

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده فیزیک

دانشکده فیزیک

گرایش حالت جامد

بررسی نظری خواص الکتریکی لایه ها و نانوساختارهای اکسید روی و
قطعات وابسته

نگارش

محمد امیر عباسی

استاد راهنما

دکتر حسین عشقی

پایان نامه ارشد جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد

زمستان ۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد محمد امیرعباسی

تحت عنوان:

بررسی نظری خواص الکتریکی لایه ها و نانوساختارهای اکسید روی و
قطعات وابسته

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد
مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
		نام و نام خانوادگی :	
		نام و نام خانوادگی :	
		نام و نام خانوادگی :	

تقدیم به

دو موجود مقدس، پدرم و مادرم

پروردگارا: این محال است که پدر و مادرم بتوانند پاداش زحمت های خود را از من دریافت بدارند و

محال است که من بتوانم در برابر زحمت ها و متاعبشان پاداش و مزدی ادا کنم و آن چنان که

حقشان اقتضا کند، به خدمتشان برخیزم.

پروردگارا: پدرم و مادرم را در جوار رحمت و عنایت خویش با سلامت و سعادت نگاه دار.

تشکر و قدردانی

حال که به لطف خداوند یکتا این پایان نامه به اتمام رسیده است ، بر خود لازم می دانم از زحمات و توجه دکتر حسین عشقی، استاد راهنمای محترم، کمال تشکر را داشته باشم که با راهنمایی های راه گشای خود پیمودن مسیر را هموار کردند.

محمد امیر عباسی

زمستان ۹۰

تعهد نامه

اینجانب محمد امیرعباسی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته فیزیک - حالت جامد دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی نظری خواص الکتریکی لایه ها و نانوساختارهای اکسید روی و قطعات وابسته تحت راهنمایی دکتر حسین عشقی. متعهد می شوم .

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

اکسید روی (ZnO) با ترکیب عناصر گروه II-VI در زمرة نیمرساناهای با گاف نواری مستقیم و پهن (۳/۳۷eV) بشمار می آید. این ویژگی اهمیت زیادی نه تنها در قطعات الکترونیکی مانند ترانزیستورهای اثر میدانی در قطعات اپتوالکترونیکی، نظیر دیودهای نورگسیل و دیود لیزرهای آبی و بنفش، همچنین آشکارسازهای نوری نیز دارد. به کارگیری این ماده در این قطعات مستلزم تهیه آن به صورت تک بلوری می باشد. این موضوع همچنان مسئله ای است که در مجامع بین المللی مورد توجه بسیار است.

در این رساله ابتدا با توجه به داده های گزارش شده مربوط به خواص ترابری الکتریکی در این ماده به طور نظری به تاثیر روش رشد بر خواص ترابری الکتریکی این ماده در شرایط کپه ای خالص و آرایش شده (ZnO:P) پرداخته ایم. علاوه بر این به بررسی داده های تجربی گزارش شده در ساختارهای ناهمگون ZnMnO/ZnO و ZnMgO/ZnO پرداخته و علل رفتاری خواص الکتریکی سیستم های گاز الکترون دو بعدی (2DEG) را در این نانو ساختارها مورد بررسی قرار داده ایم. لازم به ذکر است که ساختار اول با توجه به میزان پایین منیزیم به کار گرفته شده در ترکیب بندی آن، موسوم به نیمرسانای مغناطیسی رقیق شده، علاوه بر کاربردهای الکتریکی دارای کاربردهای مغناطیسی نیز می باشد و ساختار دوم با توجه به تحرک بالای گاز الکترونی در ساخت ترانزیستورهای الکترونی با تحرک بالا (HMTs) کاربرد دارد. سرانجام در این تحقیق به بررسی خواص الکتریکی ترانزیستورهای اثر میدانی¹ در شرایط لایه نازک و نانوسیم ZnO پرداخته ایم. در این مطالعه تاثیر دی الکتریک یک و چند لایه ای و نیز ضخامت دی الکتریک دروازه مورد بررسی قرار گرفته است. در این بخش با توجه به ابعاد هندسی کانال رسانا نمونه ها براساس آثار کانال بلند و کانال کوتاه مورد بررسی قرار گرفته اند.

کلید واژه ها : اکسید روی، نیمرسانا، خواص ترابری الکتریکی، ساختارهای کپه ای، ساختارهای ناهمگون، ترانزیستورهای اثر میدانی، کانال بلند، کانال کوتاه

¹ . Field Effect Transistors

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- ۱ - محمد امیرعباسی، حسین عشقی، (۱۳۹۰) " بررسی نظری تاثیر روش رشد بر خواص ترابری الکتریکی در لایه های تک بلوری ZnO خالص "، هجدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران، شماره صفحه ۲۳۴ - ۲۳۱، دانشگاه تبریز.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول : مقدمه ای بر نیمرسانای اکسید روی

- ۱ - ۱ - تاریخچه ۲
- ۱ - ۲ - ساختار بلوری و پارامترهای شبکه ای ۳
- ۱ - ۲ - ۱ - مهندسی گاف نواری ۶
- ۱ - ۳ - ۱ - خواص الکتریکی ۶
- ۱ - ۳ - ۱ - سیستم های کپه ای ۶
- ۱ - ۳ - ۲ - سیستم های دو بعدی ۷
- ۱ - ۳ - ۳ - ترانزیستورهای لایه نازک ۸
- ۱ - ۴ - خاصیت پیزوالکتریک ۸
- ۱ - ۵ - کاربردها ۹

فصل دوم : مبانی نظری

- ۲ - ۱ - معادله خنثایی بار ۱۱
- ۲ - ۲ - سازوکارهای پراکندگی در نمونه های کپه ای ۱۲
- ۲ - ۲ - ۱ - پراکندگی های ذاتی فونونی ۱۴
- ۲ - ۲ - ۱ - ۱ - پراکندگی فونون های آکوستیکی ۱۴
- ۲ - ۲ - ۱ - ۲ - پراکندگی پیزوالکتریک ۱۵
- ۲ - ۲ - ۱ - ۳ - پراکندگی فونون های اپتیکی طولی قطبی ۱۶
- ۲ - ۲ - ۲ - پراکندگی های غیر ذاتی ۱۶

- ۱۶ - ۲ - ۲ - ۱ - پراکندگی ناخالصی یونیزه شده.....
- ۱۷ - ۲ - ۲ - ۲ - پراکندگی ناشی از دررفتگی ها.....
- ۱۷ - ۲ - ۲ - ۳ - پراکندگی مرز دانه.....
- ۱۸ - ۲ - ۲ - ۴ - پراکندگی نقایص بلوری.....
- ۱۸ - ۲ - ۲ - ۵ - تحرک جهشی.....
- ۱۹ - ۳ - ۲ - مدل دولایه ای اثر حال.....
- ۲۰ - ۴ - ۲ - سازوکارهای پراکندگی در نمونه های با گاز الکترون دویعدی (ساختارهای ناهمگون و چاه های کوانتومی).....
- ۲۰ - ۴ - ۱ - آرایش اصلاحی.....
- ۲۲ - ۴ - ۲ - سازوکارهای پراکندگی ذاتی.....
- ۲۲ - ۴ - ۲ - ۱ - پراکندگی فونون های آکوستیکی از طریق پتانسیل تغییر شکل.....
- ۲۳ - ۴ - ۲ - ۲ - پراکندگی پیزوالکتریک.....
- ۲۴ - ۴ - ۲ - ۳ - پراکندگی فونون های اپتیکی طولی قطبی.....
- ۲۴ - ۴ - ۳ - پراکندگی غیر ذاتی.....
- ۲۴ - ۴ - ۳ - ۱ - پراکندگی ناخالصی یونیده توسط بخشنده های راه دور.....
- ۲۵ - ۴ - ۳ - ۲ - پراکندگی ناخالصی یونیده توسط بارهای سطح مشترک.....
- ۲۶ - ۴ - ۳ - ۳ - پراکندگی دررفتگی.....
- ۲۶ - ۴ - ۴ - قانون وگارد.....
- ۲۷ - ۴ - ۵ - محاسبه سرعت فونون های آکوستیکی و طولی.....
- ۲۸ - ۵ - ۲ - مدل نظری مشخصه الکتریکی ترانزیستورهای اثر میدانی.....
- ۳۰ - ۵ - ۱ - ساختار TFT و عملکرد آن.....
- ۳۱ - ۵ - ۲ - مشخصه جریان - ولتاژ در TFT ایده آل.....

- ۳-۵-۳ - نحوه تعیین V_{on} در TFTها و تفاوت آن با V_T در ترانزیستورهای معمول ۳۴
- ۳-۵-۴ - تحرک کانال ۳۶
- ۳-۵-۵ - تاثیر تحرک وابسته به ولتاژ دروازه برای حامل های الکترونی در مدل TFT ایده آل ۳۷
- ۳-۵-۶ - ترانزیستور اثر میدانی نانوسیم ۴۱
- ۳-۵-۷ - آثار کانال کوتاه ۴۲

فصل سوم : خواص ترابری الکتریکی در نیمرسانای تک بلوری کپه ای

ZnO

- ۳-۱-۱ - تاثیر روش رشد بر خواص ترابری الکتریکی ۴۵
- ۳-۱-۱ - تحلیل داده های تجربی ۴۵
- ۳-۱-۱-۱ - مطالعه رفتار دمایی تراکم حاملی ۴۵
- ۳-۱-۱-۲ - مطالعه رفتار دمایی تحرک حاملی ۴۷
- ۳-۲-۳ - بررسی خواص ترابری الکتریکی لایه های ZnO:P تهیه شده به روش لیزر پالسی ۵۱
- ۳-۲-۱ - مطالعه رفتار دمایی تراکم حاملی ۵۲
- ۳-۲-۲ - مطالعه رفتار دمایی تحرک حاملی ۵۴

فصل چهارم : خواص ترابری الکتریکی در ساختارهای ناهمگون (دو

ZnO (بعدی

- ۴-۱-۱ - مطالعه خواص ترابری الکتریکی در ساختار ناهمگون ZnMgO/ZnO ۶۰
- ۴-۱-۱ - مطالعه رفتار دمایی تحرک حامل ۶۱
- ۴-۲-۲ - بررسی خواص الکتریکی ساختار ناهمگون ZnMnO/ZnO ۶۳
- ۴-۲-۱ - مطالعه رفتار دمایی تحرک حامل ۶۴

فصل پنجم : بررسی خواص الکتریکی ترانزیستورهای اثر میدانی (لایه

نازک و نانوسیم) ZnO

- ۵ - ۱ - ترانزیستورهای اثر میدانی - کانال بلند ۶۷
- ۵ - ۱ - ۱ - بررسی مشخصه جریان - ولتاژ در ترانزیستور لایه نازک ZnO ۶۷
- ۵ - ۱ - ۱ - محاسبه ولتاژ روشن قطعه ۶۹
- ۵ - ۱ - ۱ - ۲ - تحرک میانگین کانال ۷۳
- ۵ - ۱ - ۲ - اثر گذشت زمان بر خصوصیات الکتریکی ترانزیستور لایه نازک ZnO ۷۴
- ۵ - ۱ - ۲ - محاسبه ولتاژ روشن قطعه ۷۶
- ۵ - ۱ - ۲ - انطباق مدل نظری بر داده های تجربی $I_{DS} - V_{DS}$ ۷۷
- ۵ - ۱ - ۳ - افزایش کارایی ترانزیستور لایه نازک ZnO با کاربردن دی الکتریک دروازه چندلایه ای ۸۰
- ۵ - ۱ - ۳ - محاسبه ولتاژ روشن ۸۲
- ۵ - ۱ - ۳ - ۲ - انطباق مدل نظری بر داده های تجربی $I_{DS} - V_{DS}$ ۸۴
- ۵ - ۲ - ترانزیستورهای اثر میدانی - کانال کوتاه ۸۷
- ۵ - ۲ - ۱ - مشخصه جریان - ولتاژ ترانزیستور نانوسیم ZnO ۸۷
- ۵ - ۲ - ۱ - محاسبه ولتاژ روشن قطعه ۸۸
- ۵ - ۲ - ۱ - تحلیل داده های تجربی ۹۰
- نتیجه گیری ۹۶
- مراجع ۱۰۲

فهرست شکل ها

شکل	صفحه
شکل ۱ - ۱: ساختار شش گوشه وورتسایت ZnO	۴
شکل ۱ - ۲: ساختار rock salt (NaCl) (سمت چپ) و ساختار Zinblende (سمت راست) مربوط به ZnO	۵
شکل ۲ - ۱: تاثیر پراکندگی ناخالصی و شبکه ای بر تحرک الکترونی	۱۳
شکل ۲ - ۲: شکل گیری لایه تبهگن و کپه ای درون لایه نیمرسانا	۱۹
شکل ۲ - ۳: ساختار ناهمگون AlGaAs/ GaAs	۲۲
شکل ۲ - ۴: طرح شماتیک از نوار انرژی پیوند گاه ناهمگون GaAs / AlGaAs	۲۵
شکل ۲ - ۵: طرح شماتیک ساده ای از ساختار یک ترانزیستور لایه نازک	۳۰
شکل ۲ - ۶: طرح شماتیک از عملکرد ترانزیستور لایه نازک	۳۱
شکل ۲ - ۷: منحنی جریان-ولتاژ دررو در یک TFT نوعی. این مشخصه نشان دهنده دو ناحیه عملکرد ترانزیستور قبل و بعد از تنگش به ازای یک ولتاژ دروازه ای می باشد	۳۳
شکل ۲ - ۸: نحوه بدست آوردن V_{on} و V_T	۳۴
شکل ۲ - ۹: طرح شماتیکی از ساختار TFT و ابعاد قراردادی آن	۳۷
شکل ۲ - ۱۰: ترانزیستور اثر - میدانی نانوسیم	۴۲
شکل ۳ - ۱: تراکم الکترونی برحسب عکس دما برای سه نمونه مورد مطالعه به همراه منحنی های نظری حاصل از محاسبات ما	۴۶
شکل ۳ - ۲: داده های تجربی گزارش شده تحرک الکترونی برحسب دما برای نمونه های ۱-۳	۴۸
شکل ۳ - ۳: منحنی های برازشی وابسته به سازوکارهای مختلف پراکندگی موثر در محدود سازی تحرک الکترونی در نمونه های اکسید روی مورد مطالعه الف) نمونه ۱، ب) نمونه ۲ و ج) نمونه ۳	۴۹

- شکل ۳ - ۴ (الف - ج): تصاویر AFM مربوط به لایه های نازک ZnO:P تحت فشارهای اکسیژنی
 الف) ۰/۱ mbar (ب) ۰/۰۱۶ mbar (ج) ۰/۰۰۲ mbar ۵۱
- شکل ۳ - ۵: داده های تجربی تحرک حامل برحسب عکس دما به همراه منحنی های برازشی آنها ۵۲
- شکل ۳ - ۶: داده های تجربی تحرک الکترونی برحسب دما برای نمونه های ۱ الی ۴ ۵۴
- شکل ۳ - ۷: داده های تجربی مربوط به تراکم الکترونی در نمونه ۱ به همراه داده های اصلاح شده
 حاصل از حذف رسانندگی در لایه تبهگن در نمونه ۱ ۵۵
- شکل ۳ - ۸: منحنی های برازشی برای داده های تجربی تحرک الکترونی نمونه اول ۵۵
- شکل ۳ - ۹ (الف - ج): منحنی های لگاریتمی مربوط به برازش داده های تجربی تحرک الکترونی ۵۷
- شکل ۴ - ۱: طرح شماتیک از ساختار ناهمگون ZnMgO / ZnO ۶۱
- شکل ۴ - ۲: تغییرات تحرک الکترونی در یک سیستم دو بعدی برحسب تابعی از دما. تاثیر هرکدام از
 سازوکارهای پراکندگی حاصل پیش بینی نظری در شکل مشاهده می شود ۶۲
- شکل ۴ - ۳: طرح شماتیک ساختار ناهمگون ZnMnO/ZnO ۶۳
- شکل ۴ - ۴: تغییرات تحرک الکترونی در یک سیستم دو بعدی برحسب تابعی از دما. تاثیر هرکدام از
 سازوکارهای پراکندگی حاصل پیش بینی نظری در شکل مشاهده می شود ۶۴
- شکل ۵ - ۱: طرح شماتیک از ساختار ترانزیستور لایه نازک ۶۸
- شکل ۵ - ۲: داده های تجربی $I_{DS} - V_{DS}$ بر حسب ولتاژهای دروازه مختلف ۶۸
- شکل ۵ - ۳: نمودار تغییرات $I_{DS} - V_{GS}$ در قطعه مورد نظر ۶۹
- شکل ۵ - ۴: منحنی I_{DS} برحسب V_{DS} در ترانزیستور اثر میدانی لایه نازک ZnO به همراه منحنی های
 برازشی آنها ۷۰
- شکل ۵ - ۵: مقادیر ولتاژهای دروازه اشباع بر حسب ولتاژهای دروازه مختلف ۷۱
- شکل ۵ - ۶: تحرک میانگین کانال برحسب ولتاژ دروازه و ولتاژ موثر ۷۳

شکل ۵ - ۷: تصویری از ترانزیستور اثر میدانی با کانال ZnO. الف) نمای سه بعدی ب) نمای دو بعدی از نمونه مورد نظر با کانالی به طول ۱۰۰ میکرومتر..... ۷۵

شکل ۵ - ۸: منحنی I_{DS} برحسب V_{DS} در ترانزیستور لایه نازک ZnO برای حالت تازه رشد یافته و پس از گذشت ۲۵ روز..... ۷۵

شکل ۵ - ۹: نمودار نوار انرژی در محل اتصال کانال با سطح رویی نمونه در حالت الف) تازه آماده شده و ب) پس از گذشت ۲۵ روز..... ۷۶

شکل ۵ - ۱۰: منحنی نیم - لگاریتمی تغییرات I_{DS} برحسب V_{GS} برای نمونه مورد بررسی در دو زمان متفاوت. موقعیت V_{on} در هر دو مورد در شکل نشان داده شده است..... ۷۶

شکل ۵ - ۱۱: منحنی برازشی حاصل بکارگیری مدل غیر ایده آل هافمن (رابطه ۲ - ۶۰) در داده های تجربی برای نمونه تازه آماده شده..... ۷۷

شکل ۵ - ۱۲: نمودار تحرک میانگین برحسب ولتاژ موثر در نمونه تازه رشد یافته..... ۷۸

شکل ۵ - ۱۳: اثر جذب ملکول های بخشنده در افزایش جریان دررو..... ۷۹

شکل ۵ - ۱۴: طرح شماتیک از ساختار ترانزیستور لایه نازک باکانالی بطول ۳۵ تا ۵۰ میکرومتر..... ۸۱

شکل ۵ - ۱۵) الف و ب): داده های تجربی $I_{DS} - V_{DS}$ برای دو قطعه مورد نظر..... ۸۲

شکل ۵ - ۱۶) الف و ب): داده های تجربی $I_{DS} - V_{GS}$ برای دو قطعه مورد نظر..... ۸۳

شکل ۵ - ۱۷: منحنی های برازشی برای نمونه الف) $SiO_2 / TFT - ZnO$ و ب) $STS / TFT - ZnO$ ۸۴

شکل ۵ - ۱۸: تحرک میانگین کانال مربوط به هر دو قطعه..... ۸۶

شکل ۵ - ۱۹: ترانزیستور اثر میدانی نانوسیم ZnO..... ۸۷

شکل ۵ - ۲۰: داده های تجربی $I_{DS} - V_{DS}$ برای ترانزیستورهای اثر میدانی نانوسیم ZnO رشد یافته بر روی زیرلایه الف) sapphire و ب) ZnO..... ۸۸

شکل ۵ - ۲۱: داده های تجربی $I_{DS} - V_{GS}$ برای ترانزیستورهای اثر میدانی نانوسیم ZnO رشد یافته بر روی زیرلایه الف) sapphire و ب) ZnO..... ۸۹

- شکل ۵ - ۲۲: داده های تجربی $I_{DS} - V_{DS}$ مربوط به ترانزیستور اثر میدانی نانوسیم ZnO رشد یافته بر روی زیرلایه الف (sapphire و ب) ZnO به همراه منحنی های برازشی آن ها مبتنی بر نظریه کانال بلند..... ۹۰
- شکل ۵ - ۲۳: مدل کردن داده های تجربی $I_{DS} - V_{DS}$ مربوط به ترانزیستور اثر میدانی نانوسیم ZnO رشد یافته بر روی زیرلایه الف (sapphire و ب) ZnO با در نظر گرفتن ولتاژ روشن به عنوان پارامتر برازشی..... ۹۲
- شکل ۵ - ۲۴: رفتار تنگش در ترانزیستور اثر میدانی نانوسیم ZnO رشد یافته بر روی زیرلایه الف (sapphire و ب) ZnO..... ۹۴
- شکل ۵ - ۲۵: تحرک میانگین کانال برای هر دو قطعه مورد بررسی..... ۹۵

فهرست جداول

صفحه	جدول
۱۵	جدول ۲ - ۱: پارامترهای مادی مربوط به ZnO
۴۶	جدول ۳ - ۱: پارامترهای برازشی مربوط به نمونه های مورد بررسی
۵۰	جدول ۳ - ۲: پارامترهای برازشی وابسته به تحرک الکترونی در سه نمونه فوق
۵۳	جدول ۳ - ۳: پارامترهای برازشی وابسته به نمونه های مورد بررسی
۵۶	جدول ۳ - ۴: پارامترهای برازشی
۶۲	جدول ۴ - ۱: پارامترهای برازشی در سیستم گاز الکترون دو بعدی ZnMgO/ZnO
۶۵	جدول ۴ - ۲: پارامترهای برازشی
۷۰	جدول ۵ - ۱: پارامترهای برازشی مربوطه
۷۸	جدول ۵ - ۲: پارامترهای برازشی مربوط به نمونه تازه آماده شده
۸۵	جدول ۵ - ۳: پارامترهای برازشی برای نمونه STS / ZnO - TFT و SiO ₂ / ZnO - TFT
	جدول ۵ - ۴: پارامترهای برازشی مربوط به ترانزیستور اثر میدانی نانوسیم ZnO رشد یافته بر روی زیرلایه sapphire و ZnO
۹۱	
	جدول ۵ - ۵: مقادیر ولتاژ روشن برای ولتاژهای دروازه مختلف به عنوان پارامتر برازشی مربوط به ترانزیستور اثر میدانی نانوسیم ZnO رشد یافته بر روی زیرلایه sapphire
۹۳	
	جدول ۵ - ۶: مقادیر ولتاژ روشن برای ولتاژهای دروازه مختلف به عنوان پارامتر برازشی مربوط به ترانزیستور اثر میدانی نانوسیم ZnO رشد یافته بر روی زیرلایه ZnO
۹۳	

فصل اول

مقدمه ای بر نیمرسانای اکسید روی

۱-۱- تاریخچه

مطالعه مواد نیمرسانا در اوایل قرن نوزدهم آغاز شد. در طول این سال ها نیمرساناهای فراوانی مورد مطالعه قرار گرفته اند. بعد از اختراع اولین ترانزیستور دوقطبی نیمرسانا در سال ۱۹۴۷ توسط دانشمندان آزمایشگاه بل^۱، صنعت نیمرسانا با سرعت بالایی به منظور ساخت قطعاتی با کارایی و سرعت بالاتر در مقیاس کوچکتر و با هزینه کمتر توسعه یافت [۱]. در اوایل دهه ی ۱۹۵۰، ژرمانیوم (Ge) مهمترین ماده نیمرسانا محسوب می شد [۲]. اگرچه اولین ترانزیستورهای نیمرسانا از ژرمانیوم ساخته شده بودند، اما بزودی ثابت شد که ژرمانیوم برای بسیاری از کاربردها به علت پایین بودن نقطه ذوب آن مناسب نمی باشد زیرا قطعات ساخته شده از ژرمانیوم در دماهای بالا نشت جریان بالایی را از خود نشان می دادند [۲].

از اوایل دهه ی ۱۹۶۰ به بعد سیلیسیوم (Si) به یک جانشین عملی برای ژرمانیوم تبدیل شده است. به خاطر پیشرفت تکنولوژی ساخت قطعات حاوی سیلیسیوم، این نیمرسانا بازارهای تجاری کنونی را در مورد قطعات مجزا و مدارهای مجتمع برای کاربردهایی نظیر انجام محاسبات، ذخیره داده ها و ارتباطات در اختیار گرفته است. از دیگر دلایل عمده استفاده کنونی از سیلیسیوم می توان به نشت جریان کمتر، قیمت ارزانتر آن ها و سهولت رشد گرمایی اکسید سیلیسیوم (SiO_2) با کیفیت بالا اشاره کرد. لازم به ذکر است که از آنجا که این ماده نیمرسانایی با گاف نواری غیرمستقیم محسوب می شود، برای کاربردهای اپتوالکترونیکی از بازدهی مناسبی برخوردار نمی باشد. در این قبیل کاربردها معمولا لازم است از یک نیمرسانا با گاف نواری مستقیم استفاده نمود. در این خصوص گالیوم آرسناید (GaAs) ماده ای مناسبتر محسوب می شود [۱ و ۲].

از آنجا که برای کاربردهای با توان بالا، دمای بالا و دیوهای نورگسیل آبی و فرابنفش موادی همچون گالیوم آرسناید و سیلیسیوم خواص فیزیکی مورد نیاز را برآورده نمی کنند، از اینرو لازم است به سراغ مواد نیمرسانای دیگر با گاف نواری بزرگتر و میدان بحرانی شکست بالاتری رفت. از میان مواد

^۱. Bell Laboratory

نیمرسانا با گاف نواری پهن، اکسید روی (ZnO) ماده ای با گاف نواری مستقیم به مقدار 3.37 eV در دمای اتاق [۳] بشمار می آید که در ناحیه طیف مرئی امواج الکترومغناطیس شفاف می باشد. اگرچه ZnO در شرایط تک بلوری از تحرک الکترونی^۱ نسبتاً پایینی، در حدود $205 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ، در دمای اتاق برخوردار می باشد [۴]، اما دارای سرعت اشباع بالایی ($3 \times 10^5 \text{ m/s}$) است [۵]. از دیگر خصوصیات منحصر بفرد ZnO می توان به امکان رشد آن در دماهای نسبتاً پایین بر روی زیرلایه های ارزان قیمت نظیر شیشه به صورت لایه نازک و نانو ساختار اشاره کرد [۱]. لازم به ذکر است که امکان شکل گیری نانو ساختارهایی نظیر نانوسیم ها و نانو میله ها امکان کاربرد این ماده را در فرایندهای آشکارسازی گازی و فوتونی فراهم ساخته است. علاوه بر این موارد با توجه به کارهای اخیر انجام شده بر روی ZnO، خاصیت فرومغناطیسی این ماده در اثر آلودگی با یکی از فلزات گذار (عناصر واسطه) نظیر کروم (Cr) و کبالت (Co) آشکار شده است که می تواند برای ساخت قطعات اسپینترونیک^۲ مناسب باشد [۶]. از دیگر خصوصیات عمده ZnO می توان به قابلیت تغییر گاف نواری از طریق جانشینی یک فلز دو ظرفیتی نظیر کادمیوم (Cd) و منیزیم (Mg) در مکان های کاتیونی (Zn^{2+}) برای تشکیل ساختارهای ناهمگون اشاره کرد. با آلودگی Cd انرژی گاف نواری به $3/00 \text{ eV}$ کاهش و با آلودگی Mg انرژی گاف نواری آن به $4/00 \text{ eV}$ افزایش می یابد [۱].

۱ - ۲ - ساختار بلوری و پارامترهای شبکه ای

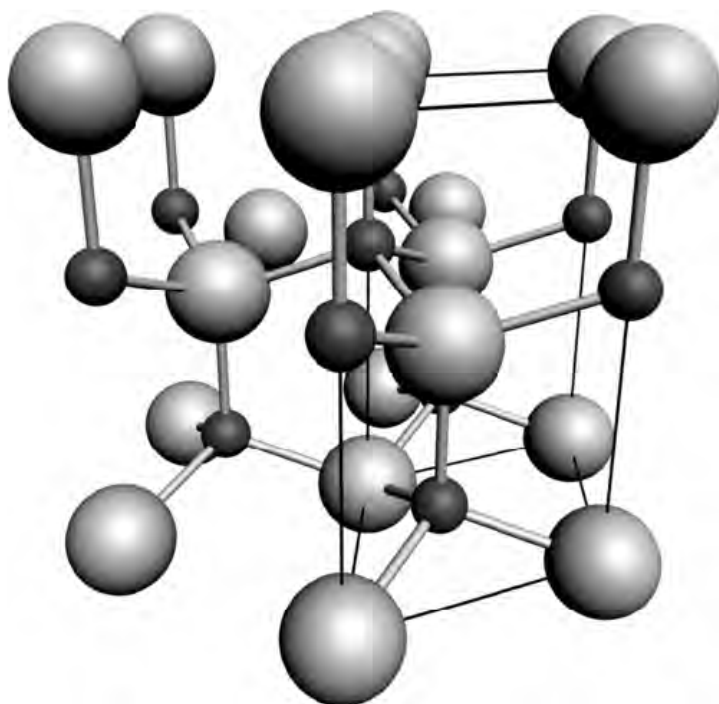
ZnO در شرایط عادی فشار و دما، دارای ساختار بلوری وورتسایت^۳ می باشد. این ساختار حالت پایدار ترمودینامیکی این ماده می باشد که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. ساختار وورتسایت از

¹. Electron Mobility

². Spintronic

³. Wurtzite

دو زیر شبکه در هم فرورفته شش گوشه در هم پکیده^۱ تشکیل شده است که هر زیر شبکه شامل یک نوع اتم (Zn یا O) می باشد.



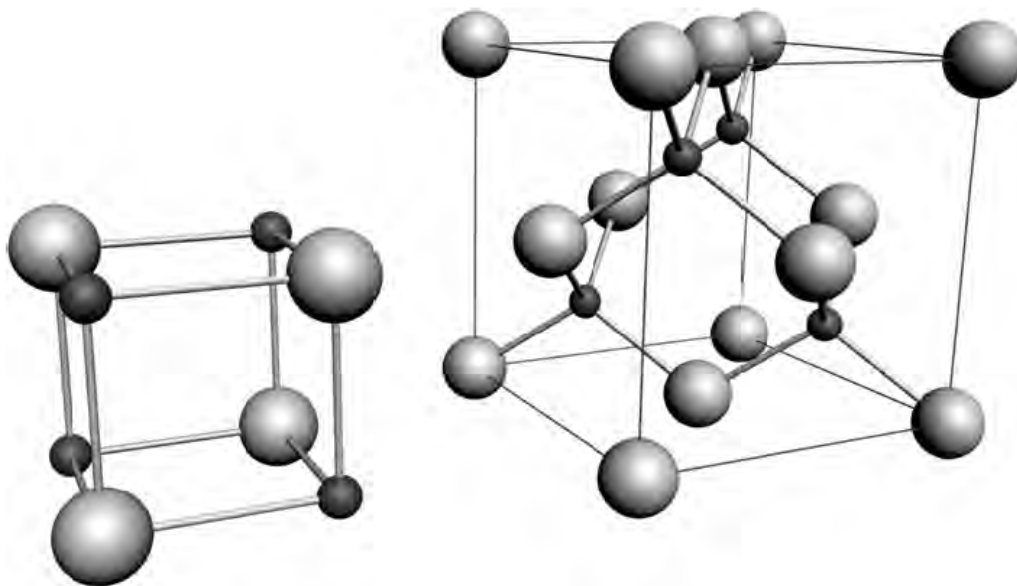
شکل ۱- ۱: ساختار شش گوشه وور تسایت ZnO. اتم های O با کره های سفید و بزرگتر و اتم های Zn با دایره های سیاه و کوچکتر نشان داده شده اند [۷].

در این زیر شبکه ها هر یون Zn با چهار یون از O (در گوشه یک چهار ضلعی) احاطه شده است و بر عکس. این پیوندهای چهار تایی منجر به تقارن قطبی در راستای محور شش گوشه خواهد شد. این قطبیت منشا قطبش خود بخودی بوده و سبب خاصیت پیزوالکتریسیته در ZnO می گردد. سلول واحد ساختار وور تسایت شش گوشه بوده و با دو پارامتر شبکه ای a و c به نسبت $\frac{c}{a} = \sqrt{\frac{8}{3}} = 1.633$ مشخص می شود. در هر زیر شبکه اتم ها در امتداد محور c - به اندازه پارامتر u نسبت به یکدیگر چیده شده اند. پارامتر u به عنوان طول پیوند موازی با محور c - (طول پیوند آنیون - کاتیون یا فاصله نزدیکترین همسایه) تقسیم بر پارامتر شبکه ای c تعریف می شود که مقدار آن برابر با ۰/۳۷۵

^۱. Hexagonal closed pack (hcp)

می باشد. پارامترهای شبکه ای c و a مربوط به ساختار وورتسایت دارای مقادیر $c = 5/20.42 \text{ \AA}$ و $a = 3/496 \text{ \AA}$ می باشند [۸].

ZnO علاوه بر ساختار وورتسایت می تواند در ساختارهای بلوری زینک بلند^۱ و کلرید سدیم^۲ که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است، متبلور شود [۷].



شکل ۱-۲: ساختار rock salt (NaCl) (سمت چپ) و ساختار Zincblende (سمت راست) مربوط به ZnO. اتم های O با کره های سفید و اتم های Zn با دایره های سیاه نشان داده شده اند [۷].

ساختار زینک بلند هنگامی پایدار است که بر روی زیرلایه های با ساختار مکعبی رشد داده شود [۹ و ۱۰ و ۱۱] در حالی که ساختار کلرید سدیم در فشارهای نسبتاً بالا (در حدود ۱۰ GPa) بدست می آید [۱۲]. همچنین محاسبات نظری دلالت بر وجود فاز چهارم کلرید سزیم مکعبی برای ZnO دارد که شکل گیری آن در دماهای بالا پیش بینی می شود لکن این فاز تاکنون از نظر تجربی گزارش نشده است [۱۳].

^۱. Zincblende

^۲. Rock salt (NaCl)

۱-۲-۱ - مهندسی گاف نواری^۱

مهندسی گاف نواری یک گام مهم در توسعه قطعات نیمرسانا خصوصا قطعات اپتوالکترونیکی بشمار می آید. با آلاینده ماده نیمرسانای اولیه با ماده دیگری با گاف نواری متفاوت، گاف نواری ماده آلیاژی حاصله تغییر می کند. با ترکیب ZnO با مواد MgO و CdO انرژی گاف نواری ماده آلیاژی حاصل بترتیب افزایش و کاهش می یابد [۱۴و۱۵و۱۶].

۱-۳-۱ - خواص الکتریکی

۱-۳-۱ - سیستم های کپه ای

خواص ترابری الکتریکی گزارش شده در مقالات عمدتا مبتنی بر آزمایش اثر هال می باشد. بنابراین گزارشات منتشر شده، لایه های نازک ZnO خالص با ساختار وورتسایت به طور طبیعی با نقایص ذاتی و غیر ذاتی بلوری نظیر تعویض جایگاه Zn و O^۲، اتم روی بین جایگاهی^۳ [۱۷] و تهی جای اکسیژن^۴ [۱۸] و نیز اتم های هیدروژن ناخواسته [۱۹] در شبکه همراه اند. به دلیل وجود این نقایص که غالبا به صورت شبه - بخشنده عمل می کنند لایه های رشد یافته از این ماده غالبا دارای رسانندگی نوع - n می باشند. در این ماده نقایصی نظیر تهی جای روی و اتم اکسیژن بین جایگاهی به عنوان پذیرنده عمل می کنند و باعث کاهش تحرک الکترونی و رسانندگی نمونه می شوند [۲۰]. نتایج نظری حاصل از شبیه سازی مونت کارلو که توسط آلبرچت و همکاران [۵] بر روی ZnO کپه ای با ساختار وورتسایت انجام شده است نشان می دهد تحرک الکترونی در دمای اتاق در ZnO بدون آلیایش در حدود $300 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ می باشد. بالاترین تحرک الکترونی در دمای اتاق برای نمونه کپه ای

¹. Band Engineering

². Zn - on - O Antisite

³. Zn Interstial

⁴. Oxygen Vacancy

تک بلوری ZnO بدون آلاینش که با روش تراپری فاز - بخار^۱ رشد داده شده است با تراکم الکترونی $۶ \times ۱۰^{۱۶} \text{ cm}^{-3}$ ، در حدود $۲۰۵ \text{ cm}^2/\text{Vs}$ گزارش شده است [۴].

از آن جایی که تاکنون لایه های نازک ZnO با رسانندگی نوع p - بطور طبیعی دیده نشده است، تلاش های زیادی برای دستیابی به این شرایط انجام گرفته است. همین موضوع یکی از علل عدم توسعه ساخت قطعات پیوندگاهی p - n این ماده در دیودهای لیزری و دیودهای نورگسیل فرابنفش، می باشد [۲۱]. چنانچه انتظار می رود با جایگزینی عناصر گروه یک جدول تناوبی (نظیر K, Na و Li) در مکان اتم های Zn و یا جایگزینی عناصر گروه پنجم جدول تناوبی (نظیر N, As و Sb) در مکان اتم های O بتوان به رسانندگی نوع p - دست یافت. تحرک حفره ای در دمای اتاق برای نیمرسانای ZnO نوع p - آلاینش یافته با As، در حدود $۵ \text{ cm}^2/\text{Vs}$ گزارش شده است [۲۲] که در مقایسه با تحرک الکترونی در نیمرسانای ZnO بدون آلاینش بسیار ناچیز می باشد.

۱ - ۳ - ۲ - سیستم های دو بعدی

ZnO به عنوان نیمرسانای شفاف دارای کاربردهای فراوانی در ساخت قطعات الکترونیکی و اپتوالکترونیکی می باشد، به ویژه با شکل گیری گاز الکترون دو بعدی، خواص تراپری آن افزایش می یابد و در ساخت قطعات ترانزیستوری با تحرک بالا بکار می رود. برنندت و همکاران [۲۳] شکل گیری گاز الکترون دو بعدی را در ساختارهای ناهمگون ZnO/ZnMgO گزارش کرده اند. این نمونه با استفاده از روش لایه نشانی لیزر پالسی^۲ (PLD) بر روی زیرلایه سفایر^۳ (Al_2O_3) رشد یافته است و مشاهده کردند که تحرک الکترونی در دماهای پایین (در حدود ۳۰ K) به مقدار $۳۰۰ \text{ cm}^2/\text{Vs}$ می رسد. از آن جا که ZnO به عنوان یک نیمرسانا که در زمینه ساخت قطعات اسپینترونیکی بسیار مورد توجه می باشد، ساختارهای ناهمگون نظیر ZnMnO/ZnO که علاوه بر خواص الکتریکی دارای

^۱. Vapor - phase transport

^۲. Pulsed laser deposition

^۳. Sapphire

خواص مغناطیسی نیز می باشند، مورد مطالعه قرار گرفته اند. اداهيرو و همکاران [۲۴] شکل گیری گاز الکترونی دوبعدی را در ساختار ZnMnO/ZnO گزارش کرده اند که در این نمونه تحرک الکترونی در دماهای پایین به مقدار $400 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ می رسد.

۱ - ۳ - ۳ - ترانزیستورهای لایه نازک

اگرچه ایده ساخت ترانزیستور لایه نازک^۱ (TFT) اولین بار در سال ۱۹۳۰ شکل گرفت، اما اخیراً (از سال ۱۹۹۰) ساخت قطعات TFT از نیمرساناهای شفاف بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از جمله این موارد، نیمرسانای ZnO می باشد که به علت داشتن شفافیت اپتیکی و گاف نواری پهن و مستقیم ماده‌ای مناسب برای ساخت قطعات ZnO - TFT بشمار می آید. از ZnO - TFT می توان در ساخت قطعات اپتوالکترونیکی نظیر دیودهای نورگسیل و صفحات نمایش بلور مایع^۲ (LCD) استفاده کرد. هافمن [۲۵] با ارائه مدلی که مبتنی بر وابستگی تحرک کانال قطعات ZnO - TFT به ولتاژ دروازه می باشد، مشخصه جریان - ولتاژ این قطعات را مورد بررسی قرار داده است که تحرک بدست آمده از این مدل با تحرک اندازه گیری شده توافق خوبی را نشان می دهد که گواه اعتبار و درستی این مدل می باشد. لازم به ذکر است که برای ساخت قطعاتی با ابعاد کوچکتر، نانوسیم های ZnO به عنوان کانال فعال در قطعات ZnO - TFT اخیراً مورد استفاده قرار گرفته اند.

۱ - ۴ - خاصیت پیزوالکتریک^۳ ZnO

رفتار پیزوالکتریک یا پیزوالکتریسیته عبارتست از تولید الکتریسیته توسط قطبیدگی یک بلور در اثر اعمال تنش. شرط ضروری برای پیزوالکتریک بودن یک بلور، عدم وجود تقارن مرکزی^۴ در ساختار بلوری است. در واقع خاصیت پیزوالکتریکی خاصیتی است که بر اساس آن برخی بلورها به هنگام قرار

^۱. Thin Film Transistor

^۲. Liquide Crystal Display.

^۳. Piezoelectric

^۴. Inversion symmetry

گرفتن در معرض فشار مکانیکی، تولید ولتاژ می کنند. ZnO با ساختار وورتسایت به علت نداشتن تقارن مرکزی از جمله مواد نیمرسانای دارای خاصیت پیزوالکتریسیته بشمار می آید.

در سال ۲۰۰۸ مرکز خواص نانو ساختار^۱ در موسسه فناوری جورجیا^۲ تولید جریان الکتریکی متناوب از دستگاه مولد برق را گزارش کرده اند که از طریق کشیدن و آزاد کردن نانوسیم های ZnO کار می کند. این دستگاه که پمپ ژنراتور شارژ انعطاف پذیر^۳ نامیده می شود قادر به تولید ولتاژ نوسان کننده به میزان ۴۵ mV را دارد. محققان از سیم هایی به طول ۰/۲ تا ۰/۳ میلیمتر و قطر ۳ تا ۵ میکرومتر استفاده کرده اند، اما این دستگاه می تواند در اندازه های کوچکتر نیز ساخته شود [۲۶].

۱-۵- کاربردها

ZnO به عنوان یک ماده با گاف نواری پهن و مستقیم، برای گستره بسیاری از کاربردهای اپتوالکترونیکی و الکترونیکی می تواند مورد استفاده قرار گیرد. از مزیت های وابسته به گاف نواری پهن می توان به موارد کاربردی در قطعات توان - بالا و دما - بالا و ولتاژ شکست - بالا اشاره کرد. این ماده همچنین در دیگر موارد از قبیل صنایع رنگ، پلاستیک، باتری، تجهیزات الکتریکی، چسب، صابون، وسایل آرایشی، نساجی و داروسازی کاربرد دارد. با بهبود یافتن تکنولوژی رشد نانو ساختارها، لایه های روآراستی، تک بلورها و نانو ذرات ZnO، ساخت قطعات الکترونیکی وابسته نظیر صفحات نمایش تخت^۴، چشمه های گسیل میدانی، حسگرهای بیولوژیکی و شیمیایی و گازی، گسیلنده نور فرابنفش و کلید زنی توسعه زیادی یافته است [۲۷ و ۲۸]. لایه های روآراستی و تک بلورهای این ماده می تواند برای ساخت قطعات اپتوالکترونیکی مانند آشکارسازها و گسیلنده های نور آبی و فرابنفش [۳]، قطعات پیزوالکتریک [۲۹] و اسپینترونیک [۳۰] مناسب باشد.

¹. Center for Nanostructure Characterization

². Georgia Institute of Technology

³. Flexible charge pump generator

⁴. Flat screen displays

فصل دوم

مبانی نظری

در این فصل نخست در بخش (۲ - ۱) به معرفی معادله خنثایی بار^۱ و در بخش های (۲ - ۲) و (۲ - ۴) به معرفی سازوکار های مختلف پراکندگی که به ترتیب در برازش داده های تجربی تراکم و تحرک الکترونی برحسب دما در سیستم های کپه ای و دو بعدی مورد استفاده قرار می گیرد، می پردازیم. در بخش ۲ - ۵ به بیان مدل نظری مشخصه جریان - ولتاژ در ترانزیستورهای اثر میدانی می پردازیم.

۲ - ۱ - معادله خنثایی بار

عمل برازش داده های مربوط به تغییرات دمایی تراکم الکترونی (n) برحسب دما (T) برای نمونه های مورد بررسی با در نظر گرفتن معادله خنثایی بار ($n + N_a^- = p + N_d^+$) انجام شده است. این معادله برای یک نیم رسانای غیر واکن با در نظر گرفتن آمار ماکسول - بولتزمن به صورت زیر در می آید [۳۱]:

$$n + N_a = \sum_i \frac{N_{di}}{1 + \frac{n}{\phi_i}} \quad (۲ - ۱)$$

به طوری که :

$$\phi_i = (g_{0i} / g_{1i}) N_c \exp(\alpha_i / k_B T) \exp(-E_{d0i} / k_B T)$$

که در آن N_d و E_d بترتیب تراکم و انرژی فعالسازی اتم های بخشنده، N_a تراکم اتم های پذیرنده و $N_c = 2(2\pi m^* k_B / h^2)^{3/2}$ چگالی موثر حالت ها در لبه نوار رسانش در دمای $T=1$ K، g_{0i} (g_{1i})، ضریب تبهگنی حالت اشغال نشده (اشغال شده) بخشنده i ام (در اغلب موارد $g_{0i} = 1$ و $g_{1i} = 2$ در نظر گرفته می شود) و α_i ضریب دمایی گاف نواری است که با رابطه $E_{di} = E_{d0i} - \alpha_i T$ تعریف می شود. در این رابطه E_{d0i} و E_{di} به ترتیب انرژی فعالسازی تراز بخشنده مورد نظر (i امین تراز) در

^۱. Charge balance equation

دمای T و دمای صفر کلوین هستند. لازم به ذکر است که به علت کوچکی ضریب α معمولاً مقدار $\alpha_i=0$ فرض می شود [۴].

۲-۲- سازوکارهای پراکندگی در نمونه های کپه ای

در نیمرسانای واقعی، همواره ناکاملی هایی وجود دارند که باعث پراکندگی حامل های بار (الکترون ها و یا حفره ها) می شوند. در میدان های الکتریکی پایین، خواص ترابری ماکروسکوپیک مواد شامل رسانندگی (σ) و تحرک (μ) طبق روابط زیر با خواص میکروسکوپیک نظیر زمان واهلش مربوط می شوند:

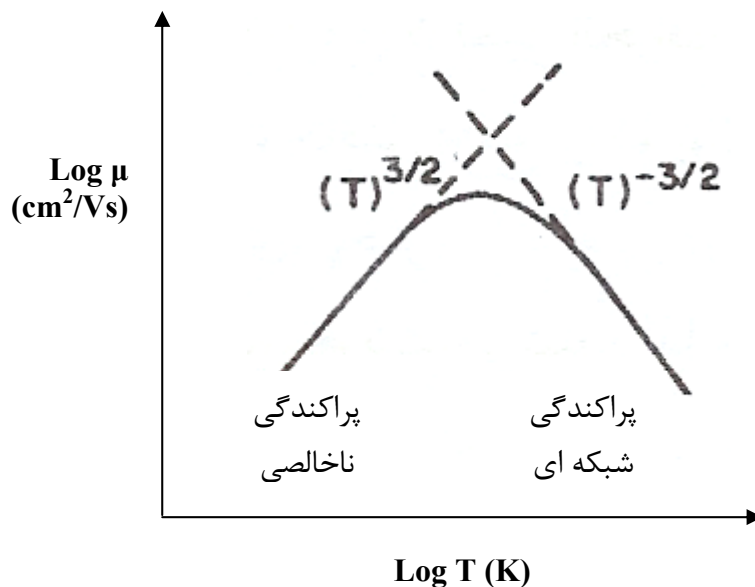
$$\sigma = \frac{ne^2\tau_{sc}}{m^*} \quad (2-2)$$

$$\mu = \frac{e\tau_{sc}}{m^*} \quad (3-2)$$

که در این روابط، e بار الکتریکی الکترون، τ_{sc} زمان واهلش (زمان میانگین آزاد بین دو برخورد) و m^* جرم موثر حامل می باشد.

در رابطه (۲-۳) تحرک حامل ها به طور مستقیم با زمان واهلش τ_{sc} ارتباط دارد که به نوبه خود به سازوکارهای مختلف پراکندگی بستگی دارد. مهمترین سازوکارهای پراکندگی، پراکندگی حامل ها توسط ناخالصی ها (عامل غیر ذاتی) و پراکندگی توسط ارتعاشات شبکه ای است که حاصل نوسانات گرمایی اتم های شبکه در هر دمای بالای صفر مطلق (عامل ذاتی) می باشد. این ارتعاشات در پتانسیل دوره ای شبکه اختلال ایجاد کرده و مبادله انرژی بین حامل ها و شبکه را میسر می سازند. از آنجا که با افزایش دما ارتعاشات شبکه ای نیز افزایش می یابند لذا پراکندگی شبکه ای در دماهای بالا غالب می گردد و چنانچه انتظار می رود تحرک با افزایش دما کاهش می یابد. بررسی های نظری [۳۲] نشان می دهد که تحرک مربوط به پراکندگی شبکه ای (μ_L) با دما بصورت $T^{-3/2}$ متناسب می باشد (شکل ۲-۱). پراکندگی حامل ها توسط ناخالصی ها هنگامی روی می دهد که حامل بار از

نزدیکی یک ناخالصی یونیده (دهنده یا پذیرنده) عبور کند. در این شرایط مسیر حامل بار به خاطر برهمکنش کولنی منحرف می شود. پراکندگی ناخالصی در دماهای بالاتر اهمیت کمتری دارد زیرا در دماهای بالا، حامل ها سریعتر حرکت می کنند لذا مدت زمان کوتاهتری نزدیک اتم ناخالصی می مانند و کمتر پراکنده می شوند. بررسی های نظری نشان می دهند که تحرک مربوط به پراکندگی ناخالصی (μ_i) به صورت $T^{3/2}/N_T$ تغییر می کند که در آن N_T تراکم ناخالصی های یونیده می باشد [۳۳]، (شکل ۲ - ۱).



شکل ۲ - ۱: تاثیر پراکندگی ناخالصی و شبکه ای بر تحرک الکترونی [۲].

مهمترین سازوکارهای پراکندگی (ذاتی و غیر ذاتی) کنترل کننده خواص ترابری الکتریکی در نیمرسانای مورد مطالعه ما (ZnO) را می توان به شرح ذیل نام برد:

پراکندگی های ذاتی فونونی: پراکندگی فونون های اپتیکی طولی قطبی^۱، پراکندگی فونون های آکوستیکی از طریق پتانسیل تغییر شکل^۲، پراکندگی فونون های پیزوالکتریک^۳

^۱. Polar longitudinal optical phonon scattering

^۲. Acoustic phonon scattering through deformation potential

^۳. Piezoelectric scattering

پراکندگی های غیر ذاتی: پراکندگی وابسته به ناخالصی های یونیده شده^۱، پراکندگی ناشی از دررفتگی ها^۲، پراکندگی از مرزهای دانه های بلوری^۳ و پراکندگی نقایص بلوری^۴.

با فرض آن که هر کدام از این سازوکارها بطور مستقل عمل می کنند می توان تاثیر کلی آن ها را بر تحرک الکترونی نمونه با استفاده از قاعده ماتیسسن^۵ بدست آورد:

$$\frac{1}{\mu_{tot}} = \sum_i \frac{1}{\mu_i} \quad (۲ - ۴)$$

که در آن μ_{tot} تحرک الکترونی کل و i نشان دهنده هر کدام از سازوکارهای پراکندگی مختلف می باشد که در ادامه به اختصار به شرح آن ها می پردازیم.

۲ - ۲ - ۱ - پراکندگی های ذاتی فونونی

۲ - ۲ - ۱ - ۱ - پراکندگی فونون های آکوستیکی

تحرک محدود شده ناشی از پراکندگی فونون های آکوستیکی مبتنی بر پتانسیل تغییر شکل^۶ شبکه بلوری با رابطه زیر داده می شود [۳۴]:

$$\mu_{ac}(T) = \frac{2(2\pi)^{1/2} \rho s^2 \hbar^4 e}{3E_I^2 (m^*)^{5/2} (k_B T)^{3/2}} \quad (۲ - ۵)$$

که در آن ρ چگالی جرمی بلور، m^* جرم موثر الکترون، s سرعت میانگین صوت در بلور، E_I پتانسیل تغییر شکل می باشد. مقادیر گزارش شده مربوط به این کمیت برای ZnO (موسوم به پارامترهای مادی^۷) و دیگر کمیت های معرفی شده در دیگر سازوکارها که در ادامه بدانها اشاره شده است در جدول ۲ - ۱ آمده است.

1. Ionized impurity scattering
 2. Dislocation scattering
 3. Grain boundary scattering
 4. Crystal defect scattering
 5. Matthiessen's rule
 6. Deformation potential
 7. Material parameter

جدول ۲ - ۱: پارامترهای مادی مربوط به ZnO

پارامترهای مادی	نماد	مقادیر
ثابت دی الکتریک فرکانس بالا	ϵ_{∞}	۳/۷۲ [۴]
ثابت دی الکتریک فرکانس پایین	ϵ_s	۸/۱۲ [۴]
جرم موثر	m^*	۰/۳ m_0 [۴]
دمای متناظر با انرژی فنون های نوری (K)	T_{pol}	۸۳۷ [۴]
پتانسیل تغییر شکل آکوستیکی (eV)	E_l	۳/۸ [۳۵]
چگالی (gr/cm^3)	ρ	۶/۱ [۳۶]
سرعت صوت در ماده (m/s)	s	6.59×10^3 [۳۶]
ثابت پیزوالکتریک (C/m^2)	h_{pz}	۱/۱۰ [۳۶]

۲-۲-۱-۲ - پراکندگی پیزوالکتریک

پراکندگی پیزوالکتریک از میدان های الکتریکی که از طریق کرنش های وابسته به فونون ها در بلورهای فاقد تقارن وارون مرکزی ایجاد می شوند، ناشی می شود. تحرک محدود شده توسط پراکندگی پیزوالکتریک با رابطه زیر داده می شود [۳۴]:

$$\mu_{pz}(T) = \frac{16(2\pi)^{1/2} \rho s^2 \hbar^2 e}{3(eh_{pz} / \epsilon_s \epsilon_0)^2 (m^*)^{3/2} (k_B T)^{1/2}} \quad (۲-۶)$$

که در آن h_{pz} ثابت پیزوالکتریک، ϵ_s ثابت دی الکتریک فرکانس پایین و ϵ_0 ضریب گذردهی دی الکتریک خلا می باشد.

۲-۲-۱-۳- پراکندگی فونون های اپتیکی طولی قطبی

این پراکندگی از طریق برهمکنش بین بارهای متحرک با میدان الکتریکی القا شده از طریق قطبش وابسته به ارتعاشات شبکه ای که به خاطر طبیعت یونی پیوند ها در نیمرساناهای قطبی می باشد، ایجاد می شود. تحرک محدود شده توسط پراکندگی فونون های طولی قطبی با رابطه زیر داده می شود [۳۷]:

$$\mu_{pop}(T) = 0.199(T/300)^{1/2} (e/e^*)^2 (m/m^*)^{3/2} (10^{22}M)(10^{23}V_a)(10^{-13}\omega) \quad (2-7)$$

$$(\exp(\hbar\omega/k_B T) - 1)G(\hbar\omega/k_B T)$$

که در آن $e^* = \sqrt{MV_a\omega\epsilon_0(1/\epsilon_\infty - 1/\epsilon_s)}$ بار یونی موثر کالن^۱ می باشد. M جرم یونی کاهش یافته^۲، $V_a = \sqrt{3}a^2c/4$ حجم لازم برای یک جفت یون Zn و O است که a و c ثابت های شبکه ای می باشند. ω فرکانس فونون های اپتیکی در نیمرسانا نامیده می شود. لازم به ذکر است که با توجه به مقدار تحرک الکترونی در نیمرسانای ZnO که $300 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ گزارش شده است [۵] مقدار $G(\hbar\omega/k_B T)$ برابر با ۰/۹۷ در نظر گرفته شده است.

۲-۲-۲- پراکندگی های غیر ذاتی

۲-۲-۱- پراکندگی ناخالصی یونیده

این پراکندگی به خاطر انحراف حامل های آزاد تحت اثر پتانسیل بلند برد کولنی مراکز باردار نظیر ناخالصی های یا نقایص ذاتی یونیده می باشد. تحرک محدود شده توسط این سازوکار توسط بروکس و هرینگ با بحساب آوردن اثر استتار^۳ حامل های آزاد و یون های ناخالصی محاسبه شده است [۳۸ و ۳۹]:

¹. Callen's effective ionic charge

². Reduced ion mass

³. Screening effect

$$\mu_{\text{Im}}(T) = \frac{128(2\pi)^{1/2}(\varepsilon_s \varepsilon_0)^2 (k_B T)^{3/2}}{e^3 (m^*)^{1/2} (n + 2N_a)} \left[\ln(1+b) - \frac{b}{b+1} \right]^{-1} \quad (8-2)$$

که در آن پارامتر b به صورت زیر محاسبه می شود:

$$b = \frac{24m^* \varepsilon_s \varepsilon_0 (k_B T)^2}{e^2 \hbar^2 n'} \quad (9-2)$$

$$n' = n + (N_d - N_a - n)(n + N_a) / N_d$$

۲-۲-۲-۲ - پراکندگی ناشی از دررفتگی ها

پراکندگی ناشی از دررفتگی ها به خاطر آن است که مراکز پذیرنده در امتداد خط دررفتگی قرار گرفته و یک ناحیه بار فضایی در اطراف آن شکل می گیرد. وجود این ناحیه در داخل ماده سبب انحراف مسیر حامل ها شده و نهایتاً باعث کاهش تحرک الکترونی می شود. تحرک محدود شده توسط پراکندگی دررفتگی ها توسط پودور محاسبه شده است [۴۰]:

$$\mu_{\text{dist}}(T) = \frac{30(2\pi)^{1/2}(\varepsilon_0 \varepsilon_s)^2 a^2 (k_B T)^{3/2}}{N_{\text{dist}} e^3 f^2 \lambda_D (m^*)^{1/2}} \quad (10-2)$$

که در آن a فاصله بین مراکز پذیرنده در امتداد خط دررفتگی و f نرخ اشغال مراکز پذیرنده و N_{dist} تراکم دررفتگی ها می باشد، که غالباً به عنوان پارامتر برازشی در نظر گرفته می شود. همچنین λ_D در این رابطه طول استتار دبابی نامیده می شود و به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$\lambda_D = \left(\frac{\varepsilon_s \varepsilon_0 k_B T}{e^2 n} \right)^{1/2} \quad (11-2)$$

۲-۲-۲-۳ - پراکندگی مرز دانه

در مواردی که نمونه مورد بررسی به صورت بس بلور رشد یافته باشد و یا در حین رشد ماده تک بلور تصاویر میکروسکوپی نمونه نشانگر وجود مرزهایی در لایه رشد یافته باشد لازم است اثر این

سازوکار در نظر گرفته شود. تحرک محدود شده توسط پراکندگی مرزهای دانه با رابطه زیر داده می شود [۴۱]:

$$\mu_{gb}(T) = \frac{eL}{\sqrt{2\pi m^* k_B T}} \exp\left(-\frac{E_b}{k_B T}\right) \quad (۲-۱۲)$$

که در آن L اندازه دانه ها و E_b ارتفاع سد انرژی برای حامل ها می باشد.

۲-۲-۴- پراکندگی نقایص بلوری

این پراکندگی به انواع مختلف نقایص بلوری وابسته به میدان های القایی ناشی از کرنش مربوط می شود. رفتار این سازوکار به صورت

$$\mu_{cd}(T) = C / T^{1.5} \quad (۲-۱۳)$$

گزارش شده است [۴۲] که در آن پارامتر C یک ضریب عددی ثابت است. این پراکندگی در دماهای بالا غالب می باشد.

۲-۲-۵- تحرک جهشی^۱

به منظور توصیف تحرک وابسته به رسانش جهشی که معمولاً در محدوده دمایی پایین و ما بین ترازهای ناخالصی رخ می دهد از رابطه زیر استفاده می شود [۴۳ و ۴۴]:

$$\mu_{hop} = M_{hop} \exp\left(-\frac{E_{hop}}{k_B T}\right) \quad (۲-۱۴)$$

که در آن M_{hop} تحرک در دمای نامتناهی است و E_{hop} انرژی فعال سازی جهشی موثر^۲ می باشد. این رابطه به ما اجازه می دهد که تحرک جهشی را از تحرک در نوار رسانش جدا کنیم.

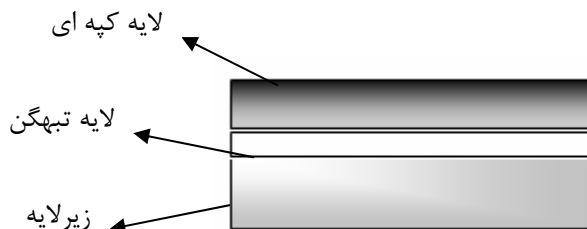
^۱. Hopping mobility

^۲. Effective hopping activation energy

۲-۳- مدل دولایه ای اثر هال^۱

گاهی اوقات بخاطر ناهمسانی شبکه ای نسبتاً بزرگ بین لایه نیمرسانا و زیرلایه مشخص، یک ناحیه باریک با تراکم دررفتگی بالا در سطح مشترک لایه نیمرسانا / زیرلایه شکل می گیرد و تاثیر بسزایی بر خواص الکتریکی (تراکم و تحرک حامل) لایه نیمرسانا در کل گستره دمایی بخصوص در دماهای پایین دارد و در دماهای پایین فرآیند رسانش را کاملاً کنترل می کند. در این ناحیه که لایه تبهگن نامیده می شود حامل های بار یک فضای دو بعدی را تجربه می کنند.

با شکل گیری لایه تبهگن، رسانش الکتریکی در لایه نیمرسانا آمیزشی از رسانش در لایه تبهگن و رسانش درون نواری (نوار رسانش) می باشد. بنابراین برای تحلیل خواص الکتریکی لایه نیمرسانا باید داده های تجربی حال طوری اصلاح شوند تا اثرات لایه تبهگن بر خواص الکتریکی لایه نیمرسانا از بین رود زیرا بدون این تصحیح، پارامترهای برازشی نظیر تراکم اتم های بخشنده بسیار بزرگ و انرژی فعالسازی آن بسیار کوچکتر از حد واقعی آن بدست می آید. شکل ۲-۲ طرح شماتیکی از شکل گیری لایه تبهگن و لایه کپه ای درون لایه نیمرسانا را نشان می دهد.



شکل ۲-۲: شکل گیری لایه تبهگن و کپه ای درون لایه نیمرسانا

با استفاده از مدل دولایه ای اثر هال که توسط لوک و همکاران [۴۵] گزارش شده است می توان تصحیح لازم را بر روی داده های تجربی حال (تراکم و تحرک حامل) انجام داد:

$$n_1 = \frac{(\mu_H n_H - \mu_2 n_2)^2}{\mu_H^2 n_H - \mu_2^2 n_2} \quad (۲-۱۵)$$

^۱ . two – layer Hall – effect model

$$\mu_1 = \frac{\mu_H^2 n_H - \mu_2^2 n_2}{\mu_H n_H - \mu_2 n_2} \quad (2-16)$$

که در آن n_H و μ_H تحرک و تراکم حامل می باشد که به صورت تجربی اندازه گیری می شود، n_2 و μ_2 تحرک و تراکم حامل در لایه تبهگن است که با برون یابی خطی از تغییرات تراکم و تحرک حامل هنگامی که دما بسمت صفر میل می کند بدست می آید و n_1 و μ_1 تحرک و تراکم حامل در لایه کپه ای (اصلاح شده) می باشند.

۴-۲ - سازوکارهای پراکندگی در نمونه های با گاز الکترون دو بعدی^۱ (2DEG) (ساختارهای ناهمگون^۲ و چاه های کوانتومی^۳)

۴-۲-۱ - آرایش اصلاحی^۴

آرایش جزء جدا ناپذیری از قطعات نیمرسانا می باشد. هدف از آرایش یک نیمرسانا کنترل تغییرات تراکم حامل ها در آن است. لازمه این امر یونیده شدن آلاینده ها ست. برای مثال در یک نیمرسانای نوع - n هنگامی که آلاینده های بخشنده یونیده می شوند، یون های باردار مثبت در بلور نیمرسانا به جا می مانند. این مراکز باردار مثبت باعث پراکندگی الکترون های آزاد می شوند. پراکندگی از ناخالصی های یونیده یکی از مهمترین سازوکارهای پراکندگی در ترابری حامل ها در نیمرساناها به ویژه در دماهای پایین است. همانطور که می دانیم در دماهای پایین الکترون ها در مکان های موجود در بخشنده ها جایگزیده می شوند. بنابراین تراکم حامل های آزاد موجود برای رسانش کاهش می یابد (انجماد حامل ها^۵). این امر باعث ایجاد اثرات منفی بر عملکرد قطعه در دماهای پایین دارد. یک سوال در این مورد آن است که آیا می توان تراکمی از الکترون های آزاد با

¹. Two Dimensional Electron Gas

². Heterostructures

³. Quantum Wells

⁴. Modulation doping

⁵. Carrier freeze - out

مقدار قابل کنترل و حداقل پراکندگی داشت؟ جواب مثبت مشروط بر به کارگیری "آلایش اصلاحی"^۱ است. شکل ۲ - ۳ یک ساختار با آلایش اصلاحی را نشان می دهد. این تصویر ساختاری متشکل از GaAs/AlGaAs (دو نیمرسانا با گاف های نواری متفاوت) را نشان می دهد که در آن ماده با گاف نواری بزرگتر آلاینده شده است. در شرایط تعادل گرمایی، الکترون های رسانشی وابسته به ماده با گاف نواری بزرگتر به نوار رسانش ماده با گاف نواری باریکتر منتقل شده و بر اثر جداسازی فضایی بخشنده های باردار مثبت و الکترون های باردار منفی ایجاد یک میدان الکتریکی داخلی می کنند که باعث خمش نواری^۲ می گردد. در این ساختار معمولا برای به حداقل رسانیدن پراکندگی وابسته به ناخالصی های یونیده از یک لایه فاقد آلایش موسوم به "جداکننده"^۳ استفاده می شود. مجموعه این فرایندها سبب می شود که الکترون ها حتی در دماهای پایین نیز تراکم و تحرک خود را حفظ می کنند. در این ساختارها با ایجاد میدان الکتریکی و خمش نواری، یک چاه کوانتومی (مثلثی یا مربعی) شکل می گیرد و بخش عمده تراکم الکترونی اولین زیرتراز^۴ از چاه کوانتومی را اشغال می کنند. در این شرایط الکترون های موجود در چاه کوانتومی یک گاز الکترون دو بعدی^۵ را تشکیل می دهند که می توانند تنها در صفحه ی عمود بر راستای رشد حرکت کنند.

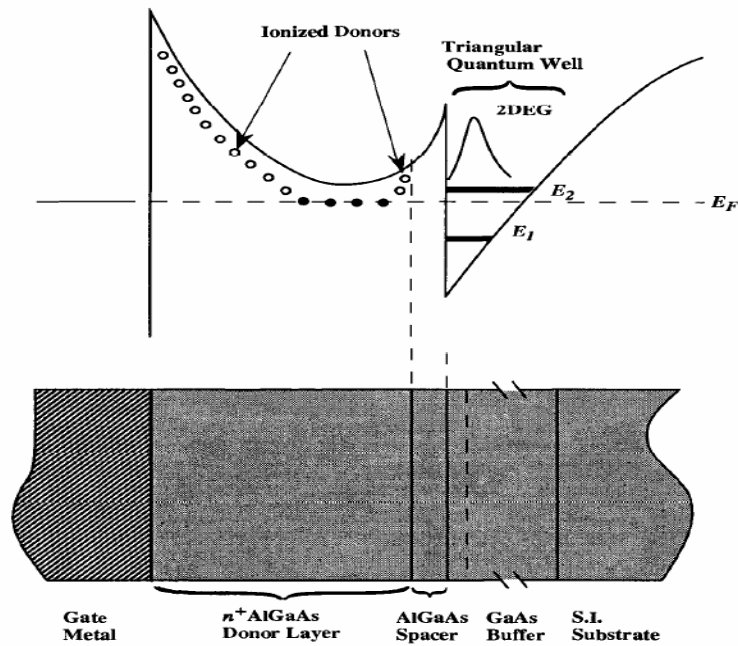
¹. Modulation doping

². Band bending

³. Spacer

⁴. Sub band

⁵. Two dimensional electron gas (2DEG)



شکل ۲-۳: ساختار ناهمگون AlGaAs/ GaAs [۴۶].

در این ساختارها نیز همانند شرایط کپه ای، برای تحلیل و برازش داده های تجربی تحرک حامل های الکترونی برحسب دما باید سازوکارهای مختلف پراکندگی نظیر پراکندگی فونون های اپتیکی طولی قطبی، پراکندگی فونون های آکوستیکی از طریق پتانسیل تغییر شکل، پراکندگی پیزوالکتریک، پراکندگی ناخالصی یونیده توسط بارهای سطح مشترک و بخشنده های راه دور و پراکندگی ناشی از دررفتگی ها در نظر گرفته شود که در ادامه به شرح آن ها می پردازیم.

۲-۴-۲ - سازوکارهای پراکندگی ذاتی الکترون های 2D

۲-۴-۲-۱ - پراکندگی فونون های آکوستیکی از طریق پتانسیل تغییر شکل

تحرک محدود شده توسط پتانسیل تغییر شکل آکوستیکی با رابطه زیر داده می شود [۴۷]:

$$\mu_{ac}(T) = \frac{e\hbar^3 \rho u_1^2 L}{m^* E_1^2 k_B T} \quad (2-17)$$

به طوری که u_1 سرعت فونون های آکوستیکی طولی، E_1 پتانسیل تغییر شکل آکوستیکی و L عرض

چاه کوانتومی می باشد که به صورت زیر محاسبه می شود [۴۸]:

$$L = 2 \left(\frac{n_s}{10^{12} \text{cm}^{-2}} \right)^{-1/3} \times 55 \text{Å} \quad (۱۸ - ۲)$$

که در آن n_s تراکم بار ورقه ای گاز الکترون دو بعدی می باشد.

۲ - ۴ - ۲ - پراکندگی پیزوالکتریک

در مواد قطبی یک برهمکنش قوی بین حامل های آزاد و فونون های آکوستیکی در انرژی های پایین از طریق اثر پیزوالکتریک انجام می گیرد. تحرک محدود شده توسط این سازوکار در سیستم های دو بعدی به صورت زیر فرمول بندی شده است [۴۹]:

$$\mu_{pz}(T) = \frac{\pi k_f E_l^2}{Le^2 h_{14}^2} \left[\frac{9}{32} + \frac{13}{32} \left(\frac{u_l}{u_t} \right)^2 \frac{I_A(\gamma_t)}{I_A(\gamma_l)} \right]^{-1} \mu_{dp} \quad (۱۹ - ۲)$$

که در آن h_{14} ثابت پیزوالکتریک، u_t سرعت فونون های آکوستیکی عرضی، $k_f (= (2\pi n_s)^{1/2})$ بردار موج در سطح فرمی می باشد. سایر پارامترها به صورت زیر تعریف می شوند:

$$I_A(\gamma_t) = \left[\left(\frac{4\gamma_t}{3\pi} \right)^2 + 1 \right]^{1/2} \quad (۲۰ - ۲)$$

$$I_A(\gamma_l) = \left[\left(\frac{4\gamma_l}{3\pi} \right)^2 + 1 \right]^{1/2} \quad (۲۱ - ۲)$$

$$\gamma_t = \frac{2\hbar u_t k_f}{k_B T} \quad (۲۲ - ۲)$$

$$\gamma_l = \frac{2\hbar u_l k_f}{k_B T} \quad (۲۳ - ۲)$$

۲-۴-۲-۳ - پراکندگی فونون های اپتیکی طولی قطبی

در دماهای بالا، تحرک حامل ها عمدتاً توسط پراکندگی فونون های اپتیکی طولی قطبی محدود

می شود. تحرک محدود شده توسط این سازوکار پراکندگی با رابطه زیر داده می شود [۵۰]:

$$\mu_{pop}(T) = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon_s\hbar^2}{e\omega(m^*)^2L} (\exp(\hbar\omega/k_B T) - 1) \quad (2-24)$$

که در آن $1/\epsilon_p = 1/\epsilon_\infty - 1/\epsilon_s$ می باشد. $\hbar\omega$ انرژی فونون های اپتیکی قطبی، ϵ_s و ϵ_∞ به ترتیب ثابت دی الکتریک فرکانس بالا و پایین می باشد.

۲-۴-۳ - پراکندگی غیرذاتی

۲-۴-۳-۱ - پراکندگی ناخالصی یونیده توسط بخشنده های راه دور^۱

یکی از سازوکارهای اثر گذار در دماهای پایین بر تحرک الکترونی از طریق پراکندگی ناخالصی

یونیده توسط بخشنده های راه دور در لایه سدی می باشد. رابطه این پراکندگی به صورت زیر ارائه

شده است [۴۸]:

$$\mu_{remote}(T) = \frac{64\pi\hbar^3 k_f^3 \epsilon_0^2 \epsilon_s^2 s_0^2}{e\omega(m^*)^2 N_d} \left(\frac{1}{L_0^2} - \frac{1}{LM_0^2} \right)^{-1} \quad (2-25)$$

که در آن S_0 ثابت استتار^۲ می باشد و در نمونه های تبهگن^۳ S_0 با رابطه زیر داده می شود [۵۱]:

$$S_0 = \frac{e^2 m^*}{2\pi\epsilon_0\epsilon_s\hbar^2} \quad (2-26)$$

به طوری که L_0 و LM_0 به صورت زیر تعریف می شوند (شکل ۲-۴):

$$L_0 = d_0 + L/2 \quad (2-27)$$

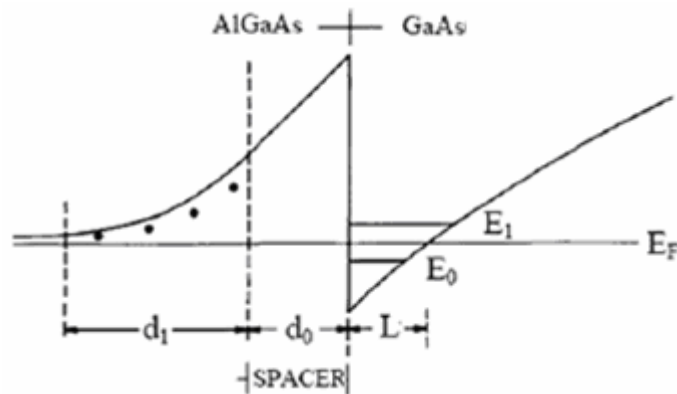
$$LM_0 = L_0 + d_1 \quad (2-28)$$

^۱. Ionized impurity scattering due to remote donors

^۲. Screening constant

^۳. Degenerate

که در آن d_0 عرض لایه جدا کننده^۱، $d_1 (= n_s / N_d)$ عرض لایه تهی^۲ و N_d تراکم بخشنده ها در لایه سدی می باشد.



شکل ۲-۴: طرح شماتیک از نوارهای انرژی در یک پیوند گاه ناهمگون نوعی GaAs / AlGaAs [۴۸].

۲-۴-۳-۲ - پراکندگی ناخالصی یونیده توسط بارهای سطح مشترک^۳

از آنجا که کانال گاز الکترون دو بعدی در ماده نیمرسانا با گاف نواری کوچکتر تر شکل می گیرد، سازوکار پراکندگی دیگری ناشی از ناخالصی ها و ناکاملی های سطح مشترک امکان تاثیر بر تحرک حامل های دوبعدی را خواهند داشت که با رابطه مستقل از دمای زیر داده می شود [۵۲]:

$$\mu_{bi} = \frac{4\pi\epsilon_0^2\epsilon_s^2\hbar^3k_f^3}{e^3(m^*)^2N_{bi}I_B} \quad (۲۹-۲)$$

که در آن N_{bi} تراکم ناخالصی در چاه پتانسیل ناشی از ناخالصی های پس زمینه یا (و) بارهای سطحی می باشد و I_B به صورت زیر محاسبه می شود:

$$I_B = \int_0^\pi \frac{\sin(\varphi)}{\left[2\sin(\varphi) + \frac{S_0}{k_f}\right]^2} d\varphi \quad (۳۰-۲)$$

^۱. Spacer layer

^۲. Depletion layer

^۳. Ionized impurity scattering due to interface charge

۲-۴-۳-۳- پراکندگی دررفتگی

رابطه پراکندگی دررفتگی برای گاز الکترون دو بعدی تبهگن ($n_s = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$) با رابطه زیر داده می شود [۵۴و۵۳]:

$$\mu_{\text{disl}} = \frac{4\pi\epsilon_0^2 \epsilon_s^2 \hbar^3 k_f^4 c^2}{e^3 (m^*)^2 N_{\text{disl}} I_t} \quad (۲-۳۱)$$

که در آن N_{disl} تراکم دررفتگی ها، c ثابت شبکه ماده با گاف نواری بزرگتر، که از طریق قانون وگارد^۱ محاسبه می شود، و I_t برابر است با:

$$I_t = 1/2 \xi^2 \int_0^1 \frac{1}{(1 + \xi^2 u^2) \sqrt{1-u^2}} d\varphi \quad (۲-۳۲)$$

به طوری که:

$$\xi = 2k_f / q_{TF} \quad (۲-۳۳)$$

$$q_{TF} = 2/a_B \quad (۲-۳۴)$$

$$a_B = \frac{\epsilon_s \epsilon_0 \hbar^2}{\pi e^2 m^*} \quad (۲-۳۵)$$

به گونه ای که در آن ξ پارامتری بدون بعد، q_{TF} بردار موج دو بعدی فرمی - توماس و a_B شعاع موثر بوهر در ماده نامیده می شود.

۲-۴-۴- قانون وگارد

خواص اپتیکی و الکترونیکی قطعات نیمرسانا به ساختار نواری آن ها بستگی دارد. یکی از راه های تغییر ساختار نواری ماده نیمرسانا آرایش آن با ماده دیگر و تشکیل ماده نیمرسانای آلیاژی است. هنگامی که دو نیمرسانای A و B از طریق یک تکنیک رشد مناسب باهم آمیخته می شوند ثابت شبکه و گاف نواری آن را می توان با استفاده از قانون وگارد به صورت زیر محاسبه کرد [۲]:

^۱. Vegards's law

$$a(A_x B_{1-x}) = xa(A) + (1-x)a(B) \quad (۳۶ - ۲)$$

$$E_g(A_x B_{1-x}) = xE_g(A) + (1-x)E_g(B) \quad (۳۷ - ۲)$$

۲ - ۴ - ۵ - محاسبه سرعت فونون های آکوستیکی عرضی و طولی

در ZnO امواج آکوستیکی شامل دو مولفه امواج طولی با سرعت u_l و امواج عرضی با سرعت u_s

می باشند که با روابط زیر محاسبه می گردند [۵۵]:

$$u_l = \sqrt{C_{33} / \rho} \quad (۳۸ - ۲)$$

$$u_t = \sqrt{C_{44} / \rho} \quad (۳۹ - ۲)$$

که در آن C_{33} و C_{44} ضریب سختی الاستیکی^۱ نامیده می شود و مقدار آن ها به ترتیب در حدود ۲۴۷ GPa و ۷۵ GPa گزارش شده است [۵۶] و ρ چگالی ماده می باشد.

^۱. Elastic stiffness coefficient

۲-۵ - مدل نظری مشخصه الکتریکی ترانزیستورهای اثر میدانی

واژه ترانزیستور مخفف انتقال - مقاومت می باشد. اگرچه ترانزیستورها یک قطعه ساده به نظر می رسند اما یکی از مهمترین قطعات الکترونیکی به شمار می آیند. ترانزیستورها به دو بخش عمده تقسیم می شوند:

۱ - **ترانزیستورهای دوقطبی:** ترانزیستورهایی هستند که در آن ها هم الکترون ها و هم حفره ها در روند رسانش شرکت دارند. این ترانزیستورها دارای سه پایانه^۱ به نام های جمع کننده^۲، پایه^۳ و گسیلنده^۴ می باشند. در این ترانزیستورها با اعمال یک جریان به پایه، جریان عبوری از پایانه گسیلنده و جمع کننده کنترل می شود.

۲ - **ترانزیستورهای تک قطبی:** ترانزیستورهایی هستند که در آن ها تنها یک نوع حامل بار بطور غالب در روند رسانش شرکت می کند. این ترانزیستورها دارای سه پایانه به نام های دروازه^۵، چشمه^۶ و دررو^۷ می باشند. از جمله این ترانزیستورها می توان به ترانزیستور اثر - میدانی^۸ (FET)، ترانزیستور اثر - میدانی فلز - اکسید - نیمرسانا^۹ (MOSFET)، ترانزیستور اثر - میدانی فلز - عایق - نیمرسانا^{۱۰} (MISFET) و ترانزیستور لایه - نازک اشاره کرد. با توجه به تحلیل داده های وابسته به مشخصه جریان - ولتاژ ترانزیستورهای اثر میدانی در فصل ۵ در ادامه به شرح مختصری از این ترانزیستورها می پردازیم.

ترانزیستور اثر - میدانی: در این ترانزیستورها پایانه کنترلی، دروازه، جریانی مصرف نمی کند و تنها با اعمال ولتاژ به دروازه و ایجاد میدان درون نیمرسانا جریان عبوری از آن کنترل می شود. در واقع

¹. Terminal

². Collector

³. Base

⁴. Emitter

⁵. Gate

⁶. Source

⁷. Drain

⁸. Field - Effect Transistor

⁹. Metal - Oxide - Semiconductor Field - Effect Transistor

¹⁰. Metal - Insulator - Semiconductor Field Effect Transistor

دروازه جریان عبوری از دررو به چشمه را کنترل می کند. کانال این ترانزیستور، ماده نیمرسانایی است که بین الکتروود چشمه و دررو قرار می گیرد.

FET ها بسته به نوع آرایش ماده نیمرسانا دارای دو نوع کانال، نوع - n و نوع - p، می باشند. FET ها معمولا بسیار حساس بوده و حتی با الکتریسیته ساکن بدن نیز تحریک می گردند. به همین دلیل نسبت به نویز بسیار حساس اند.

ترانزیستور اثر - میدانی فلز - اکسید - نیمرسانا: این ترانزیستور یک دیود ماس¹ (MOS) با دو پیوندگاه p - n است که در مجاور ناحیه دیود ماس قرار می گیرد. (ساختار فیزیکی دیود ماس را می توان با کمک گرفتن از ساختار یک خازن با صفحات موازی شرح داد بدین صورت که صفحه بالایی، صفحه فلزی، و صفحه پایینی، صفحه نیمرسانا، توسط یک عایق از هم جدا شده اند).

عملکرد MOSFET شبیه به FET می باشد با این تفاوت که جریان ورودی دروازه آن صفر است. این نوع ترانزیستور ها توان مصرفی خیلی پایینی دارند و اهمیت ویژه آن ها این است که می تواند دارای ابعاد کوچکتری باشند و فضای کمتری اشغال کنند.

ترانزیستور اثر - میدانی فلز - عایق - نیمرسانا: این ترانزیستور از خانواده MOSFET می باشد و عملکرد آن بسیار شبیه به آن است. تنها تفاوت آن با MOSFET در این است که به جای استفاده از لایه اکسید، از لایه عایق در آن استفاده می شود.

ترانزیستور لایه - نازک: TFT ساده ترین فرم ترانزیستور اثر - میدانی است. بدان معنی که TFT یک نوع خاصی از FET است که در آن کانال فعال قطعه لایه ی نازکی از ماده نیمرسانا می باشد که بر روی زیر لایه دیگری لایه نشانی می شود. تفاوت آن با ترانزیستورهای معمولی در آن است که در ترانزیستورهای معمولی از ماده نیمرسانا (کانال) به عنوان زیر لایه نیز استفاده می شود اما در TFT ها لایه نازکی از ماده نیمرسانا (کانال) بر روی زیر لایه دیگری لایه نشانی می شود و به عنوان کانال فعال قطعه عمل می کند.

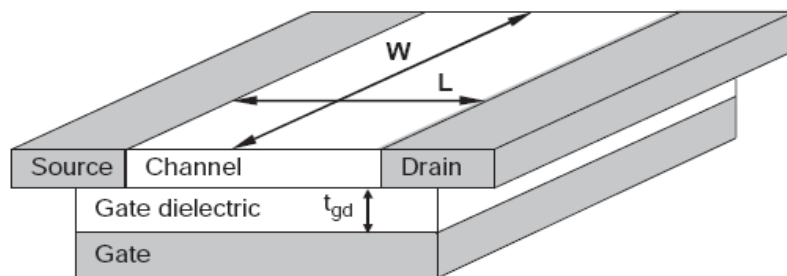
¹ . Metal - Oxide - Semiconductor

همچنین اتصالات فلزی و لایه دی الکتریک نیز به صورت لایه نازک لایه نشانی می شود. مهمترین کاربرد TFT ها در ساخت LCD ها می باشد.

در این بخش به بررسی نظری عملکرد ترانزیستورهای تک قطبی به ویژه ZnO – TFT می پردازیم. مهمترین و برجسته ترین ویژگی ترانزیستورهای لایه نازک ZnO شفافیت اپتیکی آن ها می باشد. به چنین قطعاتی " قطعات الکترونیکی نامرئی " یا " قطعات الکترونیکی شفاف " می گویند.

۲-۵-۱- ساختار TFT و عملکرد آن

به منظور بررسی دقیقتر ترانزیستور لایه نازک اکسید روی شکل ۲-۵ را در نظر می گیریم.

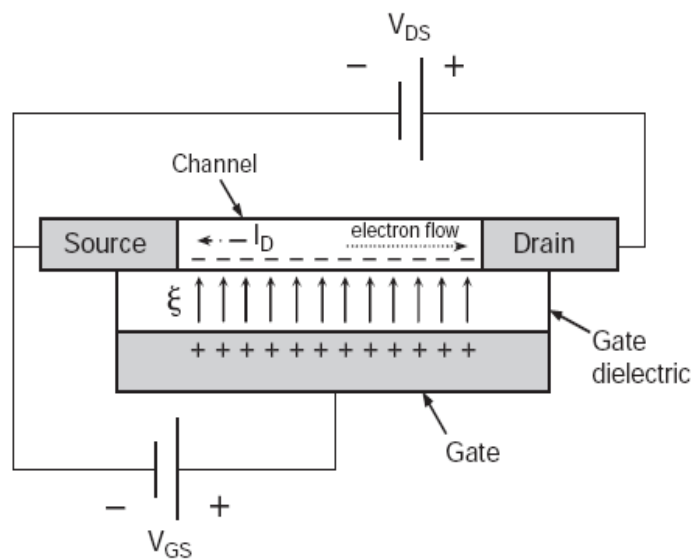


شکل ۲-۵: طرح شماتیک ساده ای از ساختار یک ترانزیستور لایه نازک [۵۷].

این ترانزیستور شامل سه پایانه دررو، چشمه و درروازه می باشد به طوری که لایه کانال مابین الکترودهای چشمه و دررو قرار دارد. در این شرایط تزریق حامل بار به ناحیه کانال توسط الکترودهای چشمه و خروج حامل بار از ناحیه کانال توسط الکترودهای دررو صورت می پذیرد. چنانچه پیداست الکترودهای درروازه از ناحیه کانال و الکترودهای چشمه توسط یک لایه دی الکتریک نازک جدا شده است. الکترودهای درروازه کار کنترل جریان عبوری از کانال را بر عهده دارد. ابعاد این ساختار شامل عرض کانال (W)، طول کانال (L) و ضخامت دی الکتریک درروازه (t_{gd}) می باشد.

شکل ۲-۶ وضعیت میدان ها و موقعیت کانال الکترونی را نشان می دهد. ولتاژ اعمال شده به الکترودهای درروازه نسبت به الکترودهای چشمه، که به عنوان ولتاژ مرجع در نظر گرفته می شود، تراکم بار در

کانال را از طریق ظرفیت دی الکتریک دروازه تعیین می کند. اختلاف پتانسیل دروازه نسبت به کانال با ایجاد میدان الکتریکی همراه می شود که این میدان باعث شکل گیری لایه ای از بار فضایی (کانال رسانا) با بزرگی یکسان و علامت مخالف در دو طرف دی الکتریک دروازه شود (توضیحات بیشتر در این مورد در بخش ۲ - ۵ - ۴ ارائه گردیده است) به طوری که بزرگی این تراکم بار متناسب با ولتاژ دروازه اعمالی می باشد. این تغییر در تراکم بار می تواند سبب تغییراتی در رسانش چشمه به دررو شده و مشخصه الکتریکی آن را تحت تاثیر قرار دهد. برای یک قطعه با کانال نوع n - ولتاژ دروازه مثبت به افزایش تراکم الکترونی در کانال منجر شده در حالی که ولتاژ دروازه منفی تراکم الکترونی کانال را کاهش می دهد. این مدوله سازی رسانش چشمه به دررو (جریان I_{DS}) از طریق ولتاژ دروازه اساس عملکرد ترانزیستورهای اثر - میدانی را تشکیل می دهد.



شکل ۲ - ۶: طرح شماتیک از عملکرد ترانزیستور لایه نازک [۵۷].

۲ - ۵ - ۲ - مشخصه جریان - ولتاژ در TFT ایده آل

عملکرد TFT به طور مشخص به مدلسازی مشخصه های جریان - ولتاژ $I_{DS} - V_{GS}$ و همچنین

$I_{DS} - V_{DS}$ می پردازد. در این مدلسازی در قطعات MISFET کانال - بلند فرض می شود: ۱- تحرک

کانال مستقل از ولتاژ دروازه باشد. ۲- در فصل مشترک بین کانال و لایه عایق تله های الکترونی وجود نداشته باشد. ۳- تنها جریان سوق مورد بررسی قرار گیرد. ۴- آرایش در کانال یکنواخت باشد. ۵- جریان نشت کوچک و قابل چشم پوشی باشد. ۶- میدان عرضی (میدان عمود بر محور کانال) در دی الکتریک (لایه اکسیدی) خیلی بزرگتر از میدان طولی (میدان در راستای محور کانال) باشد. معادله ترانزیستور ایده آل اثر میدانی نیمرسانا - عایق - فلز (MISFET) به صورت زیر می باشد [۵۸ و ۵۹ و ۶۰]:

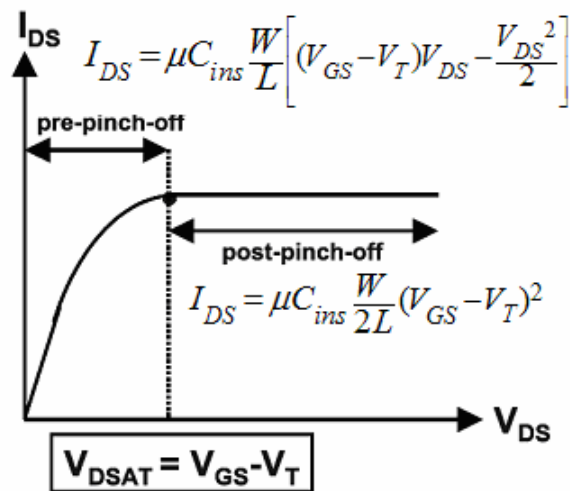
$$I_{DS} = \begin{cases} 0 & \dots\dots\dots V_{GS} \leq V_T \\ \mu C_{ins} \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] & \dots\dots\dots V_{DS} \leq V_{GS} - V_T \\ \frac{1}{2} \mu C_{ins} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 & \dots\dots\dots V_{DS} > V_{GS} - V_T \end{cases} \quad (۴۰ - ۲)$$

که در آن μ تحرک کانال، C_{ins} ظرفیت دی الکتریک دروازه در واحد سطح و V_T ولتاژ آستانه (ولتاژی که به ازای آن رسانش کانال آغاز می شود) می باشد. منظور از "حالت خاموش" حالتی است که ولتاژ اعمالی به دروازه کمتر از ولتاژ آستانه باشد که در این حالت جریان دررو بسیار ناچیز می باشد.

شکل ۲ - ۷ یک منحنی نوعی از تغییرات $I_{DS} - V_{DS}$ را به ازای یک ولتاژ دروازه معین نشان می دهد. بر طبق رابطه (۴۰ - ۲) و شکل ۲ - ۷ عملکرد ترانزیستورها به دو ناحیه "قبل از تنگش"^۱ و "بعد از تنگش"^۲ تقسیم می شود. نقطه تنگش به نقطه ای اطلاق می شود که در آن نقطه، به ازای ولتاژ اشباع V_{DSAT} بیشترین جریان دررو از کانال عبور می کند. این ولتاژ دررو اشباع از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$V_{DSAT} = V_{GS} - V_T \quad (۴۱ - ۲)$$

^۱. Pre - pinch - off
^۲. Post - pinch - off



شکل ۲-۷: منحنی جریان-ولتاژ دررو در یک TFT نوعی. این مشخصه نشان دهنده دو ناحیه عملکرد ترانزیستور قبل و بعد از تنگش به ازای یک ولتاژ دروازه ای می باشد [۶۱].

باید توجه داشت که مقادیر ولتاژ آستانه و تحرک کانال دو پارامتر اساسی و بنیادی در مدلسازی نظری مشخصه جریان - ولتاژ ترانزیستورهای معمول بشمار می آیند.

نکته قابل ذکر در مورد ترانزیستورهای لایه نازک ZnO آن است که این نوع ترانزیستورها انحرافات نسبت به مدل ایده آل از خود نشان می دهند [۶۲]. علت این انحرافات عمدتاً ناشی از وابستگی تحرک حامل های کانال به ولتاژ دروازه است. برای بررسی خصوصیات الکتریکی ترانزیستور لایه نازک ZnO لازم است دو پارامتر اساسی تحرک میانگین کانال و نیز ولتاژ روشن^۱ (V_{on}) در نظر گرفته شوند. V_{on} ولتاژ دروازه ای محسوب می شود که در آن کانال قطعه شروع به روشن شدن می کند یعنی رسانش کانال شروع به افزایش از مقدار مینیوموم "حالت خاموش" می کند.

^۱. Turn - on voltage

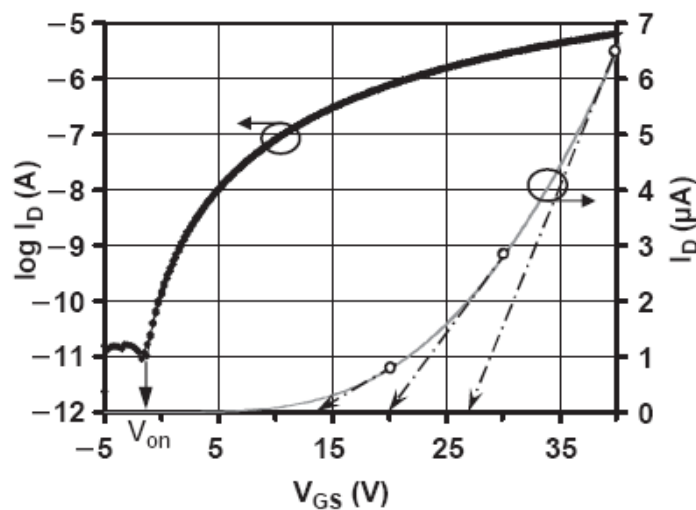
۲-۵-۳ - نحوه تعیین V_{on} در ZnO - TFT ها و تفاوت آن با V_T

در ترانزیستورهای معمول

شکل ۲-۸ عدم کاربرد ولتاژ آستانه را به عنوان پارامتر اساسی برای بررسی خصوصیات الکتریکی ZnO - TFT را نشان می دهد. در ناحیه ی خطی عملکرد TFT (یعنی در ناحیه ای که V_{DS} کوچک باشد طوری که داشته باشیم $V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$) رابطه (۲-۴۰) به صورت زیر ساده می شود :

$$I_{DS} = \mu C_{ins} \frac{W}{L} V_{DS} (V_{GS} - V_T) \quad (۲-۴۲)$$

با توجه به رابطه (۲-۴۲) انتظار می رود در نمودار داده های تجربی مربوط به I_{DS} بر حسب V_{GS} از برون یابی خطی منحنی $I_{DS} - V_{GS}$ با محور افقی که $V_{GS} = V_T$ خواهد بود بتوان ولتاژ آستانه را بدست آورد [۶۳].



شکل ۲-۸: نحوه بدست آوردن V_{on} و V_T [۶۲].

شکل ۲-۸ تغییرات $I_{DS} - V_{GS}$ را در دو نمودار یکی خطی (محور قائم سمت راست) و دیگری نیم - لگاریتمی (محور قائم سمت چپ) نشان می دهد. با استفاده از روش برون یابی، تعیین V_T از سه نقطه با ولتاژ های متفاوت (ولت) ۲۰ و ۳۰ و ۴۰ V_{GS} انجام گرفته است. از نکات قابل ذکر آن

که: (۱) $V_T -$ با نقطه ای که برون یابی از آن شروع می شود تغییر می کند. برای مثال در شکل فوق به ازای مقادیر مختلف V_{GS} ($= 20$ و 30 و 40 ولت) مقادیر V_T مختلفی (به ترتیب $13/5$ و 20 و 27 ولت) بدست می آید. (۲) - با توجه به داده های وابسته به نمودار نیم - لگاریتمی مقدار V_T می تواند بنا به پیشنهاد هافمن [۶۲] در نقطه متناظر با ولتاژ V_{GS} در حدود $V - 2$ باشد که با مقادیر بدست آمده برای V_T در روش نخست بسیار متفاوت می باشد. بنابراین در تعیین یک مقدار یکتا برای V_T و نیز در معنی فیزیکی که متناظر با نقطه روشن شدن قطعه است ابهام وجود دارد. به منظور حل این ابهام، استخراج V_{on} قطعه مستقیماً از منحنی نیم - لگاریتمی $I_{DS} - V_{GS}$ انجام می شود (شکل ۲ - ۸ را مشاهده نمایید). با این روش V_{on} همان ولتاژ دروازه ای است که I_{DS} شروع به افزایش از مقدار مینیوموم حالت خاموش می کند [۶۲]. برای نمونه برای داده های نشان داده شده در شکل ۲ - ۸، V_{on} برابر با $2 -$ (ولت) بدست می آید. بنابراین V_{on} برای ZnO - TFT یک پارامتر معنا دار از نظر فیزیکی است که مقدار آن به صورت یکتا و منحصر بفرد تعیین می شود (برخلاف پارامتر V_T). با توجه به مقدار V_{on} ، TFT ها بطور معمول دارای دو مد عملیاتی هستند:

- ۱ - مد افزایشی^۱: این مد به حالتی گفته می شود که در آن V_{on} بزرگتر از صفر باشد، یعنی TFT به ازای ولتاژ دروازه صفر ولت "خاموش" باشد.
- ۲ - مد تهی^۲: این مد به حالتی گفته می شود که در آن V_{on} کوچکتر یا مساوی با صفر باشد، یعنی TFT برای رسیدن به "حالت خاموش" به ولتاژ دروازه غیر صفر نیاز دارد.

¹. Enhancement mode
². Depletion mode

۲-۵-۴ - تحرک کانال

علاوه بر V_{on} ، تحرک کانال نیز یکی از پارامترهای اساسی برای تحلیل خصوصیات الکتریکی قطعات ZnO - TFT است. بنا به تعریف تحرک به عنوان ثابت تناسب بین سرعت سوق الکترون (v_d) و میدان الکتریکی (E) اعمال شده می باشد و به صورت زیر بیان می شود:

$$v_d = \mu E \quad (۲-۴۳)$$

با توجه به گزارش هافمن [۲۵] برای تعیین تحرک کانال در یک ZnO - TFT می توان از کمیت تحرک میانگین^۱ (μ_{avg}) استفاده کرد. استخراج μ_{avg} با فرض آن که شارش جریان سوق در فرآیند رسانش غالب باشد با عبارتی برای رسانش کانال (G_{CH}) شروع می شود:

$$G_{CH}(V_{GS}) \equiv \lim_{V_{DS} \rightarrow 0} \left(\frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{DS}} \right) = \mu_{avg}(V_{GS}) \frac{W}{L} Q_{ind}(V_{GS}) \quad (۲-۴۴)$$

که در آن $Q_{ind}(V_{GS})$ بار انبارشی (در واحد سطح) القا شده در کانال از طریق ولتاژ دروازه بزرگتر از ولتاژ روشن بوده و به همراه دیگر کمیت ها نظیر $\mu_{avg}(V_{GS})$ و $G_{CH}(V_{GS})$ تابعی از $V_{GS} > V_{on}$ می باشند. باید توجه داشت که در این روش بجای استفاده از V_T از V_{on} استفاده می شود. در این شرایط مقدار Q_{ind} را می توان از تقریب زیر بدست آورد:

$$Q_{ind}(V_{GS}) \cong C_{ins}(V_{GS} - V_{on}) \quad (۲-۴۵)$$

با ترکیب روابط (۲-۴۴) و (۲-۴۵) می توان تحرک میانگین را به ازای مقادیر مختلف $V_{GS} (> V_{on})$ محاسبه کرد:

$$\mu_{avg}(V_{GS}) = \frac{G_{CH}(V_{GS})}{\frac{W}{L} Q_{ind}(V_{GS})} \cong \frac{G_{CH}(V_{GS})}{\frac{W}{L} C_{ins}(V_{GS} - V_{on})} \quad (۲-۴۶)$$

^۱. Average mobility

۲-۵-۵- تاثیر تحرک وابسته به ولتاژ دروازه برای حامل های

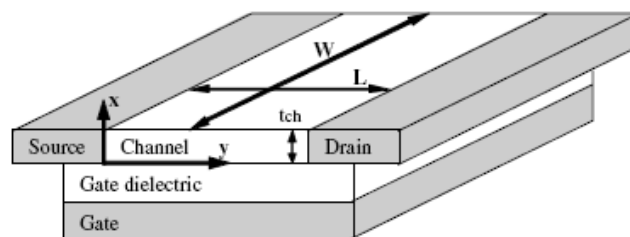
الکترونی در مدل TFT ایده آل

به منظور ارائه مدلی (مدل غیر ایده آل که تحرک کانال وابسته به V_{GS} است) که خصوصیات الکتریکی ZnO-TFT را بررسی کند از دو پارامتر μ_{avg} و V_{on} استفاده خواهیم کرد زیرا این دو پارامتر می تواند تحرک کانال وابسته V_{GS} را توصیف کند. با ارائه این مدل و در نظر گرفتن این دو پارامتر می توان مشخصات جریان - ولتاژ مربوط به ZnO-TFT را با دقت بسیار بالایی بازتولید کرد [۲۵].

جزئیات بیشتر استخراج چنین مدلی در مرجع [۲۵] آمده است. تمامی فرض های بکار رفته در مدل ایده آل TFT نیز در این جا بکار رفته است جز آن که در این مدل تحرک به ولتاژ دروازه وابسته است. برای استخراج چنین مدلی فرض می کنیم که سرعت میانگین الکترون در مکان (x,y) برابر با حاصلضرب مولفه y میدان الکتریکی و تحرک در آن مکان باشد (شکل ۲-۹ را ببینید) در نتیجه چگالی جریان الکترونی در نقطه (x,y) درون کانال TFT برابر است با:

$$J_n(x,y) = -qn(x,y)\mu(x,y)\frac{dV(y)}{dy} \quad (۲-۴۷)$$

که در آن q بار الکترون، x و y به ترتیب ابعاد وابسته به ضخامت و طول کانال می باشند، μ تحرک الکترونی، n تراکم الکترونی و V پتانسیل الکترون در نقطه (x,y) می باشد. لازم به ذکر است که پتانسیل V نسبت به الکتروود چشمه (موقعیت $y = 0$) اندازه گیری می شود. از طرفی لزوم پایستگی جریان لازم می دارد که شارش جریان کل در هر نقطه y در طول کانال یکسان می باشد.



شکل ۲-۹: طرح شماتیکی از ساختار TFT و ابعاد قراردادی آن [۲۵].

بنا بر گزارش هافمن [۲۵] و با فرض آن که قطعه در ناحیه خطی عمل می کند، جریان دررو را می توان به صورت زیر نوشت:

$$I_{DS} = -W \int_0^{t_{CH}} J_n(x, y) dx = -qW \frac{dV(y)}{dy} \int_0^{t_{CH}} \mu(x, y) n(x, y) dx \quad (۴۸ - ۲)$$

که در آن W و t_{CH} به ترتیب عرض و ضخامت کانال می باشند.
رسانندگی ورقه ای کانال^۱ G_{SH} با رابطه زیر داده می شود:

$$G_{SH}(y) = \int_0^{t_{CH}} q \mu(x, y) n(x, y) dx \quad (۴۹ - ۲)$$

با ترکیب روابط (۲ - ۴۸) و (۲ - ۴۹) خواهیم داشت:

$$I_{DS} = W \frac{dV(y)}{dy} G_{SH}(y) = W \frac{dV}{dy} G_{SH}(V) \quad (۵۰ - ۲)$$

همانگونه که پیداست، از آن جا که V تابعی از y است بنابراین G_{SH} می تواند به عنوان تابعی از y یا V نوشته شود. با ضرب dy در طرفین رابطه (۲ - ۵۰) و انتگرال گیری خواهیم داشت:

$$\int_0^L I_{DS} dy = \int_0^{V_{DS}} W G_{SH}(V) dV \quad (۵۱ - ۲)$$

در نتیجه جریان دررو به صورت زیر محاسبه می شود:

$$I_{DS} = \frac{W}{L} \int_0^{V_{DS}} G_{SH}(V) dV \quad (۵۲ - ۲)$$

از طرفی رسانندگی ورقه ای (G_{SH}) با رسانش کانال (G_{CH}) به صورت $G_{SH} = G_{CH} / [W / L]$ رابطه دارد که رسانش کانال G_{CH} به ازای یک V_{GS} معین با رابطه (۲ - ۴۴) داده می شود. در نتیجه رابطه (۲ - ۵۲) به صورت زیر نوشته می شود:

$$I_{DS} = \frac{W}{L} \int_0^{V_{DS}} \mu_{avg}(V) Q_{ind}(V) dV \quad (۵۳ - ۲)$$

که در آن Q_{ind} بار انبارشی (در واحد سطح) القا شده در کانال از طریق ولتاژ دروازه بزرگتر از ولتاژ روشن می باشد و μ_{avg} تحرک میانگین کانال می باشد. برای بدست آوردن مدل ایده آل با فرض

^۱. Channel Sheet Conductance

مستقل بودن تحرک کانال نسبت به ولتاژ، با خارج کردن μ از انتگرال معادله (۲ - ۵۳) و حل آن می توان به مدل مورد نظر دست یافت.

در مدل غیر ایده آل که در آن تحرک کانال وابسته به ولتاژ می باشد در حل انتگرال رابطه

(۲ - ۵۳) کمیتی بنام پتانسیل موثر (V_{eff}) به صورت زیر تعریف می شود:

$$V_{eff}(y) \equiv V_{GS} - V_{on} - V(y) \quad (2 - 54)$$

که در آن $V(y)$ نشان دهنده افت پتانسیل رخ داده در کانال در موضع y تا موقعیت الکتروود چشمه می باشد. از آن جا که $V(y)$ در سرتاسر طول کانال کوچکتر از V_{DS} می باشد لذا در مقابل جمله $V_{GS} - V_{on}$ کوچک و می توان از آن صرفنظر کرد. پتانسیل موثر به عنوان بخشی از ولتاژ V_{GS} تعریف می شود که به القای بار قابل تحرک در موضع y در کانال منجر می شود. از طرفی Q_{ind} را می توان به صورت زیر تقریب زد:

$$Q_{ind}(V_{eff}) = C_{ins} V_{eff} \quad (2 - 55)$$

با استفاده از روابط (۲ - ۵۴) و (۲ - ۵۵) و انجام تبدیل $V \rightarrow V_{eff}$ در رابطه (۲ - ۵۳) می توان نوشت:

$$I_{DS} = C_{ins} \frac{W}{L} \int_{V_{GS} - V_{on} - V_{DS}}^{V_{GS} - V_{on}} \mu_{avg}(V_{eff}) V_{eff} dV_{eff} \quad (2 - 56)$$

اگرچه این معادله برای ناحیه خطی در قطعه TFT نوشته شده اما چنانچه فرض شود که جریان دررو برای ولتاژهای کوچکتر از ولتاژ روشن ناچیز است و اشباع قطعه در ولتاژ $V_{GS} - V_{on}$ پدیدار می شود آنگاه می توان از رابطه (۲ - ۵۶) برای ناحیه اشباع قطعه نیز بهره جست.

برای آنکه رابطه ای مشابه با رابطه (۲ - ۴۰) "مدل ایده آل" داشته باشیم از رابطه زیر استفاده

می شود:

$$I_{DS} = \begin{cases} 0 & \dots \dots \dots V_{GS} \leq V_{on} \\ C_{ins} \frac{W}{L} \int_{V_{GS}-V_{on}-V_{DS}}^{V_{GS}-V_{on}} \mu_{avg}(V_{eff}) \mathcal{V}_{eff} dV_{eff} & \dots \dots \dots V_{DS} \leq V_{GS} - V_{on} \\ C_{ins} \frac{W}{L} \int_0^{V_{GS}-V_{on}} \mu_{avg}(V_{eff}) \mathcal{V}_{eff} dV_{eff} & \dots \dots \dots V_{DS} > V_{GS} - V_{on} \end{cases} \quad (57-2)$$

که در آن:

$$\mu_{avg}(V_{eff}) \approx \mu_{avg}(V_{GS} - V_{on}) \quad (58-2)$$

$\mu_{avg}(V_{eff})$ همان کمیت $\mu_{avg}(V_{GS})$ می باشد که به اندازه $(-V_{on})$ جابجا شده است [۲۵]. به منظور یافتن معادله ای که انتگرال های موجود در رابطه (۵۷-۲) به صورت تحلیلی قابل حل باشند لازم است از برازش چند جمله ای - مرتبه n ام^۱ برای مجموعه داده های $\mu_{avg}(V_{eff})$ به صورت زیر استفاده شود:

$$\mu_{avg}(V_{eff}) \cong \begin{cases} 0 & \dots \dots \dots V_{eff} \leq 0 \\ \sum_{i=0}^n c_i [V_{eff}]^i & \dots \dots \dots V_{eff} > 0 \end{cases} \quad (59-2)$$

با جایگزین کردن این عبارت در رابطه (۵۷-۲) و حل انتگرال های مربوطه خواهیم داشت:

$$(60-2)$$

$$I_{DS} = \begin{cases} 0 & \dots \dots \dots V_{GS} \leq V_{on} \\ C_{ins} \frac{W}{L} \sum_{i=0}^n \left(\frac{c_i}{i+2} [(V_{GS} - V_{on})^{i+2} - (V_{GS} - V_{on} - V_{DS})^{i+2}] \right) & \dots \dots \dots V_{DS} \leq V_{GS} - V_{on} \\ C_{ins} \frac{W}{L} \sum_{i=0}^n \left(\frac{c_i}{i+2} (V_{GS} - V_{on})^{i+2} \right) & \dots \dots \dots V_{DS} > V_{GS} - V_{on} \end{cases}$$

که در آن c_i ضرایب چند جمله ای مرتبه n ام و C_{ins} ظرفیت دی الکتریک دروازه است که برحسب ضریب گذردهی دی الکتریک دروازه، ϵ_s ، و ضخامت آن، d ، از رابطه زیر بدست می آید:

$$C_{ins} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s}{d} \quad (61-2)$$

^۱. nth – order polynomial curve fit

رابطه (۲ - ۶۰) به عنوان مدل غیر ایده آل هافمن شناخته شده و برای برازش داده های تجربی $I_{DS} - V_{DS}$ مربوط به ZnO - TFT که در فصل ۵ ارائه گردیده است بکار برده می شود.

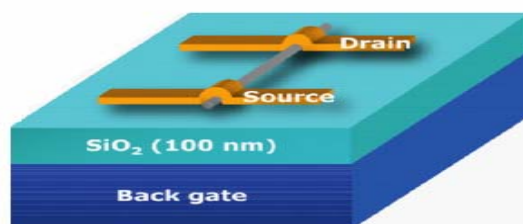
این مدل در فصل ۵ برای نمونه هایی با طول کانال $100 \mu m$ و $4 \mu m$ بکار گرفته شده و مشاهده شده است که این مدل برای قطعاتی با طول کانال $4 \mu m$ به ازای تمامی مقادیر ولتاژ دروازه توصیف کننده مشخصه جریان - ولتاژ نمی باشد که علت این امر به پدیدار شدن آثار کانال کوتاه^۱ نسبت داده می شود که در این قطعات برای تحلیل داده های تجربی $I_{DS} - V_{DS}$ به عنوان پارامتر برازشی در نظر گرفته می شود.

۲ - ۵ - ۶ - ترانزیستور اثر - میدانی نانوسیم^۲ (NWFET)

در طی سال های اخیر، مطالعات زیادی بر روی نانوسیم های نیم رسانای تک بعدی بخاطر کاربرد آن ها به عنوان واحد سازنده قطعات نانو الکترونیک، اپتوالکترونیک، الکتروشیمیایی و حسگرها صورت گرفته است. در این بین نانوسیم های نیم رسانای مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته اند. از میان این مواد نانوسیم های ZnO با گاف نوار پهن (3.37 eV) و مستقیم و انرژی بستگی اکسیتونی بالا (60 meV)، به عنوان واحد سازنده قطعات نانومتری نظیر لیزرهای ماورای بنفش، دیودهای نورگسیل، آشکارسازهای نوری، سلول های خورشیدی و حسگرهای شیمیایی مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. یکی از کاربردهای نانوسیم ZnO استفاده از آن به عنوان کانال فعال در ساخت NWFET می باشد. شکل زیر نمونه ای از ZnO - NWFET را نشان می دهد. از مزایای استفاده از NWFET به جای TFT می توان به ابعاد کوچکتر و تحرک بالاتر اشاره کرد.

^۱. Shot - Channel Effects

^۲. Nanowire Field - Effect Transistor



شکل ۲ - ۱۰: ترانزیستور اثر - میدانی نانوسیم.

۲ - ۵ - ۷ - آثار کانال - کوتاه

رابطه (۲ - ۶۰) برای TFT های با کانال - بلند به خوبی می تواند مشخصه جریان - ولتاژ قطعه را توصیف کند. اما هنگامی که طول کانال کاهش می یابد، برای استفاده از رابطه (۲ - ۶۰) باید آثار کانال کوتاه را در نظر گرفت. آثار کانال کوتاه به طور موثر به دو پدیده فیزیکی نسبت داده می شود [۶۴]:

۱ - محدودیت های موثر بر خصوصیات سوق الکترون ها در کانال

۲ - اصلاح ولتاژ آستانه به خاطر کاهش طول کانال

با در نظر گرفتن شرط های ساده کننده که در بخش ۲ - ۵ - ۲ به آن ها اشاره شده، رابطه (۲ - ۶۰) که در شرایط ترانزیستورهای اثر میدانی با کانال بلند صادق است را نمی توان برای قطعات مشابه با کانال کوتاه بکار برد. برای این کار لازم است محدودیت های یاد شده را به نحوی در رابطه (۲ - ۶۰) به کار گرفت.

انتظار می رود با کوچکتر شدن طول کانال، میدان الکتریکی طولی افزایش یافته و آثار میدان الکتریکی بالا که یکی از آن ها رسیدن سرعت سوق حامل ها به سرعت اشباع است، رخ دهد. با افزایش میدان الکتریکی طولی، تکثیر حامل در نزدیک دررو روی می دهد. الکترون های ایجاد شده در داخل دررو جریان می یابند. میدان های بالاتر ممکن است موجب تزریق بعضی از الکترون های انرژی - بالا به داخل لایه اکسید هم شوند [۲]. سپس این الکترون ها به صورت بارهای اکسیدی ثابت

عمل می کنند و در نتیجه موجب جابجایی ولتاژ آستانه می گردند [۲]. برای استفاده از رابطه

(۶۰ - ۲) در مورد TFT های کانال - کوتاه باید V_{on} اصلاح شود.

فصل سوم

خواص ترابری الکتریکی در نیمرسانای تک بلوری اکسید روی

در این فصل به بررسی تاثیر سازوکارهای پراکندگی معرفی شده در بخش ۲-۲ بر خواص ترابری الکتریکی سیستم های سه بعدی (کپه ای) می پردازیم. در بخش ۳-۱ تاثیر روش رشد بر خواص ترابری الکتریکی نیمرسانای ZnO تک بلوری خالص بیان شده و در بخش ۳-۲ به بررسی تاثیر فشار اکسیژنی بر خواص ترابری الکتریکی نیمرسانای ZnO:P می پردازیم.

۳-۱-۱- تاثیر روش رشد بر خواص ترابری الکتریکی

محاسبات ما در این بخش توصیفگر تحلیل نتایج داده های تجربی وابسته به تراکم و تحرک الکترونی نمونه های تک بلور ZnO خالص است که توسط لوک [۴] (نمونه ۱)، ساکاموتو [۶۵] (نمونه ۲)، و پگنی و همکاران [۶۶] (نمونه ۳) گزارش شده است (شکل های ۳-۱ و ۳-۲). نمونه اول به روش ترابری فاز بخار به ضخامت ۱ سانتی متر رشد داده شده است و لایه ای به ضخامت ۱ میلیمتر از آن برش خورده است. نمونه دوم به روش PLD بر روی زیرلایه sapphire به ضخامت ۱ میکرومتر رشد یافته و سرانجام نمونه سوم با استفاده از روش لایه نشانی با بخار شیمیایی مواد آلی فلزی^۱ (MOCVD) بر روی زیرلایه شیشه به ضخامت ۲ میکرومتر تهیه شده است.

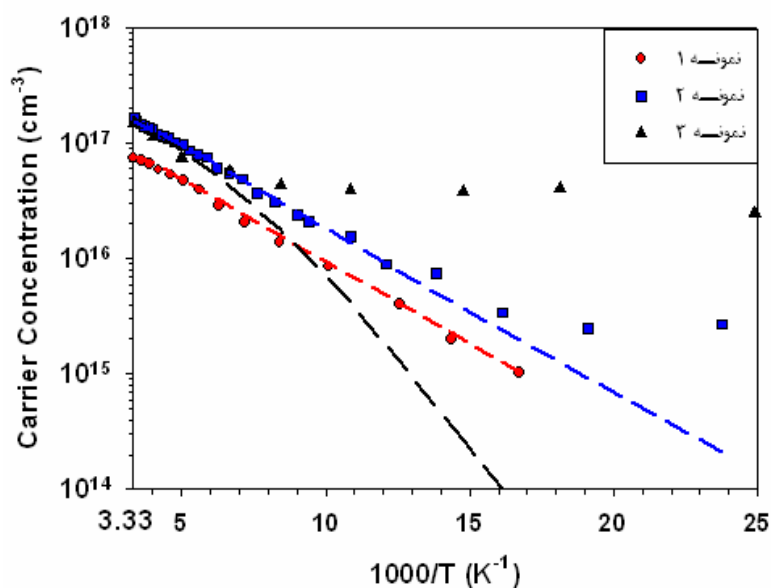
۳-۱-۱-۱- تحلیل داده های تجربی

۳-۱-۱-۱-۱- مطالعه رفتار دمایی تراکم حاملی

شکل ۳-۱ داده های تجربی مربوط به تغییرات تراکم الکترونی (n) برحسب دما را در سه نمونه فوق نشان می دهد. چنانچه پیداست در محدوده داده های گزارش شده با کاهش دما نمونه ۱ تنها رفتار انجماد حاملی از خود نشان می دهد در حالی که در نمونه های ۲ و ۳ در دماهای کمتر از ۶۰ و ۱۵۰ کلوین به یک مقدار ثابت میل می کنند. این رفتار معمولاً حاصل جهش حامل ها مابین ترازهای

^۱. Metalorganic Chemical Vapor Deposition

ناخالصی بوده که به رسانش جهشی موسوم است. در این شکل منحنی های خط چین پیش بینی نظری وابسته به رابطه (۲ - ۱) به روش برازش کوچکترین مربعات^۱ هستند. در این برازش کمیت های تراکم اتم های بخشنده (N_d)، انرژی فعالسازی اتم های بخشنده (E_d) و تراکم اتم های پذیرنده (N_a) به عنوان پارامترهای برازشی در نظر گرفته شده اند. کمیت های حاصل از این تحلیل در جدول ۳ - ۱ ارائه گردیده است.



شکل ۳ - ۱: تراکم الکترونی برحسب عکس دما برای سه نمونه مورد مطالعه [۴، ۶۵ و ۶۶] به همراه منحنی های نظری حاصل از محاسبات ما.

جدول ۳ - ۱: پارامترهای برازشی مربوط به نمونه های مورد بررسی.

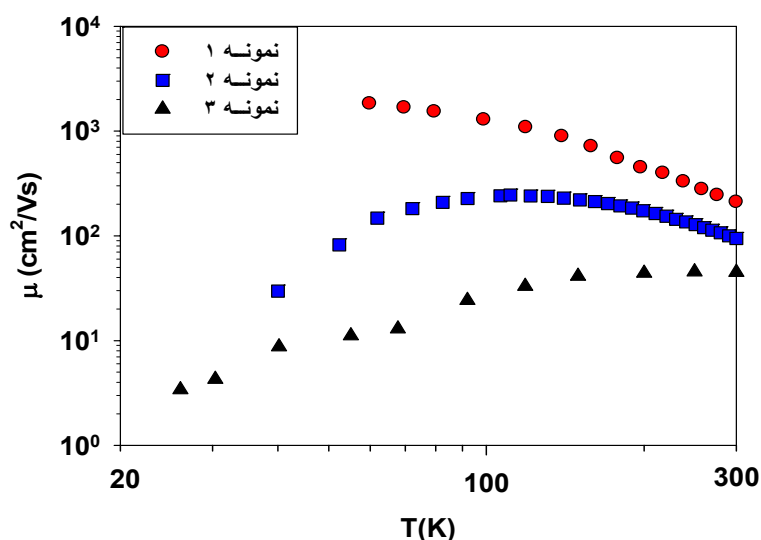
نمونه	$N_d(\text{cm}^{-3})$	$E_d(\text{meV})$	$N_a(\text{cm}^{-3})$
نمونه ۱	9×10^{15} 1×10^{17}	۳۱ ۶۱	2×10^{16}
نمونه ۲	$2/4 \times 10^{17}$	۴۸	1×10^{16}
نمونه ۳	3×10^{17}	۵۵	2×10^{15}

1. Least square fit

از نکات قابل ذکر در این تحلیل می توان به موارد ذیل اشاره نمود: (۱) چنانچه از جدول ۳ - ۱ پیداست به منظور حصول به برازش مناسب بین داده های تجربی و نظری در نمونه اول از دو تراز بخشنده با انرژی های فعالسازی ۳۱ و ۶۱ میلی الکترون ولت و در نمونه های دوم و سوم از یک تراز، به ترتیب ۴۸ و ۵۵ میلی الکترون ولت، استفاده شده است. به گزارش لوک و همکاران [۱۷] تراز بخشنده واقع در انرژی حدود $meV (30 \pm 5)$ غالباً به اتم های روی بین جایگاهی و بنابه گزارش هافمن و همکاران [۱۹] تراز بخشنده واقع در انرژی حدود $meV (35 \pm 5)$ به حضور اتم های هیدروژن که به طور ناخواسته در حین رشد در شبکه بلوری ماده جای می گیرند نسبت داده می شود. تراز بخشنده واقع در انرژی $meV 48$ نیز به یکی از ناراستی های بلوری نسبت داده می شود که منشا آن نیاز به بحث و بررسی بیشتری دارد. از طرفی یئون و همکاران [۱۸] تراز واقع در $meV 65$ را به ناراستی بلوری ناشی از جایگاه های اکسیژن نسبت داده است. از طرفی چنانچه از نتایج بدست آمده پیداست نمونه ۱ از کمترین تراکم ترازهای شبه - بخشنده کم عمق در مقایسه با دیگر نمونه ها برخوردار می باشد. این خصوصیت بر تحرک الکترون ها تاثیرگذار می باشد که در ادامه بدان پرداخته شده است.

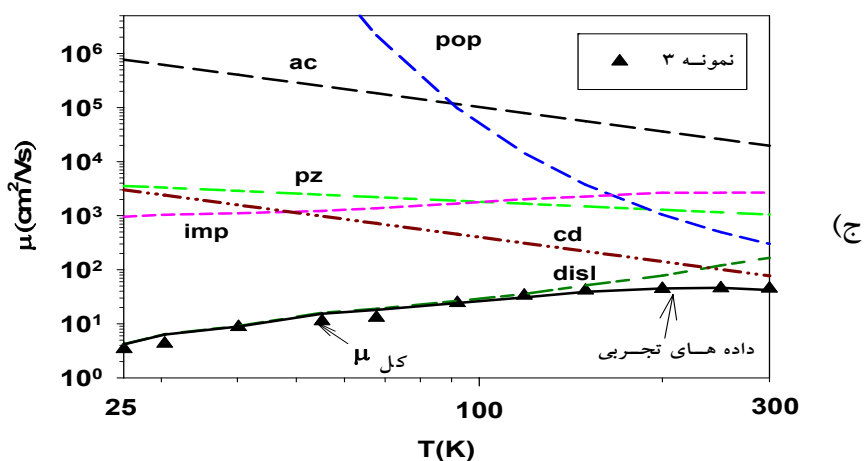
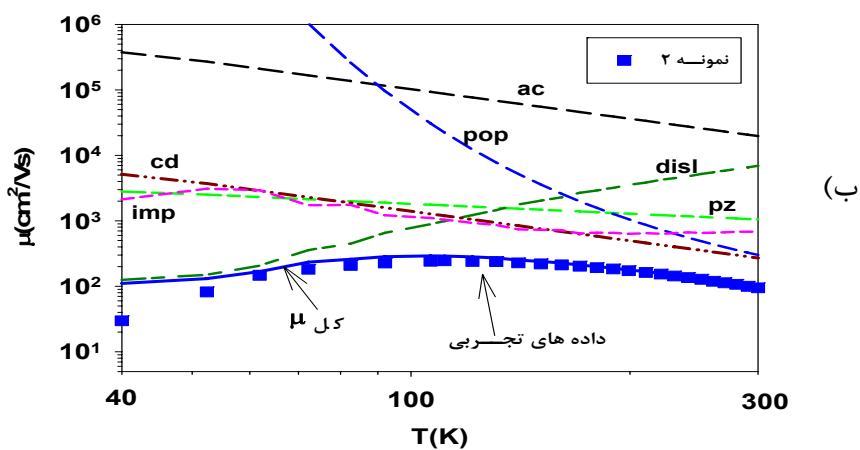
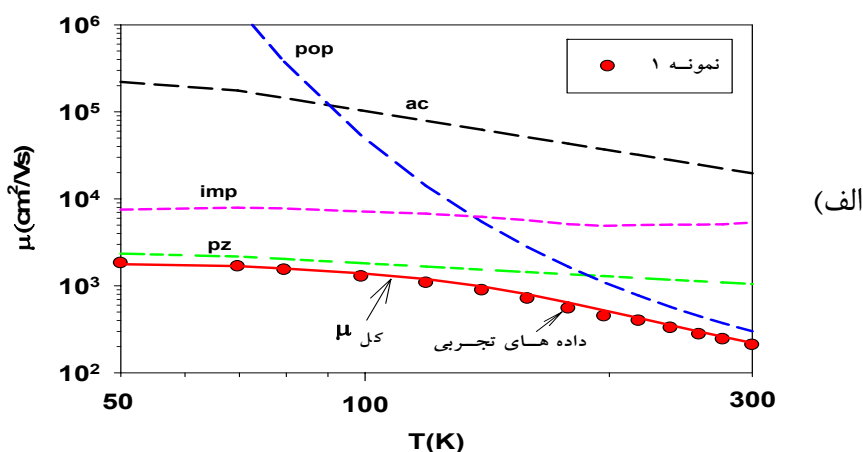
۳ - ۱ - ۱ - ۲ - مطالعه رفتار دمایی تحرک حاملی

شکل ۳ - ۲ وابستگی دمایی تحرک الکترون ها را در نمونه های تحت بررسی نشان می دهد. چنانچه پیداست تحرک الکترونی در دمای اتاق در نمونه ۱ از بیشترین مقدار ($205 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) و در نمونه ۳ از کمترین مقدار ($44 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) برخوردار است.



شکل ۳-۲: داده های تجربی گزارش شده تحرک الکترونی برحسب دما برای نمونه های ۱-۳، [۴، ۶۵ و ۶۶].

به منظور تحلیل این داده ها لازم است انواع سازوکارهای پراکندگی (ذاتی و غیر ذاتی) حامل ها را که در فصل ۲ بدانها اشاره شد (فونون های قطبی نوری (μ_{pop})، پیزوالکتریک (μ_{pz})، پتانسیل تغییر شکل آکوستیکی (μ_{ac})، ناخالصی یونیده (μ_{Im})، دررفتگی ها (μ_{disl}) و ناراستی بلوری (μ_{cd})) در مدلسازی تحرک الکترونی در این نمونه ها در نظر گرفته شوند. نتایج مربوط به جزئیات این محاسبات وابسته به نقش هر کدام از عوامل پراکندگی در شکل های ۳-۳ (الف-ج) نشان داده شده است. با انجام این برآزش می توان به دیگر مقادیر برآزشی از جمله میزان تاثیرگذاری میدان های کرنشی در ماده رشد یافته که در پارامتر C (رابطه (۲-۱۰)) خود نمایی می کند و همچنین تراکم دررفتگی ها در ماده (N_{disl})، رابطه (۲-۱۳)، دست یافت. نتایج این تحلیل در جدول ۳-۲ ارائه شده است.



شکل ۳-۳: منحنی های برازشی وابسته به سازوکارهای مختلف پراکندگی موثر در محدود سازی تحرک الکترونی در نمونه های اکسید روی مورد مطالعه (الف) نمونه ۱، (ب) نمونه ۲ و (ج) نمونه ۳.

این نتایج بیانگر آن است که در نمونه ۱ فونون ها در تمام گستره ی دمایی نقش اصلی را در کنترل تحرک الکترون ها ایفاء کرده و نقش پراکندگی های غیر ذاتی از جمله ناخالصی های یونیده

بسیار ناچیز می باشد. مقدار تراکم دررفتگی ها و پارامتر C در نمونه ۱ به ترتیب برابر با $10^5 \text{ (cm}^{-2}\text{)}$ و 10^8 بدست آمده است که در مقایسه با مقادیر بدست آمده برای نمونه ۲ و ۳ بسیار ناچیز می باشد. در نمونه ۲ در محدوده دماهای بالا ($T > 250\text{K}$) پراکندگی غالب مربوط به پراکندگی ناشی از فونون های اپتیکی و پراکندگی های وابسته به کرنش های ایجاد شده و در دماهای پایین ($T < 100\text{K}$) پراکندگی ناشی از ناخالصی های یونیده وابسته به دررفتگی ها نقش موثر را در تغییرات دمایی تحرک الکترون ها به عهده دارند. در نمونه ۳ به علت وجود تراکم نقایص ذاتی و نیز دررفتگی ها (تقریبا ۴۰ برابر بیشتر از نمونه ۲) در محدوده دمایی بالا توسط پراکندگی های وابسته به کرنش های ایجاد شده و در ناحیه دمایی پایین عمدتا توسط حجم بالای دررفتگی ها کنترل می شود. لازم به ذکر است که مقادیر تراکم های بدست آمده در نمونه های ۲ و ۳ در محدوده مقادیر گزارش شده در این ماده در دیگر نمونه های گزارش شده به میزان $10^{10} - 10^9 \text{ cm}^{-2}$ می باشد [۶۷].

جدول ۳ - ۲ : پارامترهای برازشی وابسته به تحرک الکترونی در سه نمونه فوق.

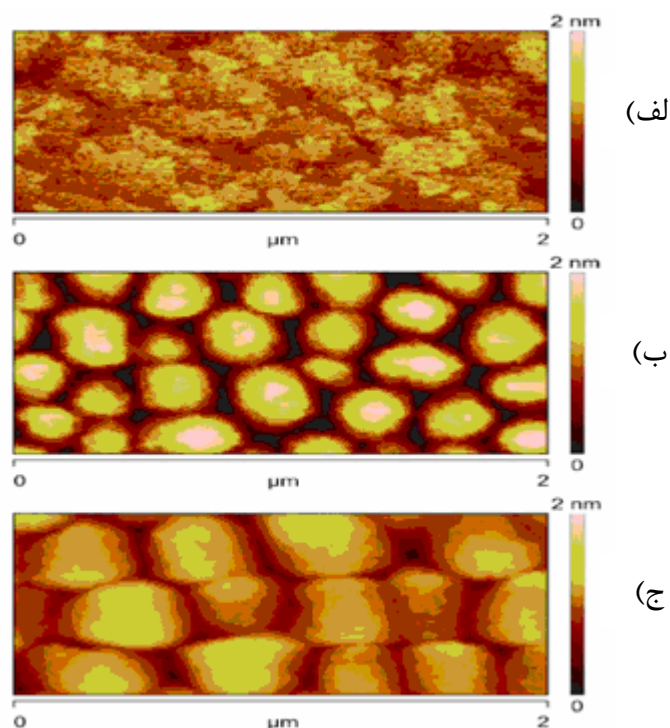
پارامترهای برازشی	نمونه اول	نمونه دوم	نمونه سوم
$N_{\text{dist}} \text{ (cm}^{-2}\text{)}$	-	2×10^8	8×10^9
پارامتر C	-	$1/4 \times 10^6$	4×10^5

همانطور که در شکل ۳ - ۳ (ب) مشاهده می شود در نمونه دوم در دماهای پایین تر از 60 K برازش حاصل از قاعده ماتیسن منطبق با داده های تجربی نمی باشد و بالاتر از آن قرار گرفته است. علت این امر آن است که فرآیند رسانش جهشی در این گستره دمایی فرآیند رسانش را کنترل می کند.

۳ - ۲ - بررسی خواص ترابری الکتریکی لایه های ZnO:P تهیه شده

به روش لیزر پالسی

محاسبات ما در این بخش توصیفگر نتایج تحلیل داده های تجربی نمونه ZnO:P تک بلوری است که توسط برنندت و همکاران [۶۸] گزارش شده است. نمونه های ZnO:P تحت فشارهای اکسیژنی ۰/۱ mbar (نمونه ۱)، ۰/۰۱۶ mbar (نمونه ۲)، ۰/۰۰۲ mbar (نمونه ۳) و ۰/۰۰۰۳ mbar (نمونه ۴) با روش PLD بر روی زیرلایه ZnO در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد رشد یافته اند. شکل ۳ - ۴ تصاویر میکروسکوپ نیرو اتمی^۱ (AFM) مربوط به این نمونه ها را نشان می دهد. همانگونه که پیداست مرفولوژی نمونه ها با تغییر شرایط رشد (فشار اکسیژنی) تغییر یافته است.



شکل ۳ - ۴ (الف - ج): تصاویر AFM مربوط به لایه های نازک ZnO:P تحت فشارهای اکسیژنی الف) ۰/۱ mbar (ب) ۰/۰۱۶ mbar (ج) ۰/۰۰۲ mbar [۶۸].

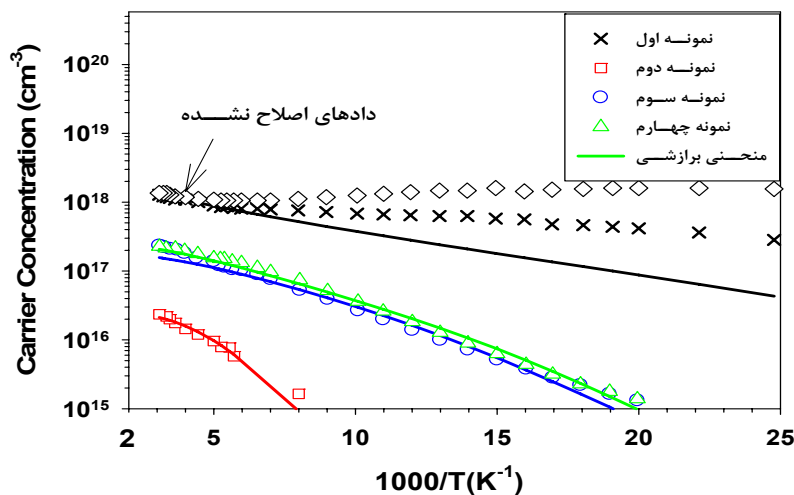
نمونه هایی که در فشار کمتر از ۰/۱ mbar لایه نشانی می شوند یک حالت رشد سه بعدی از خود نشان می دهند که در آن دانه هایی با مرزهای کاملاً مشخص شکل گرفته است. اندازه مرز دانه برای

^۱. Atomic Force Microscopy

نمونه رشد یافته تحت فشارهای اکسیژنی ۰/۰۰۲ mbar و ۰/۰۰۰۳ برابر ۴۰۰ nm و برای ۰/۰۱۶ mbar در حدود ۳۰۰ nm می باشد. نمونه رشد یافته تحت فشار اکسیژنی ۰/۱ mbar یک سطح پیوسته بدون ساختار دانه ای را از خود نشان می دهد و حالت رشد دو بعدی دارد. در ادامه به بررسی خواص ترابری الکتریکی این نمونه ها شامل وابستگی دمایی تراکم و تحرک الکترونی می پردازیم.

۳ - ۲ - ۱ - مطالعه رفتار دمایی تراکم الکترونی

شکل ۳ - ۵ داده های تجربی تراکم الکترونی بر حسب دما را برای این چهار نمونه به همراه منحنی های برازشی نظری حاصل از محاسبات ما را نشان می دهد. همانطور که پیداست نمونه رشد یافته تحت بالاترین فشار اکسیژنی (نمونه اول) دارای بیشترین تراکم حاملی و نمونه دوم از کمترین تراکم حاملی برخوردار می باشد. برای برازش این داده ها از معادله خنثایی بار (معادله ۲ - ۱) با در نظر گرفتن پارامترهای برازشی شامل یک تراز بخشنده با تراکم N_d و انرژی فعالسازی E_d و نیز تراز اتم های پذیرنده ناخواسته با تراکم N_a استفاده کرده ایم. نتایج این محاسبات در شکل ۳ - ۵ و پارامترهای برازشی مربوط به آن ها در جدول ۳ - ۳ آمده است.



شکل ۳ - ۵: داده های تجربی تراکم حامل بر حسب عکس دما به همراه منحنی های برازشی آن ها [۶۸].

همانگونه که پیداست داده های تراکم حامل گزارش شده مربوط به نمونه اول با استفاده از مدل دولایه ای اثر هال، روابط (۲-۱۵) و (۲-۱۶)، اصلاح شده اند.

همانطور که از شکل ۳-۵ پیداست بجز نمونه ۱، در سایر نمونه ها برازش داده ها در تمامی گستره دمایی حاصل شده است که بیانگر رفتار حامل ها در نوار رسانش می باشد. علت عدم انطباق کامل نظریه با داده های تجربی در نمونه ۱ می تواند نتیجه وجود ترازهای ناخالصی نسبتا بالا و وقوع رسانش جهشی در دماهای پایین تر از ۱۵۰ K باشد که معمولا در مواد با آلاینش (خواسته و یا ناخواسته) بالا محتمل می باشد.

جدول ۳-۳. پارامترهای برازشی وابسته به نمونه های مورد بررسی.

نمونه	$N_d(\text{cm}^{-3})$	$E_d(\text{meV})$	$N_a(\text{cm}^{-3})$
نمونه اول	$2/5 \times 10^{18}$	۱۵	4×10^{16}
نمونه دوم	$5/5 \times 10^{16}$	۵۶	$3/7 \times 10^{16}$
نمونه سوم	$3/6 \times 10^{17}$	۳۲	$2/5 \times 10^{16}$
نمونه چهارم	$4/3 \times 10^{17}$	۳۴	$1/5 \times 10^{16}$

با توجه به نتایج بدست آمده در جدول ۳-۳ می توان دریافت که با افزایش فشار اکسیژنی تراکم اتم های پذیرنده افزایش یافته است. این امر با توجه به افزایش نقایص بلوری وابسته به اتم های اکسیژن بین جایگاهی که به عنوان پذیرنده در شبکه ZnO عمل می کنند امری قابل قبول است.

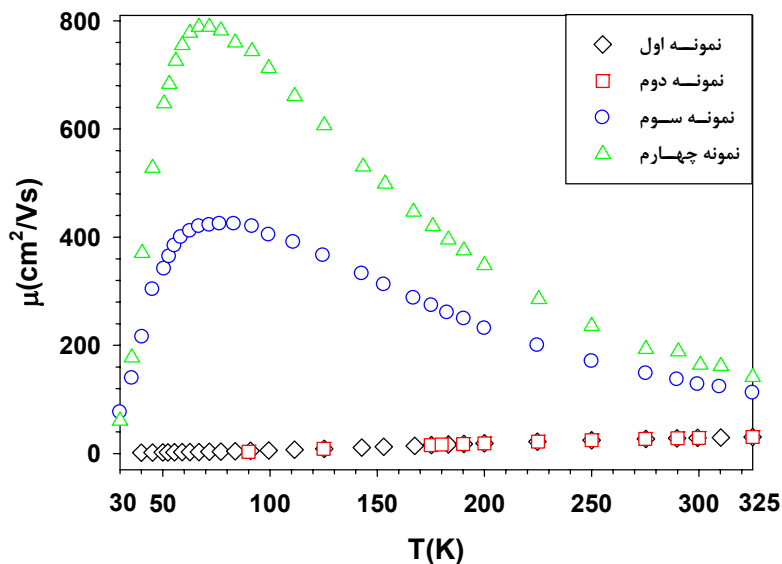
با توجه به طیف فوتو لومینسانس^۱ (PL) نمونه ها، برای نمونه های رشد یافته تحت فشار اکسیژنی پایین (نمونه های سوم و چهارم) انرژی فعالسازی بدست آمده با مقدار انرژی فعالسازی اتم روی بین جایگاهی در حدود ۳۵ meV همخوانی دارد [۶۹] که نشان می دهد در این نمونه های ناراستی بلوری ذاتی اتم روی بین جایگاهی به عنوان بخشنده غالب عمل می کند. برای نمونه سوم مقدار انرژی فعالسازی بدست آمده با انرژی فعالسازی ناراستی تعویض جایگاه های اتم Al با اتم Zn در حدود

^۱. Photoluminescence

۵۱/۵ meV همخوانی دارد [۶۹]. انرژی فعالسازی بدست آمده برای نمونه اول اگرچه با مقدار انرژی فعالسازی بدست آمده مقادیر گزارش شده در مقالات دیگر [۷۰ و ۷۱] کاملاً منطبق می باشد اما منشا آن هنوز مشخص نیست و نیاز به بررسی بیشتر دارد اما حدس ما این است که می توان آن را به ناخالصی فسفر در نمونه نسبت داد.

۳ - ۲ - مطالعه رفتار دمایی تحرک الکترونی

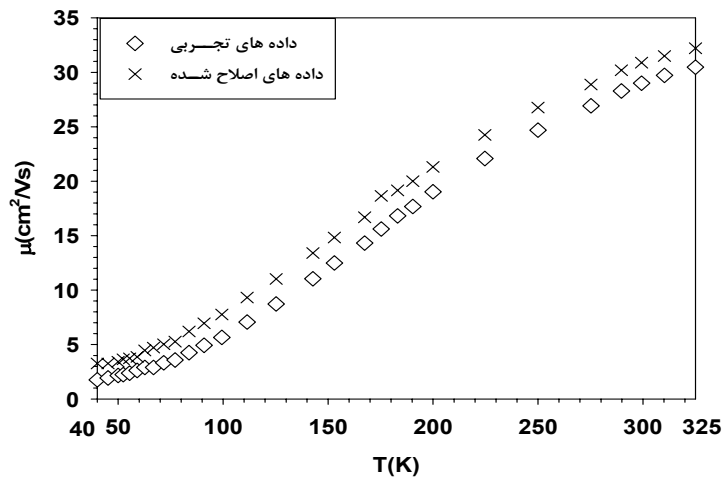
شکل ۳ - ۶ داده های تجربی تحرک الکترونی بر حسب دما را در این چهار نمونه نشان می دهد.



شکل ۳ - ۶: داده های تجربی تحرک الکترونی بر حسب دما برای نمونه های ۱ الی ۴ [۶۸].

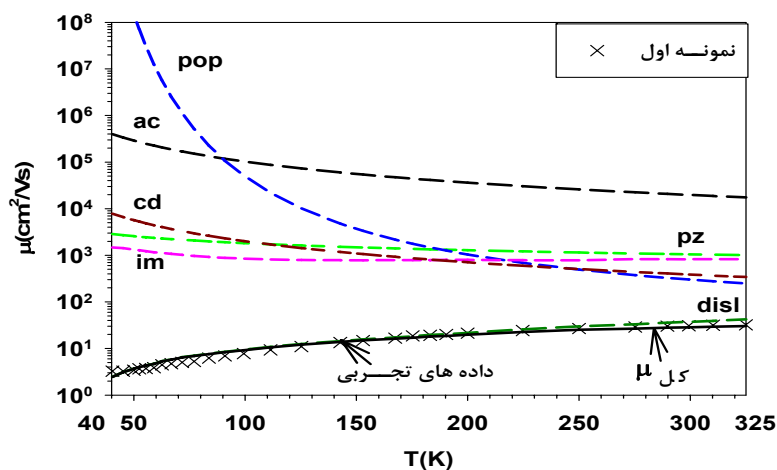
همانگونه که از شکل ۳ - ۶ پیداست نمونه رشد یافته تحت پایین ترین فشار اکسیژنی (نمونه چهارم) بالاترین تحرک الکترونی و نمونه رشد یافته تحت بالاترین فشار اکسیژنی (نمونه اول) کمترین مقدار تحرک الکترونی را داراست. علت پایین بودن تحرک الکترونی در نمونه دوم را می توان به حضور مرزهای دانه در این نمونه نسبت داد. داده های تحرک حامل گزارش شده مربوط به نمونه اول به علت شکل گیری لایه تبهگن در فصل مشترک با استفاده از مدل دولایه ای اثر هال اصلاح شده اند. شکل

۳-۷ داده های اصلاحی مربوط به تحرک الکترونی برای نمونه اول را با استفاده از مدل دو لایه ای اثر هال روابطه (۲-۱۵) و (۲-۱۶) نشان می دهد.



شکل ۳-۷: داده های تجربی مربوط به تحرک الکترونی در نمونه ۱ به همراه داده های اصلاح شده حاصل از حذف رسانندگی در لایه تبهگن در نمونه ۱.

شکل ۳-۸ جزئیات مربوط به برازش وابسته به سازوکارهای گوناگون پراگندگی شامل فونون های قطبی نوری (μ_{pop})، پیزوالکتریک (μ_{pz})، پتانسیل تغییر شکل آکوستیکی (μ_{ac})، ناخالصی های یونیده (μ_{Im})، دررفتگی ها (μ_{disl})، ناراستی بلوری (μ_{cd}) را در این نمونه نشان می دهد.



شکل ۳-۸: منحنی های برازشی برای داده های تجربی تحرک الکترونی نمونه اول.

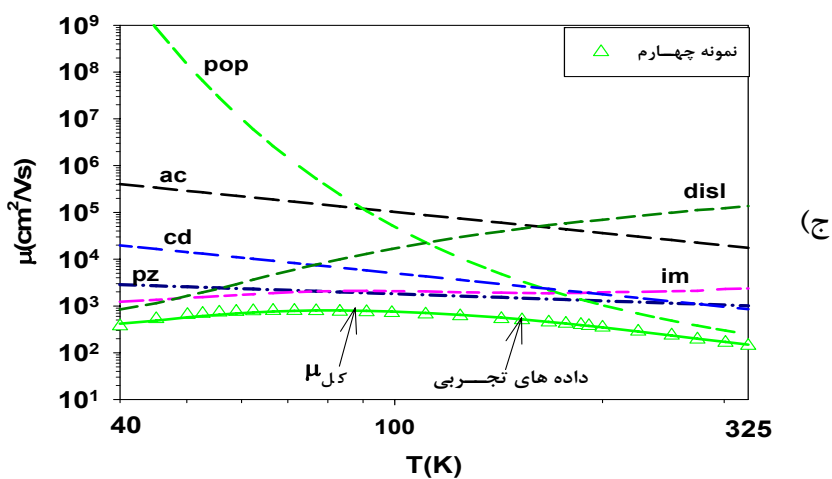
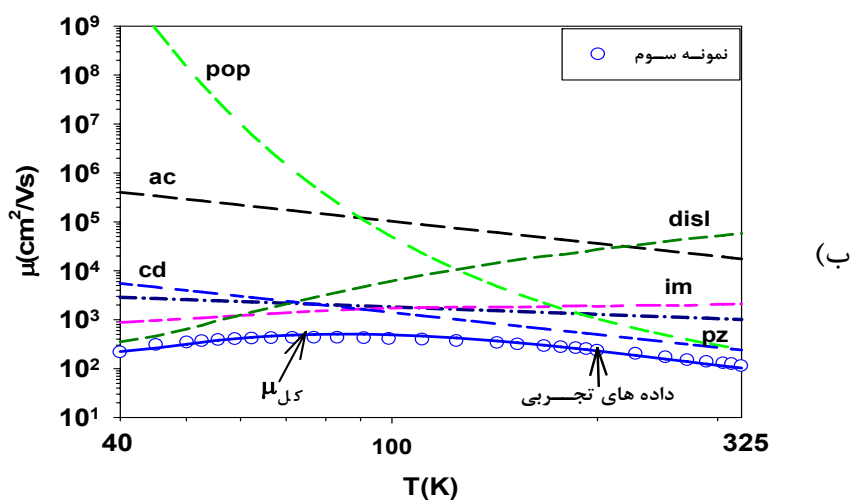
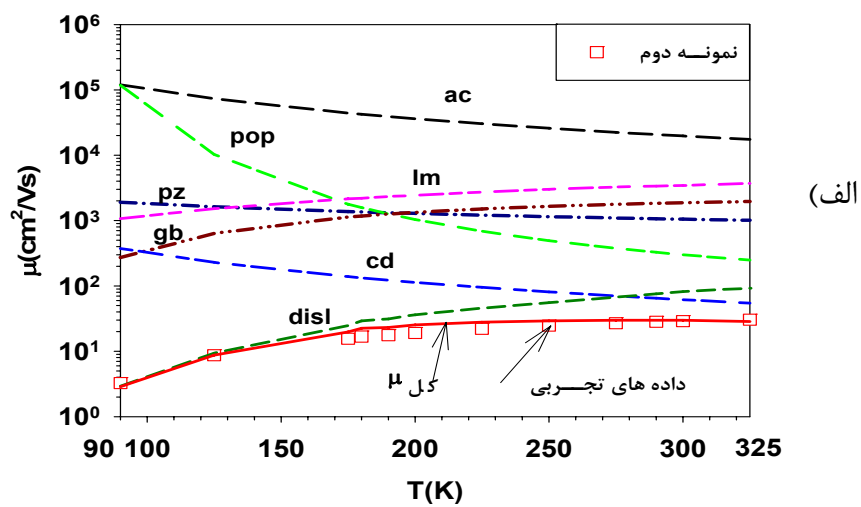
شکل ۳ - ۸ نشان می دهد که در بیشتر گستره دمایی پراکندگی ناشی از دررفتگی ها سازوکار غالب است. برای برازش داده های تجربی مربوط به تحرک حاملی نمونه های دیگر از قاعده ماتیسن رابطه (۲ - ۱۴) با در نظر گرفتن سازوکارهای پراکندگی مختلف ذکر شده استفاده شده است. لازم به ذکر است که برای نمونه دوم علاوه بر سازوکارها پراکندگی ذکر شده از سازوکار پراکندگی مرز دانه (μ_{gb}) نیز استفاده شده است. شکل ۳ - ۹ (الف - ج) منحنی های برازشی را برای سایر نمونه ها و جدول ۳ - ۴ نتیجه مقادیر برازشی را نشان می دهد.

جدول ۳ - ۴ . پارامترهای برازشی.

نمونه	نمونه اول	نمونه دوم	نمونه سوم	نمونه چهارم
$N_{disl}(cm^{-2})$	1×10^{11}	$6/2 \times 10^9$	$3/1 \times 10^7$	$1/3 \times 10^7$
پارامتر C	2×10^6	$3/2 \times 10^6$	$1/4 \times 10^5$	5×10^6

اندازه دانه برای نمونه دوم ۳۰۰ نانومتر گزارش شده است [۶۸]. برای این نمونه ما مقدار انرژی فعالسازی برای مرز دانه را به عنوان پارامتر برازشی مقدار ۲۸ meV بدست آورده ایم که با مقادیر گزارش شده برای نمونه های دیگر مطابقت دارد [۷۲].

باتوجه به جداول ۳ - ۳ و ۳ - ۴ می توان مشاهده نمود که با افزایش فشار اکسیژنی علاوه بر افزایش تراکم اتم های پذیرنده که به عنوان جبران کننده عمل می کنند، تراکم دررفتگی ها افزایش می یابد و باعث کاهش چشمگیر تحرک الکترونی می شود. برای دو نمونه رشد یافته تحت فشار اکسیژنی پایین (نمونه سوم و چهارم) برازش خوبی بدون در نظر گرفتن سازوکار پراکندگی مرز دانه انجام گرفته است. این سازوکار تاثیر ناچیزی در مقایسه با دیگر سازوکارهای پراکندگی دیگر دارد. برای نمونه دوم تحرک پایین به همراه تراکم پایین حامل دلالت بر گیراندازی حامل ها توسط مرزهای دانه ها در این نمونه حکایت دارد. برای برازش داده های تحرک حامل مربوط به این نمونه باید پراکندگی ناشی از مرزهای دانه را به عنوان سازوکار تاثیر گذار بر کاهش تحرک حامل در نظر گرفت.



شکل ۳ - ۹ (الف - ج): منحنی های لگاریتمی مربوط به برازش داده های تجربی تحرک الکترونی.

شکل ۳ - ۹الف) نشان می دهد که در اکثر محدوده دمایی پراکندگی ناشی از دررفتگی ها سازوکار غالب می باشد و در دماهای پایین اثر پراکندگی ناشی از مرز دانه غالب می شود. شکل ۳ - ۹ب) نشان می دهد که در دماهای بالا پراکندگی فنون های قطبی نوری و پراکندگی وابسته به میدان های کرنشی القایی و در دماهای پایین پراکندگی ناشی از ناخالصی یونیده و دررفتگی ها سازوکار غالب است. همچنین در شکل ۳ - ۹ج) مشاهده می شود که در دماهای بالا پراکندگی فنون های قطبی نوری و پیزوالکتریسیته و در دماهای پایین پراکندگی ناخالصی یونیزه شده و دررفتگی ها سازوکار غالب می باشد. لازم به ذکر است که مقادیر تراکم های دررفتگی بدست آمده در نمونه های مورد بررسی در محدوده مقادیر گزارش شده در این ماده در دیگر نمونه های گزارش شده می باشد [۶۷].

فصل چهارم

خواص ترابری الکتریکی در
ساختارهای ناهمگون (دو بعدی)
اکسید روی

در این فصل خواص ترابری الکتریکی در نمونه های با گاز الکترون دوبعدی مورد بررسی قرار می گیرند. در بخش ۴ - ۱ خواص ترابری الکتریکی در ساختار ناهمگون ZnMgO/ZnO و در بخش ۴ - ۲ خواص ترابری الکتریکی در ساختار ناهمگون ZnMnO/ZnO بررسی شده است.

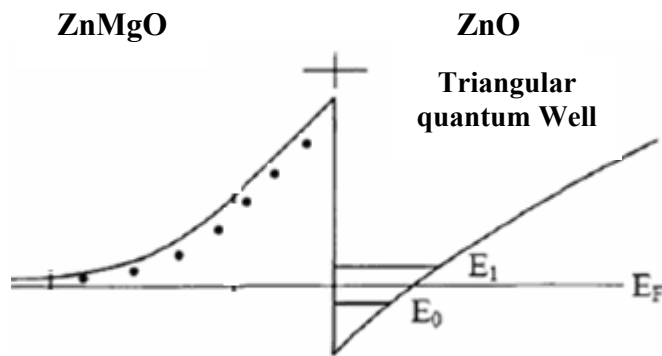
۴ - ۱ - مطالعه خواص ترابری الکتریکی در ساختار ناهمگون

ZnMgO/ZnO

در این بخش به مطالعه و بررسی خواص الکتریکی ساختار ناهمگون Zn_{0.6}Mg_{0.4}O/ZnO گزارش شده توسط تامپو و همکاران [۷۳] می پردازیم. در این بخش نمونه مورد نظر با روش روآراستی پرتو مولکولی^۱ (MBE) بر روی زیر لایه sapphire رشد یافته است. در این لایه نشانی از لایه میانین^۲ MgO به منظور افزایش کیفیت بلوری لایه ZnO (در اثر کاهش ناهمسانی شبکه ای بین ZnO و sapphire و کاهش تراکم دررفتگی ها) استفاده شده است. ضخامت لایه ها در ساختار sapphire (زیرلایه) / ZnO / MgO / ZnMgO به ترتیب برابر ۱۰ nm، ۱ μm و ۱۰۰ nm می باشد. با توجه به مقدار گاف نواری MgO [۷۴] (۷/۸۳ eV) و ZnO [۷۵] (۳/۳۷ eV) گاف نواری این ساختار با توجه به قانون وگارد (رابطه ۲ - ۳۶) برابر با ۵/۱۵ eV بدست می آید. در نتیجه آرایش ZnO با MgO باعث پهن تر شدن گاف نواری خواهد شد. بر این اساس انتظار می رود بخشی از الکترون های رسانشی در لایه ZnMgO به لایه با گاف نواری کوچکتر (ZnO) منتقل شود که خود سبب ایجاد یک میدان داخلی و در نتیجه ایجاد یک چاه کوانتومی مثلثی می گردد. حضور این چاه چنانچه در بخش (۲ - ۴ - ۱) ذکر شد می تواند منجر به تشکیل یک گاز الکترون دو بعدی (2DEG) در نزدیکی فصل مشترک دو لایه شود. شکل ۴ - ۱ ساختار نواری انتظاری مربوط به لایه های ZnO و ZnMgO را نشان می دهد.

¹ . Molecular Beam Epitaxy

² . Buffer layer

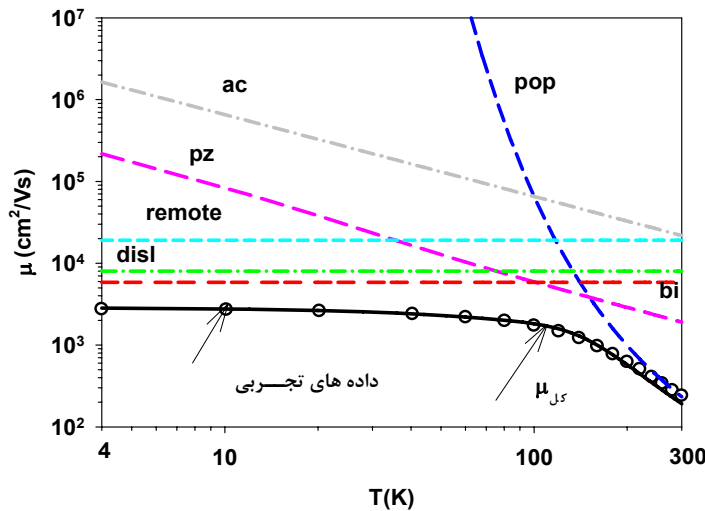


شکل ۴-۱: طرح شماتیک از ساختار ناهمگون ZnMgO / ZnO

۴-۱-۱ - مطالعه رفتار دمایی تحرک حامل

شکل ۴-۲ داده های تجربی تحرک الکترون دو بعدی را در ساختار یاد شده بر حسب دما نشان می دهد. همانطور که پیداست، بر خلاف لایه های کپه ای ZnO (فصل ۳) تحرک الکترونی در این شرایط با کاهش دما نخست افزایش و سپس تقریباً ثابت مانده است که از ویژگی های تشکیل گاز الکترون دو بعدی می باشد. این داده ها نشانگر آن است که تحرک حامل ها در دمای اتاق برابر $250 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ و در دمای ۴ کلوین به مقدار $2750 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ رسیده است. به منظور تحلیل این داده ها می توان از سازوکارهای مختلف پراکندگی، روابط (۲-۱۷) تا (۲-۳۵)، با استفاده از پارامترهای مادی مربوط به ZnO که در جدول ۲-۱ آمده است استفاده کرد. موقعیت قرارگیری هر کدام از سازوکارها در شکل ۴-۲ و مقادیر مربوط به پارامترهای برازشی در نظر گرفته شده در جدول ۴-۱ نشان داده شده است. برای استفاده از این روابط مقدار سرعت فونون های آکوستیکی عرضی (u_t) و سرعت فونون های آکوستیکی طولی (u_l) را با توجه به خواص مکانیکی ZnO، روابط (۲-۳۸) و (۲-۳۹)، به ترتیب برابر با $3/5 \times 10^3$ و $6/4 \times 10^3$ محاسبه شده اند. همچنین ثابت پیزوالکتریک ZnO (h_{14}) به عنوان پارامتر برازشی در نظر گرفته شده و مقدار آن برابر $7/7 \times 10^9$ (V/m) بدست آمده است. از آن جا که مقدار متناظر برای این پارامتر در ماده GaAs برابر

با $(V/m) \times 10^9 \times 1/2$ گزارش شده است [۴۸] و از طرفی به علت آن که ماده ZnO از خاصیت پیزو الکتریک بالاتری برخوردار می باشد، مقدار بدست آمده انتظار ما را برآورده می سازد.



شکل ۴ - ۲: تغییرات تحرک الکترونی در یک سیستم دو بعدی برحسب تابعی از دما [۷۳]. نقش هرکدام از سازوکارهای پراکندگی در تعیین تحرک الکترونی اندازه گیری شده در شکل مشاهده می شود.

جدول ۴ - ۱: پارامترهای برازشی در سیستم گاز الکترون دو بعدی ZnMgO/ZnO

تراکم دررفتگی $(m^{-2}) N_{disl}$	$9/3 \times 10^{13}$
تراکم ناخالصی در چاه پتانسیل $(m^{-3}) N_{bi}$	$2/5 \times 10^{24}$

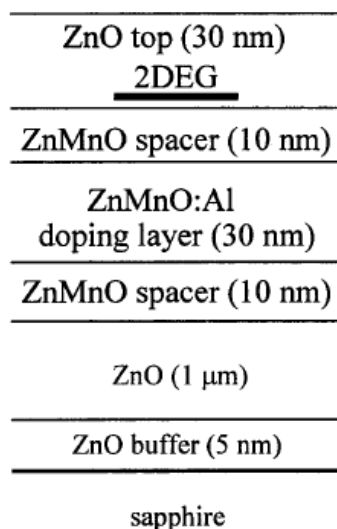
با توجه به شکل ۴ - ۳ می توان به نکات ذیل اشاره کرد:

- ۱ - در محدوده دمایی بالا ($150 < T < 300$ K) پراکندگی ناشی از فونون های اپتیکی تحرک الکترونی را کنترل می کند.
- ۲ - در دماهای نسبتاً پایین ($100 < T < 150$ K) پراکندگی ناشی از فونون های پیزوالکتریکی سازوکار غالب می باشد.
- ۳ - در دماهای پایین ($T < 100$ K) پراکندگی ناشی از ناخالصی های یونیده توسط بار های سطح مشترک سازوکار غالب است. این نتایج حاکی از آن است که در تمام گستره دمایی عوامل ذاتی نقش اصلی را در کنترل تحرک حامل ها به عهده دارند و سهم عوامل غیر ذاتی در مقایسه با آن ناچیز می باشد.

۴ - ۲ - بررسی خواص الکتریکی ساختار ناهمگون ZnMnO/ZnO

در این بخش به بررسی خواص الکتریکی داده های تجربی تحرک الکترونی گزارش شده توسط اداهيرو و همکاران [۲۴] مربوط به ساختار ناهمگون Zn_{0.9}Mn_{0.1}O/ZnO می پردازیم. علت مورد توجه بودن این ساختار ZnMnO آن است که در دمای اتاق علاوه بر خواص الکتریکی خواص مغناطیسی نیز از خود نشان می دهد. در این ماده با توجه به پایین بودن کسر مولی Mn به آن نیمرسانای مغناطیسی رقیق شده^۱ گفته می شود. طرح شماتیک ساختار لایه ای این نمونه که به روش لایه نشانی لیزر پالسی تهیه شده است در شکل ۴ - ۳ نشان داده شده است.

در این ساختار ابتدا لایه میانین ZnO با ضخامت ۵ nm بر روی زیر لایه sapphire در دمای ۷۰۰ درجه سلسیوس لایه نشانی شده، سپس لایه ZnO با ضخامت ۱ μm در دمای ۶۵۰ درجه سلسیوس به منظور حذف آثار دررفتگی ها در سطح مشترک قرار گرفته است. آنگاه پس از لایه نشانی ZnMnO بدون آلیش به ضخامت ۱۰ nm، لایه ی آلیش یافته ZnMnO:Al با میزان آلیش ۰/۰۰۵٪ به ضخامت ۳۰ nm قرار گرفته است. سرانجام بدنبال لایه ی جدا کننده ZnMnO که به منظور جلوگیری از اثرات پراکندگی ناخالصی یونیده استفاده می شود لایه ای از ZnO قرار می گیرد.



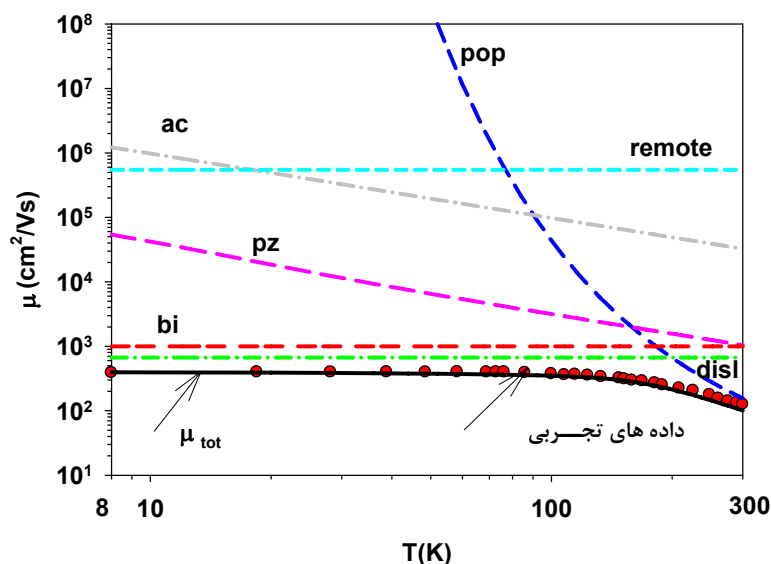
شکل ۴ - ۳: طرح شماتیک ساختار ناهمگون ZnMnO/ZnO [۲۴].

^۱. Diluted Magnetic Semiconductor

با توجه به مقدار گاف نواری MnO (76 و 77 eV [$3/8$]) و ZnO ($3/37$ eV [75]) گاف نواری این ساختار با توجه به قانون وگارد (رابطه $(2 - 36)$) برابر با $3/75$ eV بدست می آید. در نتیجه آرایش ZnO با MnO باعث پهن تر شدن گاف نواری خواهد شد.

۴ - ۲ - ۱ - مطالعه رفتار دمایی تحرک حامل

شکل ۴ - ۴ داده های تجربی تحرک الکترونی بر حسب دما را در این نمونه نشان می دهد. همانطور که پیداست داده های وابسته به تحرک الکترونی این نمونه از خصوصیات مرتبط با شکل گیری گاز الکترون دو بعدی در سطح مشترک ساختار ناهمگون $Zn_{0.9}Mn_{0.1}O$ برخوردار می باشد. به منظور تحلیل داده ها همانند بخش ۴ - ۱ می توان از روابط $(2 - 17)$ تا $(2 - 35)$ استفاده کرد. مقادیر مربوط به پارامترهای برازشی در جدول ۴ - ۲ و موقعیت قرارگیری هرکدام از سازوکارها در شکل ۴ - ۴ نشان داده شده است. ثابت پیزوالکتریک ZnO (h_{14}) متناظر با نمونه قبلی برابر $7/7 \times 10^9$ (V/m) در نظر گرفته شده است.



شکل ۴ - ۴: تغییرات تحرک الکترونی در یک سیستم دو بعدی بر حسب تابعی از دما [۲۴]. تاثیر هرکدام از سازوکارهای پراکندگی حاصل پیش بینی نظری در شکل مشاهده می شود.

جدول ۴ - ۲: پارامترهای برازشی

تراکم دررفتگی $N_{\text{disl}} (\text{m}^{-2})$	$2/1 \times 10^{14}$
تراکم ناخالصی در چاه پتانسیل $N_{\text{bi}} (\text{m}^{-3})$	$4/4 \times 10^{24}$

با توجه به شکل ۴ - ۴ می توان به نکات ذیل اشاره کرد:

- ۱ - در محدوده دمایی بالا ($200 < T < 300 \text{ K}$) پراکندگی ناشی از فونونهای اپتیکی فرایند رسانش را کنترل می کند. ۲ - در دماهای نسبتا پایین ($T < 200 \text{ K}$) پراکندگی ناشی از دررفتگی ها سازوکار غالب می باشد که با توجه به ناهماهنگی ثابت شبکه ای بین دو لایه مجاور ZnMnO/ZnO امری قابل پیش بینی می باشد.

فصل پنجم

بررسی خواص ترابری الکتريکی
ترانزیستورهای اثر میدانی (لایه
نازک و نانوسیم) اکسید روی

در این فصل به بررسی داده های تجربی جریان - ولتاژ ترانزیستورهای لایه نازک و نانوسیم ZnO پرداخته می شود. در بخش ۵ - ۱ ترانزیستورهای لایه نازک با کانال بلند مورد بررسی قرار می گیرند که در بخش ۵ - ۱ - ۱ مشخصه جریان - ولتاژ در ترانزیستور لایه نازک ZnO و در بخش ۵ - ۱ - ۲ اثر گذشت زمان بر خصوصیات الکتریکی ترانزیستور لایه نازک ZnO و در بخش ۵ - ۱ - ۳ افزایش کارایی ترانزیستور لایه نازک ZnO با بکار بردن دی الکتریک دروازه چند لایه ای مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در بخش ۵ - ۲ ترانزیستور نانوسیم ZnO و آثار کانال کوتاه بررسی خواهد شد. لازم به ذکر است که در سرتاسر این فصل برای تحلیل داده های تجربی جریان - ولتاژ از مدل غیر ایده آل هافمن (مبتنی بر وابستگی تحرک حامل ها به ولتاژ دروازه) رابطه (۲ - ۶۰) استفاده شده است.

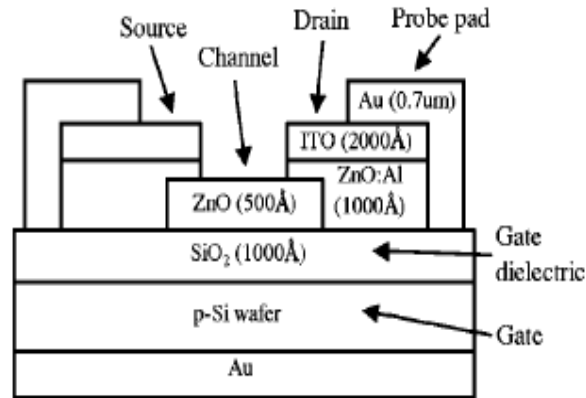
۵ - ۱ - ترانزیستورهای اثر میدانی - کانال بلند

۵ - ۱ - ۱ - بررسی مشخصه جریان - ولتاژ در ترانزیستور لایه نازک

ZnO

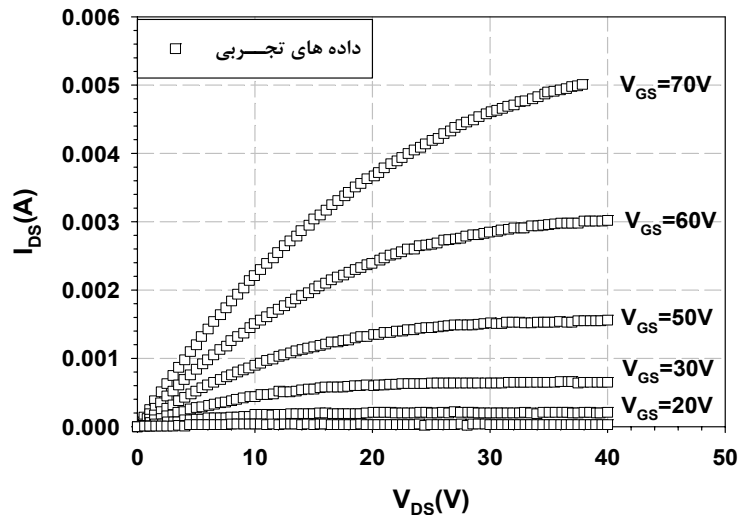
در این بخش به مدلسازی نظری داده های تجربی $I_{DS} - V_{DS}$ گزارش شده توسط هافمن [۲۵ و ۶۲] با استفاده از مدل غیر ایده آل مبتنی بر وابستگی تحرک حامل ها در کانال به ولتاژ دروازه می پردازیم. شکل ۵ - ۱ ساختار لایه ای این ترانزیستور را نشان می دهد که شامل یک ویفر Si نوع p ($N_a \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) است که بطور حرارتی اکسید شده و لایه دی الکتریک دروازه SiO_2 به ضخامت ۱۰۰ nm را شکل می دهد. ویفر Si هم به عنوان زیرلایه و هم به عنوان الکترود دروازه به کار می رود. این قطعه از یک کانال لایه نازک ZnO به ضخامت 500 \AA و به طول $L = 200 \mu\text{m}$ و نسبت عرض به طول $W/L \sim 9$ برخوردار می باشد. همچنین از لایه های ZnO:Al به ضخامت ۱۰۰ nm و ITO به ضخامت ۲۰۰ nm (ZnO:Al/ITO) به عنوان الکترود دررو و الکترود چشمه استفاده شده

است. لازم به ذکر است که لایه های های ZnO, ZnO:Al و ITO به روش کند و پاش مگنترونی^۱ lrf لایه نشانی شده اند. در انتها این ساختار در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد و در هوا بازپخت شده است.



شکل ۵ - ۱: طرح شماتیک از ساختار ترانزیستور لایه نازک ZnO [۶۲].

شکل ۵ - ۲ داده های تجربی $I_{DS} - V_{DS}$ مربوط به قطعه مورد نظر را به ازای V_{GS} های بین ۰ تا ۷۰ ولت نشان می دهد. همانطور که پیداست مقدار جریان به ازای ولتاژهای دروازه کوچکتر از ۱۰ V بسیار ناچیز و تقریباً برابر صفر است.

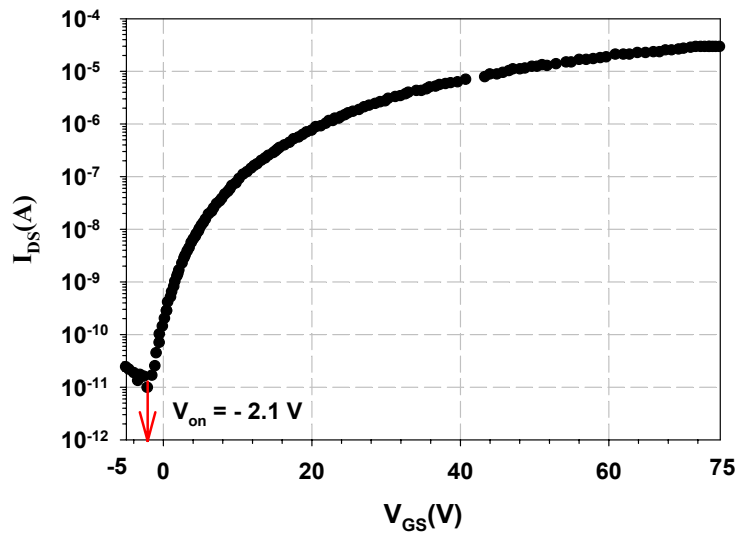


شکل ۵ - ۲: داده های تجربی $I_{DS} - V_{DS}$ بر حسب ولتاژهای دروازه مختلف [۲۵].

^۱. Magnetron sputtering radio frequency

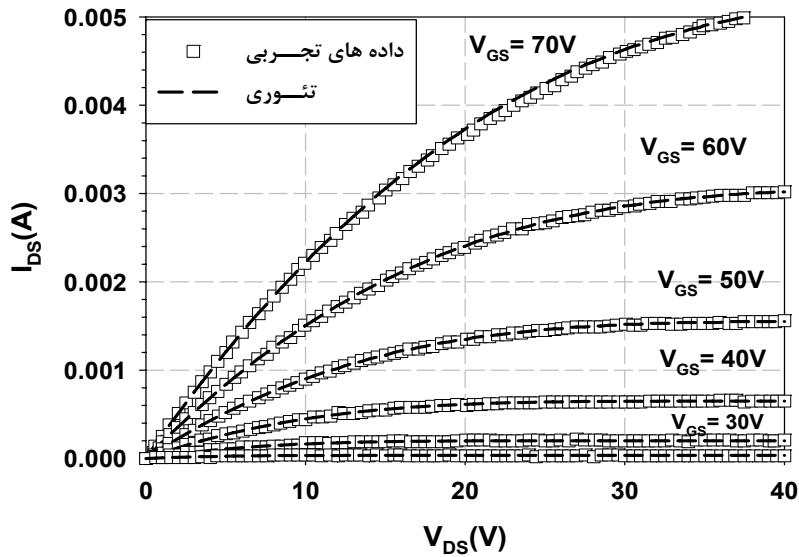
۵-۱-۱-۱- محاسبه ولتاژ روشن قطعه

به منظور مدل کردن داده های تجربی $I_{DS} - V_{DS}$ لازم است ولتاژ روشن (V_{on}) قطعه محاسبه شود. برای این منظور با توجه به مطالب بخش ۲-۵-۳ و استفاده از ایده هافمن می توان با رسم منحنی نیمه لگاریتمی مربوط به داده های تجربی $I_{DS} - V_{GS}$ به مقصود خود دست یافت. شکل ۳-۵ این داده ها را به ازای $V_{DS} = 100 \text{ mV}$ نشان می دهد. با توجه به این داده ها انتظار می رود ولتاژ روشن در حدود $2/1 \text{ V}$ باشد که نشانگر آن است که رفتار قطعه در مد تهی است.



شکل ۳-۵: نمودار تغییرات $I_{DS} - V_{GS}$ در قطعه مورد نظر [۶۲].

اکنون با استفاده از رابطه (۲-۶۰) و با در نظر گرفتن چند جمله ای مرتبه ۶ ($n = 6$) می توان به نتیجه مطلوب برازش داده ها دست یافت که نتیجه حاصل در شکل ۴-۵ و پارامترهای برازشی نشان داده شده در جدول ۵-۱ آمده است.



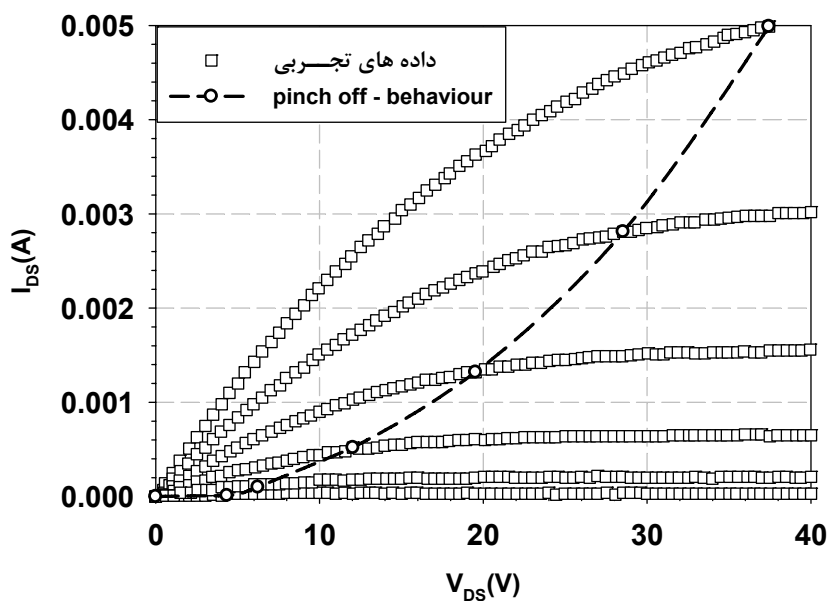
شکل ۵ - ۴: منحنی I_{DS} بر حسب V_{DS} در ترانزیستور اثر میدانی لایه نازک ZnO [۲۵] به همراه منحنی های برازشی آن ها.

جدول ۵ - ۱: پارامترهای برازشی مربوطه.

پارامتر برازشی	مقدار
c_0	۰
c_1	$5/0834 \times 10^{-3}$
c_2	$-1/4634 \times 10^{-3}$
c_3	$2/7185 \times 10^{-4}$
c_4	$-6/3302 \times 10^{-6}$
c_5	$6/2682 \times 10^{-8}$
c_6	$-2/4285 \times 10^{-10}$
$C_{ins}(F/cm^2)$	$3/45 \times 10^{-8}$

با استفاده از مقدار پارامتر برازشی C_{ins} به کمک رابطه (۲ - ۶۰) می توانیم ضریب گذردهی (ϵ_s) دی الکترونیک لایه دروازه (SiO_2) را بدست آورد. این کمیت با توجه به مقدار d (ضخامت دی الکترونیک دروازه) که برابر با ۱۰۰ نانومتر می باشد مقداری برابر با $3/9$ بدست می آید که دقیقاً با مقدار ضریب گذردهی الکترونیک SiO_2 گزارش شده [۷۸] مطابقت دارد. این نتایج حاکی از آن است که انطباق مدل

غیر ایده آل هافمن (رابطه ۲ - ۶۰) با داده های تجربی وابسته به مشخصه جریان - ولتاژ در ترانزیستورهای لایه نازک ZnO بیانگر کارایی این مدل در توصیف رفتاری این قطعات است. همانطور که در بخش ۲ - ۵ - ۲ بدان اشاره شد، ناحیه عملگری TFT (رفتار تنگش) به دو ناحیه قبل از اشباع (ناحیه خطی) و بعد از اشباع تقسیم می شود.



شکل ۵ - ۵: مقادیر ولتاژهای دررو اشباع بر حسب ولتاژهای دروازه مختلف.

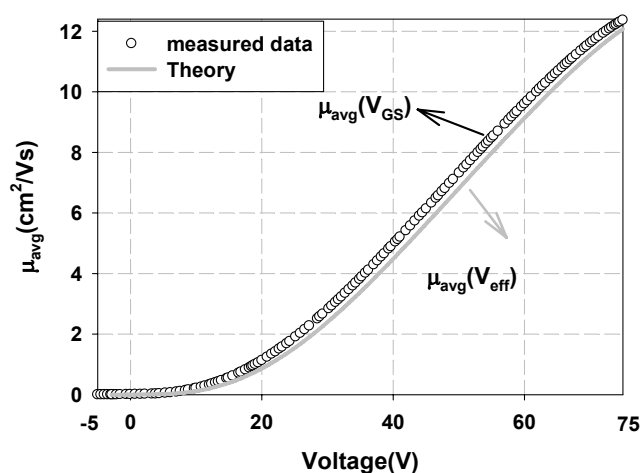
رفتار تنگش در قطعات TFT را می توان این گونه توضیح داد که هنگامی که ولتاژ دروازه به کانال قطعه اعمال می شود، بارهای انبارشی در کانال القا می شود. سپس چشمه و دررو به وسیله یک کانال سطحی نوع n رسانایی که از داخل آن می تواند جریان بزرگی جاری شود به یکدیگر متصل می شوند (لایه انبارشی). حال اگر ولتاژ دررو کوچکی اعمال شود، الکترون ها از طریق کانال رسانا از چشمه به دررو جاری خواهند شد (جریان مربوطه از دررو به چشمه جاری خواهد شد). در این حالت جریان بطور خطی افزایش می یابد و از رابطه V_{DS}/R بدست می آید که R مقاومت کانال نامیده می شود و از رابطه $\rho L/A$ بدست می آید که L طول کانال و A مساحت سطح مقطعی است که در معرض شارش جریان قرار دارد و ρ مقاومت ویژه کانال نام دارد. با افزایش بیشتر V_{DS} مساحت سطح مقطع در معرض شارش جریان کاهش می یابد و مقاومت کانال افزایش یافته بنابراین جریان با آهنگ

کوچکتری افزایش می یابد. با افزایش بیشتر ولتاژ دررو سرانجام پهنای لایه انبارشی در مکان دررو به صفر می رسد که به این مکان نقطه تنگنایی گفته می شود. در این حالت جریان اشباع از کانال عبور می کند. در ماورای نقطه تنگنا، ضمن افزایش بیشتر ولتاژ دررو، نقطه تنگنایی به طرف چشمه حرکت خواهد کرد در نتیجه ولتاژ در این نقطه (مکان جدید نسبت به چشمه) به همان اندازه ولتاژ اشباع باقی می ماند. بدین ترتیب، تعداد الکترون هایی که در واحد زمان از چشمه به نقطه تنگنایی در مکان جدید می رسند و از اینرو شارش جریان در کانال، بخاطر آن که افت پتانسیل در کانال با حرکت نقطه تنگنایی بطرف چشمه بدون تغییر می ماند، به همان اندازه جریان اشباع باقی خواهد ماند. بنابراین برای ولتاژهای بزرگتر از V_{DSAT} جریان ثابت می ماند و مستقل از V_{DS} است. لازم به ذکر است که برای ولتاژهای دروازه مختلف به ازای ولتاژ بزرگتر از ولتاژ اشباع جریان دررو افزایش اندکی دارد. علت این امر را می توان به این نکته نسبت داد که برای این قطعه به ازای $V_{DS} > V_{DSAT}$ نقطه تنگنایی به طرف چشمه حرکت می کند و باعث کاهش طول موثر کانال می شود، که این کاهش طول موثر کانال باعث کاهش مقاومت کانال می شود و در نتیجه جریان دررو افزایش می یابد.

با توجه به نتایج نظری بدست آمده ملاحظه می شود اگرچه نظریه غیر ایده آل هافمن در خصوص پیش بینی رفتاری $I_{DS} - V_{DS}$ قطعه کاملاً موفق بوده و انطباق قابل قبولی با داده های تجربی بدست می دهد، لکن این نظریه موقعیت $V_{DSAT} (\equiv V_P)$ ولتاژ تنگش) مبتنی بر جانشینی V_{on} با V_T در رابطه (۲ - ۴۰) را با مکان هندسی انتظاری آن ها که در شکل ۵ - ۵ نشان داده شده است به درستی ارائه نمی دهد. بدیهی است تحقیق در این مورد نیازمند بررسی بیشتر می باشد.

۵-۱-۱-۲- تحرک میانگین کانال

علاوه بر تعیین ضریب دی الکتریک دروازه می توان تحرک میانگین کانال بر حسب ولتاژ موثر برای ترانزیستور مورد نظر را برآورد کرد. برای این منظور می توان از رابطه (۲ - ۵۹) و نتایج محاسبات برازشی (جدول ۵ - ۱) استفاده نمود که در شکل ۵ - ۶ با تحرک میانگین اندازه گیری شده بر حسب ولتاژ دروازه که در گزارش هافمن [۲۵] آمده مقایسه گردیده است.



شکل ۵ - ۶: تحرک میانگین کانال بر حسب ولتاژ.

همانگونه که مشاهده می شود تحرک میانگین اندازه گیری شده همان تحرک میانگین بر حسب ولتاژ موثر می باشد که در طول محور ولتاژ به اندازه $V_{on} (-2/1 V)$ جابجا شده است. بنابراین شکل ۵ - ۶ کارایی مدل غیر ایده آل هافمن در ارزیابی تحرک میانگین کانال قطعات ترانزیستورهای لایه نازک ZnO را نشان می دهد.

۵ - ۱ - ۲ - اثر گذشت زمان بر خصوصیات الکتریکی ترانزیستور لایه

نازک ZnO

در این بخش با استفاده از مدل غیر ایده آل هافمن [۲۵]، به بررسی نظری داده های تجربی جریان - ولتاژ گزارش شده توسط کیم و همکاران [۷۹] می پردازیم. شکل ۵ - ۷ تصویر قطعه مورد نظر را که نسبت عرض (W) به طول (L) کانال در حدود ۱۹۰ است نشان می دهد. در این ساختار از SiO₂ با ضخامت ۲۰۰ nm به عنوان دی الکتریک و از P⁺- Si به عنوان الکتروود دروازه استفاده شده است. در این ساختار از لایه نازک بدون آلیش ZnO با ضخامت ۱۰۰ nm که به روش کند و پاش مگنترونی rf در محفظه خلا و در دمای زیرلایه ای ۴۰۰ درجه سانتیگراد لایه نشانی شده به عنوان کانال و از آلومینیوم با ضخامت ۲۰۰ nm که بر روی ZnO توسط تبخیر حرارتی لایه نشانی می شود به عنوان الکتروود های دررو و نیز چشمه استفاده شده است. سایر جزییات تجربی در متن مقاله مورد بررسی آمده است [۷۹]. اندازه گیری های جریان - ولتاژ بر روی نمونه به دو صورت انجام گرفته است :

۱- برای حالت تازه آماده شده ^۱

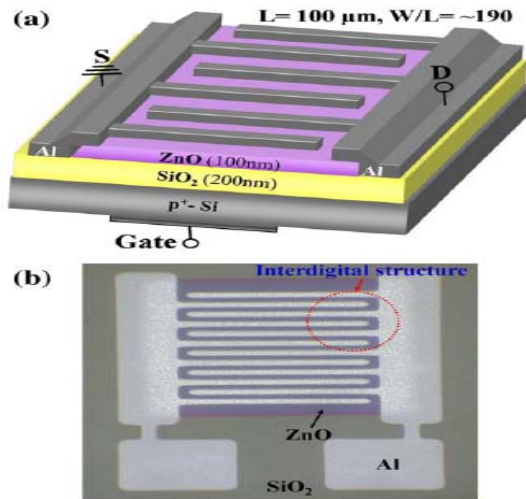
۲- برای حالتی که ۲۵ روز از ساخت قطعه گذشته است ^۲

لازم به ذکر است که در طی مدت یاد شده قطعه در خشکانه خلا^۳ در فشار ۱ Torr در تاریکی نگهداری شده است.

^۱. Pristine

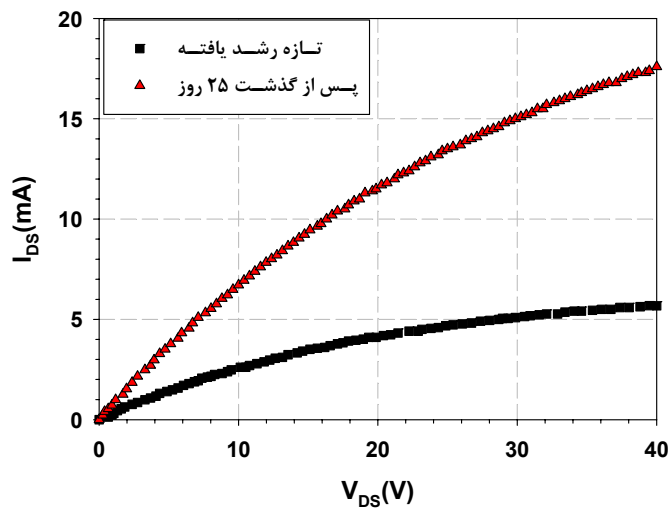
^۲. Aged

^۳. Vacuum desiccators



شکل ۵ - ۷: تصویری از ترانزیستور اثر میدانی با کانال ZnO. الف) نمای سه بعدی ب) نمای دو بعدی از نمونه مورد نظر با کانالی به طول ۱۰۰ میکرومتر [۷۹].

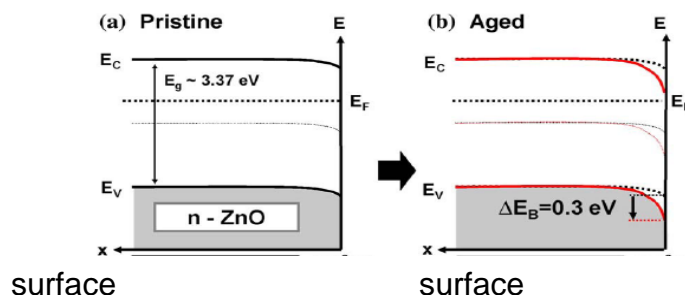
شکل ۵ - ۸ داده های تجربی مربوط به تغییرات جریان دررو I_{DS} برحسب ولتاژ دررو V_{DS} را نشان می دهد.



شکل ۵ - ۸: منحنی I_{DS} برحسب V_{DS} در ترانزیستور لایه نازک ZnO برای حالت تازه رشد یافته و پس از گذشت ۲۵ روز [۷۹].

همانگونه که پیداست با گذشت زمان جریان دررو افزایشی در حدود ۳ برابر داشته است. این افزایش می تواند به رسانایی بیشتر کانال در اثر جذب مولکول های جذب شده در سطح باشد [۷۹]. در سطح بالایی کانال علاوه بر وجود کانال رسانا در قسمت زیرین لایه عایق یک لایه رسانشی دیگر در قسمت

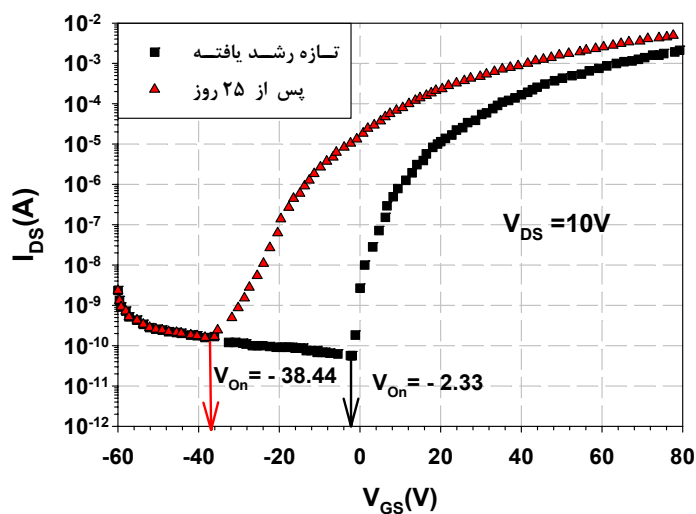
فوقانی نیز خواهیم داشت که سبب افزایش جریان قطعه خواهد شد. تاثیر جذب ملکول های بخشنده در سطح بر نوارهای انرژی را می توان در شکل ۵ - ۹ [۷۹] قبل و پس از گذشت زمان ۲۵ روز مشاهده کرد. همانطور که مشاهده می شود با گذشت زمان لبه نوار رسانش (E_C) و لبه نوار ظرفیت (E_V) نسبت به نمونه تازه آماده شده در حدود 0.3 eV به طرف پایین خم شده اند که می تواند نشان از انباشتگی بیشتر بار الکتریکی و رسانایی هرچه بیشتر سطح ZnO باشد.



شکل ۵ - ۹: نمودار نوار انرژی در محل اتصال کانال با سطح رویی نمونه در حالت الف (تازه آماده شده و ب) پس از گذشت ۲۵ روز [۷۹].

۵ - ۱ - ۲ - ۱ - محاسبه ولتاژ روشن قطعه

شکل ۵ - ۱۰ - منحنی نیم - لگاریتمی I_{DS} بر حسب V_{GS} نشان می دهد.

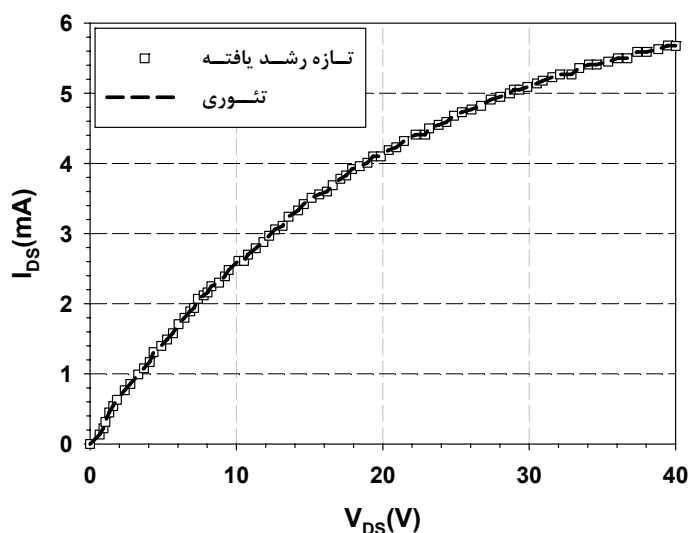


شکل ۵ - ۱۰: منحنی نیم - لگاریتمی تغییرات I_{DS} بر حسب V_{GS} برای نمونه مورد بررسی در دو زمان متفاوت [۷۹]. موقعیت V_{on} در هر دو مورد در شکل نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۵ - ۱۰ در نمونه تازه آماده شده $V_{on} = -2/3 V$ و پس از ۲۵ روز $V_{on} = -38/4 V$ بدست می آید که نشانگر آن است که در هر دو مورد قطعه در مد تهی عمل می کند. چنانچه پیداست ولتاژ روشن قطعه با گذشت زمان به مقدار $36 V$ جابجا شده است. این جابجایی می تواند ناشی از این حقیقت باشد که سطح ZnO به علت داشتن نقایص ذاتی نظیر اتم های روی بین جایگاهی (Zn_i) و تهی جایگاه های اکسیژن (V_O) سطحی قطبی و واکنش پذیر بوده [۸۰ و ۸۱] و برای رسیدن به حالت پایدار ترمودینامیکی با ملکول های موجود در هوا نظیر H_2 ، H_2O و O_2 واکنش می کند [۸۲] که در نتیجه یک لایه رسانا در سطح فوقانی ZnO تشکیل می گردد. بدیهی است تایید دقیقتر این پیش بینی نیازمند بررسی تجربی نمونه مورد نظر می باشد.

۵ - ۱ - ۲ - ۲ - انطباق مدل نظری بر داده های تجربی $I_{DS} - V_{DS}$

شکل ۵ - ۱۱ تحلیل داده های فوق برای نمونه تازه رشد یافته با استفاده از رابطه (۲ - ۶۰)، به ازای $n = 6$ ، را نشان می دهد. پارامترهای برازشی مورد نظر در جدول ۵ - ۲ آمده است.

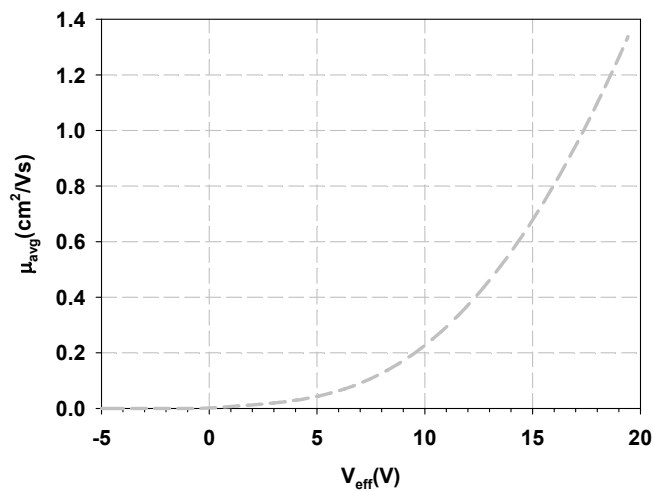


شکل ۵ - ۱۱: منحنی برازشی حاصل بکارگیری و مدل غیر ایده آل هافمن (رابطه ۲ - ۶۰) در داده های تجربی برای نمونه تازه آماده شده.

جدول ۵ - ۲. پارامترهای برازشی مربوط به نمونه تازه آماده شده.

مقدار	نمونه
۰	C ₀
$7/82 \times 10^{-5}$	C ₁
$-2/251 \times 10^{-5}$	C ₂
$4/182 \times 10^{-6}$	C ₃
$-9/738 \times 10^{-9}$	C ₄
$9/643 \times 10^{-11}$	C ₅
$-3/736 \times 10^{-12}$	C ₆
$1/726 \times 10^{-8}$	C _{ins} (F/cm ²)

شکل ۵ - ۱۲ نمودار تحرک میانگین برحسب ولتاژ موثر را برای ترانزیستور لایه نازک ZnO تازه رشد یافته را با استفاده از رابطه (۲ - ۵۹) و نتایج جدول ۵ - ۲ نشان می دهد.

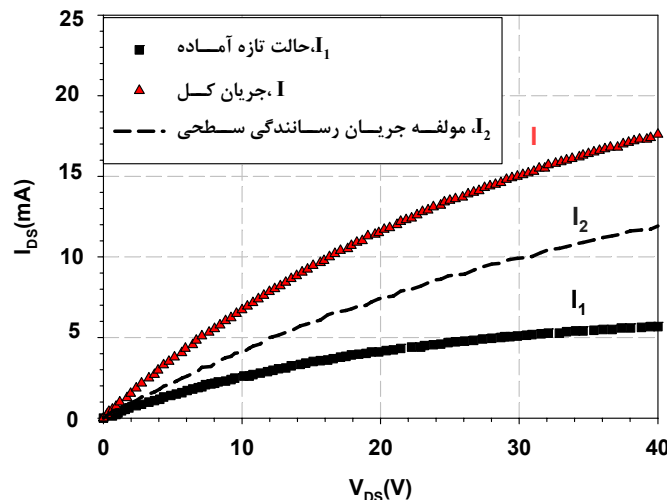


شکل ۵ - ۱۲: نمودار تغییرات تحرک میانگین برحسب ولتاژ موثر در نمونه تازه رشد یافته.

همانطور که پیداست تحرک میانگین کانال به ولتاژ وابسته است. علت کاهش تحرک (در حدود $1/4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ به ازای ولتاژ ۲۰ ولت) را می توان به بلند بودن کانال قطعه ($100 \mu\text{m}$) نسبت داد که

باعث افزایش سطح مشترک با لایه دی الکتریک می شود. در نتیجه تله های بار فصل مشترک افزایش می یابند و سبب کاهش تحرک کانال می شوند.

برای بررسی جریان دررو در اثر جذب ملکول های هوا توسط سطح قطبی و واکنش پذیر ZnO، داده های مربوط به مشخصه $I_{DS} - V_{DS}$ را بدون در نظر گرفتن اثر بار القایی تخمین زده ایم. در این نمودار I معرف جریان کل کانال، I_1 معرف جریان دررو ناشی از بار انبارشی القایی ایجاد شده در اثر ولتاژ دروازه و $I_2 (= I - I_1)$ معرف جریان دررو نمونه پس از گذشت ۲۵ روز می باشد که در شکل ۵ - ۱۳ مشاهده می شود.



شکل ۵-۱۳: اثر جذب ملکول های بخشنده در افزایش جریان دررو.

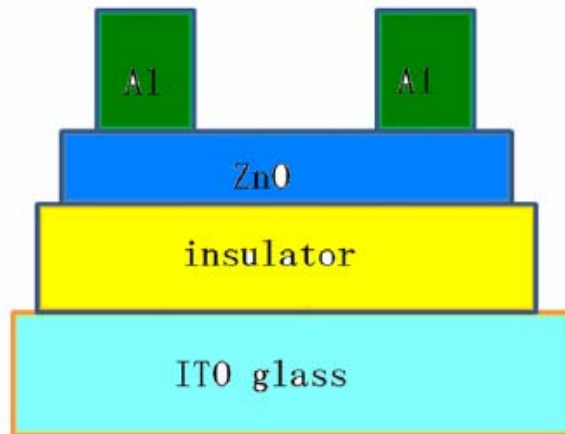
همانطور که در شکل ۵ - ۱۳ مشاهده می شود با گذشت زمان یک لایه رسانای دیگر علاوه بر بار القایی، در اثر جذب ملکول های بخشنده توسط سطح ZnO در کانال القا می شود و باعث افزایش جریان دررو خواهد شد.

۵ - ۱ - ۳ - افزایش کارایی ترانزیستور لایه نازک ZnO با بکار بردن

دی الکتریک دروازه چند لایه ای

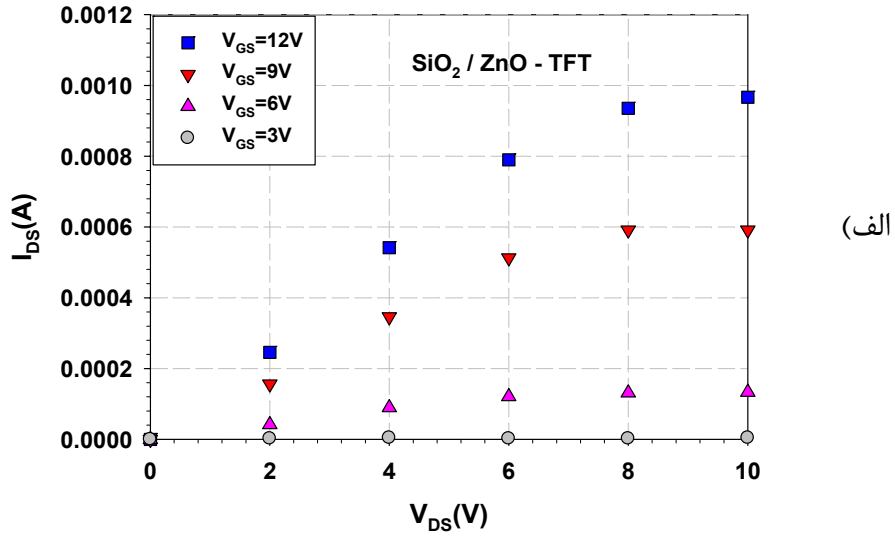
به منظور دستیابی به ترانزیستورهایی با توان مصرفی پایین نیاز به ساختن لایه هایی نازک با خصوصیات الکتریکی برتر نظیر تحرک بالاتر احساس می شود. در اغلب ترانزیستورها از SiO₂ به عنوان دی الکتریک دروازه استفاده می شود که قادر به برآورد کردن چنین نیازی نخواهد بود لذا برای داشتن ترانزیستور لایه نازک ZnO با خصوصیات الکتریکی بالاتر از دی الکتریک دروازه چندلایه ای^۱ استفاده می شود. زهانگ و همکاران [۸۳] دو نمونه ترانزیستور لایه نازک ZnO با دی الکتریک های متفاوت یکی تنها با SiO₂ به نام (SiO₂ / ZnO - TFT) و دیگری مرکب از سه لایه SiO₂/Ta₂O₅/SiO₂ (STS) به نام (STS / ZnO - TFT) می باشد را مورد بررسی قرار داده اند. شکل ۵ - ۱۴ طرح شماتیکی از ساختار این قطعات را نشان می دهد. در این ساختار لایه نشانی ها با روش کند و پاش مگنترونی rf انجام شده است. در نمونه اول ضخامت SiO₂ برابر با ۶۰ nm و در نمونه دیگر ضخامت STS نیز ۶۰ nm (به ترتیب ۵ nm / ۵۰ nm / ۵ nm) می باشد. ظرفیت SiO₂ ۵۰ nF/cm² و ظرفیت STS برابر با ۱۵۰ nF/cm² گزارش شده است [۸۳]. از لایه ZnO با ضخامت ۲۵ nm به عنوان کانال قطعه و از Al به ضخامت ۲۰۰ nm به عنوان الکترودهای دررو و دروازه استفاده شده است. در این نمونه ها نسبت W/L برای قطعه شامل SiO₂ برابر ۴۰ (۵۰ μm / ۲ mm) و برای قطعه با دی الکتریک دروازه STS برابر ۵۷ (۳۵ μm / ۲ mm) می باشد. لازم به ذکر است که طول کانال در این دو قطعه در مقایسه با قطعات گزارش شده در بخش ۵ - ۱ - ۱ در حدود ۳ برابر کوچکتر می باشد.

^۱. Multilayer gate dielectric

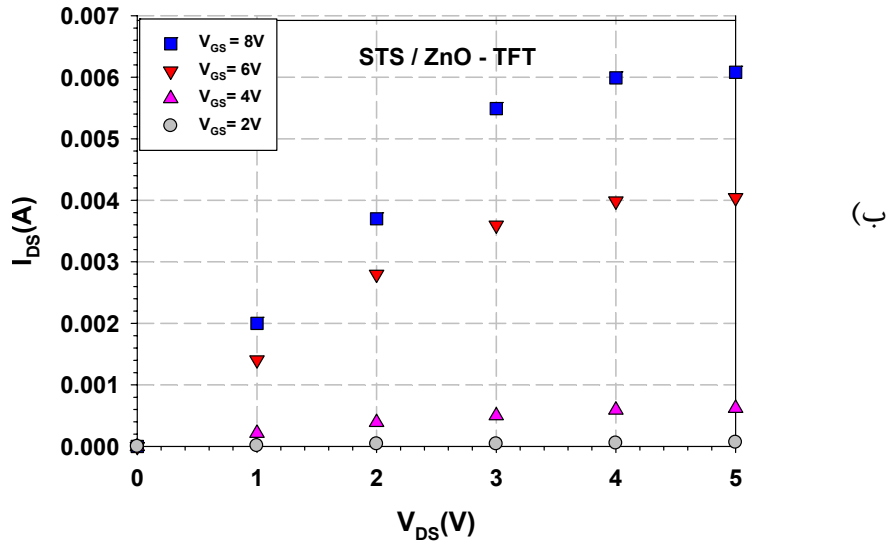


شکل ۵-۱۴: طرح شماتیک از ساختار ترانزیستور لایه نازک با کانالی بطول ۳۵ تا ۵۰ میکرومتر [۸۳].

شکل ۵-۱۵ (الف و ب) داده های تجربی $I_{DS} - V_{DS}$ را برای دو قطعه مورد نظر نشان می دهد. همان گونه که پیداست برای قطعه $SiO_2 / ZnO - TFT$ اندازه گیری ها به ازای ولتاژ های دروازه بین ۰ تا ۱۲ ولت با گام ۳ ولت و برای قطعه $STS / ZnO - TFT$ اندازه گیری ها به ازای ولتاژ های دروازه بین ۰ تا ۸ ولت با گام ۲ ولت انجام گرفته است. با توجه به داده های تجربی در این شکل می توان دریافت که با به کار بردن دی الکتریک چند لایه ای در مقایسه با دی الکتریک SiO_2 تغییرات قابل توجهی در خواص الکتریکی قطعه حاصل شده است. برای مثال قطعه $STS / ZnO - TFT$ در ولتاژ دروازه ۸ ولت به ازای ولتاژ دررو ۵ ولت به جریان اشباع ۶ میلی آمپر رسیده است در حالی که برای قطعه $SiO_2 / ZnO - TFT$ به ازای ولتاژ دروازه ۱۲ ولت در ولتاژ دررو ۱۰ ولت به جریان اشباعی در حدود ۱ میلی آمپر رسیده است. بنا به گزارش [۸۳] این تغییرات ناشی از افزایش ظرفیت دی الکتریک دروازه و بهبود مورفولوژی آن می باشد. لازم به ذکر است که شرایط سطح دی الکتریک یکی از مهمترین پارامترهای تاثیرگذار بر عملکرد قطعات TFT می باشد [۸۳] و بنا بر گزارش زهانگ و همکاران [۸۳] سطح لایه دی الکتریک STS هموارتر از سطح لایه دی الکتریک SiO_2 می باشد.



(الف)

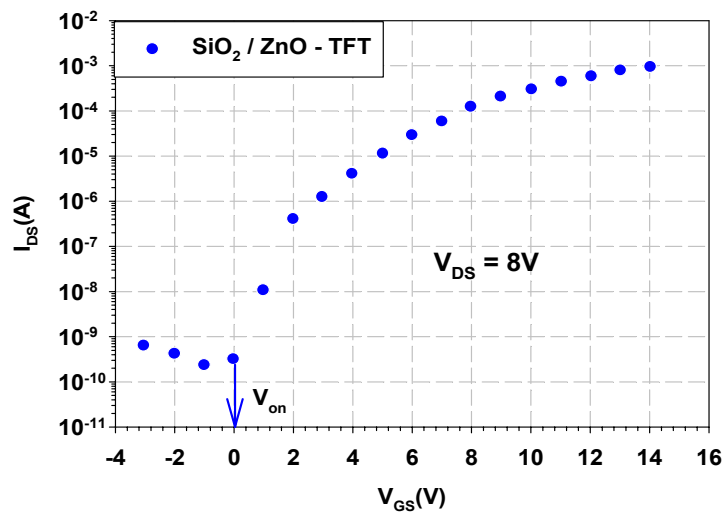


(ب)

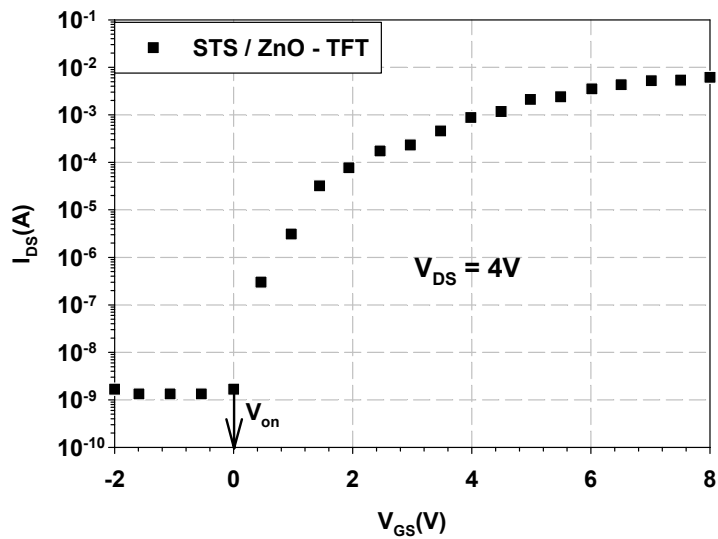
شکل ۵-۱۵ (الف و ب): داده های تجربی $I_{DS} - V_{DS}$ برای دو قطعه مورد نظر [۸۳].

۵-۱-۳-۱- محاسبه ولتاژ روشن

شکل ۵-۱۶ (الف و ب) داده های تجربی $I_{DS} - V_{GS}$ را برای این دو قطعه نشان می دهد.



(الف)



(ب)

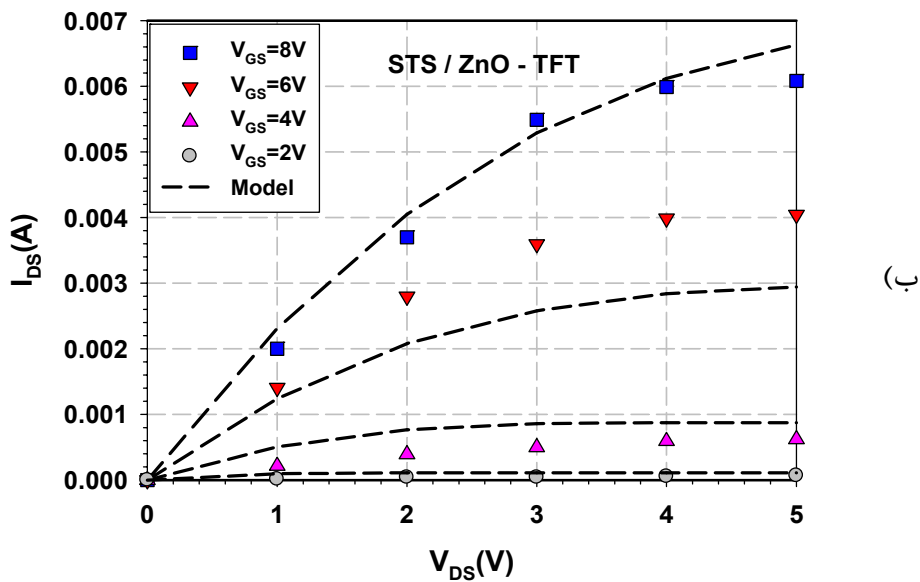
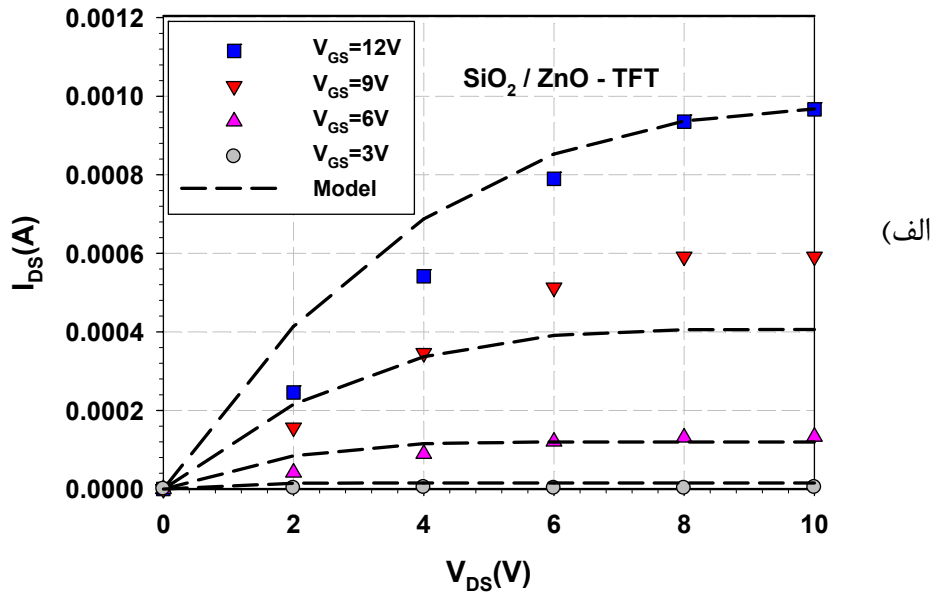
شکل ۵-۱۶ (الف و ب): داده های تجربی $I_{DS} - V_{GS}$ برای دو قطعه مورد نظر [۸۳].

با توجه به این داده ها انتظار می رود که ولتاژ روشن (V_{on}) در نمونه SiO_2/ZnO -TFT و STS/ZnO -TFT برابر صفر ولت باشد که نشان می دهد هر دو قطعه در مد تهی عمل می کنند.

۵-۱-۳-۲- انطباق مدل نظری بر داده های تجربی $I_{DS} - V_{DS}$

با استفاده از رابطه (۲-۶۰) داده های مورد نظر را مورد بررسی قرار داده ایم که نتایج حاصل

در شکل های ۵-۱۷ (الف و ب) و پارامترهای برازشی مربوطه در جدول ۵-۳ آمده است.



شکل ۵-۱۷: منحنی های برازشی برای نمونه الف) $SiO_2 / TFT - ZnO$ و ب) $STS / TFT - ZnO$.

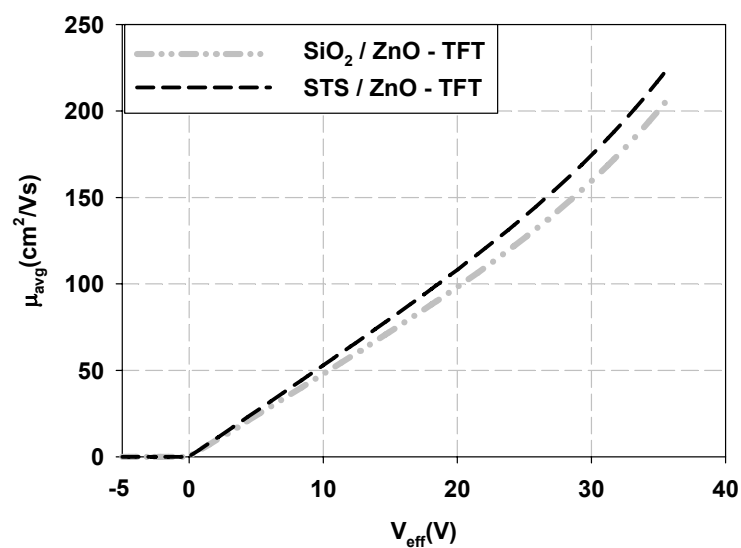
جدول ۵ - ۳: پارامترهای برازشی برای نمونه STS / ZnO - TFT و SiO₂ / ZnO - TFT.

پارامتر	مقادیر برازشی در STS / ZnO - TFT	مقادیر برازشی در SiO ₂ / ZnO - TFT
c ₀	۰	۰
c ₁	۴/۷۸۳۴	۷/۲۳۴ × ۱۰ ^{-۱}
c ₂	-۱/۴۶۳۴ × ۱۰ ^{-۳}	-۱/۴۶۳۴ × ۱۰ ^{-۳}
c ₃	۲/۷۱۸۵ × ۱۰ ^{-۴}	۲/۷۱۸۵ × ۱۰ ^{-۴}
c ₄	-۶/۳۳۰۲ × ۱۰ ^{-۶}	-۶/۳۳۰۲ × ۱۰ ^{-۶}
c ₅	۶/۲۶۸۲ × ۱۰ ^{-۸}	۶/۲۶۸۲ × ۱۰ ^{-۸}
c ₆	- ۲/۲۴۲۸۵ × ۱۰ ^{-۱۰}	- ۲/۴۲۸۵ × ۱۰ ^{-۱۰}
C _{ins} (F/cm ²)	۱۵ × ۱۰ ^{-۸}	۵/۷ × ۱۰ ^{-۸}

همانطور که از نتایج برازشی مشاهده می شود مقدار C_{ins} به عنوان پارامتر برازشی با مقدار گزارش شده برای هر دو نمونه همخوانی دارد. لازم به ذکر است که برای قطعه SiO₂ / TFT - ZnO به ازای ولتاژ دروازه ۹ ولت و برای قطعه STS / TFT - ZnO به ازای ولتاژ دروازه ۶ ولت برازش خوبی حاصل نشده است که علت این امر نیاز به بحث و بررسی بیشتر دارد.

با توجه به رابطه (۲ - ۶۱) و جداول ۵ - ۳ مقدار ε_s برای قطعه SiO₂ / ZnO - TFT برابر ۳/۴ و برای قطعه STS / ZnO - TFT برابر با ۱۰/۲ بدست می آید. لذا از دیگر عوامل افزایش کارایی و خصوصیات الکتریکی قطعه STS / ZnO - TFT نسبت به قطعه SiO₂ / ZnO - TFT بزرگتر بودن ε_s دی الکتریک دروازه می باشد

به منظور بررسی تاثیر شرایط سطح دی الکتریک بر خصوصیات الکتریکی دو قطعه مورد بررسی تحرک میانگین کانال آن ها را مورد بررسی قرار داده ایم. شکل ۵ - ۱۸ تحرک میانگین کانال که با استفاده از رابطه (۲ - ۵۹) و جداول ۵ - ۳ محاسبه شده است را برای دو قطعه مورد نظر نشان می دهد.



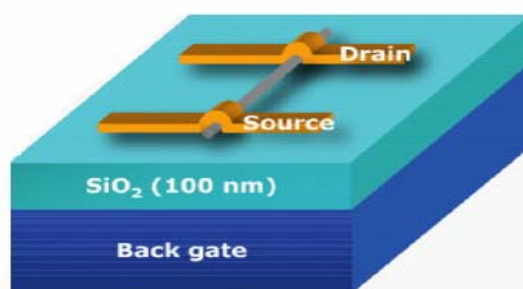
شکل ۵ - ۱۸ : تحرک میانگین کانال مربوط به هر دو قطعه.

همانطور که از شکل ۵ - ۱۸ مشاهده می شود تحرک میانگین کانال با بکاربردن دی الکتریک چند لایه ای افزایش یافته است که علت آن را می توان به کاهش تله های بار فصل مشترک در اثر بهبود مورفولوژی لایه دی الکتریک دروازه چند لایه ای (STS) نسبت به SiO₂ نسبت داد.

۵-۲- ترانزیستورهای اثر - میدانی کانال کوتاه

۵-۲-۱- مشخصه جریان-ولتاژ ترانزیستور نانوسیم ZnO

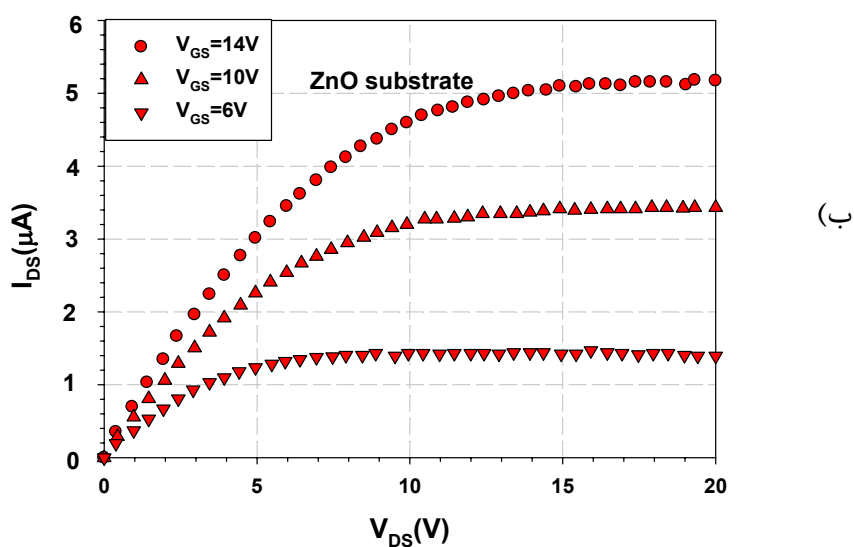
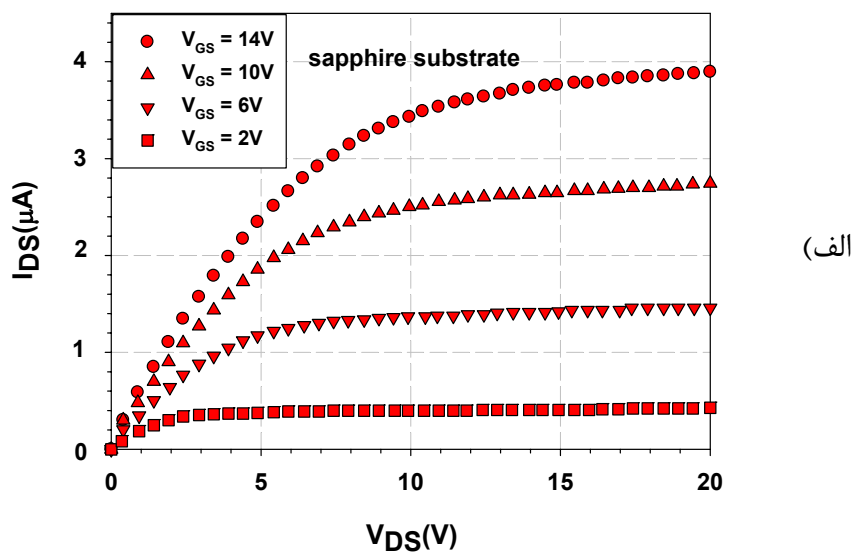
در این بخش به بررسی و تحلیل داده های تجربی $I_{DS} - V_{DS}$ مربوط به ترانزیستور اثر میدانی تهیه شده از نانوسیم ZnO، که توسط هونگ و همکاران [۸۴] گزارش شده است می پردازیم. قطعات ساخته شده به روش ترابری فاز بخار بر روی دو نوع زیرلایه یکی برروی sapphire و دیگری برروی لایه ای از جنس ZnO با استفاده از نانوسیم ZnO (به عنوان کانال قطعه) به طول ۳ تا ۴ میکرومتر و قطر (عرض کانال) ۱۱۲ nm و ۸۵ nm (به ترتیب) رشد یافته اند. در این قطعات از SiO_2 با ضخامت ۱۰۰ nm به عنوان دی الکتریک دروازه و اتصالات فلزی $Ti(100\text{ nm}) / Au(100\text{ nm})$ به عنوان الکتروود دررو و چشمه استفاده شده است. همچنین به منظور غیرفعال سازی سطحی و جلوگیری جذب ملکول های گازهای محیطی توسط سطح واکنش پذیر نانوسیم ZnO، نمونه ها با یک لایه پلیمری عایق^۱ پوشانده شده است. شکل ۵-۱۹ طرحی شماتیک از این ترانزیستورها را نشان می دهد. سایر جزئیات مربوط به ساخت نمونه ها در مراجع [۸۴ و ۸۵] آمده است.



شکل ۵-۱۹: ترانزیستور اثر میدانی نانوسیم ZnO [۸۴].

شکل ۵-۲۰ (الف و ب) به ترتیب داده های تجربی $I_{DS} - V_{DS}$ مربوط به ترانزیستور اثر میدانی نانوسیم ZnO رشد یافته بر روی زیرلایه sapphire و ZnO بعد از غیر فعال سازی سطحی را نشان می دهد.

^۱. Poly methyl metahacrylate

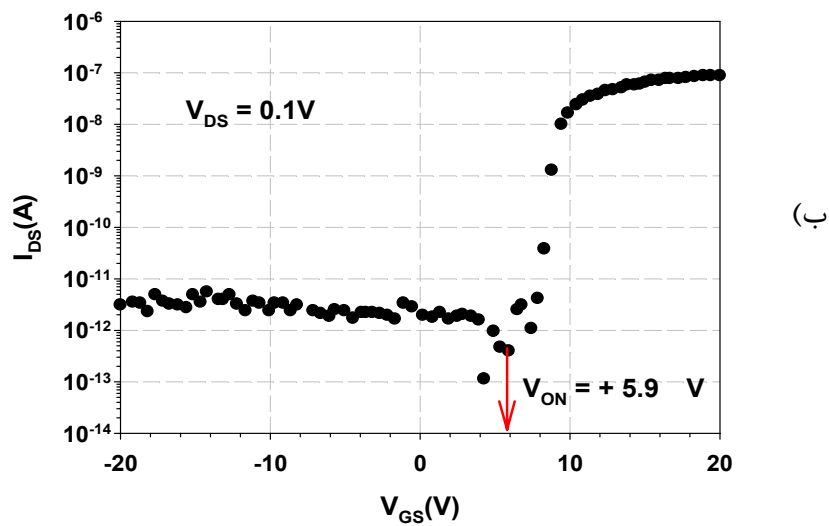
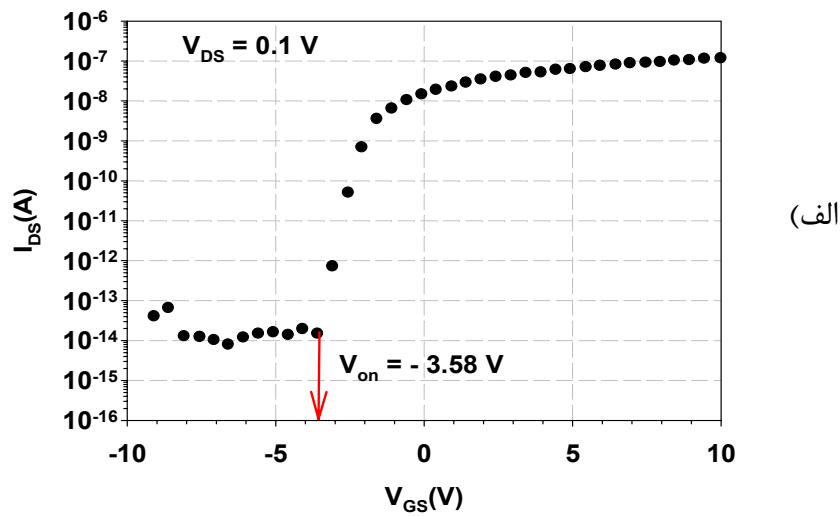


شکل ۵ - ۲۰: داده های تجربی $I_{DS} - V_{DS}$ برای ترانزیستورهای اثر میدانی نانوسیم ZnO رشد یافته بر روی زیرلایه (الف) sapphire و (ب) ZnO [۸۴].

۵ - ۲ - ۱ - ۱ - محاسبه ولتاژ روشن قطعه

شکل ۵ - ۲۱ (الف و ب) به ترتیب داده های تجربی $I_{DS} - V_{GS}$ مربوط به ترانزیستور اثر میدانی

نانوسیم ZnO رشد یافته بر روی زیرلایه sapphire و ZnO را نشان می دهد.

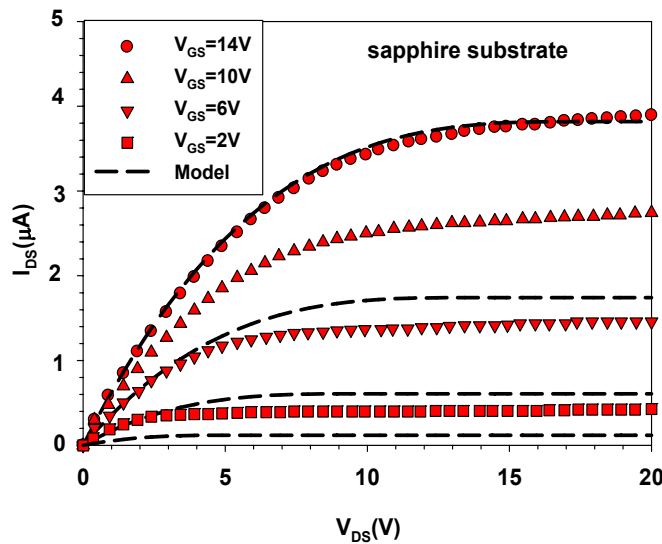


شکل ۵ - ۲۱: داده های تجربی $I_{DS} - V_{GS}$ برای ترانزیستورهای اثر میدانی نانوسیم ZnO رشد یافته بر روی زیرلایه sapphire و ZnO [۸۴].

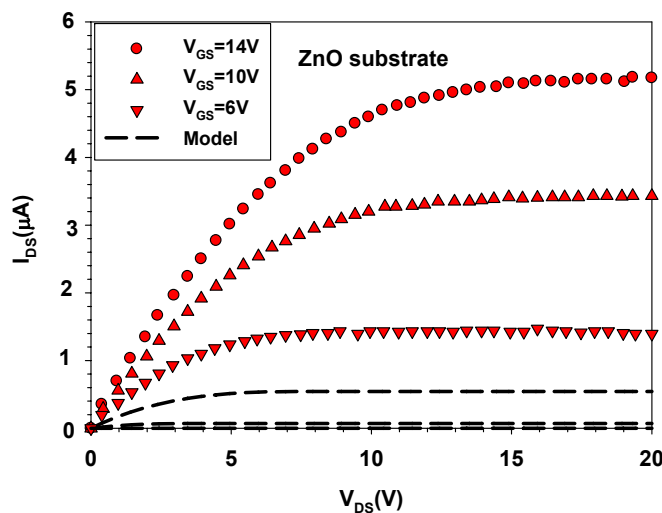
چنانچه پیداست ولتاژ روشن مربوط به این قطعات به ترتیب برای ترانزیستورهای اثر میدانی نانوسیم ZnO رشد یافته بر روی زیرلایه sapphire و ZnO برابر $۳/۶-$ و $۵/۹$ ولت می باشد که نشانگر عملگری آن ها به ترتیب در مد تهی و مد افزایشی است.

۵-۲-۱-۲ - تحلیل داده های تجربی $I_{DS} - V_{DS}$

شکل ۵-۲۲ (الف و ب) به ترتیب داده های تجربی $I_{DS} - V_{DS}$ مربوط به ترانزیستور اثر میدانی نانوسیم ZnO رشد یافته بر روی زیرلایه sapphire و ZnO به همراه منحنی های برازشی آن ها را نشان می دهد. منحنی های برازشی با استفاده از رابطه (۲-۶۰) بدست آمده است و پارامترهای برازشی مربوطه به ترتیب در جدول ۵-۴ آمده است. لازم به ذکر است که نسبت عرض به طول کانال در این قطعات به ترتیب برابر با ۰/۰۲۸ و ۰/۰۲۱ در نظر گرفته شده است.



(الف)



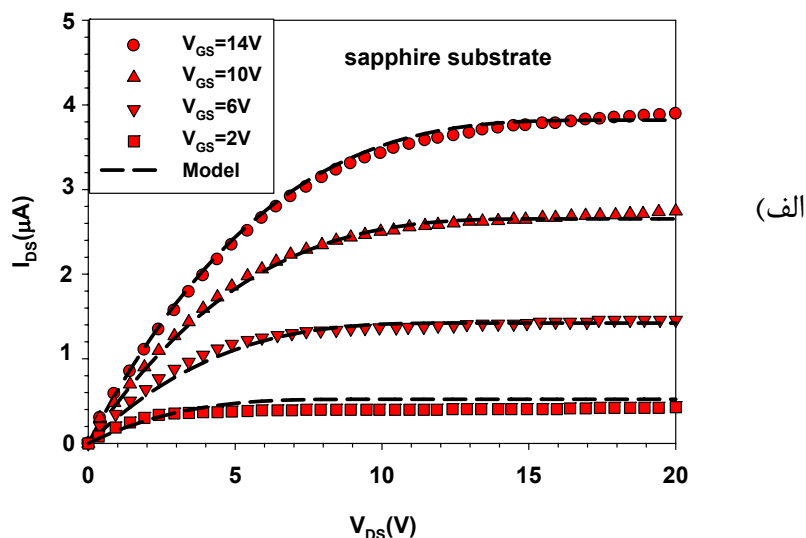
(ب)

شکل ۵-۲۲: داده های تجربی $I_{DS} - V_{DS}$ مربوط به ترانزیستور اثر میدانی نانوسیم ZnO رشد یافته بر روی زیرلایه الف) sapphire و ب) ZnO [۸۴]، به همراه منحنی های برازشی آن ها مبتنی بر نظریه کانال بلند.

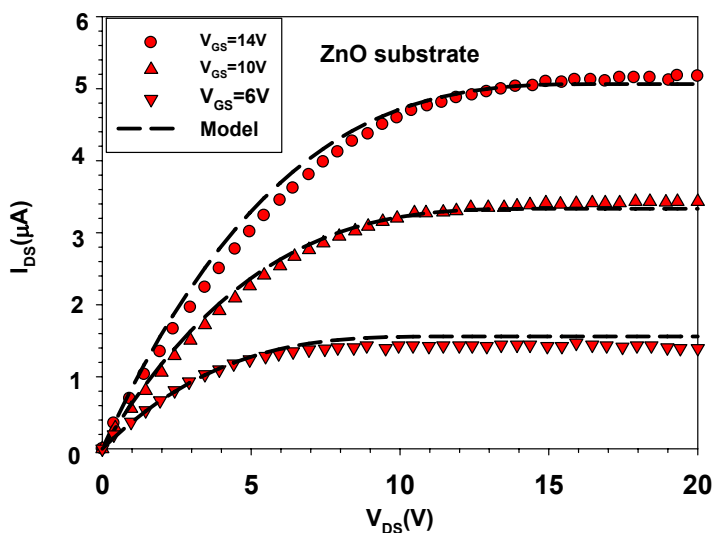
جدول ۵ - ۴: پارامترهای برازشی مربوط به ترانزیستور اثر میدانی نانوسیم ZnO رشد یافته بر روی زیرلایه sapphire و ZnO.

پارامتر	مقادیر برازشی در نمونه با زیرلایه ZnO	مقادیر برازشی در نمونه با زیرلایه sapphire
C_0	۰	۰
C_1	۴/۱۸۳۴	۲/۱۴۳۴
C_2	$-۱/۴۶۳۴ \times ۱۰^{-۳}$	$-۱/۴۶۳۴ \times ۱۰^{-۳}$
C_3	$۲/۷۱۸۵ \times ۱۰^{-۴}$	$۲/۷۱۸۵ \times ۱۰^{-۴}$
C_4	$-۶/۳۳۰۲ \times ۱۰^{-۶}$	$-۶/۳۳۰۲ \times ۱۰^{-۶}$
C_5	$۶/۲۶۸۲ \times ۱۰^{-۸}$	$۶/۲۶۸۲ \times ۱۰^{-۸}$
C_6	$-۲/۴۲۸۵ \times ۱۰^{-۱۰}$	$-۲/۴۲۸۵ \times ۱۰^{-۱۰}$
$C_{ins}(F/cm^2)$	$۳/۴۵ \times ۱۰^{-۸}$	$۳/۴۵ \times ۱۰^{-۸}$

همانطور که از منحنی های انطباق یافته نظری در شکل ۵ - ۲۲ (الف و ب) پیداست با کاهش ولتاژ دروازه V_{GS} دقت برازش بدست آمده کاهش می یابد. علت این امر را می توان به آثار کانال کوتاه نسبت داد. به منظور بدست آوردن برازش قابل قبول برای داده های تجربی $I_{DS} - V_{DS}$ آثار کانال کوتاه را مورد بررسی قرار می دهیم و ولتاژ روشن قطعه را به عنوان پارامتر برازشی مطابق با آنچه که در بخش ۲ - ۵ - ۷ گفته شد در نظر می گیریم. شکل ۵ - ۲۳ (الف و ب) و جداول ۵ - ۵ و ۵ - ۶ نتیجه این برآورد را نشان می دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۵ - ۲۳: مدل کردن داده های تجربی $I_{DS} - V_{DS}$ مربوط به ترانزیستور اثر میدانی نانوسیم ZnO رشد یافته بر روی زیرلایه الف) sapphire و ب) ZnO با در نظر گرفتن ولتاژ روشن به عنوان پارامتر برازشی.

همانطور که از شکل ۵ - ۲۲ پیداست با کاهش ولتاژ دروازه قطعه زودتر به مد اشباع می رسد. از آن جا که طول کانال قطعه کوچک است و آثار کانال - کوتاه پدیدار می شود می توان این اثر را اینگونه توضیح داد که با کاهش ولتاژ دروازه سرعت اشباع در ولتاژهای پایین تر V_{DS} رخ می دهد که نشان دهنده افزایش میدان الکتریکی طولی کانال با کاهش ولتاژ دروازه می باشد. در نتیجه آثار کانال کوتاه عملیات قطعه را پیچیده می کند و انجام وظیفه قطعه را ضعیف می سازد طوری که در برخی از موارد

دروازه کنترل جریان را از دست می دهد لذا باید آثار کانال کوتاه را حذف یا حداقل کمینه نمود طوری که قطعات با کانال کوتاه بتوانند مشخصه های الکتریکی قطعات کانال بلند را حفظ کنند.

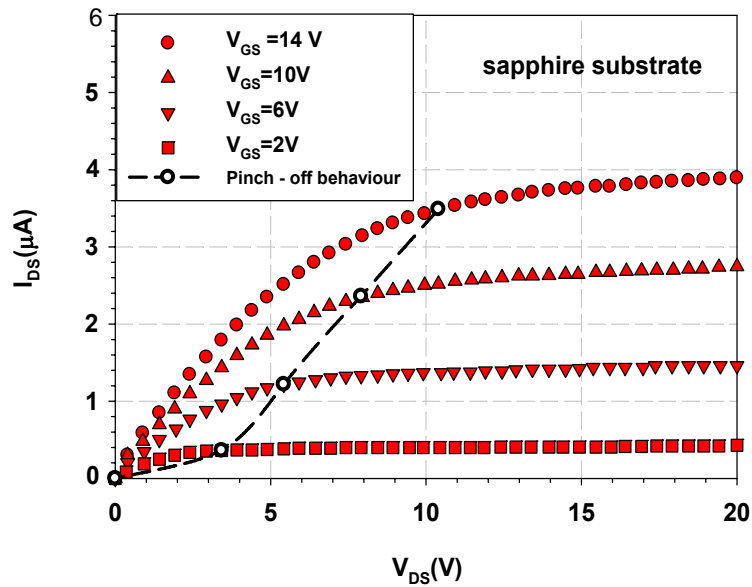
جدول ۵ - ۵: مقادیر ولتاژ روشن برای ولتاژهای دروازه مختلف به عنوان پارامتر برازشی مربوط به ترانزیستور اثر میدانی نانوسیم ZnO رشد یافته بر روی زیرلایه sapphire.

$V_{GS}(V)$	$V_{on}(\text{measured})(V)$	$V_{on}(\text{fitted})(V)$
۱۰	-۳/۵۸	-۵/۶
۶	-۳/۵۸	-۶/۷
۲	-۳/۵۸	-۷/۱

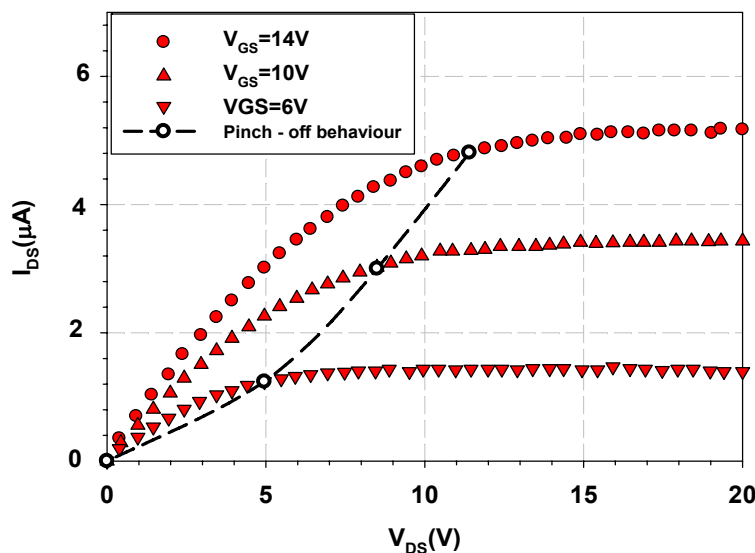
جدول ۵ - ۶: مقادیر ولتاژ روشن برای ولتاژهای دروازه مختلف به عنوان پارامتر برازشی مربوط به ترانزیستور اثر میدانی نانوسیم ZnO رشد یافته بر روی زیرلایه ZnO.

$V_{GS}(V)$	$V_{on}(\text{measured})(V)$	$V_{on}(\text{fitted})(V)$
۱۴	۵/۹	-۳
۱۰	۵/۹	-۴/۸
۶	۵/۹	-۵/۵

همچنین می توان با توجه به آن چه که در بخش ۵ - ۱ - ۱ - ۱ در مورد رفتار تنگش TFT اشاره شد، می توان رفتار تنگش را برای دو نمونه مورد بررسی در شکل ۵ - ۲۴ (الف و ب) مشاهده کرد.



(الف)

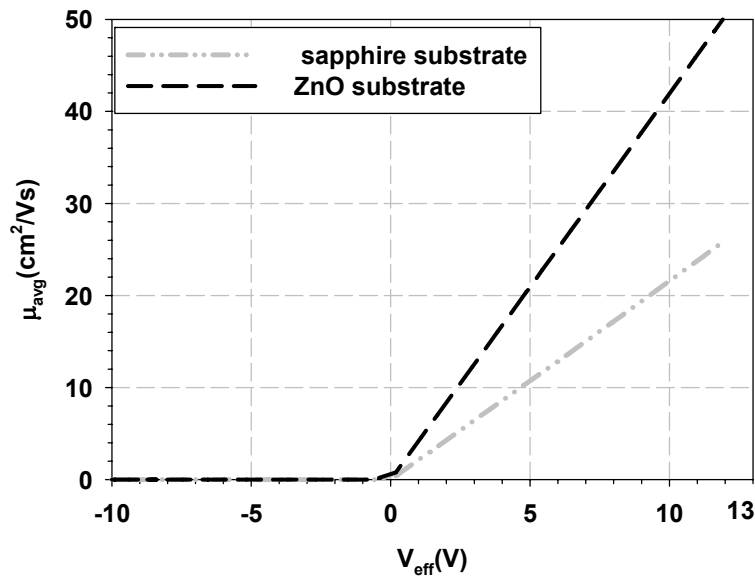


(ب)

شکل ۵ - ۲۴: رفتار تنگش در ترانزیستور اثر میدانی نانوسیم ZnO رشد یافته بر روی زیرلایه الف) sapphire و ب) ZnO.

لازم به ذکر است که برای هر دو نمونه به ازای ولتاژ بزرگتر از ولتاژ اشباع جریان دررو افزایش اندکی دارد. علت این امر را می توان به این نکته نسبت داد که برای ترانزیستور های نانوسیم به ازای $V_{DS} > V_{DSAT}$ نقطه تنگنایی به طرف چشمه حرکت می کند و باعث کاهش طول موثر کانال می شود که این کاهش طول موثر باعث کاهش مقاومت کانال می شود و در نتیجه جریان دررو اندکی افزایش می یابد.

شکل ۵ - ۲۵ نمودار تحرک میانگین کانال را برحسب ولتاژ موثر برای نمونه رشد یافته بر زیر لایه sapphire و زیر لایه ZnO به ترتیب نشان می دهد که با توجه به رابطه (۲ - ۵۹) و جدول ۵ - ۴ محاسبه شده است.



شکل ۵ - ۲۵ : تحرک میانگین کانال برای هر دو قطعه مورد بررسی.

همانطور که پیداست قطعه رشد یافته بر روی زیر لایه ZnO از تحرک بالاتری نسبت به قطعه رشد یافته بر روی زیر لایه sapphire برخوردار است که علت این امر را می توان به ناهمسانی شبکه ای کمتر و در نتیجه کاهش میزان تله های بار در فصل مشترک کانال و لایه دی الکتریک قطعه رشد یافته بر روی زیر لایه ZnO نسبت به قطعه رشد یافته بر روی زیر لایه sapphire نسبت داد.

۱- خواص ترابری الکتریکی در نیمرسانای تک بلوری کپه ای ZnO

الف) تاثیر روش رشد بر خواص ترابری الکتریکی

در این بخش داده های تجربی مربوط به تغییرات تراکم و تحرک حامل بر حسب دما وابسته به نمونه های تک بلوری ZnO خالص که به روش های مختلفی رشد یافته اند مورد مطالعه قرار گرفته اند. مطالعه داده های تجربی وابسته به خواص ترابری الکتریکی نمونه های تک بلور اکسید روی خالص که به روش های مختلفی رشد یافته اند حاکی از آن است که این نمونه ها غالبا به علت حضور نقایص بلوری شبه - بخشنده ذاتی در حین رشد، از تراکم الکترونی نسبتا بالا و تحرکی پایین برخوردارند که نشان دهنده تاثیر روش رشد و جزئیات مربوط به آن در کیفیت بلوری این ماده می باشد. تحلیل داده های وابسته به رفتار دمایی تراکم حاملی (جدول ۳ - ۱) نشان می دهد که ناراستی های اتم روی بین جایگاهی و تهی جایگاه اکسیژنی و حضور ناخواسته اتم های هیدروژن در نمونه به عنوان تراز شبه - بخشنده در نیمرسانای ZnO بلورین عمل می کنند. تحلیل داده های وابسته به رفتار دمایی تحرک حاملی (جدول ۳ - ۲) در نمونه های مورد بررسی نشان می دهد که مقدار تراکم دررفتگی بدست آمده برای نمونه اول در مقایسه با نمونه دوم و سوم بسیار ناچیز می باشد که نشانگر آن است که نمونه تهیه شده توسط لوک و همکاران (نمونه ۱) به روش ترابری فاز بخار از بالاترین کیفیت بلوری و تحرک حاملی در بین دیگر نمونه های گزارش شده توسط ساکاموتو (نمونه ۲) و پگنی (نمونه ۳) که به ترتیب به روش های PLD و MOCVD رشد یافته اند برخوردار است.

ب) بررسی خواص ترابری الکتریکی لایه های ZnO:P تهیه شده به روش لیزر پالسی

در این بخش داده های تجربی مربوط به تغییرات تراکم و تحرک حامل بر حسب دما وابسته به لایه های تک بلوری ZnO:P رشد یافته به روش PLD تحت فشارهای اکسیژنی ۰/۱mbar، ۰/۰۱۶ mbar، ۰/۰۰۲ mbar و ۰/۰۰۳ mbar مورد مطالعه قرار گرفتند. تحلیل داده های وابسته به رفتار دمایی تراکم حاملی (جدول ۳ - ۳) نشانگر آن است که با افزایش فشار اکسیژنی در حین فرآیند رشد مقدار تراکم اتم های پذیرنده افزایش می یابد که علت آن را می توان به افزایش نقایص بلوری اتم اکسیژن بین جایگاهی که به عنوان پذیرنده در شبکه ZnO عمل می کند نسبت داد که یکی از عوامل کاهش تحرک حامل با افزایش فشار اکسیژن در حین فرآیند رشد بشمار می آید. همچنین با تحلیل رفتار دمایی این داده ها (جدول ۳ - ۴) می توان علت کاهش تحرک حاملی با افزایش فشار اکسیژنی را نیز به افزایش مقدار تراکم دررفتگی ها نسبت داد طوری که برای نمونه های اول و دوم تقریباً در تمامی گستره دمایی پراکندگی ناشی از دررفتگی ها سازوکار غالب در کنترل تحرک حامل ها می باشد اما برای نمونه های سوم و چهارم این سازوکار تنها در محدوده دماهای پایین سازوکار غالب است. لازم به ذکر است که برای تحلیل داده های تجربی نمونه رشد یافته تحت فشار اکسیژنی ۰/۱mbar این داده ها با استفاده از مدل دولایه ای هال و با حذف کردن اثرات ناشی از شکل گیری لایه تبهگن در فصل مشترک اصلاح شده اند.

۲- خواص ترابری الکتریکی در ساختارهای ناهمگون (دو بعدی) ZnO

در این فصل خواص ترابری الکتریکی ساختارهای ناهمگون ZnMgO/ZnO و ZnMnO/ZnO مورد بررسی قرار گرفتند. مطالعه داده های تجربی تحرک الکترونی وابسته به دما نشان می دهد که تحرک الکترونی برای ساختار ZnMnO/ZnO در دمای اتاق $120 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ و در دمای 10 K در حدود $387 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ می باشد که در مقایسه با مقادیر تحرک الکترونی برای ساختار ZnMgO/ZnO که در دمای اتاق برابر $250 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ و در دمای 4 K برابر $2750 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ می باشد کوچک است. با توجه به

تحلیل داده های وابسته به رفتار دمایی تحرک حاملی علت کاهش تحرک الکترونی در ساختار ZnMnO/ZnO را می توان به افزایش تراکم دررفتگی ها نسبت داد که مقدار آن در حدود یک مرتبه بزرگی بزرگتر از مقدار آن در ساختار ZnMgO/ZnO می باشد. همچنین یکی دیگر از پارامترهای موثر بر کاهش تحرک الکترونی تراکم ناخالصی در چاه پتانسیل است که مقدار آن در ساختار ZnMnO/ZnO در حدود ۲ برابر بزرگتر از مقدار آن در ساختار ZnMgO/ZnO می باشد. همچنین مقدار سرعت فونون های آکوستیکی عرضی و طولی به ترتیب برابر با $3/5 \times 10^3$ و $6/4 \times 10^3$ (m/s) محاسبه شده است. لازم به ذکر است که مقدار ثابت پیزوالکتریک ZnO (h_{14}) به عنوان پارامتر برازشی در هر دو نمونه برابر با $7/7 \times 10^9$ (V/m) محاسبه شده است.

۳- بررسی خواص الکتریکی ترانزیستورهای اثر میدانی ZnO

۱-۳ ترانزیستورهای اثر میدانی - کانال بلند

الف) بررسی مشخصه جریان - ولتاژ در ترانزیستور لایه نازک ZnO

در این بخش به مدلسازی نظری داده های تجربی $I_{DS} - V_{DS}$ گزارش شده توسط هافمن با استفاده از مدل غیر ایده آل مبتنی بر وابستگی تحرک حامل ها در کانال به ولتاژ دروازه پرداخته شده است. با استفاده از منحنی برازشی چند جمله ای و مدل غیر ایده آل هافمن داده های تجربی جریان - ولتاژ مربوط به ترانزیستور لایه نازک ZnO مورد تحلیل قرار گرفتند و ظرفیت دی الکتریک دروازه به عنوان پارامتر برازشی بدست آمده است که با استفاده از این مقدار و ضخامت لایه SiO_2 ، ضریب گذردهی الکتریکی لایه دی الکتریک برابر با مقدار $3/9$ بدست می آید که با مقدار گزارش شده برای آن کاملا توافق دارد. لازم به ذکر است که شکل ۵ - ۴ و ۵ - ۶ به ترتیب کارایی مدل بیان شده را برای تحلیل داده های جریان - ولتاژ و ارزیابی تحرک میانگین کانال را نشان می دهد. بنابراین

می توان نتیجه گرفت که با بکار بردن این مدل می توان مشخصه جریان - ولتاژ قطعات TFT مربوط به ZnO را تحلیل کرده و تحرک کانال را نیز ارزیابی کرد.

ب) اثرگذشت زمان

در این بخش با استفاده از مدل غیر ایده آل، به بررسی نظری داده های تجربی جریان - ولتاژ گزارش شده توسط کیم و همکاران پرداخته شده است. اندازه گیری های جریان - ولتاژ بر روی نمونه به دو صورت انجام گرفته است :

۱- برای حالت تازه آماده شده

۲- برای حالتی که ۲۵ روز از ساخت قطعه گذشته است

لازم به ذکر است که در طی مدت یاد شده قطعه در خشکانه خلا در فشار ۱ Torr در تاریکی نگهداری شده است. اندازه گیری جریان - ولتاژ ترانزیستور لایه نازک ZnO با ساختار دروازه پایین در شرایط عادی نشان می دهد که پس از گذشت زمان کانال قطعه (ZnO) در اثر جذب مولکول های بخشنده هوا رساناتر شده است که نشان از جابجایی ولتاژ روشن قطعه می دهد. نتایج محاسبات ما حاکی از آن است که این کمیت در نمونه مورد بررسی از $2/37$ - به $38/47$ - تغییر موضع داده است. لازم به ذکر است که مقدار ظرفیت لایه دی الکتریک دروازه به عنوان پارامتر برازشی برابر با $1/726 \times 10^{-8}$ (F/cm²) بدست آمده است.

ج) افزایش کارایی ترانزیستور لایه نازک بکار بردن دی الکتریک دروازه چند لایه ای

در این بخش خواص الکتریکی وابسته به ترانزیستور های لایه نازک ZnO با دی الکتریک های متفاوت یکی تنها با SiO₂ به نام (SiO₂/ZnO - TFT) و دیگری مرکب از سه لایه SiO₂/Ta₂O₅/SiO₂ (STS) به نام (STS / ZnO - TFT) مورد بررسی قرار گرفتند. در این مطالعه دریافتیم که با به کار بردن دی الکتریک دروازه چند لایه ای (STS) به جای دی الکتریک تک لایه ای (SiO₂) می توان

خصوصیات الکتریکی ترانزیستور لایه نازک اکسید روی نظیر جریان دررو و تحرک میانگین کانال را افزایش داد که این افزایش به بالاتر بودن ظرفیت دی الکتریک دروازه چند لایه ای و ضریب گذردهی الکتریکی و همچنین به بهبود یافتن مرفولوژی آن نسبت به دی الکتریک تک لایه ای نسبت داده می شود. علت این امر آن است که استفاده از دی الکتریک چند لایه ای باعث کاهش تله های بار در فصل مشترک دی الکتریک و کانال می شود و از کاهش تحرک کانال جلوگیری می کند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که شرایط سطح دی الکتریک دروازه (مرفولوژی لایه دی الکتریک) یکی از مهمترین پارامترهای تاثیر گذار بر عملکرد ترانزیستور لایه نازک می باشد.

۲-۳ ترانزیستورهای اثر - میدانی کانال کوتاه

مشخصه جریان - ولتاژ ترانزیستور نانوسیم ZnO

در این بخش به بررسی و تحلیل داده های تجربی $I_{DS} - V_{DS}$ مربوط به ترانزیستور اثر میدانی تهیه شده از نانوسیم ZnO پرداخته شده است. قطعات ساخته شده به روش ترابری فاز بخار بر روی دو نوع زیرلایه یکی برروی sapphire و دیگری برروی لایه ای از جنس ZnO با استفاده از نانوسیم ZnO (به عنوان کانال قطعه) به طول ۳ تا ۴ میکرومتر و قطر (عرض کانال) ۱۱۲ nm و ۸۵ nm (به ترتیب) رشد یافته اند. محاسبات نظری نشان می دهد که با کاهش طول کانال آثار کانال کوتاه غالب شده و تحت تاثیر یک پتانسیل کوچکتر میدان طولی ایجاد شده منجر به وقوع سرعت اشباع حامل های الکترونی در کانال می گردد. این تغییر می تواند سبب جابجا شدن ولتاژ روشن قطعه شود. برای استفاده از مدل هافمن برای برازش هر چه مناسبتر نظریه بکارگرفته شده در داده های تجربی $I_{DS} - V_{GS}$ برای ترانزیستورهای اثر میدانی نانوسیم ZnO با کانال کوتاه ولتاژ روشن قطعه را به عنوان پارامتر برازشی در نظر گرفته ایم. در یافتیم که تغییر ولتاژ روشن برای نمونه رشد یافته برروی زیرلایه ZnO که در مد افزایشی عمل می کند بیشتر از نمونه رشد یافته برروی زیرلایه sapphire که در مد تهی عمل می کند می باشد. لازم به ذکر است که تحرک میانگین کانال نمونه رشد یافته برروی

زیرلایه ZnO بالاتر از تحرک میانگین نمونه رشد یافته بر روی زیرلایه sapphire می باشد که علت آن به ناهمسانی شبکه ای کمتر و در نتیجه به مقدار تراکم تله های بار در فصل مشترک کانال و لایه دی الکتریک نسبت داده می شود.

مراجع

- [1]Chennupati jagadish, Stephen Pearton, (2006), "**Zinc Oxide Bulk, Thin Films and Nanostructures**", Elsevier.
- [۲]اس. ام. زی، ۱۹۸۵، " فیزیک و تکنولوژی قطعات نیمرسانا ". ترجمه غلامحسین سدید عابدی، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، مشهد.
- [3]D.C. Look, (2001), **Matter. Sci. Eng. B**, **80**, 383.
- [4]D.C. Look, D.C. Reynolds, R.L. Jones, C.W. Litton, G. Cantwell, W.C. Harsch, (1998), **Solid State Communication**, **105**, 339.
- [5]J.D. Albrecht, P.P. Ruden, S. Limpijumnong, W.R.L. Lambrecht, K.F. Brennan, (1999), **J. Appl. Phys.**, **86**, 6864.
- [6]S.J. Pearton, D.P. Norton, Y.W. Heo, L.C. Tien, M.P. Ivill, Y. Li, B.S. Kang, F. Ren, J. Kelly, and A.F. Hebard, (2006), **J. Electronic Materials**, **35**.
- [7]V.A.Coleman, C.Jagadish, (2006), "**Zinc Oxide Bulk, Thin Films and nanostructures**", Elsevier.
- [8]H. Karzel, W. Potzel, M. Kofferlein, W. Schiessl, M. Steiner, V. Hiller, G.M. Kalvius, D.W. Mitchell, T.P. Das, P. Blaha, K. Schwarz and M.P. Pasternak (1996) **Phys. Rev. B, Condensed Matter**, **53**, 11425.
- [9]T. Kogure, Y. Bando, (1993), **J. Electron. Microsc.**, **47**, 7903.
- [10]A.B. M.A.Ashrafi, A.Ueta, A. Avramescu, H. Kumano, I. Suemuene, Y.W. Ok, T.Y. Seong, (2000), **Appl. Phys. Lett.**, **76**, 550.
- [11]S.K. Kim, S.Y. Seong, C.R. Cho, (2003), **Appl. Phys. Lett.**, **82**, 562.
- [12]C.H. Bates, W.B. White, R. Roy, (1962), **Science**, **137**, 993.
- [13] J.E. Jaffe, J.A. Snyder, Z. Lin, A.C. Hess, (2000), **Phys. Rev. B**, **62**, 1660.
- [14]T. Makino, Y. Segawa, M. Kawasaki, A. Ohtomo, R. Shiroki, K. Tamura, T. Yasuda, H. Kionuma, (2001), **Appl. Phys. Lett.**, **78(9)**, 1237.
- [15]K. Ogata, K. Koike, T. Tanite, T. Komuro, F. Yan, S. Sasa, M. Inoue, M.Yano, (2003), **J. Crystal Growth**, **251**, 623.
- [16]T. Makino, C.H. Chia, N.T. Tuan, H.D. Sun, Y. Segawa, M. Kawasaki, A. Ohtomo, K. Tamura, H. Koinuma, (2000), **Appl. Phys. Lett.**, **77**, 975.
- [17]D.C. Look, J.W. Hemskey, J.R. Sizelove, (1999), **Physical Review Letter**, **82** 2552.

- [18]Yeon Sik Jung, Oleg V.Kononenko, Won-Kook Choi, (2006), **Solid State Communication**, **137**, 474.
- [19]Detlev M. Hofmann, Albrecht Hofstaetter, Frank Leiter, Huijuan Zhou, Frank Henecker, Bruno K. Meyer, Sergei B. Orlinskii, Jan Schmidt, (2002) , **Physical Review Letter**, **88**, 045504.
- [20]F. Tuomisto, V. Ranki, K. Saarinen, D.C. Look, (2003), **Physical Review Letter**, **91**, 205501.
- [21]A.Tsukazaki, K. Ohtomo, T. Onuma, M. Ohtani, T. Makino, M. Smiya, K.Ohtani, S.F. Chichibu, S. Fuke, Y. Segawa, H. Ohno, K. Koinuma, M. Kawasaki, (2005), **Nat. Matter**, **4**, 42.
- [22]D.C. Look, G.M. Renlund, R.H. Burgener, J.R. Sizelove, (2004), **Appl. Phys. Lett.**, **85**, 5269.
- [23] M. Brandt, H. V. Wenckstern, G. Benndorf, H. Hochmuth, M. Lorenz, M. Grundmann, (2009), **Thin Solid Films**, **518**, 1048.
- [24]T. Edahiro, N. Fujimura, T. Ito, (2002), **J. Appl. Phys.**, **93**, 10.
- [25]R. L. Hoffman, (2005), **Solid State Electron.**, **49**, 648
- [26]"New Small-scale Generator Produces Alternating Current By Stretching Zinc Oxide Wires", (2008), **Science Daily**, November 10,.
- [27]L. Liao, J.C. Li, D.F. Wang, C. Liu, C.S. Liu, Q. Fu, L.X. Fan, (2005), **Nanotech**, **16**, 985.
- [28]Y. Xia, P. Yang, Y. Sun, Y. Wu, B. Mayers, B. Gates, Y. Yin, F. Kim, H.Yan, (2003), **Adv. Matter.**, **15**, 353.
- [29] J.G.E. Gardeniers, Z.M. Rittersma, G.J. Burger, (1998), **J. Appl. Phys.**, **83**, 7844.
- [30]D.P. Norton,S.J. Pearton, A.F. Hebard, N. Theodoropoulou, L.A. Boatner, R.G. Wilson, (2003), **Appl. Phys. Lett.**, **82**, 239.
- [31]D.C.Look, (1998), "Electrical characterization of GaAs Material and devices", **John Wiley, New York**.
- [32]C.A. Steidel, (1983), "Assembly Techniques and packing", in S.M.Sze, Ed., **VLSI Technology, McGraw – Hill**, New York.
- [33]D. Rice, (1979), "Isoplaner – S Scales Down for new heights in performance Electronics", **52**, 137.
- [34]D.A. Anderson, N. Aspley, (1986), **Semicond. Sci. Technol.**, **1**, 187.
- [35]D.L. Rode, (1975), **Semiconductors and Semimetals**, **10**, 1.

- [36]E. Furno, F. Bertazzi, M. Goano, G. Ghione, E. Bellotti, (2008), **Solid State Electronics**, **52**, 1796 – 1801.
- [37]H. Ehrenreich, (1995), **J. Phys. Chem. Solids**, **8**, 130.
- [38]H. Brooks, (1951), **Phys. Rev.**, **83**, 879
- [39]C. Herring, unpublished results; referred by: H.Tang, W. Kim, A. Botchkarev, G. Popovici, F. Hamdani, H. Morkoc, (1998), **Solid State Electronics**, **42**, 839.
- [40]B. Podor, (1966), **Phys. Status Solidi**, **16**, K167.
- [41]J.Y. Seto, (1975), **J.Appl. Phys.**, **46**, 5247.
- [42]H. Tang, W. Kim, A. Botchkarev, G. Popovici, F. Hamdani, H. Morkoc, (1998), **Solid State Electronics**, **42**, 839.
- [43]P. Kwizera, A. K. Mabatah, M. S. Dresselhaus, and D. Adler, (1981), **Phys. Rev. B**, **24**, 2972.
- [44]N. F. Mott, (1969), **Philos. Mag.**, **19**, 835.
- [45]D.C. Look, R.J. Molnar, (1997), **Appl. Phys. Lett.**, **70**, 377.
- [46]J. Singh, (1985), "Semiconductor Optoelectronic", McGraw-Hill, Inc.
- [47]P.K. Basu, B.R. Nag, (1980), **Phys. Rev. B**, **22**, 4849.
- [48]K. Lee, M.S. Shur, T.J. Drummond, H. Morkoç, (1983), **J. Appl. Phys.**, **54**, 6432.
- [49]P.J. Price, (1981), **Ann. Phys.**, NY **133**, 217.
- [50]B.K. Ridley, (1982), **J. Phys. C**, **15**, 5899.
- [51]P.J. Price, (1981), **J. Vac. Sci. Technol.**, **19**, 599.
- [52]K. Hess, (1979), **Appl. Phys. Lett.**, **35**, 484.
- [53]S. Das Sarma, F. Stern, (1985), **Phys. Rev. B**, **32**, 8442.
- [54]J.H. Davies, (1998) "The Physics of Low Dimensional Semiconductors", Cambridge University Press.
- [55]Hadis Morkoc and Umit Oagur, (2009), "Zinc Oxide Fundamentals, Materials and Device Technology", WILEY-VCH.
- [56]R. Ahuja, L. Fast, O. Eriksson, J.M. Wills, B. Johnson, (1998), **J. Appl. Phys.**, **83**, 8065.
- [57]R.L. Hoffman, (2006), "Zinc Oxide Bulk, Thin Films and Nanostructures", Elsevier.
- [58]Cherie R. Kagan and Paul Andry, (2003), eds. "Thin-Film Transistors", Marcel Dekker, New York.

- [59]J. Torkel Wallmark and Harwick Johnson, (1996), eds. “**Field-Effect Transistors: Physics, Technology, and Applications**”, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- [60]David W. Greve, (1998), “**Field Effect Devices and Applications: Devices for Portable, Low- Power, and Imaging Systems**”, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- [61]J.F. Wager, (2004), “**Zinc oxide a material for micro and optoelectronic applications**”, NATO Science Series, ISO Press.
- [62]R. L. Hoffman, (2004), **J. Appl. Phys.**, **95**, 5813.
- [63]DieterK. Schroder, (1998), “**Semiconductor Material and Device Characterization**” 2nd ed, Wiley, New York.
- [64]F.D. Agostino, D. Quercia, (2000), **EECS**, **467**.
- [65]S. Sakamoto, T. Oshio, A. Ashida, T. Yoshimura, N. Fujimura, (2008), **Applied Surface Science**, **254**, 6248.
- [66]O. Pagni, N.N. Somhlahlo, C. Weichsel, A.W.R. Leitch, (2006), **Physica B**, **376-377**, 749.
- [67]F. Vigue, P.Vennegues, C. Deparis, S. Vezian, M. Laugt, J.P. Faurie, (2001) **Jpn. J. Appl. Phys.**, **90**, 5115.
- [68]M. Brandt, H. Von. Wenckstern, H. Schmidt, A. Rahm, G. Benndorf, Holger Hochmuth , Micheal Lorenz , Christoph Meinecke , Tilman Butz , M. Grundmann , (2008) , **J. Appl. Phys.**, **104**, 013708.
- [69]J. Sann, J. Stehr, A. Hofstaetter, D.M. Hofmann, A. Neumann, M. Lerch, U. Haboek, A. Hofmann, C. Thomsen, (2007), **Phys. Rev. B**, **76**, 195203.
- [70]P.Wagner and R.Helbig,(1974) **J. Phys. Chem. Solids**, **35**, 327.
- [71]E. Ziegler, A. Heinrich, H. Oppermann, G. Stover, (1981) **Phys. Status. Solidi A**, **66**, 635.
- [72] S.J. Pearton, D.P. Norton, K. Ip, Y.W.Heo, T. Steiner, (2005), **Prog. Mater. Sci.**, **50**, 293.
- [73]H. Tampo, K. Matsubara, A. Yamada, H. Shibata, P. Fons, M.Yamagata, H. Kanie, S. Niki, (2007), **J.Crystal Growth**, **301 – 302** , 358.
- [74]R.C. Whited, C.J. Flaten, W.C. Walker, (1973) **Solid State Communication**, **13**, 1903.
- [75]K. Hummer, (1973) **Phys. Status. Solidi**, **56**, 249.

- [76]R.N. Iskenderov, I.A.Drabkin, L.T.Emel'yanovaand, Ya.M. Ksendzov, (1969), **Sou. Phys. Solid State**, **10**, 2031.
- [77]D.R. Huffman, R.L. Wild and J. Shinmei, (1969), **Chem. Phys.**, **50**, 4092.
- [78]J. Robertson, (2004), **Eur. Phys. J. Appl. Phys.**, **28**, 265.
- [79]Ki – taе Kim, Kimoon Lee, Min Suk Oh, C.H. Park, Seongil Im., (2009) , **Thin Solid Films**, **517**, 6345.
- [80]G. Kresse, Olga Dulub, Ulrike Diebold, (2003) **Phys. Rev. B**, **68**, 245409.
- [81]A.Wander, N.M.Harrison, (2001), **J. Chem. Phys.**, **115**, 2312.
- [82]V.E. Henrich, P.A.Cox, (1994), "The surface science of the metal oxide", **Cambridge University Press**.
- [83]L. Zhang, J. Li, X.W. Zhang, X.Y. Jiang, Z.L. Zhang,(2010), **Thin Solid Films**, **518**, 6130.
- [84]W. – K. Hong, Sunghoon Song, Dae – Kue Hwang, Soon – Shin Kwon, Gunho Jo, Seong – Ju Park, Takhee Lee, (2008), **Applied Surface Science**, **254**, 7559.
- [85]W.-K. Hong, B.-J. Kim, T.-W. Kim, G. Jo, S. Song, S.-S. Kwon, A. Yoon, E.A. Stach, T. Lee, (2008), **Colloids Surf. A**, **378**, 313.

Abstract

Zinc oxide (ZnO), with a combination of II-VI elements, considered as a direct wide band gap (3.37 eV) semiconductor. This feature is very important not only in electronic device, like field effect transistors, but also in optoelectronic devices, such as light emitting diodes, blue and purple diode lasers and light detectors, as well. Using this material in these devices it is required to prepare the grown material in single crystalline condition, which is still an issue in the international community.

Here in this thesis, we have first tried to explain theoretically the reported experimental data related to electrical transport properties of bulk pure and doped (ZnO:P) grown samples by various methods. Moreover, we have also tried to analyze the reported experimental data related to electrical transport properties in ZnMnO/ZnO and ZnMgO/ZnO heterostructures. In this section we have explored the reasons behind the electrical properties of the two dimensional electron gas (2DEG) formed in these nano-structures. It is notable that the former structure due to its low magnesium content, behaving as dilute magnetic semiconductor, is useful in both the electronic and magnetic applications, and the latter structure considering its high electron mobility is useful in High Mobility Electron Transistors (HMTs). Finally, we have investigated the electrical properties (the I-V characteristics) of thin film and nanowire ZnO field effect transistors. In this study the effect of mono-layer and multi-layer dielectrics and also the thickness of the gate dielectric are investigated. In this investigation, depending on the geometrical dimensions of the conducting channel, long and short channel effects are considered.

Keywords: ZnO, semiconductor, electrical transport properties, bulk, hetero-structure, field effect transistor, long channel, short channel.



Shahrood University of Technology

Faculty of physics

Master of Science Thesis

**A theoretical investigation on electrical transport
properties of ZnO layers and nanostructure devices**

Mohammad Amirabbasi

Supervisor: Dr. Hosein Eshghi

2012