نیمه‌عمر ۱۰۰/۱ سال، انرژی میانگین ۱۷ keV، انرژی بیشینه ۶۶ keV) به عنوان چشمه بتا استفاده شده است. تغییرات V_{oc} در نیمه‌هادی نسبت به دما خطی است [۳] که با رابطه ۱ بدست می‌آید:

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

که در آن n ضریب ایده‌آلی، J، جریان نشتی دیود، J_{sc} جریان اتصال کوتاه، k ثابت بولتزمن، q واحد بار الکتریکی و T دما می‌باشد. جریان نشتی دیود وابستگی دمایی شدیدی دارد که این وابستگی ناشی از تغییرات دمایی چگالی حامل‌های ذاتی (n_i) با دما می‌باشد که از رابطه ۲ محاسبه می‌شود [۳]:

$$n_i = 3.87 \times 10^{16} T^{3/2} e^{-E_g/2kT} \quad (2)$$

جریان اتصال کوتاه دیود با حل تحلیلی معادلات پخش حامل‌های اقلیت بدست می‌آید:

$$\frac{d^2(\Delta i)}{dx^2} = \frac{\Delta i}{L_i^2} - \frac{G_0 e^{-\alpha x}}{\epsilon D_i} \quad (3)$$

در روابط فوق، i نوع حامل اقلیت، الکترون یا حفره، D ثابت پخش، L طول پخش حامل‌های اقلیت، Δi چگالی حامل‌های اضافی تزریق شده، G، انرژی تخلیه شده ذرات بتا در ضخامت صفر نیمه‌هادی، α ضریب جذب ذرات بتا و ϵ انرژی لازم برای تولید EHP می‌باشد. مقدار D از رابطه انیشتین ($D = \mu kT/q$) بدست می‌آید که μ تحرک حامل‌ها می‌باشد و برای تعیین وابستگی دمایی تحرک برای الکترون و حفره از مدل Arora استفاده می‌شود [۴]:

$$\mu_n(T, N) = 88 \left(\frac{T}{300}\right)^{-0.57} + \frac{7.4e8T^{-2.33}}{1 + \frac{N}{1.26e17} \times 0.88 \times \left(\frac{T}{300}\right)^{-0.35}} \quad (4)$$

$$\mu_p(T, N) = 54.3 \left(\frac{T}{300} \right)^{-0.57} + \frac{1.36e8 T^{-2.33}}{1 + \frac{N}{2.35e17} \times 0.88 \times \left(\frac{T}{300} \right)^{-0.35}} \quad (5)$$

در رابطه فوق N چگالی ناخالصی‌ها در ناحیه مورد نظر می‌باشد.

طول پخش حامل‌های اقلیت، مسافت میانگین طی شده توسط حامل‌های اقلیت در نیمه‌هادی است و با توجه به رابطه ۳ تأثیر مستقیم بر خروجی سلول دارد. با افزایش طول پخش حامل‌های اقلیت، EHP‌هایی که در خارج از ناحیه تهی شده تولید می‌شوند، شانس بیشتری برای رسیدن به ناحیه تهی شده دارند که باعث بهبود عملکرد سلول می‌شوند. طول پخش حامل‌ها از رابطه ۶ بدست می‌آید:

$$L_{p,n} = \sqrt{D_{p,n} t_{p,n}} \quad (6)$$

که در آن t طول عمر حامل‌های اقلیت است و برای مشخص کردن وابستگی دمایی طول عمر الکترون و حفره به

ترتیب از روابط ۷ و ۸ استفاده می‌شود [۵]:

$$t_n^{-1} = (0.4 + 3e - 13 \times N)(300/T)^{1.77} + (1.83e - 31 \times N^2)(T/300)^{1.18} \quad (7)$$

$$t_p^{-1} = (0.4 + 11.76e - 13 \times N)(300/T)^{0.57} + (1.83e - 31 \times N^2)(T/300)^{0.72} \quad (8)$$

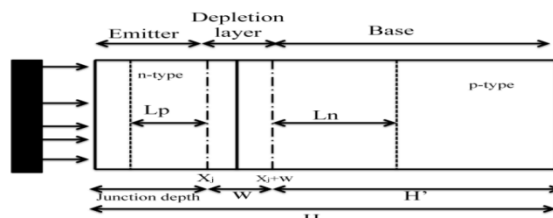
۳- نتایج

همانطور که ذکر شد V_{oc} سلول می‌تواند عاملی برای سنجش دما باشد، لذا در طراحی حسگر دمایی باید عوامل اثر گذار بر حساسیت و محدوده دمایی اندازه‌گیری در نظر گرفته شود. محاسبات مربوط به تراپرد ذرات بتا در نیمه‌هادی و چشمه توسط کد MCNP محاسبه شده است.

۳-۱- تعیین ساختار سلول

در شکل ۱ ساختار سلول نشان داده شده است که n نشان‌دهنده ناحیه تابنده، p ناحیه پایه و w ناحیه تهی شده

است. طول اتصال با x_j نشان داده شده و L_n و L_p نشان دهنده طول پخش حامل‌های اقلیت هستند.



شکل ۱- ساختار سلول بتا ولتائیک

ضخامت ناحیه تابنده و پایه و نیز چگالی ناخالصی‌ها در این نواحی تأثیر مستقیم بر خروجی سلول دارند. با توجه

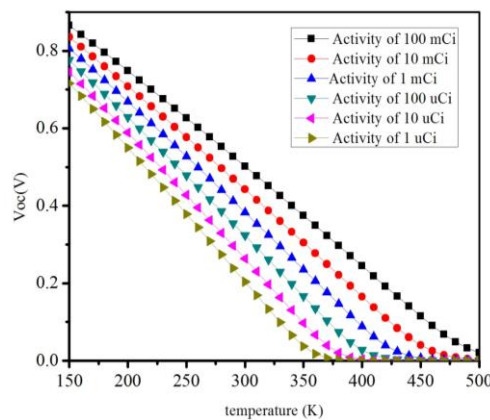
به نتایج تجربی به دست آمده و شیب منفی تغییرات V_{oc} نسبت به دما، با افزایش V_{oc} محدوده دمایی قابل اندازه‌گیری



وسیع تر می‌شود. با توجه به روابط ذکر شده، بیشترین V_{oc} خروجی در چگالی ناخالصی $N_D=8e19(\#/cm^3)$ در ناحیه تابنده و $N_A=4e18(\#/cm^3)$ در ناحیه پایه بدست آمده است. بر اساس رابطه ۶ طول پخش حامل‌ها با افزایش دما افزایش می‌یابد. طول پخش حامل‌ها بر اساس چگالی ناخالصی بدست آمده در ناحیه تابنده و پایه در دمای 150 K به ترتیب برابر $0.5\ \mu\text{m}$ و $30\ \mu\text{m}$ است. ناحیه فعال حسگر برابر ناحیه تهی شده به اضافه فاصله یک طول پخش حامل‌های اقلیت در دو طرف این ناحیه می‌باشد. بر اساس مقدار طول پخش حفره، ضخامت مناسب برای ناحیه تابنده برابر $0.5\ \mu\text{m}$ است. طول پخش حامل‌ها در ناحیه پایه در دمای 500 کلوین برابر $90\ \mu\text{m}$ است لذا مقدار طول ناحیه پایه نیز برابر $90\ \mu\text{m}$ در نظر گرفته شده است.

۳-۲- اکتیویته‌های مختلف

از دیگر عواملی که بر خروجی سلول اثرگذار است اکتیویته چشمه می‌باشد. ضرایب G و α در رابطه ۳ با در نظر گرفتن چشمه ای با اکتیویته 1 Ci برای چشمه ^{63}Ni به ترتیب برابر $6.59e17\text{ eV/cm}^2\text{s}$ و $3627/0.4\text{ cm}^{-1}$ و برای چشمه ^{147}Pm برابر $2.73e17\text{ eV/cm}^2\text{s}$ و $450/58\text{ cm}^{-1}$ بدست آمده است. اکتیویته کمتر باعث تولید کمتر EHP و در نتیجه کاهش جریان اتصال کوتاه و نیز کاهش V_{oc} حسگر می‌شود. این اثر در شکل ۲ برای اکتیویته‌های مختلف چشمه ^{63}Ni نشان داده شده است. کاهش اکتیویته باعث افزایش حساسیت دمایی و البته از طرفی کاهش گستره دمایی اندازه‌گیری می‌شود. بیشترین دمای قابل اندازه‌گیری در اکتیویته 100 mCi برابر 480 K است که این مقدار در اکتیویته 0.001 mCi به 340 K کاهش می‌یابد. حساسیت دمایی حسگر بتاوتائیک نیز با کاهش اکتیویته افزایش می‌یابد (جدول ۱).



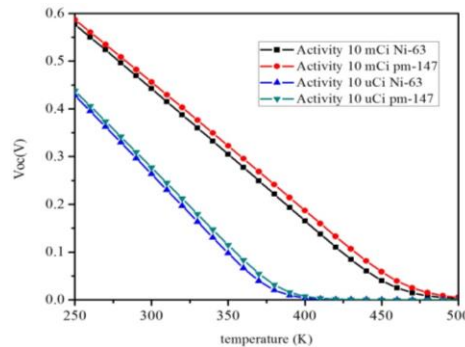
شکل ۲- محدوده دمایی اندازه‌گیری در اکتیویته‌های مختلف چشمه ^{63}Ni

جدول ۱- حساسیت دمایی حسگر در اکتیویته‌های مختلف دو چشمه

اکتیویته (mCi)	۱۰۰	۱۰	۱	۰.۱	۰.۰۱	۰.۰۰۱
^{63}Ni	-۲.۴۲	-۲.۶۲	-۲.۸۱	-۳.۰۱	-۳.۲۱	-۳.۴۱
^{147}Pm	-۲.۳۷	-۲.۵۷	-۲.۷۷	-۲.۹۷	-۳.۱۷	-۳.۳۷

۳-۳- V_{oc} نسبت به چشمه‌های مختلف

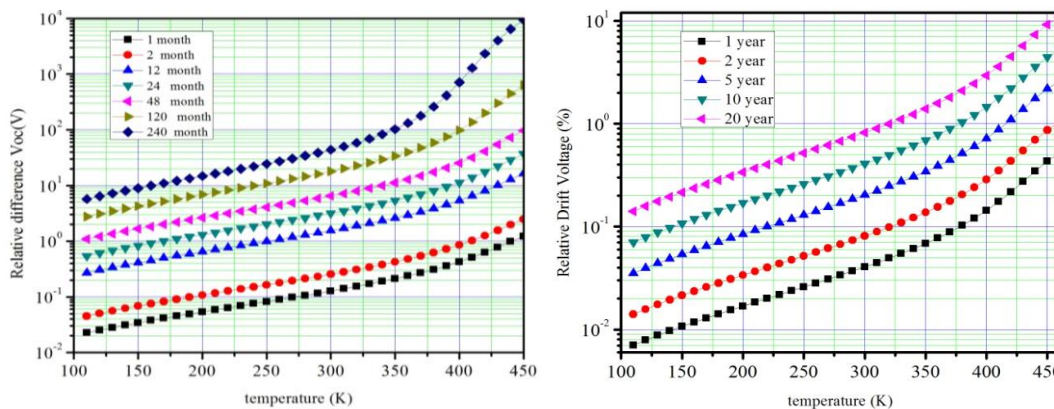
نوع چشمه مورد استفاده از دیگر عواملی است که می‌تواند بر V_{oc} اثر گذار باشد در شکل ۳ تغییرات V_{oc} در محدوده دمایی ۲۵۰ تا ۵۰۰ K برای دو چشمه در دو اکتیویته ۱۰ mCi و ۱۰ μ Ci نشان داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده V_{oc} حسگر برای چشمه ^{137}Pm بیشتر از چشمه ^{63}Ni است. با توجه به ناحیه خطی تغییرات V_{oc} در اکتیویته برابر، نوع چشمه تغییرات چندانی در محدوده دمایی اندازه‌گیری ندارد. همانطور که در جدول ۱ نشان داده حساسیت دمایی اندازه‌گیری نیز تغییرات قابل ملاحظه‌ای با نوع چشمه ندارد. انرژی میانگین و بیشینه انرژی چشمه ^{137}Pm تقریباً سه برابر چشمه ^{63}Ni است و با توجه شکل ۲ که نشان دهنده اکتیویته‌های مختلف با نسبت ۱۰ برابر است تغییرات بدست آمده با نسبت ۳ برابر دور از انتظار نیست.



شکل ۳- تغییرات V_{oc} حسگر نسبت به دو چشمه در اکتیویته‌های مختلف

۳-۴- تغییرات زمانی اکتیویته

یکی دیگر از عواملی که در حسگر دمایی بتا و لثائیک باید مد نظر قرار گیرد تغییرات زمانی اکتیویته می‌باشد. بر اساس شکل ۲، V_{oc} حسگر نسبت به تغییرات اکتیویته حساس است و لذا باید در طراحی حسگر اثر تغییرات زمانی مد نظر قرار گیرد. در شکل ۴ و ۵ تغییرات نسبی V_{oc} در دوره‌های زمانی ۱ تا ۲۰ سال برای چشمه ^{63}Ni و دوره‌های زمانی ۱ تا ۲۴۰ ماه برای چشمه ^{137}Pm با اکتیویته ۱۰ mCi نشان داده شده است. با توجه به نتایج تغییرات زمانی V_{oc} در چشمه ^{137}Pm بدلیل نیمه‌عمر پایین‌تر، بسیار بیشتر از چشمه ^{63}Ni است که در صورت استفاده نیازمند کالیبراسیون دوره‌ای بیشتری است.



شکل ۴- اختلاف ولتاژ نسبی ایجاد شده با ^{63}Ni با اکتیویته 10 mCi شکل ۵- اختلاف ولتاژ نسبی ایجاد شده با ^{147}Pm با اکتیویته 10 mCi

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق به مقایسه عملکرد یک حسگر دمایی بتاولتائیک با استفاده از نیمه‌هادی Si و چشمه‌های ^{63}Ni و ^{147}Pm پرداخته شد. برای دستیابی به بیشترین محدوده دمایی اندازه‌گیری مقدار چگالی ناخالصی‌ها در دو ناحیه تابنده و پایه برابر $N_D = 8 \times 10^{19} (\#/cm^3)$ و $N_A = 4 \times 10^{18} (\#/cm^3)$ بدست آمد. ضخامت ناحیه تابنده و پایه بر اساس طول پخش حامل‌های اقلیت انتخاب شد. محدوده و حساسیت دمایی حسگر نسبت به تغییرات اکتیویته متغیر است و در اکتیویته‌های بالاتر می‌توان محدوده دمایی بالاتری را اندازه‌گیری کرد. نوع چشمه در اکتیویته‌های برابر اثر چندانی بر محدوده دمایی قابل اندازه‌گیری ندارد. بدلیل نیمه عمر کمتر چشمه ^{147}Pm نسبت به چشمه ^{63}Ni تغییرات زمانی V_{oc} حسگر بیشتر است، لذا استفاده از چشمه ^{63}Ni بدلیل پایداری بالاتر خروجی نسبت به زمان مناسب‌تر می‌باشد.

۵- مراجع

- [۱] Tang et al., Optimization design and analysis of Si^{147}Ni betavoltaic battery, Sci China Tech Sci, ۵۵ (۴), p. ۹۹۰-۹۹۶, ۲۰۱۲
- [۲] Knight et al., Energy options for wireless sensor nodes Sensors, ۸(۱۲), p. ۸۰۳۷-۸۰۶۶, ۲۰۰۸
- [۳] Wang et al., The effect of temperature changes on electrical performance of the betavoltaic cell. Applied Radiation and Isotopes, ۶۸, p. ۲۲۱۴-۲۲۱۷, ۲۰۱۰
- [۴] Arora et al., Electron and Hole Mobilities in Silicon as a function of Concentration and Temperature. IEEE Trans Electron Devices. ۲۹, p. ۲۹۲-۲۹۵, ۱۹۸۲
- [۵] Klaassen., A unified mobility model for device simulation- II. Temperature dependence of carrier mobility and lifetime. Solid-State Electronics. ۳۵ (۷), ۹۶۱-۹۶۷, ۱۹۹۲