

صلاة الاضلاع



دانشکده: فیزیک

گروه: فیزیک حالت جامد

عنوان پایان نامه ارشد

مطالعه پیوندگاه فلز- نیمرسانا

دانشجو: سمیه سبزی سروستانی

استاد راهنما:

دکتر حسین عشقی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ماه ۱۳۹۱

تقدیم به

پدر بزرگوار و مادر مهربانم

به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایثار و از خودگذشتن
به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزکاران به‌ترین پشتیبان است
به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می‌گراید
و به پاس محبت‌های بی‌دینشان که هرگز فروکش نمی‌کند

و به کل زندگیم، همسرفداکارم

که در تمام بحظات، وجود گرم امیدبخشش را در کنارم احساس کردم.

مشکر قدردانی

پروردگاری بمتا را سپاسگذارم که در لحظه لحظه زندگیم نوریاری اوروشنی بخش زندگیم و دستان توانگرش در همه حال نگره دار وجودم بوده است. اکنون که در سایه الطاف بی کرانش این مرحله از تحصیل را به پایان می رسانم، بر خود وظیفه می دانم از زحمات استاد فرزانه و ارجمندم جناب آقای دکتر حسین عثمی که همواره از شخصیت والای ایشان درس ها آموخته ام صمیمانه تشکر نمایم؛ که موفقیت در این عرصه را مدیون زحمات، حمایت ها و پشتیبانی های دلسوزانه ایشان می دانم. همچنین از اساتید ارجمند جناب آقای دکتر ایزدی فرد و جناب آقای دکتر حسامی پیلرود که زحمات داوران این پایان نامه را تقبل نموده اند صمیمانه تشکر می نمایم.

تعهد نامه

اینجانب سمیه سبزی سروستانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته فیزیک (حالت جامد) دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **مطالعه پیوندگاه فلز- نیمرسانا تحت راهنمایی دکتر حسین عشقی متعهد می شوم .**

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

امروزه دیوده‌های شاتکی وابسته به ساختار های فلز- نیمرسانا (MS) و فلز- عایق- نیمرسانا (MIS) کاربرد های بسیار گسترده‌ای در قطعات الکترونیکی و اپتوالکترونیک پیدا کرده اند.

ما در این تحقیق تجربی مبادرت به ساخت سه نمونه دیود شاتکی با ساختار های Al/p-Si، Cu/p-Si و p-Si/سیلیکون متخلخل/Al نموده ایم. بستگی دمایی مشخصه های جریان- ولتاژ (I-V) آنها در شرایط بایاس مستقیم در محدوده دمایی ۳۰۰- K ۳۶۸ اندازه گیری و داده های بدست آمده بر مبنای نظریه گسیل گرما یونی به طور کمی پردازش شدند. در این کار به بررسی تاثیر پارامتر هایی همچون ارتفاع سد، ضریب ایده آلی، مقاومت سری و چگالی حالات سطحی در فصل مشترک با فرض حضور لایه اکسید بومی در محل فصل مشترک فلز-سیلیکون پرداخته ایم.

تحلیل داده ها در نمونه های با فصل مشترک تخت نشانگر آن است که به منظور دستیابی به یک نتیجه منطقی از روند تغییرات کمیت ها از جمله ارتفاع سد و ضریب ریچارسون لازم است از نظریه تعمیم یافته گسیل گرمایونی با وجود یک توزیع متناهی گوسی برای ارتفاع های سد پتانسیل در محل فصل مشترک استفاده شود.

داده های اندازه گیری شده مربوط به نمونه های متخلخل (به ازای چگالی های جریان آندیزاسیون متفاوت) نشانگر کاهش میزان عبور جریان در این قطعات در مقایسه با نمونه غیر متخلخل می باشد. علت این رفتار با توجه به تحلیل داده ها می تواند ناشی از افزایش (۲ تا ۳ برابری) ضریب ایده آلی در این نمونه ها در مقایسه با نمونه بدون تخلخل باشد، که خود متناظر با افزایش تراکم حالت های سطحی بر اثر تخلخل های ایجاد شده در مساحت های بزرگتر در محل فصل مشترک است.

کلید واژه: دیود شاتکی، گسیل گرما یونی، وابستگی دمایی، مشخصه جریان - ولتاژ، سیلیکون

متخلخل

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱. سبزی سروستانی، سمیه؛ عشقی، حسین (۱۳۹۱) «نقش لایه عایق بومی و حالات سطح مشترک بر سازوکارهای انتقال جریان در دیود شاتکی Cu/p-Si»، دومین همایش سالانه نوآوری ها در پردازش لایه های نازک و مشخصه های آن ها، کرمان.
۲. سبزی سروستانی، سمیه؛ عشقی، حسین (۱۳۹۱) « ناهمگنی ارتفاع سد در دیود های سد شاتکی Cu/p-Si با لایه عایق بومی»، اولین همایش ملی الکترونیکی کاربرد های فیزیک، دانشگاه جهرم.

فصل اول: مبانی نظری اتصالات فلز- نیمرسانا

۱-۱: مقدمه.....	۲
۲-۱: اتصال فلز- نیمرسانا.....	۲
۱-۲-۱: اتصال شاتکی.....	۳
۲-۲-۱: اتصال اهمی.....	۵
۳-۱: اتصال شاتکی، گسیل گرما یونی.....	۷
۱-۳-۱: مشخصه جریان- ولتاژ در شرایط حضور لایه عایق بومی.....	۹
۲-۳-۱: تعمیم نظریه گسیل گرما یونی در شرایط سد ناهمگن.....	۱۰
۴-۱: مقاومت متوالی R_s	۱۵
۵-۱: چگالی حالات سطحی.....	۱۶

فصل دوم: مروری بر مقالات وابسته به اتصالات فلز- نیمرسانا

۱-۲: مقدمه.....	۱۹
۲-۲: کاربردهای دیودهای سد شاتکی.....	۱۹
۳-۲: اتصال اهمی.....	۲۰
۴-۲: بررسی مشخصه یابی I-V دیود شاتکی Al/p-Si.....	۲۲
۱-۴-۲: وابستگی دمایی مشخصه های I-V دیود شاتکی در شرایط بایاس مستقیم، بر پایه سد همگن.....	۲۳
۱-۴-۲-۱: تعیین جریان اشباع معکوس (I_0) و ضریب ایده آلی (n).....	۲۳

- ۲-۴-۱-۲: تعیین ارتفاع سد..... ۲۵
- الف) تعیین ارتفاع سد با استفاده از اندازه‌گیری جریان- ولتاژ (I-V)..... ۲۵
- ب) تعیین ارتفاع سد با استفاده از اندازه‌گیری انرژی فعالسازی..... ۲۸
- ۲-۴-۲: مطالعه مشخصه‌های I-V دیود شاتکی Al/p-Si بر پایه سد پتانسیل ناهمگن..... ۲۹
- ۲-۴-۳: مقاومت متوالی R_s ۳۰
- ۲-۴-۴: چگالی حالات سطحی..... ۳۲
- ۲-۵: بررسی مشخصه‌یابی I-V دیود شاتکی Cu/p-Si بر پایه سد همگن..... ۳۲
- ۲-۶: سیلیکون متخلخل و کاربردهای آن..... ۳۴
- ۲-۷: روش‌های ساخت سیلیکون متخلخل..... ۳۶
- ۲-۸: ساز و کار خوردگی سیلیکون و عوامل مؤثر در آن..... ۳۶
- ۲-۹: پارامترهای مؤثر در میزان تخلخل..... ۳۷
- ۲-۱۰: بررسی مشخصه‌یابی I-V سیلیکون متخلخل با ساختار Al/PS/p-Si..... ۳۸

فصل سوم: مراحل آزمایشگاهی ساخت نمونه و روش‌های مشخصه‌یابی

- ۳-۱: مقدمه..... ۴۳
- ۳-۲: ایجاد اتصال در قسمت پشتی نمونه..... ۴۳
- ۳-۱-۲: روش TLM..... ۴۵
- ۳-۳: تمیزکاری سطح نمونه..... ۴۸
- ۳-۴: متخلخل سازی سطح نمونه..... ۴۹
- ۳-۴-۱: خشک کردن..... ۴۹
- ۳-۵: ایجاد اتصال در قسمت رویی نمونه..... ۵۰
- ۳-۶: معرفی دستگاه‌های مورد استفاده در تهیه نمونه‌ها و مشخصه‌یابی آن‌ها..... ۵۰
- ۳-۶-۱: دستگاه تبخیر در خلا..... ۵۰

۵۳.....۲-۶-۳: دستگاه ساخت سیلیکون متخلخل.....

۵۴.....۳-۶-۳: دستگاه مشخصه‌یابی I-V نمونه‌ها.....

۵۵.....۴-۶-۳: دستگاه میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی (FESEM).....

فصل چهارم: مشخصه‌یابی‌های فیزیکی و نتایج

۵۸.....۱-۴: مقدمه.....

۵۸.....۲-۴: اتصال اهمی.....

۵۹.....الف) بررسی اثر مدت زمان بازپخت.....

۶۰.....ب) بررسی اثر ضخامت لایه Al.....

۶۲.....ج) بررسی اثر دمای بازپخت.....

۶۵.....۳-۴: بررسی مشخصه‌یابی I-V دیود شاتکی Al/p-Si.....

۱-۳-۴: وابستگی دمایی مشخصه‌های I-V دیود شاتکی در شرایط بایاس مستقیم، بر پایه سد

پتانسیل همگن.....۶۵.....

۱-۱-۳-۴: تعیین جریان اشباع معکوس (I_0) و ضریب ایده‌آلی (n).....۶۵.....

۲-۱-۳-۴: تعیین ارتفاع سد.....۶۷.....

الف) تعیین ارتفاع سد با استفاده از اندازه‌گیری جریان-ولتاژ (I-V).....۶۷.....

ب) تعیین ارتفاع سد با استفاده از اندازه‌گیری انرژی فعالسازی.....۷۰.....

۲-۳-۴: مطالعه مشخصه‌های I-V دیود شاتکی Al/p-Si بر پایه سد پتانسیل ناهمگن.....۷۱.....

۳-۳-۴: مقاومت متوالی R_s۷۴.....

۴-۳-۴: چگالی حالات سطحی.....۷۶.....

۴-۴: بررسی مشخصه‌یابی I-V دیود شاتکی Cu/p-Si.....۷۸.....

۱-۴-۴: وابستگی دمایی مشخصه‌های I-V دیود شاتکی در شرایط بایاس مستقیم، بر پایه سد

پتانسیل همگن.....۷۸.....

- ۷۸.....۴-۴-۱-۱: تعیین جریان اشباع معکوس (I_0) و ضریب ایده‌آلی (n).....
- ۸۰.....۴-۴-۱-۲: تعیین ارتفاع سد.....
- ۸۰.....الف) تعیین ارتفاع سد با استفاده از اندازه‌گیری جریان-ولتاژ (I-V).....
- ۸۳.....ب) تعیین ارتفاع سد با استفاده از اندازه‌گیری انرژی فعالسازی.....
- ۸۴.....۴-۴-۲: مطالعه مشخصه‌های I-V دیود شاتکی Cu/p-Si بر پایه سد پتانسیل ناهمگن.....
- ۸۷.....۴-۴-۳: مقاومت متوالی R_s
- ۸۹.....۴-۴-۴: چگالی حالات سطحی.....
- ۹۱.....۴-۵-۵: بررسی مشخصه‌یابی الکتریکی سیلیکون متخلخل Al/PS/p-Si.....
- ۹۱.....۴-۵-۱: بررسی تأثیر جریان آنودی‌زاسیون با استفاده از تصاویر FESEM.....
- ۹۲.....۴-۵-۲: بررسی مشخصه‌یابی I-V نمونه‌ها.....
- ۹۴.....۴-۵-۳: چگالی حالات سطحی.....
- ۹۶.....نتیجه‌گیری.....
- ۱۰۰.....مراجع.....

فهرست شکل‌ها

صفحه

شکل

- شکل ۱-۱: (الف) نوارهای انرژی یک فلز و نیمرسانا (نوع n) قبل از اتصال (ب) نمودار نوارهای انرژی بعد از اتصال در شرایط تعادل گرمایی ۴
- شکل ۱-۲: نمودار نوار انرژی فلز-نیمرسانای نوع-n و نوع-p در شرایط مختلف بایاس: (الف) تعادل گرمایی (ب) بایاس مستقیم (ج) بایاس معکوس ۵
- شکل ۱-۳: فرایند تونل‌زنی در عرض سد باریک اتصال فلز - نیمرسانا ۷
- شکل ۱-۲: طرح شماتیکی از (الف) اندازه‌گیری ولتاژ (ب) تعیین L_T ۲۱
- شکل ۲-۲: مقادیر نظری و تجربی مقاومت اتصال ویژه ۲۱
- شکل ۲-۳: مقاومت اتصال ویژه برای نمونه‌های Si نوع p ۲۲
- شکل ۲-۴: داده‌های تجربی متناظر با مشخصه I-V در شرایط بایاس مستقیم دیود سد شاتکی Al/p- Si در دماهای متفاوت ۲۳
- شکل ۲-۵: تغییرات ضریب ایده آل با دما برای دیود سد شاتکی Al/p-Si ۲۴
- شکل ۲-۶: تغییرات ارتفاع سد شاتکی بر حسب ضریب ایده‌آلی در دماهای متفاوت ۲۵
- شکل ۲-۷: منحنی $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1/T$ و $1/nT$ برای دیود سد شاتکی Al/p-Si ۲۶
- شکل ۲-۸: وابستگی دمایی ارتفاع سد شاتکی موثر برای Al/p-Si ۲۷
- شکل ۲-۹: منحنی ریچاردسون از $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1/T$ و $1000/nT$ برای دیود سد شاتکی Al/p-Si ۲۸
- شکل ۲-۱۰: ارتفاع سد و ضریب ایده‌آلی بر حسب $1/T$ برای دیود سد شاتکی Al/p-Si مطابق با توزیع گاوسی ارتفاع سد ۲۹

- شکل ۱۱-۲: منحنی اصلاح شده ی ریچاردسود برای دیود شاتکی Al/p-Si بر اساس توزیع گاوسی ارتفاع سد..... ۳۰
- شکل ۱۲-۲: وابستگی دمایی مقاومت متوالی دیودهای سد شاتکی Al/p-Si (الف) منحنی H(I) بر حسب جریان I (ب) نمودار $dV/d \ln(I)$ بر حسب جریان I..... ۳۱
- شکل ۱۳-۲: وابستگی دمایی R_s بر حسب تابعی از دمای دیود شاتکی Al/p-Si با لایه عایق بومی..... ۳۱
- شکل ۱۴-۲: مشخصه نیم - لگاریتمی جریان - ولتاژ (I-V) در شرایط بایاس مستقیم و معکوس در شرایط دمایی متفاوت..... ۳۳
- شکل ۱۵-۲: مشخصه جریان - ولتاژ (I-V) در شرایط بایاس مستقیم دیود شاتکی Cu/n-Si..... ۳۴
- شکل ۱۶-۲: وابستگی دمایی ضریب ایده‌آلی و ارتفاع سد در دیود شاتکی Cu/n-Si..... ۳۴
- شکل ۱۷-۲: نمودار وابستگی تخلخل به چگالی جریان و غلظت HF..... ۳۸
- شکل ۱۸-۲: مشخصه جریان - ولتاژ ساختار Al/PS/p-Si در محدوده دمایی K ۲۹۲-۱۵۰..... ۳۹
- شکل ۱۹-۲: (الف) وابستگی دمایی ضریب ایده‌آلی (ب) وابستگی دمایی ارتفاع سد شاتکی..... ۳۹
- شکل ۲۰-۲: تصاویر SEM از (الف) سطح PS (ب) مقطع عرضی PS در چگالی جریان $\frac{mA}{cm^2}$ ۵..... ۴۰
- شکل ۲۱-۲: تصاویر SEM از (الف) سطح PS (ب) مقطع عرضی PS در چگالی جریان $\frac{mA}{cm^2}$ ۳۰..... ۴۰
- شکل ۲۲-۲: مشخصه جریان - ولتاژ برای نمونه‌هایی با ساختار Al/PS/p-Si در با چگالی جریان متفاوت..... ۴۱
- شکل ۱-۳: الگوی هندسی و بزرگی‌های ابعادی وابسته برای اتصال Al بر روی سیلیکون به‌منظور اندازه‌گیری مقاومت ویژه اتصال..... ۴۴
- شکل ۲-۳: مقاومت‌های متوالی در مسیر جریان الکتریکی در ساختار عمودی اتصال فلز - نیم‌رسانا..... ۴۵
- شکل ۳-۳: هندسه شار جریان در ساختار عرضی اتصال فلز - نیم‌رسانا..... ۴۶

شکل ۳-۴: مدل مداری معادل خط انتقال..... ۴۶

شکل ۳-۵: (الف) الگوی هندسی اتصالات عرضی فلزی بر روی نیمرسانا و (ب) نمودار تغییرات مقاومت طولی بر حسب فاصله بین اتصالات..... ۴۷

شکل ۳-۶: الگوی هندسی الکتروگذار AI بر روی ویفر سیلیکون..... ۴۸

شکل ۳-۷: مدار بکار برده شده برای اندازه‌گیری مقاومت‌های هر دو اتصال متوالی..... ۴۸

شکل ۳-۸: تصویر شماتیکی از اتصالات الکتریکی دیوده‌های شاتکی..... ۵۰

شکل ۳-۹: سمت راست تصویر شماتیک از دستگاه تبخیر در خلأ و سمت چپ دستگاه مورد استفاده در آزمایشگاه..... ۵۲

شکل ۳-۱۰: نمایی شماتیک از سلول آنودیزاسیون مورد استفاده ما در آزمایشگاه..... ۵۴

شکل ۳-۱۱: سامانه اندازه‌گیری جریان - ولتاژ مورد استفاده ما در آزمایشگاه..... ۵۵

شکل ۳-۱۲: (الف) دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) مدل (S360MV2300) دانشگاه تهران (ب) تصویر شماتیک از اجزا داخلی مسیر عبور باریکه الکترونی تا سطح نمونه..... ۵۶

شکل ۴-۱: رفتار اهمی مشخصه‌های I-V مربوط به اتصال AI روی سیلیکون در نمونه بدون بازپخت (N0) و نمونه‌های بازپخت شده (N1)، (N2) و (N3)..... ۵۹

شکل ۴-۲: نمودار تغییرات مقاومت‌های وابسته به فواصل متوالی مربوط به نمونه‌های S1، S2 و S3..... ۶۱

شکل ۴-۳: نمودار تغییرات مقاومت‌های وابسته به اتصالات متوالی در نمونه‌های T1، T2 و T3..... ۶۳

شکل ۴-۴: داده‌های تجربی متناظر با مشخصه I-V در شرایط بایاس مستقیم دیود سد شاتکی Al/p- Si در دماهای مختلف..... ۶۵

شکل ۴-۵: مشخصه‌ی جریان - ولتاژ برای دیود سد شاتکی در دمای ۳۴۳ K. موقعیت جریان اشباع معکوس (I_0) در این نمونه از طریق برون‌یابی داده‌ها در گستره خطی داده‌ها که بزرگی افت ولتاژ IR_s کوچک است نشان داده شده است..... ۶۶

شکل ۴-۶: منحنی $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1/nT$ برای دیود سد شاتکی Al/p-Si. خط نقطه چین حاصل برازش داده‌ها به کمک رابطه ۲-۱۷ می‌باشد..... ۶۸

شکل ۴-۷: وابستگی دمایی ارتفاع سد شاتکی موثر برای دیود شاتکی Al/p-Si. خط نقطه چین نشان‌دهنده شیب ظاهری داده‌هاست، لکن به دلیل گستره محدود دمایی به کار گرفته شده انتظار می‌رود شیب داده‌ها در گستره دمایی پایین به صورت خط پر باشد تا ارتفاع سد مؤثر در دمای صفر کلوین را برای Si برآورده سازد..... ۶۹

شکل ۴-۸: منحنی ریچاردسون از $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1/T$ برای دیود سد شاتکی Al/p-Si. خط نقطه چین حاصل برازش داده‌ها به کمک رابطه ۲-۱۴ می‌باشد..... ۷۱

شکل ۴-۹: نمودار ارتفاع سد ظاهری بر حسب $q/2KT$ از دیود شاتکی Al/p-Si بر اساس در نظر گیری توزیع گاوسی برای مقادیر ناهمگون ارتفاع سد خط نقطه چین سیاه رنگ حاصل برازش داده‌ها به کمک معادله ۲-۲۶ می‌باشد..... ۷۲

شکل ۴-۱۰: تغییرات ضریب ایده آلی بر حسب $q/2KT$ در دیود شاتکی Al/p-Si مبتنی بر توزیع گاوسی ارتفاع سد. خط ممتد سیاه رنگ حاصل برازش داده‌ها به کمک معادله ۲-۳۴ می‌باشد..... ۷۳

شکل ۴-۱۱: منحنی اصلاح شده ی ریچاردسون برای دیود شاتکی Al/p-Si بر اساس توزیع گاوسی ارتفاع سد. خط ممتد سیاه رنگ حاصل برازش داده‌ها به کمک معادله ۲-۳۶ می‌باشد..... ۷۴

شکل ۴-۱۲: نمودار $H(I)$ بر حسب جریان I در دیود شاتکی Al/p-Si در دماهای متفاوت..... ۷۵

شکل ۴-۱۳: نمودار $dV/d \ln(I)$ بر حسب جریان I در دیود شاتکی Al/p-Si در دماهای متفاوت. خطوط سیاه رنگ حاصل برازش داده‌ها به کمک معادله ۲-۳۹ می‌باشد..... ۷۵

شکل ۴-۱۴: وابستگی دمایی R_s بر حسب تابعی از دمای دیود شاتکی Al/p-Si با لایه عایق بومی..... ۷۶

شکل ۴-۱۵: تغییرات چگالی حالات سطحی با دما برای دیود شاتکی Al/p-Si..... ۷۷

شکل ۴-۱۶: داده‌های تجربی متناظر با مشخصه I-V در شرایط بایاس مستقیم دیود سد شاتکی Cu/p-Si در دماهای مختلف..... ۷۸

شکل ۴-۱۷: مشخصه‌ی جریان - ولتاژ برای دیود سد شاتکی در دمای ۳۲۳ K موقعیت جریان اشباع معکوس (I_0) در این نمونه از طریق برون‌یابی داده‌ها در گستره خطی داده‌ها که بزرگی افت ولتاژ IR_s کوچک است نشان داده شده است..... ۷۹

شکل ۴-۱۸: منحنی $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1/nT$ برای دیود سد شاتکی Cu/p-Si. خط نقطه چین حاصل برازش داده‌ها به کمک رابطه ۲-۱۷ می‌باشد..... ۸۱

شکل ۴-۱۹: وابستگی دمایی ارتفاع سد شاتکی موثر برای دیود شاتکی Cu/p-Si. خط نقطه چین نشان‌دهنده شیب ظاهری داده‌هاست، لکن به دلیل گستره محدود دمایی به کار گرفته شده انتظار می‌رود شیب داده‌ها در گستره دماهای پایینی به صورت خط پر باشد تا ارتفاع سد مؤثر در دمای صفر کلوین را برای Si برآورده سازد..... ۸۲

شکل ۴-۲۰: منحنی ریچاردسون از $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1/T$ برای دیود سد شاتکی Cu/p-Si. خط نقطه چین حاصل برازش داده‌ها به کمک رابطه ۲-۱۴ می‌باشد..... ۸۴

شکل ۴-۲۱: نمودار ارتفاع سد ظاهری بر حسب $q/2KT$ از دیود شاتکی Cu/p-Si بر اساس در نظر گیری توزیع گوسی برای مقادیر ناهمگون ارتفاع سد. خط ممتد سیاه رنگ حاصل برازش داده‌ها به کمک معادله ۲-۲۶ می‌باشد..... ۸۵

شکل ۴-۲۲: تغییرات ضریب ایده آلی بر حسب $q/2KT$ در دیود شاتکی Cu/p-Si مبتنی بر توزیع گاوسی ارتفاع سد. خط ممتد سیاه رنگ حاصل برازش داده‌ها به کمک معادله ۲-۳۴ می‌باشد..... ۸۶

شکل ۴-۲۳: منحنی اصلاح شده ی ریچاردسود برای دیود شاتکی Cu/p-Si بر اساس توزیع گاوسی ارتفاع سد. خط ممتد سیاه رنگ حاصل برازش داده‌ها به کمک معادله (۲-۳۶) می‌باشد..... ۸۷

شکل ۴-۲۴: نمودار $H(I)$ بر حسب جریان I در دیود شاتکی Cu/p-Si در دماهای متفاوت..... ۸۸

شکل ۴-۲۵: نمودار $dV/d \ln(I)$ بر حسب جریان I در دیود شاتکی Cu/p-Si در دماهای متفاوت. خطوط سیاه رنگ حاصل برازش داده‌ها به کمک معادله (۲-۳۹) می‌باشد..... ۸۸

شکل ۴-۲۶: دمایی R_s بر حسب تابعی از دمای دیود شاتکی Cu/p-Si با لایه عایق بومی..... ۸۹

شکل ۴-۲۷: تغییرات چگالی حالات سطحی با دما برای دیود شاتکی Cu/p-Si..... ۹۰

شکل ۴-۲۸: تصاویر FESEM مربوط به مقطع عرضی نمونه‌های: (الف) S1 و (ب) S2..... ۹۱

شکل ۴-۲۹: داده‌های تجربی متناظر با مشخصه I-V ساختار Al/PS/p-Si برای نمونه S1 و S2..... ۹۲

شکل ۴-۳۰: مشخصه I-V دیود شاتکی Al/p-Si (S0) در دمای ۳۰۰ K و ساختار سیلیکون متخلخل Al/PS/p-Si (S1 و S2) در شرایط تاریکی و دمای ۳۰۰ K..... ۹۳

شکل ۴-۳۱: مشخصه ی جریان - ولتاژ برای (الف) نمونه S1 (ب) نمونه S2 در دمای ۳۰۰ K. موقعیت جریان اشباع معکوس (I_0) در این نمونه‌ها از طریق برون‌یابی داده‌ها در گستره خطی داده‌ها نشان داده شده است..... ۹۳

شکل ۴-۳۲: افزایش مقادیر چگالی حالات سطح مشترک در نمونه‌های متخلخل S1 و S2 نسبت به نمونه S0..... ۹۵

فهرست جدول‌ها

صفحه

جدول

- جدول ۱-۲: مقادیر وابستگی دمایی پارامترهای متفاوت از مشخصه‌های I-V دیود سد شاتکی Al/p-Si در شرایط دمایی متفاوت از ۱۵۰-۳۷۵ K ۲۴
- جدول ۲-۲: وابستگی دمایی ارتفاع سد موثر با دما برای دیود سد شاتکی Al/p-Si ۲۷
- جدول ۳-۲: وابستگی دمایی مقاومت متوالی برای دیود شاتکی Al/p-Si با لایه عایق بومی ۳۱
- جدول ۴-۲: وابستگی دمایی چگالی حالات سطح مشترک برای دیود سد شاتکی Al/p-Si ۳۲
- جدول ۵-۲: وابستگی دمایی ارتفاع سد شاتکی و ضریب ایده‌آل در دماهای متفاوت از ۳۰۰-۳۷۵ K ۳۳
- جدول ۶-۲: مقادیر به دست آمده از اندازه‌گیری جریان-ولتاژ نمونه‌ها ۴۱
- جدول ۱-۴: بررسی تأثیر مدت زمان بازپخت بر مقاومت ویژه اتصال Si/Al در نمونه‌های مورد بررسی ۶۰
- جدول ۲-۴: مقادیر مقاومت‌های متوالی وابسته به فواصل متفاوت مربوط به هر نمونه ۶۱
- جدول ۳-۴: مقادیر مقاومت ویژه اتصال (ρ_c) و L_T در نمونه‌های S1، S2 و S3 ۶۲
- جدول ۴-۴: مقادیر مقاومت‌های وابسته به فواصل متوالی در نمونه‌های T1، T2 و T3 ۶۳
- جدول ۵-۴: مقادیر مقاومت ویژه اتصال ρ_c و L_T مربوط به نمونه‌های T1، T2 و T3 ۶۴
- جدول ۶-۴: مقادیر ضریب ایده‌آلی و جریان اشباع معکوس در نمونه مورد بررسی در دماهای مختلف ۶۷
- جدول ۷-۴: تغییرات دمایی ارتفاع سد شاتکی Φ_{B0} و ارتفاع سد مؤثر Φ_{Bef} ۶۸

- جدول ۴-۸: وابستگی دمایی پارامترهای متفاوت تعیین شده از مشخصه های I-V دیود شاتکی Al/p-Si با لایه عایق بومی..... ۷۶
- جدول ۴-۹: وابستگی دمایی چگالی حالات سطحی دیود شاتکی Al/p-Si با لایه عایق بومی..... ۷۷
- جدول ۴-۱۰: مقادیر ضریب ایده‌آلی و جریان اشباع معکوس در نمونه مورد بررسی در دماهای مختلف..... ۸۰
- جدول ۴-۱۱: تغییرات دمایی ارتفاع سد شاتکی Φ_{B0} و ارتفاع سد مؤثر Φ_{Bef} ۸۱
- جدول ۴-۱۲: وابستگی دمایی پارامترهای متفاوت تعیین شده از مشخصه های I-V دیود شاتکی Cu/p-Si با لایه عایق بومی..... ۸۹
- جدول ۴-۱۳: وابستگی دمایی چگالی حالات سطحی دیود شاتکی Cu/p-Si با لایه عایق بومی..... ۹۰
- جدول ۴-۱۴: مقادیر بدست آمده از مشخصه I-V در نمونه S0، S1 و S2..... ۹۴
- جدول ۴-۱۵: مقادیر چگالی حالات سطح مشترک در نمونه S0 و نمونه‌های متخلخل S1 و S2..... ۹۵

فصل اول

مبانی نظری اتصالات فلز- نیم رسانا

۱-۱ : مقدمه

قطعات تک قطبی قطعات نیمرسانایی هستند که در آنها فقط یک نوع حامل به طور غالب در روند رسانش شرکت دارد. این قطعات شامل (۱) اتصال فلز-نیمرسانا (۲) ترانزیستور اثر-میدان پیوندگاه (JFET)^۱ (۳) ترانزیستور اثر-میدان فلز-نیمرسانا (MESFET)^۲ (۴) دیود فلز-اکسید-نیمرسانا (MOS)^۳ و (۵) ترانزیستور اثر میدان فلز-اکسید-نیمرسانا (MOSFET)^۴. اتصال فلز-نیمرساناست از نظر الکتریکی مشابه با پیوندگاه پله‌ای یک طرفه p-n می‌باشد، لذا می‌توان آن را به صورت قطعه حامل اکثریت به کار انداخت [۱]. اتصال فلز-نیمرسانا امروزه در تکنولوژی بسیار مورد توجه واقع شده و این به سبب کاربردهای مهمی است که در مدارهای مجتمع و آشکارسازهای مادون قرمز و فرابنفش دارند [۲]. دیودهای سد شاتکی مبنای بسیاری از قطعات الکترونیکی (از جمله آشکارسازها) هستند. دیودهای سطح شاتکی همچنین در مشخصه‌یابی‌های الکتریکی پردازش قطعه و تست قطعات بعد از ساخت مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳]. در این فصل نگاهی خواهیم داشت به چگونگی شکل‌گیری اتصالات فلز-نیمرسانا (اعم از اتصال اهمی و اتصال شاتکی) و ساز و کارهای انتقال جریان در دیودهای سد شاتکی.

۱-۲ اتصال فلز-نیمرسانا

در سال ۱۹۳۸، شاتکی^۵ و مات^۶ پیشنهاد کردند که رفتار یکسوکنندگی می‌تواند از سد پتانسیل ناشی از بارهای فضایی پایدار در نیمرسانا نتیجه شود. مدلی که از این ملاحظه نتیجه می‌شود به سد شاتکی معروف است. اتصال‌های فلز-نیمرسانا می‌توانند غیر یکسوکننده نیز باشد، یعنی، اتصال بدون

¹ Junction Field-Effect Transistor

² Metal-Semiconductor Field-Effect Transistor

³ Metal-Oxide-Semiconductor

⁴ Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor

⁵ Schottky

⁶ Mott

توجه به قطبیت ولتاژ اعمال شده دارای مقاومت ناچیزی است. چنین اتصالی اتصال اهمی نامیده می-شود [۱].

شارش جریان از اتصالات فلز-نیمرسانا از چهار راه امکان پذیر است. (۱) جریان گسیل گرما یونی (TE)^۱ از نیمرسانا به فلز و بالعکس از بالای سد پتانسیل، روند غالب برای دیودهای سد شاتکی با نیمرساناهای با آرایش متوسط در دمای متوسط، در حدود دمای اتاق (۲) جریان تونل زنی از داخل سد پتانسیل، روند غالب برای اتصالات با آرایش بالا، (۳) جریان بازترکیبی در فضای تهی، (۴) جریان بازترکیبی از طریق حالات سطح مشترک [۴،۵،۶]

تابع کار به عنوان تفاوت انرژی بین تراز خلأ و تراز فرمی در ماده تعریف می شود و این کمیت با $q\Phi_m$ در فلزات و با $q\Phi_s$ برای نیمرسانا تعریف می شود [۷].

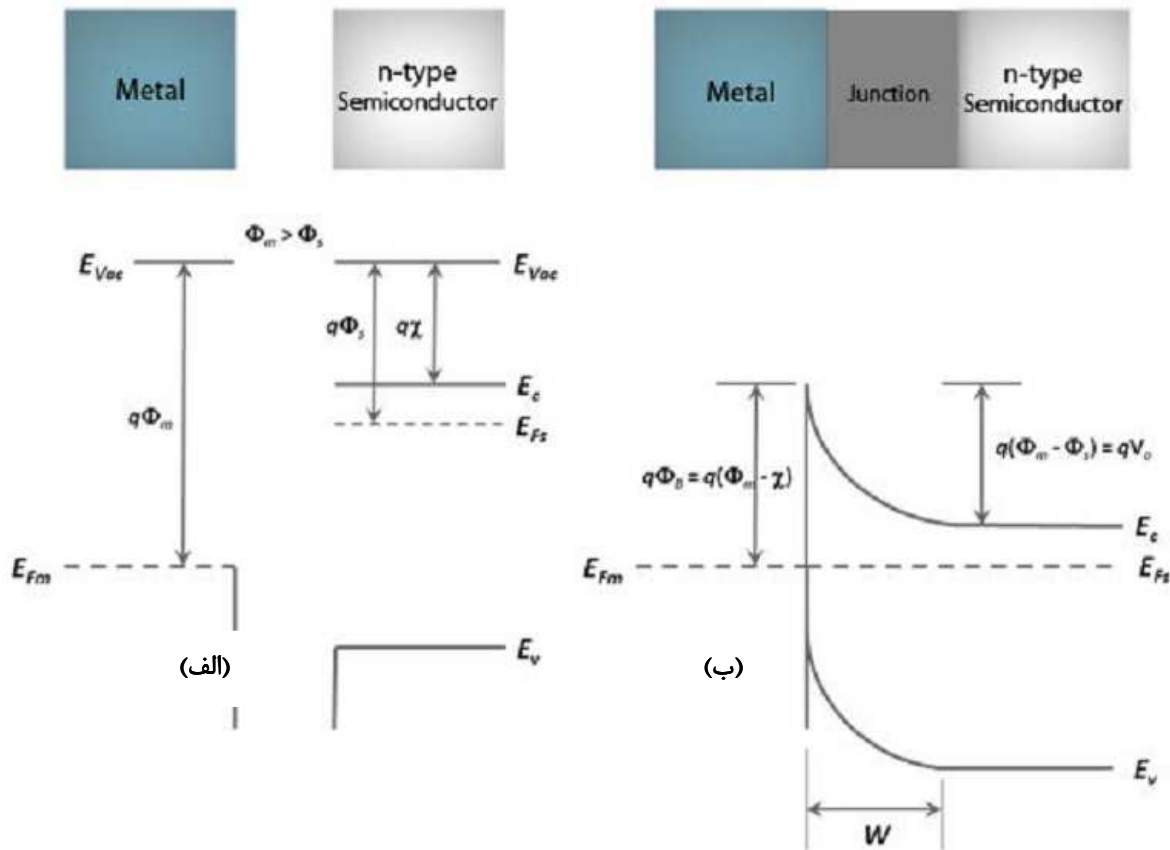
۱-۲-۱ اتصال شاتکی

اتصال شاتکی به اتصال بین یک فلز و یک نیمرسانا اشاره دارد که با ایجاد یک سد پتانسیل سبب مانعی در راه شارش حاملها از درون نیمرسانا به بیرون و بالعکس می شود [۷]. وقتی بارهای منفی به نزدیکی سطح فلز می رسند، بارهای مثبت در فلز القا می شوند. این نیروی القایی با میدان الکتریکی به کار برده شده همراه شده و بنابراین تابع کار موثر تا حدودی کاهش می یابد. چنین کاهش در سد به اثر شاتکی معروف است [۷].

وقتی $\Phi_s < \Phi_m$ همان گونه که در شکل ۱-۱ (الف) نشان داده شده موقعیت تراز فرمی در نیمرسانا بالاتر از تراز فرمی در فلز است. این تفاوت در تراز فرمی باعث می شود که الکترون ها از تراز بالاتر به تراز پایین تر شارش پیدا کنند. این شارش حاملها تا آنجا ادامه می یابد که ترازهای فرمی در فلز و نیمرسانا در یک تراز قرار گیرند، شکل ۱-۱ (ب) ناحیه تهی با پهنای W_D نزدیک پیوندگاه عمدتاً در محدوده ی نیمرسانا شکل می گیرد. بنابراین بر اثر جدایی بارهای فضایی در سمت نیمرسانا و

¹ Thermionic Emission

بار خالص منفی انباشته شده بر روی فلز در این ناحیه یک میدان لکتریکی داخلی به وجود می‌آید که این خود سبب ایجاد یک اختلاف پتانسیل الکتریکی خواهد شد.

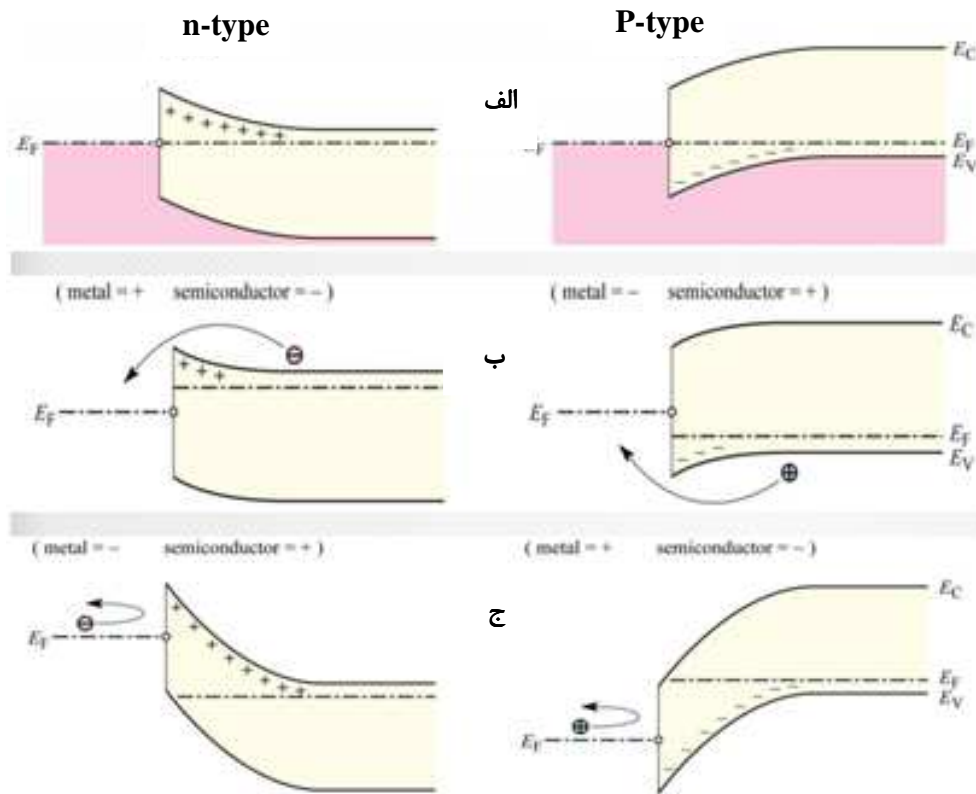


شکل ۱-۱: (الف) نوارهای انرژی یک فلز و نیمرسانا (نوع n) قبل از اتصال (ب) نمودار نوارهای انرژی

بعد از اتصال در شرایط تعادل گرمایی [۷]

در شرایط تعادل گرمایی که ترازهای فرمی با یکدیگر هم‌ردیف هستند، سد پتانسیل V_{bi} در محل پیوندگاه شکل می‌گیرد. این پتانسیل از پخش الکترون‌های بیشتر از نوار رسانش نیمرسانا به فلز جلوگیری می‌کند. این پتانسیل برابر است با تفاوت توابع کار یعنی $\Phi_s - \Phi_m$ و ارتفاع سد پتانسیل Φ_B نیز برابر است با $\chi - \Phi_m$ که $q\chi$ الکترون‌خواهی نیمرسانا است که برابر با اختلاف لبه نوار رسانش در نیمرسانای نوع n با تراز خلأ است. ارتفاع سد پتانسیل از نیمرسانا به فلز می‌تواند بسته به ولتاژ بایاس مستقیم و (معکوس) کاهش یا (افزایش) یابد [۷].

شکل ۱-۲ نمودار نوار انرژی برای سد شاتکی فلز - نیمرسانا (نوع n و p) را در شرایط تعادل گرمایی و همچنین در شرایط اعمال بایاس مستقیم و معکوس نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲: نمودار نوار انرژی فلز-نیمرسانای نوع-n و نوع-p در شرایط مختلف بایاس: (الف) تعادل گرمایی (ب) بایاس مستقیم (ج) بایاس معکوس [۸].

۱-۲-۲ اتصال اهمی

اتصال اهمی به اتصالی اطلاق می‌شود که نسبت به سایر مقاومت‌های مدار وابسته به قطعه دارای مقاومت اتصال بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی باشد. یک اتصال اهمی رضایت‌بخش نباید بر عملکرد قطعه تأثیر قابل توجهی بگذارد.

به منظور مطالعه کمی یک اتصال اهمی از کمیت مقاومت ویژه اتصال که به صورت

$$\rho_c \equiv \left[\frac{\partial J}{\partial V} \right]_{V=0}^{-1} \Omega - cm^2 \quad (1-1)$$

تعریف می‌شود، استفاده می‌کنند که در آن J چگالی جریان و V ولتاژ اعمال شده است. در اتصالات فلز-نیمرسانا (با تراکم‌های آرایش پایین)، که فرایند گسیل-گرما یونی فرایند حاکم بر جریان الکتریکی نمونه است با استفاده از رابطه ۱-۱ می‌توان دریافت:

$$\rho_c = \frac{k}{qA^*T} \exp \left[\frac{q\Phi_{Bn}}{kT} \right] \quad (2-1)$$

که Φ_{Bn} ارتفاع سد و k ثابت بولتزمن و A^* ضریب مؤثر ریچاردسون و T دمای مطلق است. این نتیجه نشان می‌دهد که برای دستیابی به یک ρ_c کوچک بایستی ارتفاع سد حتی الامکان کوچک باشد.

برای اتصالات‌های با آرایش بالا، پهنای سد بسیار باریک شده و امکان وقوع جریان تونل‌زنی محتمل

می‌شود. در این شرایط جریان تونل‌زنی با رابطه

$$I \sim \exp \left[-2W \sqrt{2m_n (q\Phi_{Bn} - qV) / \hbar^2} \right] \quad (3-1)$$

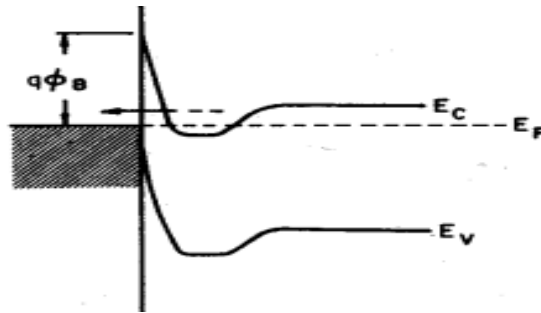
متناسب خواهد بود [۱]. در این حالت با استفاده از روابط ۱-۱ و ۳-۱ مقاومت ویژه اتصال برابر خواهد بود با:

$$\rho_c \sim \exp \left[\frac{2\sqrt{\epsilon_s m^*}}{\hbar} \left(\frac{\Phi_{Bn}}{\sqrt{N_D}} \right) \right] \quad (4-1)$$

این رابطه نشان می‌دهد که در شرایط تونل‌زنی، مقاومت ویژه اتصال تا حد زیادی به تراکم آرایش

بستگی دارد و به‌طور نمایی با ضریب $\frac{\Phi_{Bn}}{\sqrt{N_D}}$ تغییر می‌کند. شکل ۳-۱ روند تونل‌زنی در اتصالات‌های با

آرایش بالا را نشان می‌دهد [۱].



شکل ۱-۳: فرایند تونل‌زنی در عرض سد باریک اتصال فلز - نیمرسانا [۱]

۱-۳: اتصال شاتکی، گسیل گرما یونی

همان‌گونه که اشاره شد جریان اصلی در اتصالات فلز-نیمرسانا عمدتاً مربوط به حامل‌های اکثریت است.

در شرایط تعادل گرمایی (مثلاً برای نیمرسانای نوع n) چگالی جریان به‌وسیله دو شار حامل برابر و مخالف متعادل می‌شود، بدین ترتیب جریان خالص صفر می‌باشد. الکترون‌ها در نیمرسانا مایل‌اند به طرف فلز گسیل شوند، از طرفی شار متوازن‌کننده‌ی مخالفی از الکترون‌ها از فلز به سوی نیمرسانا نیز وجود خواهد داشت. این مؤلفه‌های جریان با چگالی الکترون‌ها در مرز متناسب هستند. در سطح نیمرسانا چگالی الکترون n_s عبارت است از:

$$n_s = N_D \exp\left[\frac{-qV_d}{kT}\right] = N_D \exp\left[\frac{-q(\Phi_{Bn} - V_n)}{kT}\right] = N_C \exp\left[-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right] \quad (5-1)$$

که در آن N_C چگالی حالت‌ها در نوار رسانش است و V_n نیز اختلاف پتانسیل بین تراز فرمی و نوار رسانش می‌باشد.

$$|J_{m \rightarrow s}| = |J_{s \rightarrow m}| = C_1 N_C \exp\left[-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right] \quad (6-1)$$

که در آن $J_{m \rightarrow s}$ جریان از فلز به نیمرسانا، $J_{s \rightarrow m}$ جریان از نیمرسانا به فلز، و C_1 ضریب تناسب می‌باشد.

وقتی بایاس مستقیم V_F به اتصال اعمال می‌شود، اختلاف پتانسیل الکترواستاتیکی در سد کاهش می‌یابد، و چگالی الکترون در سطح به صورت:

$$n_s \approx N_D \exp\left[-\frac{q(V_{bi} - V_F)}{kT}\right] = N_C \exp\left[-\frac{q(\Phi_{Bn} - V_F)}{kT}\right] \quad (7-1)$$

تغییر می‌یابد. بنابراین جریان $J_{s \rightarrow m}$ که از شار الکترون خارج شده از نیمرسانا نتیجه می‌شود با همان ضریب تغییر می‌کند ولی شار الکترون‌ها از فلز به نیمرسانا از آنجا که ارتفاع سد Φ_{Bn} در مقدار تعادلی‌اش باقی می‌ماند تغییری پیدا نمی‌کند. پس جریان خالص تحت بایاس مستقیم عبارت است از:

$$J = J_{s \rightarrow m} - J_{m \rightarrow s} \quad (8-1)$$

$$= C_1 N_C \exp\left[-\frac{q(\Phi_{Bn} - V_F)}{kT}\right] - C_1 N_C \exp\left[-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right] = C_1 N_C \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \left(\exp\left(\frac{qV_F}{kT}\right) - 1\right)$$

به طوری که ضریب $C_1 N_C$ برابر با $A^* T^2$ است، که در آن T دمای مطلق و A^* ضریب مؤثر ریچاردسون (بر حسب $\text{Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$) نامیده می‌شود، مقدار A^* وابسته به بزرگی جرم مؤثر است و برای Si نوع p برابر $32 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ می‌باشد. بنابراین مشخصه جریان - ولتاژ اتصال فلز - نیمرسانا در شرایط گسیل گرما یونی از رابطه زیر بدست می‌آید [۱].

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right) \quad (9-1)$$

رابطه ۹-۱ در شرایط دیود ایده‌آل $n=1$ برقرار است. با لحاظ کردن ضریب ایده‌آلی n در رابطه ۹-۱ داریم:

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)\right] \quad (10-1)$$

که در آن I_0 جریان اشباع معکوس است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۹].

$$I_0 = A^* A T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{B0}}{kT}\right) \quad (11-1)$$

مقدار جریان اشباع معکوس را می‌توان از طریق تعیین عرض از مبدا در ناحیه خطی در نمودار نیم لگاریتمی جریان - ولتاژ بدست آورد که در آن A مساحت مؤثر دیود و Φ_{B0} ارتفاع سد در شرایط

بایاس صفر است. به منظور تعیین ضریب ایده آلی قطعه می توان از رابطه ۱-۱۰ استفاده کرده و آن را به صورت زیر نوشت [۹]:

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d(\ln I)} \right) \quad (12-1)$$

به طوری که کمیت سمت راست متناظر با شیب ناحیه خطی در شرایط بایاس مستقیم در نمودار $\ln(I)-V$ است. برای تعیین ارتفاع سد (Φ_{B0}) در شرایط بایاس صفر می توان رابطه ۱-۱۱ را به صورت زیر نوشت:

$$\Phi_{B0} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{AA^* T^2}{I_0} \right] \quad (13-1)$$

که با معلوم شدن I_0 می توان ارتفاع سد را بدست آورد [۹].

برای تعیین ارتفاع سد Φ_{B0} می توان از روش دیگری نیز استفاده کرد و آن استفاده از منحنی ریچاردسون است. بدین منظور می توان از دو طرف رابطه ۱-۱۱ لگاریتم گرفت؛ در این صورت داریم:

$$\ln \left(\frac{I_0}{T^2} \right) = \ln(AA^*) - \frac{q\Phi_{B0}}{kT} \quad (14-1)$$

منحنی ریچاردسون از رسم $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1/T$ به دست می آید که از شیب و عرض از مبدأ آن به ترتیب انرژی فعالسازی (رابطه ۱-۱۵) و ضریب مؤثر ریچاردسون A^* بدست می آید [۹]. از اندازه گیری انرژی فعالسازی می توان ارتفاع سد شاتکی (Φ_{B0}) را محاسبه نمود. مزیت اصلی تعیین سد شاتکی با استفاده از اندازه گیری انرژی فعالسازی (رابطه ۱-۱۵) این است که نیازی به اطلاعاتی همچون سطح مقطع قطعه (A) ندارد [۱۰].

$$E_{act} = k \frac{d \left[\ln \left(\frac{I_0}{T^2} \right) \right]}{d \left(\frac{1}{T} \right)} = -q\Phi_{B0} \quad (15-1)$$

۱-۳-۱: مشخصه جریان - ولتاژ در شرایط حضور لایه عایق بومی

در عمل به دلیل حضور عواملی همچون لایه عایق، نیروی بار تصویری و بارهای سطحی که سبب انحراف از حالت ایده‌آل ($n=1$) می‌شوند این احتمال وجود دارد که عبارت جریان اشباع (I_0) مشتمل بر ضریب ایده‌آلی (n) و نیز ضخامت لایه عایق فصل مشترک (δ) باشد. بنابراین جریان اشباع معکوس (I_0) را می‌توان به صورت زیر نوشت [۱۱].

$$I_0 = AA^* T^2 \exp(-\alpha \chi^{1/2} \delta) \exp\left(\frac{-q \Phi_{Bef}}{nkT}\right) \quad (۱۶-۱)$$

جمله $\exp(-\alpha \chi^{1/2} \delta)$ معمولاً به عنوان ضریب انتقال تونل‌زنی شناخته می‌شود. در عبارت ۱۶-۱ کمیت Φ_{Bef} ارتفاع سد مؤثر، $\alpha = \left(\frac{4\pi}{h}\right)(2m_h^*)^{1/2}$ ثابتی است که وابسته به جرم مؤثر تونل‌زنی حفره m_h^* است. به منظور تحلیل ساده‌تر از معادله ۱۶-۱، می‌توان از طرفین آن لگاریتم گرفت. در آن صورت:

$$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) = -\frac{q}{nkT} \Phi_{Bef} - \alpha \chi^{1/2} \delta + \ln(AA^*) \quad (۱۷-۱)$$

با توجه به رابطه ۱۷-۱ ضریب تونل‌زنی حفره $\alpha \chi^{1/2} \delta$ از عرض از مبدأ خط مستقیم در نمودار $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1/nT$ بدست می‌آید. با معلوم شدن ضریب تونل‌زنی حفره ارتفاع سد مؤثر وابسته به هر دما را از رابطه ۱۸-۱ می‌توان محاسبه کرد:

$$\Phi_{Bef}(I-V) = n \frac{kT}{q} \left[\ln\left(\frac{AA^* T^2}{I_0}\right) - \alpha \chi^{1/2} \delta \right] \quad (۱۸-۱)$$

این فقط برای ولتاژهای بایاس مستقیم $V > \frac{3kT}{q}$ قابل قبول است. از رسم نمودار Φ_{Bef} بر حسب T دیده می‌شود که ارتفاع سد مؤثر تقریباً به‌طور خطی با دما تغییر می‌کند:

$$\Phi_{Bef} = \Phi_B(0K) - \beta T \quad (۱۹-۱)$$

که $\Phi(0 K)$ ارتفاع سد در دمای صفر کلوین و β ضریب دمایی منفی ارتفاع سد است که از شیب نمودار Φ_{Bef} بر حسب T به دست می آید. به طوری که این مقدار برای سیلیکون (Si) برابر است با

$$[12] \beta = -4/73 \times 10^{-4} \frac{eV}{K}$$

۱-۳-۲: تعمیم نظریه گسیل گرما یونی در شرایط سد ناهمگن

در شرایط واقعی ضریب ایده آلی $n > 1$ در نمودارهای نیم لگاریتمی جریان - ولتاژ اتصالات شاتکی فلز - نیمرساناهایی با آرایش متوسط نتیجه ناهمگونی های فضایی در فصل مشترک فلز - نیمرسانا است. این نتایج در مورد ارتفاع سد شاتکی و ضریب ایده آلی که از اندازه گیری جریان - ولتاژ به دست آمده بدون در نظرگیری یک مدل فیزیکی کمی رضایت بخش نیست. مقادیر $n > 1$ را به چند اثر می توان نسبت داد [۱۳]:

- چگالی حالات فصل مشترک در لایه نازک اکسید بین فلز و نیمرسانا [۱۴، ۱۵]
- جریان تونل زنی در نیمرساناهای با آرایش بالا [۱۶]
- کاهش نیروی تصویری سدهای شاتکی در میدان الکتریکی در محل فصل مشترک [۱۷]
- جریان های تولیدی/باز ترکیبی در ناحیه تهی [۱۸]

این چهار مورد شرایط غیر ایده آل را در اتصالات شاتکی توصیف می کنند. ما در این جا به بررسی تحلیل مدل افت و خیزهای پتانسیل در محل فصل مشترک را برای تفسیر اندازه گیری های جریان - ولتاژ در اتصالات شاتکی با ناهمگنی فضایی در ارتفاع سد پتانسیل می پردازیم. این مدل نه تنها مقادیر $n > 1$ بلکه وابستگی دمایی و نتایج متفاوت از اندازه گیری های جریان - ولتاژ سدهای شاتکی را توضیح می دهد. این تفاوت ها شامل اطلاعات کمی در رابطه با توزیع سدها در محل فصل مشترک، وابستگی دمایی سدهای شاتکی و نیز نمودار ریچاردسون را می دهد.

جدا از ناصافی فصل مشترک به سبب افت و خیز ضخامتی، در رفتگی ها و مرزدانه ها در فلز، افت و خیز پتانسیل ممکن است ناشی از کاهش سدهای مؤثر بومی به سبب گسیل میدان و نواقص

ساختاری نیمرسانا نیز باشد [۱۹]. مدل افت و خیز پتانسیل با فرض یک توزیع پیوسته از ارتفاع سدها در فصل مشترک فلز و نیمرسانا ارائه شده است [۱۹]. این توزیع را می‌توان به صورت یک توزیع گوسی با ارتفاع میانگین $\overline{\Phi_{B0}}$ و انحراف معیار σ_s توضیح داد.

چنانچه از مکانیک آماری می‌دانیم، وقتی یک مجموعه اندازه‌گیری بر روی کمیت x انجام گیرد که خطاهای تجربی آن‌ها کتره‌ای باشند، مقادیر به‌دست آمده غالباً به صورت یک توزیع گوسی خواهد بود. انحراف معیار (σ) اندازه‌گیری‌ها محکی از پخشیدگی مقادیر x حول مقدار میانگین x_0 است، و مقدار σ با جذر میانگین مربع انحرافات از x_0 برابر است. اگر N اندازه‌گیری انجام شود [۲۰].

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_0)^2} \quad (20-1)$$

تابع گوسی $f(x)$ که منحنی فوق را توصیف می‌کند عبارت است از

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (21-1)$$

که در آن $f(x)$ احتمالی است که در یک اندازه‌گیری مقدار x به‌دست آید [۲۰].

با استفاده از رابطه (۲۱-۱) تابع توزیع گوسی برای ارتفاع سد عبارت خواهد بود با [۱۹]:

$$P(\Phi_{B0}) = \frac{1}{\sigma_{s0}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\Phi_{B0} - \overline{\Phi_{B0}})^2}{2\sigma_{s0}^2}\right] \quad (22-1)$$

جریان کل در دیود شاتکی که شامل سدهای ناهمگون باشد از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$I(V) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\Phi_{B0}, V) P(\Phi_{B0}) d\Phi_{B0} \quad (23-1)$$

که در آن $P(X)$ تابع توزیع استاندارد^۱ با در نظر گرفتن یک ارتفاع سد ثابت است.

اکنون با جایگذاری روابط ۱-۱۰ و ۱-۲۲ در رابطه ۱-۲۳ خواهیم داشت:

$$I(V) = AA * T^2 \exp\left[-\frac{q}{kT} \left(\overline{\Phi_{B0}} - \frac{q\sigma_{s0}^2}{2kT}\right)\right] \times \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)\right] \quad (24-1)$$

¹ normal

به طوری که:

$$I_0 = AA * T^2 \exp \left[-\frac{q}{kT} \left(\overline{\Phi_{B0}} - \frac{q\sigma_{s0}^2}{2kT} \right) \right] = AA * T^2 \exp \left(-\frac{q\Phi_{B0}}{kT} \right) \quad (25-1)$$

با استفاده از رابطه ۲۴-۱ داریم:

$$\Phi_{B0} = \overline{\Phi_{B0}} - \frac{q\sigma_{s0}^2}{2kT} \quad (26-1)$$

که $\overline{\Phi_{B0}}$ و σ_{s0} به ترتیب ارتفاع سد میانگین و انحراف معیار برای تعادل ترمودینامیکی ($V=0$) و Φ_{B0} ارتفاع سدی است که از رابطه ۱۳-۱ بدست آمده [۱۹].

تأثیر توزیع فضایی سدها بر اندازه‌گیری جریان متفاوت است. هرگونه تغییرات فضایی در سدها باعث می‌شود که جریان ترجیحاً از طریق سد کوتاه‌تر شارش یابد. رابطه ۲۶-۱ نشان می‌دهد که Φ_{B0} همیشه کوچکتر از مقدار میانگین آن یعنی $\overline{\Phi_{B0}}$ است. به منظور بررسی وابستگی ولتاژی و دمایی ضریب ایده‌آلی n با استفاده از روابط ۱۰-۱ و ۲۴-۱ داریم:

$$n^{-1}(V, T) - 1 = -\frac{\Delta\Phi_B(V)}{V} \quad (27-1)$$

$$\Delta\Phi_B(V) = \Phi_B(V) - \Phi_{B0} \quad (28-1)$$

با توجه به رابطه ۲۷-۱ چون $n > 1$ است لازم است که $\Delta\Phi_B > 0$ باشد، از این رو ارتفاع سد با افزایش ولتاژ افزایش می‌یابد. بنابراین رابطه ۲۷-۱ نشان می‌دهد که وابستگی ولتاژی ضریب ایده‌آلی نیازمند یک افزایش خطی ارتفاع سد $\Delta\Phi_B(V)$ با ولتاژ است. اگر ضریب ایده‌آلی n با وابستگی ولتاژی ارتفاع سد توصیف شود بنابراین رابطه ۲۶-۱ به این نتیجه سراسر منجر می‌شود که ارتفاع سد میانگین $\overline{\Phi_{B0}}$ و انحراف معیار σ_s وابستگی ولتاژی دارند. ناهمگونی ارتفاع سد در اتصالات شاتکی همچنین می‌تواند به دلیل همین وابستگی ارتفاع سد به ولتاژ باشد. با استفاده از رابطه (۲۶-۱) و رابطه زیر

$$\Phi_B(V) = \overline{\Phi_B(V)} - \frac{q\sigma_s^2(V)}{2kT} \quad (29-1)$$

تغییرات Φ_B (رابطه ۲۸-۱) تحت ولتاژ به صورت زیر است [۱۹].

$$\Delta\overline{\Phi}_B(V) = \overline{\Phi}_B(V) - \overline{\Phi}_{B0} - \frac{q(\sigma_s^2(V) - \sigma_{s0}^2)}{2kT} = \Delta\overline{\Phi}_B(V) - \frac{q\Delta\sigma_s^2(V)}{2kT} \quad (30-1)$$

و سرانجام مفهوم فیزیکی ضریب ایده‌آلی با ترکیب روابط ۳۰-۱ و ۲۷-۱ به صورت زیر در می‌آید.

$$n^{-1}(V, T) - 1 = -\frac{\Delta\overline{\Phi}_B(V)}{V} + \frac{q\Delta\sigma_s^2(V)}{2kTV} \quad (31-1)$$

مطابق با رابطه ۳۱-۱ و ۲۷-۱ ضریب ایده‌آلی تنها در صورتی مستقل از ولتاژ بایاس است که ارتفاع

سد میانگین $\overline{\Phi}_B$ و مربع انحراف معیار σ_s^2 به طور خطی با ولتاژ تغییر کنند. بنابراین

$$\Delta\overline{\Phi}_B(V) = \overline{\Phi}_B(V) - \overline{\Phi}_{B0} = \rho_2 V \quad (32-1)$$

$$\Delta\sigma_s^2(V) = \sigma_s^2(V) - \sigma_{s0}^2 = \rho_3 V \quad (33-1)$$

بنابراین رابطه ۳۱-۱ به صورت زیر در می‌آید [۱۹].

$$\left(\frac{1}{n} - 1\right) = \rho_2 - \frac{q\rho_3}{2kT} \quad (34-1)$$

ضرایب ρ_2 و ρ_3 تعیین‌کننده تغییر شکل ولتاژ توزیع ارتفاع سدها هستند. به بیان دیگر

وابستگی ولتاژی ارتفاع سد میانگین و پهنای توزیع سد با ضرایب ρ_2 و ρ_3 داده می‌شود. در حقیقت

یکی از مشخصات اصلی این مدل این است که تعیین‌کننده ضریب ایده‌آلی به عنوان نتیجه‌ای از تغییر

شکل ولتاژ در یک فصل مشترک ناهمگن است [۱۹].

اگر مقدار ρ_2 منفی باشد، طبق رابطه ۳۲-۱ یعنی ارتفاع سد با افزایش بایاس مستقیم کاهش

می‌یابد همان‌طور که قبلاً هم گفتیم چون $n > 1$ است لازم است که $\Delta\overline{\Phi}_B > 0$ باشد، از این رو ارتفاع

سد با افزایش ولتاژ افزایش می‌یابد.

اگر روابط ۳۲-۱ و ۳۳-۱ در رابطه ۲۹-۱ جایگذاری کنیم خواهیم داشت:

$$\overline{\Phi}_B(V) = \overline{\Phi}_{B0} - \frac{q\sigma_s^2}{2kT} + \left(\rho_2 - \frac{q\rho_3}{2kT}\right)V \quad (35-1)$$

مقدار ρ_3 در واقع منفی است و بنابراین ارتفاع سد با افزایش بایاس مستقیم افزایش می‌یابد. بعلاوه

فقط افزایش ارتفاع سد با افزایش بایاس مستقیم امکان‌پذیر است زیرا کاهش ارتفاع سد میانگین با

افزایش بایاس با کاهش مقدار σ_s در رابطه ۱-۳۵ جبران می‌شود. در اصل وجود مقادیر بالای ضریب ایده‌آلی به سبب وابستگی ولتاژی ارتفاع سدهاست، این وابستگی در سراسر توزیع ارتفاع سدهای میانگین و انحراف استاندارد منجر به وابستگی دمایی ضریب ایده‌آلی در دیودهای شاتکی ناهمگن می‌شود [۱۹].

با توجه به مطالب فوق با در نظر گرفتن مدل افت و خیزهای پتانسیل به‌منظور محاسبه انرژی فعالسازی، رابطه ۱-۱۴ را با استفاده از رابطه ۱-۲۵ و ۱-۲۶ اصلاح می‌کنیم [۱۹].

$$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) - \left(\frac{q^2 \sigma_s^2}{2k^2 T^2}\right) = \ln(AA^*) - \frac{q\Phi_{B0}}{kT} \quad (36-1)$$

۴-۱: مقاومت متوالی R_s

بر اثر حضور ناحیه خنثای نیمرسانا در حد فاصل بین ناحیه تهی و اتصال اهمی پشتی وجود یک مقاومت متوالی R_s امری اجتناب ناپذیر است که سبب یک افت ولتاژ در شرایط بایاس مستقیم می‌شود. در ولتاژهای بالا مشخصه‌های جریان - ولتاژ دیود به سبب وجود لایه عایق در فصل مشترک و اثر مقاومت متوالی دارای انحرافی از حالت خطی می‌گردد. روش‌های متفاوتی برای بدست آوردن مقاومت متوالی R_s پیشنهاد شده است، در این جا به بررسی روش چانگ خواهیم پرداخت [۲۱].

وجود مقاومت متوالی سبب یک افت ولتاژ در دیود می‌شود بنابراین ولتاژ V در رابطه ۱-۱۰ باید

با V_D جایگذاری شود به طوری که $V_D = V - IR_s$. بنابراین

$$I = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{B0}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (37-1)$$

در شرایط $V_D > \frac{3kT}{q}$ می‌توان از ۱ در جمله $\left[\exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right]$ صرف‌نظر کرد. و سپس با

لگاریتم گرفتن از دو طرف رابطه ۱-۳۷ ولتاژ V برابر خواهد شد با:

$$V = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^* T^2}\right) + n\Phi_{B0} + IR_s \quad (38-1)$$

و در نهایت داریم:

$$\frac{dV}{d \ln(I)} = IR_s + \frac{nkT}{q} \quad (۳۹-۱)$$

به منظور ارزیابی مقاومت متوالی و ارتفاع سد با توجه به رابطه ۱-۳۸ داریم:

$$H(I) = V - \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = n\Phi_{B0} + IR_s \quad (۴۰-۱)$$

۱-۵: چگالی حالات سطحی

سطوح و فصل مشترک‌ها آشفتگی قوی را در شبکه کریستالی تناوبی ایجاد می‌کنند. اتم‌ها در سطوح / فصل مشترک‌ها به سبب عدم اتم‌های مجاور همان پیوندهای اتم‌های کپه‌ای را نمی‌توانند داشته باشند. در دیود شاتکی نیز، لایه عایق نازک فصل مشترک همیشه به سبب پیوندهای کوالانسی ناتمام حضور دارد. صرفاً وجود بار الکتریکی در لایه نازک فصل مشترک، که نه فلز است و نه نیمرسانا، معرف چگالی بالا در حالات فصل مشترک است [۲۲].

در بخش ۱-۳ به طور کلی رفتارهای غیر ایده‌آل دیودهای سد شاتکی را به ناهمگنی ارتفاع سد در فصل مشترک نسبت دادیم که این خود عمدتاً به سبب حضور لایه عایق بومی در فصل مشترک فلز - نیمرسانا است. این رفتار همچنین نشانگر وجود حالت‌های سطحی (با تراکم N_{ss}) به دلیل حضور لایه عایق در سطح مشترک فلز و نیمرسانا است. مقدار این تراکم توسط کارد و رودریک [۲۳] برای ساختار MIS در حالت پایدار به صورت زیر بیان شده است [۲۳]:

$$N_{ss} = \frac{1}{q} \left[\frac{\epsilon_i}{\delta} (n(V) - 1) - \frac{\epsilon_s}{W_D} \right] \quad (۴۱-۱)$$

که در آن $n(V)$ برابر است با:

$$n(V) = \frac{q(V - IR_s)}{kT \ln(I / I_0)} \quad (۴۲-۱)$$

ϵ_s و ϵ_i به ترتیب ضریب گذردهی نیمرسانا و لایه عایق است؛ δ ضخامت لایه عایق و W_D پهنای ناحیه تهی است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۳].

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s V_{bi}}{qN_D}} \quad (۴۳-۱)$$

که V_{bi} سد پتانسیل ایجاد شده در اتصال فلز-نیمرسانا و N_D تراکم آلایش نیمرسانا است

فصل دوم

مروری بر مقالات وابسته به اتصالات

فلز- نیم رسانا

۲-۱: مقدمه

با قدم گذاشتن به عصر دیجیتال و الکترونیک نوین، نیمرساناها نقش تاریخی ایفا کرده‌اند. سیلیکون (Si) یکی از عناصر سازنده زمین و بعد از اکسیژن بیشترین فراوانی را در پوسته زمین دارد. سیلیکون‌ها در تولید بسیاری از نیمرساناها کاربرد دارد. نیمرسانا در ساده‌ترین شکل خود یک دیود است. دیود جریان را تنها در یک جهت از خود عبور می‌دهد، به همین دلیل آن را یکسو کننده نیز می‌نامند. دیودها انواع گوناگونی دارند. در سال‌های اخیر، تعداد زیادی از گزارشات روی مطالعات تجربی از پارامترهای مشخصه‌یابی، از قبیل ارتفاع سد و ضریب ایده‌آلی در دیودهای شاتکی فلز-نیمرسانا (MS)^۱ یا فلز-عایق-نیمرسانا (MIS)^۲ [۲۴،۲۵] منتشر شده‌اند. به خوبی مشخص شده کیفیت اتصالات فلز-نیمرسانا نقش مهمی در عملکرد قطعات مختلف و مدارهای مجتمع بازی می‌کند. از آنجا که اتصالات شاتکی برای طیف گسترده‌ای از قطعات کاربردی مورد استفاده قرار می‌گیرد، بنابراین برای به دست آوردن یک درک بهتر از خواص فیزیکی و الکتریکی سیستم‌های فلز-نیمرسانا ضروری است که تکنولوژی آماده‌سازی اتصالات شاتکی و اهمی را برای طیف گسترده‌ای از قطعات کاربردی توسعه داد [۲۶]. در این فصل ابتدا به طور مختصر به بررسی کاربردهای دیودهای سد شاتکی خواهیم پرداخت و سپس به مرور برخی تحقیقات انجام شده در مورد این نوع دیودها و در نهایت به بررسی ساز و کار خوردگی سیلیکون و عوامل مؤثر و تحقیقات انجام شده در مورد ساختار سیلیکون متخلخل می‌پردازیم.

۲-۲: کاربردهای دیودهای سد شاتکی

دیودهای سد شاتکی به طور گسترده در صنعت الکترونیک به عنوان دیودهای یکسوکننده مورد استفاده قرار می‌گیرند. این خاصیت منحصر به فرد این دیودها آنها را قادر ساخته که در بسیاری از

^۱ metal-semiconductor (MS)

^۲ metal-insulator-semiconductor (MIS)

کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار گیرند. از جمله کاربردهای دیودهای سد شاتکی در آشکار-سازهای نوری^۱، آشکارسازهای میکروموج^۲، کاهنده‌های RF^۳، واراکتورها^۴، دیودهای زنر^۵، سلول‌های خورشیدی^۶ و سوئیچ‌های سریع است، وقتی دیود در حالت هدایت به سر می‌برد برای رفتن به حالت عدم هدایت مدت زمانی لازم دارد که به خاطر ظرفیت خازنی دیود است. در دیود شاتکی که اتصال بین یک نیمرسانا و یک فلز صورت می‌گیرد، این ظرفیت خازنی تا حدود زیادی کم شده است. سرعت قطع و وصل این دیود به مراتب بیشتر از دیود معمولی می‌باشد چون این دیود از اتصال بین یک نیمرسانا و یک فلز ساخته می‌شود و به دلیل اینکه بارهای الکتریکی در فلز راحت‌تر از نیمرسانا جابه‌جا می‌شوند، در نتیجه سرعت قطع و وصل این دیود بیشتر است. در این دیود ولتاژ کمتری روی آند-کاتد آن افت می‌کند [۲۷].

۲-۳: اتصال اهمی

به منظور بررسی مقاومت اتصال ویژه برای اتصال‌های فلز - نیمرسانا یو [۲۸] مقاومت اتصال آلومینیوم (Al) و پلاتین (Pt) روی Si نوع n را در محدوده تراکم‌های آرایش 10^{18} تا $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ در دمای اتاق اندازه‌گیری نموده و به‌طور تجربی مورد بررسی قرار داده است. وی در این کار ابتدا لایه نازکی از سیلیکون نوع n را بر روی زیرلایه ای از سیلیکون نوع p نشانده و با استفاده از روش لیتوگرافی فلز مورد نظر را بر روی لایه بالایی با فواصل مساوی لایه‌نشانی کرده است. سپس از دو پایانه جریان را عبور داده و از دو پایانه دیگر ولتاژ را اندازه‌گیری کرده است (شکل ۱-۲-الف). شکل (۱-۱-ب) نمودار تغییرات V بر حسب فاصله بین هر دو نوار فلزی و همچنین مقدار L_T (بخش ۳-۳-۳)

¹ photodetectors

² microwave mixers

³ attenuators

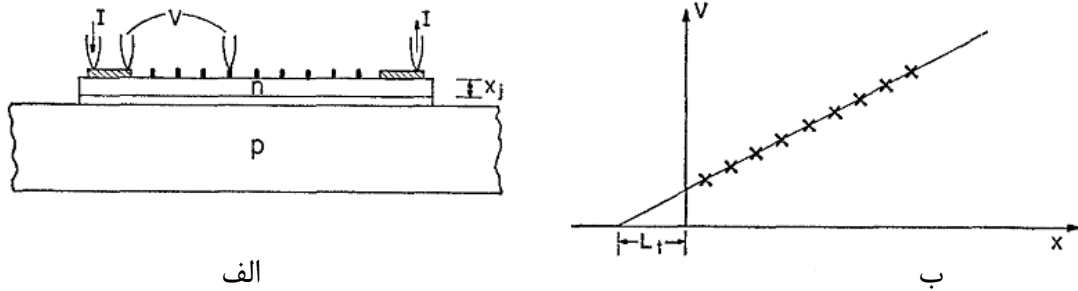
⁴ frequency Radio

⁵ varactors

⁶ Zener diodes

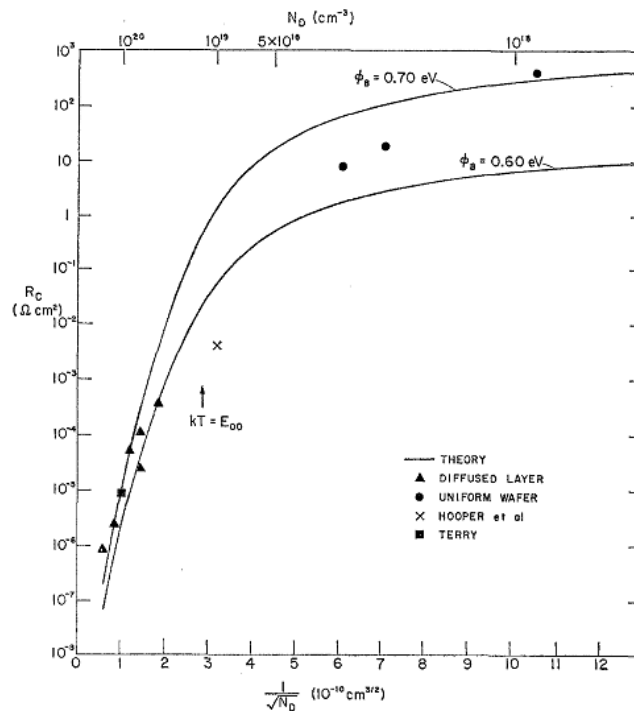
⁷ solar cells

(۱) که از برون‌یابی نمودار مربوطه با محور افقی حاصل می‌آید را نشان می‌دهد. مقاومت ویژه اتصال (R_c) که از رابطه $R_c = R_s L_T^2$ بدست می‌آید مقاومت ویژه اتصال محاسبه شده که در این رابطه R_s مقاومت سطحی نیمرساناست که به روش چهار پایانه‌ای محاسبه می‌شود



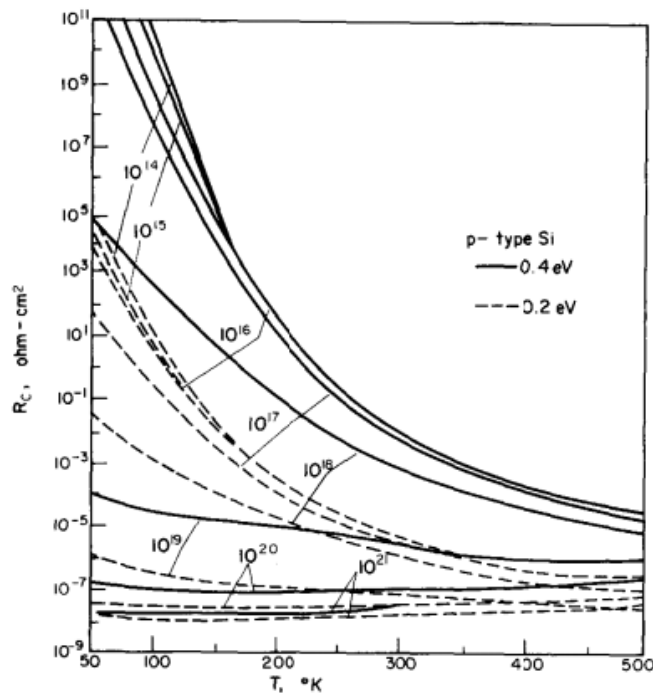
شکل ۲-۱: طرح شماتیکی از (الف) اندازه‌گیری ولتاژ (ب) تعیین L_T [۲۸]

مقادیر محاسبه شده R_c به صورت تابعی از $\frac{1}{\sqrt{N_D}}$ در شکل ۲-۲ نشان داده شده. چنانچه مشاهده می‌شود برای $N_D \geq 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ تحت تسلط روند تونل‌زنی قرار می‌گیرد و با افزایش آلایش به سرعت کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، برای $N_D \leq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ جریان به گسیل گرما یونی مربوط می‌شود.



شکل ۲-۲: مقادیر نظری و تجربی مقاومت اتصال ویژه [۲۸]

چانگ و همکارانش [۲۹] به صورت نظری به مطالعه مقاومت اتصالات فلز - سیلیکون (Si) و فلز- گالیم آرسنیک (GaAs) نوع p و نوع n پرداختند. بدین منظور با استفاده از معادلات انتقال جریان در اتصالات فلز - نیمرسانا (بخش ۱-۳) به بررسی وابستگی دمایی مقاومت اتصال R_c در محدوده ۵۰-۵۰۰ K و تراکم آلاینش 10^{14} - 10^{21} cm^{-3} پرداختند. نتایج حاکی از این است که R_c با افزایش دما به طور نمایی کاهش می‌یابد. در شکل ۲-۳ تغییرات مقاومت اتصال ویژه با دما برای نوع Si که ارتفاع سد و آلاینش به عنوان پارامترهای مورد بررسی هستند نشان داده شده است. شکل ۲-۳ نشان می‌دهد که از تراکم آلاینش بالا و ارتفاع سد پایین، یا از هر دو باید برای بدست آوردن مقادیر پایین مقاومت اتصال R_c استفاده نمود.



شکل ۲-۳: مقاومت اتصال ویژه برای نمونه‌های Si نوع p [۲۹]

۴-۲: بررسی مشخصه‌یابی I-V دیود شاتکی Al/p-Si

در این بخش مروری بر تحقیقات انجام شده بر روی دیود شاتکی Al/p-Si و تأثیر حضور لایه

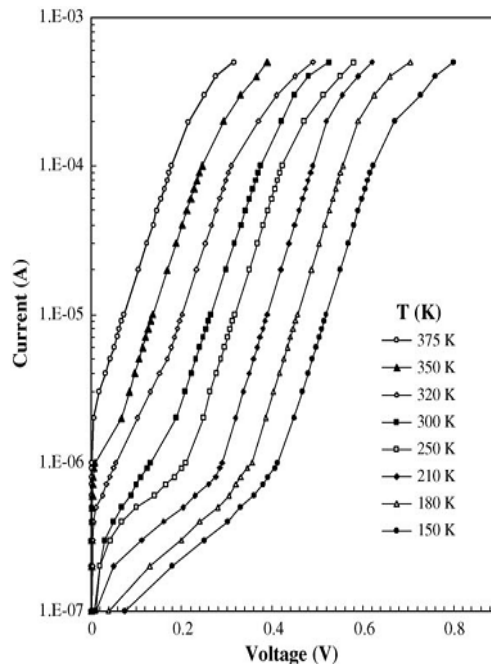
عایق بومی بر پارامترهای دیود شاتکی شامل ضریب ایده‌آلی، ارتفاع سد شاتکی، و مقاومت متوالی و... خواهیم داشت.

۲-۴-۱: وابستگی دمایی مشخصه‌های I-V دیود شاتکی در شرایط بایاس مستقیم،

بر پایه سد همگن

۲-۴-۱-۱: تعیین جریان اشباع معکوس (I_0) و ضریب ایده‌آلی (n)

مشخصه‌یابی I-V بایاس مستقیم دیودهای سد شاتکی Al/p-Si در شرایط دمایی متفاوت توسط گروه‌های مختلف و با پارامترهای متفاوت مورد ساخت و بررسی قرار گرفته است. نمودار شکل ۲-۴ مشخصه نیم-لگاریتمی I-V دیود شاتکی Al/p-Si با لایه عایق بومی در شرایط دمایی متفاوت از K ۳۷۵-۱۵۰ از سیلیکون نوع p با آلایش اتم‌های بور (B) و جهت‌گیری (۱۰۰) و ضخامت $500\mu\text{m}$ ، مقاومت ویژه حدود $4\ \Omega\ \text{cm} \approx$ که توسط ایل‌بایج و همکاران [۳۰] مورد بررسی قرار گرفته را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴: داده‌های تجربی متناظر با مشخصه I-V در شرایط بایاس مستقیم دیود سد شاتکی Al/p-Si در دماهای

متفاوت [۳۰]

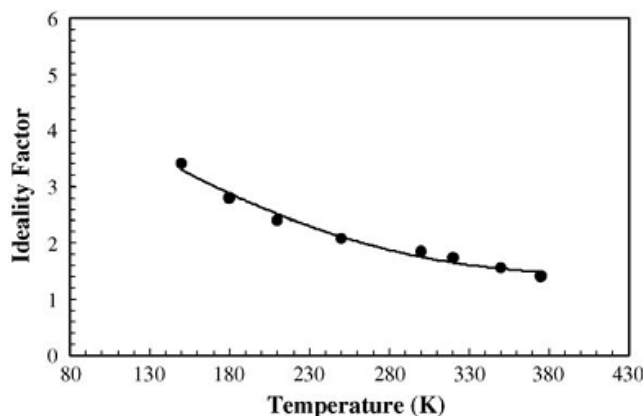
این گروه با استفاده از نظریه گسیل گرما یونی مطابق با مطالب ارائه شده در بخش ۱-۳ مقدار جریان اشباع معکوس I_0 را از طریق تعیین عرض از مبداء در ناحیه خطی در نمودار نیم لگاریتمی شکل ۲-۴، به دست آورند که در جدول ۱-۲ ارائه شده است. مقادیر ضریب ایده آلی (n) را نیز با استفاده از شیب ناحیه خطی نمودار $\ln(I)-V$ محاسبه می شود. همان گونه که از جدول ۱-۲ پیداست مقادیر مورد بررسی به ترتیب از $3/408$ (در دمای 150 K) تا $1/408$ (در دمای 375 K) تغییر پیدا کرده اند.

جدول ۱-۲: مقادیر وابستگی دمایی پارامترهای متفاوت از مشخصه های $I-V$ دیود سد شاتکی Al/p-Si در شرایط

دمایی متفاوت از $150-375\text{ K}$ [۳۰]

T (K)	I_0 (A)	n	Φ_{B0} (eV)
150	7.70×10^{-11}	3.408	0.431
180	2.78×10^{-10}	2.800	0.503
210	1.30×10^{-9}	2.400	0.564
250	8.44×10^{-9}	2.085	0.639
300	4.95×10^{-8}	1.842	0.731
320	1.46×10^{-7}	1.742	0.753
350	5.29×10^{-7}	1.561	0.790
375	1.97×10^{-6}	1.408	0.808

همان گونه که از شکل ۲-۵ مشاهده می شود مقادیر ضریب ایده آلی n به دما وابسته اند و با افزایش دما کاهش می یابند. مقادیر بالای n را به حضور یک لایه نازک اکسیدی عایق در سطح مشترک، مقاومت متوالی و..... نسبت می دهند.



شکل ۲-۵: تغییرات ضریب ایده آل با دما برای دیود سد شاتکی Al/p-Si [۳۰]

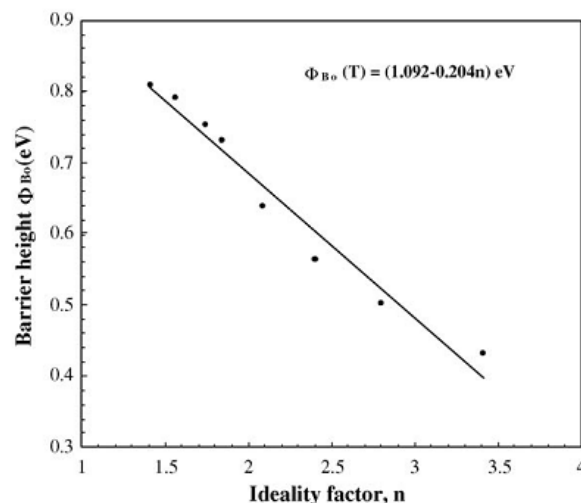
۲-۴-۱-۲: تعیین ارتفاع سد

در این بخش به منظور تعیین ارتفاع سد به بررسی دو روش می‌پردازیم.

الف: تعیین ارتفاع سد با استفاده از اندازه‌گیری جریان - ولتاژ (I-V)

مطابق با نظریه گسیل گرما یونی، (بخش ۱-۳)، با معلوم شدن مقدار جریان اشباع معکوس (I_0) ارتفاع سد Φ_{B0} از رابطه ۱-۱۳ بدست می‌آید. نتایج ارائه شده توسط ایلبایچ و همکاران [۳۰] در جدول ۱-۲ حاکی از این است که با افزایش دما ارتفاع سد شاتکی Φ_{B0} افزایش می‌یابد. این نحوه تغییرات با ضریب دمایی منفی ارتفاع سد در تناقض است [۳۰].

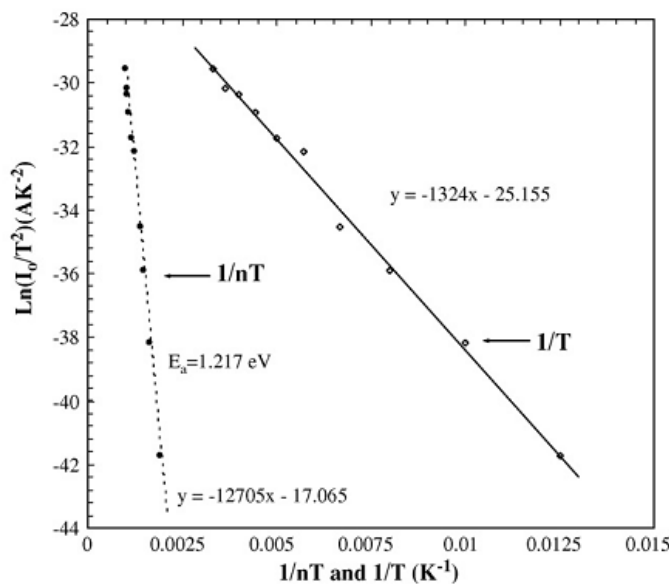
این گروه با توجه به جدول ۱-۲ و شکل ۲-۶ از بررسی وابستگی دمایی ضریب ایده‌آلی و ارتفاع سد شاتکی به یک رابطه خطی بین این دو پارامتر دست یافتند، همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود با افزایش ضریب ایده‌آلی ارتفاع سدها نیز کوچکتر می‌شوند. شمیدورف و همکاران [۳۱] نیز با استفاده از رویکرد به تئوری تانگ رابطه خطی بین مقادیر تجربی ضریب ایده‌آلی و ارتفاع سد شاتکی را به دست آوردند.



شکل ۲-۶: تغییرات ارتفاع سد شاتکی بر حسب ضریب ایده‌آلی در دماهای متفاوت [۳۰]

از آنجا که در شرایط ایده‌آل ($n=1$) انتظار می‌رود توزیع عرضی ارتفاع سد شاتکی به صورت همگون و یکنواخت باشد. با برون‌یابی نمودار شکل ۲-۶ با محور قائم مقدار این ارتفاع بدست می‌آید. این کمیت بنا به گزارش ایل‌بایج [۳۰] در این نمونه برابر 0.888 eV است. بنابراین کاهش عمده‌ی ارتفاع سد بایاس- صفر و افزایش ضریب ایده‌آلی بخصوص در دمای پایین را به ناهمگنی ارتفاع سد نسبت داده‌اند.

حال به منظور تعیین ضریب دمایی ارتفاع سد آلتیندال و همکارانش [۲۳] با استفاده از مطالب ارائه شده در بخش ۱-۳-۱، (رابطه ۲-۱۶)، از عرض از مبدأ منحنی $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1/nT$ ، شکل ۲-۷، ضریب تونل‌زنی حفره $(\alpha\chi^{1/2}\delta)$ را برابر $15/5$ بدست آوردند، که در این جا ضخامت لایه عایق فصل مشترک از اندازه‌گیری‌های C-V در 1 MHz ، $\delta = 32 \text{ \AA}$ به دست آمده.



شکل ۲-۷: منحنی $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1/nT$ و $1/T$ برای دیود سد شاتکی Al/p-Si [۲۳]

با معلوم شدن ضریب تونل‌زنی حفره با استفاده از معادله ۱-۱۸ وابستگی دمایی ارتفاع سد مؤثر

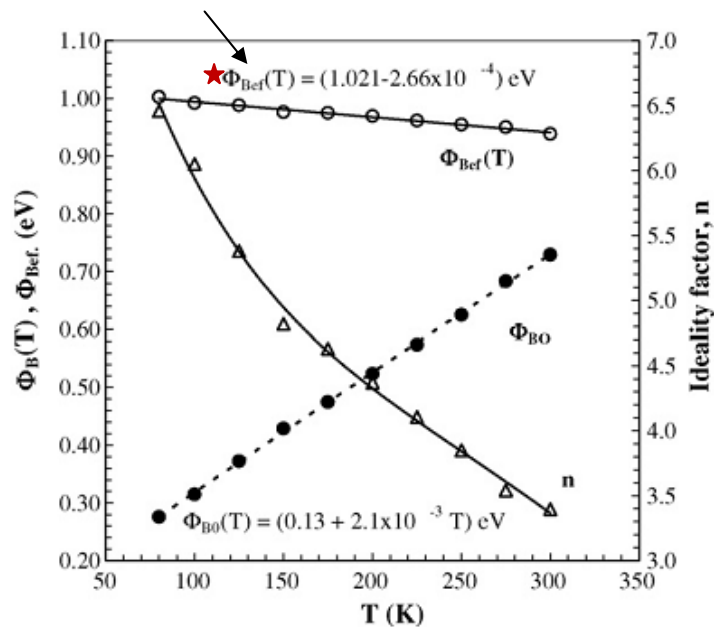
برای هر دما بدست می‌آید، (جدول ۲-۲).

جدول ۲-۲: وابستگی دمایی ارتفاع سد موثر با دما برای دیود سد شاتکی Al/p-Si [۲۳]

T (K)	I_o (A)	n	Φ_{Bo} (eV)	★ $\Phi_{Bef.}$ (eV)
80	6.90E-15	6.46	0.28	1.00
100	3.49E-13	6.05	0.31	0.99
125	3.92E-12	5.38	0.37	0.99
150	2.25E-11	4.82	0.43	0.98
175	1.69E-10	4.63	0.47	0.97
200	6.57E-10	4.37	0.52	0.97
225	1.84E-09	4.11	0.57	0.96
250	3.98E-09	3.85	0.63	0.95
275	5.84E-09	3.54	0.68	0.95
300	1.30E-08	3.40	0.73	0.94

نتایج حاصل از جدول ۱-۲ حاکی از این است که با افزایش دما ارتفاع سد موثر کاهش می‌یابد.

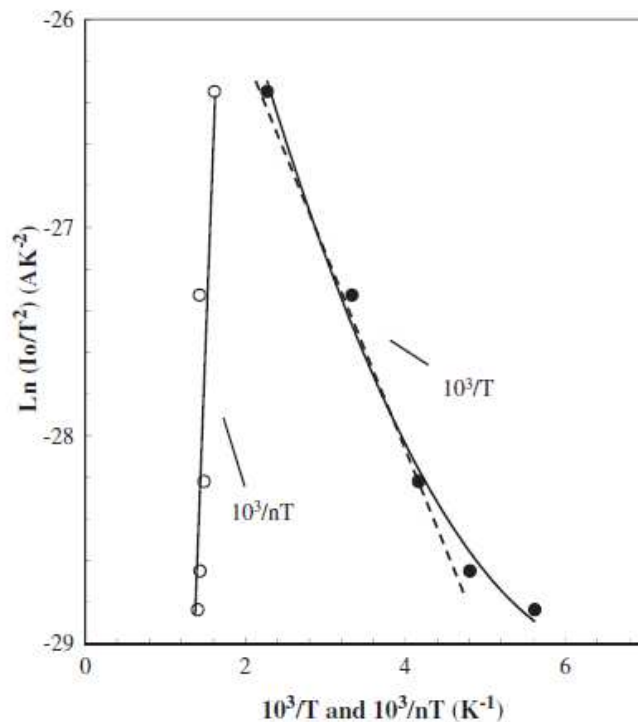
این گروه با رسم نمودار Φ_{Bef} بر حسب T (شکل ۲-۸) ضریب دمایی ارتفاع سد شاتکی را از شیب این نمودار برابر $\beta = -2/66 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$ بدست آوردند که این با ضریب دمایی منفی گاف نواری Si ($-4/73 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$) در توافق است [۲۳]. بعلاوه، از عرض از مبدأ نمودار نیز ارتفاع سد در 0K نزدیک $1/021 \text{ eV}$ محاسبه شد که این با مقدار انرژی گاف نواری ممنوع Si در 0K ($1/17 \text{ eV}$) در توافق است.



شکل ۲-۸: وابستگی دمایی ارتفاع سد شاتکی موثر برای Al/p-Si [۲۳]

ب) تعیین ارتفاع سد با استفاده از اندازه‌گیری انرژی فعالسازی

در اندازه‌گیری‌های انرژی فعالسازی، ارتفاع سد از وابستگی دمایی جریان اشباع معکوس (I_0) تعیین می‌شود. بدین منظور ایلبایچ [۳۲] با استفاده از رابطه ۱-۱۴، انرژی فعالسازی را از شیب منحنی ریچاردسون که از رسم $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1/T$ حاصل می‌آید، (شکل ۲-۹)، برابر 0.41 eV به دست آورد.



شکل ۲-۹: منحنی ریچاردسون از $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1/T$ و $10^3/nT$ برای دیود سد شاتکی

[۳۲] Al/p-Si

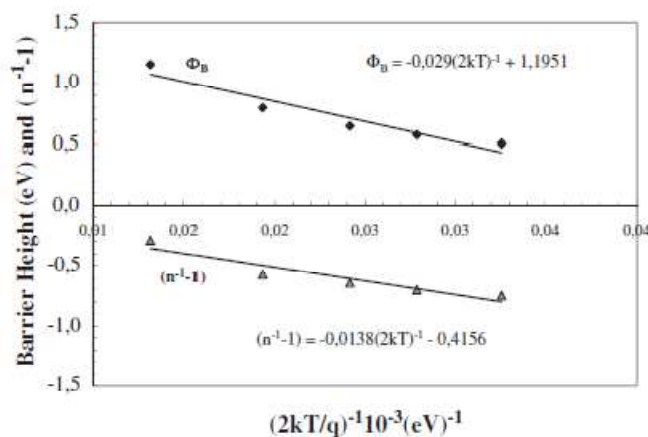
علاوه بر این کمیت مقدار ضریب مؤثر ریچاردسون (A^*) از طریق عرض از مبدأ نمودار شکل ۲-۹ برابر $1/3 \times 10^{-4} \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ بدست آمده که بسیار کوچکتر از مقدار انتظاری $32 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ برای p-Si است.

۲-۴-۲: مطالعه مشخصه‌های I-V دیود شاتکی Al/p-Si بر پایه سد پتانسیل ناهمگن

به منظور تجزیه و تحلیل سدهای ناهمگن ایلبایج [۳۲] رفتارهای غیرعادی را با استفاده از مدل مبتنی بر افت و خیز پتانسیل با فرض یک توزیع پیوسته از سدها در فصل مشترک به صورت یک توزیع گاوسی با ارتفاع سد میانگین $\overline{\Phi_{B0}}$ و انحراف معیار σ_s توضیح داد.

با استفاده مطالب ارائه شده در بخش ۱-۳-۲ و رابطه ۱-۲۶، از شیب و عرض از مبدأ نمودار Φ_{B0} برحسب $q/2KT$ ، (شکل ۲-۱۰)، به ترتیب انحراف معیار برابر $\sigma_s = 0.17$ V و ارتفاع سد میانگین برابر $\overline{\Phi_B}(T=0) = 1.19$ eV بدست آمده.

به منظور بررسی وابستگی ولتاژی و دمایی ضریب ایده‌آلی n مطابق با توضیحات بخش ۱-۴ از روابط ۱-۲۷ و ۱-۳۴ استفاده شده است. نمودار $(n^{-1}-1)$ برحسب $q/2KT$ در شکل ۲-۱۰ خط مستقیمی است که ضرایب ولتاژ به ترتیب از عرض از مبدأ و شیب نمودار برابر $\rho_2 = -0.415$ و V $\rho_3 = -0.138$ بدست می‌آید.

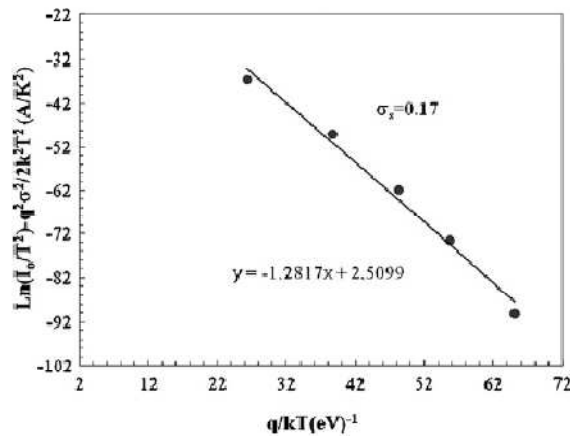


شکل ۲-۱۰: ارتفاع سد و ضریب ایده‌آلی برحسب $1/T$ برای دیود سد شاتکی Al/p-Si مطابق

با توزیع گاوسی ارتفاع سد. [۳۲]

برای توضیح اختلاف در انرژی فعالسازی و ضریب مؤثر ریچاردسون ایلبایج [۳۲] نمودار اصلاح شده‌ی شکل ۲-۱۱ را مطابق با رابطه ۱-۳۶ رسم کرده و همان‌طور که دیده می‌شود این منحنی یک

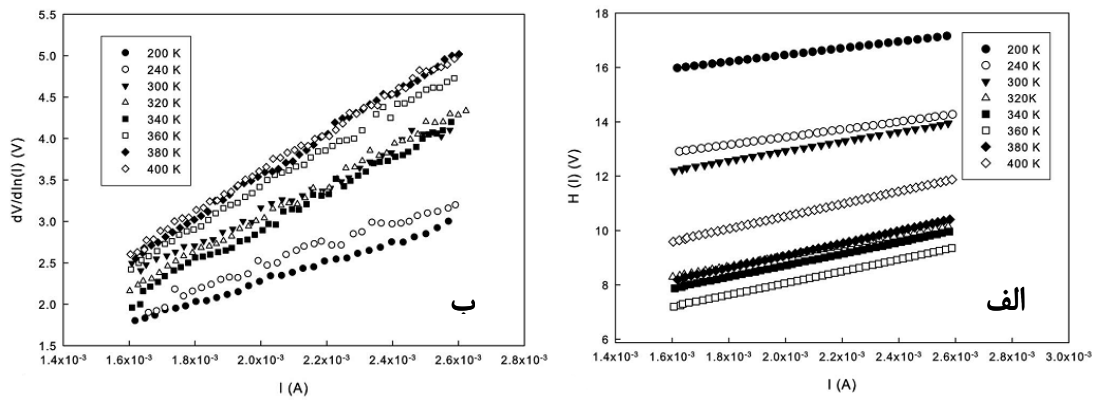
خط مستقیم با شیب راست است که از شیب آن $\Phi_B(T=0) = 1/28 \text{ eV}$ و از عرض از مبداء نیز $A^* = 38/79 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ مشخص می‌شود.



شکل ۲-۱۱: منحنی اصلاح شده ی ریچاردسون برای دیود شاتکی Al/p-Si بر اساس توزیع گاوسی ارتفاع سد [۳۲]

۲-۴-۳: مقاومت متوالی R_s

یلدیز و همکارانش [۱۲] از روش چانگ و چانگ [۳۳] که توسط ورنر [۳۴] و آلتیندال و همکارانش [۳۵] تایید شد با استفاده از روابط ۱-۳۹ و ۱-۴۰ به محاسبه وابستگی‌های دمایی مقاومت متوالی R_s در دیود شاتکی Al/p-Si پرداختند. شکل‌های ۲-۱۲ منحنی تغییرات $H(I)$ و $dV/d \ln(I)$ را برحسب تابعی از جریان I در دماهای مختلف برای قطعه دیودی Al/p-Si نشان می‌دهد. که مطابق با مطالب ارائه شده در بخش ۱-۵ شیب این داده‌ها متناظر با مقاومت متوالی R_s در نمونه مورد بررسی به ازای دمای مورد نظر است. نتیجه این محاسبات در جدول ۲-۳ و نحوه تغییرات دمایی آنها در شکل ۲-۱۳ نشان داده شده است.

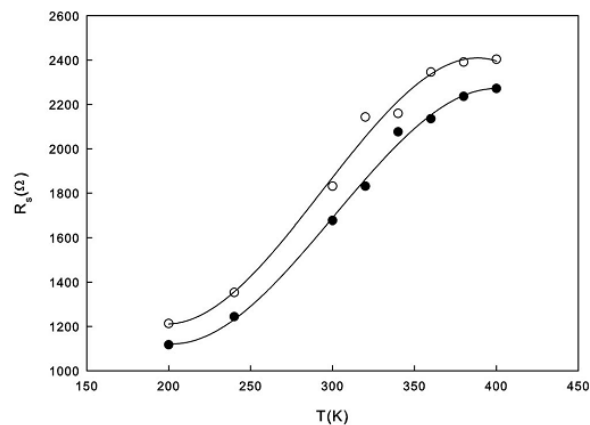


شکل ۲-۱۲: وابستگی دمایی مقاومت متوالی دیودهای سد شاتکی Al/p-Si (الف) منحنی $H(I)$ بر حسب جریان I

(ب) نمودار $dV/d \ln(I)$ بر حسب جریان I [۱۲]

جدول ۲-۳: وابستگی دمایی مقاومت متوالی برای دیود شاتکی Al/p-Si با لایه عایق بومی [۱۲]

T (K)	$R_s[H(I)]$ (Ω)	$R_s(dV/d \ln I)$ (Ω)
200	1117.4	1212.9
240	1243.9	1352.7
300	1676.6	1831.0
320	1831.0	2143.1
340	2076.3	2159.6
360	2135.4	2346.0
380	2236.3	2391.2
400	2271.8	2403.7



شکل ۲-۱۳: وابستگی دمایی R_s بر حسب تابعی از دمای دیود شاتکی Al/p-Si با لایه عایق بومی [۱۲]

۲-۴-۴: چگالی حالات سطحی

وجود تراکم حالت‌های سطحی (N_{ss}) برای ساختار MIS در حالت تعادل توسط کارد و رودریک [۲۳] بیان شد. آلتیندال و همکارانش [۲۳] با استفاده از رابطه ۱-۴۱ به بررسی وابستگی دمایی تراکم حالت‌های سطحی N_{ss} پرداختند. نتایج وابسته به مقادیر N_{ss} در هر دما به ازای $\delta = 32 A^0$ ، $\epsilon_s = 11/8 \epsilon_0$ و $\epsilon_i = 4 \epsilon_0$ در جدول ۲-۴ ارائه گردیده است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که مقادیر چگالی حالات سطح مشترک از مرتبه $10^{13} \text{ (eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}\text{)}$ بوده و با افزایش دما، کاهش می‌یابد.

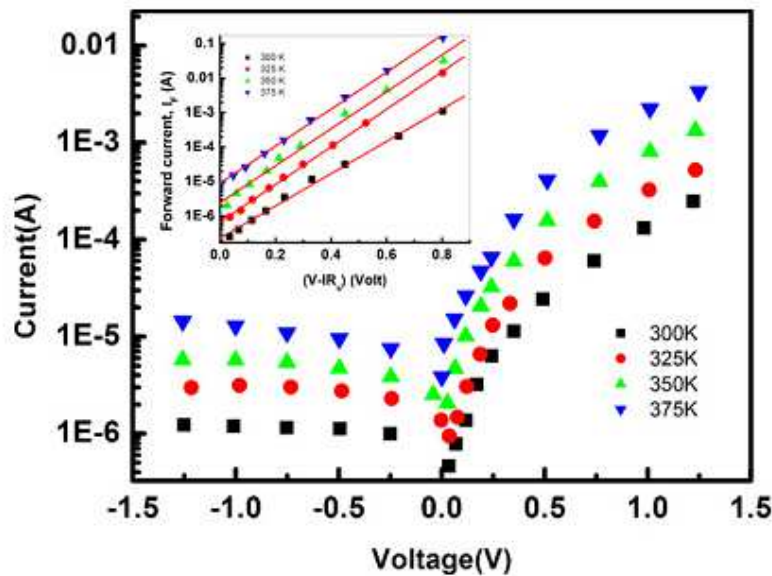
جدول ۲-۴: وابستگی دمایی چگالی حالات سطح مشترک برای دیود سد شاتکی Al/p-Si [۲۳]

T (K)	N_{ss} ($\text{eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$)
80	3.58×10^{13}
100	3.32×10^{13}
125	2.88×10^{13}
150	2.51×10^{13}
175	2.38×10^{13}
200	2.21×10^{13}
225	2.04×10^{13}
250	1.87×10^{13}
275	1.67×10^{13}
300	1.57×10^{13}

۲-۵: بررسی مشخصه‌یابی I-V دیود شاتکی Cu/p-Si بر پایه سد همگن

مشخصه‌یابی I-V با یاس مستقیم دیودهای سد شاتکی Cu/p-Si در شرایط دمایی متفاوت تهیه شده به روش روآراستی فاز مایع^۱ توسط فرج و همکارانش [۳۶] مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصه نیم-لگاریتمی I-V این نمونه‌ها در محدوده دمایی ۳۰۰-۳۷۵ K در شکل ۲-۱۴ نشان داده شده است. مقادیر ضریب ایده‌آلی و ارتفاع سد شاتکی مربوط به هر دما در جدول ۲-۵ آورده شده، همان‌گونه که پیداست مانند دیود شاتکی Al/p-Si مقادیر ضریب ایده‌آلی بزرگتر از مقدار ایده‌آل $n = 1$ به دست آمده و با افزایش دما کاهش می‌یابند و در مقابل مقادیر ارتفاع سد شاتکی نیز با افزایش دما افزایش می‌یابند.

¹ liquid phase epitaxy



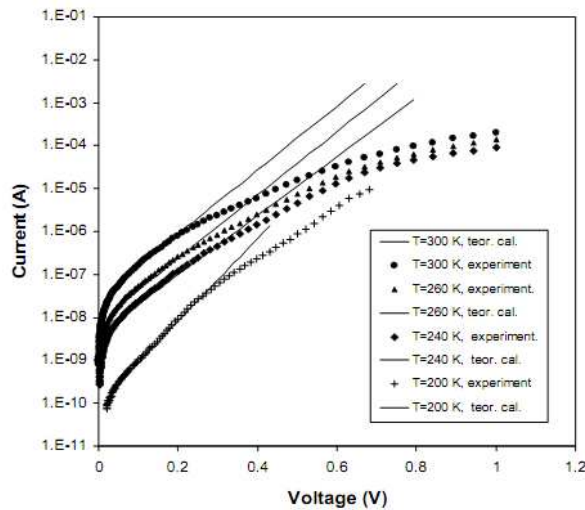
شکل ۲-۱۴: مشخصه نیم - لگاریتمی جریان - ولتاژ ($I-V$) در شرایط بایاس مستقیم و معکوس

در شرایط دمایی متفاوت [۳۶]

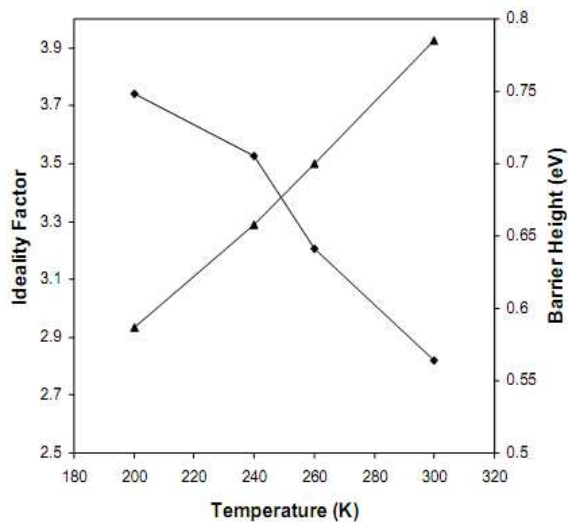
جدول ۲-۵: وابستگی دمایی ارتفاع سد شاتکی و ضریب ایده آل در دماهای متفاوت از ۳۰۰-۳۷۵ K [۳۶]

T (K)	Φ_b (eV)	n
300	0.73	2.92
325	0.77	2.84
350	0.81	2.68
375	0.83	2.13

وابستگی دمایی مشخصه جریان- ولتاژ دیود شاتکی Cu/n-Si در دماهای متفاوت از ۲۰۰ K-۳۰۰ به روش الکتروانباشت توسط احمد اقلی و همکاران [۳۷] مورد بررسی قرار گرفت. مشخصه جریان- ولتاژ این نمونه‌ها در شرایط بایاس مستقیم در شکل ۲-۱۵ نشان داده شده است. در مورد سیلیکون نوع n نیز افزایش ارتفاع سد شاتکی و کاهش ضریب ایده‌آلی با افزایش دما مشاهده شده است. این تغییرات در شکل ۲-۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۵: مشخصه جریان - ولتاژ ($I-V$) در شرایط بایاس مستقیم دیود شاتکی $Cu/n-Si$ [۳۷]



شکل ۲-۱۶: وابستگی دمایی ضریب ایده‌آلی و ارتفاع سد در دیود شاتکی $Cu/n-Si$ [۳۷]

۲-۶: سیلیکون متخلخل و کاربردهای آن

ساده‌ترین توصیفی که برای سیلیکون متخلخل می‌توان عنوان کرد آن است که سطح سیلیکون پس از تخلخل شامل شبکه‌ای از نواحی برجسته سیلیکونی با ابعاد میکرومتری و نانومتری است که اطرافش را فضای خالی احاطه کرده است. لایه سیلیکون متخلخل غالباً به روش الکتروشیمیایی روی سطح ویفر سیلیکون با الکترولیتی حاوی اسید فلئوئوریک تشکیل می‌شود. سیلیکون متخلخل در سال

۱۹۵۶ توسط اوهرل در ضمن مطالعه روی روش‌های پولیش الکترونی سیلیکون کشف شد [۳۸]. به دنبال این کشف تلاش زیادی برای شناخت جنبه‌های مختلف این ماده از جمله رابطه بین شرایط ساخت و خواص الکترونیکی و ساختاری آغاز گردید. چند سال بعد تورنر موفق به ساخت اولین لایه سیلیکون متخلخل شد [۳۹]. با توجه به گزارش بران [۴۰]، تیونیس (۱۹۷۰) با بهره‌گیری از روش تصویر برداری SEM نشان داد که لایه‌های متخلخل متشکل از کانال‌هایی (حفره‌ها و منافذ) است که به طور موضعی و ترجیحاً در امتداد محور بلوری در زیر لایه نفوذ می‌کنند. بیمکن (۱۹۶۵) با طیف سنجی جذب در ناحیه فرورسرخ (IR) نشان داد که بسته به شرایط تهیه نمونه ترکیبات گوناگونی از اتم‌های هیدروژن و اکسیژن روی سطح سیلیکون متخلخل می‌تواند وجود داشته باشد. و اتانابه (۱۹۷۵) با توجه به سطح زیاد سیلیکون متخلخل، از سیلیکون متخلخل اکسید شده به عنوان عایق دی‌الکتریک در مدارهای تجمعی استفاده کرد. پیکرینگ (۱۹۸۴) [۴۱] برای نخستین بار موفق به مشاهده فوتولومینسانس این ماده در دمای $4/2^{\circ}\text{K}$ شد، ولی از آنجا که این دما بسیار پایین بود چندان مورد توجه قرار نگرفت. لمان و گوسل (۱۹۹۱) با اندازه‌گیری عبور اپتیکی، بزرگی گاف انرژی سیلیکون متخلخل را بزرگتر از $1/7\text{ eV}$ تخمین زدند و پدیده محدودیت کوانتومی مربوط به دیواره-های باریک سیلیکونی را علت بزرگی گاف انرژی در سیلیکون دانستند [۴۰].

با وجود پیشرفت‌های زیادی که در زمینه ساخت و کاربردهای سیلیکون متخلخل صورت گرفته است، هنوز جنبه‌های ناشناخته‌ای از این ماده وجود دارد که به ساختار نامنظم آن مربوط می‌شود. از جمله این موارد می‌توان به مستقیم یا غیر مستقیم بودن گاف نواری سیلیکون متخلخل اشاره نمود [۴۳، ۴۲].

یکی از مهمترین خواصی که سیلیکون متخلخل را از سیلیکون کپه‌ای جدا می‌کند و باعث کاربردهای بیشتر آن می‌شود سطح مؤثر بسیار زیاد آن و در نتیجه فعالیت سطحی بیشتر آن از نظر شیمیایی است. از جمله کاربردهای سیلیکون متخلخل می‌توان به استفاده از این ماده در

میکروالکترونیک، اپتیک، اپتوالکترونیک، حسگرها، داروزیستی، میکروماشین‌ها، سلول‌های خورشیدی و خازن اشاره نمود [۴۴].

۷-۲: روش‌های ساخت سیلیکون متخلخل

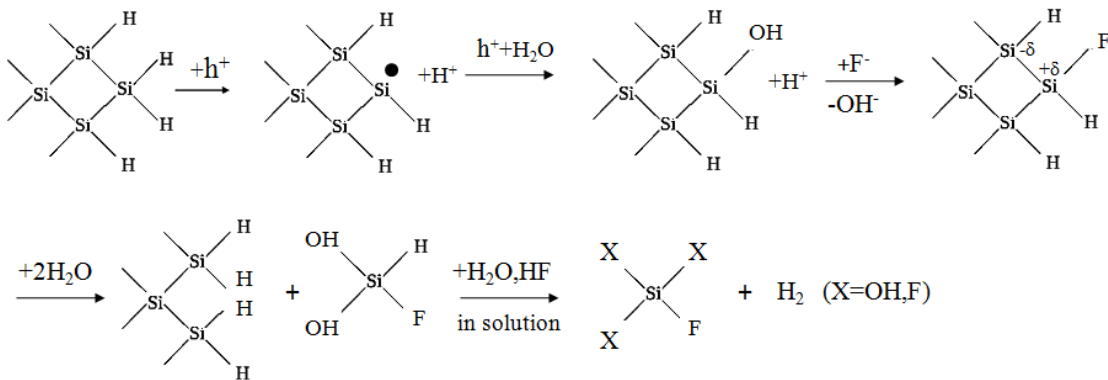
- روش خوردگی شیمیایی

- روش خوردگی الکتروشیمیایی

با استفاده از روش الکتروشیمیایی به کمک محلول الکترولیتی حاوی اسید فلئوریک می‌توان تحت شرایط خاص شبکه‌ای از حفره‌ها (منافذ) را روی سطح ویفر سیلیکون پدید آورد. مزیت این روش نسبت به روش شیمیایی آن است که می‌توان با کنترل عواملی چون چگالی جریان آنودی نمونه‌هایی با خصوصیات تخلخلی دلخواه بدست آورد. در به کارگیری این روش می‌توان از سلول‌های متفاوتی استفاده کرد [۴۴].

۸-۲: سازوکار خوردگی سیلیکون و عوامل موثر در آن

مکانیزم دقیق خوردگی به روش الکتروشیمیایی هنوز واضح نیست و فرایندهای مختلفی در این مورد مطرح شده است. سیلیکون در حالت کپه‌ای دارای ساختار شبکه‌ای الماس گونه است و از آنجا که سیلیکون یک عنصر چهار ظرفیتی است، اتم‌ها روی سطح سیلیکون بسته به نوع برش بلوری سطح می‌توانند دارای یک یا دو پیوند کووالانسی جفت نشده باشند. سیلیکون به تنهایی با اسید HF واکنشی که منجر به خوردگی آن گردد، انجام نمی‌دهد. برای انجام واکنش نیاز به حفره‌هایی است که برای ایجاد آن‌ها یا از جریان الکتریکی استفاده می‌نمایند یا در محلول از یک ماده اکسید کننده مانند HNO_3 استفاده می‌کنند. مدل واکنش سیلیکون با محلول الکترولیت را می‌توان به صورت زیر نمایش داد [۴۴].



از واکنش‌های بالا می‌توان به دو نکته زیر پی برد:

الف) برای خوردگی سیلیکون به اسید HF و حفره نیاز است.

ب) در هنگام این انحلال شیمیایی هیدروژن آزاد می‌شود.

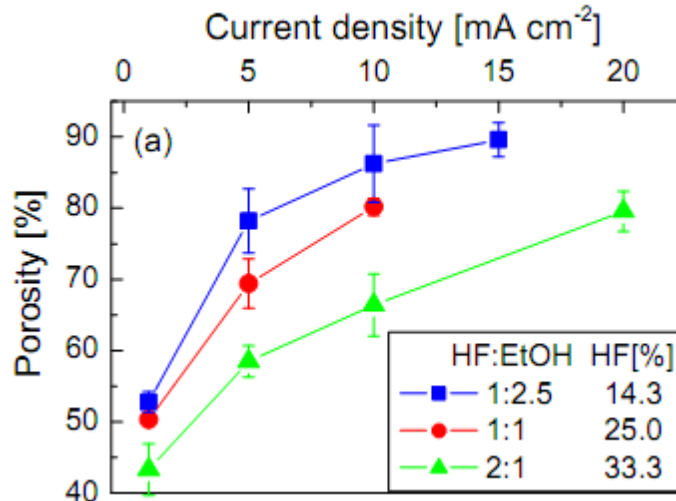
اگر تنها HF به عنوان الکترولیت جهت تشکیل PS به کار رود چسبندگی حباب‌های هیدروژن به سطح، ناهمگنی عرضی و عمقی ایجاد می‌کند. با اضافه نمودن اتانول به محلول HF، می‌توان بر این مشکل غلبه نمود. برای حذف موثر حباب‌ها، غلظت اتانول نیاستی از ۱۵ درصد کمتر باشد. از اتانول به عنوان ترکنده یکنواخت سطحی نیز نام برده می‌شود [۴۵]. از طرفی محلول HF شامل اتانول به واسطه قابلیت ترساز و پدیده موئینگی کاملاً درون کانال‌ها (حفره‌ها) نفوذ می‌کند و فصل مشترک همواری بین Si و PS ایجاد می‌کند و ضخامت یکنواختی از PS را نتیجه می‌دهد. این در حالی است که در نمونه‌هایی که تنها با محلول HF ساخته می‌شوند این فصل مشترک زبر و ناهموار است.

۹-۲: پارامترهای مؤثر در میزان تخلخل

تمام ویژگی‌های سیلیکون متخلخل از قبیل تخلخل عمق و قطر حفره‌ها و ریز ساختارها به شرایط آنودیزاسیون بستگی دارد. برخی از این شرایط شامل چگالی جریان، زمان آنودیزاسیون و غلظت HF می‌باشد.

در شکل ۲-۱۷ تأثیر پارامتر چگالی جریان و غلظت HF برای سیلیکون نوع p در یک نمودار نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در یک چگالی جریان ثابت هر چه غلظت HF کمتر باشد،

تخلخل نمونه بالاتر است. همچنین در یک غلظت ثابت HF هر چه چگالی جریان بیشتر می‌شود میزان تخلخل بالاتر می‌رود [۴۶].

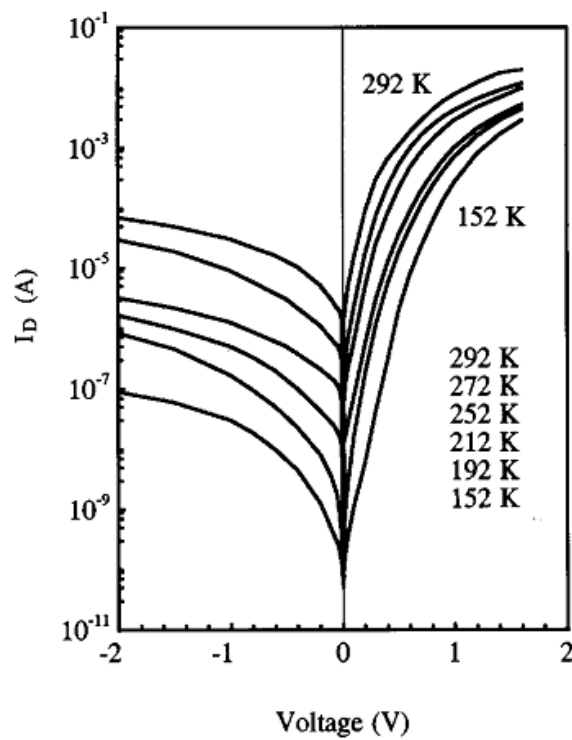


شکل ۲-۱۷: نمودار وابستگی تخلخل به چگالی جریان و غلظت HF. [۴۶]

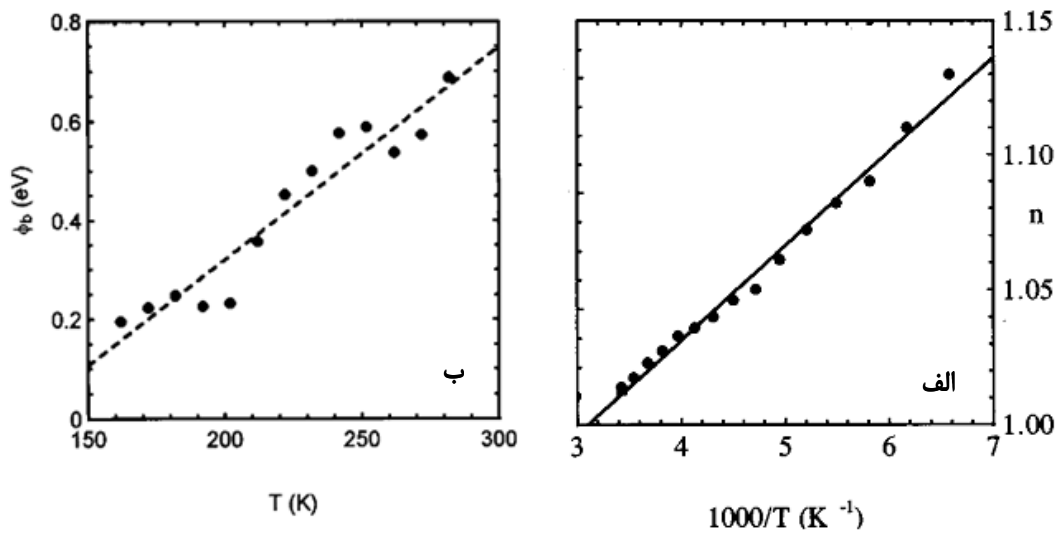
۲-۱۰: بررسی مشخصه‌یابی I-V سیلیکون متخلخل با ساختار Al¹/PS/p-Si

به منظور بررسی خواص الکتریکی سیلیکون متخلخل ری و همکاران [۴۷] لایه سیلیکون متخلخل را از زیر لایه ویفر سیلیکون نوع p به روش آنودیزاسیون در محلول با نسبت حجمی ۱:۱ از HF:C₂H₅OH و با چگالی جریان $25 \frac{mA}{cm^2}$ برای ۱۰ دقیقه در تاریکی آماده کردند. مشخصه‌های جریان - ولتاژ این نمونه‌ها در شرایط دمایی ۱۵۲-۲۹۲ K در شکل ۲-۱۸ نشان داده شده است. مقادیر به دست آمده برای ضریب ایده‌آلی و ارتفاع سد شاتکی حاکی از وابستگی دمایی این مقادیر در ساختار است. (شکل ۲-۱۹)

¹ Porous silicon (PS)



شکل ۲-۱۸: مشخصه جریان - ولتاژ ساختار Al/PS/p-Si در محدوده دمایی ۱۵۰-۲۹۲ K [۴۷]



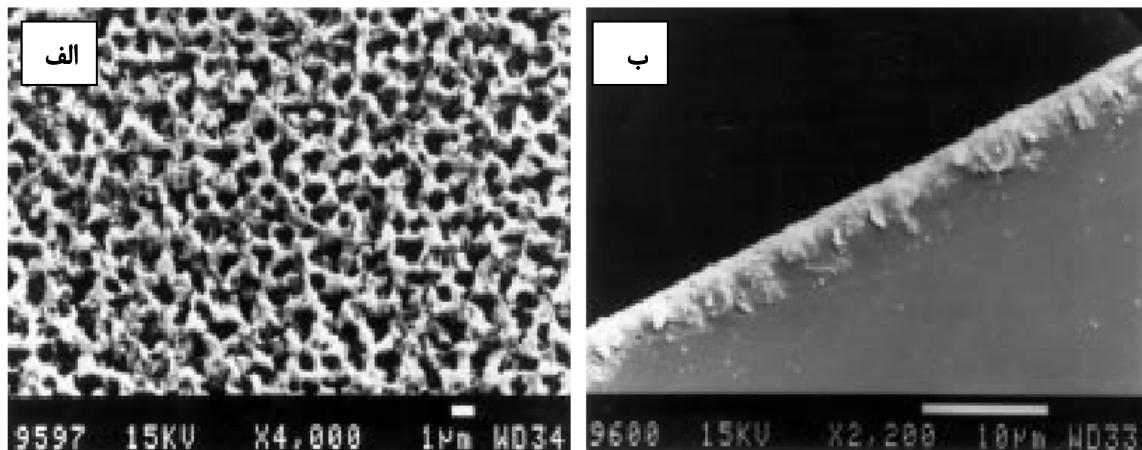
شکل ۲-۱۹: (الف) وابستگی دمایی ضریب ایده‌آلی (ب) وابستگی دمایی ارتفاع سد شاتکی [۴۷]

آلگون و همکاران [۴۸] به بررسی اثر جریان در مشخصه جریان - ولتاژ ساختار Al/PS/p-Si پرداختند، بدین منظور لایه PS را از ویفر سیلیکون نوع n و با استفاده از محلول 1HF:1C₂H₅OH با

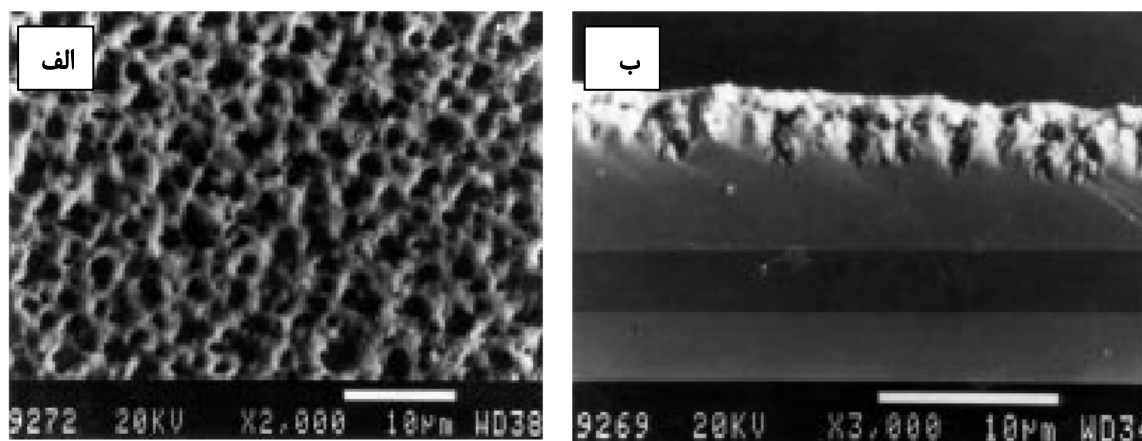
چگالی جریان $30 \frac{mA}{cm^2}$ و $5 \frac{mA}{cm^2}$ برای مدت زمان یکسان تحت نور تنگستن W ۲۵۰ آماده کردند.

شکل ۲۰-۲ و ۲۱-۲ تصاویر SEM از سطح و مقطع عرضی نمونه‌ها را پس از عمل آنودیزاسیون نشان

می‌دهد.



شکل ۲۰-۲: تصاویر SEM از (الف) سطح PS (ب) مقطع عرضی PS در چگالی جریان $5 \frac{mA}{cm^2}$ [۴۸]

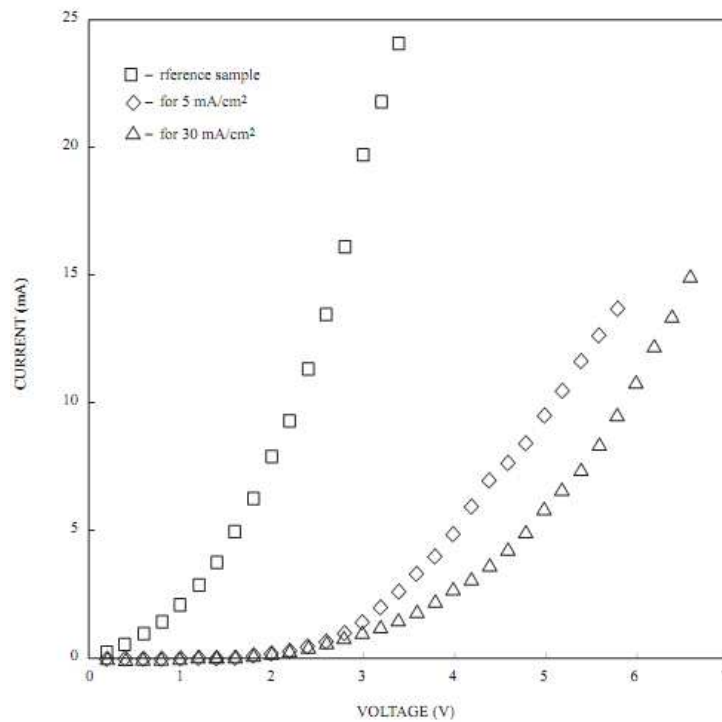


شکل ۲۱-۲: تصاویر SEM از (الف) سطح PS (ب) مقطع عرضی PS در چگالی جریان $30 \frac{mA}{cm^2}$ [۴۸]

میزان تخلخل برای نمونه با چگالی جریان $5 \frac{mA}{cm^2}$ حدود ۴۰٪ و چگالی جریان $30 \frac{mA}{cm^2}$ حدود

۶۰٪ محاسبه شده است. در شکل ۲۲-۲ و جدول ۲-۶ نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری جریان -

ولتاژ این نمونه‌ها نشان داده شده است.



شکل ۲-۲۲: مشخصه جریان - ولتاژ برای نمونه‌هایی با ساختار Al/PS/p-Si

در با چگالی جریان متفاوت [۴۸]

جدول ۲-۶: مقادیر به دست آمده از اندازه‌گیری جریان - ولتاژ نمونه‌ها [۴۸]

Sample and Current Density	I_S	n	ϕ_b
5mA/cm ²	1.4-5.5mA/cm ²	25-30	540-570 mV
30mA/cm ²	3.4-5.2	16-22	540-550
Reference Sample	1.1	26	580

چنانچه پیداست نمونه‌های متخلخل نسبت به نمونه بدون تخلخل از میزان جریان عبور کمتری برخوردار بوده و با افزایش میزان تخلخل این کاهش بیشتر می‌شود. علت این امر را می‌توان به ساختار اسفنجی سیلیکون متخلخل و در نتیجه افزایش مقاومت سطحی نسبت داد.

فصل سوم

مراحل آزمایشگاهی ساخت نمونه و

روش های مشخصه یابی

۳-۱: مقدمه

در این فصل به جزئیات کارهای آزمایشگاهی که نهایتاً به ساخت دیودهای Al/p-Si، Cu/p-Si و p-Si /سیلیکون متخلخل Al/ انجامید، می پردازیم. برای تهیه نمونه مناسب لازم است مراحل ذیل بر روی ویفر سیلیکون انجام گیرد:

۱. ایجاد اتصال اهمی در قسمت پشتی ویفر سیلیکون

۲. تمیزکاری سطح نمونه

۳. متخلخل سازی سطح سیلیکون به روش آنودیزاسیون (در مورد دیود شاتکی p-Si /سیلیکون متخلخل)

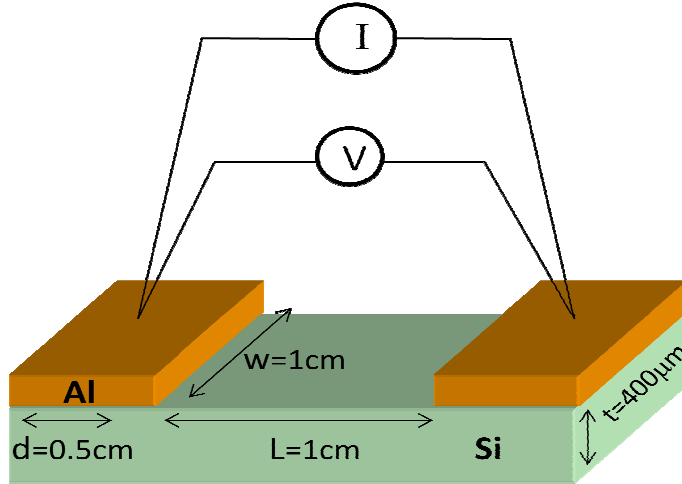
۴. مشخصه یابی جریان - ولتاژ (I-V) نمونه در دماهای متفاوت

۳-۲: ایجاد اتصال در قسمت پشتی نمونه

همانطور که در بخش ۱-۲-۲ اشاره شد، یکی از موارد مهم در بهینه سازی اتصالات اهمی فلز- نیمرسانا، کاهش مقاومت از جمله مقاومت ویژه اتصال است. در این مطالعه به منظور بررسی اتصال اهمی از اتصال فلزی Al و ویفر سیلیکون نوع p با آلایش بور (B) با مقاومت ویژه $0.5 \Omega \cdot \text{cm}$ و ضخامت $400 \mu\text{m}$ استفاده شده است. برای انجام این کار از دستگاه تبخیر در خلأ در شرایط خلأ و فشار $7 \times 10^{-6} \text{ torr}$ استفاده کرده ایم. به منظور دستیابی به یک اتصال اهمی با مقاومت هر چه کوچکتر سه کمیت را مورد توجه قرار دادیم: مدت زمان بازپخت، ضخامت لایه آلومینیوم و دمای بازپخت بعد از عملیات لایه نشانی. لازم به ذکر است که انجام عمل بازپخت می تواند به پخش هر چه بیشتر اتم های Al به عنوان یک عنصر سه ظرفیتی در سیلیکون منجر شده و در نزدیکی سطح شرایط آلایش سنگین (p^+) فراهم شود.

به منظور بررسی اثر مدت زمان بازپخت نمونه هایی با ضخامت های یکسان (تبخیر 0.14 g فلز آلومینیوم) که در معرض هوا در دمای 300°C بازپخت شدند آماده کردیم. شکل ۳-۱ نحوه اتصال

گذاری بر روی نمونه سیلیکونی را نشان می دهد. ابتدا با استفاده از اندازه گیری مشخصه I-V بین اتصالات (شکل ۱-۳) مقاومت R_T ، تعیین می شود.



شکل ۱-۳: الگوی هندسی و بزرگی های ابعادی وابسته برای اتصال Al بر روی سیلیکون به منظور اندازه گیری مقاومت ویژه اتصال

مقاومت کل تماسی از رابطه زیر:

$$R_T = 2R_m + 2R_c + l \frac{R_{sheet}}{W} \quad (1-3)$$

بدست می آید که در آن R_m مقاومت فلز است که قابل صرف نظر می باشد. $R_{sheet} = R_{sem} / t$ که R_{sem}

مقاومت نیم رسانا و R_c مقاومت تماسی بین فلز و نیم رسانا و مقاومت ویژه تماس برابر $\rho_c = R_c A_{pad}$

است. حال با جایگذاری R_T و بزرگی های طولی وابسته، (شکل ۱-۳)، در رابطه زیر، مقدار ρ_c بدست

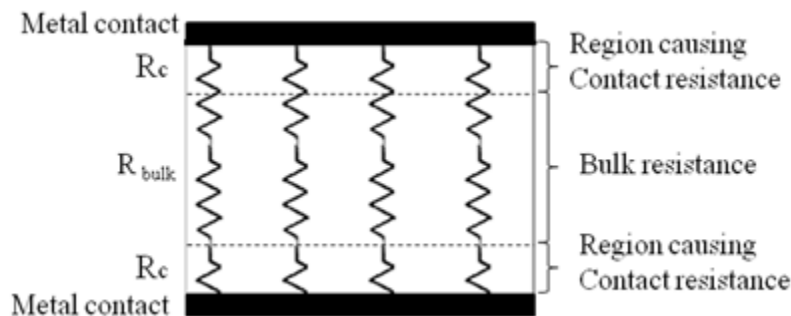
می آید:

$$\rho_c = \frac{A_{pad}}{2} \left(R_T - l \frac{R_{sem}}{W} \right) \quad (2-3)$$

که در آن با توجه به شکل فوق، $A_{pad} = d \times W$ است.

۳-۲-۱: روش TLM^۱

والتر شاتکی که بر روی اتصالات فلز - نیمرسانا تحقیق می کرد دریافت چنین اتصالاتی ممکن است رفتار شاتکی (یکسوسازی) و یا اهمی از خود نشان دهند. شکل ۳-۲ هندسه شار جریان الکتریکی در ساختار عمودی اتصال فلز - نیمرسانا را نشان می دهد [۴۹،۵۰]. ناحیه مقاومتی در این شکل شامل مقاومت اتصال بالایی (R_c)، مقاومت کپه ای (مقاومت نیمرسانا) و مقاومت اتصالی پایین (R_c) می باشد.



شکل ۳-۲: مقاومت های متوالی در مسیر جریان الکتریکی در ساختار عمودی اتصال فلز - نیمرسانا [۴۹،۵۰].

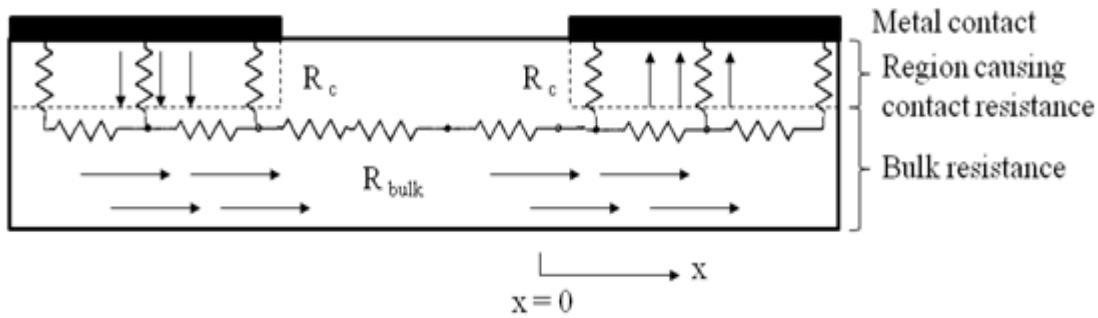
اندازه مقاومت ویژه اتصال (ρ_c) با رابطه زیر مشخص می شود [۴۹]:

$$\rho_c = R_c A \quad (۳-۳)$$

که در آن A مساحت اتصال است.

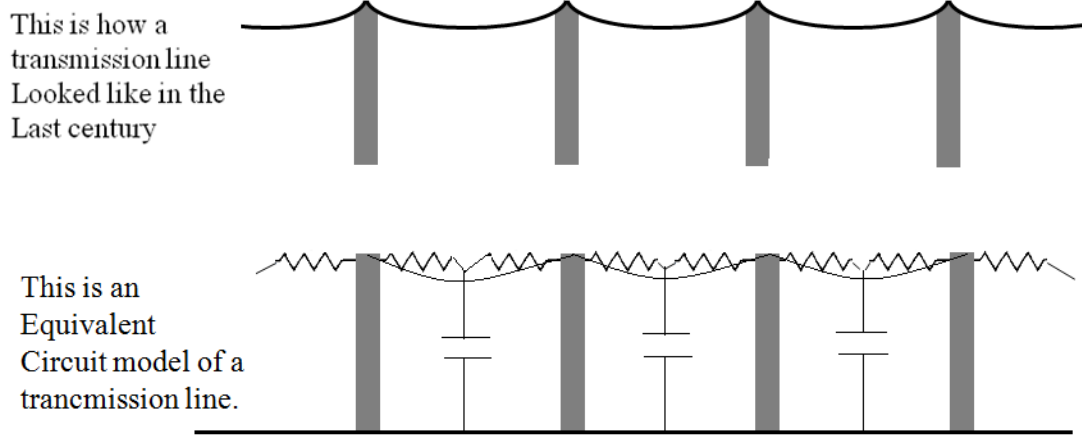
ساختار دیگر در اتصالات فلز - نیمرسانا ساختار هندسی عرضی است (شکل ۳-۳). چنانچه پیداست، سازوکار مسیر شار جریانی با هندسه شار جریان در ساختار عمودی متفاوت است و چگالی جریان در نیمرسانا تابعی از فاصله بین دو پایانه خروجی (x) است و دیگر رابطه ۳-۳ برای اندازه گیری ρ_c صادق نیست. بنابراین روش دیگری برای اندازه گیری مقاومت سطحی مورد نیاز است.

¹ Transmission line method (TLM)



شکل ۳-۳: هندسه شار جریان در ساختار عرضی اتصال فلز - نیمرسانا [۵۱]

مدلی که برای این ساختار به کار برده می شود، روش خط انتقال (TLM) نامیده می شود. این مدل توسط برگر^۱ توسعه یافته است [۵۱]. دلیل اینکه این روش موسوم به مدل خط انتقال است، در شکل ۳-۴ نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می شود، می توان شار جریان الکتریکی از فلز به نیمرسانا در مدار الکتریکی را از مسیری موسوم به طول انتقالی^۲ (L_T) در نظر گرفت.



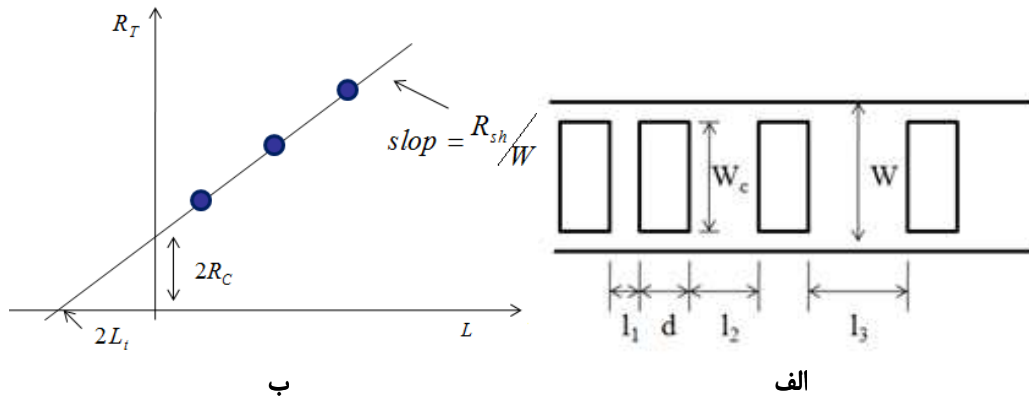
شکل ۳-۴: مدل مداری معادل خط انتقال [۵۱]

روش خط انتقال (TLM) امکان اندازه گیری مقاومت ویژه اتصال با شار جریان عرضی را فراهم

¹ H.H Berger

² Transfer length (L_T)

می سازد. همان طور که در شکل ۳-۵ (الف) دیده می شود، در این روش اتصالات فلزی به صورت عرضی در فاصله های متفاوت بر روی نیم رسانا ایجاد شده و با اندازه گیری مقاومت طولی بین اتصالات فلزی و رسم نمودار $R(T)$ بر حسب L (فاصله بین هر دو اتصال متوالی) (شکل ۳-۵ ب)، مقادیر R_C و L_T را می توان محاسبه نمود.



شکل ۳-۵: (الف) الگوی هندسی اتصالات عرضی فلزی بر روی نیم رسانا و (ب) نمودار تغییرات مقاومت طولی بر حسب فاصله بین اتصالات

با توجه به مقدار مقاومت سطحی نیم رسانا (R_{sheet}) و رسم نمودار تغییرات $R(T)$ بر حسب L

مقادیر L_T و R_C و نهایتاً مقاومت ویژه اتصال (ρ_c) مطابق روابط زیر به دست می آیند:

$$R_T = 2R_C + l \frac{R_{sheet}}{W_c} \quad (4-3)$$

$$R_C = \frac{R_{sheet} L_T}{W_c} \quad (5-3)$$

$$\rho_c = R_{sheet} L_T^2 \quad (6-3)$$

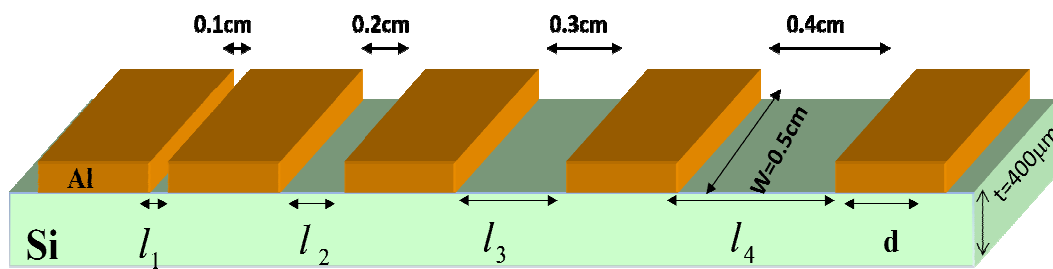
در این جا نیز به منظور بررسی اثر ضخامت لایه آلومینیوم و دمای بازپخت از روش TLM برای

تعیین مقدار مقاومت ویژه اتصال استفاده کرده ایم. در بررسی ضخامت لایه آلومینیوم نمونه هایی را با

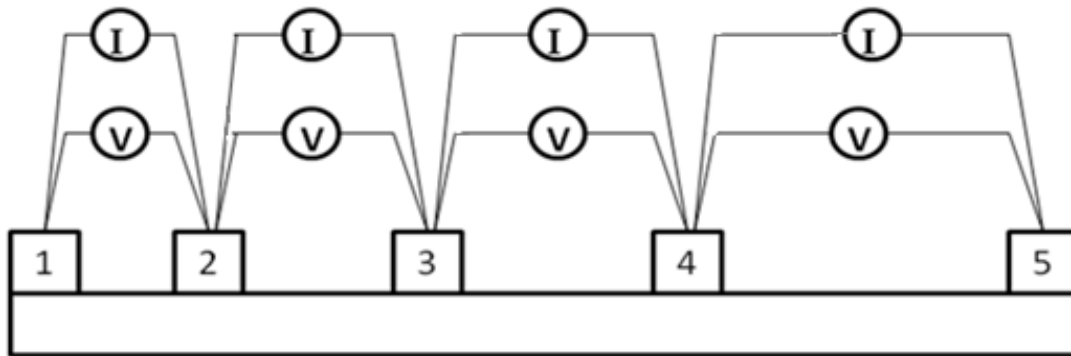
ضخامت های متفاوت با تبخیر ۰/۲g (S1)، ۰/۱۴g (S2) و ۰/۰۶g (S3) فلز آلومینیوم آماده کرده و

نمونه ها را به مدت ۴۵ دقیقه در دمای ۳۰۰ °C در کوره در معرض هوا قرار دادیم. در مورد بررسی اثر

دمای بازپخت نیز نمونه هایی را با ضخامت های یکسان، (تبخیر $g/2$ فلز آلومینیوم) آماده کرده و به مدت ۴۵ دقیقه در دماهای 400 (T1)، $300^{\circ}C$ (T2) در داخل کوره در معرض هوا قرار دادیم و نمونه دیگر (T3) را در شرایط بدون بازپخت نگه داشتیم. شکل (۳-۶) طرح شماتیکی از الگوی بکار برده شده و بزرگی های طولی وابسته را برای اتصال آلومینیوم بر روی سیلیکون و شکل ۳-۷ مدار به کار برده شده برای اندازه گیری مقاومت های بین اتصالات فلزی متوالی را نشان می دهد.



شکل ۳-۶: الگوی هندسی الکترونگذاری Al بر روی ویفر سیلیکون



شکل ۳-۷: مدار بکار برده شده برای اندازه گیری مقاومت های هر دو اتصال متوالی

۳-۳: تمیز کاری سطح نمونه

به منظور زدودن آلاینده های سطحی از ویفر سیلیکون که در ابعاد $1/2 \times 1/2$ سانتی متر درآوردیم، ابتدا هر نمونه را به مدت ۵ دقیقه در اتانول ۹۶ درصد گرم کرده، سپس با آب مقطر

شستشو دادیم. آنگاه به مدت ۵ دقیقه در دمای اتاق در محلول cp-4 متشکل از HF:HNO₃:CH₃COOH:H₂O با درصد ترکیبی ۳:۵:۳:۳۳ قرار دادیم. سپس آن‌ها را با آب دو بار تقطیر شسته و با قرار دادن آن‌ها در شرایط دمایی آزمایشگاه خشک کردیم. پس از انجام اتصال اهمی در پشت نمونه‌ها و بازپخت در شرایط مورد نظر، (قبل از انجام عملیات آنودیزاسیون یا تبخیر فلز) سطح رویی نمونه‌ها را به منظور از بین بردن لایه اکسید بومی از محلول اسیدی HF:10H₂O استفاده کردیم. از آنجا که در صورت تماس محلول اسیدی HF:10H₂O با پشت نمونه امکان زدودن اتصال آلومینیومی می‌رود، لازم است این مراحل در سلول الکترولیز تک مخزنی که در بخش ۳-۶-۲ به معرفی آن خواهیم پرداخت، انجام گیرد.

۳-۴: متخلخل سازی سطح نمونه‌ها

به منظور متخلخل سازی سطح نمونه‌ها بعد از مرحله تمیز کاری با استفاده از سلول الکترولیز تک مخزنی (شکل ۳-۱۰) متخلخل سازی در شرایط یکسان به لحاظ غلظت محلول الکترولیت (HF:C₂H₅OH) با نسبت ترکیبی (۱:۱) و زمان خوردگی ۵ دقیقه لکن تفاوت به لحاظ چگالی جریان آنودیزاسیون (به ترتیب $\frac{mA}{cm^2}$ ۵ و $\frac{mA}{cm^2}$ ۲۰) انجام شد.

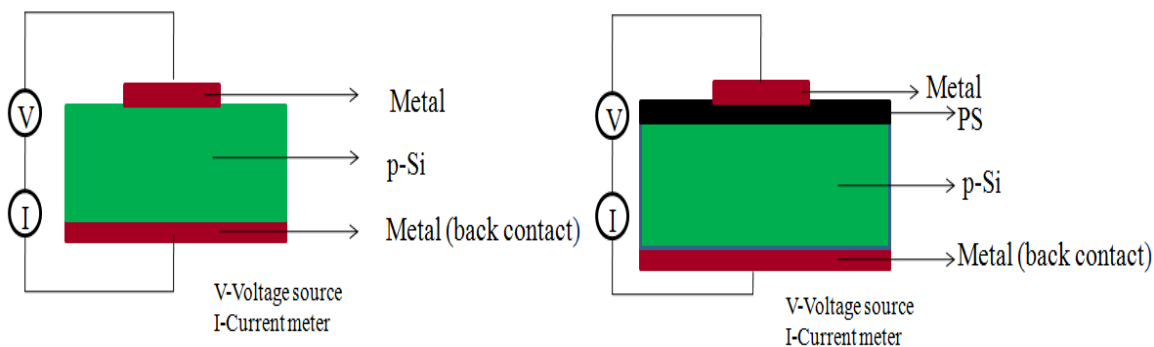
۳-۴-۱: خشک کردن

پس از اتمام فرایند تخلخل در سلول الکترولیز ابتدا محلول الکترولیت را از سلول خارج کرده و نمونه را با پنتان شستشو دادیم و با قرار دادن آن‌ها در شرایط دمایی آزمایشگاه خشک کردیم. نتایج حاکی از آن است که در نمونه‌های سیلیکون متخلخل ساخته شده، به هنگام تبخیر آب از منافذ ترک‌هایی در لایه ایجاد می‌شوند [۴۳]. این ترک‌ها ناشی از فشارهای مویرگی در منافذ با ابعاد نانو متری است. بزرگی ترک‌ها با شستن توسط مایعی که تنش سطحی کمتر از آب دارد می‌تواند تقلیل

یابد. محلول پنتان با توجه به تنش سطحی پایین (14 mJ m^{-2} در مقایسه با آب با مقدار 72 mJ m^{-2}) و عدم واکنش شیمیایی با سطوح متخلخل سیلیکونی کاندید مناسبی در این مورد است [۴۳].

۳-۵ ایجاد اتصال در قسمت رویی نمونه

در پایان به منظور مشخصه یابی جریان - ولتاژ (I-V) نمونه ها با استفاده از دستگاه تبخیر در خلأ پوشش نازکی از فلز مورد نظر (آلومینیوم یا مس) را به قطر ۲ میلی متر بر روی قسمت رویی نمونه تبخیر کردیم. پس از انجام این لایه نشانی پایانه های خروجی به کمک چسب نقره در قسمت های پشتی و رویی قرار داده شدند. در شکل ۳-۸ تصویر شماتیکی از اتصال الکتریکی نمونه ها نشان داده شده.



شکل ۳-۸: تصویر شماتیکی از اتصالات الکتریکی دیوهای شاتکی

۳-۶: معرفی دستگاه های مورد استفاده در تهیه نمونه ها و مشخصه یابی آنها

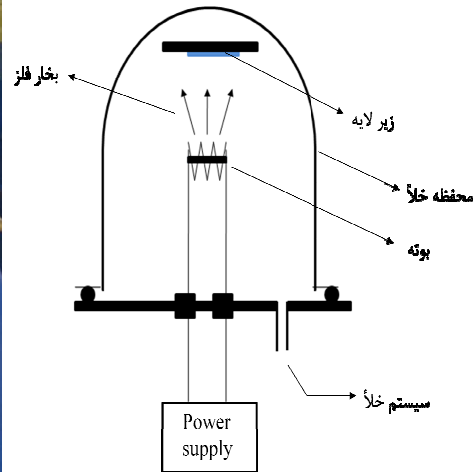
۳-۶-۱: دستگاه تبخیر در خلأ

دستگاه تبخیر در خلأ برای لایه نشانی لایه های نازک بر روی زیر لایه های مختلف مورد استفاده قرار می گیرد. این دستگاه شامل بخش های ذیل می باشد: محفظه لایه نشانی (که شامل محل قرار گرفتن بوتله و زیر لایه و ضخامت سنج و اتصالات الکتریکی می باشد)، پمپ خلأ مکانیکی (ایجاد خلأ تا

10^{-3} mbar)، پمپ جت بخار (10^{-6} mbar)، خلأسنج پیرانی که تا محدوده 10^{-3} mbar مقدار خلأ ایجاد شده توسط پمپ مکانیکی را نشان می دهد، خلأسنج پنینگ که خلأ تولید شده توسط پمپ جت بخار را نمایش می دهد، اتصالات الکتریکی مناسب و سرانجام سیستم سردکننده پمپ جت بخار. لایه نشانی در سیستم به طور فیزیکی صورت می گیرد، بدین ترتیب که ماده موردنظر درون بوته ای مناسب قرار گرفته و زیرلایه در فاصله حدود ۱۵ سانتی متر بالای بوته قرار می گیرد. خلأ سازی محفظه موجب حذف مولکول های هوا شده و سبب می شود ماده با عبور جریان الکتریکی در دمای پایین تری تبخیر شود. در صورتی که فاصله بوته و زیرلایه مساوی یا بیشتر از میانگین پویش آزاد ذرات باشد، مولکول های ماده بدون برخورد با مولکول های هوا به طرف زیرلایه حرکت کرده و روی زیرلایه می نشینند.

پارامترهای مهمی که در روش لایه نشانی تبخیر در خلأ به آن باید توجه داشت عبارتند از: انتخاب نوع و جنس بوته و زیر لایه.

موادی را که می خواهیم تبخیر شود، درون بوته مناسب قرار می دهیم. بوته ها معمولاً از جنس تنگستن، مولیبدن و یا گرافیت می باشند که برای انتخاب بوته باید به دمای تبخیر ماده و تمایل ماده تبخیر شونده برای واکنش با ماده ای که بوته تبخیر از آن ساخته شده است، توجه داشت [۵۲]. شکل ۳-۹ دستگاه تبخیر در خلأ مورد استفاده به همراه تصویر شماتیک آن را نشان می دهد.



شکل ۳-۹: سمت راست تصویر شماتیک از دستگاه تبخیر در خلأ و سمت چپ دستگاه مورد استفاده در آزمایشگاه

پارامترهای مهم در رشد لایه

عوامل متعددی در رشد لایه نازک مؤثر می باشند که یکی از آنها فاصله بوته تا زیرلایه است. این فاصله نباید از مسافت آزاد میانگین بیشتر باشد، در غیر این صورت ذرات تبخیر شده با هم برخورد کرده و باعث می شود:

- بعضی از ذرات تغییر جهت داده و اصلاً به سطح زیرلایه نرسند.
- بعضی از ذرات با سرعت بیشتری به سطح زیرلایه برخورد کرده و امکان نظم پذیری لایه را کاهش داده و باعث رشد جزیره ای شوند.
- بعضی از ذرات به هم چسبیده و تشکیل ذرات بزرگتر را داده و در رشد منظم لایه ها اختلال ایجاد کنند.

علاوه بر موارد فوق عوامل زیر نیز در رشد لایه مؤثر می باشند:

دمای منبع، کیفیت سطح زیر لایه، فشار بخار اشباع ماده، دمای ذوب ماده مورد نظر، نرخ لایه نشانی، نوع، شکل و جنس بوته، زاویه تابش و در نهایت جریان عبوری از بوته.

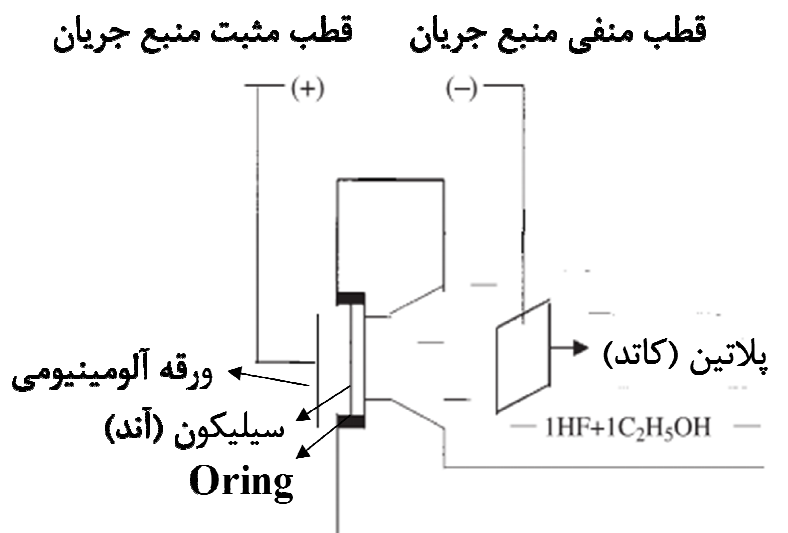
۳-۶-۲: دستگاه ساخت سیلیکون متخلخل

برای ساخت نمونه های متخلخل باید از سلول الکتروشیمیایی استفاده کنیم. سلولی که در این تحقیق برای تخلخل سازی نمونه ها از آن استفاده شده است از نوع تک مخزنی بوده و تمامی اجزای آن توسط نگارنده ساخته شده است. در این نوع سلول ها از یک اتصال فلزی در قسمت پشت ویفر سیلیکون برای دستیابی به یک سطح هم پتانسیل استفاده می شود. انجام این عمل برای ویفرهای سیلیکونی با مقاومت پایین (نوعاً کمتر از چند $m\Omega.cm$) چندان مفید نبوده لکن در ویفرهای سیلیکونی با مقاومت بالا (در محدوده چند $\Omega.cm$) می تواند کاربرد داشته باشد. درباره نحوه قراردعی این اتصال فلزی که مورد استفاده ما نیز قرار گرفته است. از مزایای این سلول ها یکنواختی تخلخل در سطح ویفر Si است [۴۴].

نکته مهم در ساخت این سلول آن است که محل اتصال ویفر سیلیکون و الکترولیت باید به گونه ای باشد که هیچ گونه نشن مایع الکترولیت وجود نداشته و نیز نمونه در خارج از محفظه قرار گیرد تا از مجاورت اسید و اتصال پشتی آن جلوگیری به عمل آید. این کار با قرار گرفتن نمونه سیلیکونی بین واشر حلقه ای و ظرف تفلونی و نیز یک ورقه آلومینیومی که توسط اتصالات مخصوص به دیواره دستگاه الکترولیز محکم شده امکان پذیر است.

به منظور اعمال جریان الکتریکی از یک منبع جریان و در مسیر مدار از یک آمپر سنج جهت اندازه گیری بزرگی جریان استفاده شده است. در این سلول که در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است،

سیلیکون نقش آند داشته و پلاتین نقش کاتد را ایفا می کند. آنودیازسیون در دمای اتاق انجام می گیرد.



سلول تفلون محتوی الکترولیت

شکل ۳-۱۰: نمایی شماتیک از سلول آنودیازسیون مورد استفاده ما در آزمایشگاه

۳-۶-۳: دستگاه مشخصه یابی I-V نمونه ها

برای اندازه گیری مشخصه جریان - ولتاژ نمونه ها از سامانه دستگاهی آنالیز کننده الکتروشیمیایی استفاده کرده ایم. استفاده از این دستگاه می تواند به کاهش خطاهای احتمالی در قرائت مقادیر جریان و ولتاژ مدار منجر شود. پیش از شروع به کار این دستگاه لازم است دو پایانه خروجی reference و counter آن را به هم متصل نموده، به عنوان قطب منفی منبع و خروجی پایانه working را نیز به عنوان قطب مثبت منبع در نظر بگیریم. آن گاه این دو پایانه را به نمونه مورد نظر که روی صفحه ای از جنس استیل مربوط به دستگاه دیمر دماسنج قرار دارد متصل شده و دستگاه دیمر دماسنج را روی دمای مورد نظر تنظیم کنیم. بعد از اینکه دستگاه به دمای مورد نظر رسید دستگاه اندازه گیری مشخصه جریان - ولتاژ را در حالت CV قرار دهیم. سپس بایستی محدوده ولتاژ مورد نظر، ارتفاع پله

افزایش پتانسیل (دکمه H_{stp}) و زمان پله (T_1) تنظیم شوند. با فشردن دکمه Run اندازه گیری انجام می شود و اطلاعات به کامپیوتر متصل به دستگاه منتقل می گردد. از معایب اندازه گیری این دستگاه محدودیت در میزان جریان قابل اندازه گیری است که در حدود ۱۵ میلی آمپر می باشد. شکل ۳-۱۱ این دستگاه را در بین صفحه نمایشگر کامپیوتر و دیمر دماسنج نشان می دهد.



شکل ۳-۱۱: سامانه اندازه گیری جریان - ولتاژ مورد استفاده ما در آزمایشگاه

۳-۶-۴: دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی^۱ (FESEM)

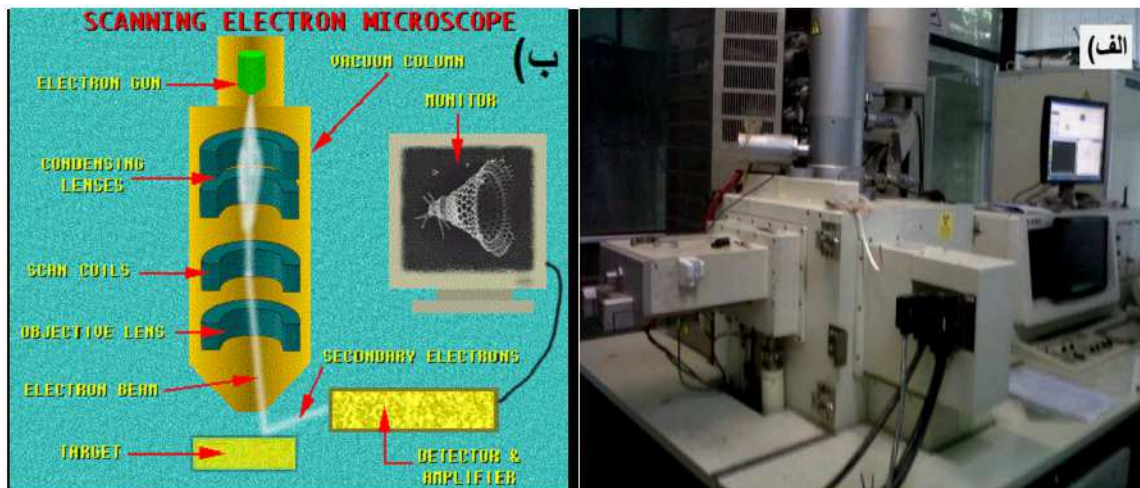
برخلاف میکروسکوپ های الکترونی روبشی که منبع الکترونی (تفنگ الکترونی) از نوع گسیل گرما یونی رشته تنگستنی است، در میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی، از منابع گسیل میدان برای قدرت تفکیک بالاتر استفاده می شود. برای تولید پرتو الکترونی در روش گسیل میدانی از پدیده تونل زنی استفاده می شود. در این حالت با اعمال یک میدان بالا در سطح فلز و در نتیجه کاهش سد پتانسیل الکترون می تواند تونل زده و از سطح فلز خارج شود. برای بدست آوردن بهره بالا برای تولید جریان باید از فلزی با نوک بسیار تیز و برای جلوگیری از اکسید شدن از خلأ بسیار بالا استفاده

¹ Field Emission Scanning Electron Microscope

کرد. در اثر برخورد باریکه الکترونی با ماده مورد نظر علاوه بر الکترون های ثانویه بخشی از الکترون ها به صورت پس پراکنده نیز تولید می شوند. در تصویربرداری الکترونی روبشی از این الکترون ها پس پراکنده شده استفاده می شود. تصویر سطح نمونه با اندازه گیری شدت مجموعه این الکترون های ثانویه به صورت تابعی از موقعیت ستون الکترون اولیه تشکیل می شود.

به هنگام برخورد پرتو الکترونی به سطح ماده معمولاً باریکه ای از پرتوهای ایکس نیز ظاهر می شود. با آشکارسازی و آنالیز این پرتوها موسوم به ¹EDAX، ماهیت اتم های موجود در نمونه قابل شناسایی است. در این روش مواد نارسانا معمولاً با لایه نازکی از کربن، طلا یا آلیاژ طلا پوشش داده می شوند تا بین نمونه و پایه اتصال الکتریکی برقرار شود. نمونه ها باید عاری از مایعاتی با فشار بخار بالا نظیر آب محلول های پاک کننده آلی و مواد روغنی باقی مانده باشند [۵۲].

شکل ۳-۱۲ نمایی از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM S360MV2300) به همراه طرح شماتیک آن را نشان می دهد.



شکل ۳-۱۲: (الف) دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) مدل (S360MV2300) دانشگاه

تهران (ب) تصویر شماتیک از اجزا داخلی مسیر عبور باریکه الکترونی تا سطح نمونه [۵۲]

¹ Energy dispersive X ray

فصل ہمارم

مشخصہ یابی ہامی فنریکی ونسایج

۴-۱: مقدمه

در سال‌های اخیر، گزارشات بسیاری در خصوص مطالعه تجربی پارامترهای وابسته به مشخصه الکتریکی دیوده‌های شاتکی فلز-نیمرسانا (MS)^۱ یا فلز-عایق-نیمرسانا (MIS)^۲ از قبیل ارتفاع سد و ضریب ایده‌آلی و مقاومت متوالی انجام شده است. این نتایج غالباً مبتنی بر نظریه گسیل گرمایونی (TE) استوارند نشانگر آنند که داده‌های بدست آمده از نظریه تعمیم یافته بخش ۱-۳-۲ تبعیت می‌کنند. این نتایج غالباً حاصل تهیه داده‌های وابسته به مشخصه جریان - ولتاژ نمونه‌ها بر حسب تابعی از دماست.

ما در این تحقیق به‌طور تجربی مبادرت به ساخت دیودهایی با سد شاتکی بین ویفر سیلیکون و لایه نشانی فلزی بر آن نموده و مشخصه جریان-ولتاژ (I-V) نمونه‌ها را در محدوده دمایی بالا K ۳۰۰-۳۶۸، در شرایط بایاس مستقیم که شرایط آزمایشگاهی آنها در فصل ۳ آمده است اندازه‌گیری و بر مبنای نظریه گسیل گرمایونی پردازش کرده‌ایم. این مطالعه مشتمل بر لایه نشانی در قسمت زیرین ویفر سیلیکون که لزوماً بایستی از ویژگی اتصال اهمی برخوردار باشد و نیز اتصال یکسوساز بالای ویفر و اثر لایه عایق بومی^۳ بر پارامترهای دیود شاتکی و محاسبه این پارامترها و توجیه آنها می‌باشد.

۴-۲: اتصال اهمی

همانطور که در بخش ۱-۲-۲ اشاره شد، یکی از موارد مهم در بهینه‌سازی اتصالات اهمی فلز-نیمرسانا، کاهش مقاومت از جمله مقاومت ویژه اتصال است. در این مطالعه به‌منظور بررسی اتصال اهمی از اتصال فلزی Al و ویفر سیلیکون نوع p با آلایش بور (B) با مقاومت ویژه $0.5 \Omega \cdot \text{cm}$ و ضخامت $400 \mu\text{m}$ استفاده شده است. به منظور دستیابی به یک اتصال اهمی با مقاومت هر چه

^۱ metal-semiconductor (MS)

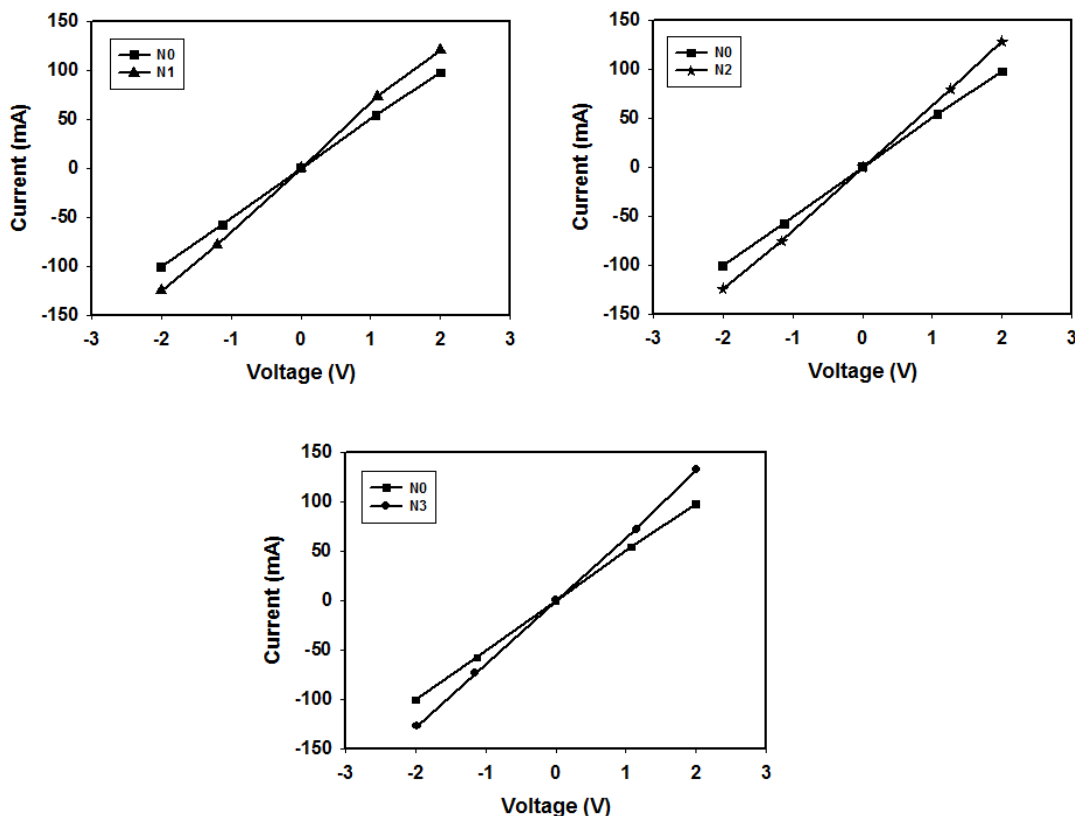
^۲ metal-insulator-semiconductor (MIS)

^۳ native insulator layer

کوچکتر سه کمیت را مورد توجه قرار داده‌ایم: مدت زمان بازپخت، ضخامت لایه آلومینیوم و دمای بازپخت

الف) بررسی اثر مدت زمان بازپخت

در این مورد مطابق با بخش ۳-۲ نمونه‌هایی با ضخامت‌های یکسان (تبخیر 0.14 g فلز آلومینیوم) که در معرض هوا در دمای 300°C بازپخت شدند آماده کردیم. شکل (۴-۱) نمودار تغییرات I-V و جدول ۴-۱ نتایج حاصل از محاسبه مقاومت ویژه اتصالات تهیه شده که در مدت زمان‌های متفاوت تحت بازپخت قرار گرفته‌اند به روش بخش ۳-۲ را نشان می‌دهد. در این نمودار NO نشان‌دهنده نمونه بدون بازپخت و N1، N2 و N3 نشانگر همین نمونه پس از بازپخت در دمای 300°C به ترتیب به مدت ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه می‌باشد.



شکل ۴-۱: رفتار اهمی مشخصه‌های I-V مربوط به اتصال Al روی سیلیکون در نمونه بدون بازپخت (NO) و نمونه-

های بازپخت شده (N1)، (N2) و (N3)

جدول ۴-۱: بررسی تأثیر مدت زمان بازپخت بر مقاومت ویژه اتصال Si/Al در نمونه‌های مورد بررسی

نمونه	مدت زمان بازپخت	ρ_c ($\Omega.cm^2$)
N0	بدون بازپخت	۱/۹۲
N1	۱۵ دقیقه	۰/۹۵
N2	۳۰ دقیقه	۰/۸۲
N3	۴۵ دقیقه	۰/۷۱

این نتایج حاکی از آن است که نمونه N3 از کمترین مقاومت ویژه اتصال ویژه به مقدار $0.71 \Omega.cm^2$ برخوردار می‌باشد.

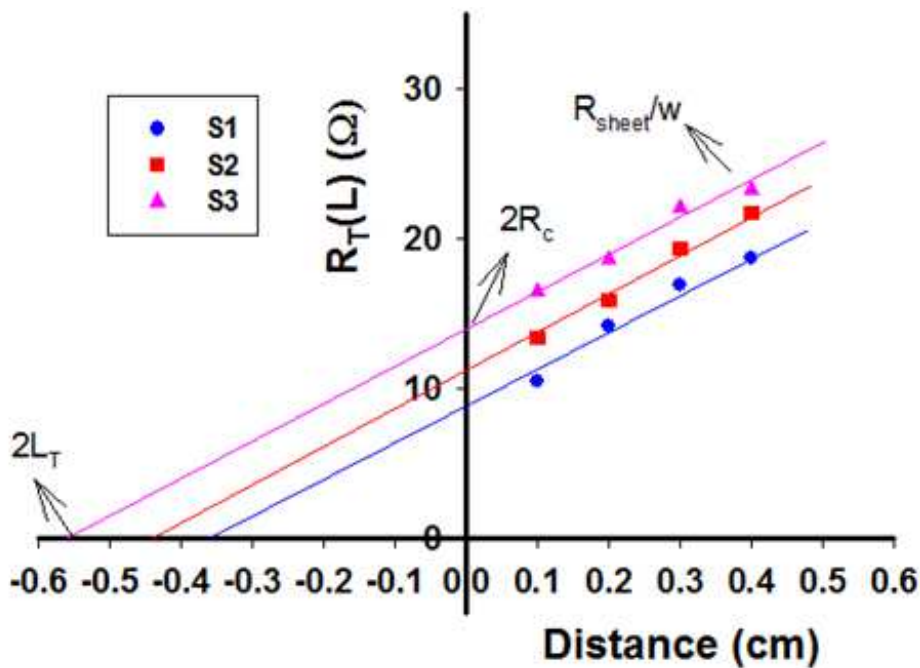
نحوه محاسبه مقدار ρ_c به این شرح است که ابتدا مقاومت R_T را با استفاده از مشخصه I-V بین دو اتصال در شکل ۳-۵ اندازه‌گیری کردیم و سپس با جایگذاری R_T و $L = 1 \text{ cm}$ ، $w = 1 \text{ cm}$ ، $A_{pad} = 0.5$ و $A_{sheet} = 12/5 \text{ cm}^2$ ، در رابطه ۲-۳ مقدار ρ_c به دست می‌آید.

ب) بررسی اثر ضخامت لایه Al

در این مرحله برای بررسی اثر ضخامت لایه آلومینیوم از روش TLM (بخش ۳-۲-۱) برای تعیین مقدار مقاومت ویژه اتصال استفاده کرده‌ایم. در این مورد نمونه‌هایی را با ضخامت‌های متفاوت آلومینیوم (Al) با تبخیر (S1) ۰/۲g، (S2) ۰/۱۴g و (S3) آماده کرده و نمونه‌ها را به مدت ۴۵ دقیقه در دمای 300°C در کوره در معرض هوا قرار دادیم. برای محاسبه ρ_c لازم است با استفاده از اندازه‌گیری مشخصه I-V بین اتصالات، (شکل ۳-۷)، مقاومت‌های وابسته به اتصالات متوالی را بایستی در فواصل I_1 تا I_4 تعیین نمود. در جدول ۴-۲ و شکل ۴-۲ نتیجه این اندازه‌گیری‌ها، و حاصل پردازش داده‌ها در جدول ۴-۳ ارائه شده است.

جدول ۲-۴: مقادیر مقاومت‌های متوالی وابسته به فواصل متفاوت مربوط به هر نمونه

L(cm)	$R_T(S1)$ (Ω)	$R_T(S2)$ (Ω)	$R_T(S3)$ (Ω)
۰/۱	۱۰/۴۷	۱۳/۴۵	۱۶/۴۸
۰/۲	۱۴/۱۶	۱۵/۹۱	۱۸/۵۹
۰/۳	۱۶/۸۸	۱۹/۳۳	۲۲/۰۶
۰/۴	۱۸/۷۲	۲۱/۷۰	۲۳/۲۹



شکل ۲-۴: نمودار تغییرات مقاومت‌های وابسته به فواصل متوالی مربوط به نمونه‌های S1، S2 و S3

به‌منظور محاسبه ρ_c مقادیر L_T و R_{sheet} از برون‌یابی نمودار شکل ۲-۴ تعیین می‌شوند و نهایتاً

ρ_c از رابطه ۳-۶ به‌دست می‌آید. در جدول ۳-۴ مقادیر ρ_c و L_T و R_c مربوط به هر نمونه نشان داده

شده است.

جدول ۴-۳: مقادیر مقاومت ویژه اتصال (ρ_c) و L_T در نمونه‌های S1، S2 و S3

نمونه	L_T (cm)	R_c (cm)	ρ_c ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
S1	-۰/۱۸	۴/۴۴	۰/۳۹
S2	-۰/۲۲	۵/۵۹	۰/۶۲
S3	-۰/۲۸	۷	۰/۹۸

این نتایج حاکی از آن است که نمونه S1 از کمترین مقاومت ویژه اتصال $0.39 \Omega \cdot \text{cm}^2$ برخوردار می‌باشد. بنابراین با افزایش ضخامت لایه مقاومت ویژه اتصال کاهش یافته است.

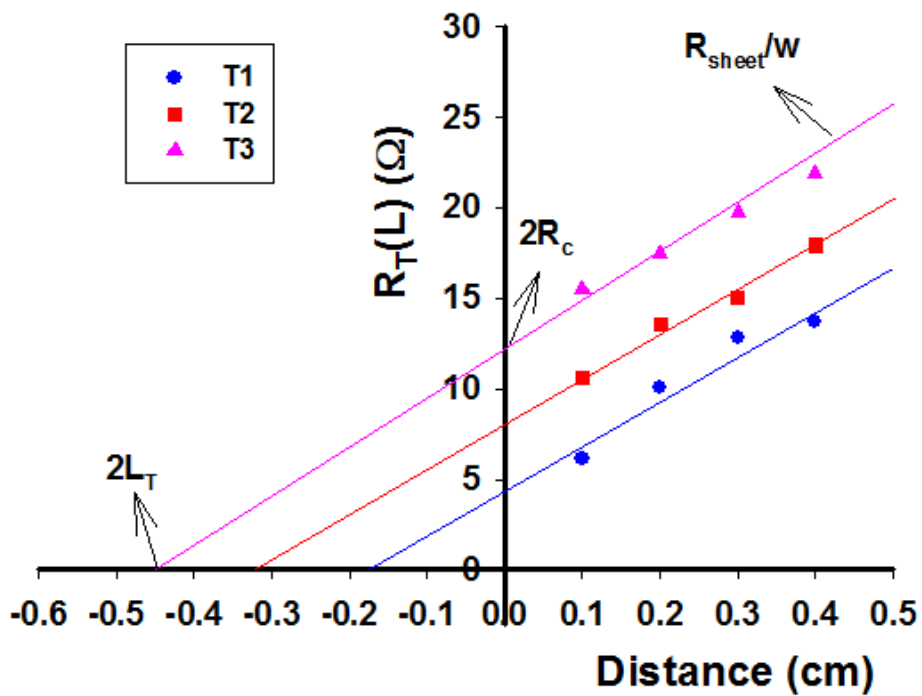
ج) بررسی اثر دمای بازپخت

در این مورد نیز برای تعیین بزرگی ρ_c نمونه‌ها از روش TLM استفاده کرده‌ایم. بدین منظور نمونه‌هایی را مانند الگوی شکل ۳-۶ با ضخامت‌های یکسان، (تبخیر 0.2 g فلز آلومینیوم) آماده کرده و به مدت ۴۵ دقیقه در دماهای 400°C (T1)، 300°C (T2) در داخل کوره در معرض هوا قرار دادیم و نمونه دیگر (T3) را در شرایط بدون بازپخت نگه داشتیم. بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها برای اندازه‌گیری مشخصه I-V بین اتصالات فلزی همانند شکل ۳-۷ عمل کرده و مقاومت‌های وابسته به فواصل متوالی را تعیین می‌کنیم.

در جدول ۴-۴ مقادیر مقاومت‌های مربوط به فواصل I_1 تا I_4 را نشان داده شده است. چنانچه دیده می‌شود با افزایش فاصله بین اتصالات مقاومت R_T نیز افزایش می‌یابد. در شکل ۴-۳ مطابق با بخش ۳-۲-۱ نمودار تغییرات این مقاومت‌ها بر حسب فواصل I_1 تا I_2 نشان داده شده است.

جدول ۴-۴: مقادیر مقاومت‌های وابسته به فواصل متوالی در نمونه‌های T1، T2 و T3

L (cm)	$R_T(T1)$ (Ω)	$R_T(T2)$ (Ω)	$R_T(T3)$ (Ω)
۰/۱	۶/۱۳	۱۰/۵۶	۱۵/۴۷
۰/۲	۱۰/۰۳	۱۳/۵۳	۱۷/۴۷
۰/۳	۱۲/۷۸	۱۵	۱۹/۶۹
۰/۴	۱۳/۷۲	۱۷/۹۳	۲۱/۸۸



شکل ۴-۳: نمودار تغییرات مقاومت‌های وابسته به اتصالات متوالی در نمونه‌های T1، T2 و T3

سرانجام با برون‌یابی نمودار شکل ۴-۳ مقادیر ρ_c و L_T تعیین می‌شوند و سپس با جایگذاری در رابطه ۴-۳ مقاومت ویژه اتصال (ρ_c) مربوط به هر یک از نمونه‌های T1، T2 و T3 محاسبه شده‌اند. جدول ۴-۴ مقادیر ρ_c و L_T مربوط به هر نمونه را ارائه می‌دهد.

جدول ۴-۵: مقادیر مقاومت ویژه اتصال ρ_c و L_T مربوط به نمونه‌های T1، T2 و T3

نمونه	L_T (cm)	R_c (cm)	ρ_c ($\Omega.cm^2$)
T1	-۰/۰۹	۲/۱۸	۰/۰۸۷
T2	-۰/۱۶	۴/۰۱	۰/۳۲
T3	-۰/۲۴	۶/۱۰	۰/۷۴

با توجه به نتایج جدول ۴-۵ ملاحظه می‌شود که نمونه T1 دارای کمترین مقدار مقاومت ویژه اتصال ($۰/۰۸۷ \Omega.cm^2$) می‌باشد.

مجموعه این نتایج بیانگر آن است که نه تنها ضخامت لایه آلومینیوم بلکه دمای بازپخت و مدت زمان بازپخت در کاهش مقدار مقاومت ویژه اتصال مؤثرند.

۳-۴: بررسی مشخصه‌یابی I-V دیود شاتکی Al/p-Si

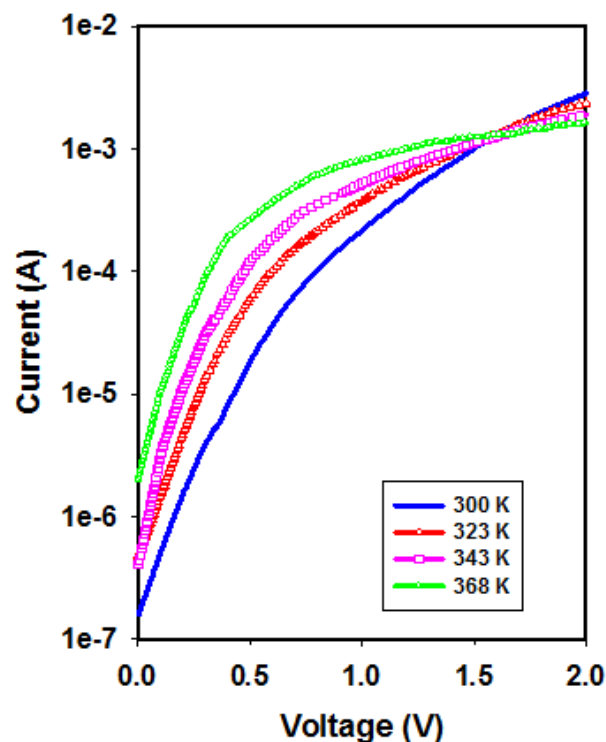
بعد از ساخت دیود شاتکی با ساختار Al/p-Si/Al که جزئیات آن در بخش ۳-۲ ارائه شد به بررسی مشخصه‌های جریان - ولتاژ این نمونه در دماهای مختلف می‌پردازیم، در این بررسی به تأثیر حضور لایه عایق بومی بر پارامترهای دیود شاتکی شامل ضریب ایده‌آلی ارتفاع سد شاتکی چگالی حالت‌های جایگزیده و مقاومت متوالی و... می‌پردازیم.

۳-۴-۱: وابستگی دمایی مشخصه‌های I-V دیود شاتکی در شرایط بایاس مستقیم،

بر پایه سد پتانسیل همگن

۳-۴-۱-۱: تعیین جریان اشباع معکوس (I_0) و ضریب ایده‌آلی (n)

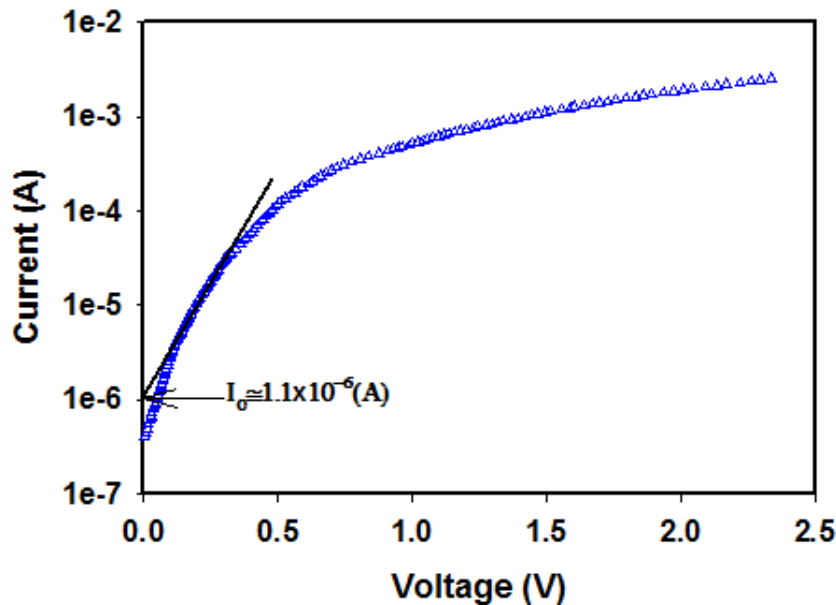
شکل ۴-۴ مشخصه نیم-لگاریتمی جریان - ولتاژ (I-V) دیود شاتکی Al/p-Si با لایه عایق بومی را که در دماهای مختلف از ۳۰۰-۳۶۸ K اندازه‌گیری شده است نشان می‌دهد.



شکل ۴-۴: داده‌های تجربی متناظر با مشخصه I-V در شرایط بایاس مستقیم دیود سد شاتکی Al/p-Si در دماهای

مختلف

همان‌گونه که در بخش ۱-۳ گفته شد، جریان از سراسر دیود سد شاتکی در شرایط بایاس مستقیم $V \geq \frac{3kT}{q}$ ، مطابق با نظریه گسیل گرمایی از رابطه ۱-۱۰ پیروی می‌کند. مقدار جریان اشباع معکوس از رابطه ۱-۱۱ محاسبه می‌شود که می‌توان آن را از طریق تعیین عرض از مبدا در ناحیه خطی در نمودار نیم لگاریتمی جریان - ولتاژ به دست آورد. در شکل ۴-۵ به عنوان نمونه مقدار جریان اشباع معکوس را برای مشخصه‌ی جریان - ولتاژ دیود در دمای ۳۴۳ K در شرایط بایاس مستقیم $V \geq \frac{3kT}{q}$ تعیین کردیم.



شکل ۴-۵: مشخصه‌ی جریان - ولتاژ برای دیود سد شاتکی در دمای ۳۴۳ K. موقعیت جریان اشباع معکوس (I_0) در این نمونه از طریق برون‌یابی داده‌ها در گستره خطی داده‌ها که بزرگی افت ولتاژ IR_s کوچک است نشان داده شده است.

مقادیر ضریب ایده‌آلی (n) را می‌توان از رابطه ۱-۱۲ با استفاده از شیب ناحیه خطی نمودار $\ln(I)-V$ محاسبه کرد. همان‌گونه که از جدول ۴-۶ پیداست مقادیر مورد بررسی برای این نمونه از ۳/۷۵ (در دمای ۳۰۰ K) تا ۲/۸۲ (در دمای ۳۶۸ K) تغییر پیدا کرده‌اند.

جدول ۴-۶: مقادیر ضریب ایده‌آلی و جریان اشباع معکوس در نمونه مورد بررسی در دماهای مختلف.

T(K)	$I_0(A)$	n
۳۰۰	$(1/7 \pm 0.1) \times 10^{-7}$	۳/۷۵
۳۲۳	$(4/8 \pm 0.1) \times 10^{-7}$	۳/۱۷
۳۴۳	$(1/1 \pm 0.1) \times 10^{-6}$	۲/۹۵
۳۶۸	$(3/4 \pm 0.1) \times 10^{-6}$	۲/۸۲

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود کمیت ضریب ایده‌آلی n به دما وابسته است، به طوری که با افزایش دما ضریب ایده‌آلی n کاهش می‌یابد. این شیوه تغییرات به‌خوبی با نتایج گزارش شده توسط ایلبایج و همکاران [۳۰] مطابقت دارد.

برای یک دیود ایده‌آل انتظار می‌رود $n=1$ باشد، اما مقادیر ضریب ایده‌آلی که در جدول ۴-۶ آمده است بزرگتر از یک هستند. مقادیر بالای n می‌تواند ناشی از حضور یک لایه نازک اکسیدی عایق در سطح مشترک، نیروی تصویری، مقاومت متوالی و..... باشد [۳۲].

۴-۳-۱-۲: تعیین ارتفاع سد

در اتصالات شاتکی، ارتفاع سد از پارامترهای مهم به حساب می‌آید. روش‌های متفاوتی برای تعیین ارتفاع سد وجود دارد، در ادامه به بررسی دو روش در این مورد می‌پردازیم.

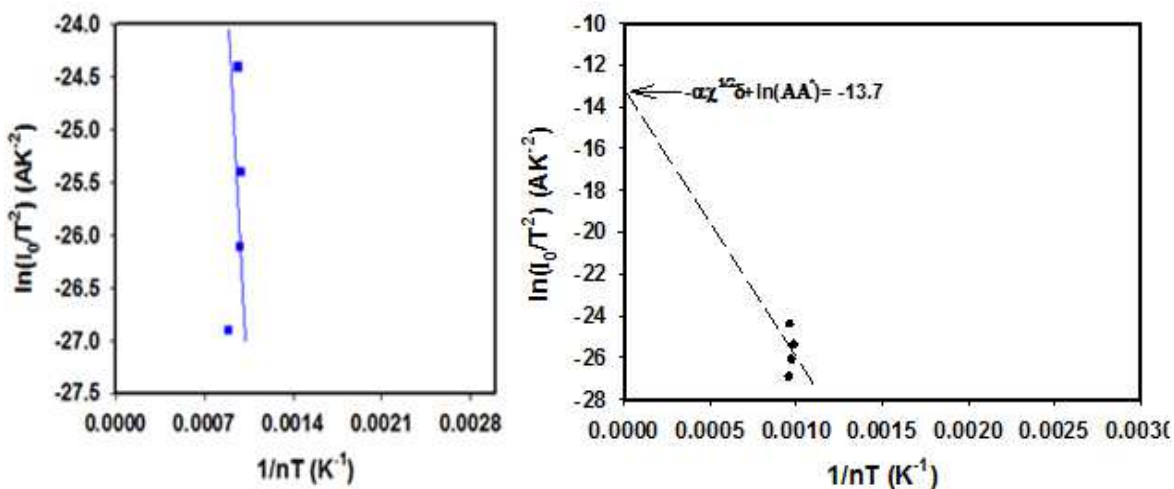
الف) تعیین ارتفاع سد با استفاده از اندازه‌گیری جریان – ولتاژ (I-V)

همان‌گونه که در بخش ۳-۱ گفته شد مطابق با نظریه گسیل گرما یونی با معلوم شدن مقدار جریان اشباع معکوس (I_0) ارتفاع سد (Φ_{B0}) در شرایط بایاس صفر از رابطه ۱-۱۳ بدست می‌آید. با توجه به جدول ۴-۷ پیداست که این مقادیر برای این نمونه از ۰/۷۰ eV (در دمای ۳۰۰ K) تا ۰/۷۷ eV (در دمای ۳۶۸) تغییر پیدا کرده‌اند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش دما ارتفاع سد شاتکی (Φ_{B0}) افزایش یافته است.

جدول ۴-۷: تغییرات دمایی ارتفاع سد شاتکی Φ_{B0} و ارتفاع سد مؤثر Φ_{Bef}

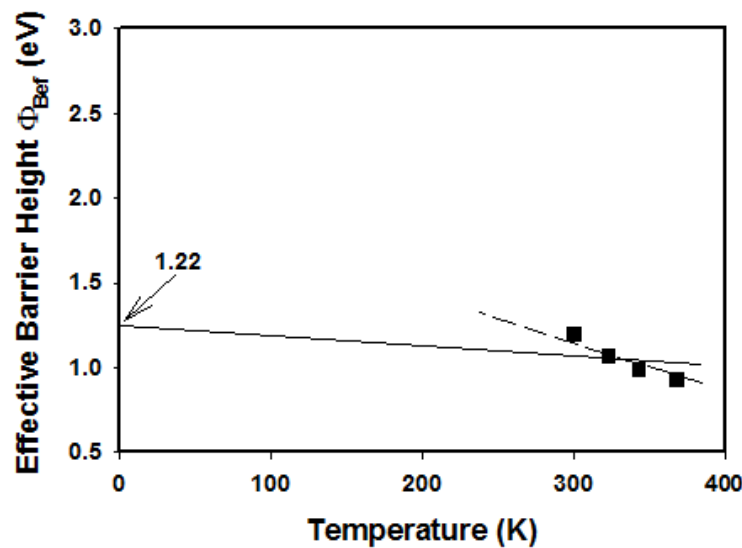
T(K)	$\Phi_{B0}(I-V)(eV)$	$\Phi_{Bef}(I-V)(eV)$
۳۰۰	۰/۷۰	۱/۲
۳۲۳	۰/۷۳	۱/۰۷
۳۴۳	۰/۷۵	۰/۹۹
۳۶۸	۰/۷۷	۰/۹۳

این نحوه تغییرات با توجه به سایر روش‌های استفاده شده توسط محققین مختلف [۵۳، ۵۴، ۵۵] و ضریب دمایی ارتفاع سد روندی غیرعادی دارد که این را به ناهمگنی در ارتفاع سد و فصل مشترک فلز - نیمرسانا نسبت می‌دهند [۳۰]. حال به منظور تعیین ضریب دمایی ارتفاع سد و به سبب مقادیر بالای ضریب ایده‌آلی به بررسی این احتمال می‌پردازیم که عبارت جریان اشباع شامل ضریب ایده‌آلی n نیز باشد (رابطه ۱-۱۶). این رابطه نشان می‌دهد که همان‌گونه که با کاهش دما ضریب ایده‌آلی افزایش می‌یابد، Φ_{B0} به‌طور مؤثر به صورت $\frac{\Phi_{B0}}{n}$ کاهش می‌یابد. با توجه به رابطه ۱-۱۷ از عرض از مبدأ خط مستقیم $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1/nT$ ، شکل ۴-۶، که برابر $-\alpha\chi^{1/2}\delta + \ln(AA^*)$ می‌باشد ضریب تونل‌زنی حفره $\alpha\chi^{1/2}\delta$ را برابر $13/7$ به دست آوردیم.



شکل ۴-۶: منحنی $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1/nT$ برای دیود سد شاتکی Al/p-Si. خط نقطه چین حاصل برازش داده‌ها به کمک رابطه ۱-۱۷ می‌باشد.

با معلوم شدن ضریب تونل زنی حفره با استفاده از معادله ۱-۱۷ وابستگی دمایی ارتفاع سد مؤثر (Φ_{Bef}) برای هر دما بدست می‌آید که در جدول ۴-۷ و شکل ۴-۷ نشان داده شده است. از رسم نمودار Φ_{Bef} بر حسب T دیده می‌شود که ارتفاع سد مؤثر تغییرات تقریباً خطی با دما دارد. با استفاده از رابطه ۱-۱۹ $\Phi_B(0 K)$ ارتفاع سد در دمای صفر کلوین و β ضریب دمایی منفی ارتفاع سد است که به ترتیب از عرض از مبدأ و شیب نمودار Φ_{Bef} بر حسب T بدست می‌آید.



شکل ۴-۷: وابستگی دمایی ارتفاع سد شاتکی مؤثر برای دیود شاتکی Al/p-Si. خط نقطه چین نشان‌دهنده شیب ظاهری داده‌هاست، لکن به دلیل گستره محدود دمایی به کار گرفته شده انتظار می‌رود شیب داده‌ها در گستره دمایی پایین به صورت خطی باشد تا ارتفاع سد مؤثر در دمای صفر کلوین را برای Si برآورده سازد.

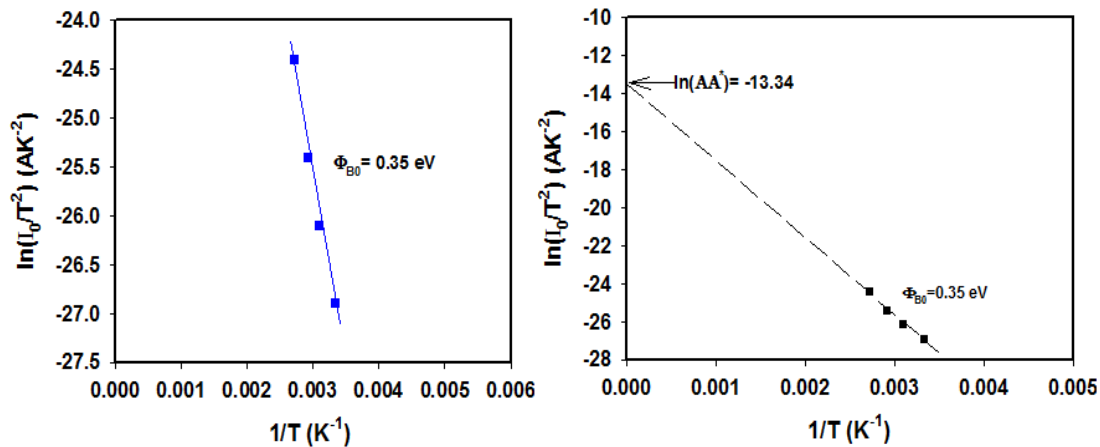
با توجه به نمودار شکل ۴-۷، $\beta = -5/82 \times 10^{-4} \text{ eV/T}$ که این با ضریب دمایی منفی گاف نواری Si ($-4/73 \times 10^{-4} \text{ eV/T}$) در توافق است. بعلاوه، ارتفاع سد نزدیک $1/22 \text{ eV}$ محاسبه می‌شود که این به انرژی گاف نواری ممنوع Si در 0K ($1/17 \text{ eV}$) نزدیک است.

بنابراین تا این جا دیدیم که ارتفاع سد شاتکی Φ_{B0} که از مشخصه‌ی جریان - ولتاژ تعیین شد با افزایش دما افزایش می‌یابد و چنین وابستگی با ضریب دمایی منفی گزارش شده از ارتفاع سد شاتکی، (شکل ۴-۷) در تناقض است. بنابراین می‌توان گفت که کاهش عمده‌ی ارتفاع سد Φ_{B0} و افزایش

ضریب ایده‌آلی (n) احتمالاً به سبب ناهمگنی در سطح مشترک و ارتفاع سد است. برای مثال نواقص سطح مشترک ممکن است سبب یک توزیع ناهمگون عرضی در ارتفاع سد در سطح مشترک شود که این مسئله سبب مقادیر بزرگ ضریب ایده‌آلی می‌شود. این سدهای ناهمگن عرضی در شاتکی می‌تواند ناشی از مرز دانه‌ها، فازهای چندگانه، رویه‌ها، نواقص، ترکیبی از فازهای متفاوت و ... باشد [۳۲].

ب) تعیین ارتفاع سد با استفاده از اندازه‌گیری انرژی فعالسازی

همان‌گونه که در بخش ۱-۳ گفته شد در اندازه‌گیری‌های انرژی فعالسازی، ارتفاع سد از وابستگی دمایی جریان اشباع معکوس (I_0) تعیین می‌شود. مزیت اصلی تعیین سد شاتکی با استفاده از اندازه‌گیری انرژی فعالسازی این است که در اندازه‌گیری انرژی فعالسازی، نیاز به اطلاعاتی همچون سطح مقطع قطعه (A) نیست بدین‌منظور با استفاده از رابطه ۱-۱۴، ارتفاع سد از شیب منحنی ریچاردسون از رسم $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1/T$ برابر 0.35 eV به دست می‌آید، (شکل ۴-۸). این مقدار تقریباً نصف مقدار بدست آمده از بخش ۱-۳-۴ (الف) است. بدیهی است این مقدار تفاوت قابل چشم‌پوشی نمی‌باشد. نه تنها این کمیت بلکه مقدار ضریب مؤثر ریچاردسون (A^*) را می‌توان به کمک معادله ۱-۱۴ از طریق عرض از مبدأ نمودار برون‌یابی شده شکل ۴-۸ نیز بدست آورد [۱۱] که در این مورد مقدار ثابت ریچاردسون (A^*) برابر $5.1 \times 10^{-5} \text{ Acm}^{-2} \text{ K}^{-2}$ حاصل می‌آید، این نیز بسیار کوچکتر از مقدار انتظاری $32 \text{ Acm}^{-2} \text{ K}^{-2}$ برای p-Si است [۱]. این انحراف در ارتفاع سد و همچنین مقدار A^* که با فرض ارتفاع سد ثابت و همگن بدست آمده است، نیاز به تصحیح دارد. در این مورد بایستی از فرضیه ارتفاع سدهای غیر همگن استفاده کنیم [۳۲]. در ادامه به مطالعه این داده‌ها با فرض شرایط سدهای ناهمگن می‌پردازیم.

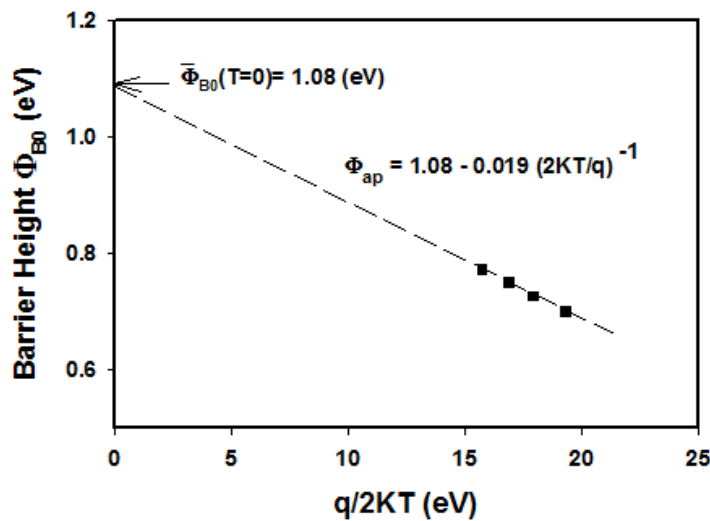


شکل ۴-۸: منحنی ریچاردسون از $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1/T$ برای دیود سد شاتکی Al/p-Si. خط نقطه چین حاصل برازش داده‌ها به کمک رابطه ۱-۱۴ می‌باشد.

۴-۳-۲: مطالعه مشخصه‌های I-V دیود شاتکی Al/p-Si بر پایه سد پتانسیل ناهمگن

همان‌گونه که در بخش ۱-۳-۲ گفته شد ما در این جا به تحلیل مدل افت و خیز پتانسیل برای تفسیر اندازه‌گیری‌های جریان - ولتاژ می‌پردازیم این مدل مبتنی بر افت و خیز پتانسیل با فرض یک توزیع پیوسته از سدها در فصل مشترک به صورت یک توزیع گوسی با ارتفاع سد میانگین $\overline{\Phi_{B0}}$ و انحراف معیار σ_s توضیح می‌دهیم.

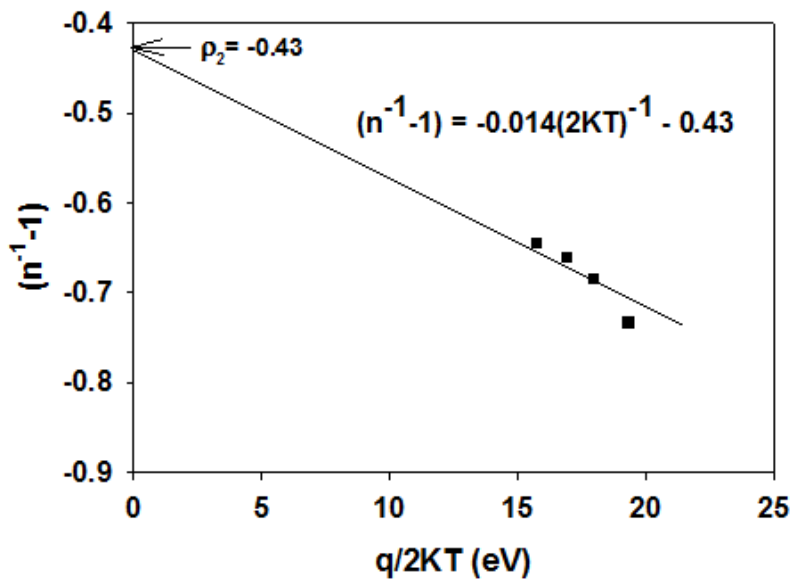
به منظور تجزیه و تحلیل سد ناهمگن مقادیر به دست آمده برای ضریب ایده‌آلی n و ارتفاع سد شاتکی Φ_{B0} در جدول ۴-۶ را متناظر با مقادیر ارتفاع سد ظاهری (Φ_{ap}) و ضریب ایده‌آلی ظاهری (n_{ap}) سد پتانسیل قرار می‌دهیم. با استفاده از رابطه ۱-۲۶ نمودار Φ_{ap} بر حسب $q/2KT$ ، شکل ۴-۹، را می‌توان رسم کرد. رابطه ۱-۲۶ نشان می‌دهد که Φ_{ap} همیشه کوچکتر از مقدار میانگین آن یعنی $\overline{\Phi_{B0}}$ است.



شکل ۴-۹: نمودار ارتفاع سد ظاهری بر حسب $q/2KT$ از دیود شاتکی Al/p-Si بر اساس در نظر گیری توزیع گوسی برای مقادیر ناهمگون ارتفاع سد خط نقطه چین سیاه رنگ حاصل برازش داده‌ها به کمک معادله ۱-۲۶ می‌باشد.

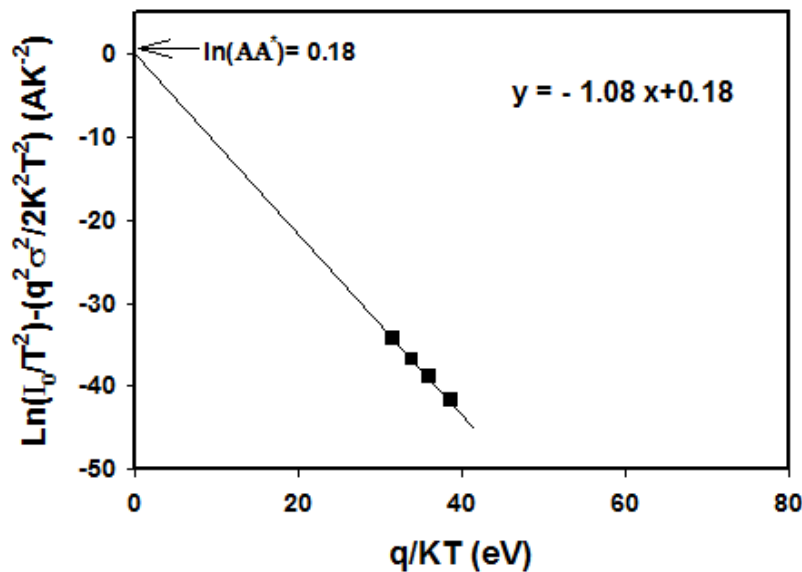
چنانچه از شکل ۴-۹ مشاهده می‌شود نمودار Φ_{ap} بر حسب $q/2KT$ خطی مستقیم است که eV $\overline{\Phi_{B0}}(T=0) = 1.08$ و $\sigma_s = 0.14 V$ به ترتیب از عرض از مبدأ و شیب نمودار تعیین می‌شود. در شرایط عملی مقدار انحراف معیار $\sigma_s = 0.14 V$ مقدار بزرگی است، که این نشان‌دهنده حضور ناهمگنی سطح مشترک است.

به منظور بررسی وابستگی ولتاژی و دمایی ضریب ایده‌آلی n مطابق با توضیحات بخش ۱-۳-۲ از روابط ۱-۲۷ و ۱-۳۴ استفاده می‌کنیم. نمودار $(n-1)$ بر حسب $q/2KT$ در شکل ۴-۱۰ خط مستقیمی است که ضرایب ولتاژ $\rho_2 = -0.48$ و $\rho_3 = -0.27$ از عرض از مبدأ و شیب نمودار تعیین می‌شود. همان‌طور که در بخش ۱-۳-۲ گفته شد اگر ρ_2 منفی باشد، ارتفاع سد با افزایش بایاس مستقیم کاهش می‌یابد، که این عکس مفهوم کاهش نیروی تصویری است. مقدار ρ_3 در واقع منفی است بنابراین با افزایش بایاس مستقیم ارتفاع سد افزایش می‌یابد. بعلاوه افزایش ارتفاع سد با افزایش بایاس مستقیم فقط امکان‌پذیر است زیرا کاهش ارتفاع سد میانگین با افزایش بایاس با کاهش مقدار σ_s جبران می‌شود.



شکل ۴-۱۰: تغییرات ضریب ایده آلی بر حسب $q/2KT$ در دیود شاتکی Al/p-Si مبتنی بر توزیع گاوسی ارتفاع سد. خط ممتد سیاه رنگ حاصل برازش داده‌ها به کمک معادله ۳۴-۱ می‌باشد.

همان‌گونه که در بالا اشاره شد مقدار کوچک انرژی فعالسازی و انحراف مقدار ضریب مؤثر ریچاردسون A^* از مقدار انتظاری ($32 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$) برای p-Si را به ناهمگنی در ارتفاع سد و افت و خیز پتانسیل نسبت دادیم، بنابراین برای بررسی این رفتار غیرعادی از رابطه اصلاح شده‌ی ۳۶-۱ کمک می‌گیریم. شیب نمودار شکل ۴-۱۱ با توجه به رابطه ۳۶-۱ متناظر با ارتفاع سد میانگین خواهد بود که برابر $\overline{\Phi_{B0}}(T=0) = 1/0.8 \text{ eV}$ بدست می‌آید. همچنین با توجه به همین معادله عرض از مبدا نمودار نشانگر بزرگی ضریب مؤثر ریچاردسون است که محاسبات ما برابر با مقدار $38/0.8 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ بدست آمد. این مقدار به مقدار معلوم $32 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ برای p-Si بسیار نزدیک است.

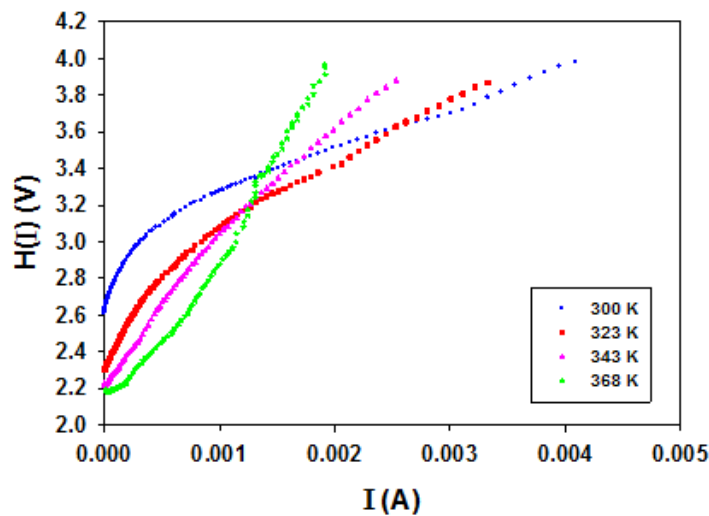


شکل ۴-۱: منحنی اصلاح شده ی ریچاردسون برای دیود شاتکی Al/p-Si بر اساس توزیع گاوسی ارتفاع سد. خط ممتد سیاه رنگ حاصل برازش داده‌ها به کمک معادله ۱-۳۶ می‌باشد.

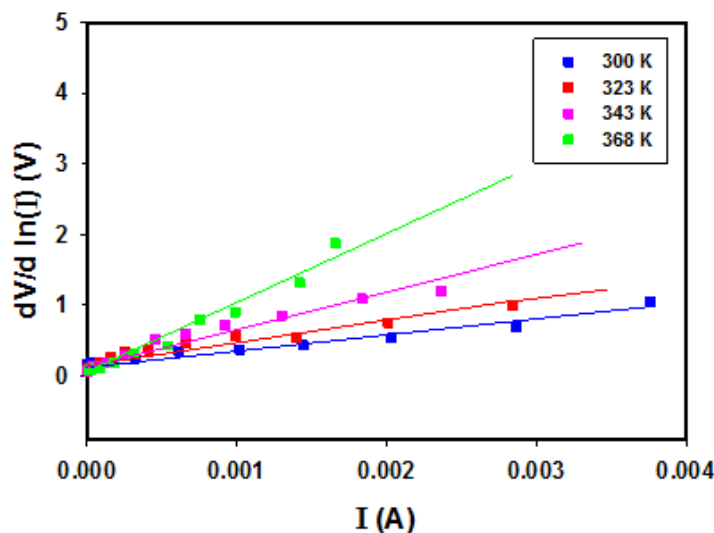
۳-۳-۴: مقاومت متوالی R_s

گفته شد که بر اثر حضور ناحیه خنثای نیمرسانا در حد فاصل بین ناحیه تهی و اتصال اهمی پشتی وجود یک مقاومت متوالی R_s امری اجتناب ناپذیر است که سبب یک افت ولتاژ در شرایط بایاس مستقیم می‌شود.

شکل‌های ۴-۱۲ و ۴-۱۳ با استفاده از روابط ۱-۳۹ و ۱-۴۰ منحنی تغییرات $H(I)$ و $dV/d\ln(I)$ را برحسب تابعی از جریان I در دماهای مختلف برای قطعه دیودی Al/p-Si نشان می‌دهد. بدیهی است با توجه به روابط بالا شیب این داده‌ها متناظر با مقاومت متوالی R_s در نمونه مورد بررسی به ازای دمای مورد نظر است. نتیجه این محاسبات در جدول ۴-۸ و نحوه تغییرات دمایی آنها در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۲: نمودار $H(I)$ بر حسب جریان I در دیود شاتکی Al/p-Si در دماهای متفاوت



شکل ۴-۱۳: نمودار $dV/d \ln(I)$ بر حسب جریان I در دیود شاتکی Al/p-Si در دماهای متفاوت. خطوط سیاه رنگ

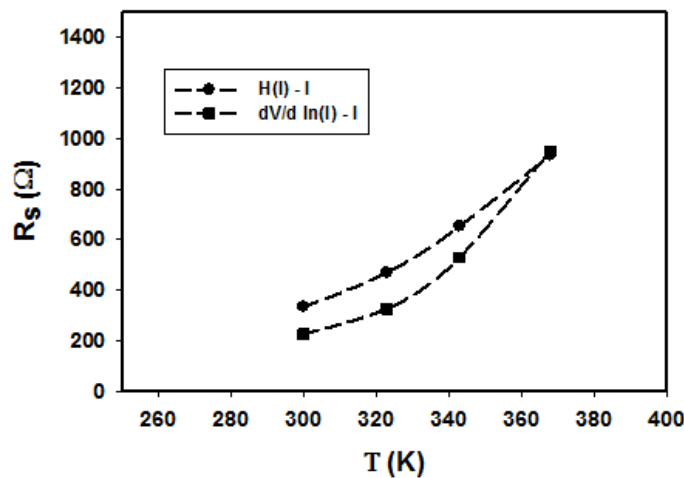
حاصل برازش داده‌ها به کمک معادله ۱-۳۹ می‌باشد.

چنانچه از جدول ۴-۸ ملاحظه می‌شود مقادیر ضریب ایده‌آلی n و ارتفاع سد شاتکی Φ_{B0} که از روابط ۱-۳۹ و ۱-۴۰ به دست آمده با مقادیر متناظر در جدول ۴-۶ بسیار به یکدیگر نزدیک‌اند، مقادیر مقاومت متوالی حاصل از این دو معادله نیز با یکدیگر سازگارند که می‌تواند حاکی از صحت محاسبات باشد. این نزدیکی مقادیر در مورد مقاومت متوالی در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است.

جدول ۴-۸: وابستگی دمایی پارامترهای متفاوت تعیین شده از مشخصه های I-V دیود شاتکی Al/p-Si با لایه عایق

بومی

T(K)	n (Eq(1-39))	Φ_{B0} (Eq(1-40)) (eV)	R_s (Eq(1-40)) (Ω)	R_s (Eq(1-39)) (Ω)
۳۰۰	۳/۵۴	۰/۷۷۷	۳۳۴	۲۲۷
۳۲۳	۳/۱۱	۰/۷۵۶	۴۶۹	۳۲۷
۳۴۳	۲/۶۸	۰/۷۲۸	۶۵۳	۵۲۹
۳۶۸	۲/۵۸	۰/۶۹۷	۹۳۴	۹۶۸



شکل ۴-۱۴: وابستگی دمایی R_s بر حسب تابعی از دمای دیود شاتکی Al/p-Si با لایه عایق بومی.

نکته جالب توجه آنکه چنانچه مشاهده می‌شود، مقاومت متوالی با افزایش دما روندی افزایشی دارد. این رفتار می‌تواند ناشی از این واقعیت باشد که اگر چه با افزایش دما بارهای به دام افتاده در تله های واقع در سطح مشترک فلز - نیمرسانا انرژی لازم را برای فرار از این ترازها بدست می‌آورند لکن به دلیل تغییرات افزایشی مقاومت در اتصالات اهمی قطعه رفتار غالب به صورت افزایشی مشاهده می‌شود.

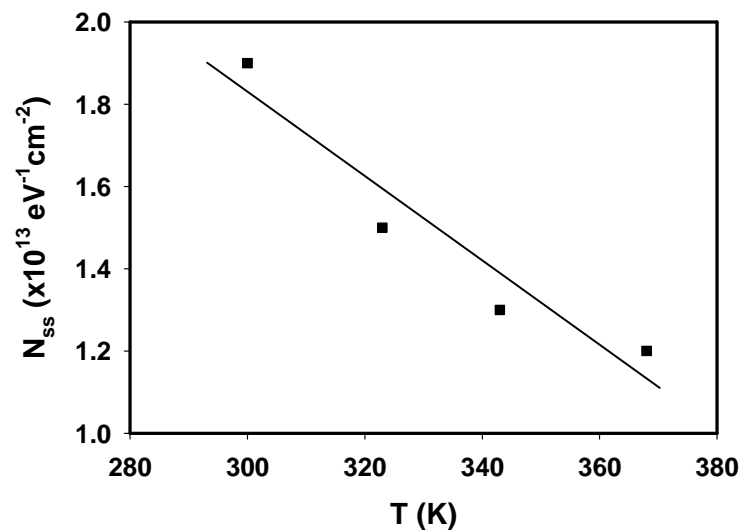
۴-۳-۴: چگالی حالات سطحی

با توجه به مطالب بخش ۱-۵ گفتیم که وجود حالت‌های سطحی (با تراکم N_{ss}) به دلیل حضور

لایه عایق در سطح مشترک فلز و نیمرسانا است. مقدار این تراکم با توجه به رابطه ۱-۴۱ محاسبه می شود. نتایج وابسته به مقادیر N_{ss} در هر دما به ازای مقادیر $\delta = 30 \text{ \AA}$ ، $\epsilon_s = 11/8 \epsilon_0$ و $\epsilon_i = 3/8 \epsilon_0$ [۲۳] در جدول ۴-۹ ارائه گردیده است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که مقادیر چگالی حالات سطح مشترک از مرتبه $(eV^{-1}cm^{-2})$ 10^{13} بوده و با افزایش دما، کاهش می یابد (شکل ۴-۱۵). این تغییرات می تواند ناشی از بهبود فصل مشترک فلز - نیمرسانا بر اثر افزایش دمای قطعه باشد.

جدول ۴-۹: وابستگی دمایی چگالی حالات سطحی دیود شاتکی Al/p-Si با لایه عایق بومی

T(K)	$N_{ss}(eV^{-1}cm^{-2})$
۳۰۰	$1/9 \times 10^{13}$
۳۲۳	$1/5 \times 10^{13}$
۳۴۳	$1/3 \times 10^{13}$
۳۶۸	$1/2 \times 10^{13}$



شکل ۴-۱۵: تغییرات چگالی حالات سطحی با دما برای دیود شاتکی Al/p-Si

۴-۴: بررسی مشخصه‌یابی I-V دیود شاتکی Cu/p-Si

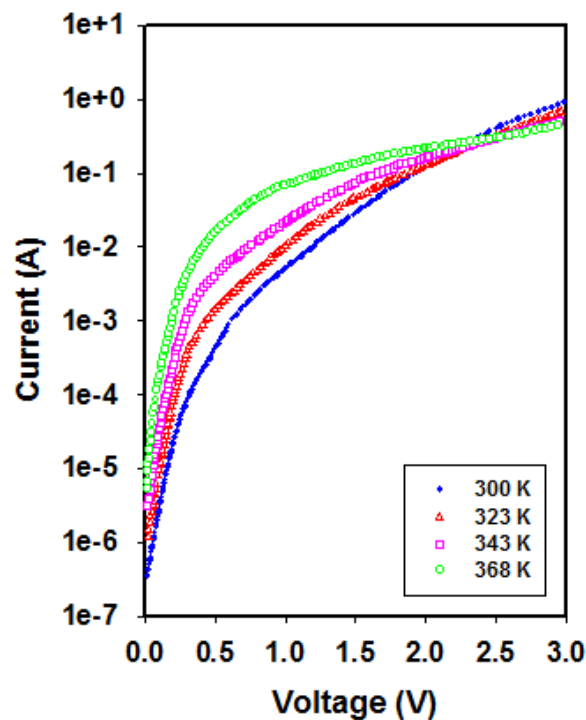
بعد از ساخت دیود شاتکی با ساختار Cu/p-Si/Al که جزئیات آن در بخش ۳-۲ ارائه شد به بررسی مشخصه‌های جریان - ولتاژ این نمونه در دماهای مختلف می‌پردازیم، در این بررسی نیز مانند بخش ۳-۴ به تأثیر حضور لایه عایق بومی بر پارامترهای دیود شاتکی شامل ضریب ایده‌آلی ارتفاع سد شاتکی چگالی حالت‌های جایگزیده و مقاومت متوالی و... می‌پردازیم.

۴-۴-۱: وابستگی دمایی مشخصه‌های I-V دیود شاتکی در شرایط بایاس مستقیم،

بر پایه سد پتانسیل همگن

۴-۴-۱-۱: تعیین جریان اشباع معکوس (I_0) و ضریب ایده‌آلی (n)

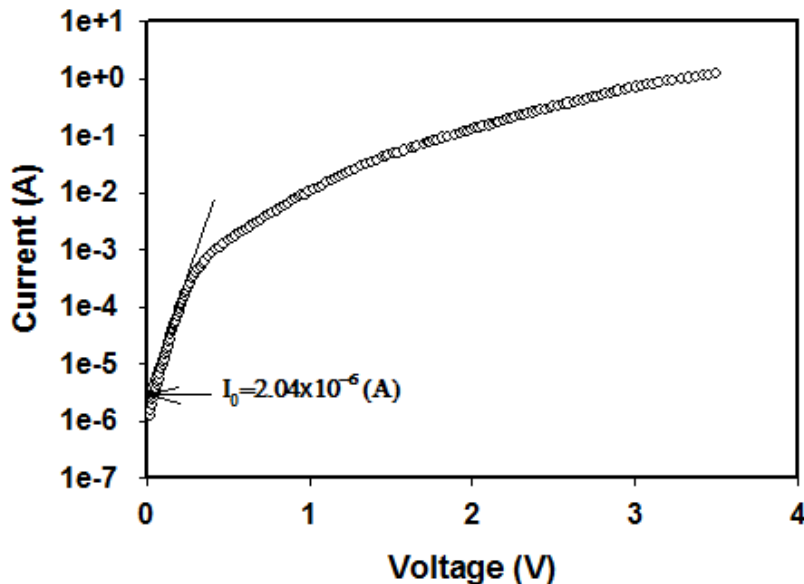
شکل ۴-۱۶ مشخصه نیم- لگاریتمی جریان - ولتاژ (I-V) دیود شاتکی Cu/p-Si با لایه عایق بومی را که در دماهای مختلف از ۳۰۰-۳۶۸ K اندازه‌گیری شده است نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۶: داده‌های تجربی متناظر با مشخصه I-V در شرایط بایاس مستقیم دیود سد شاتکی Cu/p-Si در دماهای

مختلف

همان‌گونه که در بخش ۱-۳ گفته شد، جریان از سراسر دیود سد شاتکی در شرایط بایاس مستقیم $V \geq \frac{3kT}{q}$ ، مطابق با نظریه گسیل گرمایی از رابطه ۱-۱۰ پیروی می‌کند. مقدار جریان اشباع معکوس از رابطه ۱-۱۱ محاسبه می‌شود که می‌توان آن را از طریق تعیین عرض از مبدا در ناحیه خطی در نمودار نیم لگاریتمی جریان - ولتاژ به دست آورد. در شکل ۴-۱۷ به عنوان نمونه مقدار جریان اشباع معکوس را برای مشخصه‌ی جریان - ولتاژ دیود در دمای ۳۲۳ K در شرایط بایاس مستقیم $V \geq \frac{3kT}{q}$ تعیین کردیم.



شکل ۴-۱۷: مشخصه‌ی جریان - ولتاژ برای دیود سد شاتکی در دمای ۳۲۳ K موقعیت جریان اشباع معکوس (I_0) در

این نمونه از طریق برون‌یابی داده‌ها در گستره خطی داده‌ها که بزرگی افت ولتاژ IR_s کوچک است

نشان داده شده است.

مقادیر ضریب ایده‌آلی را می‌توان از رابطه ۱-۱۲ با استفاده از شیب ناحیه خطی نمودار $\ln(I)-V$

محاسبه کرد. همان‌گونه که از جدول ۴-۱۰ پیداست مقادیر مورد بررسی برای این نمونه از ۲/۱۴ (در

دمای ۳۰۰ K) تا ۱/۶۰ (در دمای ۳۶۸ K) تغییر پیدا کرده‌اند.

جدول ۴-۱۰: مقادیر ضریب ایده‌آلی و جریان اشباع معکوس در نمونه مورد بررسی در دماهای مختلف.

T(K)	$I_0(A)$	n
۳۰۰	$(5/0.3 \pm 0/1) \times 10^{-7}$	۲/۱۴
۳۲۳	$(2/0.4 \pm 0/1) \times 10^{-6}$	۲/۰۵
۳۴۳	$(6/64 \pm 0/1) \times 10^{-6}$	۱/۸۴
۳۶۸	$(2/21 \pm 0/1) \times 10^{-5}$	۱/۶۰

چنانچه ملاحظه می‌شود کمیت ضریب ایده‌آلی به دما وابسته است، به طوری که با افزایش دما ضریب ایده‌آلی کاهش می‌یابد. این شیوه تغییرات به خوبی با نتایج گزارش شده توسط فرج و همکاران [۳۶] مطابقت دارد.

برای یک دیود ایده‌آل انتظار می‌رود $n=1$ باشد، اما مقادیر ضریب ایده‌آلی که در جدول ۴-۱۰ آمده است بزرگتر از یک هستند. مقادیر بالای n می‌تواند ناشی از حضور یک لایه نازک اکسیدی عایق در سطح مشترک، نیروی تصویری، مقاومت متوالی و..... باشد [۳۲].

۴-۱-۲: تعیین ارتفاع سد

در این جا نیز مانند بخش ۳-۴ به منظور تعیین ارتفاع سد به بررسی دو روش می‌پردازیم.

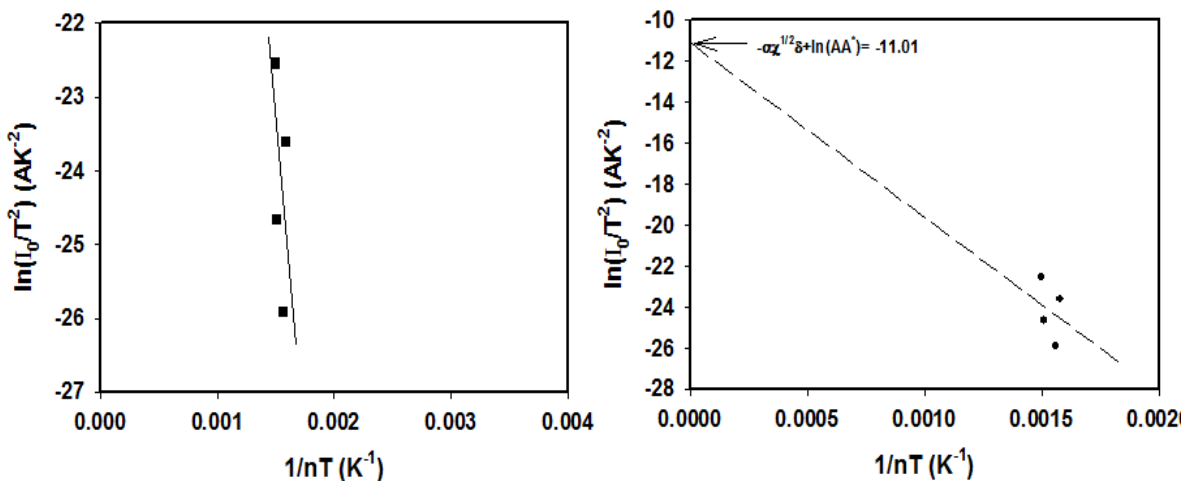
الف) تعیین ارتفاع سد با استفاده از اندازه‌گیری جریان - ولتاژ (I-V)

همان‌گونه که در بخش ۳-۱ گفته شد مطابق با نظریه گسیل گرما یونی با معلوم شدن مقدار جریان اشباع معکوس (I_0) ارتفاع سد (Φ_{B0}) در شرایط بایاس صفر از رابطه ۱-۱۳ بدست می‌آید. با توجه به جدول ۴-۱۱ پیداست که این مقادیر برای این نمونه از $0/670$ eV (در دمای 300 K) تا $0/715$ eV (در دمای 368) تغییر پیدا کرده‌اند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش دما ارتفاع سد شاتکی (Φ_{B0}) افزایش یافته است.

جدول ۴-۱۱: تغییرات دمایی ارتفاع سد شاتکی Φ_{B0} و ارتفاع سد مؤثر Φ_{Bef}

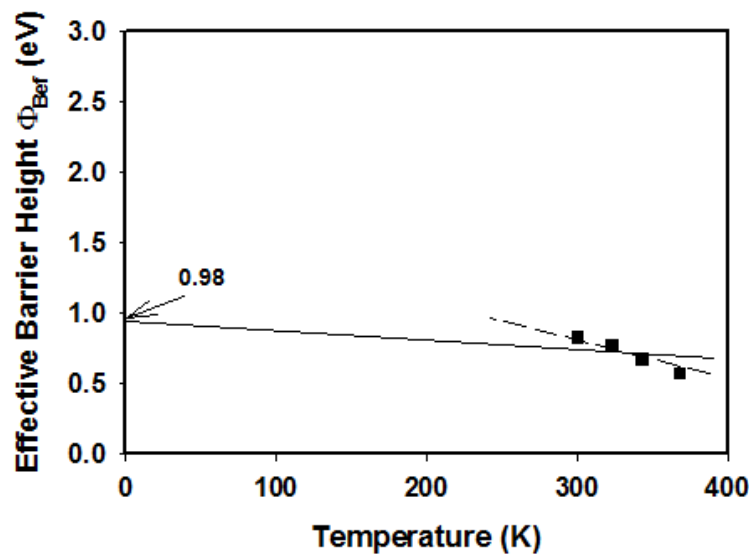
T(K)	$\Phi_{B0}(I-V)(eV)$	$\Phi_{Bef}(I-V)(eV)$
۳۰۰	۰/۶۷۰	۰/۸۳
۳۲۳	۰/۶۸۷	۰/۷۷
۳۴۳	۰/۶۹۸	۰/۶۷
۳۶۸	۰/۷۱۵	۰/۵۸

این نحوه تغییرات با توجه به سایر روش‌های استفاده شده توسط محققین مختلف [۳۶، ۵۵، ۵۶] و ضریب دمایی ارتفاع سد روندی غیرعادی دارد که این را به ناهمگنی در ارتفاع سد و فصل مشترک فلز - نیمرسانا نسبت می‌دهند [۳۶]. حال به منظور تعیین ضریب دمایی ارتفاع سد و به سبب مقادیر بالای ضریب ایده‌آلی به بررسی این احتمال می‌پردازیم که عبارت جریان اشباع شامل ضریب ایده‌آلی n نیز باشد (رابطه ۱-۱۶). این رابطه نشان می‌دهد که همان‌گونه که با کاهش دما ضریب ایده‌آلی افزایش می‌یابد، Φ_{B0} به‌طور مؤثر به صورت $\frac{\Phi_{B0}}{n}$ کاهش می‌یابد. با توجه به رابطه ۱-۱۷ از عرض از مبدأ خط مستقیم $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1/nT$ ، شکل ۴-۱۸، که برابر $-\alpha\chi^{1/2}\delta + \ln(AA^*)$ می‌باشد ضریب تونل‌زنی حفره $\alpha\chi^{1/2}\delta$ را برابر ۱۱/۰۱ به دست آوردیم.



شکل ۴-۱۸: منحنی $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1/nT$ برای دیود سد شاتکی Cu/p-Si. خط نقطه چین حاصل برازش داده‌ها به کمک رابطه ۱-۱۷ می‌باشد.

با معلوم شدن ضریب تونل زنی حفره، با استفاده از معادله ۱-۱۸ وابستگی دمایی ارتفاع سد مؤثر Φ_{Bef} برای هر دما بدست می‌آید که در جدول ۴-۱۱ و شکل ۴-۱۹ نشان داده شده. از رسم نمودار Φ_{Bef} بر حسب T دیده می‌شود که ارتفاع سد مؤثر تغییرات تقریباً خطی با دما دارد. با استفاده از رابطه ۱-۱۹ $\Phi_B(0 K)$ ارتفاع سد در دمای صفر کلوین و β ضریب دمایی منفی ارتفاع سد است که به ترتیب از عرض از مبدأ و شیب نمودار Φ_{Bef} بر حسب T به دست می‌آید.



شکل ۴-۱۹: وابستگی دمایی ارتفاع سد شاتکی مؤثر برای دیود شاتکی Cu/p-Si. خط نقطه چین نشان‌دهنده شیب ظاهری داده‌هاست، لکن به دلیل گستره محدود دمایی به کار گرفته شده انتظار می‌رود شیب داده‌ها در گستره دماهای پایینی به صورت خط پر باشد تا ارتفاع سد مؤثر در دمای صفر کلوین را برای Si برآورده سازد.

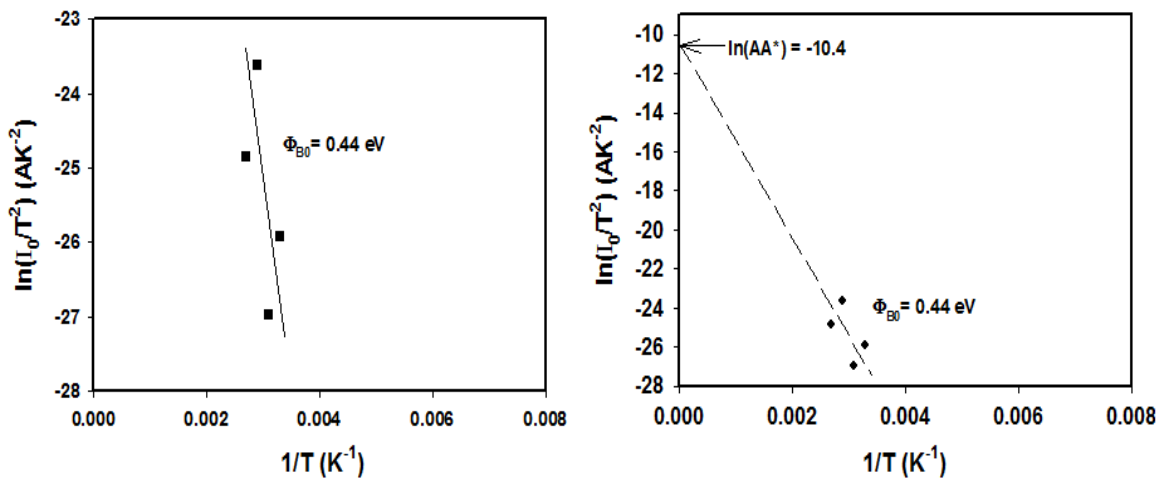
با توجه به نمودار شکل ۴-۱۹، $\beta = -6/9 \times 10^{-4} \text{ eV/T}$ که این با ضریب دمایی منفی گاف نواری Si ($-4/73 \times 10^{-4} \text{ eV/T}$) در توافق است. بعلاوه، ارتفاع سد در صفر کلوین نزدیک 0.98 eV محاسبه می‌شود که این به انرژی گاف نواری ممنوع Si در $0K$ (1.17 eV) نزدیک است.

بنابراین تا این جا دیدیم که ارتفاع سد شاتکی Φ_{B0} که از مشخصه‌ی جریان - ولتاژ تعیین شد با افزایش دما افزایش می‌یابد و چنین وابستگی با ضریب دمایی منفی گزارش شده از ارتفاع سد شاتکی، شکل ۴-۱۹ در تناقض است. بنابراین می‌توان گفت که کاهش عمده‌ی ارتفاع سد Φ_{B0} و افزایش

ضریب ایده‌آلی n احتمالاً به سبب ناهمگنی در سطح مشترک و ارتفاع سد است. برای مثال نواقص سطح مشترک ممکن است سبب یک توزیع ناهمگون عرضی در ارتفاع سد در سطح مشترک شود که این مسئله سبب مقادیر بزرگ ضریب ایده‌آلی می‌شود. این سدهای ناهمگن عرضی در شاتکی می‌تواند ناشی از مرز دانه‌ها، فازهای چندگانه، رویه‌ها، نواقص، ترکیبی از فازهای متفاوت و ... باشد [۳۶].

ب) تعیین ارتفاع سد با استفاده از اندازه‌گیری انرژی فعالسازی

همان‌گونه که در بخش ۱-۳ گفته شد در اندازه‌گیری‌های انرژی فعالسازی، ارتفاع سد از وابستگی دمایی جریان اشباع معکوس (I_0) تعیین می‌شود. مزیت اصلی تعیین سد شاتکی با استفاده از این روش این است که در اندازه‌گیری انرژی فعالسازی، نیاز به اطلاعاتی همچون سطح مقطع قطعه (A) نیست. بدین‌منظور با استفاده از رابطه ۱-۱۴، ارتفاع سد از شیب منحنی ریچاردسون از رسم $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1/T$ برابر 0.44 eV به دست می‌آید، شکل (۴-۲۰). این مقدار تقریباً نصف مقدار بدست آمده از بخش ۴-۱-۲ (الف) است. بدیهی است این مقدار تفاوت قابل چشم‌پوشی نمی‌باشد. نه تنها این کمیت بلکه مقدار ضریب مؤثر ریچاردسون (A^*) را می‌توان به کمک معادله ۱-۱۴ از طریق عرض از مبدأ نمودار برون‌یابی شده شکل ۴-۲۰ نیز بدست آورد [۱۱] که در این مورد مقدار ثابت ریچاردسون (A^*) برابر $1/0.1 \times 10^{-3} \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ حاصل می‌آید، این نیز بسیار کوچکتر از مقدار انتظاری ($32 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ برای p-Si است) [۱]. این انحراف در ارتفاع سد و همچنین مقدار A^* که با فرض ارتفاع سد ثابت و همگن بدست آمده است، نیاز به تصحیح دارد. در این مورد بایستی از فرضیه ارتفاع سدهای غیر همگن استفاده کنیم [۳۲]. در ادامه به مطالعه این داده‌ها با فرض شرایط سدهای ناهمگن می‌پردازیم.



شکل ۴-۲۰: منحنی ریچاردسون از $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1/T$ برای دیود سد شاتکی Cu/p-Si. خط نقطه چین حاصل برازش داده‌ها به کمک رابطه ۱-۱۴ می‌باشد.

۴-۲-۴: مطالعه مشخصه‌های I-V دیود شاتکی Cu/p-Si بر پایه سد پتانسیل

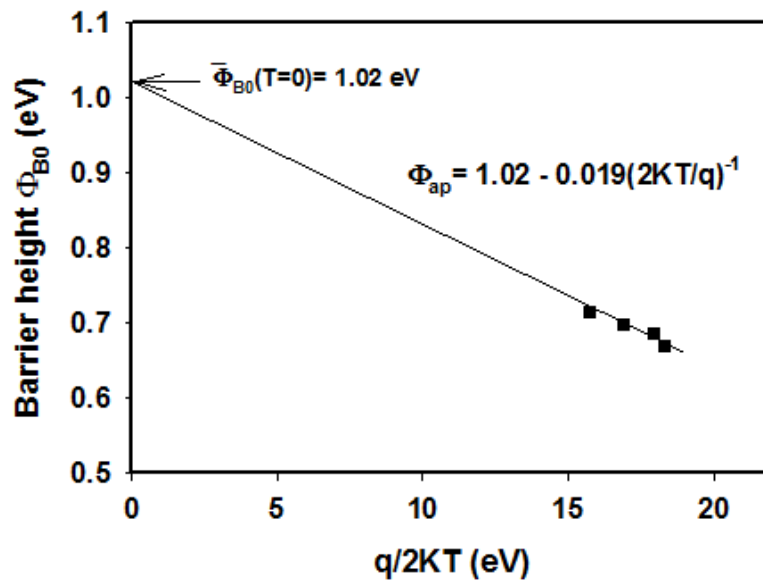
ناهمگن

همان‌گونه که در بخش ۱-۳-۲ گفته شد ما در این‌جا به تحلیل مدل افت و خیز پتانسیل برای تفسیر اندازه‌گیری‌های جریان - ولتاژ می‌پردازیم. این مدل مبتنی بر افت و خیز پتانسیل با فرض یک توزیع پیوسته از سدها در فصل مشترک به صورت یک توزیع گوسی با ارتفاع سد میانگین $\overline{\Phi_{B0}}$ و انحراف معیار σ_s توضیح می‌دهیم.

به منظور تجزیه و تحلیل سد ناهمگن مقادیر به دست آمده برای ضریب ایده‌آلی n و ارتفاع سد شاتکی Φ_{B0} در جدول ۴-۱۰ را متناظر با مقادیر ارتفاع سد ظاهری^۱ (Φ_{ap}) و ضریب ایده‌آلی ظاهری^۲ (n_{ap}) سد پتانسیل قرار می‌دهیم. با استفاده از رابطه ۱-۲۶ نمودار Φ_{ap} بر حسب $q/2KT$ ، شکل ۴-۲۱، را می‌توان رسم کرد. رابطه ۲-۲۶ نشان می‌دهد که Φ_{ap} همیشه کوچکتر از مقدار میانگین آن یعنی $\overline{\Phi_{B0}}$ است.

¹ apparent barrier height

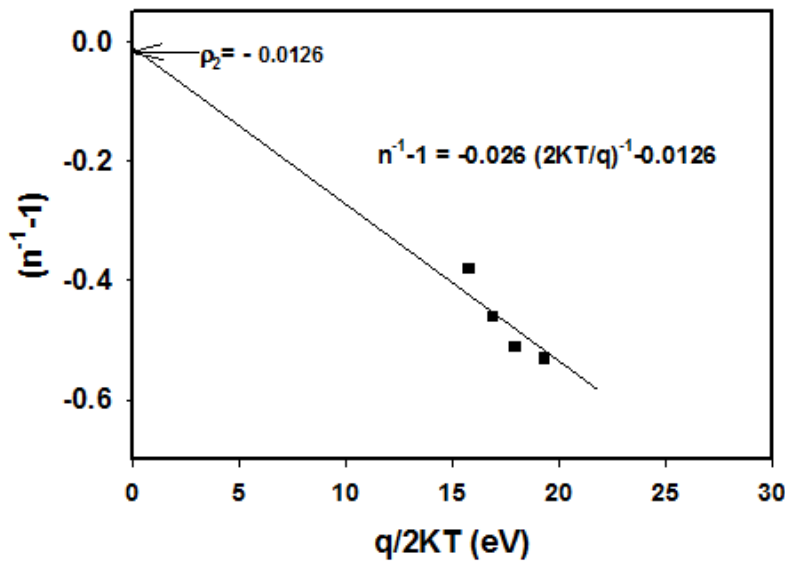
² apparent ideality factor



شکل ۴-۲۱: نمودار ارتفاع سد ظاهری بر حسب $q/2KT$ از دیود شاتکی Cu/p-Si بر اساس در نظر گیری توزیع گوسی برای مقادیر ناهمگون ارتفاع سد. خط ممتد سیاه رنگ حاصل برازش داده‌ها به کمک معادله ۱-۲۶ می‌باشد.

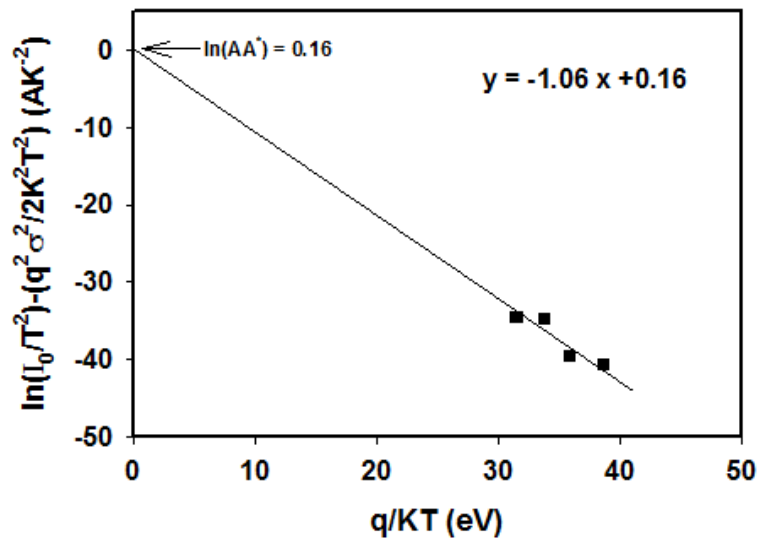
چنانچه که از شکل ۴-۲۱ مشاهده می‌شود نمودار Φ_{ap} بر حسب $q/2KT$ خطی مستقیم است که $\overline{\Phi_{B0}}(T=0) = 1.02 \text{ eV}$ و $\sigma_s = 0.14 \text{ V}$ به ترتیب از عرض از مبدأ و شیب نمودار تعیین می‌شود. در شرایط عملی مقدار انحراف معیار $\sigma_s = 0.14 \text{ V}$ مقدار بزرگی است، که این نشان‌دهنده حضور ناهمگنی سطح مشترک است.

به منظور بررسی وابستگی ولتاژی و دمایی ضریب ایده‌آلی n مطابق با توضیحات بخش ۱-۳-۲ از روابط ۱-۲۷ و ۱-۳۴ استفاده می‌کنیم. نمودار $(n^{-1}-1)$ بر حسب $q/2KT$ در شکل ۴-۲۲ خط مستقیمی است که ضرایب ولتاژ $\rho_2 = -0.012 \text{ V}$ و $\rho_3 = -0.026 \text{ V}$ از عرض از مبدأ و شیب نمودار تعیین می‌شود. همان‌طور که در بخش ۲-۳-۲ گفته شد اگر ρ_2 منفی باشد، ارتفاع سد با افزایش بایاس مستقیم کاهش می‌یابد، که این عکس مفهوم کاهش نیروی تصویری است. مقدار ρ_3 در واقع منفی است بنابراین با افزایش بایاس مستقیم ارتفاع سد افزایش می‌یابد. بعلاوه افزایش ارتفاع سد با افزایش بایاس مستقیم فقط امکان‌پذیر است زیرا کاهش ارتفاع سد میانگین با افزایش بایاس با کاهش مقدار σ_s جبران می‌شود.



شکل ۴-۲۲: تغییرات ضریب ایده آلی بر حسب $q/2KT$ در دیود شاتکی Cu/p-Si مبتنی بر توزیع گاوسی ارتفاع سد. خط ممتد سیاه رنگ حاصل برازش داده‌ها به کمک معادله ۱-۳۴ می‌باشد.

همان‌گونه که در بالا اشاره شد مقدار کوچک انرژی فعالسازی و انحراف مقدار ضریب مؤثر ریچاردسون A^* از مقدار انتظاری ($32 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ برای p-Si) را به ناهمگنی در ارتفاع سد و افت و خیز پتانسیل نسبت دادیم، بنابراین برای بررسی این رفتار غیرعادی از رابطه اصلاح شده ۱-۳۶ کمک می‌گیریم. شیب نمودار شکل ۴-۲۳ با توجه به رابطه ۱-۳۶ متناظر با ارتفاع سد میانگین خواهد بود که برابر $\overline{\Phi_{B0}}(T=0) = 1/06 \text{ eV}$ بدست می‌آید. همچنین با توجه به همین معادله عرض از مبدا نمودار نشانگر بزرگی ضریب مؤثر ریچاردسون است که محاسبات ما برابر با مقدار $\text{Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ ۳۷/۳۳ بدست آمد. این مقدار به مقدار معلوم $32 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ برای p-Si بسیار نزدیک است.

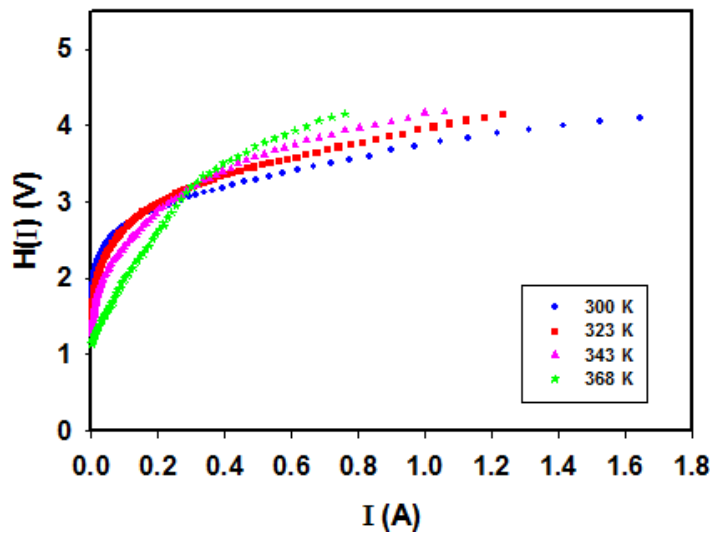


شکل ۴-۲۳: منحنی اصلاح شده ی ریچاردسون برای دیود شاتکی Cu/p-Si بر اساس توزیع گاوسی ارتفاع سد. خط ممتد سیاه رنگ حاصل برازش داده‌ها به کمک معادله (۱-۳۶) می‌باشد.

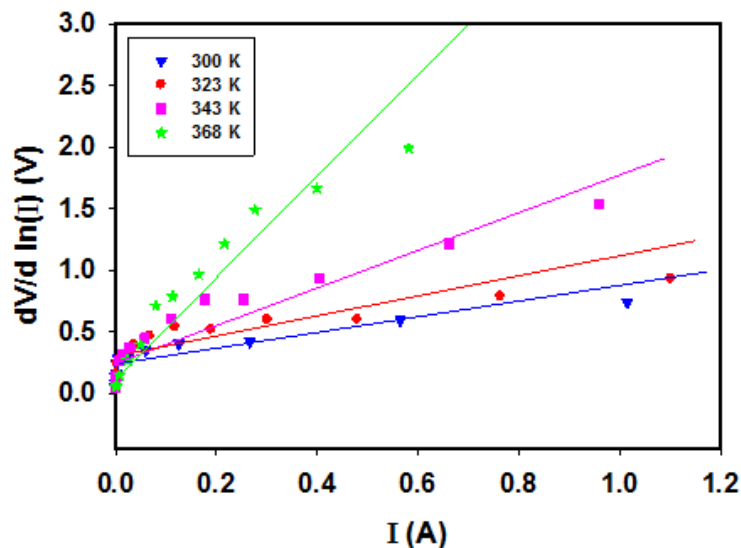
۳-۴-۴: مقاومت متوالی R_s

گفته شد که بر اثر حضور ناحیه خنثای نیمرسانا در حد فاصل بین ناحیه تهی و اتصال اهمی پشتی وجود یک مقاومت متوالی R_s امری اجتناب ناپذیر است که سبب یک افت ولتاژ در شرایط بایاس مستقیم می‌شود.

شکل‌های (۴-۲۴) و (۴-۲۵) با استفاده از روابط (۱-۳۹) و (۱-۴۰) منحنی تغییرات $H(I)$ و $dV/d\ln(I)$ را برحسب تابعی از جریان I در دماهای مختلف برای قطعه دیودی Cu/p-Si نشان می‌دهد. بدیهی است با توجه به روابط بالا شیب این داده‌ها متناظر با مقاومت متوالی R_s در نمونه مورد بررسی به ازای دمای مورد نظر است. نتیجه این محاسبات در جدول ۴-۱۲ و نحوه تغییرات دمایی آنها در شکل ۴-۲۶ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۴: نمودار $H(I)$ بر حسب جریان I در دیود شاتکی Cu/p-Si در دماهای متفاوت



شکل ۴-۲۵: نمودار $dV/d \ln(I)$ بر حسب جریان I در دیود شاتکی Cu/p-Si در دماهای متفاوت. خطوط سیاه رنگ

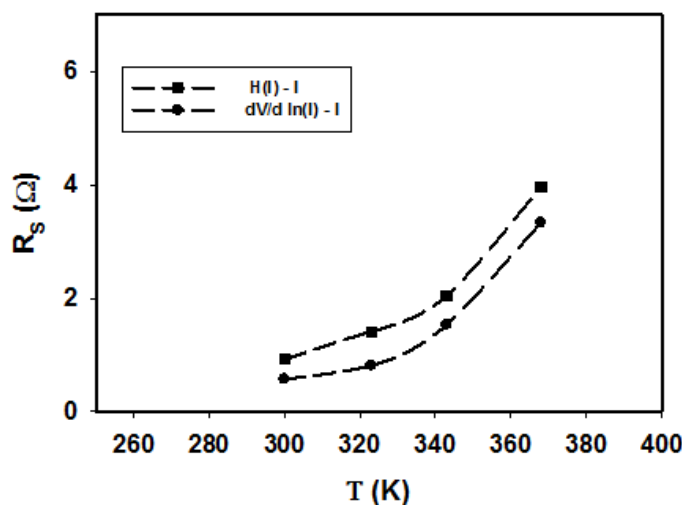
حاصل برازش داده‌ها به کمک معادله ۱-۳۹ می‌باشد.

چنانچه از جدول ۴-۱۲ ملاحظه می‌شود مقادیر ضریب ایده‌آلی n و ارتفاع سد شاتکی Φ_{B0} که از روابط ۱-۳۹ و ۱-۴۰ به دست آمده با مقادیر متناظر در جدول ۴-۱۰ بسیار به یکدیگر نزدیک‌اند، مقادیر مقاومت متوالی حاصل از این دو معادله نیز با یکدیگر سازگارند که می‌تواند حاکی از صحت محاسبات باشد. این نزدیکی مقادیر در مورد مقاومت متوالی در شکل ۴-۲۶ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۲: وابستگی دمایی پارامترهای متفاوت تعیین شده از مشخصه های I-V دیود شاتکی Cu/p-Si با لایه

عایق بومی

T(K)	n (Eq(1-39))	Φ_{B0} (Eq(1-40)) (eV)	R_s (Eq(1-40)) (Ω)	R_s (Eq(1-39)) (Ω)
۳۰۰	۲/۰۹	۰/۶۷۸	۰/۹۲	۰/۵۷
۳۲۳	۱/۸۳	۰/۶۹۱	۱/۴۱	۰/۸۱
۳۴۳	۱/۶۵	۰/۷۰۲	۲/۰۴	۱/۵۳
۳۶۸	۱/۵۹	۰/۷۲۱	۳/۹۶	۳/۳۳



شکل ۴-۲۶: وابستگی دمایی R_s بر حسب تابعی از دمای دیود شاتکی Cu/p-Si با لایه عایق بومی.

نکته جالب توجه آنکه چنانچه مشاهده می‌شود، مقاومت متوالی با افزایش دما روندی افزایشی دارد. این رفتار می‌تواند ناشی از این واقعیت باشد که اگر چه با افزایش دما بارهای به دام افتاده در تله های واقع در سطح مشترک فلز - نیمرسانا انرژی لازم را برای فرار از این ترازها بدست می‌آورند لکن به دلیل تغییرات افزایشی مقاومت در اتصالات اهمی قطعه رفتار غالب به صورت افزایشی مشاهده می‌شود.

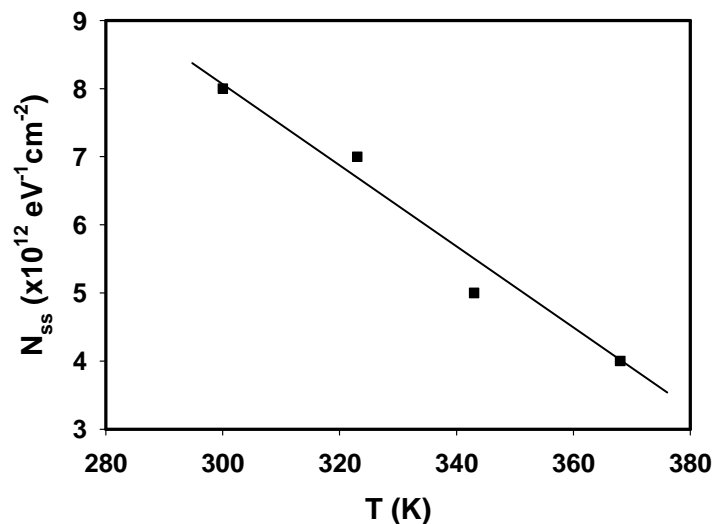
۴-۴-۴: چگالی حالات سطحی

با توجه به مطالب بخش ۱-۵ گفتیم که وجود حالت‌های سطحی (با تراکم N_{ss}) به دلیل حضور

لایه عایق در سطح مشترک فلز و نیمرسانا است. مقدار این تراکم با توجه به رابطه ۱-۴۱ محاسبه می‌شود. نتایج وابسته به مقادیر N_{ss} در هر دما به ازای مقادیر $\delta = 30 \text{ \AA}$ ، $\epsilon_s = 11/8 \epsilon_0$ و $\epsilon_i = 3/8 \epsilon_0$ [۲۳] در جدول ۴-۱۳ ارائه گردیده است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که مقادیر چگالی حالات سطح مشترک از مرتبه $(eV^{-1}cm^{-2})$ 10^{12} بوده و با افزایش دما، کاهش می‌یابد (شکل ۴-۲۷). این تغییرات می‌تواند ناشی از بهبود فصل مشترک فلز - نیمرسانا بر اثر افزایش دمای قطعه باشد.

جدول ۴-۱۳: وابستگی دمایی چگالی حالات سطحی دیود شاتکی Cu/p-Si با لایه عایق بومی

T(K)	$N_{ss}(eV^{-1}cm^{-2})$
۳۰۰	8×10^{12}
۳۲۳	7×10^{12}
۳۴۳	5×10^{12}
۳۶۸	4×10^{12}



شکل ۴-۲۷: تغییرات چگالی حالات سطحی با دما برای دیود شاتکی Cu/p-Si

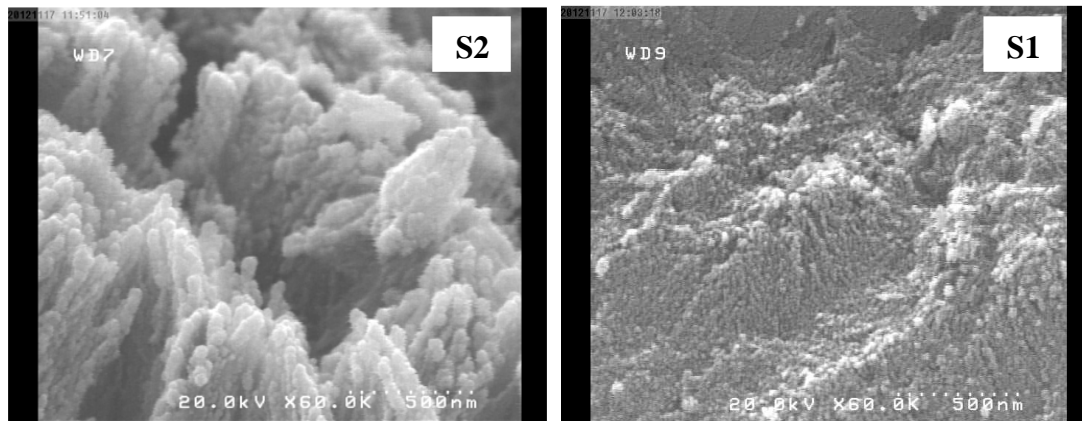
۴-۵: بررسی مشخصه‌یابی الکتریکی سیلیکون متخلخل Al/PS/p-Si

در این بخش به بررسی تأثیر اختلاف در میزان جریان آنودیزاسیون مشخصه‌های جریان - ولتاژ (I-V) و تصاویر FESEM سیلیکون متخلخل با ساختار Al/PS/p-Si/Al که مراحل آزمایشگاهی تهیه این نمونه‌ها در بخش (۳-۴) آورده شده می‌پردازیم.

نمونه‌های S1 و S2 در شرایط یکسان به لحاظ غلظت محلول الکترولیت (HF:C₂H₅OH) با نسبت ترکیبی (۱:۱) و زمان خوردگی ۵ دقیقه لکن تفاوت به لحاظ چگالی جریان آنودیزاسیون (به ترتیب $5 \frac{mA}{cm^2}$ و $20 \frac{mA}{cm^2}$) ساخته شدند.

۴-۵-۱: بررسی تأثیر جریان آنودیزاسیون با استفاده از تصاویر FESEM

شکل ۴-۲۸ تصاویر FESEM مربوط به مقطع عرضی دو نمونه S1 و S2 را پس از عملیات آنودیزاسیون نشان می‌دهد.



ب

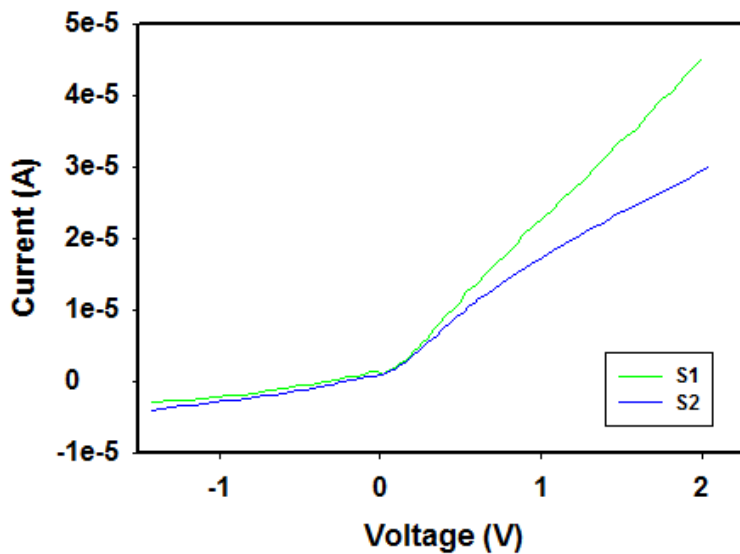
الف

شکل ۴-۲۸: تصاویر FESEM مربوط به مقطع عرضی نمونه‌های: (الف) S1 و (ب) S2

تصاویر به‌خوبی گویای شکل‌گیری خلل و فرج‌هایی بر روی سطح نمونه‌ها هستند. از مقایسه این تصاویر می‌توان دریافت که تخلخل نمونه S2 با افزایش چگالی جریان آنودیزاسیون افزایش می‌یابد.

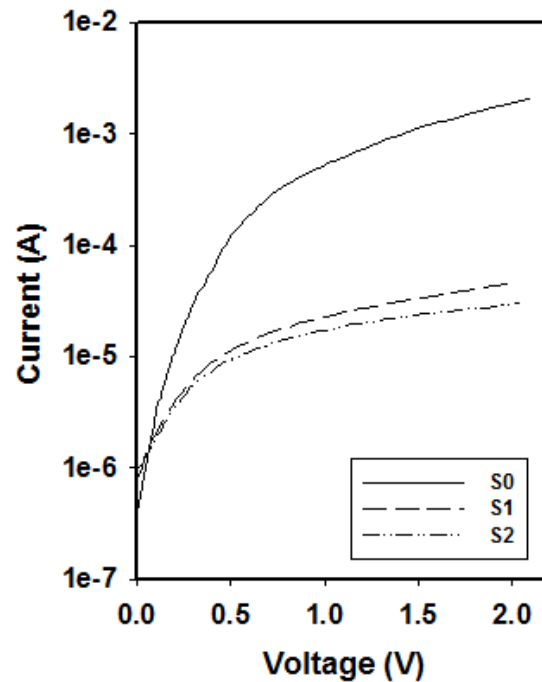
۴-۵-۲: بررسی مشخصه‌یابی I-V نمونه‌ها

در این بخش مشخصه جریان - ولتاژ (I-V) نمونه‌های تهیه شده که در شرایط تاریکی اندازه‌گیری شده است را مورد بررسی قرار دادیم. شکل ۴-۲۹ مشخصه جریان - ولتاژ (I-V) نمونه‌های S1 و S2 را در دمای ۳۰۰ K نشان می‌دهد. چنانچه دیده می‌شود این نمونه‌ها رفتار یکسو شوندگی را از خود نشان می‌دهند.



شکل ۴-۲۹: داده‌های تجربی متناظر با مشخصه I-V ساختار Al/PS/p-Si برای نمونه S1 و S2

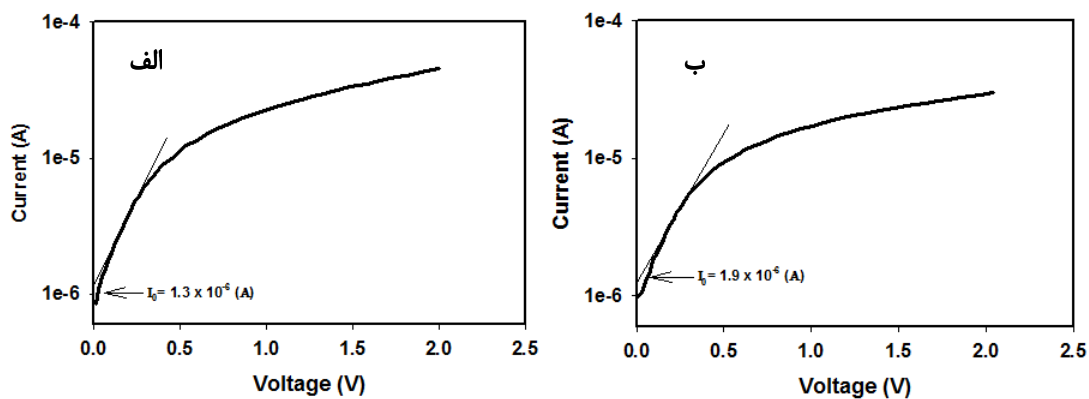
در شکل ۴-۳۰ مشخصه I-V دیود شاتکی Al/p-Si (S0) در دمای ۳۰۰ K و ساختار سیلیکون متخلخل Al/PS/p-Si (S1 و S2) در شرایط تاریکی و دمای ۳۰۰ K به منظور مقایسه نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود مشخصه‌های I-V سیلیکون متخلخل مشابه با دیودهای شاتکی است با این تفاوت که جریان عبوری از نمونه S0 بیشتر از نمونه‌های متخلخل (S1 و S2) است و از طرفی در نمونه‌های متخلخل با افزایش میزان تخلخل میزان جریان عبوری از نمونه با افزایش ولتاژ کاهش می‌یابد. بنابراین به منظور بررسی مشخصه I-V نمونه‌ها می‌توان از نظریه گسیل گرما یونی استفاده کرد [۴۷،۵۷].



شکل ۴-۳۰: مشخصه‌ی I-V دیود شاتکی Al/p-Si (S0) در دمای ۳۰۰ K و ساختار سیلیکون متخلخل

Al/PS/p-Si (S1 و S2) در شرایط تاریکی و دمای ۳۰۰ K

مقدار جریان اشباع معکوس از رابطه ۱-۱۱ محاسبه می‌شود که می‌توان آن را از طریق تعیین عرض از مبدا در ناحیه خطی در نمودار نیم لگاریتمی جریان - ولتاژ به دست آورد. در شکل ۴-۳۱ مقدار جریان اشباع معکوس را برای مشخصه‌ی جریان - ولتاژ نمونه‌های متخلخل در شرایط بایاس مستقیم تعیین کردیم.



شکل ۴-۳۱: مشخصه‌ی جریان - ولتاژ برای (الف) نمونه S1 (ب) نمونه S2 در دمای ۳۰۰ K. موقعیت جریان اشباع

معکوس (I_0) در این نمونه‌ها از طریق برون‌یابی داده‌ها در گستره خطی داده‌ها نشان داده شده است.

مقادیر ضریب ایده‌آلی (n) را می‌توان از رابطه ۱-۱۲ با استفاده از شیب ناحیه خطی نمودار $\ln(I)-V$ محاسبه کرد، همان‌گونه که از جدول ۴-۱۴ مشاهده می‌شود این مقادیر از مقادیر ضریب ایده‌آلی در حالت سطح تخت بزرگتر هستند. این بزرگی در ضریب ایده‌آلی را غالباً به چگالی حالات فصل مشترک و حضور لایه PS در فصل مشترک فلز - نیمرسانا نسبت می‌دهند [۵۷]. چنانچه پیداست مقدار ضریب ایده‌آلی در نمونه S1 نسبت به نمونه S2 کوچکتر است بنابراین با افزایش جریان آنودیزاسیون به سبب افزایش تخلخل در سطح نمونه از حالت ایده‌آل دورتر شده است.

همان‌گونه که در بخش ۱-۳ گفته شد با معلوم شدن مقدار جریان اشباع معکوس (I_0) ارتفاع سد (Φ_{B0}) در شرایط بایاس صفر از رابطه ۱-۱۳ بدست می‌آید. با توجه به جدول ۴-۱۴ پیداست که مقدار ارتفاع سد در نمونه S1 نسبت به نمونه S2 بزرگتر است. بنابراین افزایش جریان آنودیزاسیون سبب کاهش ارتفاع سد شده و از طرفی ارتفاع سد در نمونه S0 نسبت به نمونه‌های متخلخل (S1 و S2) بزرگتر است.

جدول ۴-۱۴: مقادیر بدست آمده از مشخصه I-V در نمونه S0، S1 و S2

نمونه	I_0 (A)	n	Φ_{B0} (eV)
S0	$(1/7 \pm 0.1) \times 10^{-7}$	۳/۷۵	۰/۷۰
S1	$(1/3 \pm 0.1) \times 10^{-6}$	۶/۶۵	۰/۶۴۶
S2	$(1/9 \pm 0.1) \times 10^{-6}$	۹/۱۰	۰/۶۳۰

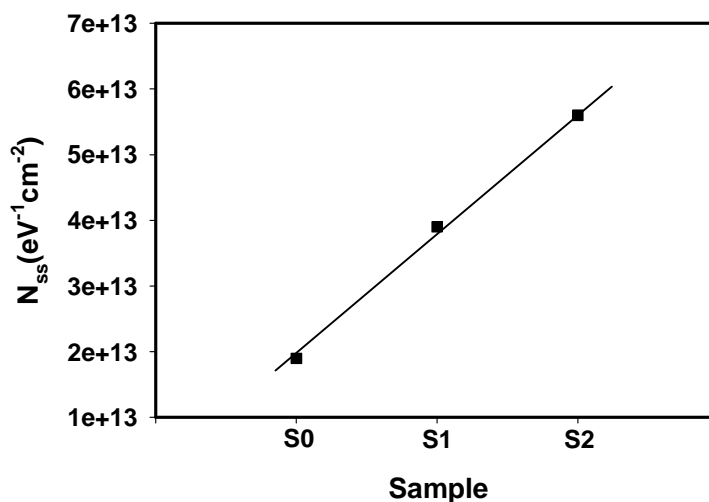
۴-۵-۳: چگالی حالات سطحی

با توجه به مطالب بخش ۱-۵ گفتیم که وجود حالت‌های سطحی (با تراکم N_{ss}) به دلیل حضور لایه عایق (در این مورد لایه PS) در سطح مشترک فلز و نیمرسانا است. مقدار این تراکم با توجه به رابطه ۱-۴۳ محاسبه می‌شود. نتایج وابسته به مقادیر N_{ss} برای هر نمونه به ازای مقادیر $A^0 = 30 \delta$ ، $\epsilon_s = 11/8 \epsilon_0$ و $\epsilon_i = 3/8 \epsilon_0$ [۲۳]. در جدول ۴-۱۵ ارائه گردیده است. نتایج بدست آمده حاکی از آن

است که مقادیر چگالی حالات سطح مشترک از مرتبه $(eV^{-1}cm^{-2})$ 10^{13} بوده و با افزایش میزان جریان آنودیازاسیون، افزایش می‌یابد. این تغییرات می‌تواند ناشی از افزایش خوردگی سطح با افزایش جریان آنودیازاسیون باشد. از مقایسه مقادیر چگالی حالت‌های سطحی بین نمونه S0 و نمونه‌های متخلخل (S1 و S2) مشاهده می‌شود که در نمونه‌های متخلخل به دلیل حضور لایه PS دارای تراکم حالت‌های سطحی N_{ss} بالاتری هستند. این نتایج با توجه به افزایش مساحت فصل مشترک بین فلز (Al) و سیلیکون بر اثر تخلخل نمونه‌ها با نتایج بذرافکن و همکاران سازگار است [۵۸].

جدول ۴-۱۵: مقادیر چگالی حالات سطح مشترک در نمونه S0 و نمونه‌های متخلخل S1 و S2

نمونه	$N_{ss}(eV^{-1}cm^{-2})$
S0	$1/9 \times 10^{13}$
S1	$3/9 \times 10^{13}$
S2	$5/6 \times 10^{13}$



شکل ۴-۳۲: افزایش مقادیر چگالی حالات سطح مشترک در نمونه‌های متخلخل S1 و S2 نسبت به نمونه S0

نتیجه گیری:

در این رساله به منظور مطالعه پیوندگاه فلز - نیمرسانا به بررسی دو نوع اتصال اهمی و شاتکی، با استفاده از ویفر سیلیکون نوع p با آرایش بور (B) با مقاومت ویژه $0.5 \Omega.cm$ و ضخامت $400 \mu m$ به عنوان نیمرسانا و از آلومینیوم (Al) و مس (Cu) به عنوان فلز در تهیه نمونه‌ها استفاده کرده‌ایم.

۱- اتصال اهمی

به منظور دستیابی به یک اتصال اهمی با مقاومت هر چه کوچکتر (با استفاده از فلز آلومینیوم و ویفر سیلیکون) سه کمیت را مورد توجه قرار داده‌ایم: مدت زمان بازپخت، ضخامت لایه آلومینیوم و دمای بازپخت

الف) اثر مدت زمان بازپخت

در بررسی اثر مدت زمان بازپخت نمونه‌هایی با شرایط یکسان به لحاظ ضخامت و دمای بازپخت، لکن تفاوت به لحاظ مدت زمان بازپخت (بدون بازپخت و بازپخت به مدت ۱۵، ۳۰ و ۴۵ دقیقه) تهیه کردیم. مشخصه‌های I-V نمونه‌ها نشانگر کاهش مقاومت ویژه اتصال (ρ_c) با افزایش مدت زمان بازپخت است.

ب) اثر ضخامت لایه آلومینیوم

در بررسی اثر ضخامت لایه آلومینیوم از روش TLM برای تعیین مقدار مقاومت ویژه اتصال استفاده کرده‌ایم. بدین منظور نمونه‌هایی را با شرایط یکسان به لحاظ مدت زمان بازپخت (مدت زمان بهینه تعیین شده) و دمای بازپخت، لکن تفاوت به لحاظ ضخامت لایه آلومینیوم (تبخیر $0.2g$ ، $0.14g$ و $0.06g$) تهیه کرده‌ایم. نتایج حاصل از مشخصه‌های I-V حاکی از کاهش مقاومت ویژه اتصال با افزایش ضخامت لایه آلومینیوم است.

ج) اثر دمای بازپخت

در این مورد نیز با استفاده از روش TLM نمونه‌هایی را با شرایط یکسان به لحاظ مدت زمان بازپخت (مدت زمان بهینه تعیین شده) ضخامت یکسان (ضخامت بهینه)، لکن تفاوت به لحاظ دمای بازپخت (بدون بازپخت و بازپخت در دمای 400°C و 300°C) آماده کرده‌ایم. نتایج نشانگر کاهش مقاومت ویژه اتصال با افزایش دمای بازپخت (تا دمای 400°C) است.

در نهایت از بررسی این سه پارامتر، مدت زمان بازپخت ۴۵ دقیقه و ضخامت نمونه با تبخیر $g/2$ فلز آلومینیوم و دمای بازپخت 400°C به عنوان شرایط بهینه بدست آمد.

۲- اتصال شاتکی

الف) مشخصه‌یابی I-V دیود شاتکی Al/p-Si و Cu/p-Si

به منظور بررسی دیودهای سد شاتکی نمونه‌هایی را با ساختار Al/p-Si/Al و Cu/p-Si/Al که به صورت یک اتصال اهمی (با استفاده از فلز آلومینیوم) با کمترین مقاومت در پشت ویفر Si و یک اتصال شاتکی (با استفاده از فلز آلومینیوم یا مس) روی سطح ویفر Si است تهیه کرده‌ایم و سپس به اندازه‌گیری مشخصه‌های I-V این نمونه‌ها (در حضور لایه عایق) در شرایط بایاس مستقیم در دماهای متفاوت ($300-368\text{ K}$) بر پایه سد همگن پرداختیم. نتایج حاصل از اندازه‌گیری ضریب ایده‌آلی (n) و ارتفاع سد (Φ_{B0}) بر پایه نظریه گسیل گرما یونی نشانگر وابستگی دمایی این پارامترها است به طوری که با افزایش دما ضریب ایده‌آلی کاهش یافته است. از آنجا که برای یک دیود ایده‌آل $n=1$ است اما مقادیر ضریب ایده‌آلی محاسبه شده نمونه ما بزرگتر از یک بدست آمد است. این افزایش می‌تواند ناشی از حضور لایه عایق بومی در فصل مشترک، ناهمگنی‌های ضخامتی در فصل مشترک، مقاومت متوالی و حالات سطحی فصل مشترک باشد.

نتایج ما حاکی از روندی افزایشی برای مقادیر ارتفاع سد با افزایش دما است. لکن این نحوه تغییرات با توجه به سایر روش‌های گزارش شده و ضریب دمایی ارتفاع سد روندی غیر عادی است که

این را به ناهمگنی در ارتفاع سد و فصل مشترک فلز- نیمرسانا نسبت داداند. علاوه بر این، مقدار ثابت مؤثر ریچاردسون بدست آمده با استفاده از این نتایج نیز بسیار کوچکتر از مقدار انتظاری $\text{Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ ۳۲ برای Si نوع p است.

به منظور تجزیه و تحلیل این رفتارهای غیر عادی با استفاده از مدلی مبتنی بر افت و خیز سد پتانسیل از فرضیه ارتفاع سدهای غیر همگن استفاده کرده ایم. این فرضیه را با یک توزیع پیوسته از ارتفاع سدها در فصل مشترک فلز - نیمرسانا به صورت یک توزیع گوسی با ارتفاع سد میانگین $\overline{\Phi_{B0}}$ و انحراف استاندارد σ_s توضیح داده ایم. مقداری که برای ارتفاع سد میانگین $\Phi_{B0}(T=0)$ (هم در دیود شاتکی Al/p-Si و هم Cu/p-Si) بدست آمده است نزدیک به مقدار انرژی گاف نواری Si در صفر کلونین (۱/۱۷eV) با مقدار انحراف معیار 0.14 V می باشد. این محاسبات همچنین حاکی از بزرگی ثابت مؤثر ریچاردسون نزدیک به مقدار انتظاری $\text{Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ ۳۲ آن در Si نوع p می باشد.

ب) مشخصه یابی I-V سیلیکون متخلخل با ساختار Al/PS/p-Si

به منظور بررسی ساختار سیلیکون متخلخل Al/PS/p-Si نمونه هایی را با یک اتصال اهمی (با استفاده از فلز آلومینیوم) با کمترین مقاومت در پشت ویفر Si و یک اتصال شاتکی (با استفاده از فلز آلومینیوم) روی لایه PS که به روش آنودیزاسیون تهیه شده است، آماده کردیم. فرایند متخلخل سازی سطح نمونه ها در شرایط یکسان به لحاظ غلظت محلول الکترولیت ($\text{HF}:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) با نسبت ترکیبی (۱:۱) و زمان خوردگی ۵ دقیقه لکن تفاوت به لحاظ چگالی جریان آنودیزاسیون (به ترتیب $5 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$ و $20 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$) انجام شد. تصاویر FESEM نشانگر افزایش خوردگی سطح و در نتیجه افزایش تخلخل سطح نمونه ها با افزایش جریان آنودیزاسیون است و حاصل این پدیده کاهش میزان جریان عبوری (با افزایش ولتاژ) از نمونه با افزایش تخلخل است.

مقادیر بالای ضریب ایده آلی در این نمونه ها را می توان به چگالی حالات فصل مشترک و حضور لایه PS در فصل مشترک فلز - نیمرسانا نسبت داد. این کمیت با توجه به افزایش تراکم حالت های

سطحی بر اثر تخلخل‌های ایجاد شده در مساحت‌های بزرگتر در محل فصل مشترک امری قابل انتظار می‌باشد.

مراجعة

[۱] اس. ام زی، (۱۹۳۶)، "فیزیک و تکنولوژی قطعات نیمرسانا"، ترجمه غلامحسین سدید عابدی،

چاپ چهارم، مرکز نشر دانشگاه امام رضا (ع)، مشهد،

[2] S. X. Jin, H. P. Wang, M. H. Yuan, H. Z. Song, H. Wang, W. L. Mao, and G. G. Qin, (1993), "Controlling of schottky barrier heights for Au/n-GaAs and Ti/n-GaAs with hydrogen interoduced after metal deposition by bias annealing," *Appl Phys. Lett.* **62**, 2719-2721.

[3] Enoch Mpho Sithole, (2001), MSC(thesis Physics), "Electrical characterization of schottky barrier diodes fabricated on GaAs by electron beam metallisation", University of Pretoria, Pretoria.

[4] V. P. Singh, O. M. Erickson and J. H. Chao, (1995), "Analysis of contact degradation at the CdTe-electrode interface in thin film CdTe-CdS solar cells," *J. Appl. Phys.* **78**, 4538-4542.

[5] O. M. Erickson, J. C. McClure, and V. P. Singh, (1992), Proc. 6 Int. *Photovoltaic Sci. Eng Conf*, **97**.

[6] D. L. Linam, V. P. Singh, J. C. McClure, G. B. Lush, X. Mathew, and P. J. Sebastian, (2001), *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* **70**, 335-344.

[7] Yanamanagandla, Srikanth, (2008), Master's Theses "SynthesSis and Characterization of Schottky Diodes on n-Type CdTe Nanowires Embedded in Porous Alumina Templates," University of Kentucky.

[8] www.ecse.rpi.edu/.../A-MT-Ch17-Metal-Semiconductor-Junction.pdf

[9] S. Ashok, J. M. Borrego, R. J. Gutmann, (1979), "Electrical characteristics of GaAs MIS schottky diodes" *Solid-State Electron.* **22**, 621-631.

[10] S. M. Sze, (1936), "Physics of Semiconductor Devices", Third Edition, 173-175.

[11] Semsettin Altindal, Ilbilge Dokme, M. Mahir Bulbul, Necati Yalcin, Tulay Serin, (2006), "The role of the interface insulator layer and interface states on the current-transport mechanism of Schottky diodes in wide temperature range," *Microelectronic Engineering*, **83** 499-505.

[12] D. E. Yildiz, S. Altindal, and H. Kanbur, (2008), "Gaussian distribution of inhomogeneous barrier height in Al/SiO₂/p-Si Schottky diodes" *J. Appl. Phys.* **103**, 103-109

- [13] H. C. Card, E. H. Rhoderick, (1971), “Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes,” *J. Phys. D*, **4** 1589-1898.
- [14] H. Werner, K. Ploog, and H. J. Queisser, (1986), “Interface-State Measurements at Schottky Contacts: A New Admittance Technique,” *Phys. Rev Lett.* **57**, 1080-1083
- [15] J. Werner, A. F. J. Levi, R. T. Tung, M. Anzlowar, and M. Pinto, (1988), “Origin of the Excess Capacitance at Intimate Schottky Contacts ” *Phys. Rev. Lett.* **60**,53-56.
- [16] See E. H. Rhoderick, and R. H. Williams, “Metal Semiconductor Contacts”, 2nd ed. (Clarendon, Oxford, 1988), p. 113, see also R. F. Broom, H. P. Meier, and W. Walter, (1986), *J. Appl. Phys.* **60**, 1833.
- [17] V. L. Rideout, and C. R. Crowell, (1970), “ Effects of image force and tunneling on current transport in metal- semiconductor (schottky – barrier) contacts,” *Solid-State Electron.* **13**,993-1009.
- [18] See E. H. Rhoderick, and R. H. Williams, “Metal-Semiconductor Contacts”, 2nd ed. (Clarendon, Oxford, 1988), p. 118; see also C. T. Sah, R. N. Noyce, and W. Shockley, (1957), *Proc. IRE* **45**, 1228.
- [19] Jurgen H. Werner, and Herbert H. Guttler, (1991), “Barrier inhomogeneities at Schottky contacts,” *J. Appl. Phys.* **69**,1522-1533.
- [۲۰] آرتور بايزر، (۱۳۸۶)، ” مفاهيم فيزيك جديد“، ترجمه دكتور حسين عشقي، انتشارات دانشگاه شاهرود، شاهرود.
- [21] S. K. Cheung and N. W. Cheung, (1986), “ Extraction of Schottky diode parameters from forward currentvoltage characteristics,” *Appl. Phys. Lett.* **49**, 85-87
- [22] Sadia Muniza Faraz, (2011), MSC(thesis), “Physical simulation, fabrication and characterization of Wide bandgap semiconductor devices”, Department of Physics, Chemistry and Biology, Linkopings universitet, Sweden.
- [23] S. Altindal, H. Kanbur, D. E. Yildiz , M. Parlak, (2007),“ Current conduction mechanism in Al/p-Si Schottky barrier diodes with native insulator layer at low temperatures,” *Applied Surface Science.* **253**, 5056–5061.
- [24] S. Karatas, S. Altindal, M. Cakar, (2005), “Current transport in Zn/p-Si(1 0 0) Schottky barrier diodes at high temperatures,” *Physica B*, **357**, 386-397.
- [25] S. Zhu, C. Detavernier, R. L. VanMeirhaeghe, F. Cardon, G. P. Ru, X. P. Qu, B. Z. Li, (2000), “Electrical characteristics of CoSi₂/n-Si(100) Schottky barrier contacts formed by solid state reaction”, *Solid-State Electron.* **44**, 1807-1818.

- [26] Sheng S. Li, "Semiconductor Physical Electronics," (Springer, 2006), Second Edition, 284-285.
- [27] <http://arr-elec.blogfa.com>
- [28] A. Y. C. Yu, (1970), "Electron tunneling and contact resistance of metal-silicon contact barriers," *Solide-State Electronics*, **13**, 239-247.
- [29] C. Y. Chang, Y. K. Fang, and S. M. Sze, (1971), "specific contact resistance of metal-semiconductor barriers," *Solide-State Electronics*, **14**, 541-550.
- [30] Ilbilge Dokme, Semsettin Altindal, M. Mahir Bulbul, (2006), "The barrier height inhomogeneity in Al/p-Si Schottky barrier diodes with native insulator layer," *Applied Surface Science*, **252**, 7749-7754.
- [31] R. F. Schmitsdorf, T. U. Kampen, W. Monch, (1995), "Correlation Between Barrier Height and Interface Structure of Ag/Si(111) Schottky Contacts," *Surf. Sci.* **324**, 249-256.
- [32] Ilbilge Dokme, (2011), "The analysis of I-V characteristics of Schottky diodes by thermionic emission with a Gaussian distribution of barrier height," *Microelectronics Reliability*. **51**, 360-364.
- [33] S. K. Cheung and N. W. Cheung, (1986), *Appl. Phys. Lett.* **49**, 85-87
- [34] J. H. Werner, (1988), *Appl. Phys. A* **47**, 291-300.
- [35] S. Altindal, S. Karadeniz, N. Tugluoglu, and A. Tataroglu, (2003). "The role of interface states and series resistance on the I-V and C-V characteristics in Al/SnO₂/p-Si Schottky diodes," *Solid-State Electron.* **47**, 1847-1854
- [36] A. A. M. Farag, A. Ashery, E. M. A. Ahmed, M. A. Salem, (2010), "Effect of temperature, illumination and frequency on the electrical characteristics of Cu/p-Si Schottky diode prepared by liquid phase epitaxy," *Journal of Alloys and Compounds*. **495**, 116-120.
- [37] M. Ahmetoglu, K. Erturk, (2008), "Temperature dependence of electrical characteristics of Cu/n-Si Schottky barrier diodes formed by electrodeposition," *Journal of Optoelectronics And Advanced Materials*, **10**, 298-301.
- [38] A. Uhler, (1956), "Electrolytic shaping of germanium and silicon," *The Bell System Technical Journal*. **35**, 333-347.
- [39] D. S. Turner, (1958), "electropolishing silicon in hydrofluoric acid solutions" *J. Electrochem. Soc.* **105(1)**, 402-408.

- [40] R. D. Braun, (1987), "Introduction to instrumental Analysis" McGraw-Hill Companies, New York.
- [41] C. Pickering, M. I. J. Beale, D. J. Pearson, R. Greef, (1984), "Optical-properties of porous silicon films. Thin Solid Films," *J. phys. C* -**17**, 6535-6552.
- [42] N. Sankara Subramaniam, R. Vivek Sabaapathy, R. Siriram, B. Santhi, (2005), International conference of smart materials structures & system, Proceeding of ISSS, Bangalire, India
- [43] L. T. Canham, D. Malvern, (1997), "properties of porous silicon," INSPEC (UK), London.
- [44] Leigh. Canham, (1997), Biomedical applications of porous silicon " in properties of porous silicon" Ed; IEEE Press: London.
- [45] A Halimaoui, (1995), Porous silicon: material processing, properties and applications, in J.C. Vial and J. Derrien (editors), "Porous Silicon Science and Technology", *Springer*
- [46] J. Dian, A. Macek, D. Niznansky ,I. Nemeč, V. Vrkošlav, (2004), " SEM and HRTEM study of porous silicon—relationship between fabrication, morphology and optical properties," *Applied Surface Science* **238**,169–174.
- [47] A. K. Ray, M. F. Mabrook, and A. V.Nabok, and S. Brown, (1998), "Transport mechanisms in porous silicon," *Journal of Applied Physics*, **48(6)**, 3232-3235.
- [48] G. Algun, M. C. Arikan, (1999), "An Investigation of Electrical Properties of Porous silicon," *Tr J. of Physics*, **23** 789-797.
- [49] R. H. Cox, H. Strack, (1967), " ohmic contacts for GaAs devices, " *Solid State Electronics*. **10**, 1213-1218.
- [50] S. S. Coher, (1983), " contac resistance and methods for its determination" *Thin Solid Films*, **104**,361-369.
- [51] H. H. Berger, (1972), " Models for contacts to planar devices, " *Solid State Electronics*, **15**, 145-158.
- [53] <http://materials.science.uoregon.edu/ttsem/SEMbasics.html>
- [52] S. Ozdemir, S. Altindal, (1994), Solar Energ. Mater. *Solar Cell* **32**
- [54] S. Chand, J. Kumar, (1996), *J. Appl. Phys. A* **63**, 171.
- [55] W. M. R. Divigalpitiya, (1989), *Solar Energ. Mater*, **4**, 253.
- [56] Fahrettin Yakuphanoglu, (2007), "Electronic and interface state density properties of Cu/n-Si MIS-type diode " *Physica B*, **394**, 23–26

-
- [57] D. B. Dimitrov, (1995), “ current – voltage characteristics of porous – silicon layers, ” *Physical Review B*, **51(3)**, 1562-1566.
- [58] I. Bazrafkan, R.S. Dariani, (2009), “Electrical behavior of free-standing porous silicon layers ” *Physica B* **404**, 1638–1642

Abstract

Today, the Schottky diodes based on metal–semiconductor (MS) and metal–insulator–semiconductor (MIS) structures have found a wide variety of applications in electronics and optoelectronics devices.

In this experimental study, we have attempted to build three Schottky barrier diodes: Al/p-Si, Cu/p-Si and Al/porous silicon (PS)/p-Si structures. The temperature dependent of the forward bias current-voltage (I-V) characteristic of these samples were measured in the range of 300-368 K. The data were then processed on the base of the thermionic emission theory, quantitatively. Through this analysis we have considered the role of various parameters including: barrier height, ideality factor, series resistance and the interface density of states, while considering the presence of the native oxide layer at the metal-Si interface.

The data analysis in flat interface samples show in order to obtain a reasonable result for the variation of effective parameters like the barrier height and the Richardson coefficient. We need to use the generalized thermionic emission theory considering a finite Gaussian distribution for the barrier height at the interface.

The experimental data in porous samples (with different anodizing current densities) show a reduction in the passing current compared with the non-porous device. The reason for this behavior could be due to bigger (2 to 3 times) ideality factor in these samples compare with the flat one that in turn lead to a higher surface state density as a result at the higher porosity and higher area at the interface.

Keywords: Schottky diode, Thermionic emission, Temperature dependent, I-V characteristic, Porous silicon



Shahrood University of Technology
Faculty of Physics

Master of Science Thesis

An investigation on Metal-Semiconductor Junction

By:

Somayeh Sabzi Sarvestani

Supervisor:

Dr.Hossein Eshghi

Feb2013