

ءولید ناخالصی نوع N در کریستال سیلیکن با استفاده از واکنش نوترونهای حرارتی

سیدعلی میرعشقی

ءانستگاه صنعتی شریف و سازمان انرژی اتمی ایران
ءهران، ایران

ءکیده

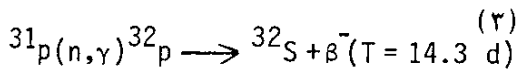
ءر این مقاله ابتدا ضمن مروری بر فرآینء ایجاد ناخالصی با نوترون (Neutron Transmutation Doping یا NTD) از نقطه نظر ءئوری، روابط لازم ءهت محاسبه مقاومت مخصوص کریستال (p) برءسب پارامءرهای پرتوءهی مانند زمان و شار نوترون استخراج و ارائه شده است. همچنین روش انجام کار ءابش ءهی سیلیکن و ملاحظاء مهم مربوطه و نیز مرایا و کاربرءهای NTD مورد مطالعه قرار گرفته است. در پایان موضوع استفاده از امكاناء ءابش نوترون راکءور ءءقیقاتی سازمان انرژی اتمی ایران بمنظور ءولید ناخالصی در کریستال سیلیکن مطرح و عملی بودن آن در شرایط کار نامی راکءور نشان ءاءه شده است.

مءءمه

اضافه ءرءن ناخالصیهای نوع N و P به کریستال سیلیکن (Si) به عنوان یکی از عمءهءترین مواد ساخءمانی اءواء الءرونیکی نیمه هاءی و سلولهای خورشیدی، ءقریباً " در ءمامی کاربرءهای مهم این عنصر امری اجءءاب ناپءیر است. افزوءن ناخالصی به ءک کریستالهای FZ (Float Zone) ممکن است در ءین ءامءءازی ماده مءاب صورت گیریء و یا در مواردیکه پوشش یک لایه نازء سیلیکن بر روی فلز و یا ءرافیت مورد نظر باشد (سلولهای خورشیدی) میءوان روش CVD یا Chemical Vapor Depositon را با استفاده از هیءءراتهای سیلیکن بکار ءرفت. البته با این روشها نمیءوان ءانسیءه ناخالصی را در قسمءهای مءءلف کریستال

با بیکنواءئی مطلوبی افزایش ءاء و در ءالب موارد نایکنواءئی در مقاومت مخصوص کریستال به ءءوءء ۴۰ ءرصد میءرسء (۱). از اوایل ءهه ۱۹۷۰ استفاده از نوترونهای حرارتی راکءورهای ءءقیقاتی به عنوان ابزاری برای افزایش ناخالصی نوع N در کریستال سیلیکن مورد ءوجه صنایع ساخت ءریستورهای ءءرت قرار ءرفت. شایان ءءر است که این روش برای ءولید ناخالصی ءبلاً " ءوسط لارء هورویءس (۲) و ءانن بام (۳) پيشنهءاء ءرءیده بود. در این روش که به NTD مشهور است، ^{30}Si در واکنش با نوترون حرارتی نهایتاً " به ^{31}P که ءوءء یک عنصر ءهنءه الءترون (Donor) می باشد ءبءیل ءرءیده و کریستال ءالص به نوع N ءبءیل میءشوء. با طراءی مناسب

سیدعلی میرعشقی، تولید ناخالصی نوع N در کریستال سیلیکن



نیز صورت می‌گیرد که از نقطه نظر دانسیته ناخالصی نوع N که همان دانسیته اتمی فسفر می‌باشد تاثیری ندارد، اما به لحاظ ایجاد رادیو پرتوئالی γ و β^- اضافی قابل ملاحظه می‌باشد.

از نقطه نظر کاربردی، پارامتر الکتریکی مهمی که در فرآیند اضافه کردن ناخالصی به کریستال مورد توجه است مقاومت مخصوص (ρ) می‌باشد که تابع دانسیته حفره و الکترونیهای آزاد موجود در کریستال است. با استفاده از تعریف ρ و نیز معادله: $n \cdot p = n_i^2$ (قانون اثر-جرم) که در آن n و p به ترتیب دانسیته الکترونیهای آزاد و حفره‌ها و n_i دانسیته ذاتی کریستال می‌باشد، می‌توان نوشت:

$$\rho = n / \{e \cdot \mu_p (a n^2 + n_i^2)\} \quad (4)$$

در معادله فوق $a = \frac{\mu_n}{\mu_p}$ ، قابلیت تحرک حامل بار و e بار الکتریکی الکترون می‌باشد. چنانچه حاصلضرب شار نوترون ϕ در زمان تابشدهی t را با ϕ و حاصلضرب σ_c ، C_0 را با Σ نمایش دهیم، دانسیته اتمهای ناخالصی نوع بخشنده (اتمهای فسفر) ناشی از واکنش نوترون برابر $C_{TD} = \Sigma \phi$ می‌شود و در اینصورت بقاء بار الکتریکی در کریستال بصورت:

$$C_A + n = p + (C_{D0} + C_{TD}) \quad (5)$$

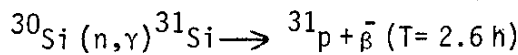
بیان می‌گردد که در آن C_{D0} و C_A به ترتیب دانسیته اتمهای بخشنده و پذیرنده قبل از تابش - دهی می‌باشند. اگر Φ لازم برای خنثی کردن کامل اثرات ناخالصی‌های موجود در کریستال (حالت $n = p$) را با Φ_c نمایش دهیم، برای Φ_c با در نظر گرفتن معادله (5) به تعریف زیر می‌رسیم:

شیوه تابشدهی سیلیکن می‌توان تلرانس در مقاومت مخصوص (ρ) را به حدود 5 درصد رسانید (1). کاربرد سیلیکن NTD در ساخت قطعات الکترونیکی قدرت از جمله دیودها مزایای زیادی، از جمله امکان دسترسی به ولتاژهای شکست بالاتر و نیز کنترل دقیق این ولتاژها را به همراه دارد (4). همچنین استفاده از این نوع سیلیکن در ساخت سلولهای خورشیدی باعث افزایش راندمان خواهد شد (5). در بخشهای زیر به بررسی نظری NTD، بحث پیرامون چگونگی تهیه آن، برتریها و کاربردهای مهم آن و نیز امکان بهره‌برداری از راکتور سازمان انرژی اتمی ایران بمنظور تهیه Si-NTD پرداخته خواهد شد.

بررسی نظری

واکنش اصلی تولید کریستال نوع N در فرآیند NTD، جذب نوترونیهای حرارتی توسط ایزوتوپ ^{30}Si که با نسبت 3/05 درصد در سیلیکن معمولی موجود است و واپاشی β^- متعاقب آن می‌باشد.

(1)



در صورتیکه نمونه اولیه محتوی C_0 اتم سیلیکن ^{30}Si در واحد حجم بوده و برای مدت زمان t در معرض شار نوترونیهای حرارتی ϕ قرار گیرد، می‌توان نشان داد که دانسیته C_{TD} اتمهای ناخالصی حاصل (اتمهای فسفر) از رابطه تقریبی زیر محاسبه می‌گردد،

$$C_{TD} = C_0 \cdot \sigma_c \cdot \phi \cdot t \quad (2)$$

در رابطه فوق σ_c سطح مقطع موثر جذب نوترون ^{30}Si می‌باشد و C_0 با در نظر گرفتن فراوانی 3/05 درصد ایزوتوپ ^{30}Si ، برابر $1/52 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ می‌باشد. ضمناً واکنش جانبی زیر:

بسادگی می توان نشان داد که در اینصورت عبارت ϕ_c به شکل زیر قابل بیان است:

(۹)

$$\phi_c = (K/\Sigma) - 2(a+1)n_i^2 / (\Sigma \sqrt{K^2 - 4an_i^2})$$

که در آن $K = 1/(e\rho_0\mu_p)$ می باشد. تغییرات ρ برحسب ϕ و نیز $(1 - \phi/\phi_c)$ برای یک کریستال با مقاومت مخصوص اولیه $\rho_0 = 1000 \Omega \cdot \text{cm}$ در حوالی $\phi - \phi_c$ در شکل ۱ نشان داده شده است. ملاحظه می گردد که در نتیجه تابش دهی ابتدا ρ رو به افزایش گذارده و روند رو به کاهش آن اندکی قبل از $\phi = \phi_c$ آغاز می شود. در اینصورت رسیدن به مقادیر ρ کمتر از ρ_0 تنها در ϕ های بزرگتر از ϕ_c میسر می باشد. همچنین مطالعه یکنواختی ρ با محاسبه کمیت $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ به کمک معادلات فوق ممکن می باشد. در شکل ۲ تغییرات $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ برحسب نسبت دانسیته اتمهای

$$\phi_c = (C_A - C_{D0})/\Sigma \quad (۶)$$

در اینصورت معادله (۵) را می توان بشکل زیر نوشت:

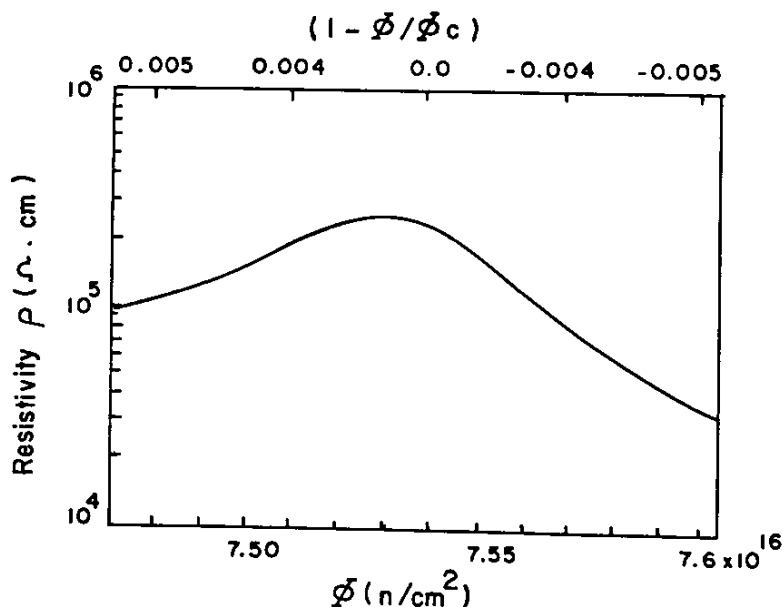
$$n^2 + n \cdot \Sigma (\phi_c - \phi) - n_i^2 = 0 \quad (۷)$$

که با حل آن دانسیته الکترونیهای آزاد بصورت تابعی از ϕ و ϕ_c بصورت زیر بدست می آید:

(۸)

$$n = \frac{\Sigma}{2} \{ (\phi - \phi_c) + \sqrt{(\phi - \phi_c)^2 + (2n_i/\Sigma)^2} \}$$

با جایگزینی n از رابطه فوق در (۴)، مقاومت مخصوص کریستال تحت تابش قرار گرفته، محاسبه می گردد. در عمل بجای پارامترهای C_A و C_{D0} کریستال اولیه از مقاومت مخصوص ρ_0 آن که به آسانی قابل اندازه گیری می باشد، استفاده می کنند.



شکل ۱- تغییرات مقاومت مخصوص برحسب تغییر ϕ و $(1 - \phi/\phi_c)$.

سیدعلی میرعشقی، تولید ناخالصی نوع N در کریستال سیلیکن

ساده‌تری برای محاسبه Φ لازم جهت رساندن مقاومت مخصوص کریستال به مقدار جدید ρ بدست آورد. برای این منظور از معادله زیر:

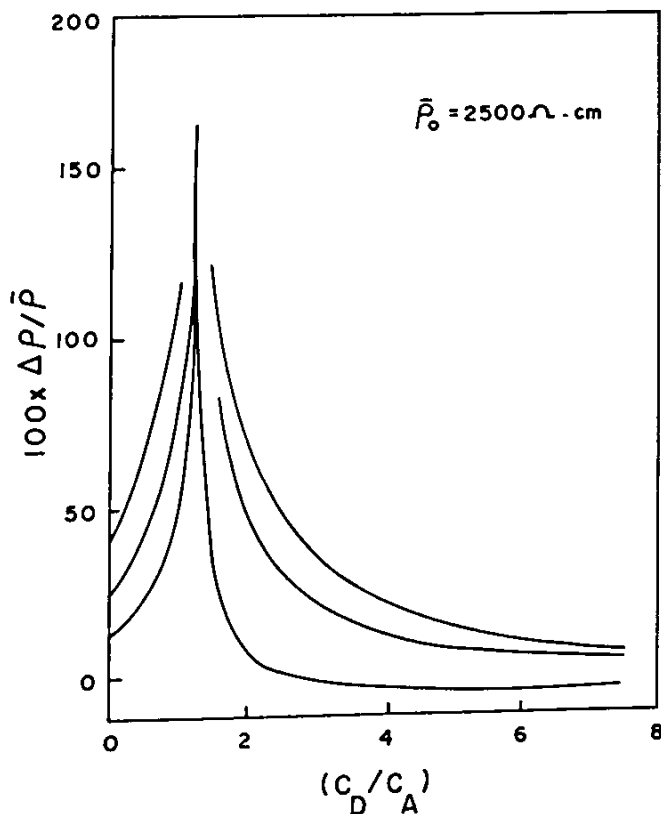
$$\Phi \Sigma = C_D - C_{D0} \quad (10)$$

که در آن C_{D0} و C_D به ترتیب دانسیته اتمهای بخشنده قبل و بعد از تابش‌دهی می‌باشند استفاده شده است. چنانچه C_D و C_{D0} برحسب مقاومتهای مخصوص ρ_0 و ρ در معادله (10) قرار داده شود، خواهیم داشت:

$$\Phi = \frac{1}{e \Sigma \mu_n} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) \quad (11)$$

ناخالصی نوع N به اتمهای ناخالصی نوع P که با پارامتر $Q = \frac{C_D}{C_A}$ مشخص گردیده، برای یک کریستال نوع P، $\rho_0 = 2500 \Omega \cdot \text{cm}$ رسم گردیده است (6). مشاهده می‌شود که قبل از جبران (Compensation) دقیق اثر ناخالصی‌های نوع p توسط اتمهای فسفر (ناخالصی نوع N) یعنی در محدوده $Q < 1$ استفاده از NTD باعث افزایش نایکنواختی در p می‌گردد. در حالیکه پس از تبدیل کریستال به نوع N ($Q > 1$) کاهش می‌یابد و برای $Q > 2$ از میزان نایکنواختی اولیه 5 درصد نیز کمتر می‌شود.

در مواردیکه کریستال قبل از تابش‌دهی از نوع N با مقاومت مخصوص اولیه ρ_0 باشد می‌توان رابطه



شکل ۲- تغییرات خطای نسبی در مقاومت مخصوص برحسب تغییر نسبت دانسیته اتمهای ناخالصی‌های نوع N و P (مرجع 6).

که با در نظر گرفتن $\Sigma = C \cdot \sigma_c$ و جایگزینی مقادیر پارامترها، رابطه (۱۱) بصورت زیر در می‌آید؛

$$\phi = \frac{2.56 \times 10^{-6}}{\sigma_c} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) \quad (12)$$

σ_c در واقع سطح مقطع وست کات (Westcott) جذب نوترون مربوط به ^{30}Si می‌باشد.

روش تهیه Si-NTD

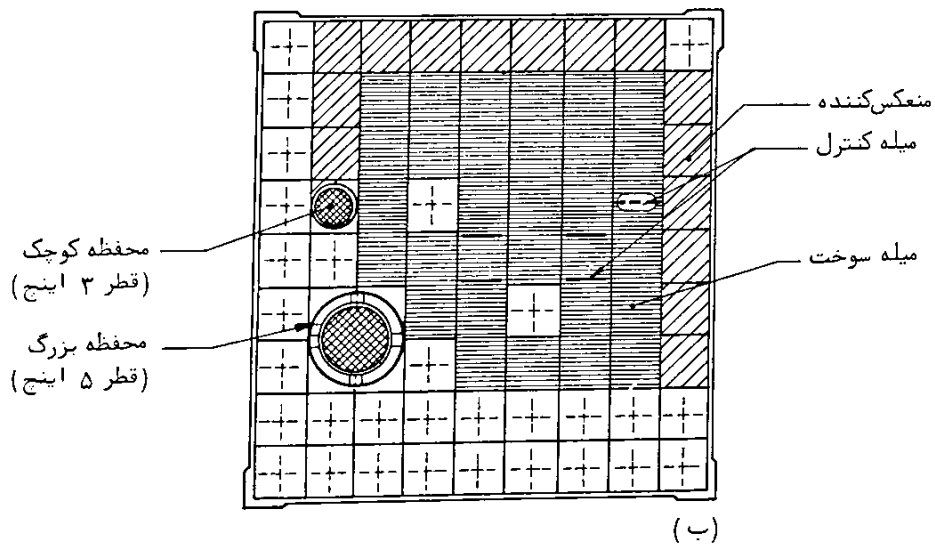
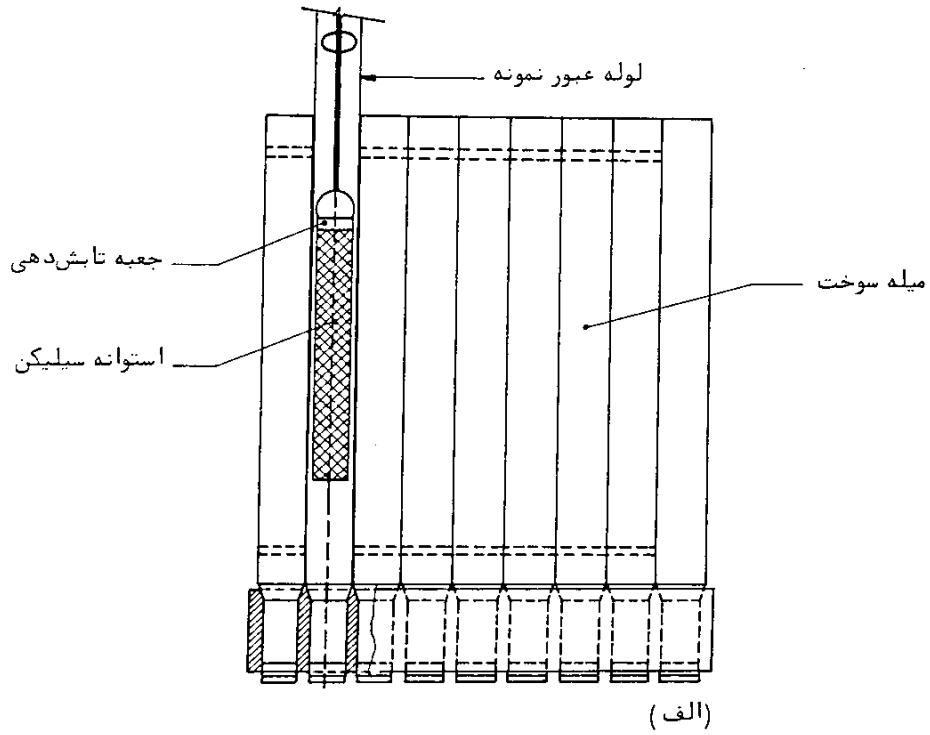
تولید ناخالصی در Si از طریق NTD امروزه در زمره یکی از فعالیتهای مهم بسیاری از راکتورهای تحقیقاتی جهان قرار گرفته است. در بعضی از این راکتورها سالانه مقادیری در حدود ۳۰-۲۰ تن سیلیکن تابش‌دهی شده و در اختیار صنایع مصرف کننده آن قرار می‌گیرد. حتی در راکتورهای با قدرت پائین با شار نوترون متوسط حدود $2 \times 10^{12} \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ با صرف وقت طولانی برای تابش‌دهی (زمان حدود ۳۵۰ ساعت) اقدام به تهیه Si-NTD می‌گردد (۷). نمونه‌های مورد نظر برای تابش‌دهی به صورت قرصهای نازک (تولید آزمایشگاهی) و یا استوانه‌هایی با ابعاد مناسب برای جا گرفتن در محلهای از پیش تعیین شده در قلب راکتور می‌باشند. در شکل ۳ نحوه قرار گرفتن قطعات استوانه‌ای شکل سیلیکن در کنار قلب یک راکتور تحقیقاتی نمایش داده شده است. برای حفاظت بیشتر سطح قطعات، آنها را در ورقه‌های آلومینیومی پیچیده و در قوطی‌های مخصوص تابش‌دهی قرار می‌دهند. در انتخاب نقطه مناسب در قلب راکتور برای قرار دادن قطعات کریستال دو نکته را باید در نظر گرفت؛

۱- با اندازه‌گیری ϕ_{FH} و ϕ_F در چند نقطه، محلی را انتخاب نمود که در آن ϕ_{FH}/ϕ_F حداکثر باشد. این موضوع از نقطه نظر حداقل کردن ضایعات ناشی از نوترونهای سریع حائز اهمیت می‌باشد، علاوه بر آن برای رسیدن به یک ρ

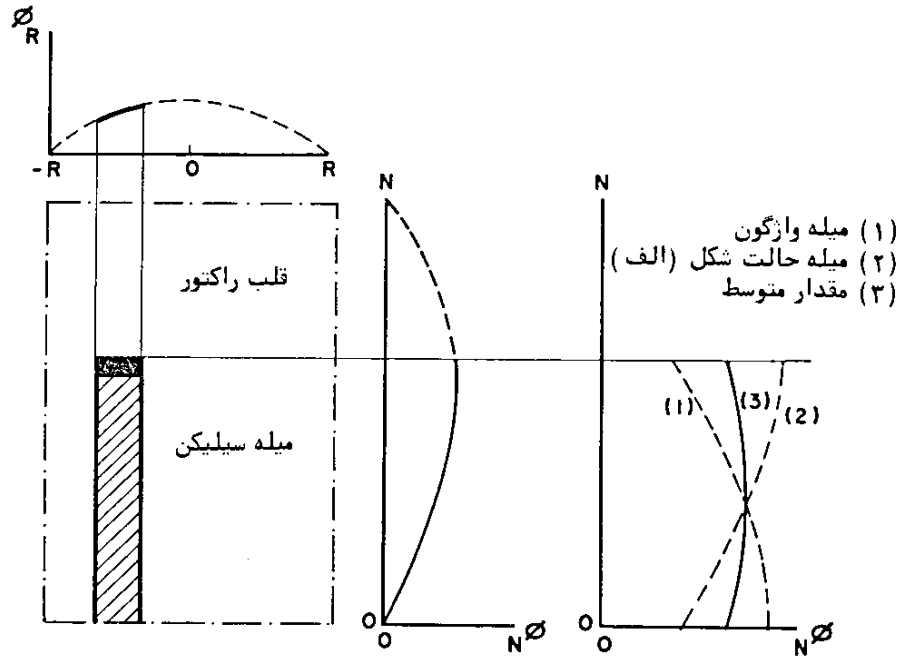
مشخص، بیشتر بودن مقدار ϕ میزان پرتوژنایی ناشی از ^{32}P را کاهش خواهد داد (۹).
۲- لازمست از اثرات حرارتی تابش ۲ در سیلیکن از طریق خنک نمودن قطعه جلوگیری نمود. درجه حرارت داخل سیلیکن نباید از 145°C بیشتر شود. بهمین منظور غالباً استوانه‌های سیلیکن را در داخل آب قرار می‌دهند.

از آنجا که یکنواختی تولید ناخالصی یکی از مهمترین مشخصه‌های NTD می‌باشد، لازمست کلیه عواملی که بطریقی موجب کاهش آن می‌گردند حذف شوند. برای نیل باین هدف با توجه به متناسب بودن دانسیته ناخالصی با شار نوترون، باید برای جبران ناپیکنواختی شار در جهت ارتفاع استوانه سیلیکن و نیز در جهت شعاعی آن اقدام نمود. استوانه سیلیکن بسته به محل قرار گرفتن آن و ابعادش در مقایسه با قلب راکتور، تغییرات شار-نوترون با Z و R و شکل ۴ - الف چگونگی تغییرات شار نوترون برای یک استوانه سیلیکن که در قسمت پائین و در نواحی جانبی قلب قرار گرفته بطور شماتیک نشان داده شده است. تقریباً در تمامی راکتورها برای یکنواخت نمودن شار در نقاط مختلف در جهت شعاعی مکانیزم مناسبی برای چرخاندن استوانه و یا قوطی محتوی آن حول محور قائم خود پیش‌بینی می‌نمایند. در مورد تغییرات در جهت محور Z می‌توان در نیمی از زمان تابش‌دهی، استوانه را به صورت واژگون قرار داد. این عمل باعث می‌شود که تغییرات $\bar{\phi}$ در جهت طول استوانه تا حد زیادی کاهش یابد (شکل ۴ - ب). همچنین برای اینکه تولید ناخالصی از روش NTD در مقایسه با روشهای دیگر بنحو چشمگیری یکنواخت‌تر انجام گیرد، ضروری است مقاومت مخصوص کریستال اولیه حداقل از ۵ برابر مقاومت مخصوص مورد نظر برای سیلیکن NTD کمتر

سیدعلی میرعشقی . تولید ناخالصی نوع N در کریستال سیلیکن



شکل ۳- محل قرار گرفتن میله سیلیکن در قلب راکتور تحقیقاتی SAPHIR در سوئیس (مرجع ۸) .



شکل ۴- تغییرات شار نوترون در جهت طولی و شعاعی میله سیلیکن (الف) و نحوه جریان آن (ب)؛ در شکل (ب) منحنی ۳ نمایانگر مقدار متوسط شار نوترون در طول میله در مدت زمان تابش دهی می باشد

می پذیرد. در بعضی از راکتورها از آشکارساز نوترون SPND استفاده می شود. در این صورت می توان با بکار گرفتن پردازشگر الکترونیکی مناسب سیگنال SPND را انتگرال گیری نمود. در این حالت چنانچه SPND قبلاً "کالیبره شده باشد (با سیم کبالت) خروجی انتگرال گیر مستقیماً همان Φ خواهد بود. همچنین ممکن است مکانیزمی طراحی نمود که پس از رسیدن Φ بمقدار مشخص مورد نظر، قطعه سیلیکن را از قلب راکتور خارج نماید. بمنظور جلوگیری از ایجاد پرتوزائی ناشی از فعال شدن آلودگی های سطحی سیلیکن باید قبل از پرتو دهی، قطعه را به دقت تمیز نمود. در این صورت در پایان تابش دهی تنها پرتوزائی قابل ملاحظه مربوط

نباشد (۴).

برای محاسبه Φ مورد نیاز در مورد یک قطعه کریستال با ρ_0 مشخص، معادله لازم همان رابطه (۱۲) می باشد که در آن ضریب بیرون پراکنش را با A نمایش داده و آنرا برای هر راکتور به روش تجربی تعیین می نمایند. برای اینکار چندین نمونه مختلف با ρ_0 های مشخص را با Φ های معین تحت تابش قرار داده و سپس مقاومت مخصوص آنهارا اندازه گیری می نمایند. آنگاه با استفاده از معادله (۱۲) مقادیر متعددی برای ضریب A مذکور بدست آورده و با متوسط گیری مناسب یک مقدار نهائی برای این ضریب مشخص می کنند. اندازه گیری شار نوترون قبل از تابش دهی با استفاده از سیم کبالت صورت

میزان تولید اکسیژن (ناخالصی ناخواسته) توصیه نموده‌اند . شایان ذکر است که شرایط گرمادهی شامل درجه حرارت و مدت زمان آن و حتی شرایط داخل کوره ، تاثیر قابل توجهی در پارامترهای اساسی کریستال همچون میزان دانسیته ناخالصی نوع N و طول عمر حاملهای اقلیت (minority carrier lifetime) دارد . در این زمینه مطالعات نسبتاً وسیعی صورت گرفته است (۵ و ۶) . در مورد وضعیت‌های پرتودهی مختلف (نسبت شار نوترون حرارتی به سریع) شرایط حرارت‌دهی مختلفی برای رسیدن به مقاومت مخصوص پیش‌بینی شده گزارش گردیده است . در حالیکه ضایعات ناشی از اثرات پرتوهای گاما در دماهای حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد ترمیم می‌یابند ، برای از بین بردن جابجایی‌های (dislocation) ایجاد شده ناشی از اثر نوترونهای سریع و نیز حفره‌های اکسیژن (oxygen vacancy) به دماهای بیشتر و در مدت زمانهای طولانی‌تری نیاز می‌باشد .

مطالعه تغییرات مقاومت مخصوص بر حسب درجه حرارت در حرارت‌دهی‌های با طول زمان مساوی (isochronal) نوسانات زیادی را نشان می‌دهد . در شکل ۵ این تغییرات برای یک نمونه نوع p با مقاومت مخصوص اولیه ۵۲۵۰ Ω.cm نمایش داده شده است . نمونه تابش داده شده در لحظات اولیه پس از تابش‌دهی ، نوع p می‌باشد ولی با افزایش دما ابتدا مقاومت مخصوص کاهش یافته و در حوالی ۶۰۰ °C شروع به افزایش می‌نماید . در دمای حدود ۷۲۵ °C کریستال به نوع N تبدیل گردیده و در دماهای بالاتر از ۷۵۰ °C به وضعیت پایدار رسیده و مقاومت مخصوص آن به مقدار پیش‌بینی شده توسط پارامترهای پرتودهی یعنی ۱۰۰ Ω.cm می‌رسد . (۶)

به ایزوتوپهای ^{31}P و ^{32}P خواهد بود که اولی با نیمه عمر ۲/۶ ساعت پس از یکی دو روز عملاً "از بین رفته و در مورد دومی با توجه به داشتن نیمه عمر ۱۴/۳ روز ، برای رسیدن به سطح مجاز به چهار روز وقت نیاز دارد . در عمل مرحله نهائی آماده‌سازی Si-NTD که ترمیم ضایعات کریستالی ناشی از پرتودهی می‌باشد معمولاً "چهار و یا پنج روز پس از اتمام پرتودهی انجام می‌گیرد .

ترمیم ضایعات

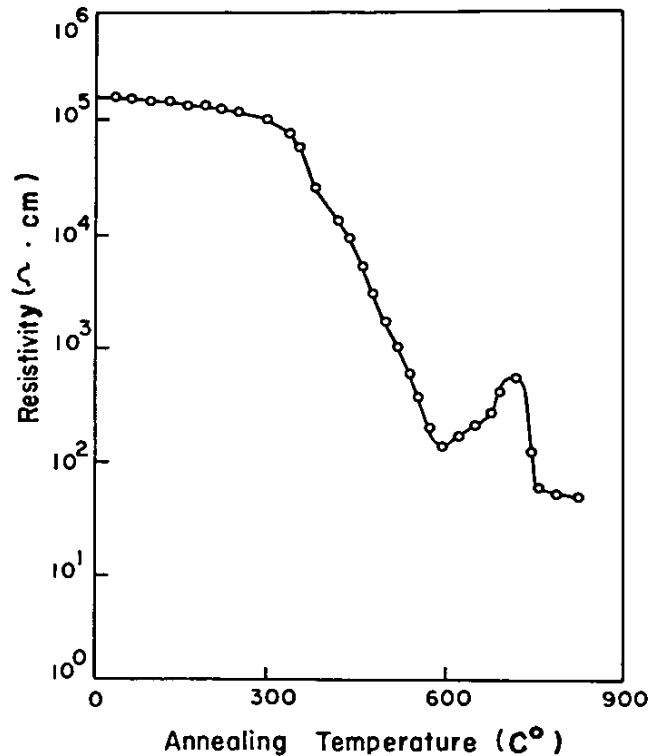
تولید ناخالصی در کریستال به روش NTD با ایجاد ضایعاتی (defects) در ساختمان کریستالی قطعه سیلیکن همراه است ، که قبل از ترمیم آنها هیچیک از خواص الکتریکی مورد نظر قابل مشاهده نخواهند بود .

این خرابیها ناشی از اثر تابشهای مختلف هسته‌ای موجود می‌باشد که مهمترین آنها عبارتند از (۱۰) ؛
۱- ضایعات نقطه‌ای (Point defect) که بنظر می‌رسد عمدتاً "بدنیال هسته‌های برگشته (recoil) ناشی از واکنش (n,γ) نوترونهای حرارتی بوجود می‌آیند .

۲- ضایعات خوشه‌ای گسترده که برخوردی متوالی نوترونهای سریع بعنوان عامل ایجاد آنها شناخته شده‌اند .

برای ترمیم ضایعات مذکور ، سیلیکن پرتو داده شده را برای مدتی در کوره‌های خلاء یا حاوی گاز آرگون (Ar) در دمای ۷۰۰ - ۸۰۰ درجه سانتیگراد حرارت می‌دهند (annealing) . در مورد مدت زمان لازم ، بستگی به ابعاد قطعه سیلیکن و میزان پرتودهی ، مقادیری از یک ساعت تا حدود بیست ساعت گزارش شده است .

در بعضی از گزارشها پائین آوردن سریع دمای قطعه تا حدود ۲۰۰ درجه سانتیگراد را برای تقلیل



شکل ۵- تغییرات مقاومت مخصوص بر حسب تغییرات دما در حرارت دهی‌های با زمان مساوی برای یک کریستال نوع P با مقاومت مخصوص اولیه $5250 \Omega \cdot \text{cm}$ و مقدار نهایی (مرجع ۱۰):

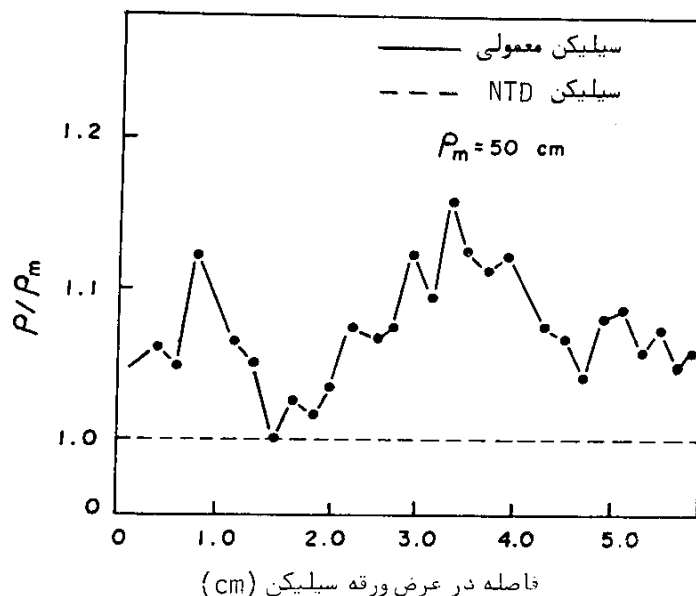
یکنواختی این توزیع شوند از قبیل تغییرات شار- نوترون به روشهایی که قبلاً توضیح داده شد قابل خنثی شدن می‌باشند. در شکل ۶ این مسئله با مقایسه تغییرات مقاومت مخصوص در طول یک ورقه (wafer) سیلیکن برای دو روش تولید ناخالصی، یکی به طریق معمول و دیگری به روش NTD نشان داده شده است (۱۰).

همانطور که ملاحظه می‌گردد، مقاومت مخصوص نهایی در روش NTD که با خطوط بریده نشان داده شده در طول ورقه ثابت است و یا در حقیقت تغییرات آن ناچیز بوده و در محدوده خطای آزمایش قرار

مزایا و کاربردها

- مزایای عمده NTD را می‌توان در سه بند زیر خلاصه نمود:
- تولید ناخالصی با یکنواختی سطحی و فضایی بسیار مطلوب.
 - امکان کنترل دقیق میزان ناخالصی تولید شده.
 - وارد نکردن ناخالصی‌های ناخواسته مثل اتمهای سنگین به کریستال.
 - علت برتری اول در واقع توزیع تصادفی اتمهای فسفر تولید شده در سیلیکن در فرآیند NTD می‌باشد. البته عوامل دیگری که ممکن است باعث

سیدعلی میرعشقی . تولید ناخالصی نوع N در کریستال سیلیکن



شکل ۶- نمایش تغییرات مقاومت مخصوص در سیلیکن (مرجع ۱۰).

مسئله روشن است که مقادیر بسیار کمی از ناخالصی - هایی از قبیل Au ، Ag و Cu باعث کاهش عمر حاملهای اقلیت (MCL) می‌گردد (۵). از این جهت فرآیند NTD در تهیه سلولهای خورشیدی که در آنها حداکثر نمودن MCL به لحاظ بالا بردن راندمان تبدیل انرژی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است کار - برد فراوانی یافته است. همچنین، نقش یکنواختی سطحی و فضائی دانسیته ناخالصی در افزایش راندمان مذکور در سلولهای خورشیدی را نمی‌توان از نظر دور داشت، از آنجا که دقت در میزان ناخالصی در نمونه‌های با ابعاد کوچک تا حدود یک درصد نیز قابل کنترل می‌باشد، ایجاد مقاومتهای مخصوص بیشتر از یکصد هزار اهم سانتی‌متر از طریق خنثی نمودن اثر وجود رگه‌های ناخالصی بر (B) باقیمانده در کریستالهای خالص، به روش NTD میسر می‌باشد.

دارد، در حالیکه در روشهای معمولی این تغییرات به حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد می‌رسد. این یکنواختی در میزان ناخالصی از اهمیت بسیار شایانی برخوردار بوده و در حقیقت پشتوانه محکمی برای بکارگیری این روش در تامین کریستال پایه مورد نیاز تکنولوژی تولید مدارات مجتمع الکترونیکی می‌باشد.

در مورد قابلیت کنترل دقیق سطح ناخالصی تولیدی با توجه به وابستگی دانسیته اتمهای فسفر ایجاد شده به شار نوترون و زمان پرتودهی، با اندازه‌گیری دقیق این دو کمیت و استفاده از فرمول (۸) می‌توان دانسیته حاملهای آزاد تولید شده را به دقت پیش‌بینی نمود. در تک کریستال سیلیکن اندازه‌گیریهای بعدی این پیش‌بینی را دقیقاً "تائید" می‌کند (۱۰).

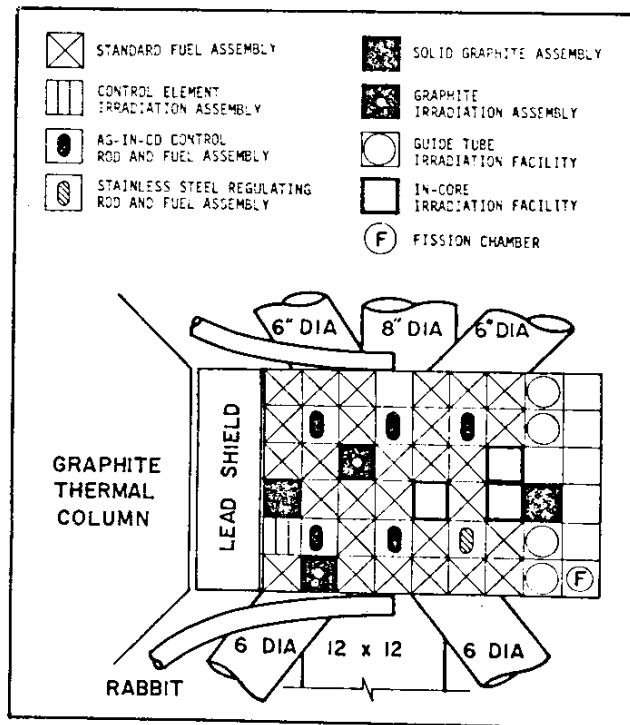
از دیگر مزایای ذاتی NTD این است که هیچگونه ناخالصی مزاحمی در کریستال تولید نمی‌شود. این

لحاظ حرارتی نبودن نوترونهای تولیدی و نیز شار نوترونی پائین، بکارگیری آنها در NTD عملی نخواهد بود. مثلاً "در شتاب‌دهنده واندوگراف سازمان انرژی اتمی امکان دستیابی به نوترونهای حرارتی از طریق کند کردن نوترونهای تولیدی تنها در شار حدود: $10^7 \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{S}^{-1}$ فراهم می‌باشد. در اینصورت تنها چشمه نوترونی قابل قبول برای پرتودهی سیلیکن، راکتور اتمی سازمان انرژی اتمی می‌باشد. این راکتور تحقیقاتی از نوع استخری و با قدرت ۵ مگاوات و سوخت آن به صورت صفحاتی از جنس آلیاژ آلومینیوم و اورانیوم غنی شده است. در شکل ۷ قلب این راکتور نشان داده شده است. در این شکل کانالهای نوترون و لوله‌های پرتودهی

این کریستال‌های پرمقاومت در ساخت انواع آشکاره‌سازها، منجمله آشکاره‌سازهای پرتوهای γ ، x ، بتا و آلفا کاربرد دارند (۶). همچنین در ساخت رکتیفایرهای سیلیکن و نیز ترისტورهای با قدرت و ولتاژ بالا، استفاده از Si-NTD نه تنها باعث افزایش میزان تولید می‌شود بلکه باعث کنترل دقیق‌تر ولتاژهای شکست بی‌معنی و نیز دستیابی به ولتاژهای شکست بالاتر گردیده است (۱۱ و ۴).

بررسی امکانات تهیه Si-NTD در ایران

گرچه استفاده از چشمه‌های نوترون و یا باریکه نوترون تولید شده در شتاب‌دهنده‌ها در بسیاری از موارد پرتودهی می‌تواند مورد نظر قرار گیرد، اما به



شکل ۷- یک آرایش نمونه قلب و امکانات تابش‌دهی راکتور تحقیقاتی سازمان انرژی اتمی ایران (مرجع ۱۲).

سیدعلی میرعشقی، تولید ناخالصی نوع N در کریستال سیلیکن

دقیق شارنوترونیهای حرارتی (ϕ_{th}) و سریع (ϕ_f) در نقاط مختلف محللهای مذکور می باشد. در واقع ممکن است که برای ایجاد یک نسبت ϕ_{th}/ϕ_f مطلوب ناگزیر از اعمال تغییراتی در شرایط محللهای فوق بمنظور حرارتی تر کردن نوترونها باشیم. بعنوان مثال ممکن است نمونهها را در کانال نوترون پراز آب در یک فاصله ای دورتر از قلب قرار دهیم که در اینصورت شارنوترون به میزان قابل ملاحظه ای از مقدار تعیین شده در جدول ۱ کمتر خواهد بود. در هر حال در صورتیکه سوخت از شرایط مناسبی برای کار راکتور در توان حداکثر و با برنامه زمانی قابل قبول برخوردار شود، پروژه پرتودهی سیلیکن می تواند بعنوان یکی از فعالیتهای راکتور سازمان مورد توجه قرار گیرد.

نمونهها در قلب به چشم می خورند. علاوه بر اینها ستون حرارتی نیز وجود دارد که در آن نوترونها پس از عبور از یک ستون گرافیتی کاملا "حرارتی می شوند. شارنوترون و آهنگ دز (dose rate) پرتوهای گاما در محللهای مختلف قلب راکتور در توان حداکثر ۵ مگاوات را می توان در جدول شماره ۱ مشاهده نمود. براساس این مقادیر با در نظر گرفتن رابطه (۱۲)، برای رسیدن به $\rho = 20 \Omega \cdot \text{cm}$ در یک کریستال سیلیکن با $\rho_0 = 1000 \Omega \cdot \text{cm}$ زمان تقریبی لازم در محل کانالهای نوترون و حفره آب به ترتیب حدود ۱۵ و ۱/۵ ساعت محاسبه می گردد. بدین ترتیب در این راکتور اساسا "امکان پرتودهی سیلیکن وجود دارد. البته نسبت ϕ_{th}/ϕ_f را نیز نباید از نظر دور داشت و آگاهی از آن مستلزم اندازه گیریهای

جدول ۱- شارنوترون حرارتی و میزان دز گاما در محللهای مختلف راکتور (۱۲)

میزان دز گاما Gy/hr	شار نوترون حرارتی $n/cm^2 \cdot S$	محل
10^6	2×10^{13}	کانال نوترون
10^{10}	1×10^{14}	لوله های داخل قلب
10^6	2×10^{13}	کناره قلب (Core Face)
10^7	2×10^{14}	حفره آب (Water hole)
—	1×10^{10}	ستون حرارتی

References

1. M. Pawlowska, A. Bukowski, S. Strzelecka and P. Kaminski, Investigation of Heterogenaties in Neutron Transmutated Single Crystal, IAEA-TECDOC 456, 120 (1985).
2. K. Lark-Horwitz, Nuclear Bombarded Semiconductor Materials, Butterworths, London, 47 (1951).
3. M. Tanenbaum and A.D. Miolis, J. Electrochem. Soc. 108, 276 (1964).
4. H.M. Janus and O. Malmros, Application of Thermal Neutron Irradiation for Large Scale Production of Homogeneous Phosphorus Doping of Floatzone Silicon, IEEE trans. Electron Devices, ED-23, 8, 797 (1976).
5. J.W. Clealand, R.D. Westbrook, R.F. Wood and R.T. Young, Neutron Transmutation Doping of Polycrystalline Silicon, CONF-760529-1, 1 (1976).
6. J.M. Meese, D.L. Cowan and M. Chandrasekhar, A Review of Transmutation Doping in Silicon, IEEE Trans. Nuclear Science, NS-26, 6, 4858 (1979).
7. V. Dimic, Neutron Tramsmutation Doping of Silicon in the 250 KW TRIGA Reactor in Ljubljona, IAEA-TECDOC-456, 88 (1985).
8. H. Winkler, Silicon Irradiation at SAPHIR, IAEA-TECDOC-456, 29 (1985).
9. J. Koziel and K. Pytel, Neutron Doped Silicon in Polish Research Reactors, IAEA-TECDOC-456, 42 (1985).
10. R.F. Wood, R.D. Westbrook, R.T. Young and J.W. Clealand, Transmutation Doping of Silicon Solar Cells, CONF. 770439-1, 1 (1977).
11. W.E. Hass, J.S. Schroller, J. Electronic Materials, 5, 1, 57 (1976).

۱۲- گزارش آنالیز ایمنی (SAR) راکتور سازمان انرژی اتمی ایران، صفحه ۱۹ (۱۹۶۶).

NEUTRON TRANSMUTATION DOPING OF SILICON

A. Mireshghi
Sharif University of Technology
and
Atomic Energy Organization of Iran
Tehran, Iran

Abstract

After a brief review of the theoretical bases for Neutron Transmutation Doping (NTD) process, the equations necessary for calculation of doped crystal resistivity (ρ) in terms of parameters of irradiation, such as time and neutron flux, are derived. The procedure for production of NTD-Si is described, important considerations are outlined and the advantages and applications are introduced. Also, an assessment is made of the practicality of using AEOI Research Reactor thermal neutron irradiation facilities for production of NTD-Si, which is concluded to be possible at reactor nominal operating conditions.