

بررسی عمق نفوذ طیف بتای نیکل ۶۳ در سیلیکون به روش مونت کارلو با بهره‌گیری از کد MCNPX

داود قاسم‌آبادی* و مسعود عبدالله‌زاده

گروه فیزیک، دانشکده و پژوهشکده علوم پایه، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران.

*تهران، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، دانشکده و پژوهشکده علوم پایه، گروه فیزیک، کدپستی: ۱۶۹۸۷۱۵۴۶۱

پست الکترونیکی: Davood.Ghasemabadi@gmail.com

چکیده

در این پژوهش، طیف انرژی بتای نیکل ۶۳ به صورت طیف کامل انرژی، انرژی متوسط طیف و انرژی ماکزیمم طیف جهت بررسی عمق نفوذ در سیلیکون در نظر گرفته شده است. محاسبات انجام شده به روش مونت کارلو با بهره‌گیری از کد MCNPX در یک هندسه مشخص انجام گردید؛ در ادامه توان توقف الکترون با انرژی مختلف در سیلیکون با استفاده از کد محاسباتی ESTAR محاسبه گردید. نتایج بدست آمده توافق خوبی باهم دارند. محاسبات انجام شده در طراحی قطعات نیمه‌هادی آشکارسازها و دزیمترهای هسته‌ای قابل استفاده است.

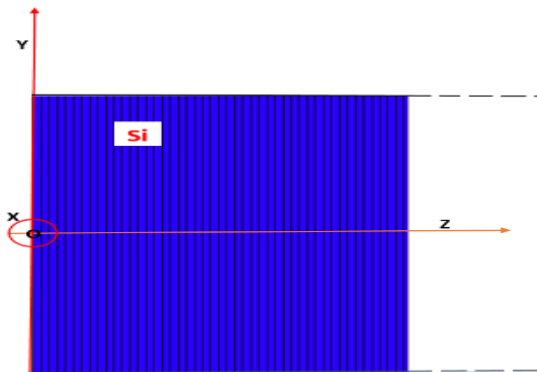
کلیدواژگان: طیف انرژی بتا، نیکل ۶۳، عمق نفوذ، کد MCNPX، کد محاسباتی ESTAR.

۱. مقدمه

انرژی ماکزیمم E_{max} ، متشکل از الکترون‌هایی است که دارای طیف انرژی پیوسته هستند که از صفر تا انرژی بیشینه E_{max} تغییر می‌کند. برای بسیاری از محاسبات ذرات بتا با یک میانگین انرژی، به صورت یک‌سوم انرژی بیشینه طیف ذرات بتا در نظر گرفته می‌شود. تخمین دقیق‌تر محاسبه انرژی میانگین طیف بتا در مرجع [۱] انجام شده است. در اغلب واپاشی‌های بتا، هسته نهایی در حالت برانگیخته است و بنابراین پرتوهای گاما به همراه ذرات بتا گسیل می‌شوند. تعدادی هسته‌ها وجود دارند به‌طور مستقیم به حالت پایه واپاشی می‌کنند و به اصطلاح چشمه‌های گسیلنده خالص بتا هستند. [۲] تعدادی از این چشمه‌ها در جدول (۱) به ترتیب از

معمول‌ترین چشمه‌های الکترون‌های سریع، رادیو ایزوتوپ‌هایی هستند که با گسیل بتای منفی واپاشی می‌کنند. این فرآیند به صورت ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + \beta^- + \nu^-$ است؛ که X و Y به ترتیب هسته‌های اولیه و نهایی و ν^- معرف آنتی‌نوترینو است. هسته پس‌زن Y با انرژی پس‌زنی بسیار پایینی تولید می‌شود؛ که معمولاً پایین‌تر از آستانه تولید یونش است. تنها ذره یوننده قابل توجهی که در واپاشی بتا تولید می‌شود، الکترون سریع یا همان ذره بتا است. تفاوت عملی بین الکترون و بتای منفی این است که یک باریکه الکترون با انرژی T متشکل از الکترون‌هایی است که هر یک از آن‌ها دارای انرژی جنبشی T است. ولی در یک باریکه ذرات بتا با

شده مطابق شکل (۱) است. چشمه نقطه‌ای بتازای روی یک سطح مکعب مستطیل در وسط آن قرار داده شده است. چشمه بتازای در ابتدا به صورت جهتی در جهت مثبت محور Z و در مرحله بعد به صورت ایزوتروپیک، برای محاسبات در نظر گرفته شده و در مبدأ مختصات قرار داده شده است. ابعاد سیلیکون مکعب مستطیل شکل، به ابعاد $50 \times 500 \times 500$ میکرومتر در نظر گرفته شده است.



شکل (۱): هندسه شبیه‌سازی شده در MCNP.

ضخامت ۵۰ میکرومتری به ۱۰۰ قسمت مساوی تقسیم شده و هر قسمت (سلول) با عرض ۵ میکرومتر و طول و ارتفاع ۵۰۰ میکرومتر می‌باشد. انرژی بجای گذاشته حاصل از ذرات بتا چشمه نیکل ۶۳ در هر سلول توسط کد محاسبه می‌گردد. آخرین سلولی که انرژی در آن به جای نهاده شده است مشخص می‌شود. از روی آخرین سلول میزان برد الکترون بابا تقریب ± 0.25 میکرون بدست می‌آید. چشمه گسیلنده ذرات بتا در این تحقیق از ایزوتوپ ^{63}Ni با طیف شکل (۲) جهت شبیه‌سازی در کد مورد استفاده قرار گرفته است. ^{63}Ni دارای انرژی متوسط و ماکزیمم به ترتیب $17/4$ و $66/9$ کیلو الکترون ولت می‌باشد. [۶]

چپ به راست نام ایزوتوپ، نیمه عمر، انرژی بیشینه، انرژی میانگین طیف، انرژی میانگین محاسبه شده و هسته دختر تولیدی نشان داده شده است. [۳]

جدول (۱): تعدادی از چشمه‌های بتازای خالص [۳].

| Isotope | Half-Life | E_{\max} | $E_{\beta_{\text{av}}}$ | E_{α} | Daughter Isotope |
|---------|-------------|------------|-------------------------|--------------|------------------|
| S-35 | 87.51 days | 167.47 keV | 55.8 keV | 53.1 keV | Cl-35 |
| Sr-90 | 28.8 years | 546 keV | 182 keV | 167 keV | Y-90 |
| Y-90 | 2.67 days | 2.28 MeV | 760 keV | 945 keV | Zr-90 |
| Pm-147 | 2.6 years | 224 keV | 74.6 keV | 61.93 keV | Sm-147 |
| Ni-63 | 100 years | 65.9 keV | 22 keV | 17 keV | Cu-63 |
| H-3 | 12.32 years | 18.6 keV | 6.2 keV | 5.6 keV | He-3 |

ایزوتوپ ^{63}Ni از جمله چشمه‌های بتازای خالص می‌باشند؛ که در کاربردهای مختلف به عنوان چشمه گسیلنده الکترون مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از کاربردهای سیلیکون استفاده آن‌ها در ساخت قطعات الکترونیکی است. تحلیل و آنالیز انرژی بجای گذاشته ذرات بتا در نیمه‌رساناها، تخمین عمق نفوذ آن‌ها، در طراحی خاص قطعات الکترونیکی حائز اهمیت است. محققین زیادی از روش‌های متفاوتی از قبیل معادله برد، روش تحلیلی، روش مونت کارلو و کد MCNPX برای تعیین انرژی بر جای گذاشته و عمق نفوذ ذرات بتا استفاده کرده‌اند. [۴] و [۵] کار کمتری روی انرژی کامل طیف بتا انجام شده است. در این پژوهش از کد MCNPX برای مدل جزئیات ترابرد ذرات بتا در سیلیکون استفاده شده است.

۲. روش کار

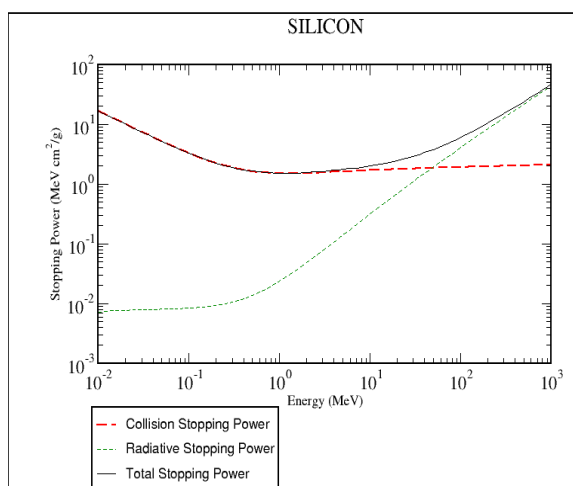
در این مقاله برای محاسبات و شبیه‌سازی مونت کارلو از کد MCNPX ورژن (۲/۷) استفاده گردید. هندسه شبیه‌سازی

با توجه به شکل های (۳) و (۴) تاریخچه 10^7 با خطای قابل قبول مورد پذیرش قرار گرفت؛ و محاسبات کد با این تاریخچه انجام گردید. نتایج بدست آمده عمق نفوذ ذرات بتا در سیلیکون برحسب میکرومتر در جدول (۲) نشان داده شده است.

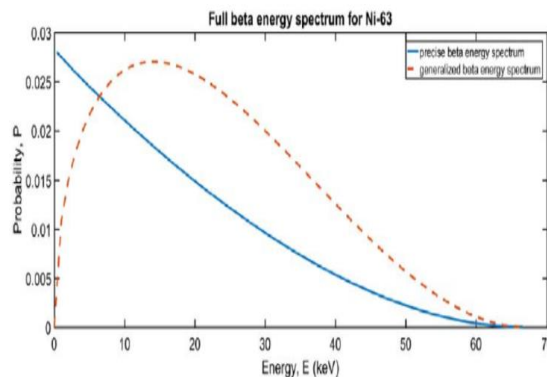
جدول (۲): نتایج بدست آمده از محاسبات MCNP.

| محاسبات MCNP | مشخصات چشمه | چشمه ^{63}Ni |
|--------------------|-------------------------------------------------|-----------------------|
| 0.5 ± 0.25 | تک انرژی با انرژی متوسط 17.4 KeV | |
| 3.6 ± 0.25 | تک انرژی با انرژی ماکزیمم 66.9 KeV | |
| $2.4/0.5 \pm 0.25$ | با طیف تمام انرژی ($0 - 66.9 \text{ KeV}$) | |

توان توقف سیلیکون با استفاده از کد ESTAR¹ به صورت شکل (۵) برای انرژی های مختلف الکترون محاسبه گردید. محور افقی انرژی برحسب (MeV) و محور عمودی توان توقف برحسب (MeV cm²/gr) می باشد. [۷]



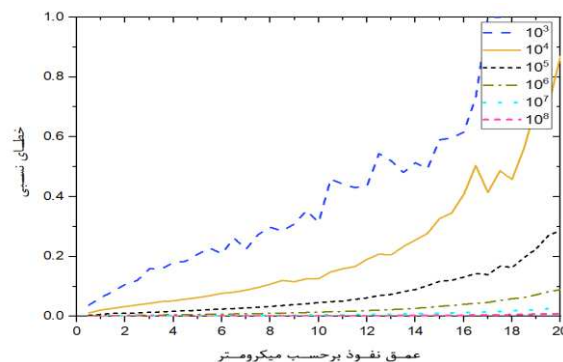
شکل (۵): توان توقف الکترون در سیلیکون با استفاده از کد ESTAR برای انرژی های مختلف.



شکل (۲): طیف بتای تمام انرژی نیکل ۶۳ [۶].

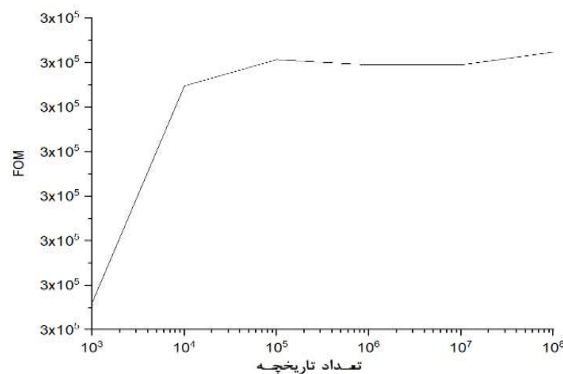
۳. بحث و نتایج

جهت هم گرایی و اعتمادپذیری نتایج شبیه سازی با کد MCNP و تعیین بهترین تاریخچه با خطای قابل قبول در محاسبات خطای نسبی برای تاریخچه های مختلف و عمق نفوذ (برحسب میکرومتر) محاسبه و نتایج در شکل (۴) نشان داده شده است.



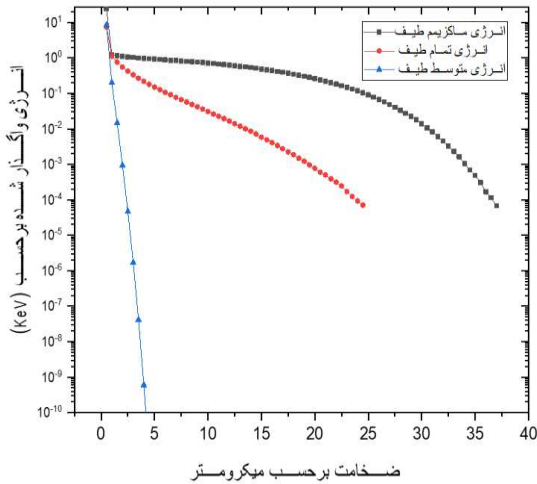
شکل (۳): خطای نسبی برای تاریخچه های مختلف و عمق نفوذ (برحسب میکرومتر).

مقدار FOM ضریب شایستگی برای تاریخچه های مختلف مطابق شکل (۴) توسط کد محاسبه گردید.

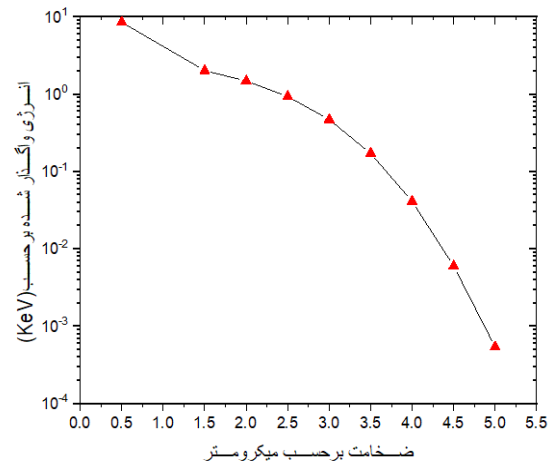


شکل (۴): محاسبه FOM برای تاریخچه های مختلف.

¹Stopping Powers and Ranges for Electrons



شکل (۹): انرژی و گذار شده ذرات بتا برای چشمه ایزوتروپیک.

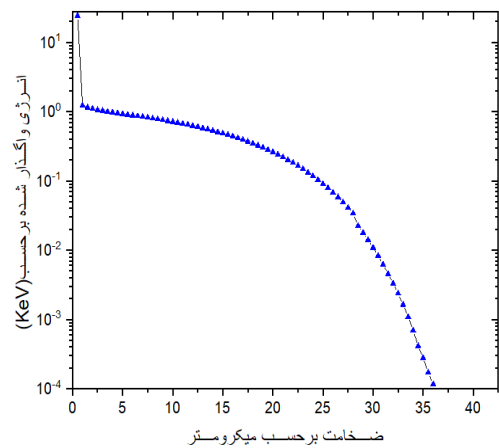


شکل (۶): انرژی و گذار شده ذرات بتا با انرژی متوسط ۱۷/۴

کیلو الکترون ولت در ضخامت های مختلف سیلیکون.

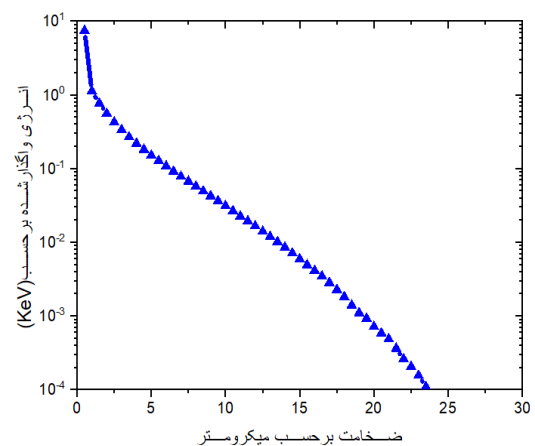
۴. نتیجه گیری

در این پژوهش، طیف انرژی بتای نیکل ۶۳ به صورت طیف کامل انرژی، انرژی متوسط طیف و انرژی ماکزیمم طیف جهت بررسی عمق نفوذ در سیلیکون در نظر گرفته شده است. محاسبات انجام شده به روش مونت کارلو با بهره گیری از کد MCNPX در یک هندسه مشخص انجام گردید. توان توقف الکترون ها در سیلیکون با استفاده از کد ESTAR برای انرژی های مختلف الکترون محاسبه گردید. نمودارهای بدست آمده در بازه انرژی مد نظر توافق خوبی دارند. از روی نمودارها و نتایج بدست آمده تعیین عمق نفوذ به صورت دقیق تری مطابق جدول (۲) انجام گردید. اهمیت این مقاله تعیین عمق نفوذ براساس طیف تمام انرژی تجربی است. بیش تر مقالات محاسبات خود را با میانگین انرژی طیف انجام داده اند. نتایج این روش در طراحی قطعات نیمه هادی سیلیکونی در تهیه آشکارسازها و دزیتمترهای هسته ای حائز اهمیت است.



شکل (۷): انرژی و گذار شده ذرات بتا با انرژی متوسط ۶۶/۹

کیلو الکترون ولت در ضخامت های مختلف سیلیکون.



شکل (۸): انرژی و گذار شده ذرات بتا با طیف تمام انرژی، بر حسب

کیلو الکترون ولت در ضخامت های مختلف سیلیکون.

۵. مراجع

- [1] M. G. Stamatelatos, T. R. England, "Accurate Approximations to Average Beta-Particle Energies and Spectra", Nucl. Sci. Eng. 63:304,1977.
- [2] Glenn F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement Fourth Edition" John Wiley & Sons, Inc.2010.
- [3] Sirichai Theirrattanakul, Mark Prelas, "A methodology for efficiency optimization of beta voltaic cell design using an isotropic planar source having an energy dependent beta particle distribution", Applied Radiation and Isotopes 127, 41-46,2017.
- [4] Tariq R. Alam and Mark A. Pierson, "Principles of Beta voltaic Battery Design", Department of Mechanical Engineering, Virginia Tech, 439 Goodwin Hall (0238), Blacksburg, VA 24061, USA, 2016.
- [5] Katz, L., Penfold, A., "Range-energy relations for electrons and the determination of beta-ray end-point energies by absorption". Rev. Mod. Phys. 24 (1), 28.1952.
- [6] Tariq R. Alam, Mark A. Pierson, Mark A. Prelas, "Beta particle transport and its impact on beta voltaic battery modeling", Applied Radiation and Isotopes, 130,80-89,2017.
- [8] <https://www.nist.gov/pml/stopping-power-range-tables-electrons-protons-and-helium-ions>

