



# بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

## بهینه‌سازی پارامترهای باتری بتاولتائیک سیلیکونی مبتنی بر دیود سد شاتکی

حسین خسروی نیا<sup>۱</sup>، فائزه رحمانی<sup>۲\*</sup> و فریدون عباسی دوانی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتوها

<sup>۲</sup> دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده فیزیک

### چکیده:

در این مقاله، پارامترهای بهینه به منظور طراحی یک باتری بتاولتائیک مبتنی بر دیود سد شاتکی تعیین شده است. برای این منظور سیلیکون با سطح مقطع یک سانتی‌متر مربع در ساختار دیود سد شاتکی برای جمع‌آوری حامل‌های تولیدی ناشی از اکتیویته‌ی ۱۰ میلی‌کوری از چشمه‌ی نیکل-۶۳ مورد بررسی قرار گرفتند در انتها به ازای پارامترهای معرفی شده‌ی بهینه، مقادیر چگالی جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز و بازدهی تبدیل بتاولتائیک به ترتیب برابر با  $16.7/0.27$  و  $1/18\%$  محاسبه شده‌اند.

**کلیدواژه:** باتری بتاولتائیک، سد شاتکی، نیکل-۶۳، سیلیکون، بهینه‌سازی.

### مقدمه

باتری بتاولتائیک به دلیل دارا بودن چگالی انرژی بالا، طول عمر بالا، قابلیت مجتمع‌سازی آسان، کوچک‌سازی و ... گزینه‌ی بسیار مناسبی برای مقاصد توان پایینی از قبیل شبکه‌های بیسیم، حسگرهای دمایی و سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی می‌باشد [i,ii]. این باتری‌ها از قرار دادن یک چشمه‌ی رادیوایزوتوپی بتازا در مجاورت یک نیمه‌هادی پیوندی مناسب (اتصالات p-n, p-i-n و یا شاتکی) تشکیل می‌شود [iii]. اساس کار باتری‌های بتاولتائیک مشابه سلول‌های خورشیدی، جمع‌آوری حامل‌های تولیدشده (الکترون-حفره) توسط میدان الکتریکی ذاتی شکل گرفته در اتصال است.

در این مقاله، با استفاده از چشمه‌ی نیکل-۶۳ و براساس شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو با کد MCNP4C و معادلات حالت درون نیمه‌هادی سیلیکون، پارامترهای بهینه‌به منظور طراحی یک باتری بتاولتائیک مبتنی بر دیود سد شاتکی تعیین شده‌اند. لازم به ذکر است که در این مطالعه برخلاف برخی از کارهای اخیر صورت گرفته در این حوزه، به‌جای استفاده از انرژی متوسط، از طیف انرژی ذرات بتا استفاده شده است [iv, v].

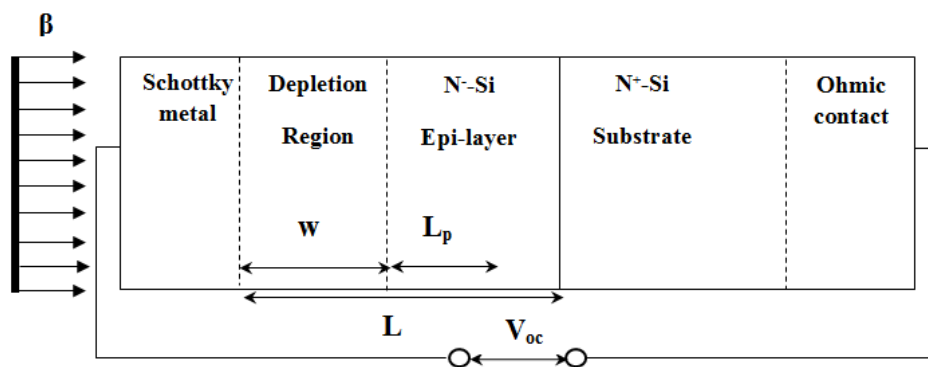
### مواد و روش‌ها



## بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

**Error! Unknown switch argument.** سطح مقطعی از باتری بتاولتائیک طراحی شده را نشان می‌دهد که در آن  $\beta$  ذرات بتای گسیلی از چشمه  $^{63}\text{Ni}$  می‌باشد. هم‌چنین  $W$  عرض ناحیه‌ی تخلیه و  $L_p$  طول پخش حامل‌های اقلیتی حفره درون شبه‌لایه‌ی سیلیکون نوع- $n$  با داپت پایین می‌باشند که به ترتیب از روابط ۱ و ۲ به دست می‌آیند **Error! Unknown switch argument.** [vi i ]



شکل ۱: سطح مقطعی از باتری بتاولتائیک طراحی شده مبتنی بر دیود سد شاتکی (ابعاد واقعی نیست)

$$w = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \phi_i}{qN_D}} \quad (1)$$

$$L_p = \sqrt{\frac{kT}{q} \left(130 + \frac{370}{1 + \left(\frac{N_D}{8E17}\right)^{1.25}}\right) \cdot \frac{1}{7.8E - 13N_D + 1.8E - 31N_D^2}} \quad (2)$$

در روابط اخیر  $\epsilon_s$ ،  $q$ ،  $N_D$  و  $kT$  به ترتیب ثابت دی‌الکتریک، بار الکتریکی، چگالی ناخالصی دهنده، ثابت بولتزمنو دمای مطلق بر حسب کلوین می‌باشند. هم‌چنین  $\phi_i$  پتانسیل شکل گرفته در عرض ناحیه‌ی تخلیه بوده که از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$\phi_i = \phi_B - V_t \ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right) \quad (3)$$

که در آن  $V_t$  ولتاژ حرارتی ( $0.025 \text{ eV}$ )،  $N_C$  چگالی موثر حالت‌ها در نوار رسانش نیمه‌هادی و  $\phi_B$  ارتفاع سد شاتکی است که با توجه به تابع کار فلز شاتکی ( $\phi_M$ ) و الکترون افینیتی نیمه‌هادی ( $\chi$ ) مطابق رابطه‌ی **Error! Unknown switch argument.** تعیین می‌شود.

$$\phi_B = \phi_M - \chi \quad (4)$$

برای یک باتری بتاولتائیک مبتنی بر دیود سد شاتکی، چگالی جریان اتصال کوتاه ( $J_{SC}$ ) از حل معادله‌ی پخش حامل‌ها درون نیمه‌هادی و از مجموع چگالی‌های جریان در نواحی تخلیه ( $J_D$ ) و شبه‌لایه نوع- $N$  ( $J_N$ ) به دست می‌آید **Error! Unknown switch argument.** [vi i ]



## بست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

$$J_{SC} = J_D + J_N = \varphi q N_{e-h} (1 - \exp(-w/L_a)) + \varphi q N_{e-h} \left( \frac{L_p L_a}{L_a^2 - L_p^2} \times \left\{ \coth\left(\frac{L-w}{L_p}\right) - \frac{L_p}{L_a} \right\} \times \exp(-w/L_a) - \frac{\exp(-L/L_a)}{\sinh(L/L_p)} \right) \quad (5)$$

که در آن  $\varphi$ ،  $L_a$  و  $L$  به ترتیب بیانگر اکتیویته، برد توقف ذرات بتا و ضخامت ناحیه فعال (نشان داده شده در **Error! Unknown switch argument.** می باشند. هم چنین برای یک باتری بتاولتائیک ولتاژ مدار باز ( $V_{oc}$ ) و بازدهی ( $\eta$ ) به ترتیب از روابط **Error! Unknown switch argument.** و **Error! Unknown switch argument.** تعیین می شوند.

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(1 + \frac{J_{sc}}{J_0}\right) \quad (6)$$

$$\eta(\%) = \frac{FF \times V_{oc} \times I_{sc}}{P_{in}} \times 100 \quad (7)$$

که در آن  $P_{in}$  توان کل ورودی به قطعه توسط چشمه‌ی رادیوایزوتوپی است. هم چنین  $J_0$  چگالی جریان نشتی و  $FF$  فاکتور پرکننده می باشند که به ترتیب مطابق روابط **Error! Unknown switch argument.** و **Error! Unknown switch argument.** **Error! Unknown switch argument.** تعریف می شود.

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{nkT}\right) \quad (8)$$

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(1 + \frac{J_{sc}}{J_0}\right) \quad (9)$$

### بحث و نتیجه گیری

براساس روابط تحلیلی بخش قبل، عملکرد باتری بتاولتائیک مبتنی بر سد شاتکی، متأثر از فلز شاتکی (جنس و ضخامت)، تعداد حامل های تولیدی ( $N_{e-h}$ )، برد توقف ذرات بتا ( $L_a$ )، ضخامت ناحیه‌ی فعال ( $L$ )، عرض ناحیه‌ی تخلیه ( $W$ ) و طول پخش حامل اقلیتی حفره در شبه لایه‌ی نوع-N ( $L_p$ ) است. بنابراین برای محاسبه‌ی بازدهی تبدیل، این پارامترها باید بررسی و تعیین شوند.

با توجه به روابط بخش قبلی، ولتاژ مدار باز به شدت، تابع فلز شاتکی است لذا فلزات شاتکی با تابع کار بالا باید انتخاب شوند. از طرفی دیگر، بواسطه‌ی تضعیف ذرات بتا در فلز، ضخامت فلز شاتکی باید کمینه باشد. بنابراین نیکل با ضخامت ۱۰۰ نانومتر به عنوان فلز شاتکی انتخاب شد.

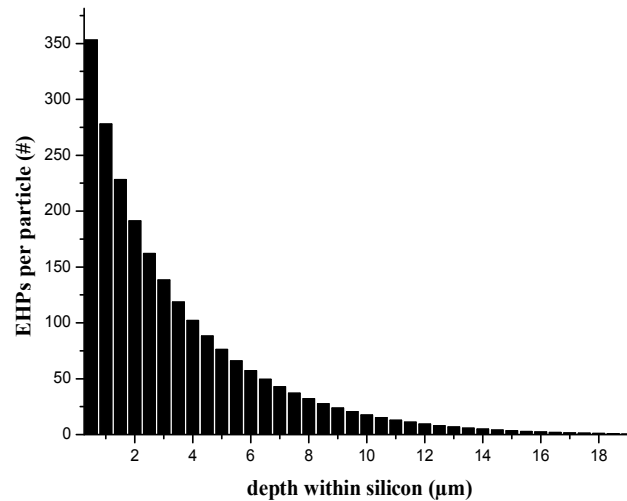
براساس شبیه سازی با کد MCNP4C (شکل ۲)، متوسط تعداد حامل های تولیدی درون سیلیکون ( $N_{e-h}$ ) از تقسیم متوسط انرژی به جای گذاشته شده توسط یک ذره بتا درون سیلیکون ( $E_{dep}$ ) بر متوسط انرژی یونش ( $\square$ )، برابر با ۲۲۰۰ حامل محاسبه شد. هم چنین با توجه به اینکه بیش از ۹۵٪ از انرژی ذرات بتا در ضخامت های کمتر از ۹/۵



# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

میکرومتر به جای گذاشته می‌شود، این ضخامت به عنوان برد توقف ذرات بتای گسیلی از چشمه‌ی نیکل-۶۳ درون سیلیکون تعیین شد.



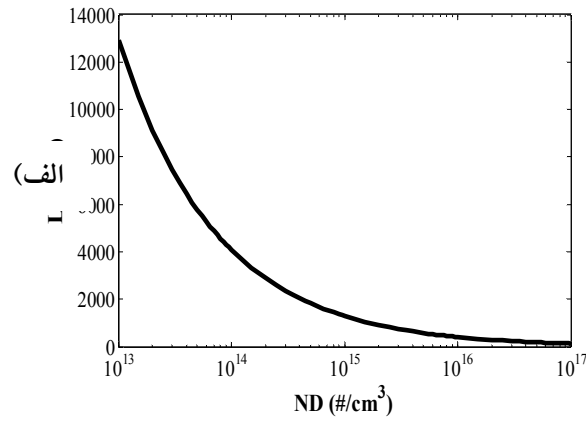
شکل ۲: متوسط انرژی به جای گذاشته شده در سیلیکون به ازای یک ذره بتای گسیلی از چشمه‌ی نیکل-۶۳

همچنین وابستگی عرض ناحیه‌ی تخلیه و طول پخش حفره در سیلیکون با چگالی ناخالصی ( $N_D$ ) در **Error!** **Unknown switch argument.** نشان داده شده است. همان طور که از این شکل پیداست این مقادیر با افزایش  $N_D$  کاهش می‌یابند. شایان ذکر است که وقتی  $N_D$  برابر با  $1e13$  ( $\#/cm^3$ ) باشد، عرض ناحیه تخلیه تقریباً برابر با  $9/5$  میکرومتر (برابر با برد توقف ذرات بتا) خواهد بود.

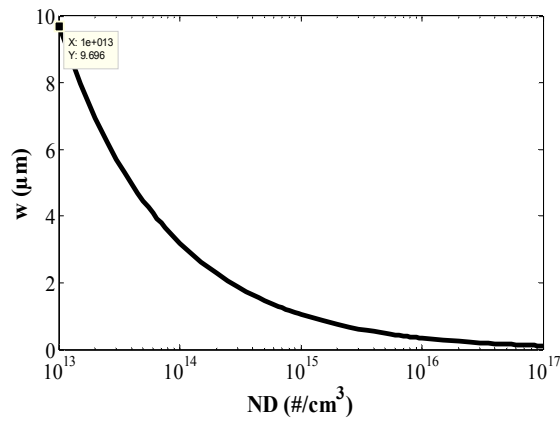


# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان



(ب)



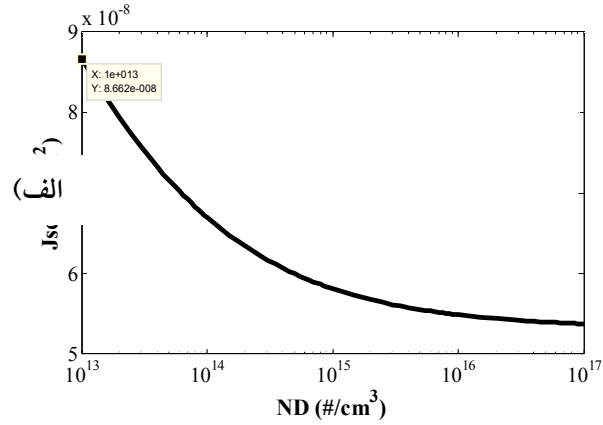
شکل ۳: الف) عرض ناحیه‌ی تخلیه و ب) طول پخش حفره در سیلیکون برحسب  $N_D$

در انتها نیز عملکرد الکتریکی باتری به‌ازای اکتیویته‌ی  $10 \text{ mCi/cm}^2$  از چشمه‌ی نیکل-۶۳ در **Error!** **Unknown switch argument.** نشان داده شده است.

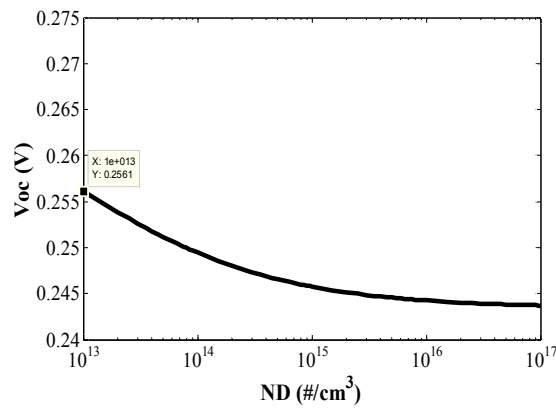


# بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان



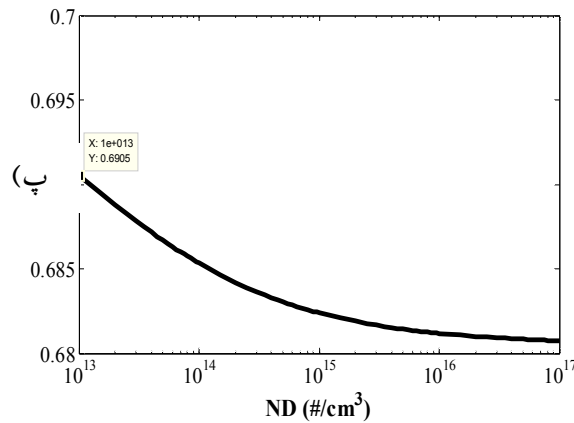
(ب)



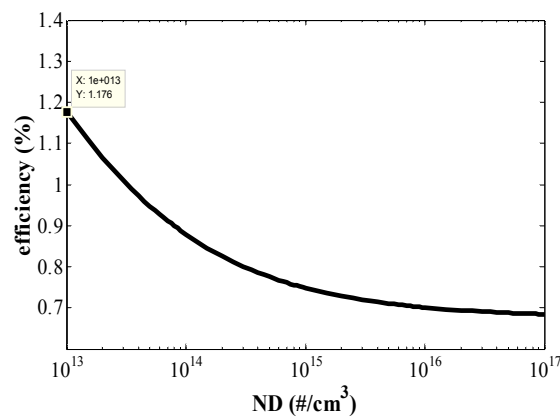


# بیست و یکمین کنفرانس هشتاد و یکم ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان



(ت)



شکل ۴: الف) چگالی جریان اتصال کوتاه، ب) ولتاژ مدار باز، پ) فاکتور پرکننده و ت) بازدهی باتری بتاولتائیک

برحسب  $N_D$

براساس **Error! Unknown switch argument.** عملکرد باتری با افزایش  $N_D$  دچار افت می‌شود. از طرفی بالاترین بازدهی تبدیل بتاولتائیک وقتی حاصل می‌شود که عرض ناحیه‌ی تخلیه برابر با برد توقف ذرات بتا درون سیلیکون باشد، زیرا احتمال جمع‌آوری حامل‌های تولیدی درون ناحیه‌ی تخلیه بواسطه‌ی وجود میدان الکتریکی ذاتی در این ناحیه، ۱۰۰ درصد است. بنابراین به‌ازای عرض ناحیه‌ی تخلیه ۹/۵ میکرومتر (معادل با برد توقف ذرات بتا و یا  $N_D \approx 1e13$  (#/cm<sup>3</sup>))، بیشینه مقادیر برای چگالی جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز، فاکتور FF و بازدهی تبدیل به ترتیب برابر با  $87/6nA/cm^2$ ، ۰/۲۶ V، ۰/۶۹ و ۱/۱۸٪ به دست می‌آیند. در انتها نیز به طور خلاصه، پارامترهای بهینه برای طراحی باتری بتاولتائیک سیلیکونی مبتنی بر دیود سد شاتکی در جدول ۱ آورده شده‌اند.



# بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

جدول ۱: پارامترهای بهینه‌ی برای طراحی باتری بتا ولتائیک پیشنهادی مبتنی بر دیود سد شاتکی

نیکل	جنس فلز شاتکی
$0.1 \mu\text{m}$	ضخامت فلز شاتکی
$11 \mu\text{m}$	ضخامت شبه‌لایه سیلیکون نوع-N (ضخامت ناحیه فعال)
$10^{13} \text{ (#/cm}^3\text{)}$	چگالی ناخالصی شبه‌لایه سیلیکون نوع-N
$400 \mu\text{m}$	زیر لایه‌ی سیلیکون

مراجع:

- [i]. LI D.-R., et al. 2012. Betavoltaic Battery Conversion Efficiency Improvement Based on Interlayer Structures. J. CHIN. PHYS. LETT. 29 (7), 0781021-0781024.
- [ii]. GhasemiNejad G. R., et al., 2014. Design and optimization of beta-cell temperature sensor based on  $63\text{Ni-Si}$ . J. Applied Radiation and Isotopes. 86, 46-51.
- [iii]. Olsen L.C., 1993. Review of betavoltaic energy conversion. In NASA Conference Publication. NASA.
- [iv]. Qiao, D.-Y., et al., 2011. A Micro Nuclear Battery Based on SiC Schottky Barrier Diode. J. Microelectromechanical systems. 20(3), 685-690.
- [v]. Li, X.-Y., et al., 2011.  $63\text{Ni}$  schottky barrier nuclear battery of 4H-SiC. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, pp. 173-176.
- [vi]. Qiao, D.-Y., et al., 2008. Demonstration of a 4H SiC Betavoltaic Nuclear Battery Based on Schottky Barrier Diode. J. CHIN. PHYS. LETT, pp. 3798-3800.
- [vii]. XiaoBin T., et al., 2012. Optimization design and analysis of  $63\text{Ni-Si}$  betavoltaic battery. J. Sci China Tech Sci. 55 (4), 990-996