

## وابستگی دمایی مشخصه‌های الکتریکی دیود سد شاتکی Al/p-Si

محمد علی صادق‌زاده<sup>۱</sup>، عاطفه توکلی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار فیزیک، گروه حالت جامد، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد msadeghzadeh@yazd.ac.ir

<sup>۲</sup>آکارسناس ارشد فیزیک، گروه حالت جامد، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد

### چکیده

اتصالات فلز-نیمرسانای شاتکی بعنوان بخش پیچیده قطعات نیمرسانا و صنعت الکترونیک مورد توجه بوده‌اند. در این مقاله دیودهای شاتکی Al/p-Si به روش لایه نشانی تبخیر حرارتی بر بستر سیلیکان نوع پذیرنده ساخته و بر اساس نظریه گسیل گرما یونی مشخصه یابی شدند. پارامترهای فاکتور ایده‌آل، ارتفاع سد شاتکی و جریان اشباع معکوس، با اندازه‌گیری منحنی جریان-ولتاژ (I-V) دیودهای بازپخت شده در محدوده دمایی ۳۵۰-۱۰۰<sup>o</sup>C بدست آمدند. تأثیر بازپخت بر پارامترهای دیود سد شاتکی بررسی و مشخص شد که دمای بهینه بازپخت ۲۵۰<sup>o</sup>C می‌باشد. سپس مشخصه جریان-ولتاژ دیودهای ساخته شده در گستره دمایی ۳۰-۱۵ کلوین اندازه‌گیری و فاکتور ایده‌آل، ارتفاع سد شاتکی و جریان اشباع معکوس تعیین گردید. مشخص شد با کاهش دمای دیود، ارتفاع سد شاتکی و جریان اشباع معکوس کاهش، اما فاکتور ایده‌آل افزایش می‌یابد. در خاتمه ارتفاع سد شاتکی و ثابت ریچاردسون دیود مذکور با در نظر گرفتن توزیع گاوسی ارتفاع سد محاسبه شدند. مقدار بزرگ و غیر منتظره فاکتور ایده‌آل را می‌توان با پراکندگی حامل‌ها از اتمهای Al نفوذ یافته به نیمرسانا در نزدیکی میانگاه Al/Si توجیه کرد.

### کلیدواژه

دیود شاتکی، سد شاتکی، دیود Al/p-Si، مشخصه یابی الکتریکی، فلز-نیمرسانا.

### مقدمه

میانگاه، مکانیزم‌های ترابردی و برخی از پارامترهای ساختاری اتصال شاتکی فلز-نیمرسانا موضوع تحقیقات نظری و تجربی در دهه‌های گذشته بوده است، اما اطلاعات تجربی کمی در شکل گیری سد شاتکی و چگالی حالات میانگاهی (بین فلز و نیمرسانا) در دسترس است [۳]. هم‌چنین وجود یک لایه عایق نازک در میانگاه فلز - نیمرسانا عامل مهمی است که بر رفتار دیود شاتکی مؤثر می‌باشد [۴].

قابلیت اطمینان و کیفیت مطلوب یک اتصال فلز-نیمرسانا، برای عملکرد مطلوب ابزارهای مربوطه در مدارهای الکترونیکی ضروری است [۵]. بطور مثال تکنولوژی مدارهای مجتمع و اتصالات درونی نیازمند اتصالات فلز-نیمرسانایی که پایداری حرارتی و مقاومت کمی دارند، می‌باشند [۱]. بازپخت حرارتی دیود شاتکی (پس از فرآیند ساخت) رایج‌ترین فرآیند مورد استفاده برای ایجاد کیفیت مطلوب و پایداری این دیودها می‌باشد [۶ و ۷]. در این مقاله، ابتدا دیودهای شاتکی Al/p-Si به روش لایه نشانی تبخیر حرارتی بر بستر سیلیکان نوع پذیرنده ساخته و سپس مشخصه‌های الکتریکی (فاکتور ایده‌آل، جریان اشباع

واکنش فاز جامد در زیر دمای ذوب بین یک فیلم نازک فلزی و یک نیمرسانای تک بلوری می‌تواند منجر به شکل گیری اتصال فلز-نیمرسانای شاتکی<sup>۱</sup> (اتصال شاتکی و یا دیود شاتکی) در فصل مشترک آنها شود. انگیزه اصلی مستمر در زمینه ساخت اتصالات یکسوساز فلز-نیمرسانای شاتکی، نیاز به ویژگی‌های مهمی نظیر یکسوسازی سریع، قابلیت کارکرد در فرکانس‌های بالا می‌باشد [۲ و ۱]. چنین خواص ویژه‌ای دیودهای شاتکی را جهت یکسوسازهای با بهره بالا و کاربردهای با فرکانس رادیویی و آشکارسازهای RF و استفاده در سلول‌های خورشیدی مناسب می‌سازد [۳]. از اتصالات فلز-نیمرسانا اغلب در مدارهای مجتمع، به عنوان دریچه مسفت یا موسفت، و در آشکارسازها و سلول‌های خورشیدی استفاده می‌شود. مضافاً اینکه اتصالات فلز-نیمرسانا، یکسوسازهایی هستند که در مدارهای کلیدزنی سریع، منابع تغذیه سوئیچینگ، مایکروویو و همچنین قطعات نیمرسانا پیچیده کاربرد دارند و به صورت گسترده مورد مطالعه قرار گرفته اند [۱]. لذا درک ویژگی‌های ساختاری و الکترونیکی آنها همواره مورد توجه پژوهشگران فیزیک و الکترونیک بوده است. خواص

<sup>۱</sup> Metal-Semiconductor Schottky Contact

$$I = I_0 \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \quad (1)$$

این معادله،  $I_0$  جریان اشباع معکوس،  $e$  بار الکترون،  $k$  ثابت بولتزمن،  $T$  دمای نمونه،  $V$  ولتاژ اعمالی به دیود و  $n$  فاکتور ایده آل می باشد. جریان اشباع معکوس  $I_0$  از رابطه:

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_{B0}}{kT}\right) \quad (2)$$

به دست می آید که در آن  $A^*$  ثابت مؤثر ریچاردسون (که برای Si نوع p برابر با  $32 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ )،  $\phi_{B0}$  ارتفاع سد شاتکی در بایاس صفر و  $A$  مساحت دیود می باشد. طبق رابطه (1) خواهیم داشت:

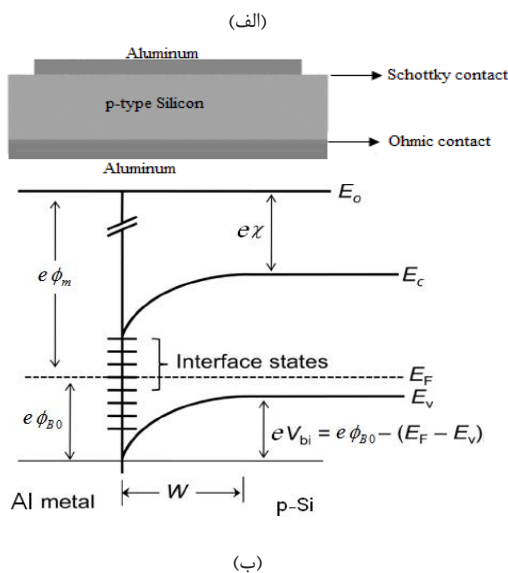
$$\ln I = \ln I_0 + \frac{eV}{nkT} \quad (3)$$

و فاکتور ایده آل  $n$  از شیب ناحیه خطی بایاس مستقیم مشخصه نیمه لگاریتمی جریان - ولتاژ ( $\ln I - V$ ) از رابطه:

$$n = \left(\frac{e}{kT}\right) / \left(\frac{dV}{d(\ln I)}\right) \quad (4)$$

زیر به دست می آید همچنین در نمودار  $\ln I - V$  محل برخورد خط برونیابی شده (ادامه قسمت خطی نمودار) با محور عمودی (عرض از مبدأ نمودار)، جریان اشباع معکوس  $I_0$  را مشخص می کند. نهایتاً با استفاده از جریان اشباع معکوس به دست آمده می توان ارتفاع سد شاتکی را از رابطه زیر به دست آورد:

$$\phi_{B0} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (5)$$



شکل ۱. (الف) شمای کلی ساختمان دیود شاتکی و (ب) نمودار نوار انرژی مربوطه در حالت بدون بایاس و در حضور حالت های میانگهی (Interface States).

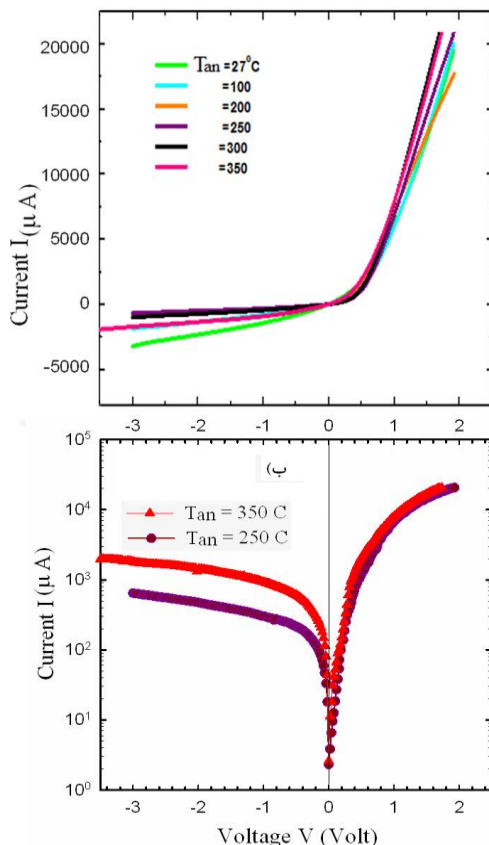
معکوس و ارتفاع سد شاتکی) نمونه های ساخته و بازپخت شده را با برآزش نمودارهای تجربی جریان - ولتاژ ( $I - V$ ) بر اساس تئوری گسیل گرمایونی تعیین و مطالعه گردید. در ادامه مشخصه جریان - ولتاژ دیود شاتکی Al/p-Si ساخته شده در دماهای مختلف نمونه (گستره دمایی ۱۵-۳۰۰ درجه کلوین) اندازه گیری شد و با تحلیل نتایج حاصل، تأثیر دمای نمونه (دیود) بر مشخصه های الکتریکی دیود مذکور مشخص شد و ثابت ریچاردسون نیز محاسبه گردید.

## روش تحقیق

در این تحقیق از بستر سیلیکون نوع-p (آلاییده با بور) با جهت کریستالی (۱۰۰) و مقاومت ویژه ۱۰ اهم - سانتی متر و ضخامت ۵۰۰ میکرومتر به عنوان زیرلایه (بستر) استفاده شد. قبل از لایه نشانی، بستر سیلیکونی با استفاده از روش لایه برداری استاندارد RCA به صورت شیمیایی تمیز گردید. از سیستم لایه نشانی تبخیر حرارتی برای لایه نشانی فلز آلومینیوم استفاده شد. از آنجا که لازمه تشکیل اتصال سد شاتکی فلز - نیم رسانای نوع p نیست که تابع کار فلز کمتر از نیم رسانا باشد لذا از آلومینیوم با ویژگی های مناسب (دمای ذوب پایین، سهولت تبخیر و نفوذ سریع) استفاده شد. هدف، ساخت دیودهای شاتکی Al/p-Si با ابعاد چند میلیمتر مربع و لازمه آن ایجاد اتصال الکتریکی (اهمی) بر طرف دیگر (بستر) بوده است، لذا لایه ای از فلز آلومینیوم به ضخامت ۱۵۰ نانومتر در یک طرف بستر سیلیکونی مطابق شکل ۱ الف، لایه نشانی شد و سپس نمونه بمدت ۱۰ دقیقه در کوره با دمای ۴۵۰ درجه سانتی گراد و حاوی گاز نیتروژن قرار داده شد تا اتصال اهمی فلز - نیم رسانا شکل گیرد. در این شرایط نفوذ سریع اتمهای Al در بستر p-Si باعث ایجاد لایه نانومتری  $p^{++}$  (تبهگن) می شود که خواص اتصال اهمی را دارا است. در مرحله بعد با لایه نشانی مجدد آلومینیوم در طرف دیگر بستر، عدم بازپخت و یا بازپخت در دمای پایین (و نفوذ ناچیز اتمهای Al در بستر) اتصال شاتکی فلز - نیم رسانا ایجاد و فرآیند اسمی ساخت دیود سد شاتکی انجام شد (شکل ۱ الف). هر چند روشهای متنوعی برای مشخصه یابی فیزیکی - الکترونیکی سد شاتکی فلز - نیم رسانا وجود دارد [۱ و ۲] ولی سر راست ترین شیوه مطالعه دیود شاتکی ساخته شده بررسی منحنی تغییرات جریان عبوری از دیود بر حسب ولتاژ اعمالی به آن ( $I - V$ ) است و لذا از دستگاه  $I - V$  Measurement برای اندازه گیری منحنی مشخصه جریان - ولتاژ دیودهای ساخته شده استفاده شد.

جریان عبوری  $I$  از دیود سد شاتکی تحت بایاس مستقیم و در ولتاژ  $V$  (بیش از ۰/۲ ولت) را می توان با نظریه گسیل گرمایونی بصورت رابطه زیر بیان کرد [۲ و ۱]:

بازپخت منجر به افزایش ضخامت لایه اکسید ذاتی در فصل مشترک فلز- نیمرسانا می‌گردد. عوامل ذکر شده باعث افزایش حالت‌های میانگامی می‌شوند این افزایش نیز منجر به افزایش باز ترکیب حامل‌ها شده و به تبع فاکتور ایده‌آل افزایش می‌یابد [۱]. مشابهاً پاکما و همکاران در پژوهش خود [۱۱] دریافتند که مقادیر بزرگ فاکتور ایده‌آل ناشی از وجود لایه عایق در میانگام Al/p-Si می‌باشد.



شکل ۲. (الف) منحنی‌های جریان-ولتاژ دیود شاتکی Al/p-Si بازپخت شده در دماهای مختلف و در مقیاس خطی و (ب) منحنی‌های نیمه لگاریتمی اندازه جریان - ولتاژ برای دو دمای بازپخت ۲۵۰ و ۳۰۰ درجه سلسیوس.

جدول ۱. جریان اشباع معکوس، ارتفاع سد شاتکی و فاکتور ایده‌آل دیود شاتکی بازپخت شده در دماهای مختلف.

## نتایج و بحث

### الف) تاثیر دمای بازپخت

به تحقیق ثابت شده است که دیود سد شاتکی Al/p-Si ساخته شده (در دمای اتاق  $27^{\circ}\text{C}$ ) کیفیت مطلوب را ندارد و بطور مثال کاملاً یکسو کننده نیست و به عبارتی جریان اشباع معکوس آن زیاد است. لذا دیودهای ساخته شده بمدت ۵ دقیقه در کوره‌ای در گستره دمایی  $100-350$  درجه سانتی‌گراد بازپخت شدند و منحنی‌های  $I-V$  مربوطه اندازه‌گیری و مقایسه گردید. نتایج تجربی حاصل از بازپخت در دماهای ( $T_{an}$ ) ۱۰۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰ و ۳۵۰ درجه سانتیگراد در شکل ۲ الف نمودار خطی جریان-ولتاژ و در شکل ۲ ب نمودار نیمه لگاریتمی اندازه جریان-ولتاژ برای دو دمای بازپخت ۲۵۰ و ۳۵۰ درجه سانتیگراد جهت مقایسه نشان داده شده است. از شکل ۲ ب مشخص است که تغییرات نیمه لگاریتمی اندازه جریان-ولتاژ در محدوده  $0/4-0/2$  ولت خطی بوده و به کمک آن جریان اشباع معکوس، فاکتور ایده‌آل و ارتفاع سد شاتکی بدست آمد. لازم به توضیح است که نمودار نیمه لگاریتمی جریان-ولتاژ در ولتاژهای بیش از  $0/5$  ولت خطی نبوده و این واقعیت به مقاومت سری دیود  $R_s$  مربوط است [۱۲].

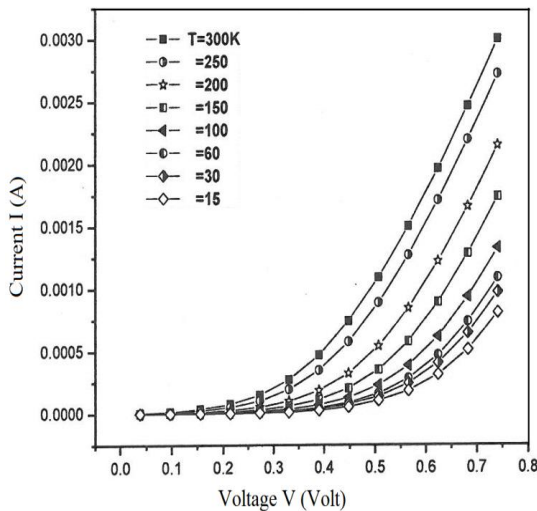
جدول ۱ مقادیر به دست آمده برای فاکتور ایده‌آل، ارتفاع سد شاتکی و جریان اشباع معکوس را نشان می‌دهد. از مقایسه‌ی آن‌ها درمی‌یابیم که کمینه جریان اشباع معکوس در نتیجه بازپخت در گستره دمایی  $250-300$  درجه رخ می‌دهد و در این گستره دمایی یکسوسازی مناسبی از نمونه دیده می‌شود. در مقابل، با افزایش دمای بازپخت، ارتفاع سد شاتکی و فاکتور ایده‌آل افزایش می‌یابند. لذا نتیجه می‌گیریم که دمای مطلوب بازپخت ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و نتایج مشابهی توسط گولر و همکارانش در بررسی اثر بازپخت بر پارامترهای دیود شاتکی Co/p-Si گزارش شده است [۸]. مضافاً نتایج به دست آمده از بازپخت دیود شاتکی ساخته شده در توافق با گزارشات ارائه شده توسط ناگلو و گولن می‌باشد [۹]. بطور کلی تغییرات خواص تراپردی دیودهای شاتکی در اثر بازپخت ناشی از آثار واکنش میانگامی و گذار فاز در فرآیند بازپخت می‌باشد.

افزایش فاکتور ایده‌آل با افزایش دمای بازپخت را می‌توان از طریق افزایش چگالی بارهای میانگامی توضیح داد [۹و۸]. از طرفی با افزایش دمای بازپخت (بطور مثال  $T_{an}=350\text{C}$ )، نفوذ اتمهای Al در بستر Si افزایش می‌یابد [۱۳] و باعث می‌شود که ماهیت پیوند از اتصال شاتکی ایده‌آل (با پروفایل ناگهانی) تا حدی به اتصال اهمی با پروفایل نفوذی تغییر کند. مضافاً اینکه افزایش دمای

Abrupt profile<sup>۲</sup>

(ب) تاثیر دمایی نمونه

فاکتور ایده آل $n$	جریان اشباع معکوس $I_o (A)$	ارتفاع سد شاتکی $\phi_{B0} (eV)$	دمای بازبخت $T_{an} (^{\circ}C)$
۲/۱۸	$5/34 \times 10^{-4}$	۰/۶۴۰	۱۰۰
۲/۲۴	$5/12 \times 10^{-4}$	۰/۶۵۱	۱۵۰
۲/۴۵	$8/80 \times 10^{-6}$	۰/۶۶۵	۲۰۰
۲/۵۸	$4/31 \times 10^{-6}$	۰/۶۷۴	۲۵۰
۲/۷۱	$2/47 \times 10^{-6}$	۰/۶۸۱	۳۰۰
۳/۰۲	$2/71 \times 10^{-6}$	۰/۶۸۵	۳۵۰



شکل ۳. نتایج تجربی منحنی های I-V دیود شاتکی Al/p-Si در بایاس مستقیم و اندازه گیری شده در دماهای نمونه مختلف.

جدول ۲. نتایج تجربی مشخصه های دیود شاتکی Al/p-Si در دماهای مختلف.

فاکتور ایده آل $n$	جریان اشباع معکوس $I_o (A)$	ارتفاع سد شاتکی $\phi_{B0} (eV)$	دمای نمونه $T (^{\circ}K)$
۲/۵	$1/2 \times 10^{-6}$	۰/۶۹۰	۳۰۰
۳/۰۵	$2/55 \times 10^{-7}$	۰/۵۶	۲۵۰
۳/۶۲	$1/2 \times 10^{-7}$	۰/۴۷	۲۰۰
۴/۰۱	$6/4 \times 10^{-8}$	۰/۳۴	۱۵۰

چنانچه ملاحظه می شود مقدار  $A^*$  از مقدار انتظاری آن که برابر با  $32 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$  گزارش شده است، بسیار کوچکتر می باشد. این انحراف می تواند ناشی از ثابت در نظر گرفتن ارتفاع سد در فصل مشترک فلز- نیمرسانا باشد. نتایج مشابهی در سایر تحقیقات تجربی توسط کومار و چاند [۱۶ و ۱۷] با بررسی تأثیر دمایی نمونه بر خواص دیود شاتکی Al/p-Si به دست آمده است.

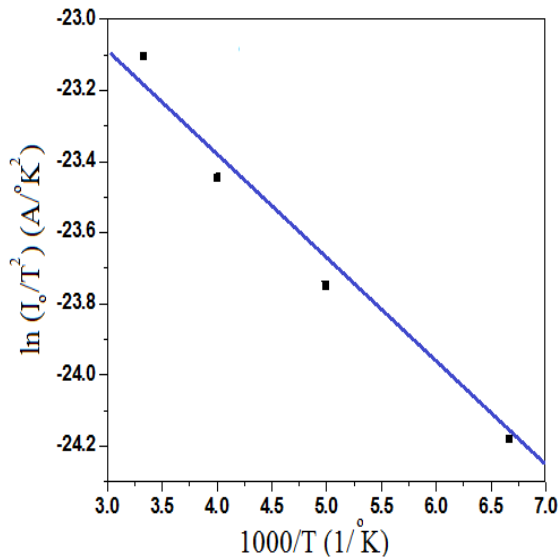
معادله ۲ می رساند که جریان اشباع معکوس و به تبع سایر مشخصه های دیود سد شاتکی به دمایی نمونه (دمای دیود) بستگی دارند و لذا برای ارزیابی تأثیر دمایی نمونه از زمپای (سرد کن) سیکل بسته هلیوم، مجهز به کنترلر دما و توربو پمپ خلا برای سرد کردن نمونه در گستره دمایی ۱۵-۳۰۰ درجه کلوین استفاده شد. شکل ۳ منحنی جریان- ولتاژ I-V اندازه گیری شده دیود شاتکی Al/p-Si بازبخت شده در دمایی بهینه ۲۵۰ سانتیگراد را تحت شرایط دمایی مختلف نمونه (۱۵-۳۰۰ کلوین) نشان می دهد. واضح است با کاهش دمایی دیود، افزایش یکبارگی جریان در ولتاژ بالا رخ می دهد و این ناشی از وابستگی دمایی  $I_o$  می باشد. لازم به توضیح است بواسطه وجود پارامتر  $T$  در مخرج روابط مذکور (و روابطی که در ادامه بحث خواهد آمد)، این رهیافت برای دماهای پایین دیود معتبر نبوده و از داده های دمایی نسبتا بالا ( $T > 150 \text{ }^{\circ}\text{K}$ ) در استخراج پارامترهای دیود استفاده شده است [۱۴].

در این مرحله نیز فاکتور ایده آل  $n$  از شیب ناحیه خطی بایاس مستقیم مشخصه نیمه لگاریتمی جریان- ولتاژ ( $\ln I-V$ ) و مشابهها جریان اشباع معکوس، توسط عرض از مبدا خط برونیایی قسمت خطی آن (ولتاژهای ۰/۴ - ۰/۲ ولت) استخراج شده و نهایتا با استفاده از جریان اشباع معکوس به دست آمده، ارتفاع سد شاتکی طبق روال ذکر شده به دست آمد و نتایج در جدول ۲ لیست شده است. از نتایج جدول ۲ درمی یابیم که با افزایش دمایی نمونه، فاکتور ایده آل  $n$  کاهش، ولی ارتفاع سد شاتکی در محل فصل مشترک  $\phi_{B0}$  افزایش می یابد، نتایج مشابهی در مقالات ارائه شده است [۷ و ۶]. افزایش فاکتور ایده آل با کاهش دمایی نمونه که به اثر  $T_0$  معروف است به پدیده تونل زنی کوانتومی و بارهای تصویری و حتی توزیع حالت های میانگامی مرتبط می باشد [۱۲ و ۱۵].

با استفاده از مقادیر جریان اشباع معکوس بدست آمده در دماهای مختلف نمونه، و با توجه به رابطه (۲) که می توان آن را به صورت زیر نوشت:

$$\ln\left(\frac{I_o}{T^2}\right) = \ln(AA^*) - \frac{e\phi_{B0}}{kT} \quad (6)$$

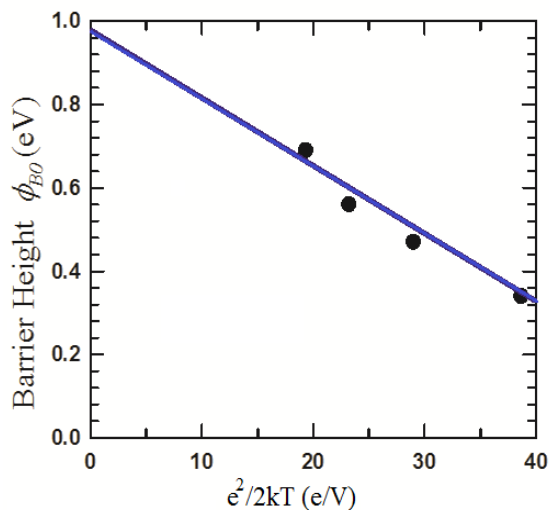
و با رسم منحنی تغییرات  $\ln\left(\frac{I_o}{T^2}\right)$  بر حسب  $\frac{1}{T}$  (مطابق شکل ۴) و اندازه گیری عرض از مبدا آن ( $\ln(AA^*)$ ) می توان ثابت ریچاردسون  $A^*$  را بدست آورد. بر این اساس مقدار ثابت ریچاردسون برابر  $2/5-10 \times 10 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$  به دست آمد.



شکل ۴. نمودار مورد استفاده در تعیین ثابت ریچاردسون.

از آنجا که ترابرد حامل‌ها در میانگانه فلز - نیمرسانا یک فرآیند برانگیختگی گرمایی (گسیل گرمایی) است و الکترون‌ها در دمای پایین فقط قادرند از سدهای کوچکتر عبور کنند و بعبارتی ترابرد حامل‌ها محدود به جریان از بخش‌هایی است که دارای سدهای شاتکی کوچکتر و فاکتور ایده‌آل بزرگتر می‌باشد. با افزایش دما، الکترون‌های بیشتری یافت می‌شوند که انرژی لازم برای غلبه بر سدهای شاتکی بزرگتر را دارا هستند و در نتیجه با افزایش دما و ولتاژ بایاس، ارتفاع سدهای غالب (دخیل در عبور جریان) دیود افزایش می‌یابد [۱۲ و ۱۶ و ۲۱].

رهیافت این پژوهش بر این فرض استوار است که پروفایل میانگانه Al/Si کاملاً ناگهانی بوده ولی عملاً در فرآیند بازیخت (حتی در دمای پایین ۲۵۰C) اتمهای Al به بلور Si نفوذ کرده [۱۳] که می‌تواند منجر به رفتار غیر منتظره دیود از جمله بزرگ بودن فاکتور ایده‌آل شود.



محل دقیق تراز فرمی در گاف انرژی و به تبع مقدار ارتفاع سد شاتکی از چالش‌های فیزیک الکترونیک بوده است. به تحقیق ثابت شده است که دانسیته حالت‌های میانگانه فلز-نیمرسانا (شکل ۱ب) بالا می‌باشد ( $10^{13} - 10^{12}$ ) و لذا تغییر در محل تراز فرمی و به تبع تغییر ارتفاع سد شاتکی بواسطه تغییر ولتاژ اعمالی به دیود مذکور ناچیز است [۳]. به عبارتی این انحراف که ناشی از ناهمگونی و غیریکنواختی ارتفاع سد شاتکی در فصل مشترک فلز-نیمرسانا است را می‌توان با فرض یک توزیع گاوسی برای ارتفاع سد، با یک مقدار میانگین  $\bar{\phi}_{B0}$  و انحراف استاندارد  $\sigma_s$  توضیح داد [۱۴ و ۱۸]:

$$\phi_{B0} = \bar{\phi}_{B0} - \frac{e\sigma_s^2}{2kT} \quad (7)$$

بر این اساس با رسم نمودار ارتفاع سد شاتکی بر حسب  $e^2/2kT$  (شکل ۵) و اندازه‌گیری عرض از مبدأ، مقدار میانگین ارتفاع سد شاتکی  $e\bar{\phi}_{B0}$  برابر  $0.98$  الکترون ولت و انحراف استاندارد  $\sigma_s$  از شیب نمودار برابر با  $0.09$  ولت به دست آمد. در حقیقت مقدار  $\sigma_s$ ، میزان انحراف بزرگی سد شاتکی در محل فصل مشترک از مقدار میانگین آن و در نتیجه میزان ناهمگونی آن در سطح دیود مورد نظر می‌باشد.

سپس با جایگذاری مقدار بدست آمده در رابطه ۲ نمودار اصلاح یافته را رسم می‌کنیم. با فرض توزیع گاوسی ارتفاع سد و با توجه به مقدار انحراف معیار به دست آمده می‌توان نمودار اصلاح شده را بر اساس رابطه:

$$Z = \ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) - \frac{e^2\sigma_s^2}{2k^2T^2} = \ln(AA^*) - \frac{e\bar{\phi}_{B0}}{kT} \quad (8)$$

رسم کرد (شکل ۶). با توجه به اصلاح انجام شده ثابت ریچاردسون برابر با  $29.3 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$  بدست آمد که با مقدار انتظاری شناخته شده  $32 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$  همخوانی دارد. آلتیندال و همکارانش [۱۹] نیز به نتایج مشابهی دست یافتند.

شکل ۵ می‌رساند که با افزایش دمای دیود (متناظر با مقادیر کوچک  $e^2/2kT$ )، ارتفاع سد شاتکی افزایش می‌یابد و این نتیجه در تقابل یا تغییرات گاف انرژی در اثر دما می‌باشد بعبارتی تغییر ارتفاع سد شاتکی در اثر دما نمی‌تواند ناشی از وابستگی دمایی گاف انرژی نیمرسانا باشد [۱۹ و ۲۰] و این تأییدی بر رهیافت فرضیه توزیع گاوسی ارتفاع شاتکی مورد بحث در این پژوهش است.



به دست آمد. مقدار بزرگ و غیر منتظره فاکتور ایده آل را می توان با پراکندگی حامل های جریان از اتمهای Al نفوذ یافته در نزدیکی میانگام Al/Si توجیه کرد.

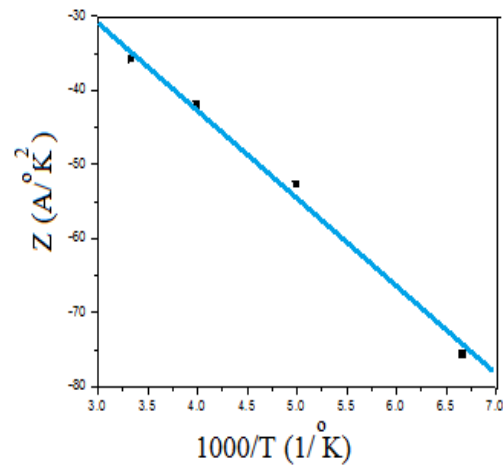
### تشکر و قدردانی

بسترهای p-Si مورد استفاده در این پژوهش توسط گروه نانو-سیلیکان دانشگاه واریک انگلستان تهیه شده و نویسندگان از پروفیسور پارکر، پروفیسور و آل و پروفیسور لیدلی تشکر می کنند.

### مراجع

- [۱] B.L. Sharma, "Metal-semiconductor Schottky barrier junctions and their applications," Plenum Pres, 2013.
- [۲] S.M. Sze, and K.K. Ng, "Physics of semiconductor devices," Wiley, Hoboken, NJ, 2007.
- [۳] M.G. Arashti and M.A. Sadeghzadeh, "Low-temperature electrical characterization of the Ti-Si(100) interface at the p-Si/SiGe/Si-Ti structure using Hall measurement analysis," Physica Scripta, vol. 88, 02570, 2013.
- [۴] M.K. Hudait, and S.B. Krupanidhi, " Effects of thin oxide in metal-semiconductor and metal-insulator-semiconductor epi-GaAs Schottky diodes," Solid-State Electronics, vol. 44, pp. 1089-1097, 2000.
- [۵] E. Guo, Z. Zeng, Y. Zhang, X. Long, H. Zhou, and X. Wang, "The effect of annealing temprature on the electronic parameters and transport mechanism of Pt/n-type Ge Schottky diodes," Microelectronic Reliability, vol. 62, pp. 62-69, 2016.
- [۶] A. Chawanda, C. Nyamhere, F. Auret, W. Mtangi, M. Diale, and J. Nel, "Thermal annealing behaviour of platinum, nickel and titanium Schottky barrier diodes on n-Ge (100)," Journal of Alloys and Compounds, vol. 492, pp. 649-655, 2010.
- [۷] H. Doğan, N. Yıldırım, and A. Turut, "Thermally annealed Ni/n-GaAs (Si)/In Schottky barrier diodes," Microelectronic Engineering, vol. 85, pp. 658-655, 2008.
- [۸] G. Güler, Ş. Karataş, and Ö. Bakkaloglu, "Annealing temperatureon effect on electrical characteristics of Co/p-type Si Schottky barrier diodes," Physica B: Condensed Matter, vol. 404, pp. 1494-1497, 2009.

شکل ۵. نمودار ارتفاع سد بر حسب  $e^2/2KT$  با توجه به توزیع گاوسی ارتفاع سد شاتکی.



شکل ۶. منحنی رهیافت تعیین ثابت ریچاردسون دیود شاتکی Al/p-Si بر اساس توزیع گاوسی ارتفاع سد شاتکی.

مشابه با ساختار AlGaAs/GaAs با پروفایل غیر ناگهانی [۲۲]، نفوذ اتمهای آلومینیم (بعنوان ناخالصی پذیرنده) در بلور سیلیکان باعث می شود که غلظت ناخالصی های پذیرنده و یونیزه شده در نیمرسانا و در نزدیک میانگام Al/Si افزایش یابد و به تبع تحرک پذیری حامل ها در نتیجه جریان عبوری از دیود بواسطه پراکندگی حامل ها از اتم های نفوذ یافته کاهش یابد و لذا طبق معادله ۱ بزرگ بودن فاکتور ایده آل  $n$  توجیح می گردد. به بیان دیگر بزرگی غیر منتظره فاکتور ایده آل ناشی از پراکندگی حامل های جریان دیود از ناخالصی های (اتمهای Al) نفوذ یافته به نیمرسانا می باشد و از آنجا که پراکندگی از ناخالص یونیده (کولنی) در دماهای پایین بیشتر است به تبع با کاهش دما فاکتور ایده آل نیز افزایش می یابد.

### نتیجه گیری

در این مطالعه دیود شاتکی Al/p-Si به روش لایه نشانی تبخیر حرارتی ساخته و مشخصه یابی شد. با اندازه گیری منحنی جریان-ولتاژ دیودهای بازپخت شده در محدوده دمای ۱۰۰-۳۵۰ درجه سانتی گراد، پارامتر های فاکتور ایده آل، ارتفاع سد شاتکی و جریان اشباع معکوس ارزیابی شد و دریافتیم که دمای مطلوب بازپخت ۲۵۰ درجه سانتی گراد می باشد. مضافاً با تحلیل نتایج مشخصه جریان-ولتاژ دیود شاتکی اندازه گیری شده در گستره دمایی ۳۰۰-۱۵۰ کلون، اثر دمای دیود (نمونه) بر ارتفاع سد شاتکی، فاکتور ایده آل و جریان اشباع معکوس بررسی شد. با کاهش دمای دیود، ارتفاع سد شاتکی و جریان اشباع معکوس کاهش اما فاکتور ایده آل افزایش یافت. با در نظر گرفتن توزیع غیر یکنواخت سد شاتکی در میانگام فلز-نیمرسانا، ارتفاع آن برابر با  $0.198\text{eV}$  و مقدار ثابت ریچاردسون برابر با  $29.3\text{Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$

- Al/Si Schottky diode,” Proceeding of International Conference on Recent Trends in Applied Physics & Material Science: RA, pp. ۴۸۷- ۴۸۸, ۲۰۱۳.
- [۱۷] S. Chand, and J. Kumar, “Current-Voltage characteristics and barrier parameters of Pd<sub>2</sub>Si/p-Si(111) Schottky diodes in a wide temperature range,” *Semicond. Sci. Technol.* vol. 10, pp. 1680-1688, 1995.
- [۱۸] S. Acar, S. Karadeniz, N. Tuğluoğlu, A. Selçuk, and M. Kasap, “Gaussian distribution of inhomogeneous barrier height in Ag/P-Si (100) diodes,” *Applied Surface Science*, vol. 233, pp. 373-381, 2004.
- [۱۹] Ş. Altındal, H. Kanbur, A. Tataroğlu, and M. Bülbül, “The barrier height distribution in identically prepared Al/p-Si Schottky diodes with the native interfacial insulator layer,” *Physica B: Condensed Matter*, vol. 399, pp. 146-154, 2007.
- [۲۰] Ş. Altındal, H. Kanbur, D.E. Yildiz, and M. Parlak, “Current conduction mechanism in Al/P-Si Schottky barrier diodes with native insulator layer at low temperatures,” *Appl. Surf. Sci.* vol. 253, pp. 5056-5061, 2007.
- [۲۱] A. Gümüş, A. Türüt, and N. Yalçın, “Temperature dependence of barrier characteristics of CrNiCo alloy Schottky contacts on n-type molecular beam epitaxy GaAs,” *J. Appl. Phys.* vol. 91, pp. 245-250, 2002.
- [۲۲] M.A. Sadeghzadeh, S.M. Azizi, “Interfacial Al segregation limiting electron mobility at inverted interface of AlGaAs/GaAs quantum well,” *Semicond. Sci. Technol.* vol. 27, 105009, (6pages), 2012.
- [۹] Ç. Nuhoğlu and Y. Gülen, “The effect of high temperature annealing on Schottky diode characteristics of Au/n-Si contacts,” *Vacuum*, vol. 84, pp. 812-816, 2010.
- [۱۰] İ. Dökme, M.Ş. Altındal, and M. M. Bülbül, “The barrier height inhomogeneity in Al/p-Si Schottky barrier diodes with native insulator layer,” *Applied Surface Science*, vol. 252, pp. 7749-7756, 2006.
- [۱۱] O. Pakma, N. Serin, T. Serin, and Ş. Altındal, “On the energy distribution profile of interface states obtained by taking into account of series resistance in Al/TiO<sub>2</sub>/p-Si (MIS) structures,” *Physica B: Condensed Matter*, vol. 406, pp. 771-776, 2011.
- [۱۲] Ö. Faruk Yüksel, “Temperature dependence of current-voltage characteristics of Al/p-Si (100) Schottky barrier diodes,” *Physica B: Condensed Matter*, vol. 404, pp. 1993-1997, 2002.
- [۱۳] J.Y. Wang, A. Zalar, Y.H. Zhao, E.J. Mittemeijer, “Determination of interdiffusion coefficient for Si/Al multilayers by Auger electron spectroscopical sputter depth profiling,” *Thin Solid Films*, vol. 433, pp. 92-96, ۲۰۰۳.
- [۱۴] A. Sariyidiz, Ö. Vural, M. Evecen, and Ş. Altındal, “Single Gaussian distribution of barrier height in Al/PS-ZnPc/P-Si type Schottky barrier diode in temperature range of 120-320K,” *J. Mater Sci: Mater Electron*, vol. 25, pp. 4391-4397, 2014.
- [۱۵] R. T. Tung, “Electron transport at metal-semiconductor interfaces: General theory,” *Phys. Rev. B*, vol. 45, pp. 13509-13523, 1992.
- [۱۶] R. Kumar and S. Chand, “The effects of temperature on electrical transport properties of

