

الله أكبر



دانشکده فیزیک

گروه: فیزیک حالت جامد

عنوان پایان نامه ارشد

مطالعه نظری خواص الکتریکی در اتصالات رسانا – نیمرسانا

دانشجو: زهره کردقاسمی

استاد راهنما:

دکتر حسین عشقی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

خرداد ماه ۱۳۹۳

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

که پیوسته جرمه نوش جام تعلیم و تربیت، فضیلت و انسانیت آنها بوده ام و همواره چراغ وجودشان روشنگر راه من در سختی ها و

مشکلات بوده است

به همسر مهربانم

که مسج و ارباب صبرش در تمامی سختی رفیق راهم بود

و به گل زندگیم، کودک دلبندم

که وجودش شادی بخش و معنایش مایه آرامش من است.

شکر و قدردانی

شکرشایان نثار ایزدمنان که توفیق راز فیتق را هم ساخت تا این مرحله از تحصیل را به پایان برسانم. اکنون با احترام فراوان بر خود

و غیفه می دانم از زحمات استاد فرهیخته و ارجمندم جناب آقای دکتر حسین عشقی که همواره از محضر پر فیض ایشان بهره برده ام صمیمانه

شکر نمایم، که به دلیل یاریها و راهنمایی های دلسوزانه و بی چشمداشت ایشان توانستم بر بسیاری از مشکلات فائق آیم و برای ایشان

آرزوی سعادت و سلامت در تمامی مراحل زندگی را دارم.

همچنین از اساتید ارجمند جناب آقای دکتر حسامی پیله رود و جناب آقای دکتر قاضی که زحمت داوروی این پایان نامه را تقبل

نموده اند پاسکوزاری می نمایم.

تعهد نامه

اینجانب زهره کردقاسمی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته فیزیک (حالت جامد) دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مطالعه نظری خواص الکتریکی در اتصالات رسانا - نیمرسانا تحت راهنمایی جناب آقای 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

در این تحقیق نظری به بررسی وابستگی دمایی مشخصه جریان - ولتاژ (I-V) در برخی دیودهای شاتکی شامل اتصالات فلز-نیمرسانا (MS) Au/n-GaN (رشد یافته به دو روش متفاوت) و اتصالات فلز-اکسید-نیمرسانا (MOS) در ساختار Au/SiO₂/n-GaAs، بر مبنای نظریه گسیل گرمایونی و نظریه تعمیم یافته آن پرداخته ایم. در گستره ولتاژهای اعمال شده پایین، تحلیل به کار گرفته شده در خصوص تعیین ارتفاع سد پتانسیل و ضریب ایده آلی مبتنی بر دو رهیافت می باشد: نظریه نخست بر پایه نوار-تخت در محل فصل مشترک با در نظر گیری تفاوت در ارتفاع سد پتانسیل در نقاط مختلف تماس ناشی از تاثیر نیروی بارهای تصویری و نظریه دوم بر پایه توزیع ناهمگون عرضی ارتفاع سد پتانسیل در نقاط مختلف فصل مشترک ناشی از ناهمواری ها سطح و نیز حضور نراستی های بلوری.

در نمونه های مورد بررسی معلوم شد که با افزایش دما ضریب ایده آلی قطعات روندی کاهشی و ارتفاع سد روندی افزایشی دارد. در تحلیل داه ها دریافتیم که در نظریه نخست ضریب دمایی تغییرات ارتفاع سد موثر بخوبی با ضریب دمایی گاف نواری نیمرسانا هماهنگ می باشد، و در نظریه دوم با در نظر گیری توزیع گوسی برای ارتفاع سد های پتانسیل عرضی کمیت انحراف معیار (که نشانگر میزان توزیع یک کمیت نسبت به مقدار میانگین اش است) پارامتر مهمی می باشد. در این بین هماهنگی قابل قبولی بین مقادیر ارتفاع سد موثر در نظریه اول و مقدار ارتفاع سد پتانسیل میانگین (قله توزیع گوسی) در نظریه دوم حاصل شد. علاوه بر این معلوم شد نظریه دوم نه تنها در بردارنده نتایج نظریه مقدماتی است بلکه به خوبی برآورنده بزرگی ضریب موثر ریچاردسون در این پیوندگاه هاست.

کلید واژه: دیود شاتکی، بستگی دمایی مشخصه I-V، نظریه گسیل گرمایونی، مدل ارتفاع سد ناهمگن.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱. کردقاسمی، زهره؛ عشقی، حسین «مطالعه نظری خواص الکتریکی دیود شاتکی Au/n-GaN» بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران به همراه ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، (۱۳۹۲)، دانشگاه صنعتی شیراز، ص ۱۱۷۷ - ۱۱۸۰
۲. کردقاسمی، زهره؛ عشقی، حسین «مطالعه نظری خواص الکتریکی و نقش لایه عایق اکسیدی در دیود MOS با ساختار Au/SiO₂/n-GaAs» سومین کنفرانس رشد بلور ایران، (۱۳۹۳)، دانشگاه سمنان، ص ۳۰۴ - ۳۰۷
۳. کردقاسمی، زهره؛ عشقی، حسین «مطالعه نظری خواص الکتریکی و بررسی ارتفاع سد شاتکی در دیود Au/n-GaN» سومین کنفرانس رشد بلور ایران، (۱۳۹۳)، دانشگاه سمنان، ص ۳۵۵ - ۳۵۸

فهرست مطالب

فصل اول: مبانی نظری اتصالات فلز - نیمرسانا

- ۱-۱: مقدمه..... ۲
- ۲-۱: اتصال فلز - نیمرسانا..... ۳
- ۳-۱: اتصال شاتکی..... ۳
- ۴-۱: اتصال شاتکی ، گسیل گرما یونی..... ۶
- ۴-۱-۱: نظریه گسیل گرما یونی با در نظر گیری ارتفاع سد ثابت (مدل ارتفاع سد در حالت نوار مسطح)..... ۸
- ۴-۱-۲: تعمیم نظریه گسیل گرما یونی با در نظر گیری مدل توزیع ناهمگن (گوسی) ارتفاع سد پتانسیل..... ۱۱
- ۵-۱: اثر پارامتر ایده آلی T_0 ۱۴
- ۶-۱: مقاومت متوالی قطعه R_s ۱۵
- ۷-۱: مشخصه جریان - ولتاژ در شرایط حضور لایه عایق..... ۱۶

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

- ۱-۲: مقدمه..... ۲۰
- ۲-۲: بررسی مشخصه یابی جریان - ولتاژ ($I-V$) در دیود شاتکی $Au/n-GaAs$ ۲۰
- بررسی وابستگی دمایی مشخصه های جریان ولتاژ ($I-V$) قطعه..... ۲۱
- الف: تعیین پارامتر های ضریب ایده آلی و ارتفاع سد بر پایه مدل سد همگن..... ۲۲
- ب: تعیین ارتفاع سد پتانسیل ناهمگن با استفاده از رابطه تعمیم یافته گسیل گرما یونی..... ۲۳
- ۳-۲: بررسی مشخصه یابی جریان - ولتاژ ($I-V$) در دیود شاتکی ماس $Al/SiO_2/p-Si$ و نقش لایه عایق..... ۲۶
- بررسی وابستگی دمایی مشخصه های جریان ولتاژ ($I-V$) قطعه..... ۲۶
- الف: تعیین جریان اشباع معکوس (I_0) و ضریب ایده آلی..... ۲۷
- ب: تعیین ارتفاع سد..... ۲۸
- ج: تعیین ارتفاع سد شاتکی میانگین و بزرگی ضریب ریچاردسون با استفاده از نمودار اصلاح شده ریچاردسون..... ۳۱
- ۴-۲: بررسی مشخصه یابی جریان - ولتاژ ($I-V$) در دیود شاتکی نانو سیم $Au/n-GaN$ ۳۱
- بررسی وابستگی دمایی مشخصه های جریان ولتاژ ($I-V$) قطعه..... ۳۲
- الف: تعیین پارامتر های ضریب ایده آلی و ارتفاع سد بر پایه مدل سد همگن..... ۳۳

- ب: تعیین ارتفاع سد میانگین و بزرگی ضریب ریچاردسون با استفاده از نمودار ریچاردسون..... ۳۵
- ج: تعیین ارتفاع سد پتانسیل ناهمگن با استفاده از رابطه تعمیم یافته گسیل گرما یونی..... ۳۶
- د: تعیین ارتفاع سد شاتکی میانگین و بزرگی ضریب ریچاردسون با استفاده از نمودار اصلاح شده ریچاردسون..... ۳۷

فصل سوم: مشخصه یابی های فیزیکی و نتایج

- ۳-۱: مقدمه..... ۴۰
- ۳-۲: بررسی خواص الکتریکی دیود شاتکی Au/n-GaN ساخته شده به روش تبخیر پرتو الکترونی ۴۰
- بررسی وابستگی دمایی مشخصه های جریان - ولتاژ دیود شاتکی در شرایط بایاس مستقیم..... ۴۱
- الف: تعیین جریان اشباع معکوس (I_0) و ضریب ایده آلی (n)..... ۴۱
- ب: تعیین ارتفاع سد شاتکی..... ۴۳
- ج: تعیین ارتفاع سد شاتکی میانگین و بزرگی ضریب ریچاردسون با استفاده از نمودار ریچاردسون..... ۴۷
- د: ارتفاع سد شاتکی میانگین و بزرگی ضریب ریچاردسون با استفاده از نمودار اصلاح شده ریچاردسون..... ۴۸
- و: اثر پارامتر ایده آلی دما T_0 ۴۹
- ه: تعیین مقاومت متوالی دیود (R_S)..... ۵۰
- نتیجه گیری..... ۵۲
- ۳-۳: بررسی خواص الکتریکی دیود شاتکی ماس Au/SiO₂/n-GaAs..... ۵۳
- بررسی وابستگی دمایی مشخصه های جریان - ولتاژ دیود شاتکی در شرایط بایاس مستقیم..... ۵۴
- الف: تعیین جریان اشباع معکوس (I_0) و ضریب ایده آلی (n)..... ۵۴
- ب: تعیین ارتفاع سد شاتکی..... ۵۶
- ج: تعیین ارتفاع سد شاتکی میانگین و بزرگی ضریب ریچاردسون با استفاده از نمودار ریچاردسون..... ۶۱
- د: ارتفاع سد شاتکی میانگین و بزرگی ضریب ریچاردسون با استفاده از نمودار اصلاح شده ریچاردسون..... ۶۲
- و: اثر پارامتر ایده آلی دما T_0 ۶۳
- ه: تعیین مقاومت متوالی دیود (R_S)..... ۶۳
- نتیجه گیری..... ۶۵
- ۴-۳: بررسی خواص الکتریکی دیود شاتکی Au/n-GaN ساخته شده به روش تبخیر شیمیایی..... ۶۶
- بررسی وابستگی دمایی مشخصه های جریان - ولتاژ دیود شاتکی در شرایط بایاس مستقیم..... ۶۶

- الف: تعیین جریان اشباع معکوس (I_0) و ضریب ایده آل (n)..... ۶۷
- ب: تعیین ارتفاع سد شاتکی..... ۶۹
- ج: تعیین ارتفاع سد شاتکی میانگین و بزرگی ضریب ریچاردسون با استفاده از نمودار ریچاردسون..... ۷۳
- د: ارتفاع سد شاتکی میانگین و بزرگی ضریب ریچاردسون با استفاده از نمودار اصلاح شده ریچاردسون..... ۷۴
- و: اثر پارامتر ایده آلی T_0 ۷۵
- ه: تعیین مقاومت متوالی دیود (R_S)..... ۷۵
- نتیجه گیری..... ۷۷
- مراجع..... ۷۹

فهرست شکل ها

- شکل ۱-۱: الف) نمودار نوار انرژی فلز منزوی و یک نیمرسانای نوع n در شرایط غیر تعادلی. (ب) نمودار نوار انرژی اتصال فلز - نیمرسانا در تعادل گرمایی. (ج) توزیع بار..... ۴
- شکل ۱-۲: نمودار نوار انرژی فلز - نیمرسانای نوع n و نوع p در شرایط مختلف بایاس شدن. الف) تعادل گرمایی. (ب) بایاس مستقیم. (ج) بایاس معکوس..... ۵
- شکل ۱-۳: جریان عبوری با روند گسیل گرما یونی. الف) تعادل گرمایی. (ب) بایاس مستقیم. (ج) بایاس معکوس..... ۷
- شکل ۱-۲: مشخصه نیم لگاریتمی جریان- ولتاژ $Ni/n-GaAs$ دیود در شرایط دمایی مختلف..... ۲۱
- شکل ۲-۲: وابستگی دمایی ضریب ایده آلی و ارتفاع سد شاتکی $Ni/n-GaAs$ ۲۲
- شکل ۲-۳: وابستگی دمایی ارتفاع سد شاتکی موثر بر دیود $Ni/n-GaAs$ ۲۳
- شکل ۲-۴: نمودار تغییرات ضریب ایده آلی بر حسب $q/2kT$ در دیود شاتکی $Ni/n-GaAs$ مبتنی بر توزیع گوسی ارتفاع سد..... ۲۴
- شکل ۲-۵: نمودار تغییرات ارتفاع سد بر حسب $q/2kT$ در دیود شاتکی $Ni/n-GaAs$ مبتنی بر توزیع گوسی ارتفاع سد..... ۲۴
- شکل ۲-۶: نمودار تغییرات nT بر حسب دما مربوط به دیود شاتکی $Ni/n-GaAs$ ۲۵
- شکل ۲-۷: داده های تجربی متناظر با مشخصه نیم لگاریتمی $I-V$ در شرایط بایاس مستقیم و معکوس دیود $Au/SiO_2/p-Si$ در دماهای متفاوت..... ۲۶
- شکل ۲-۸: وابستگی دمایی ضریب ایده آلی در دیود شاتکی ماس $Al/SiO_2/p-Si$ ۲۸
- شکل ۲-۹: نمودار ریچاردسون وابسته به تغییرات $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1/nT$ مربوط به دیود ماس $Al/SiO_2/p-Si$ ۲۹
- شکل ۲-۱۰: وابستگی دمایی ارتفاع سد شاتکی و ارتفاع سد موثر در دیود ماس با ترکیب $Al/SiO_2/p-Si$ ۲۹
- شکل ۲-۱۱: نمودار تغییرات ضریب ایده آلی و ارتفاع سد بر حسب $q/2kT$ در دیود شاتکی $Al/SiO_2/p-Si$ مبتنی بر توزیع گوسی ارتفاع سد..... ۳۰
- شکل ۲-۱۲: نمودار اصلاح شده ریچاردسون مربوط به دیود ماس با ترکیب لایه ای: $Al/SiO_2/p-Si$ ۳۱
- شکل ۲-۱۳: تصویر شماتیکی از دیود شاتکی نانو سیم $Au/n-GaN$ به همراه تصویر $FE-SEM$ مربوط به آن..... ۳۲
- شکل ۲-۱۴: مشخصه نیم لگاریتمی جریان- ولتاژ دیود $Au/n-GaN$ در شرایط دمایی مختلف..... ۳۳

- شکل ۲-۱۵: وابستگی دمایی ضریب ایده آلی و ارتفاع سد شاتکی Au/n-GaN..... ۳۴
- شکل ۲-۱۶: نمودار ریچاردسون وابسته به تغییرات $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1000/T$ مربوط به دیود Au/n-GaN..... ۳۵
- شکل ۲-۱۷: نمودار تغییرات ضریب ایده آلی و ارتفاع سد ظاهری بر حسب $q/2kT$ در دیود شاتکی Au/n-GaN
- مبتنی بر توزیع گوسی ارتفاع سد..... ۳۶
- شکل ۲-۱۸: نمودار اصلاح شده ریچاردسون مربوط به دیود شاتکی Au/n-GaN..... ۳۷
- شکل ۳-۱: داده های تجربی مشخصه I-V در شرایط بایاس مستقیم در دیود Au/n-GaN در دماهای مختلف..... ۴۱
- شکل ۳-۲: مشخصه جریان-ولتاژ دیود سد شاتکی Au/n-GaN در دمای ۱۰۰ K که موقعیت جریان اشباع معکوس (I_0) در این نمونه از طریق برون یابی داده ها در ناحیه خطی داده ها نشان داده شده است..... ۴۲
- شکل ۳-۳: تغییرات دمایی ضریب ایده آلی محاسبه شده برای دیود مورد بررسی..... ۴۳
- شکل ۳-۴: تغییرات دمایی ارتفاع سد شاتکی (ϕ_{b0}) در نمونه مورد بررسی..... ۴۴
- شکل ۳-۵: وابستگی دمایی ارتفاع سد شاتکی موثر بر دیود Au/n-GaN به همراه تغییرات دمایی گاف نواری GaN در گستره دمایی ۱۰۰-۳۵۰ K..... ۴۵
- شکل ۳-۶: تغییرات ضریب ایده آلی بر حسب $q/2kT$ در دیود شاتکی Au/n-GaN مبتنی بر توزیع گوسی ارتفاع سد..... ۴۷
- شکل ۳-۷: تغییرات ارتفاع سد ظاهری بر حسب $q/2kT$ در دیود Au/n-GaN مبتنی بر توزیع گوسی ارتفاع سد..... ۴۷
- شکل ۳-۸: نمودار ریچاردسون وابسته به تغییرات $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1000/T$ مربوط به دیود شاتکی Au/n-GaN..... ۴۸
- شکل ۳-۹: نمودار اصلاح شده ریچاردسون مربوط به دیود شاتکی Au/n-GaN..... ۴۹
- شکل ۳-۱۰: نمودار تغییرات nT بر حسب دما مربوط به دیود شاتکی Au/n-GaN..... ۵۰
- شکل ۳-۱۱: طرح شماتیک لایه های به کار رفته در ساخت دیود MOS مورد بررسی..... ۵۳
- شکل ۳-۱۲: داده های تجربی مشخصه I-V در شرایط بایاس مستقیم در دیود Au/SiO₂/n-GaAs در دماهای مختلف..... ۵۴
- شکل ۳-۱۳: مشخصه جریان-ولتاژ دیود سد شاتکی Au/SiO₂/n-GaAs در دمای ۳۰۰ K که موقعیت جریان اشباع معکوس (I_0) در این نمونه از طریق برون یابی داده ها در ناحیه خطی داده ها نشان داده شده است..... ۵۵
- شکل ۳-۱۴: تغییرات دمایی ضریب ایده آلی محاسبه شده برای دیود مورد بررسی..... ۵۶
- شکل ۳-۱۵: تغییرات دمایی ارتفاع سد شاتکی (ϕ_{b0}) در نمونه مورد بررسی..... ۵۷

- شکل ۳-۱۶: تغییرات $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1/nT$ در دیود سد شاتکی Au/SiO₂/n-GaAs ۵۸
- شکل ۳-۱۷: وابستگی دمایی ارتفاع سد شاتکی موثر در دیود ماس با ترکیب لایه ای Au/SiO₂/n-GaAs به همراه تغییرات دمایی گاف نواری GaAs در گستره ۳۰۰ الی ۴۰۰ K ۵۹
- شکل ۳-۱۸: تغییرات ضریب ایده آلی بر حسب $q/2kT$ در دیود شاتکی Au/SiO₂/n-GaAs مبتنی بر توزیع گوسی ارتفاع سد ۶۰
- ۳-۱۹: تغییرات ارتفاع سد ظاهری بر حسب $q/2kT$ در دیود شاتکی Au/SiO₂/n-GaAs مبتنی بر توزیع گوسی ارتفاع سد ۶۰
- شکل ۳-۲۰: نمودار ریچاردسون وابسته به تغییرات $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1000/T$ مربوط به دیود شاتکی Au/SiO₂/n-GaAs ۶۱
- شکل ۳-۲۱: نمودار اصلاح شده ریچاردسون مربوط به دیود شاتکی Au/SiO₂/n-GaAs که به دلیل گستره محدود دمایی به کار گرفته شده انتظار می رود شیب داده ها در گستره دمایی پایین به صورت خط نقطه چین باشد ۶۲
- شکل ۳-۲۲: نمودار تغییرات nT بر حسب دما مربوط به دیود شاتکی Au/SiO₂/n-GaAs ۶۳
- شکل ۳-۲۳: داده های تجربی مشخصه I-V در شرایط بایاس مستقیم در دیود Au/n-GaN در دماهای مختلف ۶۶
- شکل ۳-۲۴: مشخصه جریان-ولتاژ دیود سد شاتکی Au/n-GaN در دمای ۳۰۰ K که موقعیت جریان اشباع معکوس (I_0) در این نمونه از طریق برون یابی داده ها در ناحیه خطی داده ها نشان داده شده است ۶۷
- شکل ۳-۲۵: تغییرات دمایی ضریب ایده آلی محاسبه شده برای دیود مورد بررسی ۶۸
- شکل ۳-۲۶: تغییرات دمایی ارتفاع سد شاتکی (ϕ_{b0}) در نمونه مورد بررسی ۷۰
- شکل ۳-۲۷: وابستگی دمایی ارتفاع سد شاتکی موثر بر دیود Au/n-GaN به همراه تغییرات دمایی گاف نواری GaN در گستره دمایی ۱۰۰-۳۵۰ K ۷۱
- شکل ۳-۲۸: تغییرات ضریب ایده آلی بر حسب $q/2kT$ در دیود شاتکی Au/n-GaN مبتنی بر توزیع گوسی ارتفاع سد ۷۲
- شکل ۳-۲۹: تغییرات ارتفاع سد بر حسب $q/2kT$ در دیود شاتکی Au/n-GaN مبتنی بر توزیع گوسی ارتفاع سد ۷۲
- شکل ۳-۳۰: نمودار ریچاردسون وابسته به تغییرات $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1000/T$ مربوط به دیود شاتکی Au/n-GaN ۷۳
- شکل ۳-۳۱: نمودار اصلاح شده ریچاردسون مربوط به دیود شاتکی Au/n-GaN ۷۴
- شکل ۳-۳۲: نمودار تغییرات nT بر حسب دما مربوط به دیود شاتکی Au/n-GaN ۷۵

فهرست جدول ها

- جدول ۱-۲: مقادیر ضریب ایده آلی، جریان اشباع معکوس و ارتفاع سد در نمونه مورد بررسی در دماهای مختلف.....۲۷
- جدول ۱-۳: مقادیر ضریب ایده آلی و جریان اشباع معکوس در نمونه مورد بررسی در دماهای مختلف.....۴۳
- جدول ۲-۳: تغییرات دمایی ارتفاع سد شاتکی (Φ_{b0}) و ارتفاع سد موثر (Φ_{bef}).....۴۴
- جدول ۳-۳: مقادیر مقاومت متوالی در دیود مورد بررسی در دماهای مختلف.....۵۰
- جدول ۴-۳: داده های تجربی بدست آمده از مشخصه جریان - ولتاژ در دیود Au/n-GaN گزارش شده توسط لین و همکاران [۳۰].....۵۱
- جدول ۵-۳: مقادیر ضریب ایده آلی و جریان اشباع معکوس در نمونه مورد بررسی در دماهای مختلف.....۵۶
- جدول ۶-۳: تغییرات دمایی ارتفاع سد شاتکی (Φ_{b0}) و ارتفاع سد موثر (Φ_{bef}).....۵۷
- جدول ۷-۳: مقادیر مقاومت متوالی در دیود مورد بررسی در دماهای مختلف.....۶۴
- جدول ۸-۳: داده های تجربی بدست آمده از مشخصه جریان - ولتاژ در دیود Au/SiO₂/n-GaAs گزارش شده توسط آلتونتاس و همکاران [۳۳].....۶۴
- جدول ۹-۳: مقادیر ضریب ایده آلی و جریان اشباع معکوس در نمونه مورد بررسی در دماهای مختلف.....۶۸
- جدول ۱۰-۳: تغییرات دمایی ارتفاع سد شاتکی (Φ_{b0}) و ارتفاع سد موثر (Φ_{bef}).....۶۹
- جدول ۱۱-۳: مقادیر مقاومت متوالی در دیود مورد بررسی در دماهای مختلف.....۷۶
- جدول ۱۲-۳: داده های تجربی بدست آمده از مشخصه جریان - ولتاژ در دیود Au/n-GaN گزارش شده توسط بنامارا و همکاران [۳۶].....۷۶

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 (اتصال شاتکی)، (۲) ترانزیستور اثر میدانی پیوند گاهی (JFET)^۱، (۳) ترانزیستور اثر میدانی فلز - نیمرسانا (MESFET)^۲، (۴) دیود ماس فلز - اکسید - نیمرسانا (MOS)^۳ و (۵) ترانزیستور اثر میدان فلز - اکسید - نیمرسانا (MOSFET)^۴ می باشند. ساده ترین قطعه تک قطبی اتصال فلز - نیمرساناست. این قطعه از نظر الکتریکی مشابه با پیوندگاه پله ای یک طرفه p-n است. وقتی تراکم ناخالصی در یک طرف پیوندگاه پله ای خیلی بیشتر از طرف دیگر باشد به آن پیوند گاه پله ای یک طرفه گفته می شود که پهنای ناحیه تهی در طرف p - خیلی کوچکتر از پهنای در طرف n - است. مع ذلک می توان این قطعه تک قطبی را به صورت قطعه ای با حامل اکثریت مورد استفاده قرار داد [۱].

دیود ماس (MOS) از جمله قطعاتی به شمار می رود که رفتار آن تا حد زیادی به شرایط سطحی لایه ها بستگی دارد. به همین خاطر درک فیزیک این قطعات تا حد زیادی به درک فیزیک سطح آنها وابسته است. دیود ماس به عنوان خازن انبارش در مدارهای یکپارچه نیز مفید می باشد. دیودهای شاتکی نقش بسیار مهمی را در تکنولوژی نیمرساناها دارند و اساس عملکرد بسیاری از دستگاه های الکترونیکی نیمرسانا از جمله دیودهای میکروویو، ترانزیستورهای اثر میدانی (FET)ها^۵، سلول های خورشیدی و آشکارسازهای نوری می باشند [۱].

در این فصل نگاهی خواهیم داشت به چگونگی شکل گیری اتصالات فلز - نیمرسانا (اتصال شاتکی) و مشخصه الکتریکی جریان - ولتاژ مربوط به دیودهای شاتکی و معرفی نظریه گسیل گرما

^۱ Junction Field Effect Transistor (JFET)

^۲ Metal - Semiconductor Field Effect Transistor (MESFET)

^۳ Metal - Oxide - Semiconductor (MOS)

^۴ Metal - Oxide - Semiconductor Field - Effect Transistor (MOSFET)

^۵ Field Effect Transistor

یونی و همچنین تعمیم آن در بدست آوردن پارامترهای گوناگون دخیل در مشخصه الکتریکی این قطعات.

۱-۲: اتصال فلز - نیمرسانا

اولین قطعه اتصال فلز - نیمرسانا با رفتار یکسو کنندگی به صورت اتصال نقطه ای بود، بدین معنی که یک سیم فلزی نوک تیزی با فشار به سطح یک نیمرسانا تماس داده شد. در سال ۱۹۳۸ شاتکی^۱ پیشنهاد کرد که رفتار یکسو کنندگی می تواند از سد پتانسیل (موسوم به سد شاتکی) ناشی از بارهای فضایی پایدار در نیمرسانا نتیجه شود [۱].

۱-۳: اتصال شاتکی

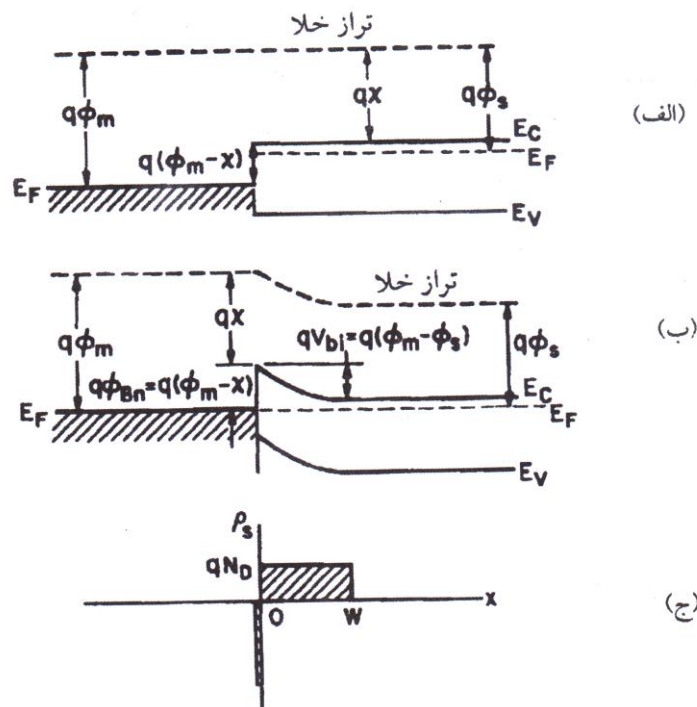
از آنجا که دیوهای p-n نمی توانند خیلی سریع قطع و وصل شوند برای بالا بردن سرعت قطع و وصل از دیوهای شاتکی استفاده می کنند. دیوهای شاتکی از اتصال نیمرسانا و فلز تشکیل می شود و زمان تاخیر این نوع دیوها بسیار کم است. همچنین، در این دیوها به دلیل اعمال ولتاژ کم، انرژی کمتری به صورت گرما هدر رفته، بنابراین آنها گزینه ای کارآمد برای کاربردهای حساس به شمار می آیند [۲، ۳].

اتصال شاتکی به اتصال یک فلز و یک نیمرسانا اشاره دارد که با ایجاد یک سد پتانسیل سبب مانعی در راه شارش حامل ها از درون نیمرسانا به بیرون و بالعکس می شود. وقتی بارهای منفی به نزدیکی سطح فلز میرسند، بارهای مثبت در فلز القا می شوند. این نیروی القایی با میدان الکتریکی اعمال شده همراه گردیده و در نتیجه تابع کار موثر تا حدودی کاهش می یابد [۴]. تابع کار به عنوان تفاوت انرژی بین تراز خلا و تراز فرمی در ماده تعریف می شود و این کمیت با $q\Phi_m$ در فلزات و با $q\Phi_s$ در نیمرسانا تعریف می شود. وقتی $\Phi_s < \Phi_m$ همانگونه که در شکل ۱-۱ الف) نشان داده شده موقعیت تراز فرمی در نیمرسانا بالاتر از تراز فرمی در فلز قرار می گیرد. این تفاوت در تراز فرمی باعث می شود

^۱ Schottky

که الکترونها از تراز بالاتر به تراز پایین تر شارش کنند. این شارش حامل ها تا آنجا ادامه می یابد که ترازهای فرمی در فلز و نیمرسانا در یک تراز قرار گیرند. (شکل ۱-۱ (ب)).

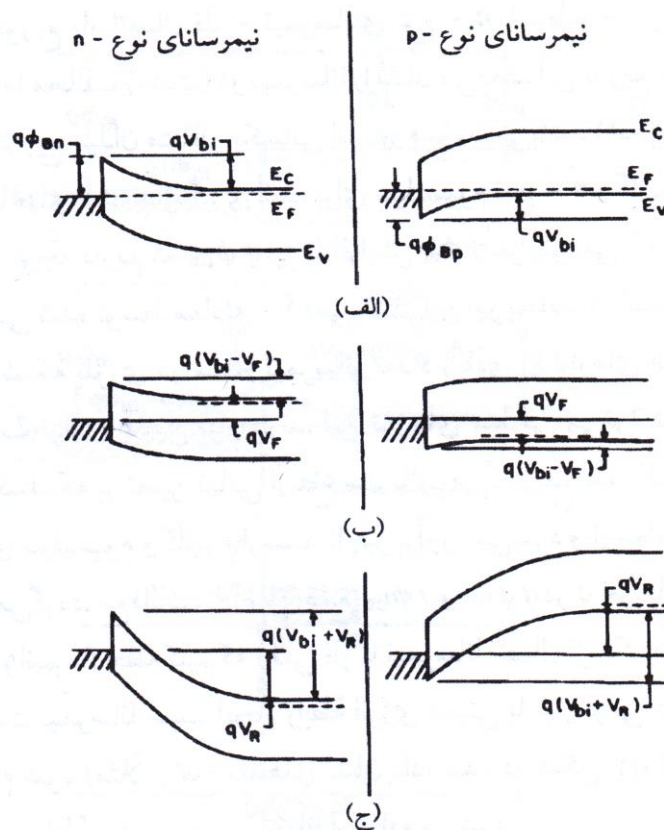
ناحیه تهی با پهنا W نزدیک پیوندگاه عمدتاً در محدوده نیمرسانا شکل می گیرد. بنابراین بر اثر جدایی بارهای فضایی در سمت نیمرسانا و بار خالص منفی انباشته شده روی فلز در این ناحیه یک میدان الکتریکی داخلی به وجود می آید که سبب ایجاد یک اختلاف پتانسیل الکتریکی خواهد شد.



شکل ۱-۱: الف) نمودار نوار انرژی فلز منزوی و یک نیمرسانای نوع n در شرایط غیر تعادلی. ب) نمودار نوار انرژی اتصال فلز - نیمرسانا در تعادل گرمایی. ج) توزیع بار [۱].

در شرایط تعادل گرمایی که ترازهای فرمی با یکدیگر همردیف هستند، سد پتانسیل V_{bi} در محل پیوندگاه شکل می گیرد که از پخش الکترونها بیشتر از نوار رسانش نیمرسانا به فلز جلوگیری می کند. این پتانسیل برابر است با تفاوت توابع کار $\Phi_s - \Phi_m$ و ارتفاع سد پتانسیل نیز برابر است با

$\chi - \Phi_m$ که $q\chi$ الکترونخواهی نیمرسانا است و برابر با اختلاف انرژی لبه نوار رسانش در نیمرسانای نوع n با تراز خلا می باشد. ارتفاع سد پتانسیل از نیمرسانا به فلز می تواند بسته به ولتاژ بایاس مستقیم و (معکوس) کاهش یا افزایش یابد [۴]. شکل ۱-۱ (ج) توزیع بارهای الکتریکی در این اتصال که شکل گیری تراکم بار منفی در فلز و بار فضایی مساوی اما مخالف (مثبت) در نیمرسانا است و همچنین شکل ۲-۱ 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 می دهد [۱].



شکل ۱-۲: نمودار نوار انرژی فلز - نیمرسانای نوع n و نوع p در شرایط مختلف بایاس شدن.

(الف) تعادل گرمایی. (ب) بایاس مستقیم. (ج) بایاس معکوس [۱].

۱-۴: اتصال شاتکی، گسیل گرمایونی (TE)

شارش جریان از اتصالات فلز-نیمرسانا از چهار طریق امکان پذیر است [۵، ۶]:

۱. جریان گسیل گرما یونی از نیمرسانا به فلز و بالعکس از بالای سد پتانسیل که روند غالب برای دیوهای سد شاتکی با نیمرساناهای با آرایش متوسط، در محدوده دمای اتاق است.
۲. جریان تونل زنی از داخل سد پتانسیل که روند غالب برای اتصالات با آرایش بالاست.
۳. جریان بازترکیبی در ناحیه تهی.
۴. جریان بازترکیبی از طریق حالات فصل مشترک.

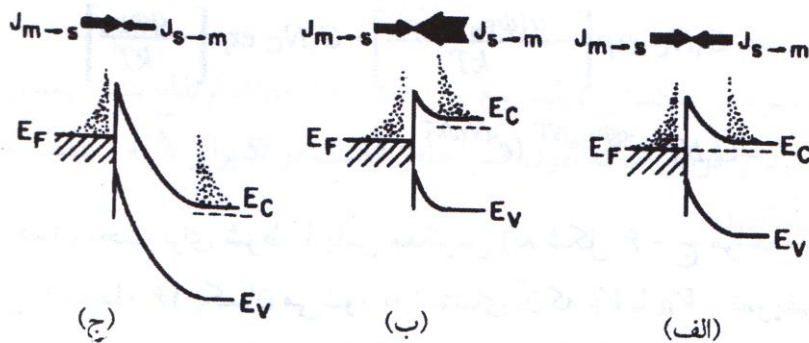
جریانی که از اتصال های فلز-نیمرسانا عبور می کند عمدتاً مربوط به حامل های اکثریت است. از آنجا که دیود های شاتکی با نیمرساناهای به طور متوسط آرایش یافته در دماهای متوسط عمل می کنند، لذا ساز و کار انتقال غالب عبارت از گسیل گرمایونی حامل های اکثریت از نیمرسانا به داخل فلز از بالای سد پتانسیل می باشد [۱].

شکل ۱-۳ روند گسیل گرمایی را تشریح می کند. در شرایط تعادل گرمایی شکل ۱-۳ (الف) چگالی جریان بوسیله دو شار حامل برابر و مخالف در حالت تعادل هستند و در نتیجه جریان خالص صفر خواهد بود. الکترون ها در نیمرسانا مایلند تا به داخل فلز جریان یابند و شار متوازن کننده مخالفی از الکترونها از فلز به داخل نیمرسانا به وجود می آیند. این مولفه های جریان با چگالی الکترونها در مرز متناسب هستند [۱]. در سطح نیمرسانا چگالی الکترون n_s عبارت است از: [۱]

$$n_s = N_D \exp\left[\frac{-qV_{bi}}{kT}\right] = N_D \exp\left[\frac{-q(\phi_{Bn} - V_n)}{kT}\right] = N_C \exp\left[\frac{-q\phi_{Bn}}{kT}\right] \quad (1-1)$$

که در آن N_C چگالی موثر حالت ها در نوار رسانش، N_D چگالی ناخالصی بخشنده، ϕ_{Bn} ارتفاع سد پتانسیل و V_{bi} پتانسیل درونی در محل پیوندگاه می باشد.

^۱ Thermionic Emission



شکل ۳-۱: جریان عبوری با روند گسیل گرما یونی. (الف) تعادل گرمایی. (ب) بایاس مستقیم. (ج) بایاس

معکوس [۱].

در شرایط تعادل گرمایی داریم:

$$|J_{m \rightarrow s}| = |J_{s \rightarrow m}| = C_1 N_C \exp\left[-\frac{q\phi_{Bn}}{kT}\right] \quad (۲-۱)$$

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 می باشد. وقتی بایاس مستقیم V_F به اتصال اعمال می شود، اختلاف پتانسیل الکتروستاتیکی در سد کاهش یافته و چگالی الکترون ها افزایش می یابد:

$$n_s \approx N_D \exp\left[-\frac{q(V_{bi} - V_F)}{kT}\right] = N_C \exp\left[-\frac{q(\phi_{Bn} - V_F)}{kT}\right] \quad (۳-۱)$$

بنابراین جریان $J_{s \rightarrow m}$ که از شار الکترون خارج شده از نیمرسانا نتیجه می شود با همان ضریب تغییر می کند، در حالی که شار الکترونها از فلز به نیمرسانا به همان اندازه باقی می ماند (شکل ۳-۱-ب). علت این امر آن است که ϕ_{Bn} بدون تغییر باقی می ماند. بنابراین جریان خالص تحت بایاس مستقیم عبارتست از:

$$J = J_{s \rightarrow m} - J_{m \rightarrow s} \quad (۴-۱)$$

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

به طوری که ضریب $C_1 N_c$ برابر با $A^* T^2$ است، که در آن A^* ضریب موثر ریچاردسون (بر حسب $\text{Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$) و T دمای مطلق است. مقادیر A^* بستگی به جرم موثر حاملهای آزاد داشته و به عنوان مثال برای GaAs نوع-n و نوع-p به ترتیب برابر $8/16 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ و 74 و برای GaN نوع-n برابر $\text{Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ است [۱].

۱-۴-۱: نظریه گسیل گرما یونی با در نظر گیری ارتفاع سد ثابت (مدل ارتفاع سد در حالت نوار مسطح)^۱

مشخصه جریان - ولتاژ اتصال فلز - نیمرسانا در شرایط وقوع فرایند گسیل گرما یونی در یک دیود شاتکی ایده آل از رابطه زیر به دست می آید [۱]:

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (5-1)$$

که در آن I_0 جریان اشباع معکوس دیود است. با در نظر گرفتن مقاومت متوالی R_s قطعه عبارت فوق از رابطه زیر تبعیت می کند [۲۰]:

$$I = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{bef}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{kT}\right) - 1 \right] \quad (6-1)$$

که در آن ϕ_{bef} ارتفاع سد پتانسیل می باشد، به طوریکه در تئوری گسیل گرما یونی وابستگی ولتاژی ارتفاع سد با وارد کردن ضریب ایده آلی n از رابطه زیر به دست می آید:

$$\phi_{bef} = \phi_{b0} + \left(1 - \frac{1}{n}\right)V \quad (7-1)$$

با قرار دادن رابطه (۷-۱) در رابطه (۶-۱) در شرایط ولتاژ بایاس پایین $\frac{3kT}{q} > V - IR_s$ که در این شرایط می توان از عبارت IR_s صرفنظر کرد خواهیم داشت:

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (8-1)$$

در این حالت پارامتر I_0 از رابطه زیر بدست می آید [۷]:

^۱ Flat - band barrier height

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{b0}}{kT}\right) \quad (9-1)$$

که در آن A مساحت دیود و ϕ_{b0} ارتفاع سد در شرایط بایاس صفر است. مقدار جریان اشباع معکوس را می توان از طریق تعیین عرض از مبدا در ناحیه خطی در نمودار نیم لگاریتمی جریان-ولتاژ بدست آورد. علاوه بر این، ضریب ایده آلی قطعه را نیز می توان به ازای جریان های پایین به کمک همین معادله و بازنویسی آن به صورت:

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d(\ln I)} \right) \quad (10-1)$$

و تعیین شیب نمودار $\ln(I) - V$ بدست آورد. همچنین با مشخص کردن مقدار I_0 استفاده از معادله (۱-۹) می توان ارتفاع سد را به کمک رابطه زیر تعیین کرد [۸، ۹]:

$$\phi_{b0} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{AA^*T^2}{I_0} \right] \quad (11-1)$$

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 (۱-۹) لگاریتم گرفت. در این صورت داریم:

$$\ln \left(\frac{I_0}{T^2} \right) = \ln(AA^*) - \frac{q\phi_{b0}}{kT} \quad (12-1)$$

با استفاده از مقادیر جریان معکوس یک نمونه در دماهای مختلف و با استفاده از معادله (۱-۱۲) و رسم نمودار $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1/T$ (موسوم به نمودار ریچاردسون) می توان ارتفاع سد و بزرگی ضریب ریچاردسون را به ترتیب از شیب و عرض از مبدا نمودار بدست آورد [۱۰].

نکته قابل توجه آنکه تغییرات ارتفاع سد پتانسیل بایستی با روند رو به کاهش گاف نواری نیمرساناها با افزایش دما که از رابطه وارثنی پیروی میکند سازگاری داشته باشد. معادلات (۱-۱۳) و (۱-۱۴) به ترتیب روابط وابسته به تغییرات گاف نواری مربوط به نیمرسانای GaAs و GaN را ارائه می دهد [۱۱، ۱]:

$$E_g(T) = 1.52 - \frac{5.4 \times 10^{-4} T^2}{T + 204} \quad (13-1)$$

$$E_g(T) = 3.427 - \frac{9.39 \times 10^{-4} T^2}{T + 772} \quad (14-1)$$

بدیهی است در موارد مشاهده شده رفتار غیر عادی در تغییرات دمایی این کمیت (ارتفاع سد پتانسیل) در اصل به دلیل ناهمگنی ارتفاع سد ناشی از ناهمگنی ساختاری و مورفولوژی در سطح فلز - نیمرسانا می باشد که موجب می شود ارتفاع سد به طور فضایی غیر یکنواخت و ناهمسان شود. همچنین در عمل به دلیل حضور عواملی همچون لایه عایق ، میدان حاصل از نیروی بار تصویری و بارهای سطحی و میدان عبوری در محل اتصال فلز - نیمرسانا ، سبب انحراف از حالت ایده آل ($n=1$) می شوند.

در دیوهای شاتکی ارتفاع سد در شرایط واقعی می تواند تحت تاثیر نیروی بار تصویری شامل افت و خیزهایی در محل اتصال فلز - نیمرسانا شود. در آن شرایط ارتفاع سد مشاهده شده برای عبور حامل های آزاد از ورای آن به طور میانگین (موثر) از رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۳، ۱۴]:

$$\phi_{bef} = n\phi_{b0} - (n-1) \frac{kT}{q} \ln \frac{N_c}{N_d} \quad (15-1)$$

به طوریکه:

$$N_c = \left[\frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right]^{3/2} \quad (16-1)$$

در این مدل انتظار می رود تغییرات ارتفاع سد موثر ϕ_{bef} بر حسب دما در تقریب اول به صورت خطی تغییر کند:

$$\phi_{bef} = \phi_b(OK) + \alpha T \quad (17-1)$$

که در آن $\phi_b(OK)$ ارتفاع سد در دمای صفر کلوین و α ضریب دمایی ارتفاع سد پتانسیل است که به ترتیب به کمک عرض از مبدا و شیب نمودار قابل محاسبه اند.

۱-۴-۲: تعمیم نظریه گسیل گرما یونی با در نظر گیری مدل توزیع ناهمگن

(گوسی) ارتفاع سد پتانسیل

در دیود های شاتکی مقادیر ضریب ایده آلی بزرگتر از واحد را می توان به موارد زیر مرتبط دانست:

۱. چگالی حالات فصل مشترک در لایه نازک اکسید بین فلز و نیمرسانا [۱۵].
 ۲. جریان تونل زنی در نیمرساناهای با آرایش بالا [۱۵].
 ۳. کاهش نیروی تصویری سد های شاتکی در میدان الکتریکی در محل فصل مشترک [۱۵].
 ۴. جریان های تولیدی / باز ترکیبی در ناحیه تهی [۱۵].
 ۵. افت پتانسیل در لایه عایق سطحی [۱۶].
 ۶. ناهمگنی ارتفاع سد و توزیع خاص چگالی حالات در سطح مشترک فلز - نیمرسانا [۱۶].
- موارد ذکر شده شرایط غیر ایده آل را در اتصالات شاتکی توصیف می کنند. ما در اینجا به بررسی تحلیل مدل افت و خیز های ارتفاع سد پتانسیل در محل فصل مشترک برای تفسیر اندازه گیری های جریان - ولتاژ در اتصالات شاتکی با ناهمگنی فضایی در ارتفاع سد پتانسیل می پردازیم. در واقع به طور نظری مشخصه جریان - ولتاژ بر مبنای نظریه گسیل گرما یونی تعمیم یافته مبتنی بر وجود یک توزیع ارتفاع سد پتانسیل در محل فصل مشترک را مورد تجزیه تحلیل قرار می دهیم که مدلی کامل تر در مقایسه با مدل ارتفاع سد پتانسیل ثابت می باشد. 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 که شامل اطلاعاتی در رابطه با توزیع گوسی سد پتانسیل در محل فصل مشترک، وابستگی دمایی سد های شاتکی و تشریح نمودار ریچاردسون است.

فصل مشترک بین فلز و نیمرسانا در مقیاس اتمی صاف نبوده و این به دلیل افت و خیزهای فضایی در لایه ها به هنگام ساخت می باشد. جدا از ناصافی های فصل مشترک به سبب افت و خیزهای ضخامت، در رفتگی ها و مرز دانه ها در فلز، افت و خیز پتانسیل ممکن است ناشی از کاهش

سد های موثر موضعی ناشی از حضور میدان الکتریکی و نواقص ساختاری نیمرسانا باشد [۱۵].

مدل افت و خیز پتانسیل با فرض یک توزیع پیوسته از ارتفاع سدها در فصل مشترک فلز و نیمرسانا ارائه شده است. همچنین به منظور توجیه رفتار غیر طبیعی بین مقادیر نظری و تجربی ضریب ریچاردسون A^* این توزیع ارتفاع سد را به صورت یک توزیع گوسی با ارتفاع سد میانگین ϕ_{B0} و انحراف معیار σ_0 در نظر می گیریم [۱۵].

چنانچه از مکانیک آماری می دانیم، وقتی یک مجموعه اندازه گیری بر روی کمیت X انجام گیرد که خطاهای تجربی آنها کتره ای باشند، مقادیر بدست آمده غالباً به صورت یک توزیع گوسی خواهد بود. انحراف معیار (σ) اندازه گیری ها محکی از توزیع مقادیر X حول مقدار میانگین X_0 است، و مقدار σ با جذر میانگین مربع انحرافات از X_0 برابر است. اگر N اندازه گیری انجام شود داریم [۱۷]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - X_0)^2} \quad (18-1)$$

تابع گوسی $f(x)$ که منحنی فوق را توصیف می کند عبارت است از :

$$f(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(X - X_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (19-1)$$

که در آن $f(x)$ احتمالی است که در یک اندازه گیری مقدار X به دست می آید [۱۷]. با استفاده از رابطه (۱۹-۱) تابع گوسی برای ارتفاع سد عبارت خواهد بود از [۱۸]:

$$P(\phi_b) = \frac{1}{\sigma_0\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\phi_b - \overline{\phi_{b0}})^2}{2\sigma_0^2}\right] \quad (20-1)$$

از آنجا که جریان کل در دیوذهای شاتکی با در نظر گرفتن مجموعه ای از سد های ناهمگن از رابطه زیر به دست می آید [۱۸]:

$$I(V) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\phi_b, V) P(\phi_b) d\phi_b \quad (21-1)$$

با انجام محاسبات فوق و با در نظر گرفتن توزیعی گوسی برای ارتفاع سد پتانسیل حول سد پتانسیل

میانگین در بایاس صفر $\overline{\phi_{b0}}$ از رابطه زیر پیروی می کند:

$$\phi_{ap} = \overline{\phi_{b0}}(T=0) - \frac{q\sigma_0^2}{2kT} \quad (22-1)$$

که $\overline{\phi_{b0}}$ و σ_0 به ترتیب ارتفاع سد میانگین و انحراف معیار در شرایط تعادل ترمودینامیکی ($V=0$) و ϕ_{ap} ارتفاع سدی است که از رابطه (۱۱-۱) بدست آمده است [۱۵].

رابطه (۲۲-۱) نشان می دهد که ϕ_{ap} همیشه کوچکتر از مقدار میانگین آن یعنی $\overline{\phi_{b0}}$ است. به منظور وابستگی ولتاژی و دمایی ضریب ایده آلی n داریم:

$$n^{-1}(V, T) - 1 = -\frac{\Delta\phi_B(V)}{V} \quad (23-1)$$

$$\Delta\phi_B(V) = \phi_B(V) - \phi_{B0} \quad (24-1)$$

با توجه به رابطه (۲۳-۱) چون $n > 1$ است لازم است که $\Delta\phi_B > 0$ باشد، از این رو ارتفاع سد با افزایش ولتاژ افزایش می یابد. اگر ضریب ایده آلی n با وابستگی ولتاژی ارتفاع سد توصیف شود بنابراین رابطه (۲۲-۱) به این نتیجه سر راست منجر می شود که ارتفاع سد میانگین $\overline{\phi_{b0}}$ و انحراف معیار σ_0 وابستگی ولتاژی دارند. ناهمگنی ارتفاع سد در اتصالات شاتکی همچنین می تواند به دلیل همین وابستگی ارتفاع سد به ولتاژ باشد. با استفاده از رابطه (۲۲-۱) و رابطه زیر

$$\phi_B(V) = \overline{\phi_B}(V) - \frac{q\sigma_s^2(V)}{2kT} \quad (25-1)$$

که در آن $\sigma_s(V)$ نشان دهنده انحراف معیار ارتفاع سد به ازای ولتاژ اعمالی V است. بنابراین تغییرات ϕ_B (رابطه ۲۴-۱) تحت ولتاژ V از رابطه زیر به دست می آید [۱۵]:

$$\Delta\phi_B(V) = \overline{\phi_B}(V) - \phi_{B0} - \frac{q(\sigma_s^2(V) - \sigma_{s0}^2)}{2kT} = \overline{\Delta\phi_B}(V) - \frac{q\Delta\sigma_s^2(V)}{2kT} \quad (26-1)$$

که در آن σ_{s0} نشان دهنده انحراف معیار در ولتاژ صفر می باشد.

سرانجام ضریب ایده آلی با ترکیب روابط (۲۳-۱) و (۲۶-۱) به صورت زیر حاصل می آید:

$$n^{-1}(V, T) - 1 = -\frac{\overline{\Delta\phi_B}(V)}{V} + \frac{q\Delta\sigma_s^2(V)}{2kTV} \quad (27-1)$$

مطابق با روابط (۲۳-۱) و (۲۷-۱) ضریب ایده آلی تنها در صورتی مستقل از بایاس است که ارتفاع سد میانگین $\overline{\phi_B}$ و مربع انحراف معیار σ_s^2 به طور خطی با ولتاژ تغییر کنند. بنابراین:

$$\Delta \overline{\phi_B}(V) = \overline{\phi_B}(V) - \overline{\phi_{B0}} = \rho_2 V \quad (28-1)$$

$$\Delta \sigma_s^2(V) = \sigma_s^2(V) - \sigma_{s0}^2 = \rho_3 V \quad (29-1)$$

بنابراین رابطه (۲۷-۱) به صورت زیر در می آید [۱۵]:

$$\frac{1}{n_{ap}} - 1 = \rho_2 - \frac{q\rho_3}{2kT} \quad (30-1)$$

ضرایب ρ_2 و ρ_3 تعیین کننده 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 می شود. در حقیقت یکی از مشخصات اصلی این مدل این است که ضریب ایده آلی به عنوان نتیجه ای از تغییر شکل ولتاژ در یک فصل مشترک ناهمگن است [۱۵].

با توجه به مطالب فوق با در نظر گرفتن مدل افت و خیز های سد پتانسیل به منظور محاسبه ضریب ریچاردسون و ارتفاع سد میانگین رابطه (۱۲-۱) را با استفاده از رابطه (۲۲-۱) اصلاح می کنیم [۱۸]:

$$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) - \left(\frac{\sigma_0^2 q^2}{2k^2 T^2}\right) = \ln(AA^*) - \frac{q \overline{\phi_{b0}}}{kT} \quad (31-1)$$

۵-۱: اثر پارامتر ایده آلی دما T_0

با توجه به اغلب گزارش محققین ملاحظه شده است که ضریب ایده آلی n به صورت زیر به دما

وابسته است [۱۵، ۲۰، ۲۱].

$$n = n_0 + \frac{T_0}{T} \quad (32-1)$$

یا

$$nT = n_0 T + T_0 \quad (33-1)$$

این رفتار نتیجه وجود ناهمگنی ارتفاع سد در یک اتصال شاتکی است. در دیود ایده آل که $n=1$

است، $T_0=0$ و $n_0=1$ می باشد که نشانگر وجود یک ارتفاع سد همگن است. با توجه به معادله (۳۲-۱) T_0 نشانگر میزان وابستگی n به دما است. بر اساس معادله (۳۲-۱) در صورتیکه T_0 مستقل از دما باشد، نمودار nT بر حسب T یک خط مستقیم به موازات خط $n=1$ خواهد بود ولی اگر T_0 به دما وابسته باشد، نمودار nT بر حسب T خط مستقیمی است که دیگر با خط $n=1$ موازی نمی باشد که این ممکن است به خاطر وجود یک مجموعه میدان های الکتریکی بالا در لبه دیود باشد [۲۰]. به منظور تعیین مقدار T_0 و n_0 می توان از رسم نمودار nT بر حسب T استفاده کرد.

۱-۶: مقاومت متوالی قطعه R_s

با توجه به حضور ناحیه خنثای نیمرسانا، ناحیه تهی و اتصالات اهمی پایانه های خروجی وجود یک مقاومت متوالی R_s در قطعه امری اجتناب ناپذیر است که سبب بروز افت ولتاژ در شرایط بایاس مستقیم می شود. در ولتاژهای بالا مشخصه های جریان - ولتاژ دیود به سبب وجود لایه عایق در فصل مشترک و اثر مقاومت متوالی دارای انحرافی از حالت خطی می گردد. روش های متفاوتی برای بدست آوردن مقاومت متوالی R_s پیشنهاد شده است، که در اینجا به بررسی روش چانگ می پردازیم [۱۹]:

به علت وجود مقاومت متوالی لازم است افت ولتاژی وابسته بدان (IR_s) را در رابطه (۱-۵) در نظر گرفت، به طوری که ولتاژ موثر V_D بایستی بجای V که با هم به صورت $V_D = V - IR_s$ در ارتباطند جایگزین نمود. بنابراین:

$$I = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{B0}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (۳۴-۱)$$

در شرایط $V_D \geq \frac{3kT}{q}$ می توان از ۱ در جمله $\left[\exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right]$ صرف نظر کرد. با لگاریتم گرفتن از دو طرف رابطه (۳۴-۱) ولتاژ V برابر خواهد شد با:

$$V = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^* T^2}\right) + n\phi_{B0} + IR_s \quad (۳۵-۱)$$

و از آنجا داریم:

$$\frac{dV}{d \ln(I)} = IR_s + \frac{nkT}{q} \quad (36-1)$$

بر اساس رابطه (36-1) و با رسم نمودار $dV/d \ln(I)$ بر حسب I با انجام قدری عملیات ریاضی می توان از روی شیب این نمودار مقاومت متوالی قطعه را بدست آورد. همچنین به منظور ارزیابی مقاومت متوالی و ارتفاع سد با توجه به رابطه (35-1) داریم:

$$H(I) = V - \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = n\phi_{B0} + IR_s \quad (37-1)$$

با توجه به رابطه (37-1) و رسم نمودار $H(I)$ بر حسب I نیز می توان از روی شیب نمودار مقاومت متوالی قطعه را تعیین کرد.

۷-۱: مشخصه جریان - ولتاژ در شرایط حضور لایه عایق

در دیود های MOS با در نظر گرفتن لایه عایق در فصل مشترک فلز- نیمرسانا این احتمال وجود دارد که عبارت جریان اشباع معکوس (I_0) مشتمل بر ضریب ایده آلی n و نیز ضخامت لایه عایق باشد. بنابراین رابطه جریان اشباع معکوس را می توان به صورت زیر نوشت [۱۲]:

$$I_0 = AA^*T^2 \exp(-a\chi^{1/2}\delta) \exp\left(\frac{-q\phi_{bef}}{nkT}\right) \quad (38-1)$$

که در آن ϕ_{bef} ارتفاع سد موثر، δ ضخامت لایه عایق در محل فصل مشترک و عبارت $-a\chi^{1/2}\delta$ به عنوان ضریب انتقال تونلی است که در آن χ پهنای متوسط سد تونلی و $a = \left(\frac{4\pi}{h}\right)(2m_h^*)^{1/2}$ مقدار ثابتی است که وابسته به جرم موثر تونل زنی حامل ها می باشد. با قدری عملیات ریاضی رابطه (۱-۳۸) را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) = \frac{-q\phi_{bef}}{nkT} - a\chi^{1/2}\delta + \ln(AA^*) \quad (39-1)$$

با توجه به معادله اخیر و با استفاده از نمودار $\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right)$ بر حسب $1/nT$ که خطی مستقیم است بزرگی

عرض از مبدا آن برابر $-a\chi^{1/2}\delta + \ln(AA^*)$ خواهد بود و بدین ترتیب مقدار ضریب تونل زنی $(a\chi^{1/2}\delta)$ قابل محاسبه می باشد.

با معلوم شدن ضریب تونل زنی می توان ارتفاع سد موثر وابسته به هر دما را با توجه به معادله (۱-۳۸) به صورت:

$$\phi_{bef}(I-V) = \frac{nkT}{q} \left[\ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) - a\chi^{1/2}\delta \right] \quad (۴۰-۱)$$

بدست آورد. از رسم نمودار ارتفاع سد موثر ϕ_{bef} بر حسب دما ملاحظه می شود که ارتفاع سد موثر تقریباً به طور خطی با دما تغییر می کند:

$$\phi_{bef} = \phi_b(0K) + \alpha T \quad (۴۱-۱)$$

که در آن $\phi_b(0K)$ ارتفاع سد در دمای صفر کلوین و α ضریب دمایی ارتفاع سد پتانسیل است که به ترتیب به کمک عرض از مبدا و شیب نمودار قابل محاسبه اند.

فصل دوم

مروری بر مقالات وابسته به اتصالات فلز- نیم رسانا

۲-۱: مقدمه

با قدم گذاشتن به عصر دیجیتال و الکترونیک، نیمرساناها نقش تاریخی ایفا کرده اند. گالیوم نیتريد GaN و گالیوم آرسنید GaAs از جمله نیمرساناهایی هستند که بخصوص در دهه گذشته مورد علاقه بسیاری برای مطالعه بوده اند و کاربردهای زیادی از آنها مورد بررسی قرار گرفته اند. از جمله خصوصیات نیمرسانای گالیوم نیتريد (GaN) که سبب کاربرد وسیع آن از نظر تجاری شده است می توان به مواردی همچون: گاف نواری مستقیم و پهن آن ($3/2 \text{ eV}$)، میدان شکست بالا، سرعت اشباع بالای الکترونی در آن و... اشاره کرد [۲۲]. از جمله کاربردهای GaN و ترکیبات وابسته به آن عبارتند از: قطعات اپتیکی طول موج کوتاه نظیر دیودهای نور گسیل (LED) و دیودهای لیزری (LD)، ترانزیستورهای اثر میدانی (MOSFET) ترانزیستور تحرک الکترونی بالا (HEMT) [۲۳].

نیمرسانا در ساده ترین شکل خود در یک دیود قابل به کارگیری با قابلیت یکسوکنندگی است. در سال های اخیر، تعداد زیادی از گزارشات روی مطالعات تجربی پارامترهای مشخصه یابی، از قبیل ارتفاع سد و ضریب ایده آلی در دیودهای شاتکی فلز - نیمرسانا (MS) یا فلز - عایق - نیمرسانا (MIS) منتشر شده اند [۲۴، ۲۵]. در این فصل به اختصار به مرور برخی تحقیقات انجام شده در دیودهای شاتکی و اندازه گیری مشخصه جریان - ولتاژ و تحلیل پارامترهای گوناگون وابسته خواهیم پرداخت.

۲-۲: بررسی مشخصه یابی جریان - ولتاژ (I-V) در دیود شاتکی Ni/n-GaAs

در این بخش مروری بر تحقیقات انجام شده بر روی دیود شاتکی Ni/n-GaAs که توسط دورموس و همکاران [۲۰] ارائه گردیده است می پردازیم. آنها برای ساخت این نمونه از ویفر GaAs با راستای

^۱Light Emitting Diode (LED)

^۱Laser Diode (LD)

^۲High Electron Mobility Transistor (HEMT)

^۴Metal - Semiconductor (MS)

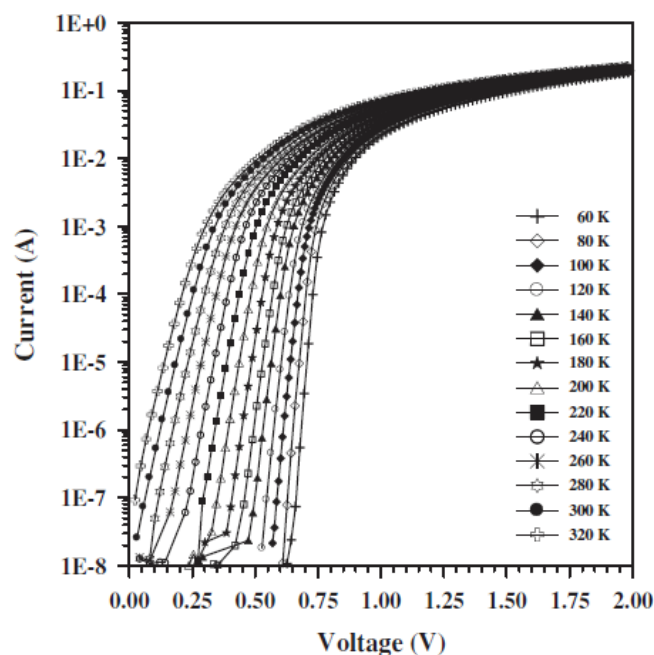
^۵Metal - Insulator - Semiconductor (MIS)

(۱۰۰) و با تراکم چگالی حاملها به مقدار $10^{16} \times 1/46$ cm⁻³ استفاده و به منظور اتصال فلزی در دیود مزبور از فلز Ni به شکل نقطه ای با قطر ۱/۵ mm با روش اسپاترینگ استفاده کردند.

بررسی وابستگی دمایی مشخصه های جریان - ولتاژ (I-V) قطعه

دیود Ni/n-GaAs در شرایط دمایی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. مشخصه نیم لگاریتمی I-V

این نمونه در گستره دمایی ۶۰ تا ۳۲۰ K در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.

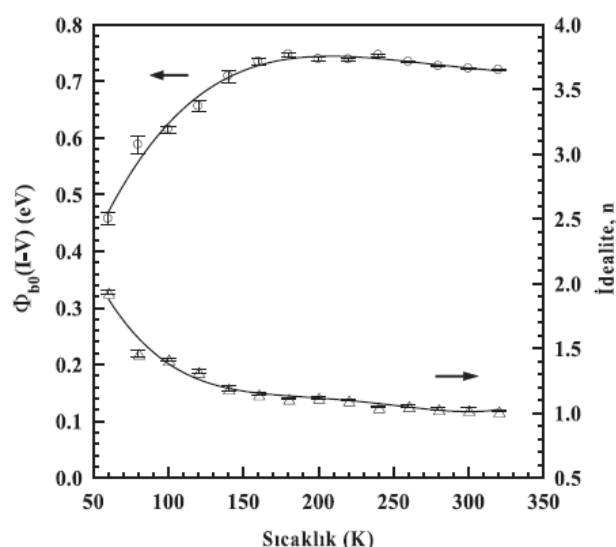


شکل ۱-۲: مشخصه نیم لگاریتمی جریان-ولتاژ Ni/n-GaAs دیود در شرایط دمایی مختلف [۲۰].

همانطور که ملاحظه می شود در نواحی جریان های پایین که اثرات مقاومت متوالی ناچیز است، نمودار نیمه لگاریتمی جریان - ولتاژ به صورت خطی است و با افزایش ولتاژ به دلیل اثر مقاومت متوالی این نمودار از حالت خطی خارج می شود. با تحلیل این داده ها آنها توانستند پارامتر های مهم مربوط به این دیود از جمله ضریب ایده آلی، ارتفاع سد شاتکی، مقاومت متوالی و... را بدست آورند که در ادامه بدان پرداخته ایم..

الف: تعیین پارامترهای ضریب ایده آلی و ارتفاع سد

این گروه مقادیر ضریب ایده آلی و ارتفاع سد شاتکی مربوط به هر دماریا با استفاده از روابط (۱-۱۰) و (۱-۱۱) مربوط به گسیل گرما یونی محاسبه نمودند. همانطور که در شکل ۲-۲ دیده می شود ضریب ایده آلی با افزایش دما رو به کاهش گذارده، لکن ارتفاع سد در گستره دمایی ۶۰ K تا ۱۸۰ K افزایش و در دماهای بالاتر رو به کاهش گذارده است.



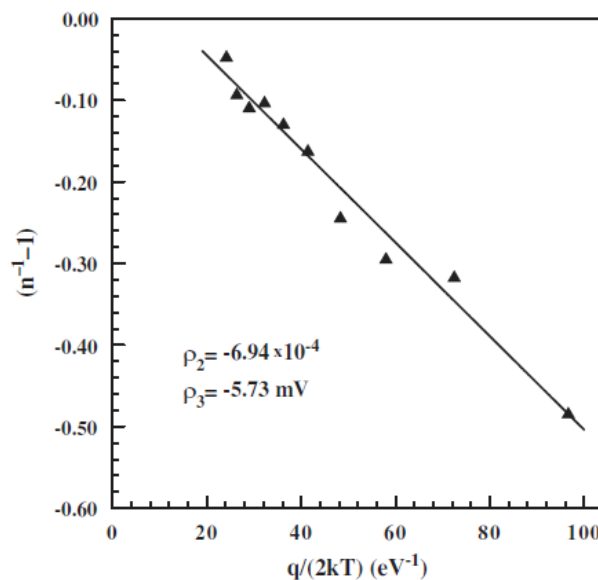
شکل ۲-۲: وابستگی دمایی ضریب ایده آلی و ارتفاع سد شاتکی Ni/n-GaAs [۲۰].

با توجه به روند رو به کاهش گاف نواری GaAs با افزایش دما این تغییرات افزایشی سد پتانسیل امری غیر عادی به نظر می رسد. زیرا همانطور که می دانیم طبق رابطه وارثنی (۱-۱۳) با افزایش دما انرژی گاف نواری کاهش می یابد. این گروه، این رفتار را به ناهمگنی ارتفاع سد ناشی از ناهمگنی ساختاری و مورفولوژی در سطح فلز - نیمرسانا نسبت دادند که موجب می شود ارتفاع سد به طور فضایی غیر یکنواخت و ناهمسان شود. به همین دلیل برای مقادیر مختلف ارتفاع سد یک توزیع گوسی در نظر گرفتند که در ادامه به آن می پردازیم.

ب: تعیین ارتفاع سد پتانسیل ناهمگن با استفاده از رابطه تعمیم یافته گسیل

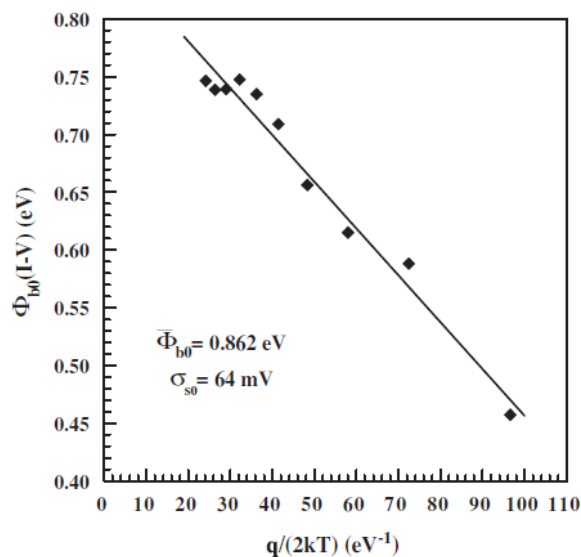
گرمایونی

این گروه تحقیقاتی رفتار غیر عادی مربوط به افزایش ارتفاع سد با افزایش دما را با استفاده از مدل افت و خیز پتانسیل با فرض یک توزیع گوسی با یک ارتفاع سد میانگین ϕ_{b0}^- و انحراف استاندارد σ_0 توضیح داده اند. بدین منظور آنها با استفاده از روابط (۱-۲۲) و (۱-۳۰) نمودار $n^{-1}-1$ بر حسب $q/2kT$ و همچنین نمودار ارتفاع سد بر حسب $q/2kT$ مطابق شکل ۲-۳ و ۲-۴ رسم کرده و از آنجا ضرایب ولتاژی ρ_2 و ρ_3 به ترتیب برابر 6.94×10^{-4} و 5.73 mV و همچنین انحراف استاندارد و ارتفاع سد میانگین به ترتیب 64 mV و 0.1862 eV به دست آورده اند. از آنجایی که مقدار انحراف استاندارد σ_0 در واقع محکی از ناهمگنی ارتفاع سد را نشان می دهد، مقدار σ_0 بدست آمده در اینجا در مقایسه با ارتفاع سد میانگین محاسبه شده نشان از کیفیت خوب سطح و کم افت و خیز بودن آن در دیود مورد مطالعه دارد.



شکل ۲-۳: نمودار تغییرات ضریب ایده آلی بر حسب $q/2kT$ در دیود شاتکی Ni/n-GaAs مبتنی بر توزیع گوسی

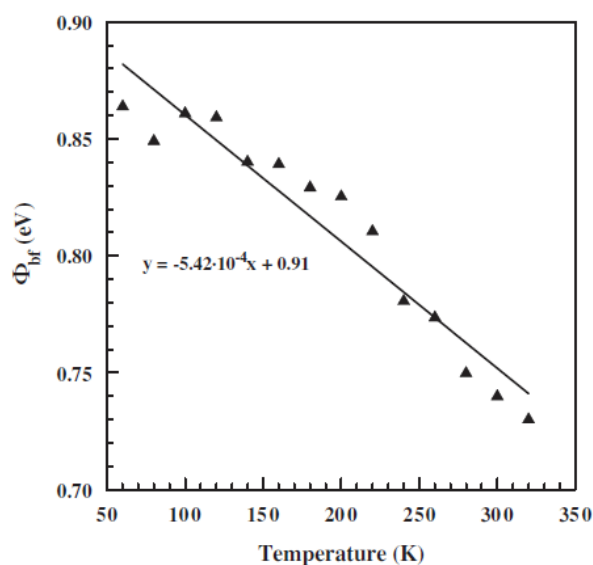
ارتفاع سد [۲۰]



شکل ۲-۴: نمودار تغییرات ارتفاع سد بر حسب $q/2kT$ در دیود شاتکی Ni/n-GaAs مبتنی بر توزیع گوسی ارتفاع

سد [۲۰].

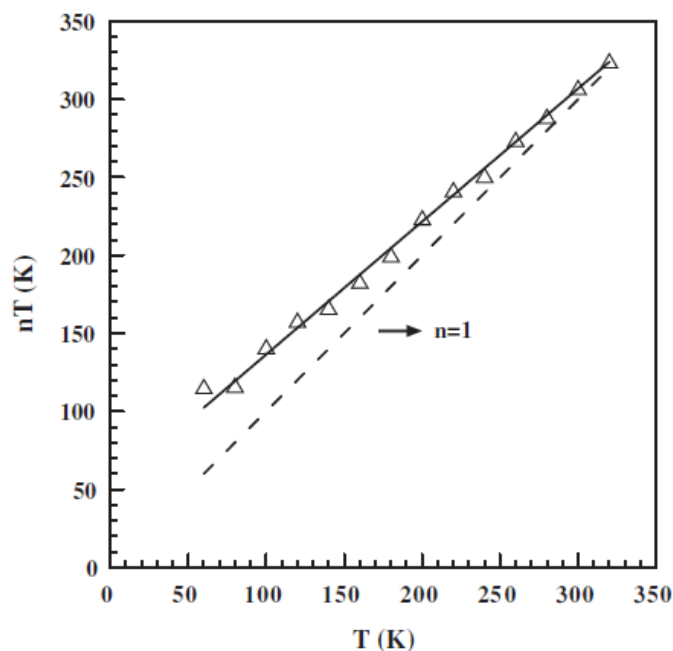
همچنین آنها با استفاده از نظریه گسیل گرمایونی بر اساس ارتفاع سد نوار مسطح طبق روابط (۱-۱۵) و (۱-۱۷) به محاسبه ارتفاع سد پرداختند. در این مدل ارتفاع سد در دیود شاتکی به میدان الکتریکی عبوری در محل اتصال فلز - نیمرسانا بستگی دارد. این ارتفاع سد با استفاده از رابطه (۱-۱۵) که موسوم به ارتفاع سد موثر می باشد در شکل ۲-۵ نشان داده شده است محاسبه شد.



شکل ۲-۵: وابستگی دمایی ارتفاع سد شاتکی موثر در دیود Ni/n-GaAs [۲۰].

با استفاده از این نمودار $\phi_b(0K)$ ارتفاع سد در دمای صفر کلویین $91eV$ و α ضریب دمایی ارتفاع سد پتانسیل $5/24 \times 10^{-4} eV/K$ محاسبه شدند. این کمیتها به ترتیب به کمک عرض از مبدا و شیب نمودار بدست آمده اند. چنانچه انتظار می رود روند تغییرات سد پتانسیل بدست آمده دارای شیب منفی بوده که با روند تغییرات گاف نواری GaAs مورد بررسی هماهنگی بسیار نزدیکی دارد [۲۶ ، ۲۷]. بنابراین تغییرات ارتفاع سد موثر نسبت به دما کاملا به وابستگی دمایی گاف نواری به دما بستگی دارد.

آنها همچنین رابطه ضریب ایده آلی بر حسب دما را بررسی کردند و با استفاده از رابطه (۱-۳۳) به این نتیجه رسیدند که می توان نمودار nT بر حسب T (شکل ۲-۶) را رسم کرد و از آنجا با اندازه گیری پارامترهای T_0 و n_0 می توان به میزان حضور میدان های الکتریکی لبه دیود ها و همچنین میزان ناهمگنی سطحی پی برد. با توجه به رابطه (۱-۳۳) مقادیر n_0 و T_0 را به ترتیب از شیب و عرض از مبدا این نمودار قابل محاسبه است. مقادیر به دست آمده به ترتیب عبارتند از: 0.85 و $51/23 K$. آنها موازی نبودن خط برازش شده بر داده ها با خط $n=1$ را به دلیل امکان وجود یک مجموعه میدان های الکتریکی بالا در لبه دیود ها ذکر کرده اند.



شکل ۲-۶: نمودار تغییرات nT بر حسب دما مربوط به دیود شاتکی Ni/n-GaAs [۲۰].

۳-۲: بررسی مشخصه یابی جریان - ولتاژ (I-V) در دیود شاتکی ماس

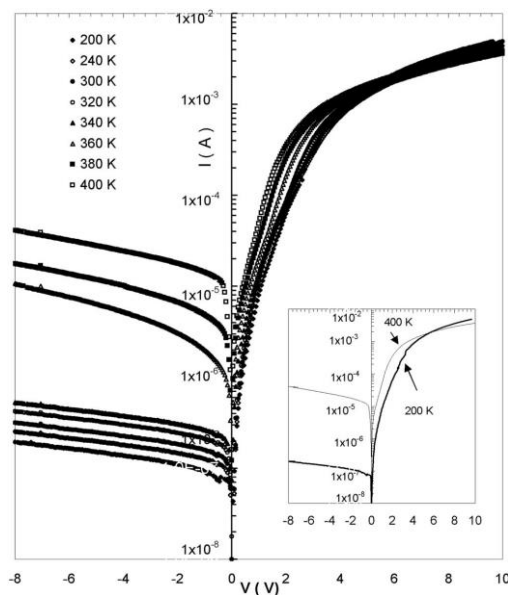
Al/SiO₂/p-Si و نقش لایه عایق

در این بخش مروری بر تحقیقات انجام شده بر روی دیود Al/SiO₂/p-Si که توسط ایلدیز و همکاران [۲۸] در شرایط رشد زیر ساخته شد خواهیم داشت. دیود مذکور بر روی ویفر سیلیکون تک بلور نوع p با آرایش اتم های بور و جهت گیری (۱۰۰) به ضخامت ۲۸۰ μm با مقاومت ویژه ۸ Ωcm ساخته شده است. لایه فلزی پوشش داده شده از جنس آلومینیوم و با ضخامت ۲۰۰۰ Å بوده که با روش تبخیر حرارتی بر روی نیمی از قسمت پشتی ویفر لایه نشانی شده است.

بررسی وابستگی دمایی مشخصه های جریان - ولتاژ (I-V) قطعه

شکل ۲-۷ مشخصه نیم لگاریتمی I-V دیود Al/SiO₂/p-Si در حضور لایه عایق را در شرایط

دمایی متفاوت از ۲۰۰ تا ۴۰۰ K نشان می دهد.



شکل ۲-۷: داده های تجربی متناظر با مشخصه نیم لگاریتمی I-V در شرایط بایاس مستقیم و معکوس دیود

Au/SiO₂/p-Si در دماهای متفاوت [۲۸].

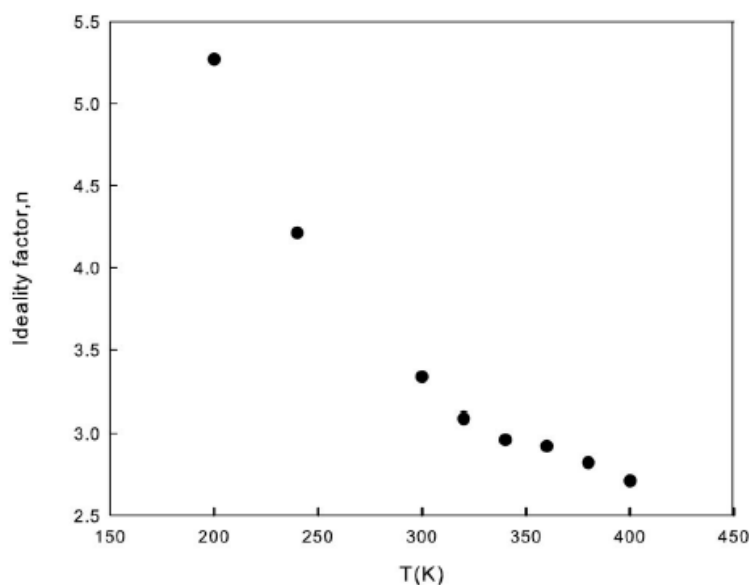
همانطور که ملاحظه می شود خمیدگی نمودار در ولتاژهای بایاس مستقیم بالاتر ناشی از ظاهر شدن مقاومت سری R_s قطعه می باشد. در اینجا به بررسی پارامترهای مهم مربوط به این دیود شاتکی از جمله ضریب ایده آلی، ارتفاع سد شاتکی و... خواهیم پرداخت.

الف: تعیین جریان اشباع معکوس (I_0) و ضریب ایده آلی

با استفاده از نظریه گسیل گرما یونی بخش ۴-۱ و رابطه (۹-۱) مقدار جریان اشباع معکوس (I_0) را از طریق تعیین عرض از مبدا در ناحیه خطی نمودار نیم لگاریتمی شکل ۷-۲ و مقادیر ضریب ایده آلی (n) با استفاده از شیب ناحیه خطی نمودار $\ln(I)-V$ محاسبه شده است. همانگونه که در جدول ۱-۲ و شکل ۸-۲ مشاهده می شود مقادیر مورد بررسی مربوط به ضریب ایده آلی با افزایش دما از ۲۰۰ به ۴۰۰ K از ۵/۲۷۰ به ۲/۷۱۲ کاهش پیدا کرده است. این رفتار ضریب ایده آلی و تغییرات آن نسبت به دما نشان از وجود توزیعی از حالت‌های سطحی در محل فصل مشترک لایه عایق با فلز و نیم‌رسانا دارد.

جدول ۱-۲: مقادیر ضریب ایده آلی، جریان اشباع معکوس و ارتفاع سد در نمونه مورد بررسی در دماهای مختلف [۲۸].

T (K)	I_0 (A)	n	Φ_{B0} (eV)	$\Phi_{B\text{ eff}}$ (eV)
200	3.736×10^{-7}	5.270	0.414	0.856
240	3.662×10^{-7}	4.212	0.505	0.854
300	5.300×10^{-7}	3.335	0.633	0.852
320	5.574×10^{-7}	3.089	0.678	0.849
340	9.661×10^{-7}	2.960	0.708	0.827
360	2.679×10^{-6}	2.922	0.721	0.782
380	4.552×10^{-6}	2.822	0.747	0.758
400	5.672×10^{-6}	2.712	0.783	0.757

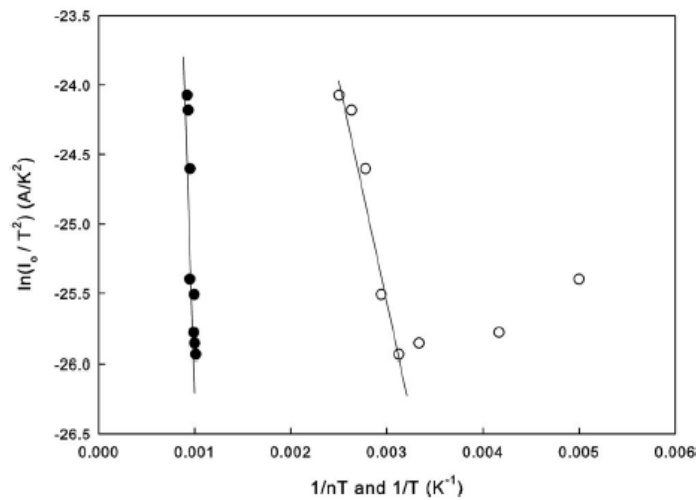


شکل ۲-۸: وابستگی دمایی ضریب ایده آلی در دیود شاتکی ماس Al/SiO₂/p-Si [۲۸].

ب: تعیین ارتفاع سد

ایلدیز و همکاران [۲۸] به دو روش به تعیین ارتفاع سد پرداختند: روش اول به کمک مشخصه جریان - ولتاژ ($I-V$) و روش دوم با استفاده از رابطه تعمیم یافته گسیل گرما یونی.

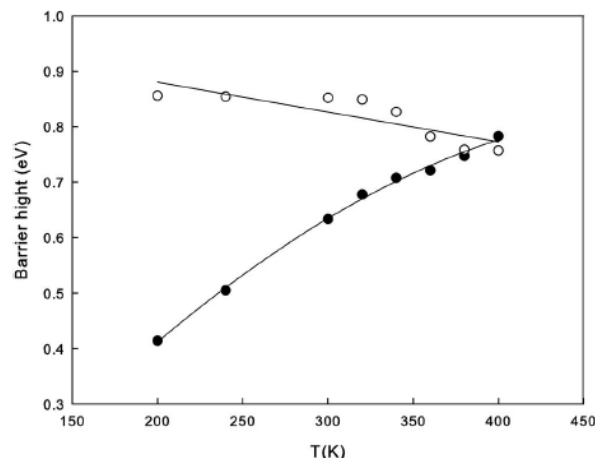
در روش اول مطابق با نظریه گسیل گرما یونی (بخش ۱-۴-۱) با معلوم شدن جریان اشباع معکوس (I_0)، ارتفاع سد از رابطه (۱-۱۱) قابل محاسبه است. نتایج ارائه شده در جدول ۱-۲ حاکی از این است که با افزایش دما ارتفاع سد شاتکی افزایش می یابد. این نحوه تغییرات با ضریب دمایی منفی ارتفاع سد در تناقض است. این گروه به منظور تعیین ارتفاع سد موثر و ضریب دمایی ارتفاع سد با استفاده از مطالب ارائه شده در بخش (۱-۷) به کمک مقدار عرض از مبدا منحنی $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1/nT$ مقدار ضریب تونل زنی ($\alpha X^{1/2} \delta$) را برابر $14/6$ بدست آوردند و با استفاده از آن طبق شکل ۲-۹ و با در نظرگیری ضخامت لایه عایق به مقدار $\delta = 55 \text{ \AA}$ ، ارتفاع سد موثر را برای هر دما پیدا کردند. (جدول ۱-۲).



شکل ۲-۹: نمودار ریچاردسون وابسته به تغییرات $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1/nT$ مربوط به دیود ماس Al/SiO₂/p-Si

[۲۸].

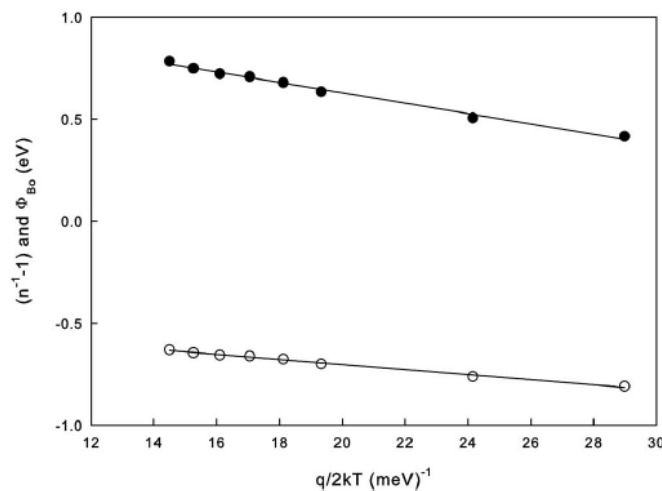
نتایج حاصل حاکی از آن است که با افزایش دما ارتفاع سد کاهش می یابد. این نتایج در شکل ۲-۱۰ با دایره های سفید نشان داده شده است. این گروه با رسم نمودار ϕ_{bef} بر حسب T ضریب دمایی ارتفاع سد شاتکی را $-5 \times 10^{-4} eV/K$ به دست آوردند که به ضریب دمایی گاف نواری Si نزدیک است. بعلاوه از عرض از مبدا نمودار نیز ارتفاع سد در صفر کلوین حدود $0.988 eV$ محاسبه شد که این به مقدار انرژی گاف نواری ممنوع Si در صفر کلوین ($1.17 eV$) نزدیک است.



شکل ۲-۱۰: وابستگی دمایی ارتفاع سد شاتکی (دایره های سیاه) و ارتفاع سد موثر (دایره های سفید) در دیود ماس با

ترکیب Al/SiO₂/p-Si [۲۸].

در روش دوم به منظور تجزیه تحلیل سدهای ناهمگن، ایلدیز و همکاران [۲۸] رفتارهای غیر عادی تغییرات افزایشی ارتفاع سد با افزایش دما ذکر شده در قسمت (الف) را با استفاده از مدل افت و خیز پتانسیل با فرض یک توزیع گوسی از ارتفاع سد ها با یک ارتفاع سد میانگین $\bar{\phi}_{b0}$ و σ_0 انحراف استاندارد توضیح دادند. بر اساس نمودار ϕ_{ap} ارتفاع سد بر حسب $q/2kT$ با استفاده از رابطه (۱-۲۲)، انحراف استاندارد و ارتفاع سد میانگین به ترتیب 0.159 و 1.136 eV به دست آمد. این نتیجه در شکل ۱۱-۲ با دایره های سیاه نشان داده شده است. همچنین با استفاده از رابطه (۱-۳۰) مطابق با توضیحات بخش (۱-۴-۲) نمودار $n^{-1}-1$ بر حسب $q/2kT$ رسم شد که از آنجا ضرایب ولتاژی ρ_2 و ρ_3 به ترتیب 0.4539 V و 0.125 به دست آمد. این نتیجه در شکل ۱۱-۲ با دایره های سفید نشان داده شده است. طبق این نتایج واضح است که مقدار انحراف استاندارد حاصله در مقایسه با اندازه ارتفاع سد میانگین، کوچک نبوده و این نشان دهنده وجود ناهمگنی های زیاد در سطح مشترک است. در واقع در اینجا ناهمگنی های سد به دلیل ناهمگنی های ناشی از وجود ضخامت از لایه عایق در سطح مشترک می باشد. بدیهی است هر چه میزان انحراف استاندارد کمتر باشد نشان از همگن بودن ارتفاع سد در سطح مشترک می دهد. همچنین مقادیر ρ_2 و ρ_3 که ضرایب ولتاژی نامیده می شوند میزان تغییر شکل ولتاژ مربوط به توزیع ارتفاع سد را نشان می دهند.



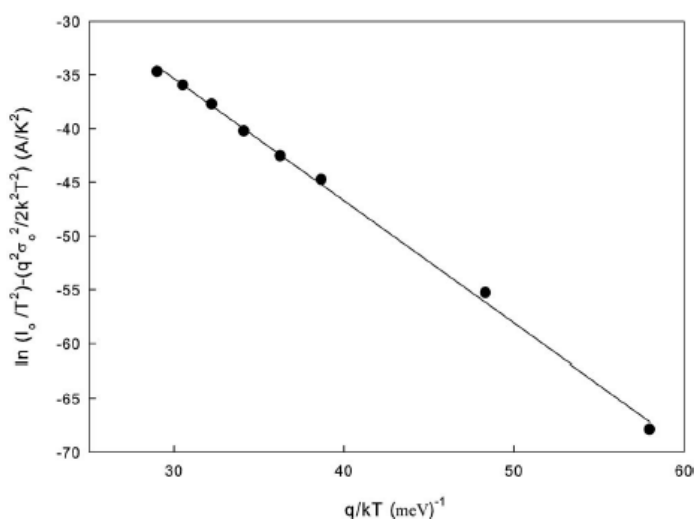
شکل ۱۱-۲: نمودار تغییرات ضریب ایده آلی و ارتفاع سد بر حسب $q/2kT$ در دیود شاتکی Al/SiO₂/p-Si مبتنی

بر توزیع گوسی ارتفاع سد [۲۸].

ج: تعیین ارتفاع سد شاتکی میانگین و بزرگی ضریب ریچاردسون با استفاده از

نمودار اصلاح شده ریچاردسون

همانطور که در شکل ۲-۱۲ دیده می شود مطابق با رابطه (۱-۳۱) از برازش داده های منحنی ریچاردسون اصلاح شده خط مستقیمی به دست می آید که از عرض از مبدا آن ضریب ریچاردسون $37/23 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ به دست می آید که به مقدار اصلی آن (در حدود $32 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$) بسیار نزدیک است. از طرفی از شیب این نمودار مقدار $\phi_{b0} = 1/138 \text{ eV}$ به دست می آید که با شیب نمودار مربوط به نمودار ϕ_{ap} ارتفاع سد بر حسب $q/2kT$ ($\phi_{b0} = 1/136 \text{ eV}$) توافق خوبی دارد.



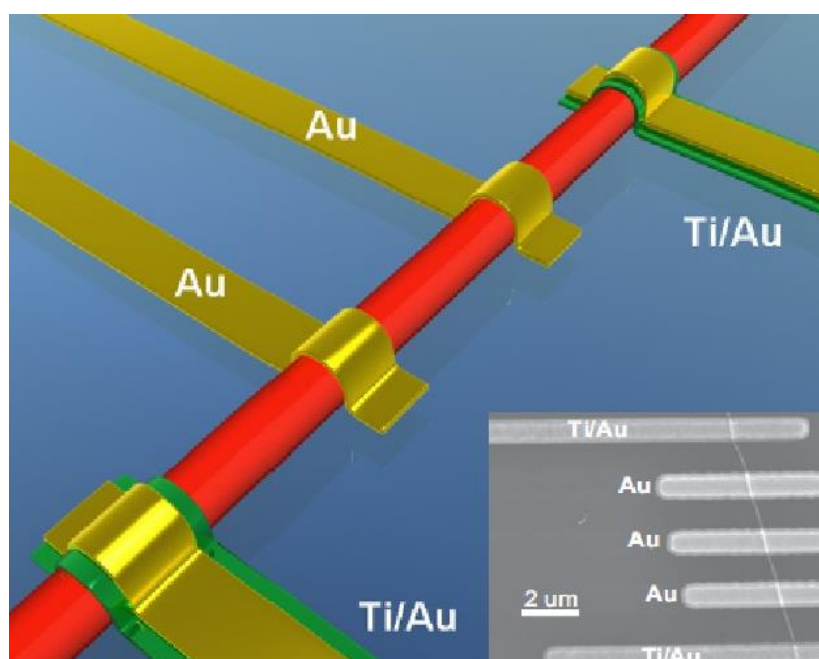
شکل ۲-۱۲: نمودار اصلاح شده ریچاردسون مربوط به دیود ماس با ترکیب لایه ای: $Al/SiO_2/p-Si$ [۲۸].

۲-۴: بررسی مشخصه یابی جریان – ولتاژ (I-V) در دیود شاتکی نانو سیم

Au/n-GaN

در این بخش مروری بر تحقیقات انجام شده بر روی دیود نانو سیم Au/n-GaN که توسط یانگ و همکاران [۲۹] گزارش گردیده است خواهیم داشت. آنها برای ساخت این قطعه از نانو سیم های GaN تک بلوری با قطری در حدود 50 nm و طول چند صد میکرو متر استفاده کرده اند. تحرک و تراکم

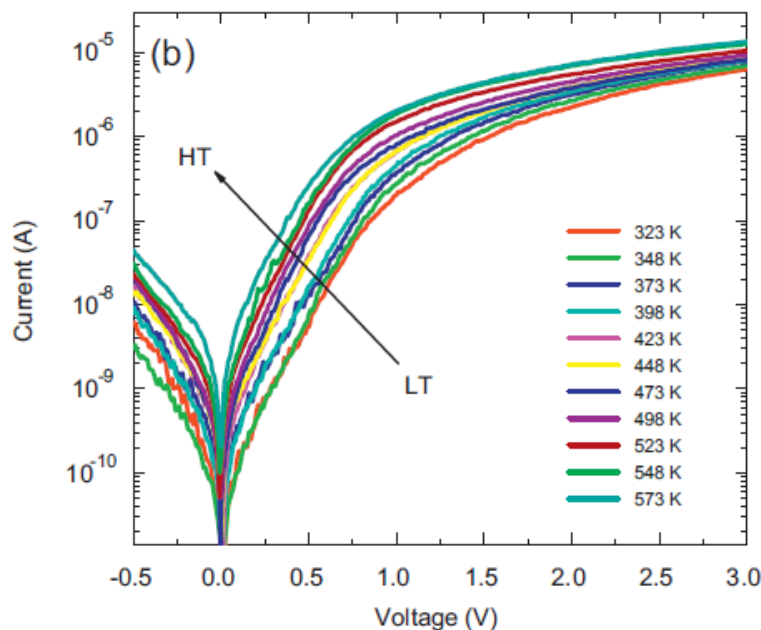
حامل ها در نانو سیم های GaN که به طور ناخواسته آرایش شده اند به ترتیب برابر $50 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ و 10^{19} cm^{-3} بوده است. آنها همچنین از الکتروود Ti/Au به عنوان اتصال اهمی به روش لیتوگرافی پرتو الکترونی و فلز Au به عنوان اتصال شاتکی و با روش تبخیر پرتو الکترونی به روی نانو سیم های GaN استفاده کرده اند. شکل ۲-۱۳ تصویر شماتیکی از دیود شاتکی نانو سیم Au/n-GaN به همراه تصویر واقعی FE-SEM مربوطه را نشان می دهد.



شکل ۲-۱۳: تصویر شماتیکی از دیود شاتکی نانو سیم Au/n-GaN به همراه تصویر FE-SEM مربوط به آن [۲۹].

بررسی وابستگی دمایی مشخصه های جریان - ولتاژ (I-V) قطعه

دیود نانو سیم Au/n-GaN در شرایط دمایی متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۲-۱۴ مشخصه نیم لگاریتمی I-V این نمونه را در محدوده دمایی ۳۲۳ تا ۵۷۳ K نشان می دهد.



شکل ۲-۱۴: مشخصه نیم لگاریتمی جریان-ولتاژ دیود Au/n-GaN در شرایط دمایی مختلف [۲۹].

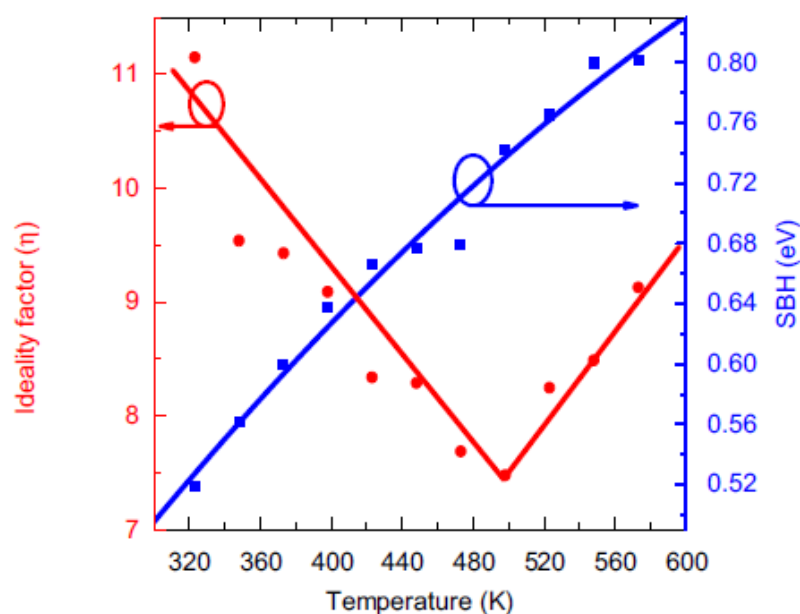
در ادامه به بررسی پارامترهای مهم مربوط به این دیود شاتکی از جمله ضریب ایده آلی، ارتفاع سد شاتکی، مقاومت متوالی و... می پردازیم.

الف: تعیین پارامترهای ضریب ایده آلی و ارتفاع سد بر پایه مدل سد همگن

مقادیر ضریب ایده آلی و ارتفاع سد شاتکی (SBH)^۱ مربوط به هر دما با استفاده از روابط (۱-۹) و (۱-۱۱) وابسته به فرایند گسیل گرما یونی (بخش ۱-۴-۱) محاسبه شده است. آنها ضریب ایده آلی را با استفاده از شیب ناحیه خطی در نمودار $\ln(I)-V$ بدست آورده اند. همانطور که در شکل ۲-۱۵ دیده می شود ضریب ایده آلی با افزایش دما از ۳۲۳ تا ۵۰۰ K از $11/2$ تا $7/9$ کاهش پیدا کرده است و در مقابل ارتفاع سد شاتکی با افزایش دما افزایش یافته است. همچنین مقدار ضریب ایده آلی (n) و ارتفاع سد در دمای ۳۰۰ K به ترتیب ۱۲ و 0.48 eV گزارش شده است. این نتایج نشان می دهد که در دیود شاتکی نانو سیم Au/n-GaN نسبت به لایه های نازک مشابه آن، مقادیر ضریب ایده آلی از مقدار ایده آل آن ($n=1$) بسیار بزرگتر و به همان نسبت ارتفاع سد بسیار کوتاهتر است که می تواند

^۱Schottky Barrier Height (SBH)

ناشی از دو عامل باشد: (الف) رفتار این دیود متأثر از ابعاد نانو متری نیمرسانا بوده به طوری که سطح اتصال در این نوع دیودها کوچک بوده و این سبب ایجاد جریان تونلی شده است و به نوبه خود سبب افزایش در مقدار ضریب ایده آلی و کاهش در ارتفاع سد دیود شاتکی نانو Au/n-GaN شده است. (ب) مقدار بالای تراکم حامل ها در نانو سیم GaN منجر به کاهش پهنای سد و از این رو سبب افزایش جریان تونلی گردیده است.



شکل ۲-۱۵: وابستگی دمایی ضریب ایده آلی و ارتفاع سد شاتکی Au/n-GaN [۲۹].

همانطور که در شکل ۲-۱۵ مشاهده می شود ضریب ایده آلی در دمای K ۵۰۰ تا K ۵۷۳ با افزایش دما در حال افزایش و روندی غیر عادی پیدا کرده است. این روند به وجود جریان های تونلی زنی در دماهای بالا نسبت داده شده است که الکترونیهای بیشتری انرژی لازم برای برانگیختگی از تراز ظرفیت به تراز هدایت را پیدا خواهند کرد و به این ترتیب تراکم حاملها افزایش یافته و جریان تونلی سبب افزایش مقادیر ضریب ایده آلی در دماهای بالاتر از K ۵۰۰ گردیده است.

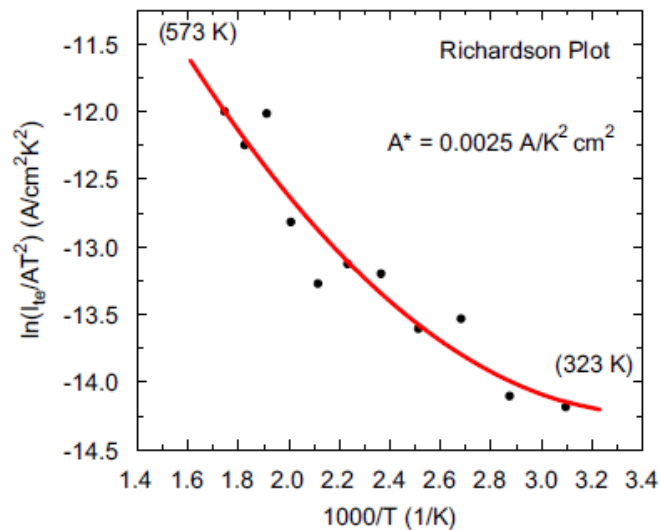
مطالعات گذشته نشان داده است که وابستگی دمایی ضریب ایده آلی و ارتفاع سد به دما در دیود شاتکی ناشی از وجود ناهمگنی در ارتفاع سد می باشد. این گروه برای تایید اثرات ناهمگنی در ارتفاع

سد در دیود نانو سیم Au/n-GaN از رسم نمودار ریچاردسون $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1000/T$ استفاده کردند که در ادامه به آن می پردازیم.

ب: تعیین ارتفاع سد میانگین و بزرگی ضریب ریچاردسون با استفاده از نمودار

ریچاردسون

با توجه به رابطه (۱۲-۱) شکل ۲-۱۶ نمودار $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1000/T$ را نشان می دهد. با استفاده از شیب و عرض از مبدا این نمودار ضریب ریچاردسون در حدود $0.0025 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ و ارتفاع سد در حدود 0.3 eV به دست آمده است. مشاهده می شود که ضریب ریچاردسون به دست آمده از مقدار نظری آن برای نیمرسانای GaN نوع n یعنی $26/4 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ بسیار کوچکتر است.



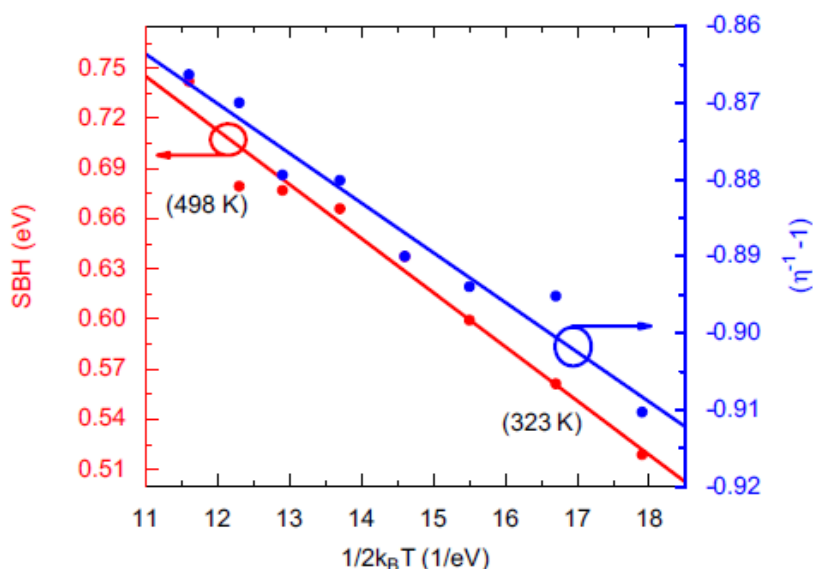
شکل ۲-۱۶: نمودار ریچاردسون وابسته به تغییرات $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1000/T$ مربوط به دیود Au/n-GaN [۲۹].

این نتایج تاییدی بر این نکته است که نمونه مورد نظر را نمی توان بر اساس مدل نظریه گسیل گرما یونی بدون در نظر گرفتن اثرات ناهمگونی ارتفاع سد تحلیل نمود.

ج: تعیین ارتفاع سد پتانسیل ناهمگن با استفاده از رابطه تعمیم یافته گسیل

گرما یونی

به منظور تجزیه تحلیل سدهای ناهمگن، یانگ و همکاران [۲۹] رفتارهای غیر عادی مشاهده شده در بخش (ب) را با استفاده از مدل افت و خیز پتانسیل با فرض یک توزیع گوسی از ارتفاع سد ها با یک ارتفاع سد میانگین ϕ_{b0}^- و انحراف استاندارد σ_0 توضیح داده اند. برای این منظور با استفاده از روابط (۲۲-۱) و (۳۰-۱) در بخش (۱-۴-۲) نمودار n^{-1} بر حسب $q/2kT$ و همچنین نمودار ارتفاع سد ϕ_{ap} بر حسب $q/2kT$ مطابق شکل ۱۷-۲ رسم شده است. با استفاده از عرض از مبدا و شیب این نمودار ها ضرایب ولتاژی ρ_2 و ρ_3 به ترتیب -0.179 و 0.065 و همچنین ارتفاع سد میانگین و انحراف استاندارد به ترتیب 1.1eV و 0.17 به دست آمده است.



شکل ۱۷-۲: نمودار تغییرات ضریب ایده آلی و ارتفاع سد ظاهری بر حسب $q/2kT$ در دیود شاتکی Au/n-GaN

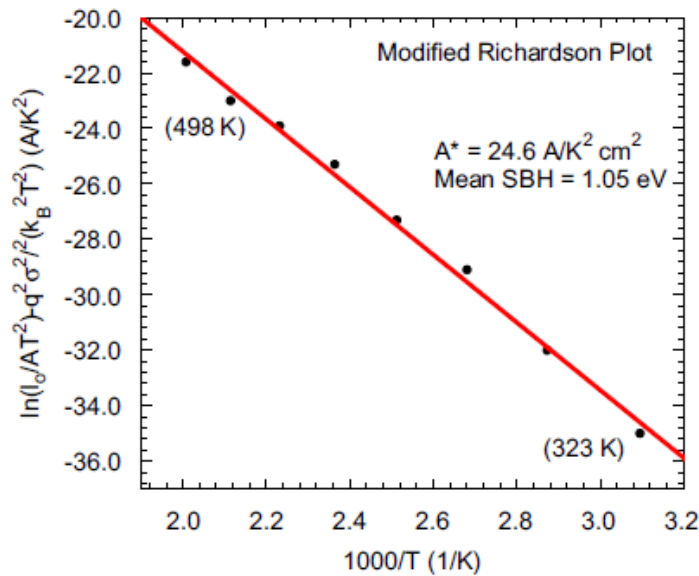
مبتنی بر توزیع گوسی ارتفاع سد [۲۹].

اکنون با استفاده از این مقادیر و در نظر گیری ناهمگنی ارتفاع سد پتانسیل تناقض در مقادیر ضریب موثر ریچاردسون و ارتفاع سد بدست آمده در بخش (ب) قابل توجیه است.

د: تعیین ارتفاع سد میانگین و بزرگی ضریب ریچاردسون با استفاده از نمودار

اصلاح شده ریچاردسون

با توجه به شکل ۲-۱۸ ملاحظه می شود مطابق با رابطه (۱-۳۱) از برازش داده های منحنی ریچاردسون اصلاح شده خط مستقیمی به دست می آید که از شیب آن $\phi_{b0} = 1.05 \text{ eV}$ و عرض از مبدا آن ضریب ریچاردسون $24.6 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ را به دست می دهد. چنانچه پیداست مقدار به دست آمده به مقدار اصلی آن که در حدود $26.4 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ می باشد بسیار نزدیک است. همچنین مقدار ارتفاع سد میانگین در این محاسبه با مقدار ارتفاع سد میانگین بدست آمده در بخش (ج) نزدیک است.



شکل ۲-۱۸: نمودار اصلاح شده ریچاردسون مربوط به دیود شاتکی [Au/n-GaN] [۲۹].

فصل سوم

مشخصه‌یابی‌های فنریکی و نتایج

۳-۱: مقدمه

در سال های اخیر مطالعات تجربی و نظری زیادی در مورد مشخصه های الکتریکی و پارامتر های وابسته به آن در دیود های شاتکی (MS) فلز-نیمرسانا یا (MIS) فلز-عایق-نیمرسانا از قبیل ارتفاع سد پتانسیل، ضریب ایده آلی، مقاومت متوالی انجام شده است. این نتایج که غالباً مبتنی بر نظریه گسیل گرما یونی استوارند نشانگر آن هستند که داده های بدست آمده از نظریه تعمیم یافته تری که در بخش (۱-۶) توضیح داده شد تبعیت می کنند، که نمایانگر وابستگی دمایی پارامتر های حاصل از مشخصه جریان - ولتاژ نمونه دیود شاتکی مورد بررسی است.

ما در این تحقیق به طور نظری به بررسی مشخصه جریان - ولتاژ (I-V) نمونه دیود های شاتکی ساخته شده در ساختارهای Au/n-GaN و Au/SiO₂/n-GaAs که در محدوده دماهای مختلف در شرایط بایاس مستقیم که بر اساس شرایطی خاص در آزمایشگاه ساخته شده اند، بر اساس نظریه گسیل گرما یونی می پردازیم و پارامتر های مهم الکتریکی از جمله ارتفاع سد شاتکی، ضریب ایده آلی، مقاومت متوالی، را محاسبه می کنیم.

۳-۲: بررسی خواص الکتریکی دیود شاتکی Au/n-GaN ساخته شده به روش

تبخیر پرتو الکترونی

ما در این تحقیق به طور نظری مشخصه جریان - ولتاژ یک نمونه از دیود شاتکی Au/n-GaN را که توسط جون لین و همکاران [۳۰] در محدوده دمایی K ۱۰۰-۳۵۰ گزارش شده است بر مبنای نظریه گسیل گرما یونی تعمیم یافته مبتنی بر وجود توزیع گوسی شکل از ارتفاع سد پتانسیل در محل سطح مشترک مورد تجزیه و تحلیل قرار دادیم که مدلی کاملتر در مقایسه با مدل ارتفاع سد پتانسیل ثابت می باشد. نمونه مورد مطالعه متشکل از یک لایه نیمرسانای GaN با ضخامت ۱/۲ μm آلایش شده با اتم های Si با تراکم چگالی حاملها به مقدار $6/7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ بر روی زیرلایه سفایر تهیه و بر روی آن لایه ای از طلا به ضخامت ۱۰۰ nm به روش تبخیر پرتو الکترونی به شکل نقطه ای

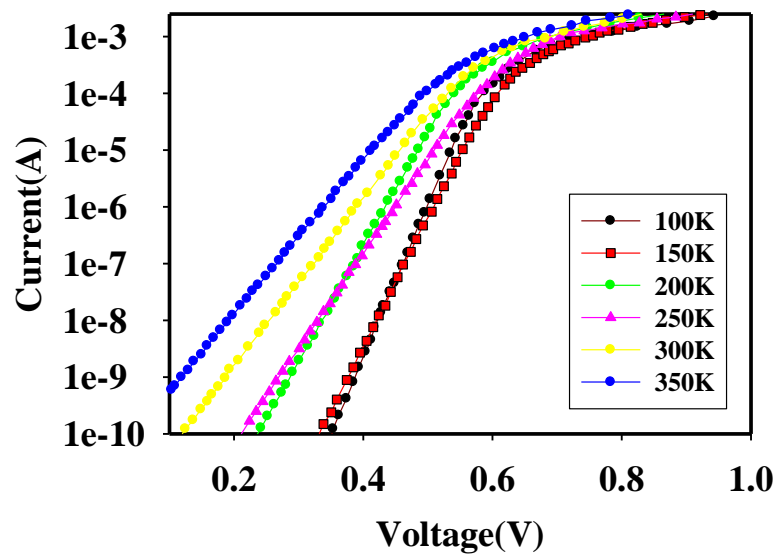
دایره ای با قطر $200 \mu\text{m}$ قرار گرفته است [۳۰].

بررسی وابستگی دمایی مشخصه های جریان- ولتاژ دیود شاتکی در شرایط

بایاس مستقیم

شکل ۱-۳ مشخصه نیم لگاریتمی I-V دیود شاتکی Au/n-GaN را تحت شرایط دمایی مختلف

(۱۰۰-۳۵۰ K) نشان می دهد.



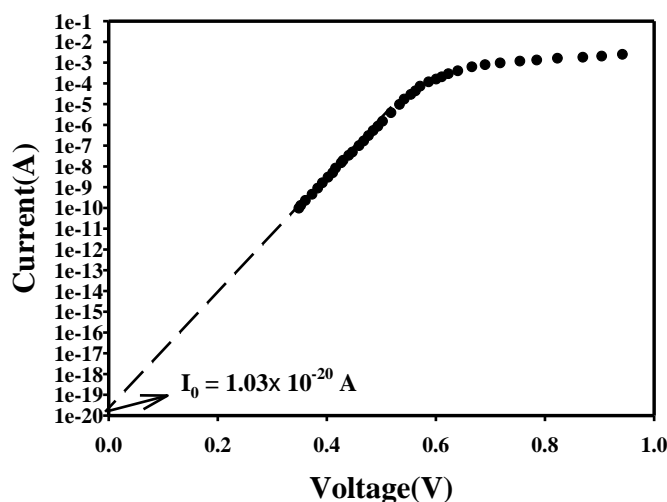
شکل ۱-۳: داده های تجربی مشخصه I-V در شرایط بایاس مستقیم در دیود Au/n-GaN در دماهای مختلف [۳۰].

همانطور که ملاحظه می شود در نواحی جریان های پایین که اثرات مقاومت متوالی ناچیز است و نادیده گرفته می شود، نمودار نیمه لگاریتمی جریان - ولتاژ به صورت خطی است و با افزایش ولتاژ به دلیل اثر مقاومت متوالی این نمودار از حالت خطی خارج می شود. در اینجا به بررسی پارامترهای مهم مربوط به این دیود از جمله ضریب ایده آلی، ارتفاع سد شاتکی، مقاومت متوالی و... خواهیم پرداخت.

الف: تعیین جریان اشباع معکوس (I_0) و ضریب ایده آلی (n)

طبق نظریه گسیل گرمایونی بخش (۱-۴-۱) جریان عبوری از سرتاسر دیود شاتکی در شرایط

بایاس مستقیم در حالت $\frac{3kT}{q} V$ از رابطه (۸-۱) پیروی می کند که در آن I_0 جریان اشباع معکوس است که از معادله (۹-۱) محاسبه می شود. این کمیت را می توان از طریق برون یابی و تعیین عرض از مبدا در ناحیه خطی نمودار نیم لگاریتمی جریان - ولتاژ به ازای $V=0$ به دست آورد. به عنوان نمونه شکل ۲-۳ نحوه تعیین جریان اشباع معکوس را در شرایط بایاس مستقیم برای مشخصه جریان - ولتاژ دیود Au/n-GaN در دمای ۱۰۰ K نشان می دهد.

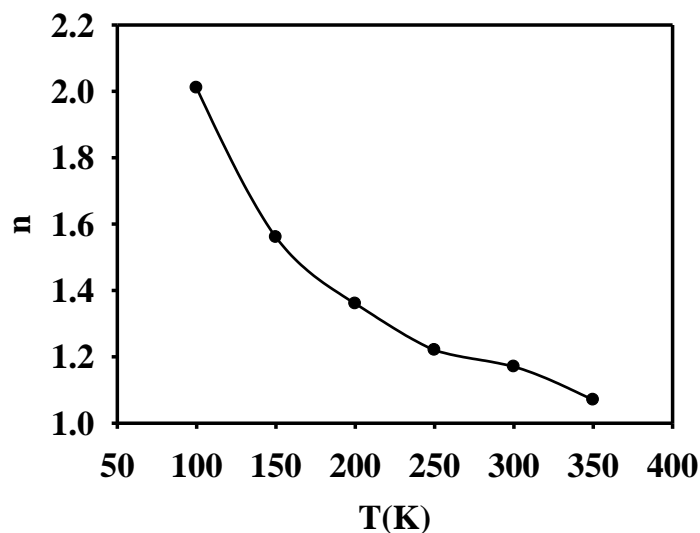


شکل ۲-۳: مشخصه جریان- ولتاژ دیود سد شاتکی Au/n-GaN در دمای ۱۰۰ K که موقعیت جریان اشباع معکوس (I_0) در این نمونه از طریق برون یابی در ناحیه خطی داده ها نشان داده شده است.

همچنین مقادیر ضریب ایده آلی (n) را می توان به کمک رابطه (۱۰-۱) در هر دمای معینی محاسبه نمود. مقادیر محاسبه شده I_0 و n در جدول ۳-۱ ارائه گردیده است. همانگونه که از شکل ۳-۳ هم پیداست مقادیر ضریب آلی برای این نمونه با افزایش دما در حال کاهش بوده و از ۲/۰۱ در دمای K ۱۰۰ به ۱/۰۷ در دمای K ۳۵۰ تغییر پیدا کرده است که با توجه به نتایج گزارش شده در مقالات امری قابل انتظار است. [۲۰]. برای یک دیود ایده آل انتظار می رود $n=1$ باشد. اما مقادیر محاسبه شده در این نمونه در دماهای پایین همواره بزرگتر از یک بوده که می تواند ناشی از توزیع عرضی ارتفاع سد شاتکی در سطح مشترک فلز - نیمرسانا باشد [۳۱].

جدول ۳-۱: مقادیر ضریب ایده آلی و جریان اشباع معکوس در نمونه مورد بررسی در دماهای مختلف.

T (K)	n	$I_0(A)$
۱۰۰	۲/۰۱	$۱/۰۳ \times ۱۰^{-۲۰}$
۱۵۰	۱/۵۶	$۲/۱۶ \times ۱۰^{-۱۸}$
۲۰۰	۱/۳۶	$۱/۹۹ \times ۱۰^{-۱۵}$
۲۵۰	۱/۲۲	$۲/۳۲ \times ۱۰^{-۱۴}$
۳۰۰	۱/۱۷	$۱/۸۵ \times ۱۰^{-۱۳}$
۳۵۰	۱/۰۷	$۲/۲۵ \times ۱۰^{-۱۱}$



شکل ۳-۳: تغییرات دمایی ضریب ایده آلی محاسبه شده برای دیود مورد بررسی.

ب: تعیین ارتفاع سد شاتکی

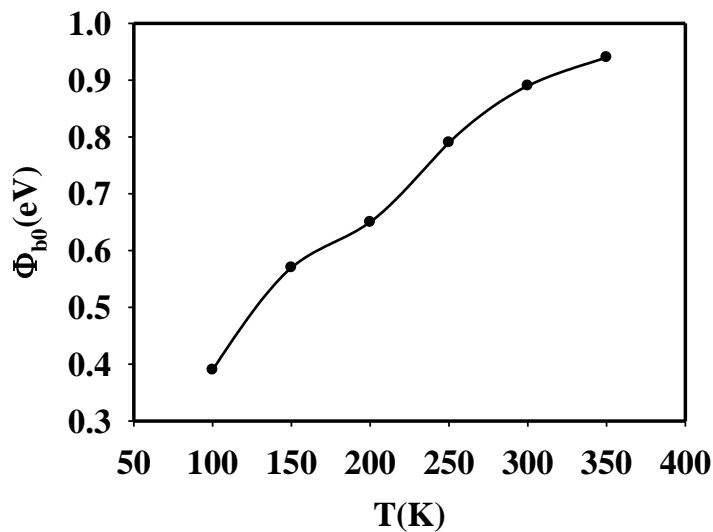
در دیود های شاتکی روش های متفاوتی برای تعیین ارتفاع سد (ϕ_{b0}) وجود دارد که در ادامه به

بررسی آن می پردازیم.

روش اول: تعیین ارتفاع سد شاتکی با استفاده از مشخصه جریان -ولتاژ:

همانگونه که در بخش (۱-۴-۱) اشاره شد با استفاده از مقادیر جریان اشباع معکوس (I_0) ارتفاع

سد پتانسیل (ϕ_{b0}) در شرایط بایاس صفر از رابطه (۱-۱۱) به دست می آید. نتیجه این محاسبات در جدول ۲-۳ و شکل ۳-۴ ارائه گردیده است. نتایج بدست آمده نشانگر آن است که ارتفاع سد برای این نمونه از 0.39 eV (در دمای 100 K) به 0.94 eV (در دمای 350 K) تغییر پیدا کرده است. همانگونه که ملاحظه می شود با افزایش دما ارتفاع سد شاتکی بایاس صفر (ϕ_{b0}) افزایش یافته است.



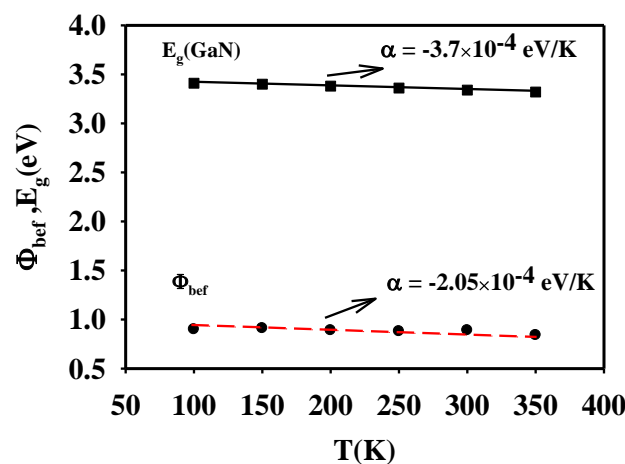
شکل ۳-۴: تغییرات دمایی ارتفاع سد شاتکی (ϕ_{b0}) در نمونه مورد بررسی.

جدول ۲-۳: تغییرات دمایی ارتفاع سد شاتکی (ϕ_{b0}) و ارتفاع سد موثر (ϕ_{bef}).

T (K)	ϕ_{b0} (eV)	ϕ_{bef} (eV)
۱۰۰	۰/۳۹	۰/۹
۱۵۰	۰/۵۷	۰/۹۱
۲۰۰	۰/۶۵	۰/۸
۲۵۰	۰/۷۹	۰/۸۸
۳۰۰	۰/۸۶	۰/۸۹
۳۵۰	۰/۹۴	۰/۸۴

این نحوه تغییرات افزایشی سد پتانسیل با توجه به روند رو به کاهش گاف نواری GaN با افزایش دما که از رابطه وارثنی (۱-۱۴) تبعیت می کند امری غیر عادی به نظر می رسد. این رفتار غیر عادی

چنانچه توسط هودایت و همکاران [۱۳] در نمونه Au/n-GaAs مورد مطالعه قرار گرفته است را به ناهمگونی عرضی در بزرگی ارتفاع سد نسبت می دهند که متاثر از مرز دانه ها، نواقص شبکه ای و روی هم چینی صفحات بلوری و حضور فازهای متفاوت در لایه بس بلوری فلزی در محل فصل مشترک است. با مدل ارتفاع سد در حالت های تراز مسطح در شرایط تعادل گرمایی نیز می توان ارتفاع سد را بدست آورد که موسوم به ارتفاع سد موثر است و همانگونه که در بخش ۱-۴-۱ گفته شد از رابطه (۱۵-۱) محاسبه می شود. این رابطه نشان می دهد که ارتفاع سد موثر با تقریب خوبی به صورت خطی با دما تغییر می کند. با توجه به رابطه (۱۷-۱) ارتفاع سد در دمای صفر کلونین $\phi_b(0K)$ و ضریب دمایی ارتفاع سد پتانسیل به ترتیب به کمک عرض از مبدا و شیب نمودار ϕ_{bef} بر حسب T در شکل ۵-۳ قابل محاسبه اند. این مقادیر به ترتیب عبارتند از: 0.93 eV و $-2/0.5 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$ ، جالب توجه آنکه چنانچه انتظار می رود روند تغییرات سد پتانسیل بدست آمده دارای شیب منفی بوده که با روند تغییرات گاف نواری GaN (با ضریب دمایی $-3/7 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$) مبتنی بر معادله (۱۴-۱) در گستره دمایی مورد بررسی که در شکل ۵-۳ با نقاط مربعی نشان داده شده اند هماهنگی بسیار نزدیکی دارد.



شکل ۵-۳: وابستگی دمایی ارتفاع سد شانکی موثر در دیود Au/n-GaN به همراه تغییرات دمایی گاف نواری GaN در

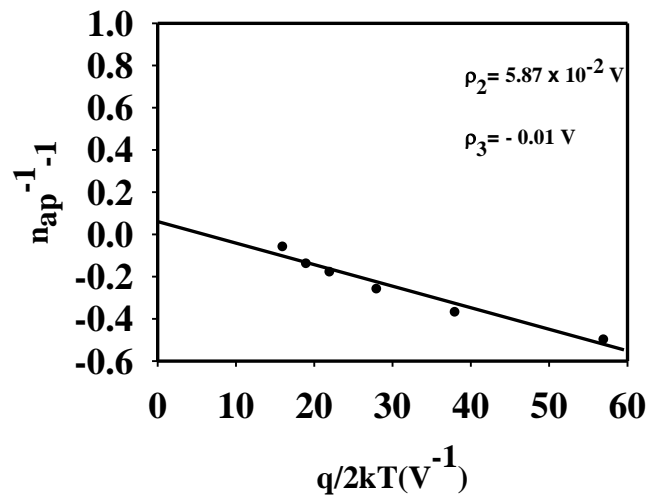
گستره دمایی ۱۰۰-۳۵۰ K.

روش دوم: تعیین ارتفاع سد پتانسیل ناهمگن با استفاده از رابطه تعمیم یافته

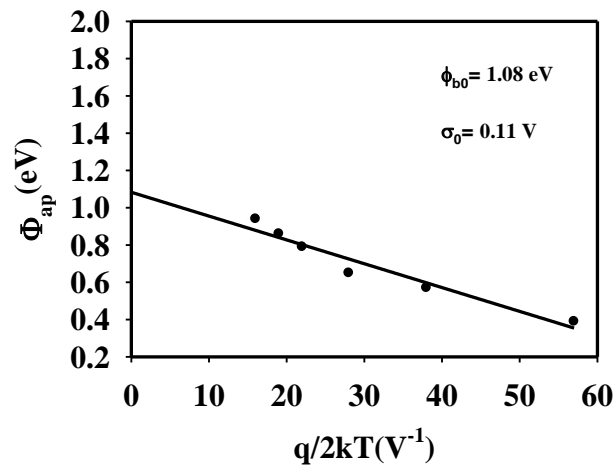
گسیل گرما یونی:

همانگونه که در بخش (۱-۴-۲) اشاره شد وجود ناهمگنی در ارتفاع سد را می توان به حضور ناراستی ها در فصل مشترک فلز - نیمرسانا نسبت داد. به منظور تحلیل دقیق تر این پارامتر (ϕ_{b0}) می توان از مدل افت و خیز پتانسیل با فرض یک توزیع پیوسته از سد ها در فصل مشترک به صورت یک توزیع گوسی با ارتفاع سد میانگین $\bar{\phi}_{b0}$ و انحراف معیار استاندارد σ_0 استفاده کرد.

به منظور تعیین ارتفاع سد ناهمگن، مقادیر بدست آمده برای ضریب ایده آلی و ارتفاع سد شاتکی ϕ_{b0} در جداول ۱-۳ و ۲-۳ را متناظر با مقادیر ارتفاع سد ظاهری ϕ_{ap} و ضریب ایده آلی n_{ap} در روابط (۱-۲۲) و (۱-۳۰) قرار می دهیم. شکل ۳-۶ تغییرات دمایی ضریب ایده آلی ظاهری (مبتنی بر معادله (۱-۳۰) را برحسب عکس دما نشان می دهد. چنانچه انتظار می رود داده ها بر روی خط مستقیم قرار دارند به طوری که مقادیر برازشی وابسته از طریق عرض از مبدا و شیب نمودار به ترتیب $\rho_2 = 0.0587V$ و $\rho_3 = -0.01V$ بدست می آید. همچنین شکل ۳-۷ نمودار تغییرات ϕ_{ap} برحسب $q/2kT$ را نشان می دهد که قابل برازش با خط مستقیمی است که از شیب و همچنین عرض از مبدا آن می توان به ترتیب $\sigma_0 = 0.11V$ و $\bar{\phi}_{b0} = 1.08 eV$ را تعیین کرد. در حقیقت مقدار σ_0 نشانگر میزان انحراف بزرگی سد پتانسیل شاتکی در محل فصل مشترک از مقدار میانگین آن و در نتیجه میزان ناهمگنی آن در سطح دیود مورد نظر می باشد. مقایسه بین σ_0 و $\bar{\phi}_{b0}$ نشانگر آن است که کیفیت سطح مشترک در این دیود مناسب است.



شکل ۳-۶: تغییرات ضریب ایده آلی بر حسب $q/2kT$ در دیود شاتکی Au/n-GaN مبتنی بر توزیع گوسی ارتفاع سد.



شکل ۳-۷: تغییرات ارتفاع سد ظاهری بر حسب $q/2kT$ در دیود Au/n-GaN مبتنی بر توزیع گوسی ارتفاع سد

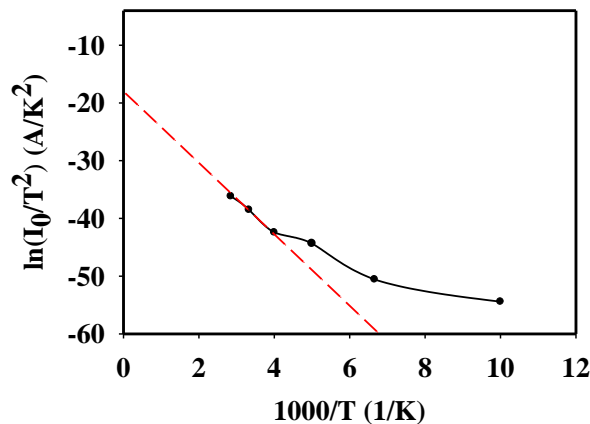
ج: تعیین ارتفاع سد شاتکی میانگین و بزرگی ضریب ریچاردسون با استفاده از

نمودار ریچاردسون

به منظور دریافت اعتبار این نظریه تعمیم یافته و راستی آزمایی آن می توان با استفاده از مقادیر

جریان معکوس این نمونه در دماهای مختلف بر حسب عکس دما و با توجه به معادله (۱-۱۲) در

بخش ۱-۴ (موسوم به نمودار ریچاردسون) به شیوه ای مستقل با روش یاد شده قبلی به محاسبه ارتفاع سد و نیز بزرگی ضریب ریچاردسون اقدام نمود. نتیجه این محاسبات در شکل ۳-۸ نشان داده شده است.



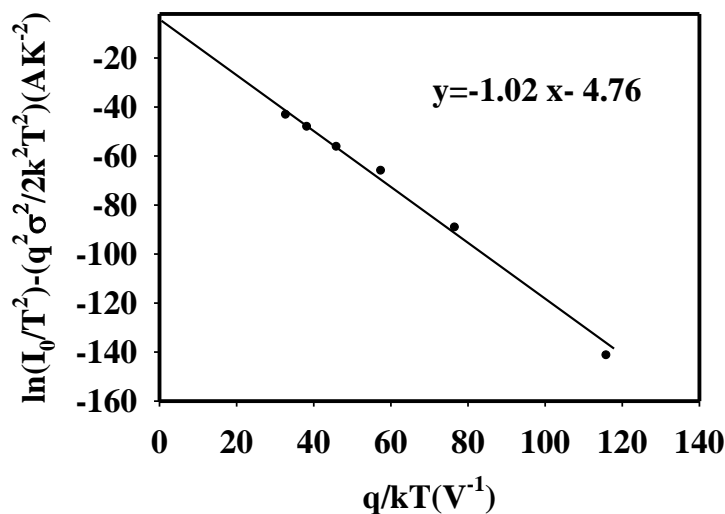
شکل ۳-۸: نمودار ریچاردسون وابسته به تغییرات $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1000/T$ مربوط به دیود شاتکی Au/n-GaN

با استفاده از عرض از مبدا این نمودار ضریب ریچاردسون و به کمک شیب آن، ارتفاع سد به ترتیب برابر با $A^* = 4/25 \times 10^{-5} \text{ A.cm}^{-2}\text{K}^{-2}$ و $\phi_{b0} = 0.42 \text{ eV}$ به دست می آید. چنانچه ملاحظه می شود مقدار A^* از مقدار واقعی آن که برابر $26/4 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ گزارش شده است بسیار کوچکتر می باشد. این انحراف در مقدار ضریب موثر ریچاردسون می تواند ناشی از در نظر گرفتن ارتفاع سد ثابت در محل سطح مشترک فلز / نیمرسانا باشد.

د: تعیین ارتفاع سد شاتکی میانگین و بزرگی ضریب ریچاردسون با استفاده از

نمودار اصلاح شده ریچاردسون

انحراف در مقدار ارتفاع سد میانگین و بزرگی ضریب ریچاردسون به دست آمده را می توان با فرض توزیع گوسی ارتفاع سد و با توجه به انحراف معیار به دست آمده در محاسبات قبلی و رسم نمودار اصلاح شده ریچاردسون بر اساس رابطه (۱-۳۱) در شکل ۳-۹ برطرف کرد.



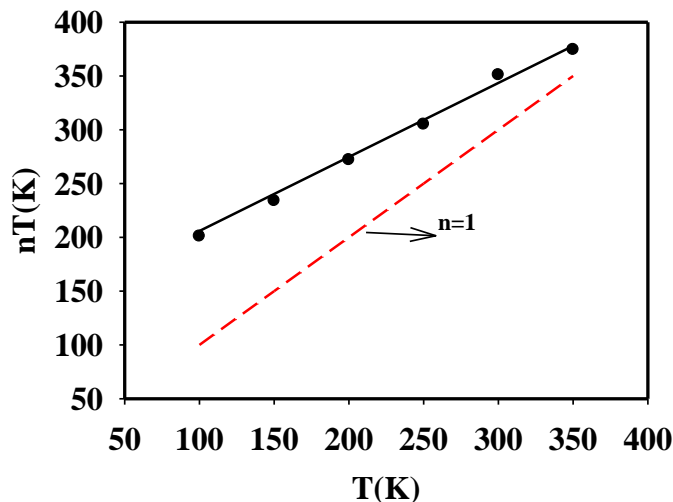
شکل ۳-۹: نمودار اصلاح شده ریچاردسون مربوط به دیود شاتکی Au/n-GaN

همانگونه که مشاهده می شود نمودار بدست آمده خط مستقیمی است که شیب و عرض از مبدا آن به ترتیب متناظر با: $\phi_{b0}^- = 1/0.2 \text{ eV}$ و $A^* = 27/27 \text{ A.cm}^{-2}\text{K}^{-2}$ است. چنانچه پیداست علاوه بر اینکه مقدار ϕ_{b0}^- به دست آمده از این طریق بسیار نزدیک به مقدار بدست آمده از شکل ۳-۷ می باشد، مقدار بدست آمده برای A^* نیز تا حد زیادی به مقدار واقعی آن یعنی $26/4 \text{ A.cm}^{-2}\text{K}^{-2}$ نزدیک است. بدین ترتیب این نتایج می تواند موید نظریه وجود یک توزیع گوسی برای ارتفاع سد در محل فصل مشترک فلز / نیمرسانا باشد.

و: اثر پارامتر ایده آلی دما T_0

همانطور که در بخش ۱-۵ گفته شد تغییرات n به دما می تواند از طریق اثر T_0 با رابطه (۱-۳۲) بیان شود. شکل ۳-۱۰ نمودار تغییرات nT بر حسب T را نشان می دهد که خط مستقیمی است که با خط $n=1$ موازی نمی باشد. این موضوع می تواند نشانگر وجود میدان هایی در لبه های اتصال لایه ها در نمونه باشد [۲۰]. مقادیر n_0 و T_0 را می توان به ترتیب از عرض از مبدا و شیب خط برازش شده بر داده ها با انطباق داده ها به روش کمینه سازی مجموع مربعات بدست آورد. این مقادیر به ترتیب

عبارتند از: 0.71 و $128/67 \text{ K}$ که نشان دهنده میزان وابستگی دمایی ضریب ایده آلی است که از مشخصه های مهم دیود های شاتکی به حساب می آید.



شکل ۳-۱۰: نمودار تغییرات nT بر حسب دما مربوط به دیود شاتکی Au/n-GaN

ه: تعیین مقاومت متوالی دیود (R_S)

همانگونه که در بخش ۱-۶ گفته شد با استفاده از روش چانگ و از رابطه (۱-۳۶) می توان مقاومت متوالی قطعه را که سبب یک افت ولتاژ در شرایط بایاس مستقیم می شود بدست آورد. این کار از طریق تعیین شیب نمودار $dV/d \ln(I)$ بر حسب I امکان پذیر است. نتیجه این محاسبات در جدول ۳-۳ نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می شود مقاومت متوالی با افزایش دما به طور کلی روندی کاهشی دارد. این رفتار می تواند ناشی از این باشد که با افزایش دما تراکم حاملها افزایش پیدا کرده و در نتیجه رسانندگی افزایش می یابد [۳۲].

جدول ۳-۳: مقادیر مقاومت متوالی در دیود مورد بررسی در دماهای مختلف

T(K)	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰	۳۵۰
$R_S(\Omega)$	۱۵۷	۱۰۲	۹۶	۸۲	۸۸	۹۱

نکته قابل توجه اینکه مقادیر به دست آمده از محاسبات ما مربوط به ضریب ایده آلی، ارتفاع سد و مقاومت متوالی در این دیود با داده های حاصل از یافته های لین و همکاران [۳۰]، جدول ۳-۴، هماهنگی نزدیکی وجود دارد.

جدول ۳-۴: داده های تجربی بدست آمده از مشخصه جریان - ولتاژ در دیود Au/n-GaN گزارش شده توسط لین و

همکاران [۳۰].

	100 K	150 K	200 K	250 K	300 K	350 K
ϕ_b (eV)	0.43 ± 0.04	0.59 ± 0.04	0.68 ± 0.04	0.81 ± 0.02	0.88 ± 0.02	0.94 ± 0.03
η	1.84 ± 0.06	1.49 ± 0.05	1.27 ± 0.03	1.20 ± 0.03	1.13 ± 0.02	1.07 ± 0.03
R_s (Ω)	150 ± 5	106 ± 5	91 ± 4	81 ± 2	85 ± 2	96 ± 3

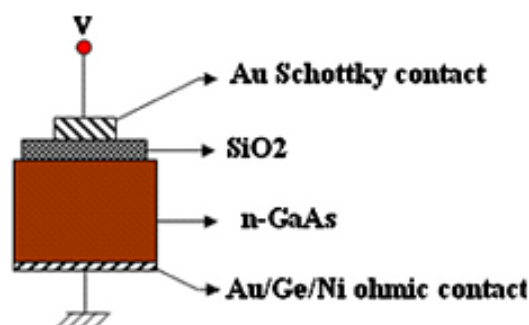
نتیجه گیری:

در این تحقیق ما به تحلیل نظری داده های برگرفته از مشخصه I-V دیود Au/n-GaN در دماهای مختلف پرداختیم و پارامترهای فیزیکی دخیل در این مشخصه ها را بر حسب تابعی از دما مورد بررسی قرار دادیم. نتایج حاصل از اندازه گیری ضریب ایده آلی (n) و ارتفاع سد (ϕ_{b0}) بر پایه نظریه گسیل گرما یونی نشانگر وابستگی دمایی این پارامتر هاست به طوری که با افزایش دما ضریب ایده آلی کاهش یافته است. از آنجا که برای یک دیود ایده آل $n=1$ است اما مقادیر ضریب ایده آلی محاسبه شده در این نمونه بزرگتر از یک بدست می آید. این افزایش می تواند ناشی از ناهمگنی های ضخامتی در فصل مشترک باشد. نتایج ما همچنین حاکی از روندی افزایشی برای مقادیر ارتفاع سد با افزایش دما است. لکن این نحوه تغییرات با توجه به سایر روش های گزارش شده و ضریب دمایی منفی گاف نواری GaN روندی غیر عادی دارد. تحلیل نظری داده ها نشان داد که رفتار الکتریکی قطعه مورد نظر به خوبی با نظریه مبتنی بر ناهمگونی توزیع ارتفاع های سد پتانسیل در محل فصل مشترک سازگار می باشد. مویده این نتیجه گیری محاسبات مربوط به تعیین مقدار ثابت موثر ریچاردسون (A^*) و همچنین ارتفاع سد میانگین (ϕ_{b0}^-) با استفاده از فرضیات ارتفاع سد ناهمگون بر پایه توزیع گوسی است که متناظر با: $\phi_{b0}^- = 1/0.2 \text{ eV}$ و $A^* = 27/27 \text{ A.cm}^{-2}\text{K}^{-2}$ محاسبه شد. همچنین در این محاسبات مقدار انحراف استاندارد و ضریب دمایی ارتفاع سد با در نظر گیری توزیع گوسی ارتفاع سد به ترتیب 0.11 V و $2/0.5 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$ بدست آمد.

۳-۳: بررسی خواص الکتریکی دیود شاتکی ماس Au/SiO₂/n-GaAs

مطالعه بر روی دیود های MOS (فلز - اکسید - نیمرسانا) از جمله قطعات بسیار مهم در کاربرد های کلید زنی بسامد بالا و نیز توان پایین بشمار می آید. لایه اکسید سیلیکون (SiO₂) به عنوان دروازه عایق نقش بسزایی در توسعه قطعات میکروالکترونیک و صنایع نیمرسانا داشته است [۸]. خواص الکترونیکی یک دیود MOS از طریق پارامتر های اصلی آن شامل: جریان اشباع معکوس، ارتفاع سد موثر، ضریب ایده آلی n و مقاومت متوالی معرفی می شود. ما در این تحقیق نظری به بررسی وابستگی دمایی مشخصه جریان - ولتاژ نمونه ای از این نوع دیود ها با ساختار لایه ای Au/SiO₂/n-GaAs که توسط آلتونتاس و همکاران [۳۳] در محدوده دمایی ۳۰۰ K - ۴۰۰ K گزارش شده است می پردازیم. بحث ما در این تحقیق مبتنی بر نظریه گسیل گرما یونی (TE) و نیز تعمیم آن در شرایط حضور لایه عایق می باشد.

شکل ۳-۱۱ نمایی از لایه های به کار رفته در این قطعه را نشان می دهد. این نمونه متشکل از یک لایه نیمرسانای GaAs با جهت گیری (۱۰۰) و تراکم چگالی حاملها به مقدار $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ با ضخامت $350 \mu\text{m}$ و قرارگیری لایه عایق SiO₂ بر روی آن است که با اتصالی از طلا به شکل نقطه ای دایره ای با قطر ۱ mm و با ضخامت 1500 \AA به روش تبخیر حرارتی بر روی آن پوشیده شده است.

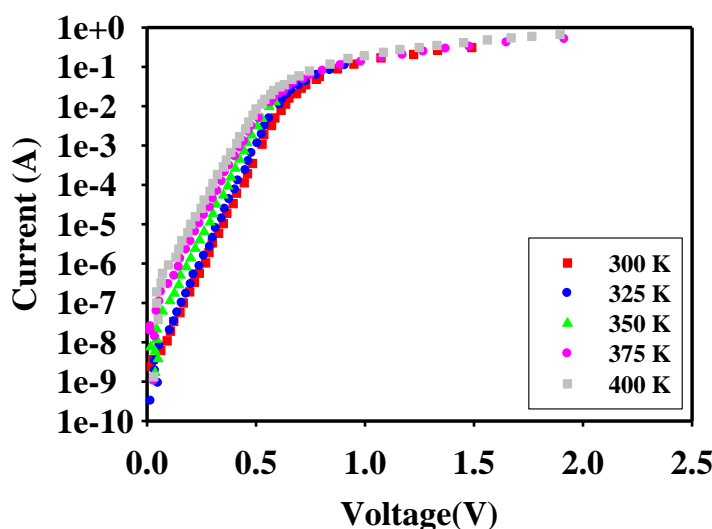


شکل ۳-۱۱: طرح شماتیک لایه های به کار رفته در ساخت دیود MOS مورد بررسی [۳۳].

بررسی وابستگی دمایی مشخصه های جریان- ولتاژ دیود شاتکی در شرایط

بایاس مستقیم

شکل ۳-۱۲ مشخصه نیم لگاریتمی I-V دیود ماس Au/SiO₂/n-GaAs را در دما های مختلف در گستره ۳۰۰ الی ۴۰۰ K نشان می دهد.



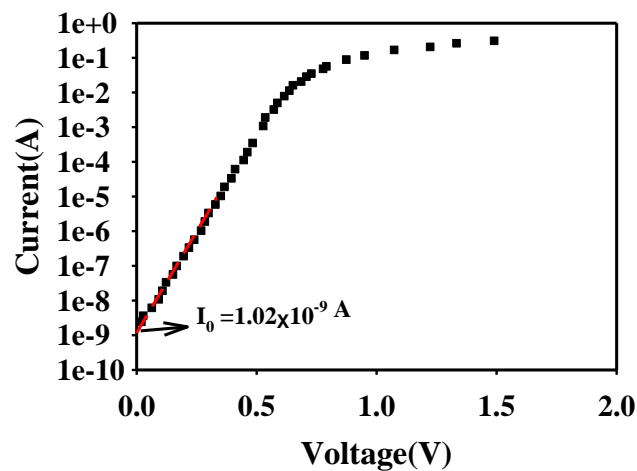
شکل ۳-۱۲: داده های تجربی مشخصه I-V در شرایط بایاس مستقیم در دیود Au/SiO₂/n-GaAs در دما های مختلف [۳۳].

همانطور که ملاحظه می شود در نواحی جریان های پایین که اثرات مقاومت سری ناچیز است و نادیده گرفته میشود، نمودار نیمه لگاریتمی جریان - ولتاژ به صورت خطی است و با افزایش ولتاژ به دلیل اثر مقاومت متوالی این نمودار از حالت خطی خارج می شود. در اینجا به بررسی پارامتر های مهم مربوط به دیود های شاتکی از جمله ضریب ایده آلی، ارتفاع سد شاتکی، مقاومت متوالی و.... خواهیم پرداخت.

الف: تعیین جریان اشباع معکوس (I_0) و ضریب ایده آلی (n)

طبق نظریه گسیل گرمایونی بخش (۱-۴-۱)، جریان عبوری از دیود شاتکی در شرایط بایاس

مستقیم در حالت $V > \frac{3kT}{q}$ از رابطه (۸-۱) پیروی می کند، که در آن I_0 جریان اشباع معکوس است که از معادله (۹-۱) محاسبه می شود. این کمیت را می توان از طریق برون یابی و تعیین عرض از مبدا در ناحیه خطی نمودار نیم لگاریتمی جریان - ولتاژ به ازای $V=0$ به دست آورد. شکل ۳-۱۳ تغییرات جریان - ولتاژ نمونه را در دمای اتاق ($T=300$ K) و نیز نحوه تعیین جریان اشباع معکوس را در شرایط بایاس مستقیم برای مشخصه جریان-ولتاژ دیود Au/SiO₂/n-GaAs نشان می دهد.

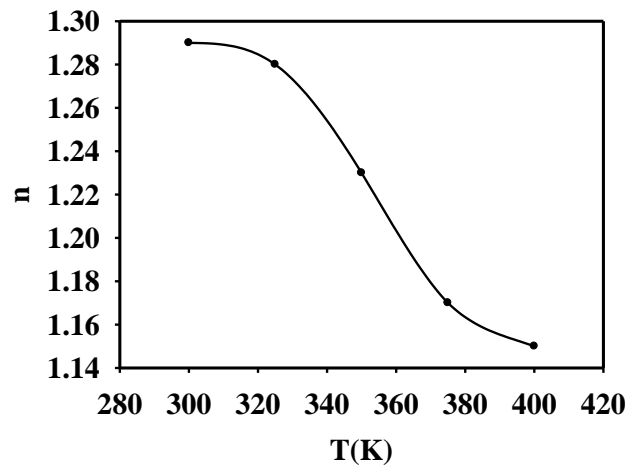


شکل ۳-۱۳: مشخصه جریان-ولتاژ دیود سد شاتکی Au/SiO₂/n-GaAs در دمای ۳۰۰ K که موقعیت جریان اشباع معکوس (I_0) در این نمونه از طریق برون یابی داده ها در ناحیه خطی داده ها نشان داده شده است.

به منظور تعیین ضریب ایده آلی (n) قطعه در هر دما از رابطه (۱۰-۱) استفاده کرده ایم. مقادیر محاسبه شده I_0 و n در جدول ۳-۵ ارائه گردیده است. همانگونه از شکل ۳-۱۴ هم پیداست مقادیر ضریب ایده آلی برای این نمونه با افزایش دما در حال کاهش بوده و از ۱/۲۹ در دمای ۳۰۰ K به حدود ۱/۱۵ در دمای ۴۰۰ K تغییر پیدا کرده است. این نحوه تغییرات با توجه به نتایج گزارش شده در مقالات امری قابل انتظار است. برای یک دیود ایده آل انتظار می رود که $n=1$ باشد. اما مقادیر محاسبه شده در این نمونه ها همواره بزرگتر از یک بوده که می تواند ناشی از عواملی همچون حضور لایه نازک اکسیدی در سطح مشترک، نیروی بارهای تصویری، مقاومت متوالی و... باشد [۳۱].

جدول ۳-۵: مقادیر ضریب ایده آلی و جریان اشباع معکوس در نمونه مورد بررسی در دماهای مختلف

T (K)	n	$I_0(A)$
۳۰۰	۱/۲۹	$۱/۰۲ \times ۱۰^{-۹}$
۳۲۵	۱/۲۸	$۱/۳ \times ۱۰^{-۹}$
۳۵۰	۱/۲۳	$۶/۸۳ \times ۱۰^{-۹}$
۳۷۵	۱/۱۷	$۳/۷ \times ۱۰^{-۸}$
۴۰۰	۱/۱۵	$۶/۳ \times ۱۰^{-۸}$



شکل ۳-۱۴: تغییرات دمایی ضریب ایده آلی محاسبه شده برای دیود مورد بررسی.

ب: تعیین ارتفاع سد شاتکی :

در دیود های شاتکی روش های متفاوتی برای تعیین ارتفاع سد (ϕ_{b0}) وجود دارد که در ادامه به

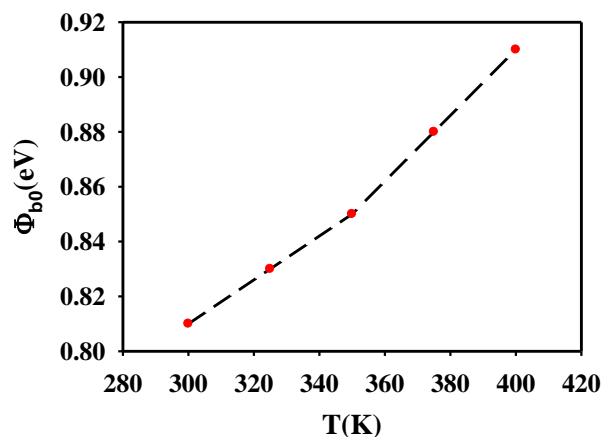
بررسی آن می پردازیم.

روش اول: تعیین ارتفاع سد شاتکی با استفاده از مشخصه جریان - ولتاژ

همانگونه که در بخش (۱-۴) اشاره شد با استفاده از مقادیر جریان اشباع معکوس (I_0) ، ارتفاع

سد پتانسیل در شرایط بایاس صفر (ϕ_{b0}) از رابطه (۱-۱۱) به دست می آید. نتیجه این محاسبات در

شکل ۳-۱۵ و جدول ۳-۶ ارائه گردیده است. این نتایج حاکی از آن است که ارتفاع سد برای این نمونه از 0.81 eV (در دمای 300 K) به 0.91 eV (در دمای 400 K) افزایش پیدا کرده است.



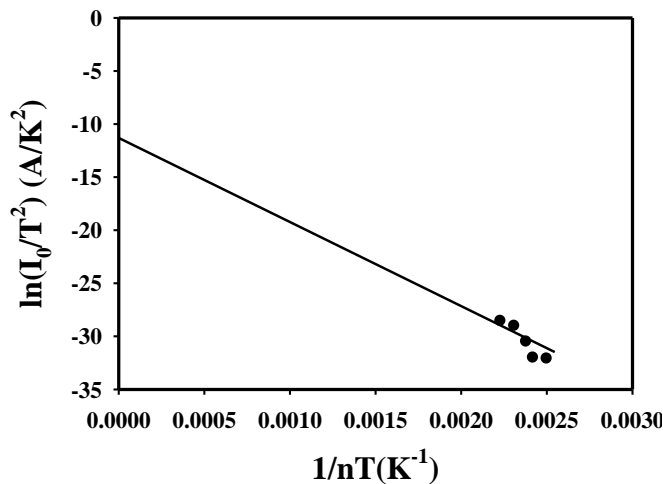
شکل ۳-۱۵: تغییرات دمایی ارتفاع سد شاتکی (Φ_{b0}) در نمونه مورد بررسی.

جدول ۳-۶: تغییرات دمایی ارتفاع سد شاتکی (Φ_{b0}) و ارتفاع سد موثر (Φ_{bef})

T (K)	Φ_{b0} (eV)	Φ_{bef} (eV)
۳۰۰	۰/۸۱	۰/۶۹
۳۲۵	۰/۸۳	۰/۷۳
۳۵۰	۰/۸۵	۰/۷
۳۷۵	۰/۸۸	۰/۶۶
۴۰۰	۰/۹۱	۰/۶۸

اگر چه تغییرات رو به کاهش ضریب ایده آلی با افزایش دما با توجه به گزارشات دیگر محققین در دیود شاتکی مشابه $\text{Al/SnO}_2/\text{p-Si}$ [۳۴] امری منطقی است، لکن تغییرات افزایشی سد پتانسیل با توجه به روند رو به کاهش گاف نواری GaAs با افزایش دما که از رابطه وارثنی (۱-۱۳) تبعیت می کند امری غیر عادی به نظر می رسد. این رفتار غیر عادی چنانچه توسط آلتوندال و همکاران [۳۳] در نمونه $\text{Al/SnO}_2/\text{p-Si}$ مورد مطالعه قرار گرفته است به ناهمگونی عرضی در بزرگی ارتفاع سد نسبت

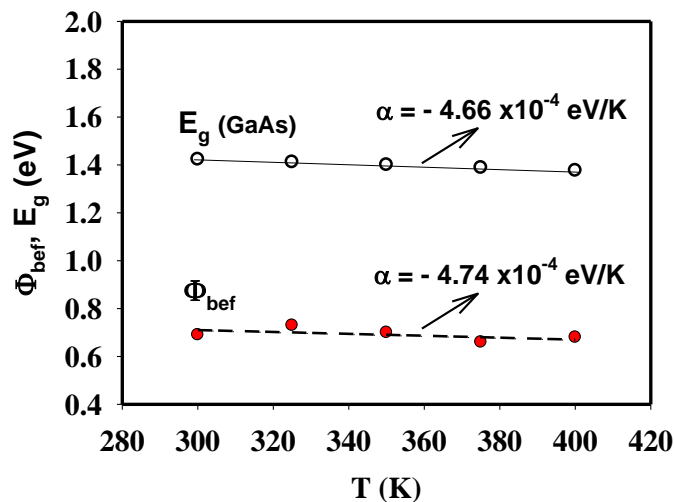
داده می شود. علت این امر می تواند متأثر از مرز دانه ها، نواقص شبکه ای و روی هم چینی صفحات بلوری و حضور فازهای متفاوت در لایه بس بلوری فلزی در محل فصل مشترک با نیمرسانا باشد [۳۵]. همچنین می توان همانگونه که در بخش ۱-۷ اشاره شد با در نظر گرفتن ضخامت لایه عایق در رابطه تعمیم یافته جریان اشباع معکوس (I_0) طبق معادله (۱-۳۹) ارتفاع سد را بدست آورد. با توجه به معادله (۱-۳۹) انتظار می رود نمودار $\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right)$ بر حسب $1/nT$ (شکل ۳-۱۶) خطی مستقیم باشد به طوری که عرض از مبدا آن که معادل کمیت $-a\chi^{1/2}\delta + \ln(AA^*)$ می باشد برابر $11/4 \text{ A/K}^2$ بوده و از آنجا ضریب تونل زنی ($a\chi^{1/2}\delta$) برابر $8/66$ حاصل می شود.



شکل ۳-۱۶: تغییرات $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1/nT$ در دیود سد شاتکی Au/SiO₂/n-GaAs

با معلوم شدن ضریب تونل زنی می توان ارتفاع سد موثر وابسته به هر دما را با توجه به معادله (۱-۴۰) بدست آورد. نتایج این محاسبات در شکل ۳-۱۷ نشان داده شده است. این نتایج حاکی از آن است که ارتفاع سد موثر با تقریب خوبی به صورت خطی با دما با توجه به معادله (۱-۴۱) تغییر می کند که در آن $\phi_b(0K)$ ارتفاع سد در دمای صفر کلوین و α ضریب دمایی ارتفاع سد پتانسیل است که به ترتیب به کمک عرض از مبدا و شیب نمودار قابل محاسبه اند. این مقادیر به ترتیب عبارتند از: 0.186 و $-4/74 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$. جالب توجه آنکه چنانچه انتظار می رود روند تغییرات سد پتانسیل

بدست آمده دارای شیب منفی بوده که با روند تغییرات گاف نواری GaAs (با ضریب دمایی eV/K -4.66×10^{-4}) مبتنی بر معادله (۱-۱۳) در گستره دمایی مورد بررسی در شکل ۳-۱۷ با دایره های سفید نشان داده شده اند هماهنگی بسیار نزدیکی دارد.



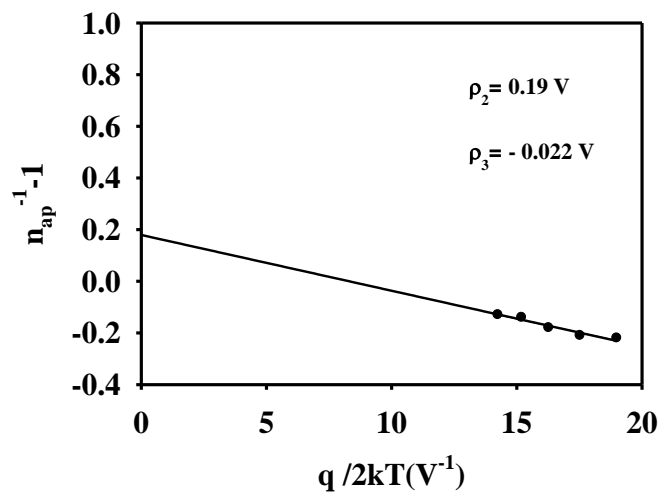
شکل ۳-۱۷: وابستگی دمایی ارتفاع سد شاتکی موثر در دیود ماس با ترکیب لایه ای: Au/SiO₂/n-GaAs به همراه تغییرات دمایی گاف نواری GaAs در گستره ۳۰۰ الی ۴۰۰ K

روش دوم: تعیین ارتفاع سد پتانسیل ناهمگن با استفاده از رابطه تعمیم یافته

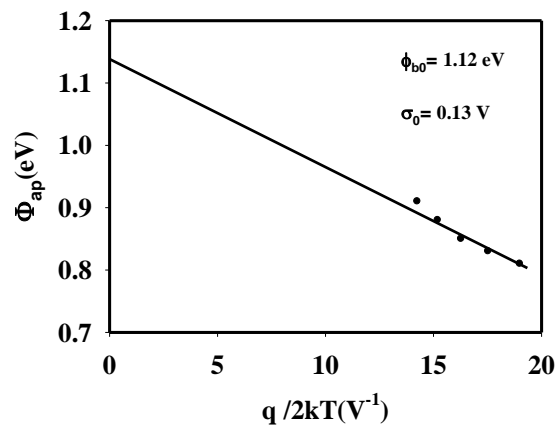
گسیل گرما یونی

همانگونه که در بخش (۱-۴-۲) اشاره شد وجود ناهمگنی در ارتفاع سد را می توان به ناراستیهای فصل مشترک نسبت داد. به منظور تحلیل دقیق تر این پارامتر می توان از مدل افت و خیز پتانسیل با فرض یک توزیع از ارتفاع سد ها در فصل مشترک به صورت یک توزیع گوسی با میانگین ϕ_{b0}^- و انحراف معیار استاندارد σ_0 استفاده کرد. به منظور تعیین ارتفاع سد ناهمگن می توان مقادیر بدست آمده برای ضریب ایده آلی و ارتفاع سد شاتکی ϕ_{b0} (بترتیب جداول ۳-۵ و ۳-۶) را متناظر با مقادیر ارتفاع سد ظاهری ϕ_{ap} و ضریب ایده آلی n_{ap} در روابط (۱-۲۲) و (۱-۳۰) قرار داد. شکل ۳-۱۸ تغییرات دمایی ضریب ایده آلی ظاهری (مبتنی بر معادله (۱-۳۰)) را برحسب عکس دما نشان می

دهد. چنانچه انتظار می رود داده ها بر روی خط مستقیم قرار دارند به طوری که مقادیر برازشی وابسته از طریق عرض از مبدا و شیب نمودار به ترتیب $\rho_2 = 0.19 \text{ V}$ و $\rho_3 = -0.022 \text{ V}$ بدست می آید. همچنین شکل ۳-۱۹ نمودار تغییرات Φ_{ap} بر حسب $q/2kT$ را نشان می دهد که قابل برازش با خط مستقیمی است که از شیب و همچنین عرض از مبدا آن می توان به ترتیب $\sigma_0 = 0.13 \text{ V}$ و $\phi_{b0} = 1.12 \text{ eV}$ را تعیین کرد. در حقیقت مقدار σ_0 نشانگر میزان انحراف بزرگی سد پتانسیل شاتکی در محل فصل مشترک از مقدار میانگین آن و در نتیجه میزان ناهمگنی آن در سطح دیود مورد نظر می باشد که در این مورد این توزیع چندان وسیع نیست.



شکل ۳-۱۸: تغییرات ضریب ایده آلی بر حسب $q/2kT$ در دیود شاتکی $\text{Au/SiO}_2/\text{n-GaAs}$ مبتنی بر توزیع گوسی ارتفاع سد.

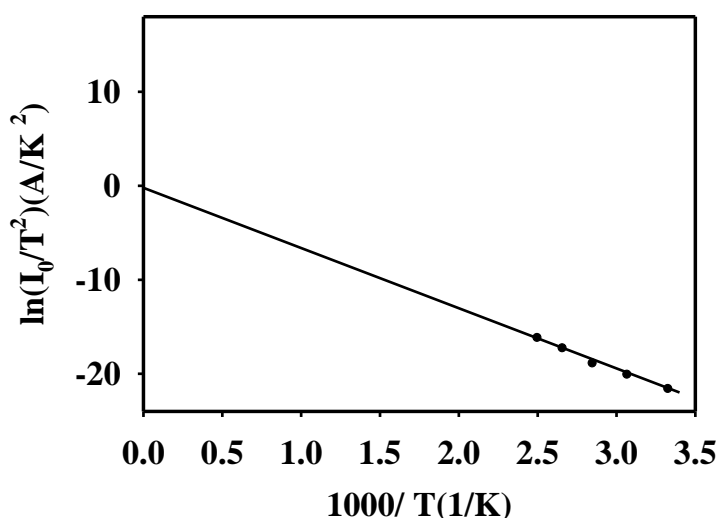


شکل ۳-۱۹: تغییرات ارتفاع سد ظاهری بر حسب $q/2kT$ در دیود شاتکی $\text{Au/SiO}_2/\text{n-GaAs}$ مبتنی بر توزیع گوسی

ج: تعیین ارتفاع سد شاتکی میانگین و بزرگی ضریب ریچاردسون با استفاده از

نمودار ریچاردسون

به منظور دریافت اعتبار این نظریه تعمیم یافته و راستی آزمایی آن می توان با استفاده از مقادیر جریان معکوس این نمونه در دماهای مختلف برحسب عکس دما و با توجه به معادله (۱-۱۲) در بخش ۱-۴-۱ (موسوم به نمودار ریچاردسون) به شیوه ای مستقل با روش یاد شده قبلی به محاسبه ارتفاع سد و نیز بزرگی ضریب ریچاردسون اقدام نمود. نتیجه این محاسبات در شکل ۳-۲۰ نشان داده شد.



شکل ۳-۲۰: نمودار ریچاردسون وابسته به تغییرات $\ln(I_0/T^2)$ برحسب $1000/T$ مربوط به دیود شاتکی

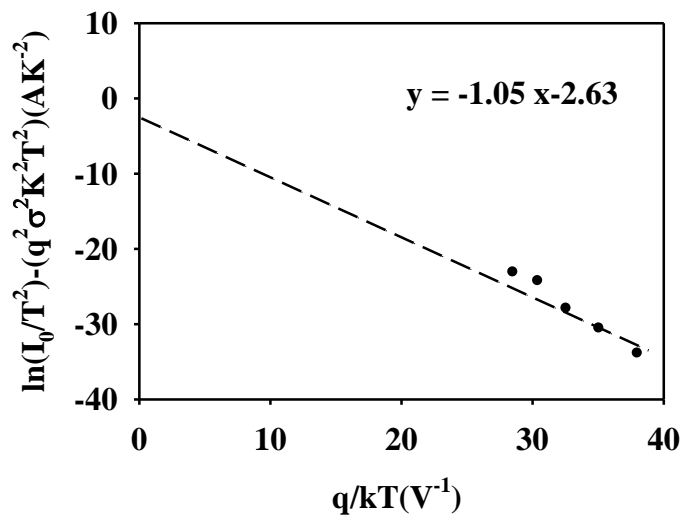
Au/SiO₂/n-GaAs

با استفاده از عرض از مبدا این نمودار ضریب ریچاردسون و به کمک شیب آن ارتفاع سد به ترتیب برابر با $A^* = 95/03 \text{ A.cm}^{-2}\text{K}^{-2}$ و $\phi_{b0} = 0/55 \text{ eV}$ به دست می آید. چنانچه ملاحظه می شود مقدار A^* از مقدار واقعی آن که برابر $8/16 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ گزارش شده است بسیار بزرگتر می باشد. این انحراف در مقدار ضریب موثر ریچاردسون می تواند ناشی از در نظر گرفتن ارتفاع سد ثابت در محل سطح مشترک فلز / اکسید / نیمرسانا باشد.

د: تعیین ارتفاع سد شاتکی میانگین و بزرگی ضریب ریچاردسون با استفاده از

نمودار اصلاح شده ریچاردسون

انحراف در مقدار ارتفاع سد میانگین و بزرگی ضریب ریچاردسون به دست آمده را می توان با فرض توزیع گوسی ارتفاع سد و با توجه به انحراف معیار به دست آمده در محاسبات قبلی و رسم نمودار اصلاح شده ریچاردسون بر اساس رابطه (۳۱-۱) و شکل ۳-۲۱ بر طرف کرد.

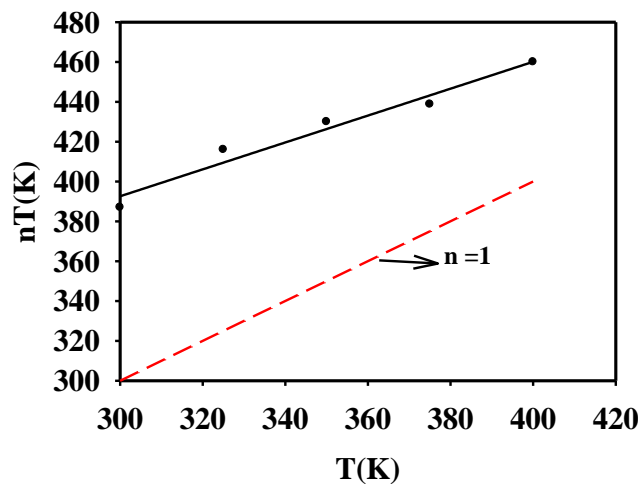


شکل ۳-۲۱: نمودار اصلاح شده ریچاردسون مربوط به دیود شاتکی Au/SiO₂/n-GaAs که به دلیل گستره محدود دمایی به کار گرفته شده انتظار می رود شیب داده ها در گستره دمایی پایین به صورت خط نقطه چین باشد.

همانگونه که مشاهده می شود نمودار بدست آمده خط مستقیمی است که از روی شیب و عرض از مبدا آن به ترتیب مقادیر ارتفاع سد متوسط و ضریب ریچاردسون متناظر با: $\bar{\phi}_{b0} = 1/0.5 \text{ eV}$ و $A^* = 9/18 \text{ A.cm}^{-2}\text{K}^{-2}$ بدست می آید. چنانچه پیداست مقدار $\bar{\phi}_{b0}$ به دست آمده از این طریق نزدیک به مقدار بدست آمده از شکل ۳-۱۹ بوده و علاوه بر این، مقدار بدست آمده برای A^* نیز تا حد زیادی به مقدار واقعی آن یعنی $8/16 \text{ A.cm}^{-2}\text{K}^{-2}$ نزدیک است. بدین ترتیب این نتایج می تواند موید نظریه وجود یک توزیع گوسی برای ارتفاع سد در محل فصل مشترک فلز / نیمرسانا باشد.

و: اثر پارامتر ایده آلی دما T_0

همانطور که در بخش ۸-۱ گفته شد تغییرات n به دما می تواند از طریق اثر T_0 با رابطه (۳۲-۱) بیان شود. شکل ۲۲-۳ نمودار تغییرات nT بر حسب T را نشان می دهد که خط مستقیمی است که با خط $n=1$ موازی نمی باشد. این موضوع می تواند نشانگر وجود میدان هایی در لبه های اتصال لایه ها در نمونه باشد [۲۰]. مقادیر n_0 و T_0 را می توان به ترتیب از عرض از مبدا و شیب خط برازش شده بر داده ها با انطباق داده ها به روش کمینه سازی مجموع مربعات بدست آورد. این مقادیر به ترتیب عبارتند از : 0.67 و 190.1 K که نشان دهنده میزان وابستگی دمایی ضریب ایده آلی است که از مشخصه های مهم دیود های شاتکی به حساب می آید.



شکل ۲۲-۳: نمودار تغییرات nT بر حسب دما مربوط به دیود شاتکی $Au/SiO_2/n-GaAs$

ه: تعیین مقاومت متوالی دیود (R_S)

همانگونه که در بخش ۷-۱ گفته شد با استفاده از روش چانگ وبه کمک رابطه (۳۶-۱) می توان مقاومت متوالی قطعه را که سبب یک افت ولتاژ در شرایط بایاس مستقیم می شود. این کار از طریق تعیین شیب نمودار $dV/d \ln(I)$ بر حسب I امکان پذیر است. نتیجه این محاسبات در جدول ۷-۳ نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می شود مقاومت متوالی با افزایش دما به طور کلی روندی

کاهش می‌دهد. این رفتار می‌تواند ناشی از این باشد که با افزایش دما تراکم حاملها افزایش پیدا کرده و در نتیجه رسانندگی افزایش می‌یابد [۳۲].

جدول ۳-۷: مقادیر مقاومت متوالی در دیود مورد بررسی در دماهای مختلف

T(K)	۳۰۰	۳۲۵	۳۵۰	۳۷۵	۴۰۰
$R_S(\Omega)$	۱/۹۷	۱/۹۹	۱/۷۰	۲/۸۲	۱/۸۲

نکته قابل توجه اینکه مقادیر به دست آمده از محاسبات ما مربوط به ضریب ایده آلی، ارتفاع سد و مقاومت متوالی در این دیود با داده‌های حاصل از یافته‌های آلتونتاس و همکاران [۳۳]، جدول ۳-۸، هماهنگی نزدیکی وجود دارد.

جدول ۳-۸: داده‌های تجربی بدست آمده از مشخصه جریان - ولتاژ در دیود ماس Au/SiO₂/n-GaAs گزارش شده توسط آلتونتاس و همکاران [۳۳].

Temperature (K)	n	ϕ_{Bo} (eV)	$R_s (H(I))$ (Ω)	$R_s (dV/d\ln(I))$ (Ω)
300	1.33	0.81	1.56	1.65
325	1.27	0.84	1.47	1.72
350	1.20	0.87	1.39	1.81
375	1.15	0.91	1.71	2.05
400	1.12	0.93	1.32	1.96

نتیجه گیری:

در این تحقیق ما به تحلیل نظری داده های برگرفته از مشخصه I-V دیود ماس با ترکیب لایه ای Au/SiO₂/n-GaAs در دماهای مختلف پرداختیم و پارامتر های فیزیکی دخیل در این مشخصه را بر حسب تابعی از دما مورد بررسی قرار دادیم. تحلیل نظری داده ها نشان داد که نحوه تغییرات ارتفاع سد پتانسیل با روند تغییرات گاف نواری GaAs هماهنگی ندارد. همچنین برای بدست آوردن ارتفاع سد از معادله تعمیم یافته جریان اشباع معکوس در شرایط حضور لایه عایق (لایه اکسید سیلیکون) استفاده شد. نتایج بدست آمده روندی کاهشی را با افزایش دمای قطعه با شیب منفی به مقدار eV/K^{-۴} × ۱۰^{-۴} نشان می دهد که از هماهنگی خوبی با شیب منفی گاف نواری GaAs به مقدار eV/K^{-۴} × ۱۰^{-۴} برخوردار می باشد.

تحلیل نظری داده ها نشان داد که رفتار الکتریکی قطعه مورد نظر به خوبی با نظریه مبتنی بر ناهمگونی توزیع ارتفاع های سد پتانسیل در محل فصل مشترک سازگار می باشد. موید این نتیجه گیری محاسبات مربوط به تعیین مقدار ثابت موثر ریچاردسون (A*) و همچنین ارتفاع میانگین ($\bar{\phi}_{b0}$) با استفاده از فرضیات ارتفاع سد پتانسیل ثابت و نیز ارتفاع سد ناهمگون بر پایه توزیع گوسی است. در این محاسبات مقدار انحراف استاندارد ۰/۱۳ V بدست آمد که نشانگر کیفیت خوب سطح مشترک است.

۳-۴: بررسی خواص الکتریکی دیود شاتکی Au/n-GaN ساخته شده به روش

تبخیر شیمیایی

ما در این بخش به طور نظری به بررسی مشخصه جریان - ولتاژ یک نمونه از دیود شاتکی Au/n-GaN که توسط بنامارا و همکاران [۳۶] در محدوده دمایی ۸۰-۳۰۰ K گزارش شده است بر مبنای نظریه گسیل گرمایونی تعمیم یافته مبتنی بر وجود یک توزیع ارتفاع سد پتانسیل در محل سطح مشترک مورد تجزیه و تحلیل قرار دادیم که مدلی کاملتر در مقایسه با مدل ارتفاع سد پتانسیل ثابت می باشد که توسط محقق در مقاله خود به کار گرفته است.

نمونه مورد مطالعه متشکل از یک لایه نیمرسانای GaN نوع n با ضخامت $4\mu\text{m}$ و با تراکم حامل

های تقریباً 10^{17}cm^{-3} روی زیر لایه سفایر تهیه شده که با اتصالی از طلا با قطر 0.6mm و با

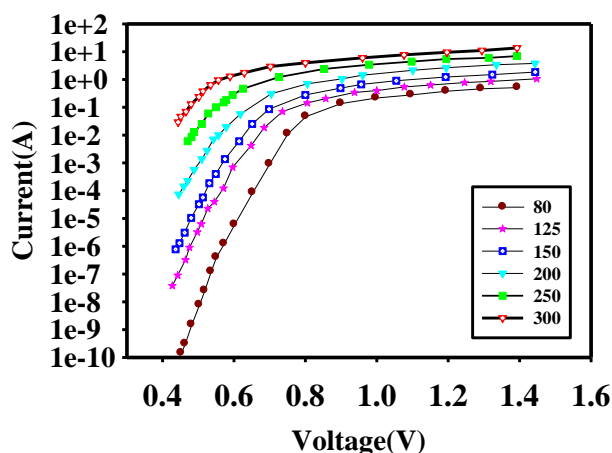
ضخامت حدود 1000Å به روش تبخیر شیمیایی بر روی آن پوشیده شده است.

بررسی وابستگی دمایی مشخصه های جریان - ولتاژ دیود شاتکی در شرایط

بایاس مستقیم

شکل ۳-۲۳ مشخصه نیم لگاریتمی I-V دیود شاتکی Au/n-GaN را تحت شرایط دمایی مختلف

(۸۰-۳۰۰ K) نشان می دهد.



شکل ۳-۲۳: داده های تجربی مشخصه I-V در شرایط بایاس مستقیم در دیود Au/n-GaN در دماهای مختلف [۳۶].

همانطور که ملاحظه می شود در نواحی جریان های پایین که اثرات مقاومت متوالی ناچیز است و نمودار نیمه لگاریتمی جریان - ولتاژ به صورت خطی است و با افزایش ولتاژ به دلیل اثر مقاومت متوالی این نمودار از حالت خطی خارج می شود. در اینجا به بررسی پارامتر های مهم مربوط به دیود های شاتکی از جمله ضریب ایده آلی، ارتفاع سد شاتکی، مقاومت متوالی و.... خواهیم پرداخت.

الف: تعیین جریان اشباع معکوس (I_0) و ضریب ایده آلی (n)

طبق نظریه گسیل گرمایونی بخش (۱-۴-۱)، جریان عبوری از دیود شاتکی در شرایط بایاس

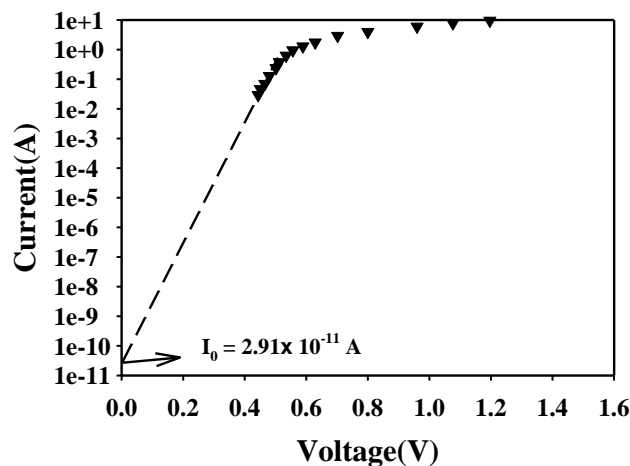
مستقیم در حالت $V > \frac{3kT}{q}$ از رابطه (۱-۸) پیروی می کند، که در آن I_0 جریان اشباع معکوس است

که از معادله (۱-۹) محاسبه می شود. این کمیت را می توان از طریق برون یابی و تعیین عرض از

مبدا در ناحیه خطی نمودار نیم لگاریتمی جریان - ولتاژ به ازای $V=0$ به دست آورد. در شکل ۳-۲۴

به عنوان نمونه جریان اشباع معکوس را در شرایط بایاس مستقیم برای مشخصه جریان - ولتاژ دیود

Au/n-GaN در دمای ۳۰۰ K تعیین کرده ایم.



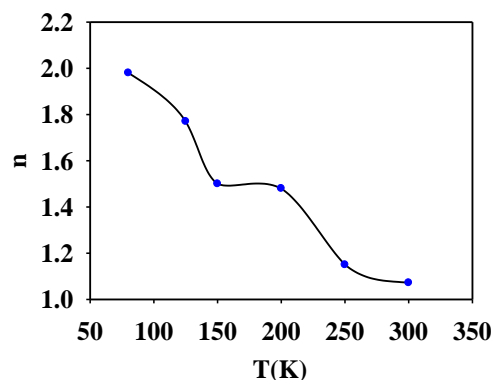
شکل ۳-۲۴: مشخصه جریان - ولتاژ دیود سد شاتکی Au/n-GaN در دمای ۳۰۰ K که موقعیت جریان اشباع

معکوس (I_0) در این نمونه از طریق برون یابی داده ها در ناحیه خطی داده ها نشان داده شده است.

همچنین مقادیر ضریب ایده آلی (n) را می توان به کمک رابطه (۱-۱۰) بدست آورد. مقادیر محاسبه شده I_0 و n در جدول ۳-۹ ارائه گردیده است. شکل ۳-۲۵ نمودار تغییرات n بر حسب T را نشان می دهد. چنانچه پیداست مقادیر ضریب آلی برای این نمونه با افزایش دما در حال کاهش است و از ۱/۹۸ در دمای 80 K به ۱/۰۷ در دمای 300 K کاهش پیدا کرده است که با توجه به نتایج گزارش شده در مقالات امری قابل انتظار است. برای یک دیود ایده آل انتظار می رود $n=1$ باشد. اما مقادیر محاسبه شده در این نمونه در دماهای پایین همواره بزرگتر از یک بوده که می تواند ناشی از توزیع عرضی ارتفاع سد شاتکی در سطح مشترک فلز - نیمرسانا باشد [۳۱].

جدول ۳-۹: مقادیر ضریب ایده آلی و جریان اشباع معکوس در نمونه مورد بررسی در دماهای مختلف.

T (K)	n	$I_0(A)$
80	1/98	$1/26 \times 10^{-25}$
125	1/77	$2/9 \times 10^{-20}$
150	1/50	$2/3 \times 10^{-17}$
200	1/48	$1/39 \times 10^{-13}$
250	1/15	$2/72 \times 10^{-11}$
300	1/07	$2/91 \times 10^{-11}$



شکل ۳-۲۵: تغییرات دمایی ضریب ایده آلی محاسبه شده برای دیود مورد بررسی.

ب: تعیین ارتفاع سد شاتکی

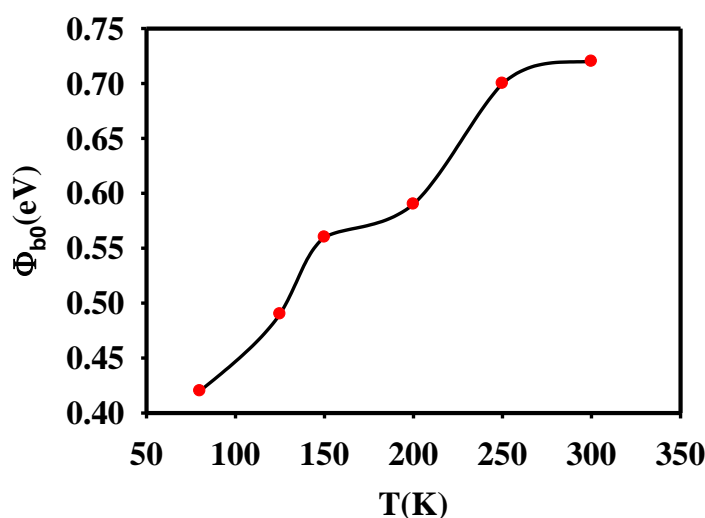
در دیود های شاتکی روش های متفاوتی برای تعیین ارتفاع سد (ϕ_{b0}) وجود دارد که در ادامه به بررسی آن می پردازیم.

روش اول: تعیین ارتفاع سد شاتکی با استفاده از مشخصه جریان-ولتاژ:

همانگونه که در بخش (۱-۴-۱) اشاره شد با استفاده از مقادیر جریان اشباع معکوس (I_0) ارتفاع سد پتانسیل در شرایط بایاس صفر (ϕ_{b0}) از رابطه (۱-۱۱) قابل محاسبه است. نتیجه این محاسبات در جدول ۱۰-۳ و همچنین شکل ۳-۲۶ ارائه گردیده است. چنانچه پیداست ارتفاع سد برای این نمونه از 0.39 eV (در دمای 100 K) به 0.94 eV (در دمای 350 K) افزایش پیدا کرده است. این نحوه تغییرات افزایشی سد پتانسیل با توجه به روند رو به کاهش گاف نواری GaN با افزایش دما که از رابطه وارثنی (۱-۱۴) تبعیت می کند امری غیر عادی به نظر می رسد.

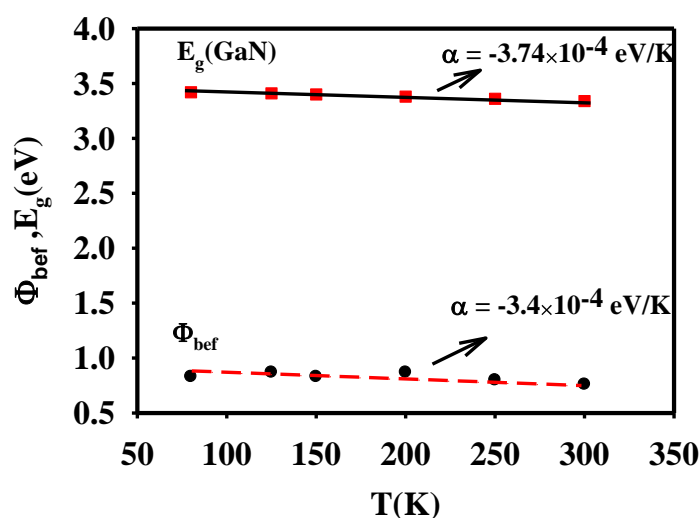
جدول ۱۰-۳: تغییرات دمایی ارتفاع سد شاتکی (ϕ_{b0}) و ارتفاع سد موثر (ϕ_{bef})

T (K)	ϕ_{b0} (eV)	ϕ_{bef} (eV)
۸۰	۰/۴۲	۰/۸۳
۱۲۵	۰/۴۹	۰/۸۷
۱۵۰	۰/۵۶	۰/۸۳
۲۰۰	۰/۵۹	۰/۸۷
۲۵۰	۰/۷	۰/۸
۳۰۰	۰/۷۲	۰/۷۶



شکل ۳-۲۶: تغییرات دمایی ارتفاع سد شاتکی (Φ_{b0}) در نمونه مورد بررسی.

این رفتار غیر عادی چنانچه توسط کرکوت و همکاران [۳۷] در نمونه Cr/n-GaAs مورد مطالعه قرار گرفته است به ناهمگونی عرضی در بزرگی ارتفاع سد نسبت داده شده است که متاثر از مرز دانه ها، نواقص شبکه ای و حضور فازهای متفاوت در لایه بس بلوری فلزی در محل فصل مشترک با نیمرسانا است [۳۵]. با مدل ارتفاع سد در حالت های تراز مسطح در شرایط تعادل گرمایی نیز می توان ارتفاع سد را بدست آورد که موسوم به ارتفاع سد موثر است و همانگونه که در بخش ۱-۴-۱ گفته شد از رابطه (۱-۱۵) محاسبه می شود. این رابطه نشان می دهد که ارتفاع سد موثر با تقریب خوبی به صورت خطی با دما تغییر می کند. با توجه به رابطه (۱-۱۷) ارتفاع سد در دمای صفر کلوین ($\phi_b(0K)$) و α ضریب دمایی ارتفاع سد پتانسیل به ترتیب به کمک عرض از مبدا و شیب نمودار Φ_{bef} بر حسب T در شکل ۳-۲۷ قابل محاسبه اند. این مقادیر به ترتیب عبارتند از: 0.88 eV و $3/4 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$. جالب توجه آنکه چنانچه انتظار می رود روند تغییرات سد پتانسیل بدست آمده دارای شیب منفی بوده که با روند تغییرات گاف نواری GaN (با ضریب دمایی $3/74 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$ -) مبتنی بر معادله (۱-۱۴) در گستره دمایی مورد بررسی که در شکل ۳-۲۷ با مربع های سیاه نشان داده شده اند هماهنگی نزدیکی دارد.



شکل ۳-۲۷: وابستگی دمایی ارتفاع سد شاتکی موثر بر دیود Au/n-GaN به همراه تغییرات دمایی گاف نواری GaN

در گستره دمایی ۸۰-۳۰۰ K

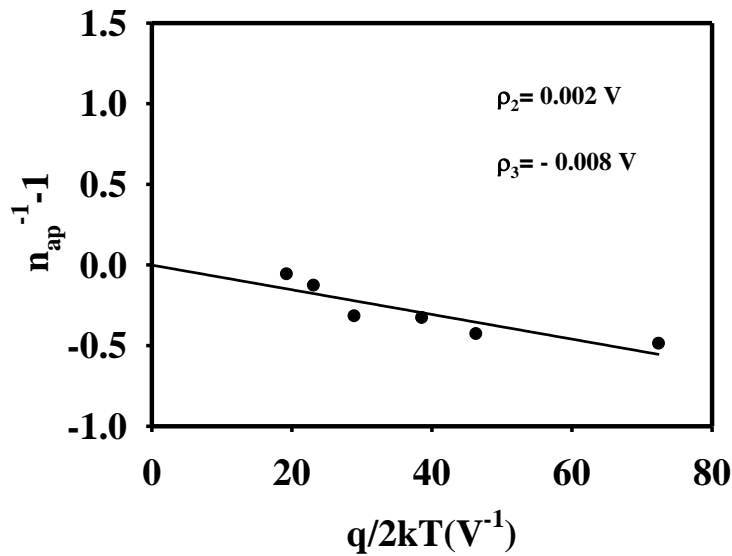
روش دوم: تعیین ارتفاع سد پتانسیل ناهمگن با استفاده از رابطه تعمیم یافته

گسیل گرمایونی

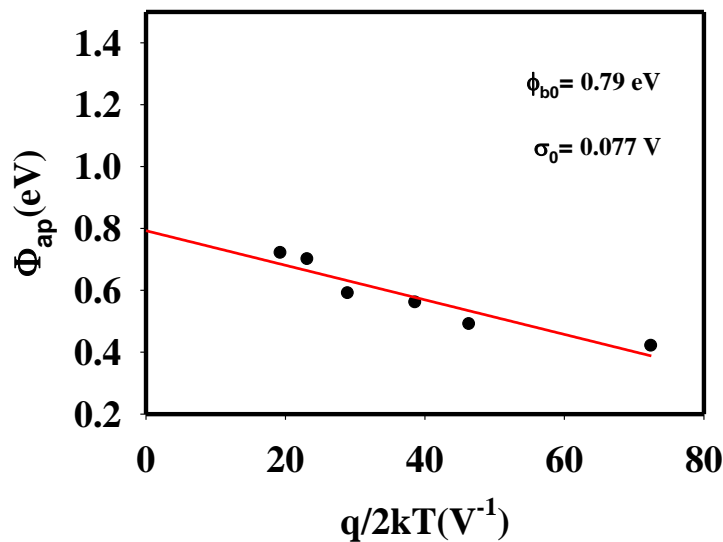
همانگونه که در بخش (۱-۴-۲) اشاره شد وجود ناهمگنی در ارتفاع سد را می توان به وجود ناراستیها در فصل مشترک نسبت داد. به منظور تحلیل دقیق تر این پارامتر (Φ_{b0}) می توان از مدل افت و خیز پتانسیل با فرض یک توزیع پیوسته از سد ها در فصل مشترک به صورت یک توزیع گوسی با ارتفاع سد میانگین $\bar{\Phi}_{b0}$ و انحراف معیار استاندارد σ_0 استفاده کرد.

به منظور تعیین ارتفاع سد ناهمگن، مقادیر بدست آمده برای ضریب ایده آلی و ارتفاع سد شاتکی Φ_{b0} در جداول ۳-۷ و ۳-۸ را متناظر با مقادیر ارتفاع سد ظاهری (Φ_{ap}) و ضریب ایده آلی (n_{ap}) در روابط (۱-۲۲) و (۱-۳۰) قرار می دهیم. شکل ۳-۲۸ تغییرات دمایی ضریب ایده آلی ظاهری مبتنی بر معادله (۱-۳۰) را برحسب عکس دما نشان می دهد. چنانچه انتظار می رود داده ها بر روی خط مستقیم قرار دارند به طوری که مقادیر برازشی وابسته از طریق عرض از مبدا و شیب نمودار به ترتیب $\rho_2 = 0.0027$ و $\rho_3 = -0.008$ V بدست می آید. همچنین شکل ۳-۲۹ نمودار تغییرات Φ_{ap}

برحسب $q/2kT$ را نشان می دهد که قابل برازش با خط مستقیمی است که از شیب و همچنین عرض از مبدا آن می توان به ترتیب $\sigma_0 = 0.077 \text{ V}$ و $\phi_{b0} = 0.79 \text{ eV}$ را تعیین کرد. در حقیقت مقدار σ_0 نشانگر میزان انحراف بزرگی سد پتانسیل شاتکی در محل فصل مشترک از مقدار میانگین آن و در نتیجه میزان ناهمگنی آن در سطح دیود مورد نظر می باشد.



شکل ۲۸-۳: تغییرات ضریب ایده آلی بر حسب $q/2kT$ در دیود شاتکی Au/n-GaN مبتنی بر توزیع گوسی ارتفاع سد



شکل ۲۹-۳: تغییرات ارتفاع سد بر حسب $q/2kT$ در دیود شاتکی Au/n-GaN مبتنی بر توزیع گوسی ارتفاع سد

ج: تعیین ارتفاع سد شاتکی میانگین و بزرگی ضریب ریچاردسون با استفاده از

نمودار ریچاردسون

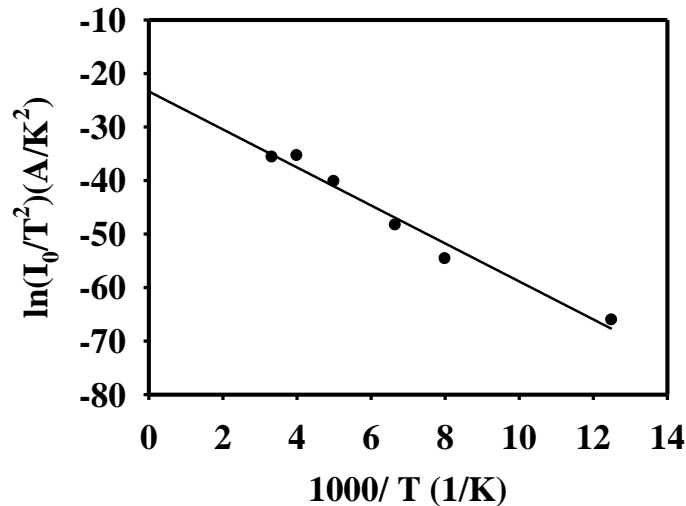
به منظور دریافت اعتبار این نظریه تعمیم یافته و راستی آزمایی آن می توان با استفاده از مقادیر

جریان معکوس این نمونه در دماهای مختلف بر حسب عکس دما و با توجه به معادله (۱-۱۲) در

بخش (۱-۴-۱) (موسوم به نمودار ریچاردسون) به شیوه ای مستقل با روش یاد شده قبلی به محاسبه

ارتفاع سد و نیز بزرگی ضریب ریچاردسون اقدام نمود. نتیجه این محاسبات در شکل ۳-۳۰ نشان داده

شده است.



شکل ۳-۳۰: نمودار ریچاردسون وابسته به تغییرات $\ln(I_0/T^2)$ بر حسب $1000/T$ مربوط به دیود شاتکی Au/n-GaN

با استفاده از عرض از مبدا این نمودار ضریب ریچاردسون و به کمک شیب آن ارتفاع سد به ترتیب

برابر با $A^* = 2.74 \times 10^{-5} \text{ A.cm}^{-2}\text{K}^{-2}$ و $\phi_{b0} = 3.15 \times 10^{-7} \text{ eV}$ به دست می آید. چنانچه ملاحظه می

شود مقدار A^* بدست آمده از مقدار واقعی آن که برابر $26/4 \text{ A.cm}^{-2}\text{K}^{-2}$ گزارش شده است بسیار

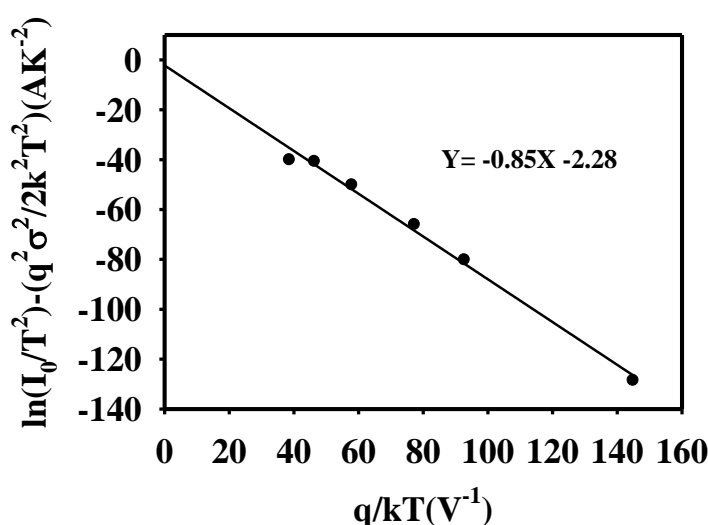
کوچکتر می باشد. این انحراف در مقدار ضریب موثر ریچاردسون می تواند ناشی از در نظر گرفتن

ارتفاع سد ثابت در محل سطح مشترک فلز / نیمرسانا باشد.

د: تعیین ارتفاع سد شاتکی میانگین و بزرگی ضریب ریچاردسون با استفاده از

نمودار اصلاح شده ریچاردسون

انحراف در مقدار ارتفاع سد میانگین و بزرگی ضریب ریچاردسون به دست آمده را می توان با فرض توزیع گوسی ارتفاع سد و با توجه به انحراف معیار به دست آمده در محاسبات قبلی و رسم نمودار اصلاح شده ریچاردسون بر اساس رابطه (۳۱-۱) و شکل ۳-۳۱ برطرف کرد.

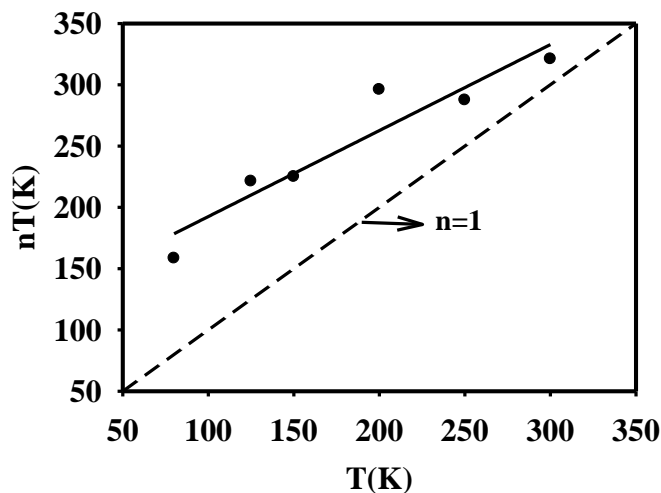


شکل ۳-۳۱: نمودار اصلاح شده ریچاردسون مربوط به دیود شاتکی Au/n-GaN

همانگونه که مشاهده می شود نمودار بدست آمده خط مستقیمی است که شیب و عرض از مبدا آن به ترتیب متناظر با: $\phi_{b0}^- = 0.185 \text{ eV}$ و $A^* = 32/52 \text{ A.cm}^{-2}\text{K}^{-2}$ است. چنانچه پیداست مقدار ϕ_{b0}^- به دست آمده از این طریق بسیار نزدیک به مقدار بدست آمده از شکل ۳-۲۹ بوده، علاوه بر این مقدار بدست آمده برای A^* نیز تا حد زیادی به مقدار واقعی آن یعنی $26/4 \text{ A.cm}^{-2}\text{K}^{-2}$ نزدیک است. بدین ترتیب این نتایج می تواند موید نظریه وجود یک توزیع گوسی برای ارتفاع سد در محل فصل مشترک فلز / نیمرسانا باشد.

و: اثر پارامتر ایده آلی دما T_0

همانطور که در بخش ۱-۵ گفته شد تغییرات n به دما می تواند از طریق اثر پارامتر T_0 با رابطه (۳۲-۱) بیان شود. شکل ۳-۳۲ نمودار تغییرات nT بر حسب T را نشان می دهد که خط مستقیمی است که با خط $n=1$ موازی نمی باشد. این موضوع می تواند نشانگر وجود میدان هایی در لبه های اتصال لایه ها در نمونه باشد [۲۰]. مقادیر n_0 و T_0 را می توان به ترتیب از عرض از مبدا و شیب خط برازش شده بر داده ها با انطباق داده ها به روش کمینه سازی مجموع مربعات بدست آورد. این مقادیر به ترتیب عبارتند از: 0.7 و $122/31$ K که نشان دهنده میزان وابستگی دمایی ضریب ایده آلی است که از مشخصه های مهم دیود های شاتکی به حساب می آید.



شکل ۳-۳۲: نمودار تغییرات nT بر حسب دما مربوط به دیود شاتکی Au/n-GaN

ه: تعیین مقاومت متوالی دیود (R_S)

همانگونه که در بخش ۱-۶ گفته شد با استفاده از روش چانگ و از رابطه (۳۶-۱) می توان مقاومت متوالی قطعه را که سبب یک افت ولتاژ در شرایط بایاس مستقیم می شود بدست آورد. این کار از طریق تعیین شیب نمودار $dV/d \ln(I)$ بر حسب I امکان پذیر است. نتیجه این محاسبات در جدول ۳-۱۱ نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می شود مقاومت متوالی با افزایش دما به طور

کلی روندی کاهشی دارد. این رفتار می تواند ناشی از این باشد که با افزایش دما تراکم حاملها افزایش پیدا کرده و در نتیجه رسانندگی افزایش می یابد [۳۲].

جدول ۱۱-۳: مقادیر مقاومت متوالی در دیود مورد بررسی در دماهای مختلف

T(K)	۸۰	۱۲۵	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰
$R_S(\Omega)$	۱/۵۸	۰/۷۸	۰/۴۳	۰/۲۴	۰/۱۲	۰/۰۵

نکته قابل توجه اینکه مقادیر به دست آمده از محاسبات ما مربوط به ضریب ایده آلی، ارتفاع سد و مقاومت متوالی در این دیود با داده های حاصل از یافته های بنامارا و همکاران [۳۶]، جدول ۱۲-۳، هماهنگی نزدیکی وجود دارد.

جدول ۱۲-۳: داده های تجربی بدست آمده از مشخصه جریان - ولتاژ در دیود Au/n-GaN گزارش شده توسط

بنامارا و همکاران [۳۶].

T(K)	۸۰	۳۰۰
n	۱/۸۱	۱/۱۸
$\phi_{b0}(eV)$	۰/۴۹	۰/۸۴
$I_0(A)$	$۱/۳۲ \times ۱۰^{-۲۵}$	$۱/۹ \times ۱۰^{-۱۱}$

نتیجه گیری:

در این تحقیق ما به تحلیل نظری داده های برگرفته از مشخصه I-V دیود با ترکیب لایه ای Au/n-GaN در دماهای مختلف پرداختیم و پارامترهای دخیل در این مشخصه ها را بر حسب تابعی از دما مورد بررسی قرار دادیم. تحلیل نظری داده ها نشان داد که نحوه تغییرات ارتفاع سد پتانسیل با روند تغییرات گاف نواری GaN هماهنگی ندارد. این رفتار غیر عادی به ناهمگنی های ارتفاع سد نسبت داده شد. همچنین با استفاده از مدل ارتفاع سد تراز سطح تحت تاثیر میدان الکتریکی عبوری در محل اتصال موسوم به ارتفاع سد موثر، نتایج بدست آمده روندی کاهشی را با افزایش دمای قطعه با شیب $3/4 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$ را نشان می دهد که از هماهنگی خوبی با شیب منفی گاف نواری GaN به مقدار $3/74 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$ برخوردار است. همچنین تحلیل نظری داده ها نشان داد که رفتار الکتریکی قطعه مورد نظر بخوبی با نظریه مبتنی بر ناهمگونی توزیع ارتفاع های سد پتانسیل در محل فصل مشترک سازگار می باشد. موبد این نتیجه گیری محاسبات مربوط به تعیین مقدار ثابت موثر ریچاردسون (A^*) و همچنین ارتفاع میانگین (ϕ_{b0}) با استفاده از فرضیات ارتفاع سد پتانسیل ثابت و نیز ارتفاع سد ناهمگون بر پایه توزیع گوسی است. در این محاسبات مقدار انحراف استاندارد و ضریب دمایی ارتفاع سد به ترتیب 0.077 V و $3/4 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$ بدست آمد.

مراجع

[۱] اس. ام زی، (۱۹۳۶)، ” فیزیک و تکنولوژی قطعات نیمرسانا “، ترجمه غلامحسین سدیر عابدی، چاپ چهارم، مرکز نشر دانشگاه امام رضا (ع)، مشهد.

[2] <http://arr-elec.blogfa.com>

[3] www.futureelectronics.com

[4] Yanamangandla, Srikanth, (2008), Master's Theses “Synthesis and Characterization of Schottky Diodes on n-Type CdTe Nanowires Embedded in Porous Alumina Templates” University of Kentucky.

[5] V. P. Singh, O. M. Erikson 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

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

[7] H. Korkut, N. Yildirim, A. Turut, H. Dogan, (2009), “Analysis of current–voltage–temperature characteristics and T_0 anomaly in Cr/n-GaAs Schottky diodes fabricated by magnetron sputtering technique” *Materials Science and Engineering B*, **157**, 48–52

[8] H.C. Card, E.H. Rhoderick, (1971), “Studies of tunnel MOS diode”; *Appl. Phys.* **4**, 1589.

[9] S.M. Sze, K. Ng, (2006) “Physics of Semiconductor Devices”, third ed., Wiley, New York

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

[11] Y. Xi, E. F. Schubert, (2004), “Junction-temperature measurement in GaN ultraviolet light-emitting diodes using diode forward voltage method” *Applied physics letters*. **85**, 12

[12] S. Altindal, I. Dokme, M.M. Bulbul, N. Yalcin, T. 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

[13] M.K. Hudait , P. Venkateswarlu, S.B. Krupanidhi, (2001), “ Electrical transport characteristics of Au/n-GaAs Schottky diodes on n-Ge at low temperatures” *Solid-State Electronics*, **45** ,133-141

- [14] L. F. Wagner, R. W. Young and A. Sugeran, (1983), "A Note on the Correlation between the Schottky Diode Barrier Height and the Ideality Factor as Determined from I-V Measurements" *IEEE Electron Device Letters*, **4**, 320-322
- [15] J. H. Werner and H. H. Guttler, (1991), "Barrier Inhomogeneities at Schottky Contacts" *Journal of Applied Physics*, **69**,1522-1533
- [16] P. Durmus, S. Altindal, A. Tataroglu, (2010), "Extraction of series resistance and interface states in Au/n-Si(111) Schottky barrier diodes (SBDs) with native insulator layer using I-V-T and C-V-T measurement methods" *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*,**12**,1472-1478
- [17] آر تور بایزر، (۱۳۸۶)، مفاهیم فیزیک جدید، ترجمه دکتر حسین عشقی، انتشارات دانشگاه شاهرود، شاهرود
- [18] M. Siva Pratap Reddy, A. Ashok Kumar, V. Rajagopal Reddy,(2011), "Electrical transport characteristics of Ni/Pd/n-GaN Schottky barrier diodes as a function of temperature" *Thin Solid Films*, **519**, 3844–3850
- [19] S. K. Cheung and N. W. Cheung, (1986), "Extraction of Schottky diode parameters from forward current voltage characteristics" *Appl.Phys.Lett*,**49**,85-87
- [20] Durmus_ Ali Aldemir, Ali Kokce, Ahmet Faruk Ozdemir , (2012), "Temperature dependent ideality factor and barrier height of Ni/n-GaAs/In Schottky diodes " *Microelectronic Engineering*, **98**, 6–11
- [21] S. Altundal, 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
- [22] Ashish Kumar a , Seema Vinayak b, R. Singh ,(2013), "Micro-structural and temperature dependent electrical characterization of Ni/GaN Schottky barrier diodes " *Current Applied Physics* ,**13**, 1137-1142
- [23] B. Prasanna Lakshmi, M. Siva Pratap Reddy, A. Ashok Kumar, V. Rajagopal Reddy, (2012), "Electrical transport properties of Au/SiO₂/n-GaN MIS structure in a wide temperature range " *Current Applied Physics*, **12**, 765-772
- [24] S. Karatas, S.Altindal,M.Cakar, (2005), "Current transport in Zn/p-Si(100) Schottky barrier diodes at high temperatures " *Physica B*, **357**,386-397
- [25] S.Zhu,C.Detavernier,R.L.Vanmerhaeghe, F.Cardon, G.P.Ru, X.P.Qu,B.Z.Li, (2000), "Electrical characteristics of CoSi₂/n-Si(1000) Schottky barrier contacts formed by solid state reaction " *Solid-State Electronics* , **44**,1807-1818

- [26] M. Guzzi, E. Grilli, S. Oggioni, J.L. Staehli, C. Bosio, L. Pavesi, (1992), “Indirect-energy-gap dependence on Al concentration in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$ as alloys ” *Phys. Rev. B*, **45**,951-955
- [27] P. Lautenschlager, M. Garriga, S. Logothetidis, M. Cardona, (1987), “ Interband critical points of GaAs and their temperature dependence ” *Phys.Rev.B*, **35**, 9174-9189.
- [28] D. E. Yildiz, S. Altindal, and H. Kanbur, (2008), “Gaussian distribution of inhomogeneous barrier height in Al/SiO₂/p-Si Schottky diodes” *Journal of Applied Physics*, **103**, 124502.
- [29] Seung-Yong Lee, Chan-Oh Jang, Jung-Hwan Hyung, Tae-Hong Kim, Sang-Kwon Lee ,(2008), “High-temperature characteristics of GaN nano-Schottky diodes” *Physica E*,**40**, 3092– 3096.
- [30] Y.J. Lin, (2010)), “ Origins of the temperature dependence of the series resistance, ideality factor and barrier height based on the thermionic emission model for n-type GaN Schottky diodes ” *Thin Solid Films* ,**519**, 829.
- [31] Ilbige 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.
- [32] Wen -Chang Huang, Tien-Chai Lin , Chia -Tsung , Yu-Huang Li, (2013), “ The electrical characteristics of Ni/n-GaSb Schottky diode” *Materials Science in Semiconductor Processing*, **16**, 418-423
- [33] H. Altuntas, S. Ozcelik, (2013), “The interface states and series resistance analyzing of Au/SiO₂/n-GaAs at high temperature ” *Jornal of Alloys and Compounds*, **577** , 143.
- [34] S. Altundal, S. Karadeniz, N. Tugluoglu, 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 Electronics* **47**, 1847.
- [35] 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.

[36] Z. Benamara, B. Akkal, A. Talbi, B. Gruzza,(2006), “Electrical transport characteristics of Au/n-GaN Schottky diodes ” *Materials Science and Engineering C*. **26**, 519.

[37] H. Korkut, N. Yildirim, A. Turut,(2009), “Temperature-dependent current-voltage characteristics of Cr/n-GaAs Schottky diodes ”*Microelectronics of Engineering*, **86**, 111.

Abstract

In this theoretical research work, we have investigated the temperature dependence of current-voltage (I-V) characteristics in some Schottky diodes including metal-semiconductor (MS) contacts in Au/n-GaN structure (grown by two different methods) and metal-oxide-semiconductor (MOS) contacts in Au/SiO₂/n-GaAs structure based on thermionic emission theory and its extended version. In low-voltage range, the applied analysis for finding the potential barrier height and the ideality factor is based on two approaches: the first one is based on the flat-band theory at the interface considering various potential barriers at different contact points due to the effect of the image forces; and the second one which is based on inhomogeneous lateral potential barriers at different points of the interface due to surface roughness and the presence of crystal defects.

In the studied samples it was revealed that by increasing the device temperature the ideality factor has a decreasing trend and the potential barrier height has an increasing trend. Through data analysis we found that in the first theory the thermal coefficient variations of the potential barrier is well compatible with that of the semiconductor band gap; and in the second theory, considering a Gaussian distribution for the lateral potential heights, the standard deviation (showing how much a quantity is distributed around the mean value) is an important parameter. Meanwhile we found a well compatibility between the values of the effective potential barrier in the first theory and the mean potential barrier (the peak Gaussian distribution) in the second one. In addition it is found that the second theory provides not only the preliminary theory results, but also it successfully predicts the effective Richardson coefficient in these junctions.

Keywords: Schottky diode, temperature dependence of I-V characteristics, thermionic emission theory, inhomogeneous barrier height model.



Shahrood University of Technology

Faculty of Physics

Master of Science Thesis

**A theoretical study on electrical properties of conductor –
semiconductor contacts**

By:

Zohreh Kordghasemi

Supervisor:

Dr. Hossein Eshghi

June 2014

