

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده فیزیک

گروه: نانوفیزیک

سنتز و مشخصه‌یابی نانوساختارهای ZnO برای کاربرد در سلول‌های خورشیدی

نگارنده: ساعد علی‌پور

اساتید راهنما:

دکتر مرتضی ایزدی فرد

دکتر محمد ابراهیم قاضی

بهمن ماه ۱۳۹۸

تقدیم به

پدر و مادر عزیزتر از جانم که بیش از ۳۰ سال از زندگی خود را به تعلیم و تربیت پرداخته اند و موی ایشان سفید شد تا روسفید شوم و با

مهربانی های خود الفبای زندگی را به من آموختند.

سپاس

سکرتاریان نثار ایزدمنان که توفیق رارفتق راه ام ساخت تا این پایان نامه را به سرانجام برسانم. به مصداق ﴿من لم یسکر المخلوق لم یسکر الخالق﴾ از استادید فاضل و اندیشمند آقایان دکتر مرتضی ایزدی فرد و دکتر محمد ابراهیم قاضی که در این پایان نامه چراغ راه من بوده اند و بار اهنایی خود مرا یاری کردند کمال سپاس را دارم. همچنین از استادید محترم دانشکده آقایان دکتر بهراتی زاده، دکتر حسامی و دکتر انصاری را که فرصت حضور در کلاس درس این استاتید را داشتم شکر فراوان دارم. از مسئولین محترم آزمایشگاه فیزیک مهندس عسکری و شهیدی که از بچگونه لگی در محیط آزمایشگاه دریغ نکرده و با رفتارهای صمیمانه خود محیط مناسبی برای انجام فعالیت های آزمایشگاهی را برای دانشجویان فراهم کرده اند کمال قدردانی را دارم. در آخر از تمام دوستان حاضر در آزمایشگاه که بی هیچ منت مراد این پایان نامه یاری کردند سپاسگزارم.

ساعده علی پور

بهمن ۱۳۹۸

تعمیرنامه

اینجانب **ساعده علی پور** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **نانوفیزیک** دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه **سنترز و مشخصه‌یابی نانوساختارهای ZnO برای کاربرد در سلول‌های خورشیدی** تحت راهنمایی **استادید محترم دکتر مرتضی ایزدی فرد و دکتر محمد ابراهیم قاضی** متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه 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 پایان‌نامه 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 می‌باشد 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 پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، 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: ۱۳۹۸/۱۱/۸

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 می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

نیمرساناهای اکسید فلزی نانوساختار مانند اکسید روی گروهی از ترکیبات نسبتاً ارزان برای کاربردهای فتوولتایی محسوب می‌شوند که می‌توانند برای پاسخگویی به تقاضاهای گسترده مورد استفاده قرار گیرند. در این پایان نامه نانومیله‌های اکسید روی به روش رسوب گذاری حمام شیمیایی، که قابل کاربرد در سلول خورشیدی می‌باشند، سنتز شدند. با تغییر پارامترهای لایه‌نشانی مانند pH (۱۱ و ۵/۵)، مدت زمان لایه‌نشانی (۳ و ۵ ساعت) و نوع زیرلایه (شیشه و FTO) نانوساختارهای اکسید روی مورد مطالعه آماده شدند. سپس خواص ساختاری، مورفولوژی، خواص اپتیکی و الکتریکی نمونه‌ها بررسی شدند. بررسی الگوهای XRD نشان داد که تمامی نمونه‌ها دارای ساختار ورتسایت اکسید روی با راستای ترجیحی (۲۰۰) می‌باشند. بررسی تصاویر FESEM از سطح و مقطع نمونه‌ها نشان داد که با افزایش pH و مدت زمان لایه‌نشانی قطر و طول متوسط نانومیله‌ها افزایش می‌یابد. بررسی خواص اپتیکی نمونه‌ها نشان داد که با افزایش pH گاف نواری نمونه‌های انباشت شده روی زیرلایه شیشه‌ای افزایش و روی زیرلایه‌های FTO کاهش می‌یابد. اندازه‌گیری‌های اثر هال رسانندگی نوع n را برای تمامی نمونه‌ها اثبات کرد. همچنین با افزایش pH و مدت زمان لایه‌نشانی غلظت حامل‌ها در نمونه با زیرلایه‌های شیشه‌ای کاهش و تحرک حامل‌ها افزایش یافت. اندازه‌گیری پاسخ نوری نمونه نشان داد که پاسخ نوری با افزایش pH برای نمونه‌های با زیرلایه شیشه‌ای کاهش و با زیرلایه‌های FTO افزایش می‌یابد. همچنین افزایش مدت زمان لایه‌نشانی پاسخ نوری نمونه‌های با زیرلایه شیشه‌ای را افزایش و با زیرلایه‌های FTO را کاهش داد. برای بررسی خواص فتوولتایی، نانومیله‌های اکسید روی (با زیرلایه‌های FTO) با یک لایه از کادمیوم تلوراید به روش کندوپاش پوشش داده شدند. بررسی الگوهای XRD نمونه‌ها نشان داد که نمونه‌ها دارای ساختار ورتسایت اکسید روی و ساختار مکعبی کادمیوم تلوراید هستند. بررسی تصاویر FESEM از سطح و مقطع نمونه نشان داد که لایه کادمیوم تلوراید سطح نانومیله‌ها را پوشانده است. بررسی خواص اپتیکی نمونه‌ها نشان داد که شرایط رشد لایه اکسید روی بر گاف نواری ساختار

ZnO/CdTe تاثیر گذار است. نتایج آنالیز جریان-ولتاژ نمونه نشان داد که ساختار با لایه اکسید روی رشد داده شده در $\text{pH}=5/5$ و مدت زمان رشد ۳ ساعت دارای پاسخ نوری بالاتری است، لذا این نمونه کاندیدای مناسبتری برای کاربرد به عنوان سلول خورشیدی می باشد.

کلمات کلیدی: نانومیله اکسید روی، کادمیوم تلوراید، نانوساختارها، رسوب گذاری حمام شیمیایی، کندوپاش،

سلول خورشیدی

فهرست مطالب

فصل اول:	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۳-۱ اکسید روی (ZnO)	۳
۴-۱ کادمیوم تلوراید (CdTe)	۵
فصل دوم:	۷
۱-۲ مقدمه	۸
۲-۲ طیف سنج پراش پرتو ایکس (XRD)	۸
۳-۲ میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان (FESEM)	۱۰
۴-۲ طیف سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس (EDS)	۱۲
۵-۲ طیف سنج مرئی-فرابنفش (UV-Visible)	۱۳
۱-۵-۲ محاسبه ضریب جذب (α)	۱۴
۲-۵-۲ محاسبه گاف نواری (E_g)	۱۴
۶-۲ طیف سنجی رامان	۱۵
۷-۲ آزمایش اثر هال	۱۷
۸-۲ مشخصه یابی جریان-ولتاژ (I-V)	۱۸
فصل سوم:	۱۹
۱-۳ رسانندگی الکتریکی و خصوصیات نوری لایه نازک نانوساختار اکسید روی	۲۰
۲-۳ رشد نانومیله‌های ZnO به روش سل-ژل و بررسی خواص ساختاری و نوری آنها	۲۲

۲۲	۱-۲-۳ آماده سازی محلول بذر و فرآیند لایه‌نشانی بذر ZnO
۲۳	۲-۲-۳ فرآیند رشد نانومیله ZnO
۲۶	۳-۳ رسوب گذاری حمام شیمیایی نانومیله‌های ZnO
۲۹	۴-۳ رشد آرایه‌های منظم نانومیله ZnO در دمای پایین به روش رسوب گذاری حمام شیمیایی تحت شرایط کنترلی
۳۳	۵-۳ ساخت سلول خورشیدی هسته-پوسته‌های ZnO/CdTe
۳۴	۱-۵-۳ رشد نانوسیم‌های ZnO
۳۴	۲-۵-۳ تهیه هسته-پوسته ZnO/CdTe نانوسیم‌های ZnO
۳۵	۴-۵-۳ خواص ساختاری
۳۶	۵-۵-۳ ریخت‌شناسی نمونه‌ها
۳۸	۶-۵-۳ خواص اپتیکی
۴۱	فصل چهارم :
۴۲	۱-۴ بخش اول: روش‌های رشد
۴۲	۱-۱-۴ مقدمه
۴۳	۲-۱-۴ پوشش‌دهی به روش سل-ژل (sol-gel)
۴۵	۳-۱-۴ پوشش‌دهی به روش رسوب گذاری حمام شیمیایی (CBD)
۴۶	۴-۱-۴ پوشش‌دهی به روش کندوپاش
۴۷	۲-۴ بخش دوم: روش‌های سنتز
۴۹	۱-۲-۴ نحوه رشد بذر ZnO
۴۹	۲-۲-۴ تهیه محلول لایه‌نشانی جهت رشد نانومیله‌های ZnO
۵۱	۵-۲-۴ تهیه لایه کامپوزیت ZnO/CdTe

فصل پنجم:	۵۳
۱-۵ مقدمه	۵۴
۲-۵ بررسی خواص ساختاری، مورفولوژی سطح، اپتیکی لایه اکسید روی بذر رشد داده شده به روش پوشش‌دهی چرخشی بر زیرلایه شیشه	۵۵
۱-۲-۵ الگوی پراش پرتو ایکس (XRD)	۵۵
۲-۲-۵ بررسی مورفولوژی	۵۶
۳-۲-۵ خواص اپتیکی	۵۷
۳-۵ بررسی خواص ساختاری، مورفولوژی، اپتیکی و الکتریکی نانومیله‌های اکسید روی رشد یافته بر بستر شیشه‌ای	۵۸
۱-۳-۵ مقایسه خواص فیزیکی دو نمونه‌های NB1 و NB2 (بررسی اثر pH محلول لایه‌نشانی)	۵۹
۱-۱-۳-۵ الگوی پراش پرتو ایکس (XRD)	۵۹
۲-۱-۳-۵ طیف سنجی رامان	۶۰
۳-۱-۳-۵ طیف سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس (EDS)	۶۱
۴-۱-۳-۵ بررسی مورفولوژی	۶۲
۵-۱-۳-۵ بررسی خواص اپتیکی	۶۴
۴-۱-۳-۵ بررسی خواص الکتریکی	۶۵
۲-۳-۵ خواص فیزیکی نمونه‌های NB2 و NB3 (بررسی اثر زمان لایه‌نشانی)	۶۷
۱-۲-۳-۵ طیف پراش پرتو ایکس (XRD)	۶۷
۲-۲-۳-۵ طیف سنجی رامان	۶۹
۳-۲-۳-۵ طیف سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس (EDS)	۷۰
۴-۲-۳-۵ بررسی مورفولوژی	۷۱

۷۳	۵-۳-۲-۵ بررسی خواص اپتیکی
۷۴	۵-۳-۲-۶ بررسی خواص الکتریکی
۷۴	۵-۴-۴ بررسی خواص ساختاری، مورفولوژی، اپتیکی و الکتریکی نانومیله‌های اکسید روی رشد یافته بر بستر FTO
۷۶	
۷۶	۵-۴-۱ مقایسه خواص فیزیکی دو نمونه Z1 و Z2 (بررسی اثر pH محلول لایه‌نشانی)
۷۶	۵-۴-۱-۱ طیف پراش پرتو ایکس (XRD)
۷۸	۵-۴-۱-۲ طیف سنجی رامان
۷۹	۵-۴-۱-۳ طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS)
۸۰	۵-۴-۱-۴ بررسی مورفولوژی
۸۱	۵-۴-۱-۵ بررسی خواص اپتیکی
۸۳	۵-۴-۱-۶ بررسی خواص الکتریکی
۸۴	۵-۴-۲ مقایسه خواص فیزیکی دو نمونه Z2 و Z3 (بررسی اثر زمان لایه‌نشانی)
۸۴	۵-۴-۲-۱ طیف پراش پرتو ایکس (XRD)
۸۶	۵-۴-۲-۲ طیفسنجی رامان
۸۷	۵-۴-۲-۳ طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS)
۸۸	۵-۴-۲-۴ بررسی مورفولوژی
۹۰	۵-۴-۲-۳ بررسی خواص اپتیکی
۹۱	۵-۴-۲-۴ بررسی خواص الکتریکی
۹۲	۵-۵ بررسی خواص ساختاری، مورفولوژی، اپتیکی و الکتریکی نانومیله‌های اکسید روی رشد یافته بر بسترهای شیشه‌ای و FTO
۹۲	۵-۵-۱ مقایسه خواص فیزیکی دو نمونه Z1 و NB1

- ۹۲.....(XRD) طیف پراش پرتو ایکس (XRD) ۱-۱-۵-۵
- ۹۴..... طیف سنجی رامان ۲-۱-۵-۵
- ۹۵.....(EDS) طیف سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس (EDS) ۳-۱-۵-۵
- ۹۶..... بررسی مورفولوژی ۴-۱-۵-۵
- ۹۸..... بررسی خواص اپتیکی ۵-۱-۵-۵
- ۹۹..... بررسی خواص الکتریکی ۶-۱-۵-۵
- ۱۰۰..... مقایسه خواص فیزیکی دو نمونه NB2 و Z2 ۲-۵-۵
- ۱۰۰.....(XRD) طیف پراش پرتو ایکس (XRD) ۱-۲-۵-۵
- ۱۰۲..... طیف سنجی رامان ۲-۲-۵-۵
- ۱۰۳..... بررسی مورفولوژی ۴-۲-۵-۵
- ۱۰۵.....(EDS) طیف سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس (EDS) ۳-۲-۵-۵
- ۱۰۶..... بررسی خواص اپتیکی ۳-۲-۵-۵
- ۱۰۷..... بررسی خواص الکتریکی ۴-۲-۵-۵
- ۱۰۸..... مقایسه خواص فیزیکی دو نمونه NB3 و Z3 ۳-۵-۵
- ۱۰۸.....(XRD) طیف پراش پرتو ایکس (XRD) ۱-۳-۵-۵
- ۱۱۰..... طیف سنجی رامان ۲-۳-۵-۵
- ۱۱۱.....(EDS) طیف سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس (EDS) ۳-۳-۵-۵
- ۱۱۲..... بررسی مورفولوژی ۴-۳-۵-۵
- ۱۱۴..... بررسی خواص اپتیکی ۵-۳-۵-۵
- ۱۱۵..... بررسی خواص الکتریکی ۶-۳-۵-۵

۶-۵	بررسی مورفولوژی و خواص ساختاری، اپتیکی و الکتریکی نانومیله‌های اکسید روی پوشش داده شده با کادمیوم تلوراید (FTO/ZnO/CdTe).....	۱۱۶
۱-۶-۵	مقدمه.....	۱۱۶
۲-۶-۵	مقایسه خواص فیزیکی دو نمونه FZ1 و FZ2 (بررسی اثر تغییر pH محلول لایه‌نشانی).....	۱۱۷
۱-۲-۶-۵	طیف پراش پرتو ایکس (XRD).....	۱۱۷
۲-۲-۶-۵	طیف سنجی رامان.....	۱۱۹
۴-۲-۶-۵	طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS).....	۱۲۰
۴-۲-۶-۵	بررسی مورفولوژی.....	۱۲۱
۳-۲-۶-۵	بررسی خواص اپتیکی.....	۱۲۳
۴-۲-۶-۵	بررسی خواص الکتریکی.....	۱۲۴
۳-۶-۵	مقایسه خواص فیزیکی دو نمونه FZ2 و FZ3 (بررسی اثر زمان لایه‌نشانی).....	۱۲۵
۱-۳-۶-۵	طیف پراش پرتو ایکس (XRD).....	۱۲۵
۲-۳-۶-۵	طیف سنجی رامان.....	۱۲۷
۳-۲-۶-۵	طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS).....	۱۲۸
۴-۲-۶-۵	بررسی مورفولوژی.....	۱۲۹
۶-۳-۶-۵	بررسی خواص اپتیکی.....	۱۳۱
۶-۲-۶-۵	بررسی خواص الکتریکی.....	۱۳۲
۷-۵	خواص فتوولتایی.....	۱۳۳
۸-۵	نتیجه‌گیری.....	۱۳۴
۹-۵	پیشنهادات جهت ادامه تحقیقات و مطالعات تکمیلی.....	۱۳۶
	منابع.....	۱۳۹

فهرست تصاویر

- شکل ۱-۱: (الف) ساختار ورتسایت (ب) ساختار بلند روی (ج) ساختار نمک ۴
- شکل ۱-۲: (الف) ساختار شش گوشه (ب) ساختار بلند روی کادمیوم تلوراید ۵
- شکل ۱-۲: نمایی از دستگاه XRD مدل PhilipsPw3040 مستقر در دانشگاه کاشان ۱۰
- شکل ۲-۲: (الف) طرح واره‌ای از اجزای یک دستگاه FESEM (ب) نمایی از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان مدل MIRA3 TESCAN واقع در پژوهشگاه بوعلی مشهد ۱۱
- شکل ۲-۶: نمایی از دستگاه طیف سنجی رامان مدل uRaman-532-Ci واقع در دانشگاه صنعتی شاهرود ۱۶
- شکل ۱-۳: الگوی پراش پرتو ایکس از لایه نازک نانوساختار ZnO ۲۱
- شکل ۲-۳: تصویر SEM لایه نازک نانوساختار ZnO در مقیاس ۳۰۰nm ۲۱
- شکل ۳-۳: طیف‌های عبور و بازتاب نوری لایه نازک نانوساختار ZnO ۲۴
- شکل ۳-۴: تصاویر SEM از نانومیله‌های ZnO آماده شده با حلال‌های مختلف: (الف) متانول، (ب) اتانول، (ج) ایزوپروپانول، (د) ۲-متوکسی اتانول ۲۴
- شکل ۳-۵: الگوهای پراش پرتو X از نانومیله‌های ZnO با رشد به روش گرم‌آبی: (الف) متانول، (ب) اتانول، (ج) ایزوپروپانول و (د) ۲-متوکسی اتانول ۲۵
- شکل ۳-۶: نمودار طیف عبور از نانومیله‌های ZnO رشد داده شده به روش گرم‌آبی ۲۶
- شکل ۳-۷: الگوهای پراش XRD نانومیله‌های ZnO تهیه شده با غلظت‌های متفاوت ۲۷
- شکل ۳-۸: تصاویر SEM از نانومیله‌های ZnO رشد داده شده در غلظت‌های متفاوت: (الف) ۰/۰۳ مولار، (ب) ۰/۰۵ مولار، (ج) ۰/۰۷ مولار ۲۸

- شکل ۳-۹: نمودار از طیف EDS نانومیله‌های ZnO ۲۹
- شکل ۳-۱۰: الگوی XRD از آرایه‌های نانومیله ZnO رشد داده شده ۳۰
- شکل ۳-۱۱: تصاویر SEM از نانومیله ZnO سنتز شده در غلظت‌های ماده اولیه مختلف: الف) ۱۲/۵ میلی‌مولار، ب) ۲۵ میلی‌مولار، ج) ۳۷/۵ میلی‌مولار، د) ۵۰ میلی‌مولار. دمای رشد و زمان به ترتیب C ۹۵° و ۵ ساعت بود ۳۱
- شکل ۳-۱۲: تصاویر SEM از آرایه‌های نانومیله ZnO رشد داده شده با زمان‌های رشد متفاوت: الف) ۳ ساعت، ب) ۵ ساعت، ج) ۶ ساعت، د) ۹ ساعت. غلظت ماده اولیه و دمای رشد به ترتیب ۲۵ میلی‌مولار و ۹۵°C بودند ۳۲
- شکل ۳-۱۳: طیف رامان نانومیله ZnO رشد داده شده ۳۳
- شکل ۳-۱۴: طیف‌های XRD نانوسیم‌های ZnO و ZnO تزئین شده با CdTe سنتز شده در زمان‌های متفاوت (۵، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه) ۳۴
- شکل ۳-۱۵: تصاویر FESEM، الف) آرایه‌های نانوسیم‌های ZnO و ب، ج، د، ه) نانوسیم‌های ZnO پوشش‌دهی شده با نانوذرات CdTe در زمان‌های مختلف به ترتیب ۵، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه ۳۷
- شکل ۳-۱۶: نمایی از طیف جذبی فرابنفش-مرئی از نانوسیم‌های ZnO و نانوسیم‌های ZnO پوشش داده شده با نانوذرات CdTe در زمان‌های پوشش‌دهی مختلف (۵، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه) ۳۸
- شکل ۳-۱۷: مشخصات ولتاژ-جریان دو سلول خورشیدی هسته-پوسته، نانوسیم‌های ZnO / CdSe / نانوذرات CdTe (۶۰ دقیقه) و نانوسیم‌های ZnO / نانوذرات CdTe (۶۰ دقیقه) ۳۹
- شکل ۴-۱: طرحواره‌ای از مراحل مختلف سل-ژل ۴۳
- شکل ۴-۲: طرحواره‌ای از فرآیند پوشش‌دهی چرخشی ۴۵
- شکل ۴-۳: شمایی از سیستم لایه‌نشانی کندوپاش ۴۷

- شکل ۴-۴: نمایی از محلول لایه‌نشانی بذر ZnO تهیه شده..... ۴۸
- شکل ۵-۴: دستگاه پوشش‌دهی چرخشی واقع در آزمایشگاه نانوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود..... ۴۹
- شکل ۶-۴: محلول نیترات روی و هگزامتیلن تترامین..... ۵۰
- شکل ۷-۴: نمایی از فرآیند پوشش‌دهی نانومیله‌های ZnO به روش رسوب گذاری حمام شیمیایی..... ۵۱
- شکل ۱-۵: طیف XRD لایه بذر اکسید روی رشد داده شده به روش لایه نشانی چرخشی..... ۵۵
- شکل ۲-۵: نمایی از تصاویر FESEM الف) دید از بالا ب) دید از پهلو از نانوذرات اکسید روی در مقیاس ۵۰۰ nm..... ۵۶
- شکل ۳-۵: نمایی از طیف‌های الف) عبور ب) جذب، لایه اکسید روی بذر..... ۵۷
- شکل ۴-۵: نمودار $h\nu - (\alpha h\nu)^2$ برای لایه اکسید روی بذر..... ۵۸
- شکل ۵-۵: الگوهای XRD نانومیله‌های اکسید روی سنتز شده در دو pH متفاوت (NB1 و NB2)..... ۵۹
- شکل ۶-۵: طیف‌های رامان نمونه‌های NB1 و NB2..... ۶۱
- شکل ۷-۵: طیف پراش انرژی پرتو ایکس برای الف) نمونه NB1 و ب) نمونه NB2..... ۶۲
- شکل ۸-۵: تصاویر FESEM الف) دید از بالا نمونه NB1 ب) دید از بالا نمونه NB2 ج) دید از پهلو نمونه NB1 د) دید از پهلو نمونه NB2 در مقیاس‌های ۵۰۰ nm و ۲ μm ۶۳
- شکل ۹-۵: تصاویر الف) طیف‌های عبور نمونه‌های NB1 و NB2 ب) طیف‌های جذب نمونه‌های NB1 و NB2..... ۶۴
- شکل ۱۰-۵: نمودارهای $h\nu - (\alpha h\nu)^2$ نمونه‌های NB1 و NB2..... ۶۵
- شکل ۱۱-۵: نمودار جریان-ولتاژ در شرایط تاریکی و روشنایی الف) نمونه NB1 ، ب) نمونه NB2..... ۶۶

- شکل ۵-۱۲: طیف‌های XRD نانومیله‌های اکسید روی رشد داده شده در مدت زمان لایه‌نشانی ۳ (NB2) و ۵ ساعت (NB3) ۶۸
- شکل ۵-۱۳: طیف‌های رامان نمونه‌های NB2 و NB3 ۶۹
- شکل ۵-۱۴: طیف پراش انرژی پرتو ایکس برای الف) نمونه NB2 و ب) نمونه NB3 ۷۰
- شکل ۵-۱۵: تصاویر FESEM الف) دید از بالا نمونه NB2 ب) دید از بالا نمونه NB3 ج) دید از پهلو نمونه NB2 د) دید از پهلو نمونه NB3 در مقیاس‌های ۵۰۰ nm و ۲ μm ۷۲
- شکل ۵-۱۶: تصاویر الف) طیف‌های عبور و ب) طیف‌های جذب نمونه‌های NB2 و NB3 ۷۳
- شکل ۵-۱۷: نمودارهای $hu - (\alpha hu)^2$ نمونه‌های NB2 و NB3 ۷۴
- شکل ۵-۱۸: نمودارهای جریان-ولتاژ الف) تاریکی و روشنایی برای نمونه NB2، ب) تاریکی و روشنایی برای نمونه NB3 ۷۵
- شکل ۵-۱۹: الگوهای XRD نانومیله‌های اکسید روی رشد داده شده در دو pH متفاوت الف) ۵/۵ (نمونه Z1) و ب) ۱۱ (نمونه Z2) ۷۷
- شکل ۵-۲۰: طیف‌های رامان مربوط به نمونه‌های Z1 و Z2 ۷۹
- شکل ۵-۲۱: طیف‌های پراش انرژی پرتو ایکس برای الف) نمونه Z1 و ب) نمونه Z2 ۷۹
- شکل ۵-۲۲: تصاویر FESEM الف) دید از بالا برای نمونه Z1 ب) دید از بالا برای نمونه Z2 ج) دید از پهلو برای نمونه Z1 د) دید از پهلو برای نمونه Z2 ۸۰
- شکل ۵-۲۳: تصاویر الف) طیف‌های عبور نمونه‌های Z1 و Z2 ب) طیف‌های جذب نمونه‌های Z1 و Z2 ۸۱
- شکل ۵-۲۴: نمودارهای $hu - (\alpha hu)^2$ برای نمونه‌های سنتز شده توسط محلول با pH مختلف ۵/۵ (نمونه Z1) و ۱۱ (نمونه Z2) ۸۲

- شکل ۵-۲۵: نمودار جریان-ولتاژ الف) تاریکی و روشنایی برای نمونه Z1 ، ب) تاریکی و روشنایی برای نمونه Z2
 ۸۴.....
- شکل ۵-۲۶: طیف‌های XRD نانومیله‌های اکسید روی رشد داده شده در دو مدت زمان رشد متفاوت الف) ۳ ساعت (نمونه Z2) و ب) ۵ ساعت (نمونه Z3).....
 ۸۶.....
- شکل ۵-۲۷: طیف‌های رامان مربوط به نمونه‌های Z2 و Z3.....
 ۸۷.....
- شکل ۵-۲۸: طیف پراش انرژی پرتو ایکس برای الف) نمونه Z2 و ب) نمونه Z3.....
 ۸۸.....
- شکل ۵-۲۹: تصاویر FESEM الف) دید از بالا برای نمونه Z2 ب) دید از بالا برای نمونه Z3 ج) دید از پهلو برای نمونه Z2 د) دید از پهلو برای نمونه Z3.....
 ۸۹.....
- شکل ۵-۳۰: تصاویر الف) طیف‌های عبور نمونه‌های Z2 و Z3 ب) طیف‌های جذب نمونه‌های Z2 و Z3.....
 ۹۰.....
- شکل ۵-۳۱: نمودارهای $h\nu - (\alpha h\nu)^2$ برای نمونه‌های سنتز شده در دو زمان لایه‌نشانی ۳ ساعت (نمونه Z2) و ۵ ساعت (نمونه Z3).....
 ۹۱.....
- شکل ۵-۳۲: نمودارهای جریان-ولتاژ الف) تاریکی و روشنایی برای نمونه Z2 ، ب) تاریکی و روشنایی برای نمونه Z3.....
 ۹۲.....
- شکل ۵-۳۳: الگوهای XRD نانومیله‌های اکسید روی رشد داده شده بر دو بستر متفاوت الف) شیشه‌ای و ب) FTO.....
 ۹۴.....
- شکل ۵-۳۴: طیف‌های رامان مربوط به نمونه‌های NB1 و Z1.....
 ۹۶.....
- شکل ۵-۳۵: طیف پراش انرژی پرتو ایکس برای الف) نمونه NB2 و ب) نمونه Z1.....
 ۹۶.....
- شکل ۵-۳۶: تصاویر FESEM الف) دید از بالا نمونه NB1 ب) دید از بالا نمونه Z1 ج) دید از پهلو نمونه NB1 د) دید از پهلو نمونه Z1.....
 ۹۸.....

- شکل ۳۷-۵: تصاویر الف) طیف‌های عبور نمونه‌های NB1 و Z1 (ب) طیف‌های جذب نمونه‌های NB1 و Z1.... ۹۹
- شکل ۳۸-۵: نمودارهای $hu - (\alpha hu)^2$ نمونه‌های NB1 و Z1..... ۹۹
- شکل ۳۹-۵: نمودار جریان-ولتاژ الف) تاریکی و روشنایی نمونه NB1، ب) تاریکی و روشنایی نمونه Z1..... ۱۰۰
- شکل ۴۰-۵: الگوهای XRD نمونه‌های NB2 و Z2..... ۱۰۱
- شکل ۴۱-۵: طیف‌های رامان مربوط به نمونه‌های NB2 و Z2..... ۱۰۳
- شکل ۴۲-۵: تصاویر FESEM الف) دید از بالا برای نمونه NB2 (ب) دید از بالا برای نمونه Z2 (ج) دید از پهلو برای نمونه NB2 (د) دید از پهلو برای نمونه Z2..... ۱۰۴
- شکل ۴۳-۵: طیف‌های پراش انرژی پرتو ایکس برای الف) نمونه NB2 و ب) نمونه Z2..... ۱۰۵
- شکل ۴۴-۵: تصاویر الف) طیف عبور نمونه‌های NB1 و Z2 (ب) طیف جذب نمونه‌های NB1 و Z2..... ۱۰۶
- شکل ۴۵-۵: نمودارهای $hu - (\alpha hu)^2$ نمونه‌های NB2 و Z2..... ۱۰۷
- شکل ۴۶-۵: نمودار جریان-ولتاژ الف) تاریکی و روشنایی برای نمونه NB2، ب) تاریکی و روشنایی برای نمونه Z2..... ۱۰۸
- شکل ۴۷-۵: الگوهای XRD نمونه‌های NB3 و Z3..... ۱۰۹
- شکل ۴۸-۵: طیف‌های رامان برای نمونه‌های NB3 و Z3..... ۱۱۱
- شکل ۴۹-۵: طیف پراش انرژی پرتو ایکس برای الف) نمونه NB3 و ب) نمونه Z3..... ۱۱۱
- شکل ۵۰-۵: تصاویر FESEM الف) دید از بالا نمونه NB3 (ب) دید از بالا نمونه Z3 (ج) دید از پهلو نمونه NB3 (د) دید از پهلو نمونه Z3..... ۱۱۳
- شکل ۵۱-۵: تصاویر الف) طیف عبور برای نمونه‌های NB3 و Z3 (ب) طیف جذب برای نمونه‌های NB3 و Z3..... ۱۱۴

- شکل ۵-۵۲: نمودارهای $hu - (\alpha hu)^2$ - hu نمونه‌های NB3 و Z3 ۱۱۵
- شکل ۵-۵۳: نمودار جریان-ولتاژ الف) تاریکی و روشنایی برای نمونه NB3 ، ب) تاریکی و روشنایی برای نمونه Z3 ۱۱۶
- شکل ۵-۵۴: الگوهای XRD نمونه‌های FZ1 و FZ2 نانومیله‌های پوشش یافته با CdTe سنتز شده با محلول لایه نشانی دارای pH های مختلف ۵/۵ و ۱۱ ۱۱۷
- شکل ۵-۵۵: طیف‌های رامان مربوط به نمونه‌های FZ1 و FZ2 ۱۱۹
- شکل ۵-۵۶: طیف‌های پراش انرژی پرتو ایکس برای نمونه‌های الف) FZ1 و ب) FZ2 ۱۲۱
- شکل ۵-۵۷: تصاویر FESEM الف) دید از بالا نمونه FZ1 ب) دید از بالا نمونه FZ2 ج) دید از پهلو نمونه FZ1 د) دید از پهلو نمونه FZ2 ۱۲۲
- شکل ۵-۵۸: طیف‌های الف) عبور و ب) جذب نمونه‌های FZ1 و FZ2 ۱۲۳
- شکل ۵-۵۹: نمودارهای $hu - (\alpha hu)^2$ برای نمونه‌های FZ1 و FZ2 ۱۲۴
- شکل ۵-۶۰: نمودارهای جریان-ولتاژ در شرایط الف) تاریکی و روشنایی برای نمونه FZ1 ، ب) تاریکی و روشنایی برای نمونه FZ2 ۱۲۵
- شکل ۵-۶۱: الگوهای XRD نمونه‌های FZ2 و FZ3 (نانومیله‌های پوشش داده با CdTe سنتز شده در دو زمان لایه‌نشانی ۳ و ۵ ساعت). ۱۲۶
- شکل ۵-۶۲: طیف‌های رامان مربوط به نمونه‌های FZ2 و FZ3 ۱۲۸
- شکل ۵-۶۳: طیف‌های پراش انرژی پرتو ایکس برای نمونه‌های الف) FZ2 و ب) FZ3 ۱۲۹
- شکل ۵-۶۴: تصاویر FESEM الف) دید از بالا نمونه FZ2 ب) دید از بالا نمونه FZ3 ج) دید از پهلو نمونه FZ2 د) دید از پهلو نمونه FZ3 ۱۳۰

- شکل ۵-۶۵: طیف‌های الف) عبور و ب) جذب نمونه‌های FZ2 و FZ3 ۱۳۲
- شکل ۵-۶۶: نمودارهای $h\nu - (\alpha h\nu)^2$ برای نمونه‌های FZ2 و FZ3 ۱۳۲
- شکل ۵-۶۷: نمودارهای جریان-ولتاژ در شرایط الف) تاریکی و روشنایی برای نمونه FZ2، ب) تاریکی و روشنایی برای نمونه FZ3 ۱۳۳
- شکل ۵-۶۸: تصاویر الف) سلول خورشیدی ZnO-CdTe تهیه شده و ب) طرح شماتیک سلول خورشیدی تهیه شده ۱۳۴

فهرست جداول

- جدول ۵-۱: مشخصات نمونه‌های تهیه شده در شرایط مختلف ۵۴
- جدول ۵-۲: نتایج بدست آمده از پراش پرتو X از لایه بذر ۵۶
- جدول ۵-۳: نتایج بدست آمده از تحلیل الگوهای XRD از نمونه‌های مورد مطالعه ۶۰
- جدول ۵-۴: نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های EDS برای دو نمونه NB1 و NB2 ۶۲
- جدول ۵-۵: پارامترهای الکتریکی اندازه‌گیری شده در آنالیز اثر هال و پاسخ نوری برای نمونه‌های NB1 و NB2 ۶۷
- جدول ۵-۶: نتایج بدست آمده با استفاده از الگوی XRD نمونه‌های مورد مطالعه ۶۹
- جدول ۵-۷: نتایج حاصل از طیف سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس برای دو نمونه NB1 و NB2 ۷۱
- جدول ۵-۸: پارامترهای الکتریکی اندازه‌گیری شده در آنالیز اثر هال و پاسخ نوری برای نمونه‌های NB2 و NB3 ۷۵
- جدول ۵-۹: پارامترهای ساختاری محاسبه شده با استفاده از الگوهای پراش نمونه‌های مورد مطالعه ۷۸
- جدول ۵-۱۰: درصد وزنی و اتمی موجود در نمونه‌های Z1 و Z2 استخراج شده از اندازه‌گیری‌های EDS ۷۹
- جدول ۵-۱۱: پارامترهای الکتریکی اندازه‌گیری شده در آنالیز اثر هال و پاسخ نوری برای نمونه‌های Z1 و Z2 ۸۵
- جدول ۵-۱۲: پارامترهای ساختاری محاسبه شده با استفاده از الگوی پراش نمونه‌های مورد مطالعه ۸۷
- جدول ۵-۱۳: درصد وزنی و اتمی عناصر موجود در نمونه‌های Z2 و Z3 استخراج شده از اندازه‌گیری‌های EDS ۸۹

- جدول ۵-۱۴: پاسخ نوری برای دو نمونه Z2 و Z3 ۹۱
- جدول ۵-۱۵: پارامترهای ساختاری محاسبه شده با استفاده از الگوهای پراش نمونه‌های مورد مطالعه ۹۵
- جدول ۵-۱۶: نتایج حاصل از طیف سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس برای دو نمونه NB1 و Z1 ۹۷
- جدول ۵-۱۷: پاسخ نوری برای دو نمونه NB1 و Z1 ۱۰۰
- جدول ۵-۱۸: پارامترهای ساختاری محاسبه شده با استفاده از الگوهای پراش نمونه‌های مورد مطالعه ۱۰۲
- جدول ۵-۱۹: نتایج حاصل از طیف سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس برای دو نمونه NB2 و Z2 ۱۰۵
- جدول ۵-۲۰: پاسخ نوری برای دو نمونه NB2 و Z2 ۱۰۸
- جدول ۵-۲۱: نتایج بدست آمده از تحلیل الگوهای XRD از نمونه‌های مورد مطالعه ۱۱۰
- جدول ۵-۲۲: نتایج حاصل از طیف سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس برای دو نمونه NB3 و Z3 ۱۱۲
- جدول ۵-۲۳: پاسخ نوری برای دو نمونه NB3 و Z3 ۱۱۶
- جدول ۵-۲۴: پارامترهای ساختاری محاسبه شده با استفاده از الگوهای XRD نمونه‌های FZ1 و FZ2 ۱۱۸
- جدول ۵-۲۵: نتایج حاصل از طیف سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس برای دو نمونه FZ1 و FZ2 ۱۲۰
- جدول ۵-۲۶: پاسخ نوری برای دو نمونه FZ1 و FZ2 ۱۲۵
- جدول ۵-۲۷: نتایج بدست آمده از پراش پرتو X از نمونه‌های مورد مطالعه ۱۲۷
- جدول ۵-۲۸: نتایج حاصل از طیف سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس برای دو نمونه FZ2 و FZ3 ۱۲۹
- جدول ۵-۲۹: پاسخ نوری برای دو نمونه FZ2 و FZ3 ۱۳۳

فصل اول:

کلیات

۱-۱ مقدمه

نانوفناوری با ساختارهای مختلف ماده که دارای ابعادی از مرتبه‌ی یک میلیاردم متر (10^{-9} m) هستند، سروکار دارد. نانوذره‌ها می‌توانند نسبت به هم به طور نامنظم قرار بگیرند. وقتی اندازه یا بعد یک ماده به طور پیوسته از یک اندازه‌ی بزرگ مثلا یک متر یا یک سانتی‌متر به اندازه‌ای خیلی کوچک کاهش می‌یابد، در ابتدا خواص ماده بی‌تغییر می‌ماند، سپس تغییرات کوچکی آغاز می‌شود تا سرانجام وقتی اندازه به کمتر از ۱۰۰ نانومتر می‌رسد تغییرات قابل توجهی در خواص ماده‌ها ظاهر می‌شود. اگر یکی از ابعاد ماده تا محدوده نانو کوچک شود و ابعاد دیگر بزرگ باقی بمانند ساختاری حاصل می‌شود که (چاه کوانتومی)^۱ نامیده می‌شود. با محدود کردن دو بعد ماده در ابعاد نانو به ساختار (سیم کوانتومی)^۲ می‌رسیم. حال اگر ابعاد ماده در سه بعد به ابعاد نانو برسند، در این وضعیت یک (نقطه کوانتومی)^۳ خواهیم داشت [۱]. لایه‌های نازک لایه‌هایی هستند که ضخامت آن‌ها کمتر از یک ماکرون می‌باشد. با توجه به نوع کاربرد لایه‌های نازک کیفیت ساخت آن‌ها می‌تواند متفاوت باشد. روش لایه‌نشانی، سرعت لایه‌نشانی، دمای زیرلایه، نوع خلاء، ساختار زیرلایه و تطابق آن با لایه از عواملی هستند که می‌توانند در کیفیت لایه‌های نازک تهیه شده موثر باشند [۲،۳]. نانو ذرات براساس موفولوژی، اندازه، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی طبقه بندی می‌شوند. برخی از نانوذرات شناخته شده بر اساس خصوصیات فیزیکی و شیمیایی عبارتند از نانوذرات مبتنی بر کربن، نانوذرات فلزی، نانوذرات سرامیکی، نانوذرات پلیمری و نانوذرات نیمرسانا. مواد نانو ساختار دارای نسبت سطح به حجم زیاد می‌باشند. [۴].

¹ Quantum Well

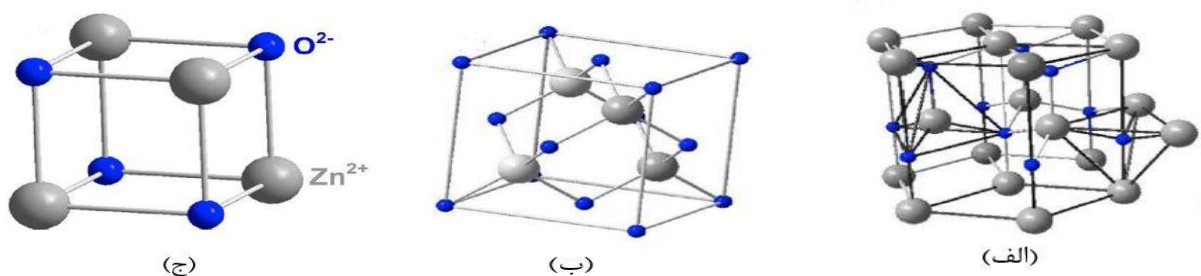
² Quantum Wire

³ Quantum dot

۱-۳ اکسید روی (ZnO)

اکسید روی (ZnO) ماده‌ای جامد و به صورت پودری سفید رنگ است که در آب حل نمی‌شود و دارای دمای ذوب 1975°C می‌باشد [۵]. ZnO یک ترکیب محبوب با ویژگی‌های جالب توجه است که به عنوان یکی از مهم‌ترین مواد در خانواده اکسیدهای فلزی محسوب می‌شود. با توجه به گاف نواری پهن آن در دمای اتاق (3.37 eV) و همچنین انرژی بستگی اکسیتونی بزرگ (60 mV) و لومینسانس قوی در دمای اتاق، این ترکیب به عنوان یک کاندیدای مناسب برای ساخت دستگاه‌های الکترونیکی با طول موج کوتاه مانند دیودهای لیزری، دیودهای نورگسیل و آشکارسازهای نوری، نمایشگرها و الکترودهای شفاف و همچنین انواع حسگرها مورد استفاده قرار گرفته است. در سلول‌های حساس به نور، مواردی همچون سطح ویژه بزرگ برای به دام اندازی فوتون‌ها، تراکم حامل بار و پهنای گاف انرژی از موارد حیاتی به شمار می‌روند که نانوساختارهای نیم‌رساناهای اکسید روی قادر به پاسخگویی در این زمینه هستند [۱۱-۱۳]. اکسید روی دارای سه ساختار بلوری ورتسایت^۴ شش گوشه، زینک بلند مکعبی و ساختار نمک طعام است [۱۴-۱۵]. پارامترهای شبکه ورتسایت اکسید روی عبارتند از: $a = 3.296\text{ \AA}$ و $c = 5.2065\text{ \AA}$ ، انحراف ساختار ورتسایت اکسید روی نسبت به ساختار ایده‌آل ورتسایت باعث تغییر نسبت c/a به مقدار $1/6$ در مقایسه با مقدار ایده‌آل آن $1/633$ می‌شود. [۱۶-۱۷].

⁴ Wurtzite



شکل ۱-۱: (الف) ساختار ورتسایت (ب) ساختار بلند روی (ج) ساختار نمک [۱۳]

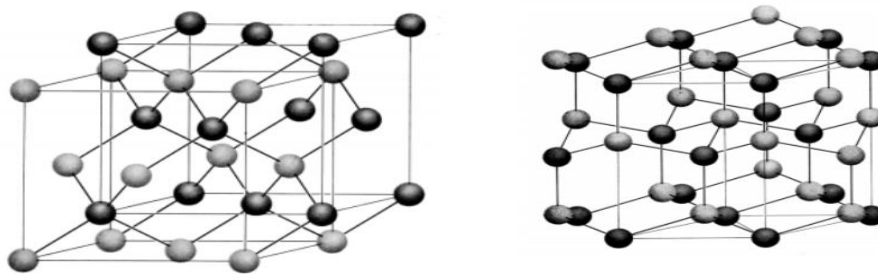
در اکسید روی، نقص‌های ذاتی مانند تهی‌جا اکسیژن یا اتم‌های روی بینابینی^۵، شکل‌گیری نیم‌رسانا از نوع n را آسان می‌کند. با آرایش عناصر گروه سوم مانند آلومینیوم و گالیوم، می‌توان نیم‌رسانای نوع n اکسید روی را با غلظت حامل الکترون بالاتری به دست آورد. با این حال ساخت نیم‌رسانای نوع p اکسید روی بسیار دشوار است. روش متداول آرایش با نیتروژن است [۱۴]. سلول‌های فتوولتائیک در زمینه بهره‌برداری از انرژی خورشیدی مهمترین نقش را دارد. این سلول‌ها که غالباً از نوع نیم‌رسانای سیلیکونی هستند، با جذب فوتون فرودی و آزاد کردن الکترون مستقیماً تابش فرودی (انرژی خورشیدی) را به جریان الکتریکی تبدیل می‌کنند. لایه‌های نازک اکسید روی به دلیل جذب بالا و بازتاب کم در محدوده نور فرابنفش به عنوان پوشش‌های شفاف و ضد بازتاب در ساخت سلول‌های خورشیدی استفاده می‌شوند [۱۵]. اکسید روی به دلیل عبور تابش‌ها در ناحیه مرئی و جذب تابش‌ها در ناحیه فرابنفش در پنجره‌های اپتیکی استفاده می‌شود. این پنجره‌های اپتیکی کاربرد فراوانی دارند. این پنجره‌ها علاوه بر داشتن چشم‌انداز، به دلیل شفافیت در ناحیه مرئی، می‌توانند انرژی خورشیدی و تابش‌های فرابنفش را جذب کرده و در مصرف انرژی صرفه‌جویی نمایند. مدت‌ها است که مواد نیم‌رسانایی که مقاومت سطحی آن‌ها در اثر واکنش با یک گاز فعال تغییر می‌کند، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در این مواد فرآیند جذب شیمیایی

⁵ Interstitial

گاز فعال در سطح ماده با تغییر مقاومت الکتریکی رابطه مستقیم دارد. لایه‌های نازک اکسید روی تهیه شده به روش سل-ژل، می‌توانند حسگرهای خوبی برای گازهای متان، منوکسید کربن و هیدروژن باشند [۱۶].

۴-۱ کادمیوم تلوراید (CdTe)

کادمیوم تلوراید (CdTe) در سال ۱۹۴۷ به عنوان یک ماده الکترونیکی جدید ظاهر شد [۱۷]. کادمیوم تلوراید یک نیمرسانا از گروه II-VI می‌باشد که به لطف عدد اتمی بزرگ (۴۸ و ۵۲) و چگالی بالا ($5/8 \text{ g/cm}^3$) به عنوان یک ماده جاذب عالی عمل می‌کند [۱۸]. CdTe دارای رنگ تیره و در آب نامحلول است و تنها تلوریدهای فلزات در آب محلول هستند [۱۹]. بالاترین عدد اتمی، کمترین آنتالپی تشکیل منفی و بزرگترین پارامتر شبکه، برخی از خصوصیات منحصر به فرد کادمیوم تلوراید است [۲۰]. کادمیوم تلوراید در شکل توده و در فشار جو ساختار زینک بلند دارد. در فشارهای بالا، CdTe با ساختار اسفالریت به ترتیب با کاهش حجم‌های ۲۴ و ۳ درصدی، به ساختار نمک طعام و قلع در خواهد آمد [۲۱]. عموماً فاز پایدار CdTe به شکل زینک بلند می‌باشد اما برخی گزارشات، فاز شش‌گوشی CdTe را در لایه‌های نازک اعلام نموده‌اند. شکل (۵-۱) نشان دهنده ساختار (الف) شش‌گوشی و (ب) بلند روی کادمیوم تلوراید است.



شکل ۱-۲: (الف) ساختار شش‌گوشی (ب) ساختار بلند روی کادمیوم تلوراید [۶۴].

CdTe به شکل توده دارای رسانندگی نوع p می‌باشد. اگرچه دستیابی به نوع n این ماده با تغییر تناسب عنصری نیز امکان پذیر خواهد بود. [۲۲]. کادمیوم تلوراید در دمای اتاق دارای گاف نواری $1/5 \text{ eV}$ و ضریب جذب حدود $5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ است که این گاف نواری و ضریب جذب بالا برای یک جذب کننده‌ی فتوولتایی ایده‌آل است [۲۳]. کادمیوم تلوراید به دلیل کاربرد آن در سلول‌های خورشیدی، دستگاه‌های فتوولتایی، آشکارسازهای هسته‌ای، دستگاه‌های اپتوالکترونیک مانند آشکارساز پرتو ایکس و پرتو گاما توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۲۹-۳۳]. لایه‌های نازک کادمیوم تلوراید در پنجره‌های اپتیکی فروسرخ [۲۹]، شناسایی سلول‌های سرطانی [۳۰] نیز کاربرد دارند. پیش‌بینی بازده تئوری سلول‌های خورشیدی لایه نازک CdTe بین ۲۸٪ و ۳۰٪ است. CdTe با توجه به ویژگی منحصر به فرد، توجه زیادی را در میان دیگر ترکیبات نیم‌رسانا گروه II-VI ایجاد کرده است. CdTe دارای گاف نواری مستقیم $1/48 \text{ eV}$ است که نزدیک به مقدار ایده‌آل برای بازده تبدیل انرژی فتوولتائیک است. ضریب جذب آن بیش از 10^5 cm^{-1} در گستره مرئی به معنی جذب تقریباً تمامی فوتون‌ها تنها با چند میکرومتر از لایه CdTe است. چندین روش برای رسوب CdTe در دسترس هستند، در حالی که روش کندوپاش مغناطیسی فرکانس رادیویی از نظر فناوری تولیدی مطلوب است چون امکان استفاده از یک فرآیند خلا خطی برای ساخت سلول خورشیدی را می‌دهد، می‌توان از آن در ساخت سیستم‌های خورشیدی با مقیاس بزرگ به خوبی استفاده کرد. الهه اکبر نژاد و همکارانش [۳۱]، از نانوذرات CdTe کندوپاش شده به عنوان ماده جاذب نوع p (پوسته) و نانوسیم ZnO به عنوان قسمت جمع کننده نوع n (هسته) استفاده کردند که توانستند یک پیوندگاه برای سلول خورشیدی هسته-پوسته تهیه کنند. ZnO نوع n و CdTe نوع p می‌توانند یک شریک خوب برای ساخت پیوندگاه قوی برای کاربرد در سلول‌های خورشیدی باشند. [۳۱].

فصل دوم:

روش های آنالیز مشخصه یابی نمونه ها

۲-۱ مقدمه

تعیین مشخصات مواد مورد مطالعه از جمله موارد پر اهمیت در فناوری‌های نوین و بخصوص فناوری نانو می‌باشد. برای مطالعه ریز ساختارها نیاز بیشتری به ابزارهای شناسایی و آنالیز وجود دارد. در این فصل دستگاه‌های مشخصه-یابی مورد استفاده در این پایان‌نامه معرفی شده‌اند.

۲-۲ طیف سنج پراش پرتو ایکس (XRD)^۶

پرتو ایکس در طیف امواج الکترومغناطیسی در محدوده بین پرتو گاما و پرتو فرابنفش با طول موج بین ۰/۰۱-۱ نانومتر با بسامد حدود 10^{18} هرتز قرار دارد. با استفاده از این ناحیه‌ی طیفی می‌توان اطلاعاتی در خصوص ساختار بلوری، جنس ماده، میانگین فواصل بین لایه‌ها، موقعیت تک بلور و ترتیب اتم‌ها، ساختار بلوری مواد ناشناخته، مشخصات ساختار بلوری مانند ثابت شبکه، اندازه، ترکیب فاز، تشخیص فازهای بلوری و موقعیت آن‌ها بدست آورد [۳۲]. براگ دریافت موادی که ساختار میکروسکوپی آن‌ها بلوری است الگوهای بخصوصی از تابش‌های X بازتاب شده را نشان می‌دهند [۳۳]. در مواد بلوری به ازای طول موج‌های مشخص بخصوص و جهت‌های تابشی خاص قله‌های با شدت زیاد از تابش پراکنده شده مشاهده می‌شود. براگ برای توجیه این رفتار، بلور را به صورت صفحات اتمی که فاصله d از هم دارند در نظر گرفت. برای ظاهر شدن قله پراش باید تداخل بازتاب نور فرودی از صفحات اتمی سازنده باشد [۳۴]. اختلاف راه پرتو X که بین دو صفحه متوالی برخورد می‌کند، مضرب درستی از طول موج پرتو فرودی است و با رابطه براگ (۲-۱) داده می‌شود:

$$2d_{hkl}\sin\theta = n\lambda \quad (1-2)$$

که در این رابطه d_{hkl} فاصله بین دو صفحه متوالی اتمی، θ زاویه پرتو فرودی، n مرتبه بازتاب و λ طول موج پرتو X فرودی است [۳۵]. در مواد بلوری پهنای قله الگوی پراش با کاهش ضخامت، افزایش می‌یابد. به کمک داده‌های

^۶ X-ray Diffraction

طیف XRD و استفاده از رابطه (۲-۲) موسوم به رابطه شرر می توان اندازه متوسط بلورکها را بدست آورد [۳۵].
 [۳۶]. که در این رابطه D اندازه متوسط بلورکها، λ طول موج پرتو X، θ زاویه براگ و β پهنای قله در نصف
 بیشینه (FWHM) می باشد.

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (۲-۲)$$

همچنین می توان میزان کرنش (ε) و چگالی درفتگی (σ) لایه ها را به ترتیب با استفاده از رابطه های زیر بدست
 آورد [۳۷]:

$$\varepsilon = \frac{\beta}{4 \tan\theta} \quad (۳-۲)$$

$$\sigma = \frac{1}{D^2} \quad (۴-۲)$$

برای شبکه ی بلوری با ساختار مکعبی و شش گوشه می توان اندازه ثابت شبکه را با استفاده از رابطه های (۲-۵) و
 (۲-۶) بدست آورد که در آن a ثابت شبکه بلور، d_{hkl} فاصله بین دو صفحه ی متوالی اتمی، (h k l) اندیس های
 میلر هستند [۳۸]:

$$a = d_{hkl} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (۵-۲)$$

$$\frac{1}{d_{(hkl)}^2} = \left(\frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \right) + \frac{4}{3} \frac{l^2}{c^2} \quad (۶-۲)$$

در این پایان نامه از دستگاه XRD شکل (۲-۲)، ساخت شرکت Panalytical از کشور هلند با مدل
 PhilipsPw3040 مستقر در دانشگاه کاشان استفاده شده است.

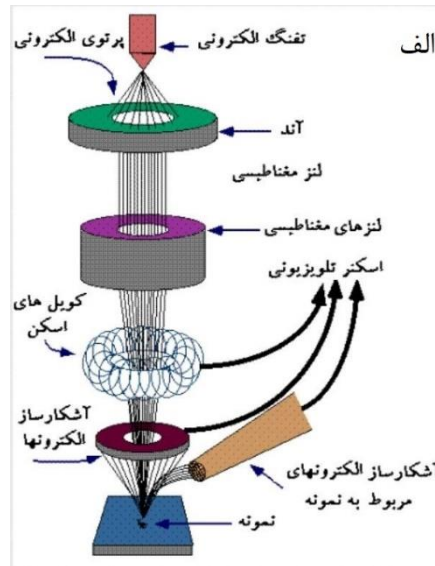
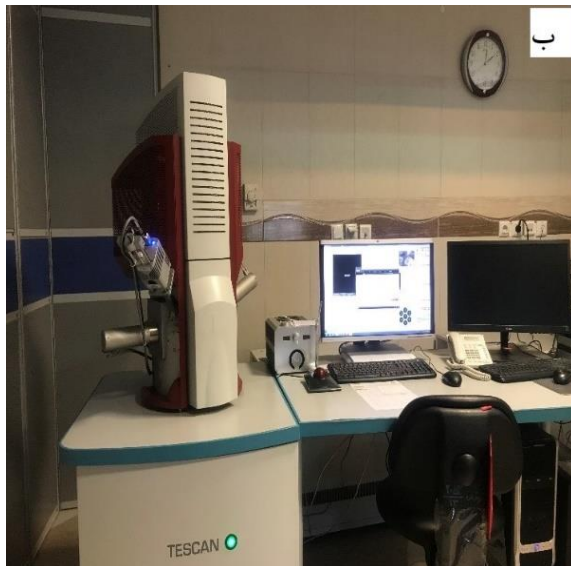


شکل ۱-۲: نمایی از دستگاه XRD مدل Philips Pw3040 مستقر در دانشگاه کاشان.

۲-۳ میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان (FESEM)^۷

میکروسکوپ الکترونی روبشی، یکی از روش‌های تولید تصاویر از طریق روبش یک پرتو الکترونی روی سطح نمونه است، این روش امکان دستیابی به تصاویر سه بعدی از ساختار نمونه را فراهم می‌کند. FESEM میکروسکوپی است که از خصوصیات الکترون‌ها استفاده می‌کند این الکترون‌ها بوسلیه یک منبع گسیل میدانی آزاد شده اند. در این دستگاه یک نمونه با پرتو باریکی به قطر ۱۰۰ آنگسترم بمباران می‌شود [۳۹]، در شکل (۲-۳) الف) طرحواره‌ای از اجزای یک دستگاه FESEM و ب) دستگاه FESEM مدل MIRA3 TESCAN استفاده شده در این تحقیق واقع در پژوهشگاه بوعلی مشهد نشان داده شد.

⁷ Field Emission Scanning Electron Microscopy



شکل ۲-۲: الف) طرح واره‌ای از اجزای یک دستگاه FESEM (ب) نمایی از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان مدل MIRA3 TESCAN واقع در پژوهشگاه بوعلی مشهد.

برخلاف میکروسکوپ‌های الکترون روبشی (SEM) که منبع باریکه آن الکترون‌های گسیلی بر اثر گرما یونی در فیلامان یا رشته تنگستنی است، در میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی اثر میدان از اعمال یک میدان الکتریکی قوی برای تولید پرتو الکترونی در پدیده تونل‌زنی استفاده می‌شود. اعمال یک میدان الکتریکی قوی بر سطح فلز سبب کاهش ارتفاع سد پتانسیل الکترون شده و احتمال تونل‌زنی از سطح را افزایش می‌دهد. به این ترتیب شار بزرگی از الکترون فراهم می‌گردد. در این فرآیند مقدار بار گسیل شده به بزرگی میدان الکتریکی اعمال شده بستگی دارد. معمولاً برای بدست آوردن بهره هر چه بیشتر برای تولید جریان الکتریکی لازم است از فلزی نوک‌تیز استفاده کرد و برای جلوگیری از اکسید شدن فلز به خلا بسیار بالا نیاز است. الکترون‌های ایجاد شده را می‌توان به کمک میدان مغناطیسی موسوم به لنزهای مغناطیسی کانونی کرده و باریکه الکترونی مناسبی تولید کرد. بر اثر برخورد باریکه الکترونی با ماده الکترون‌های ثانویه تولید می‌شوند. علاوه بر الکترون‌های ثانویه الکترون‌های پراکنده شده (برگشتی) نیز وجود دارند. پرتو الکترون‌های ثانویه که از نزدیکی سطح گسیل می‌شوند حاوی اطلاعاتی از توپوگرافی سطح نمونه هستند، در صورتی که پرتو الکترون‌های برگشتی حاوی اطلاعاتی در رابطه با ترکیب شیمیایی ماده

می‌باشد [۴۰]. در آماده سازی مواد نارسانا معمولا سطح نمونه را با لایه نازکی از کربن، طلا یا آلیاژ طلا پوشش می‌دهند. علت این امر آن است که باید بین نمونه و پایه، اتصال الکتریکی برقرار باشد. در مورد نمونه‌های پودری ابتدا باید آن‌ها بر روی یک لایه نازک رسانی پخش شده و کاملا خشک شوند. همچنین نمونه باید عاری از مایعاتی با فشار بخار بالا نظیر آب، محلول‌های پاک‌کننده آلی و لایه‌های روغنی باقی مانده باشد [۴۵-۴۶].

۲-۴ طیف سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس (EDS)^۸

میکروسکوپ‌های الکترونی با قابلیت‌های خود تحولی عظیم در زمینه میکروسکوپی ایجاد کردند. این میکروسکوپ‌ها با قدرت تفکیک بالا، امکان مطالعه در زمینه علوم مختلف از جمله شیمی، زیست‌شناسی، فیزیک، پزشکی و نانو را ممکن ساختند. معمول‌ترین روش‌هایی که در کنار میکروسکوپ‌های الکترونی به آنالیز شیمیایی (تعیین عناصر سازنده) مواد می‌پردازند عبارتند از: طیف‌سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس (EDAX یا EDS)، طیف‌سنجی الکترونی اوژه (AES)^۹ و طیف‌سنجی افت انرژی الکترون (EELS)^{۱۰}. در بین این روش‌ها، EDS متداول‌ترین تکنیک می‌باشد که به عنوان تکنیک متصل به میکروسکوپ‌های الکترونی بکار می‌رود و همزمان به همراه تصویر نمونه حاصل از میکروسکوپ الکترونی، امکان شناسایی کمی و کیفی عناصر مختلف نمونه را به ما می‌دهد. از طرفی این دو دستگاه (EDS و میکروسکوپ الکترونی) در خلا بالا و محیطی به دور از رطوبت عمل می‌کنند تا بتوانند پرتو الکترونی پرتو انرژی، برای گرفتن تصویر و آنالیز مناسب تولید کنند. اصلی‌ترین کاربرد تکنیک EDS شناسایی عنصری ترکیبات به صورت کیفی (بررسی حضور یا عدم حضور یک عنصر در ترکیب ماده مورد مطالعه) و کمی (میزان حضور هر یک از عناصر در نمونه مورد مطالعه) می‌باشد. اساس کار EDS به این صورت می‌باشد که ابتدا نمونه توسط پرتو الکترونی بمباران می‌شود. در اثر برخورد الکترون‌ها با نمونه، برخی از الکترون‌های داخلی اتم از تراز خودشان خارج

^۸ Energy-dispersive X-ray spectroscopy

^۹ Auger electron spectroscopy

^{۱۰} Electron energy loss spectroscopy

شده و بدین ترتیب حفره (جای خالی الکترون) ایجاد می‌شود و در واقع اتم ناپایدار می‌شود. برای رسیدن اتم به حالت پایدار خود، الکترونی از ترازهای بالاتر به محل خالی ایجاد شده مهاجرت کرده و جای خالی را پر می‌کند. برای این منظور، الکترون‌های ترازهای بالاتر که دارای انرژی بیشتری هستند، بخشی از انرژی خود را به صورت تابشی از دست می‌دهند تا در تراز الکترونی پایین‌تر (انرژی کمتر) قرار گیرند. تابش گسیل شده در این حالت به صورت گسیل پرتو ایکس می‌باشد. مقدار انرژی تابش گسیل شده به ترازهایی که الکترون از آن جدا شده و یا به آن مهاجرت کرده، بستگی دارد. از سوی دیگر، اتم‌های عنصر، در حین انتقال از تراز به تراز دیگر، انرژی پرتو ایکس گسیل شده در حین بمباران الکترونی یک نمونه، می‌توان نوع اتم‌های موجود در آن نمونه را مشخص کرد. این نتایج به صورت یک طیف EDS ثبت می‌شوند. در طیف‌های آنالیز EDS، قله‌های عناصر برحسب عدد اتمی‌شان از کم به زیاد (از انرژی کم به انرژی بیشتر) قرار گرفته‌اند و به همین ترتیب از تفسیر پالس‌های پرتو ایکس تولید شده می‌توان عناصر موجود در نمونه را به صورت نیمه کمی شناسایی کرد. شناسایی عناصر به این صورت است که پرتو ایکس حاصل از هر یک از عناصر موجود در نمونه مورد مطالعه با پرتو ایکس استاندارد عناصر مختلف که به کامپیوتر پردازنده ذخیره شده‌اند، تطبیق داده شده و بدین ترتیب به وجود هر عنصر پی برده می‌شود [۴۲].

۲-۵ طیف سنج مرئی-فرابنفش (UV-Visible)^{۱۱}

از این دستگاه برای تعیین خواص نوری نمونه‌ها می‌توان استفاده کرد. در این طیف سنج باریکه‌ای از نور فرابنفش و مرئی به نمونه مورد نظر تابانده می‌شود و با بررسی نور بازتابی، جذبی یا عبوری اطلاعاتی از ماده دریافت می‌شود. پارامترهای اپتیکی ساختار، مانند ضریب شکست، گاف نواری، ضریب جذب، غلظت محلول، ضخامت و غیره به میزان عبور نور از ماده وابسته هستند [۴۳]. در این پایان نامه اندازه‌گیری‌های طیف تراگیل نمونه‌های مورد مطالعه با استفاده از یک دستگاه طیف سنج نوری دو پرتویی شرکت Shimadzu مدل UV-1800، انجام شد.

¹¹ Ultraviolet-Visible spectroscopy

اساس کاری این دستگاه بر پایه مقایسه شدت امواج عبوری از نمونه (به همراه زیرلایه) و زیرلایه (شاهد) می‌باشد. طیف سنج‌های نوری به دو دسته تک پرتویی و دو پرتویی تقسیم بندی می‌شوند. در طیف سنج نوری تک پرتویی، شدت پرتوی نور، قبل و بعد از نمونه، اندازه‌گیری می‌شود. در طیف سنج نوری دو پرتویی، شدت نور بین دو مسیرنوری، که شامل یک مسیر نوری جمع است، مقایسه می‌شود، سپس میزان عبور، با جذب و یا بازتاب نمونه را نسبت به شاهد برحسب طول موج اندازه‌گیری می‌کند.

۲-۵-۱ محاسبه ضریب جذب (α)

با استفاده از طیف تراگسیل می‌توان ضریب جذب (α) و گاف نواری (E_g) را محاسبه نمود. ضریب (α) جذب با استفاده از رابطه (۷-۲) محاسبه شد، که A میزان جذب و t ضخامت نمونه می‌باشد [۳۷].

$$\alpha = \frac{2.303 A}{t} \quad (7-2)$$

۲-۵-۲ محاسبه گاف نواری (E_g)

هنگامی که نوری با فوتون‌هایی با انرژی $h\nu$ بر یک ماده‌ای نیمرسانا فرود می‌آید بسته به بزرگی انرژی آن ممکن است از نمونه عبور کرده، بازتاب شده و یا جذب شود. در صورتی که انرژی فوتون‌های فرودی بیشتر از گاف نواری باشد جذب و در صورتی که کمتر باشد عبور می‌کند. فرآیند جذب در نیمرساناها تابع مستقیم و یا غیرمستقیم بودن گاف نواری ماده (E_g) مورد نظر است. گاف نواری را می‌توان توسط رابطه تاوک^{۱۲} (۸-۲) به دست آورد [۴۴].

$$(\alpha h\nu)^m = A(h\nu - E_g) \quad (8-2)$$

در این رابطه $h\nu$ انرژی فوتون فرودی و A یک ثابت می‌باشد. برای گاف نواری مستقیم $m=2$ و برای گاف نواری غیرمستقیم $m=1/2$ خواهد بود [۴۵].

¹² Tauc

۲-۶ طیف سنجی رامان^{۱۳}

هنگامی که یک تابش الکترومغناطیس از یک محیط شفاف عبور می‌کند، گونه‌های موجود قسمتی از باریکه را در تمامی جهات پراکنده می‌کنند. در سال ۱۹۲۸ سی‌وی رامان^{۱۴} کشف کرد که طول موج مربوط به کسر کوچکی از تابش پراکنده شده توسط مولکول‌های خاص متفاوت از طول موج تابش اولیه است که میزان تفاوت در طول موج‌ها وابسته به ساختار مولکولی ترکیبات تغییر می‌کند. طیف سنجی رامان براساس تجزیه و تحلیل این تفاوت‌ها جهت تعیین ساختار مولکولی ترکیبات مختلف شکل گرفته است [۴۶]. در اثر برخورد نور با ماده، با توجه به طول موج تابش پراکنده شده دو نوع پراکندگی رایلی^{۱۵} و رامان خواهیم داشت. پراکندگی رایلی به وسیله ذراتی ایجاد می‌شود که اندازه آن‌ها به مراتب کوچکتر از طول موج تابش باشد. در اثر این نوع پراکندگی طول موج تابش تغییر نمی‌کند و تحت عنوان پراکندگی کشسان هم دسته بندی می‌شود. در پراکندگی رامان در اثر انتقال انرژی میان فوتون تابیده شده و مولکول‌های ماده، طول موج اولیه تغییر کرده و در اثر از دست دادن انرژی، طول موج افزایش و یا در اثر جذب انرژی طول موج کاهش می‌یابد. میزان این تغییرات انرژی متناسب با بسامد ارتعاشات مولکولی گونه پراکننده نور می‌باشد به این ترتیب پراکندگی رامان به دو دسته کلی تقسیم بندی خواهد شد. دسته اول که دارای طول موج بلندتر (انرژی کمتر) از تابش اولیه است تحت عنوان استوکس^{۱۶} و دسته دوم که طول موج کوتاه‌تر (انرژی بیشتر) از تابش اولیه دارند با نام آنتی‌استوکس^{۱۷} شناخته می‌شوند [۴۷]. مهم‌ترین اجزا یک دستگاه رامان را منبع و سیستم طیف سنج آن تشکیل می‌دهند. منابع مورد استفاده در روش رامان اکثراً لیزری هستند، چون شدت آن‌ها به اندازه کافی زیاد است که بتوانند یک پراکندگی رامان قابل قبول ایجاد نمایند. متداول ترین منابع لیزری مورد استفاده عبارتند از : لیزر یون آرگون با طول موج‌های ۴۸۸ و ۵۱۴/۸ نانومتر، یون کریپتون با طول

¹³ Raman Spectroscopy

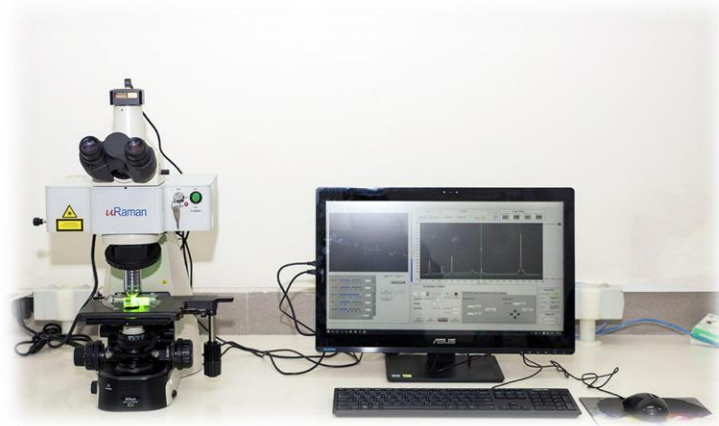
¹⁴ C. V. Raman

¹⁵ Rayleigh scattering

¹⁶ Stokes

¹⁷ Anti-Stokes

موج‌های نزدیک به ۵۳۱ و ۶۴۷ نانومتر، هلیوم/ نئون با طول موج ۶۳۲/۸ نانومتر، لیزر دیودی با طول موج ۷۸۲ و ۸۳۰ نانومتر و لیزر Nd/YAG با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر. دستگاه مورد استفاده در این پایان نامه از منبع لیزری با طول موج ۵۳۲ نانومتر استفاده شده است. از آنجا که فرکانس منبع تاثیر بسزایی روی شدت قله‌های رامان یک گونه دارد، انتخاب منبع مورد استفاده تاثیر بسزایی روی شدت قله‌های رامان یک گونه دارد. در دستگاه‌های جدید عمدتاً از دو نوع کلی طیف سنج‌های پاشنده و یا تبدیل فوریه استفاده می‌شود. استفاده از طیف سنج در دستگاه رامان به دو دلیل عمده صورت می‌پذیرد: الف) جدا کردن تابش ناشی از پراکندگی رایلی از تابش‌های رامان که با پس زدن تابش رایلی که توسط سیستم تکفام ساز، فیلتر یا تداخل سنج مورد استفاده در بخش طیف سنج انجام می‌شود و ب) تجزیه و تحلیل سیگنال‌های نوری جمع آوری شده [۴۸].



شکل ۲-۳: نمایی از دستگاه طیف سنجی رامان مدل uRaman-532-Ci واقع در دانشگاه صنعتی شاهرود.

۲-۷ آزمایش اثر هال^{۱۸}

اگر از یک نیمرسانایی که در میدان مغناطیسی قرار دارد جریان الکتریکی عبور کند به گونه‌ای که میدان مغناطیسی بر جریان الکتریکی عبوری عمود باشد، به دلیل منحرف شدن بارهای متحرک در مسیر حرکتشان، یک نیروی محرکه در عرض نمونه و عمود بر میدان مغناطیسی به وجود می‌آید که این پدیده را اثر عرضی هال^{۱۹} می‌نامند [۴۹]. برای الکترون‌هایی که با سرعت V_x در میدان مغناطیسی B_z حرکت می‌کنند خواهیم داشت:

$$e\varepsilon_y = ev_x B_z = j_x B_z / n \quad (۹-۲)$$

$$R_H = ZV_H / I_x B_z = 1/ne \quad (۱۰-۲)$$

که در این روابط $d_x = nev_x$ چگالی جریان و I_x جریان از نمونه، V_H مقدار اندازه‌گیری شده ولتاژ هال و Z ضخامت نمونه در راستای میدان مغناطیسی می‌باشد. برای بدست آوردن نوع، تراکم و تحرک حامل‌ها می‌توان از روش وندریاور که از اتصالات در چهار گوشه‌ی نمونه استفاده می‌شود، کمک گرفت. در این روش نمونه در یک میدان مغناطیسی ثابت که عمود بر سطح زیرلایه است قرار داده می‌شود. در حضور این میدان به دو سر نمونه در راستای قطر نمونه جریان وارد می‌شود و از دو سر پایانه‌های قطری دیگر مقدار و علامت ولتاژ هال بدست می‌آید. با معلوم بودن میدان مغناطیسی (B) و جریان الکتریکی (I) می‌توان نوع قطبش بین پایانه‌ها و مقدار ولتاژ هال (V_H) را اندازه‌گیری و با جایگزینی در رابطه (۲-۱۱) تراکم حامل‌های اکثریت نمونه را بدست آورد. در این رابطه d ضخامت نمونه، q بار الکتریکی حامل بار است [۵۰].

$$N_e = \frac{IB}{qdV_H} \quad (۱۱-۲)$$

¹⁸ Hall effect

¹⁹ Transverse Hall effect

با داشتن تراکم‌های اکثریت (n_e یا n_h) و مقاومت ویژه (ρ) می‌توان تحرک (μ) حامل‌ها را از روابط زیر محاسبه کرد:

$$\mu_e = \frac{1}{n_e e \rho} \quad (12-2)$$

$$\mu_h = \frac{1}{n_h e \rho} \quad (13-2)$$

۲-۸ مشخصه یابی جریان ولتاژ (I-V)

یکی از روش‌های اندازه‌گیری مقاومت سطحی روش تعیین مشخصه جریان-ولتاژ (I-V) لایه است. پتانسیو استات/گالوانو استات یک دستگاه کنترل و اندازه‌گیری است که جهت تعیین مقاومت الکتریکی ماده استفاده می‌شود. در این پایان‌نامه جهت مشخصه‌یابی جریان-ولتاژ نمونه‌ها دستگاه آنالیز الکتروشیمیایی مدل PGS 2065 مستقر در آزمایشگاه نانوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، استفاده شده است. به منظور انجام این آزمایش نخست بایستی یک الکتروود (شانه‌ای) روی سطح نمونه ایجاد کرد و سپس با استفاده از چسب کربن دو سیم مسی را به رو سر الکتروود متصل و سپس سیم‌های مسی متصل به نمونه به دستگاه پتانسیل گالوانو استات وصل شود. با اعمال ولتاژ در یک بازه معین جریان عبوری از نمونه اندازه‌گیری می‌شود. حساسیت نوری نمونه‌ها از رابطه (۲-۱۴) بدست می‌آید که در آن I_L جریان در روشنایی و I_d جریان در تاریکی و I_{ph} جریان نوری است که از رابطه (۲-۱۵) محاسبه می‌شود.

$$S = \frac{I_{ph} - I_d}{I_d} \quad (14-2)$$

$$I_{ph} = I_L - I_d \quad (15-2)$$

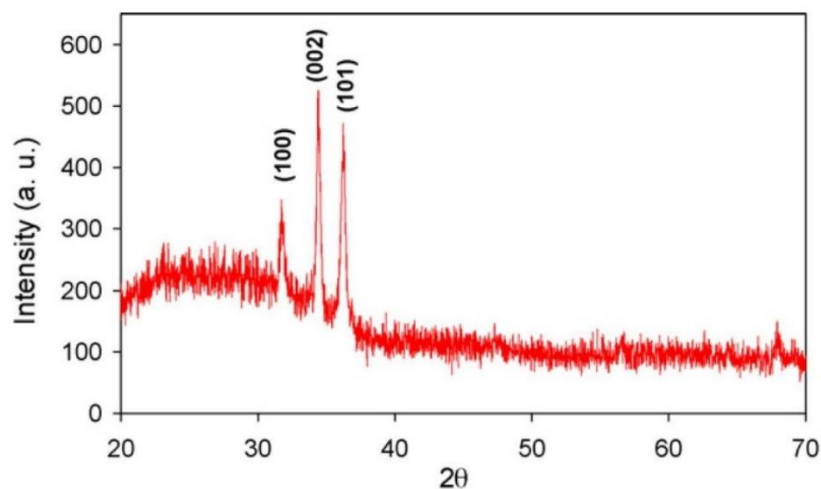
فصل سوم:

مروری بر مقالات

۳-۱ رسانندگی الکتریکی و خصوصیات نوری لایه نازک نانوساختار اکسید روی

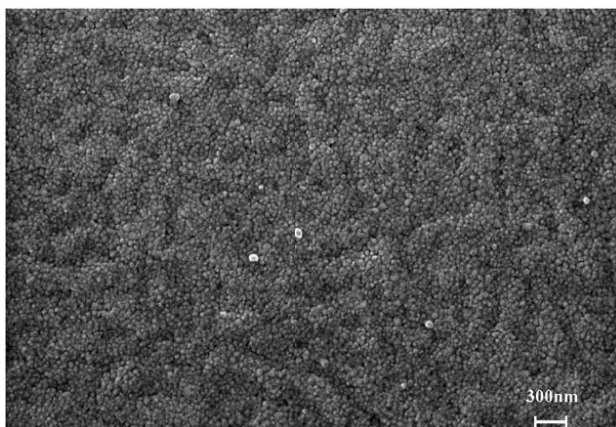
مژدات کاگلار و همکارانش^{۲۰} در سال ۲۰۰۸ با ساخت لایه نازک نانوساختار ZnO با روش سل-ژل (چرخشی) به بررسی رسانندگی الکتریکی و خصوصیات نوری آن پرداختند [۵۱]. در این تحقیق لایه نازک نانوساختار ZnO به روش پوشش‌دهی سل-ژل چرخشی روی زیرلایه شیشه‌ای لایه نشانی شده است. در این کار استات روی به عنوان ماده اولیه و ۲-متوکسی اتانول و مونو اتانول آمین به ترتیب به عنوان حلال و پایدار کننده استفاده شدند. نسبت مولی مونواتانول آمین به استات روی ۱:۱ انتخاب شد و غلظت استات روی ۰/۳۵ مولار انتخاب شد. محلول در دمای ۶۰°C به مدت ۲ ساعت هم زده شد تا یک محلول شفاف و همگن به عنوان محلول لایه نشانی بعد از خنک شدن در دمای اتاق بدست آید. زیرلایه شیشه‌ای با مواد شوینده شسته شده، سپس در محلول متانول و استون در التراسونیک به مدت ۱۰ دقیقه قرار داده شد و سپس با آب مقطر شسته و نهایتاً خشک سازی شد. محلول لایه نشانی بر روی زیرلایه شیشه‌ای که روی دستگاه پوشش‌دهی چرخشی قرار دارد چکانده شد. سرعت چرخش دستگاه ۳۰۰۰ rpm و مدت چرخش ۲۰ ثانیه انتخاب شد. بعد از لایه نشانی، لایه به مدت ۱۰ دقیقه در کوره با دمای ۳۰۰°C به منظور تبخیر حلال و باقی‌مانده‌های آلی قرار داده شد. فرآیند پوشش‌دهی تا خشک سازی ۹ مرتبه تکرار و سپس لایه‌ها در یک کوره توپیی در دمای ۵۰۰°C به مدت ۱ ساعت باز پخت شدند. الگوی XRD لایه‌ها در شکل (۳-۱) نمایش داده شده است. نتیجه XRD نشان می‌دهد که لایه ZnO دارای ساختار چند بلوری است. این لایه با ساختار ورتسایت شش گوشه متبلور و دارای راستای ترجیحی (۰۲۰) است. قله‌های پراش متناظر با صفحات (۱۰۰) و (۱۰۰) مربوط به تشکیل فاز شش گوشه ZnO نیز در الگوی XRD مشاهده شدند [۵۱].

²⁰ Mujdat Caglar et al



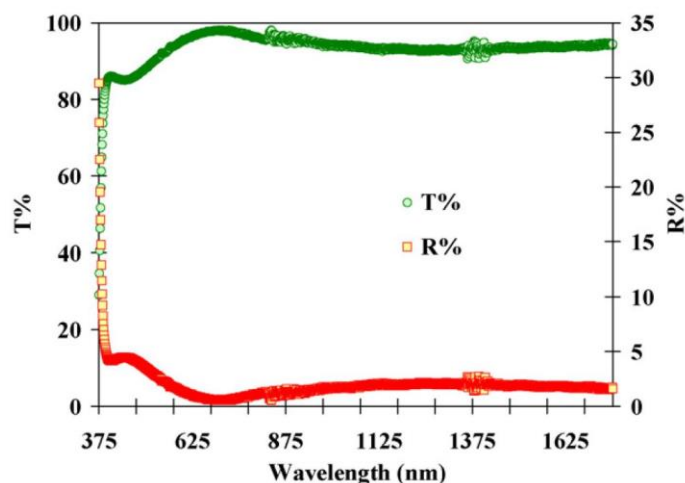
شکل ۳-۱: الگوی پراش پرتو ایکس از لایه نازک نانوساختار ZnO [۵۱].

شکل (۳-۲) تصویر SEM از لایه نازک نانوساختار ZnO را نشان می‌دهد. این لایه دارای یک نانوساختار متخلخل و کروی با اندازه ذرات بلوری تقریباً ۴۰ nm می‌باشد [۵۱].



شکل ۳-۲: تصویر SEM لایه نازک نانوساختار ZnO در مقیاس ۳۰۰ nm [۵۱].

به منظور تجزیه و تحلیل خواص نوری لایه نازک نانوساختار ZnO، از طیف عبوری و بازتابی استفاده شد. طیف-های عبور و بازتاب لایه در شکل (۳-۳) نشان داده شده است. مقدار متوسط عبور نور برای لایه نازک ZnO در محدوده مرئی (۴۰۰-۸۰۰ نانومتر) ۹۳٪ بود که نشان می‌دهد لایه شفافیت بالایی دارد [۵۱].



شکل ۳-۳: طیف‌های عبور و بازتاب نوری لایه نازک نانوساختار ZnO [۵۱].

۳-۲ رشد نانومیله‌های ZnO به روش سل-ژل و بررسی خواص ساختاری و نوری آنها

در این تحقیق کای لونگ فو و همکارانش^{۲۱} [۵۲] از روش کم هزینه آبی-گرمایی برای رشد نانومیله‌های ZnO بر زیرلایه سیلیکونی با استفاده از حلال‌های مختلف، استفاده کردند. علاوه بر این، اثر حلال‌ها بر خصوصیات ساختاری و نوری مورد بررسی قرار گرفت. مطالعه حلال‌ها حائز اهمیت است زیرا این عامل به طور چشمگیری بر خصوصیات ساختاری و نوری نانومیله‌های ZnO تاثیر می‌گذارد.

۳-۲-۱ آماده سازی محلول بذر و فرآیند لایه‌نشانی بذر ZnO

نانوذرات همگن و یکنواخت ZnO با استفاده از روش سل-ژل چرخشی سنتز شدند. قبل از لایه‌نشانی بذر، با استفاده از استات روی به عنوان ماده اولیه و مونواتانول‌آمین به عنوان پایدار کننده، محلول لایه‌نشانی ZnO آماده شد. در این تحقیق از متانول، اتانول، ایزوپروپانول و ۲-متوکسی اتانول به عنوان حلال استفاده شد. برای تهیه سل

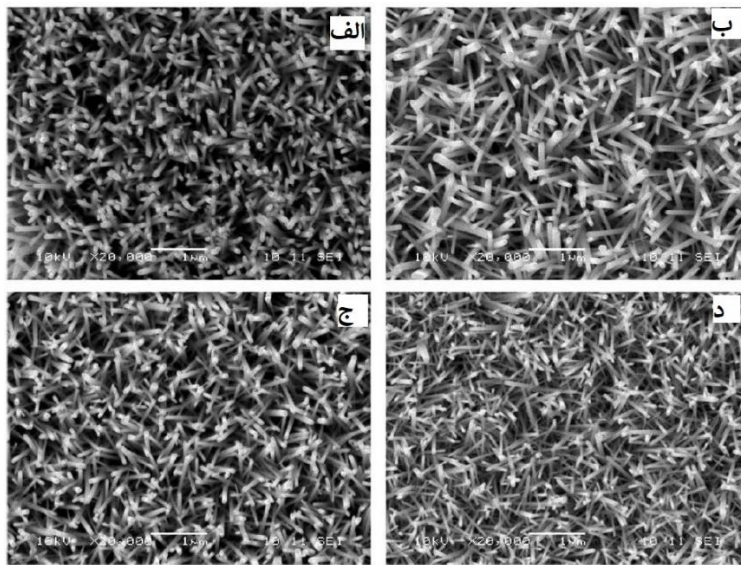
²¹ Kai Loong Foo

با غلظت ۰/۲ مولار، ۴۴ گرم استات روی با ۱۰۰ میلی لیتر حلال مخلوط می شود. برای اطمینان از حل شدن پودر روی در حلال، محلول مخلوط شده به مدت ۲۰ دقیقه در دمای 60°C روی همزن مغناطیسی هم خورد. سپس ۱/۲۲۱۶ گرم از مونواتانول آمین را به تدریج به محلول ZnO اضافه شد و به مدت ۲ ساعت در دمای 60°C محلول هم خورد. محلول شیری رنگ تبدیل به یک محلول شفاف و همگن ZnO شد. محلول قبل از لایه نشانی به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق نگهداری شد. در این آزمایش برای تهیه لایه بذر ZnO از زیرلایه سیلیکونی استفاده شد. لایه نشانی به روش سل-ژل چرخشی با سرعت ۳۰۰۰ rpm به مدت ۲۰ ثانیه انجام شد. سپس عمل خشک کردن بر صفحه داغ با دمای 150°C به مدت ۱۰ دقیقه انجام شد. فرآیند لایه نشانی برای به دست آوردن لایه ZnO ضخیم و همگن ۳ بار تکرار شد. برای پاک شدن ترکیبات آلی و حلال از روی لایه پوشش داده شده، لایه در دمای 500°C درجه سانتی گراد به مدت ۲ ساعت باز پخت شد [۵۲].

۳-۲-۲ فرآیند رشد نانومیله ZnO

پس از پوشش یکنواخت نانو ذرات ZnO روی بستر، نانومیله های ZnO به روش رشد آبی-گرماپی سنتز شدند. محلول رشد شامل محلول آبی نیترات روی $(\text{Zn}(\text{NO}_3)_2)$ (که به عنوان منبع Zn^{2+}) و هگزامتیلن تترامین $(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4)$ بود. غلظت نیترات روی ۳۵ میلی مولار و نسبت مولی نیترات روی و هگزامتیلن تترامین ۱:۱ انتخاب شد. برای حل شدن کامل پودر نیترات روی و هگزامتیلن تترامین در آب مقطر، محلول حاصل با استفاده از همزن مغناطیسی به مدت ۲۰ دقیقه در دمای اتاق هم زده شد. نانومیله های ZnO با غوطه ور کردن زیرلایه که قبلا لایه بذر بر روی آن پوشش داده شده، به صورت وارونه در محلول آبی رشد کردند. در طی فرآیند رشد، محلول آبی در دمای 93°C به مدت ۶ ساعت در یک کوره معمولی آزمایشگاهی حرارت دید. پس از طی مراحل رشد، نمونه ها با آب مقطر به منظور از بین بردن نمک های روی سطح، کاملا شسته شدند و سپس عملیات خشک سازی روی آن ها صورت گرفت. سرانجام، نانومیله های ZnO قرار گرفته بر زیرلایه سیلیکونی در دمای 500°C به مدت ۲ ساعت باز پخت

شدند. تصاویر SEM از سطح، نانومیله‌های ZnO رشد داده شده با حلال‌های مختلف در شکل (۳-۴) نمایش داده شده‌اند. قطر نانومیله‌های بدست آمده حدود ۲۰ تا ۵۰ nm است. براساس تصاویر SEM، استفاده از حلال‌های مختلف به وضوح منجر به تولید نانومیله‌های ZnO با قطرهای مختلف شده است.



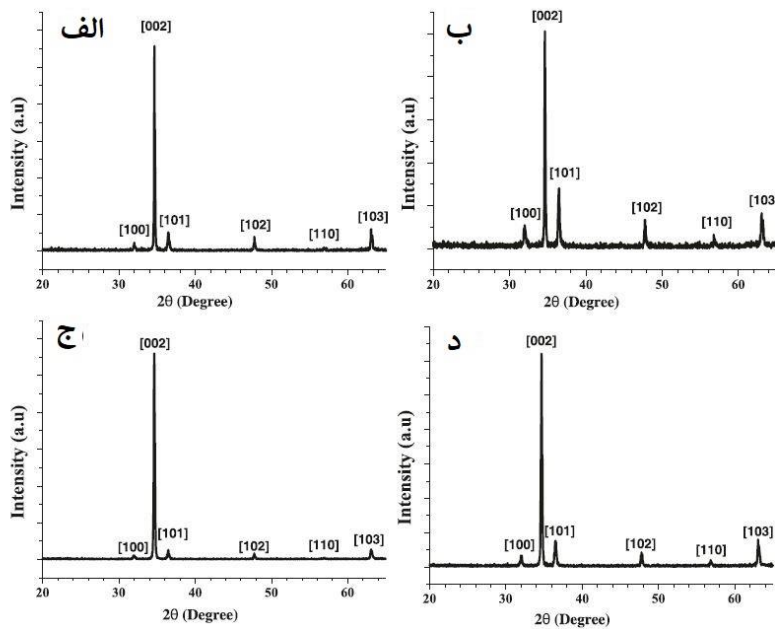
شکل ۳-۴: تصاویر SEM از نانومیله‌های ZnO آماده شده با حلال‌های مختلف: الف) متانول، ب) اتانول، ج) ایزوپروپانول، د) ۲-

متوکسی‌اتانول [۵۲].

تصاویر SEM نشان می‌دهد نانومیله‌های ZnO که با استفاده از ۲-متوکسی‌اتانول رشد داده شده‌اند کمترین قطر را دارند در حالی که آن‌هایی که با اتانول رشد داده شده‌اند بزرگ‌ترین قطر را دارا هستند. اندازه قطر نانومیله‌های ZnO به شدت به اندازه دانه‌های لایه بذر ZnO وابسته است. شکل (۳-۵) الگوهای XRD نانومیله‌های ZnO که با استفاده از محلول‌های آبی و لایه‌های بذر مختلف بر زیرلایه سیلیکونی رشد داده شده‌اند را نشان می‌دهد. در بین قله‌ها، نانومیله‌های آماده شده با اتانول منجر به ایجاد کمترین پهنا در نصف بیشینه (FWHM)^{۲۲} می‌شود. در مقابل

²² Full width at half maximum

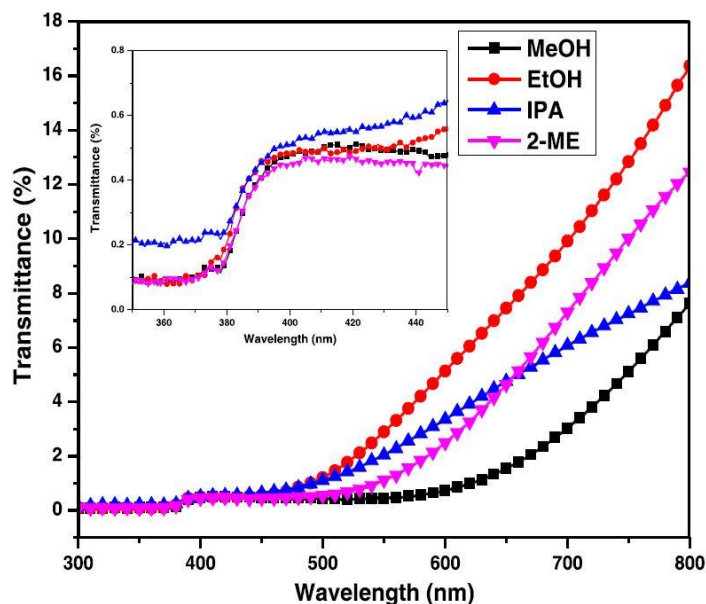
نانو میله‌های ZnO تهیه شده با ۲-متوکسی اتانول بزرگ‌ترین FWHM را نشان دادند. به طور همزمان حلال ۲-متوکسی اتانول بالاترین شدت قله را در (۰ ۰ ۲) نشان داد [۵۲].



شکل ۳-۵: الگوهای پراش پرتو X از نانومیله‌های ZnO با رشد به روش آبی-گرمایی (الف) متانول، (ب) اتانول، (ج) ایزوپروپانول و

(د) ۲-متوکسی اتانول [۵۲].

طیف‌های عبور نانومیله‌های ZnO در شکل (۳-۶) نشان داده شده‌اند. در این شکل نمودار طیف عبور در محدوده طول موجی ۳۵۰ تا ۴۵۰ نانومتر نیز نشان داده شده است. نتایج بدست آمده نشان داد که تمام نانومیله‌های ZnO که با استفاده از حلال‌های مختلف تهیه شده‌اند، قله‌های جذب برانگیخته قوی را در ۳۷۸ nm دارند. این قله‌ها نشان می‌دهند که نانومیله‌های ZnO دارای کیفیت نوری خوب و پیوند اکسیتونی قوی هستند.



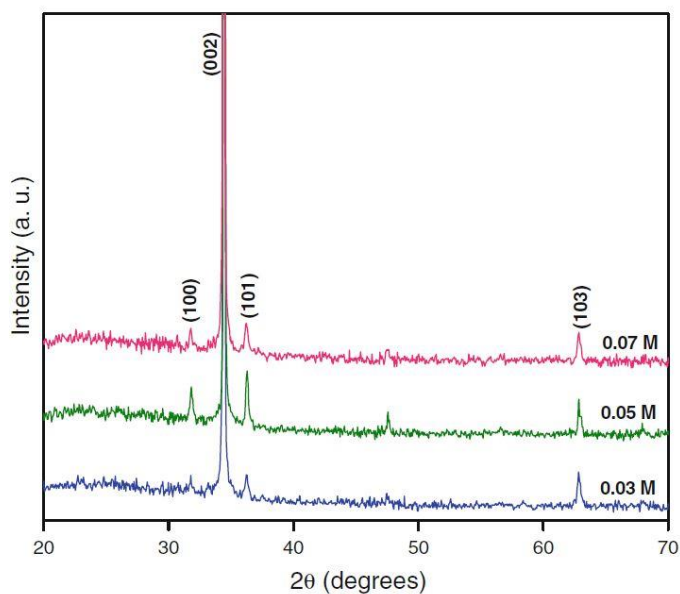
شکل ۳-۶: نمودار طیف عبور از نانومیله‌های ZnO رشد داده شده به روش آبی-گرمایی [۵۲].

۳-۳ رسوب گذاری حمام شیمیایی نانومیله‌های ZnO

م.تامیدورایی و همکارانش^{۲۳} [۵۳]، نانومیله‌های ZnO را توسط یک روش شیمیایی ساده دو مرحله‌ای سنتز کردند. در مرحله اول لایه بذر ZnO با استفاده از روش سل-ژل غوطه‌وری تهیه شده است. استات روی در مخلوطی از اتانول و اتانول‌آمین در دمای اتاق حل شد. محلول حاصل به مدت ۱ ساعت با استفاده از همزن مغناطیسی هم زده شد تا یک محلول شفاف و همگن حاصل شود. با استفاده از سل آماده شده، لایه‌های ZnO با استفاده روش پوشش‌دهی غوطه‌وری آماده شدند. سپس لایه‌های پوشش داده شده در دمای متوسط پخت شدند تا مقدار اضافی حلال و مواد آلی باقی‌مانده در آن حذف شود. بعد از باز پخت در دمای 450°C به مدت ۱ ساعت یک لایه بذر ZnO به ضخامت ۳۰۰ nm بر روی زیرلایه تشکیل شد. در مرحله دوم، یک محلول آبی از حل شدن نیترات روی و هگزامین در آب مقطر تهیه شد. غلظت نیترات روی ۰/۰۳، ۰/۰۵ و ۰/۰۷ مولار و نسبت مولی نیترات روی و

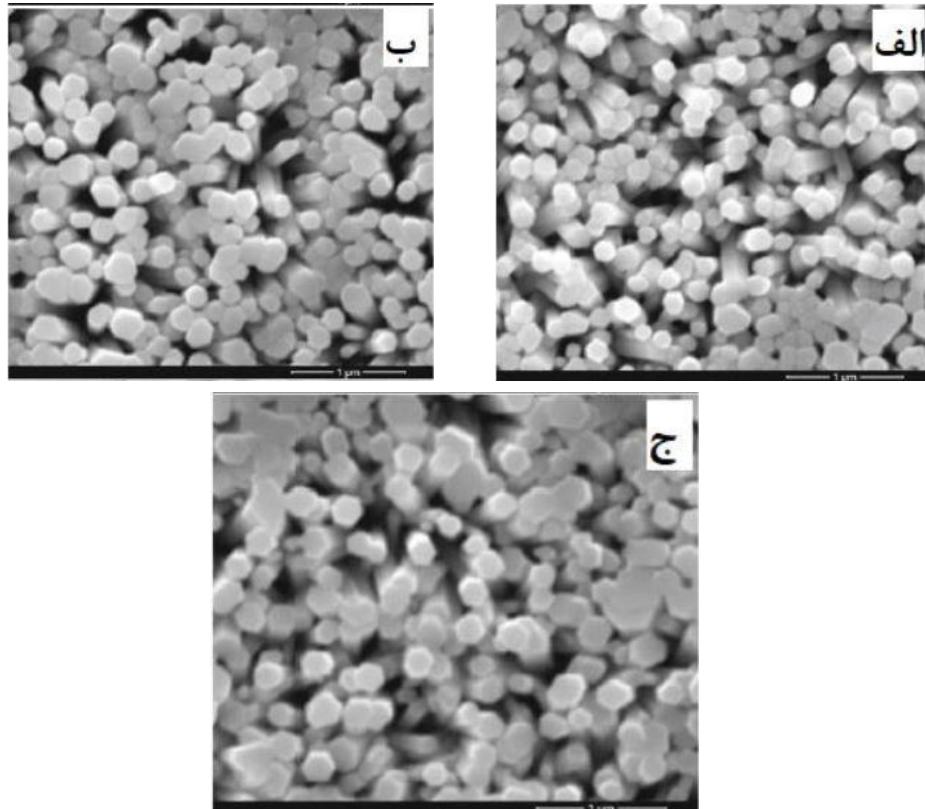
²³ Thambidurai et al

هگزامین ۱:۱ انتخاب شد. سپس بسترهای پوشیده شده با بذر ZnO در محلول به مدت ۴ ساعت در دمای 70°C دما داده شد. در پایان، زیرلایه از محلول خارج شده و با آب مقطر کاملاً شسته شده تا نمک باقیمانده زدوده شود و سپس به مدت ۱ ساعت در دمای 200°C خشک شد. شکل (۷-۳) الگوهای پراش XRD نانومیله‌های ZnO رشد داده با روش رسوب گذاری حمام شیمیایی در غلظت‌های متفاوت را نشان می‌دهد [۵۳].



شکل ۷-۳: الگوهای پراش XRD نانومیله‌های ZnO تهیه شده با غلظت‌های متفاوت [۵۳].

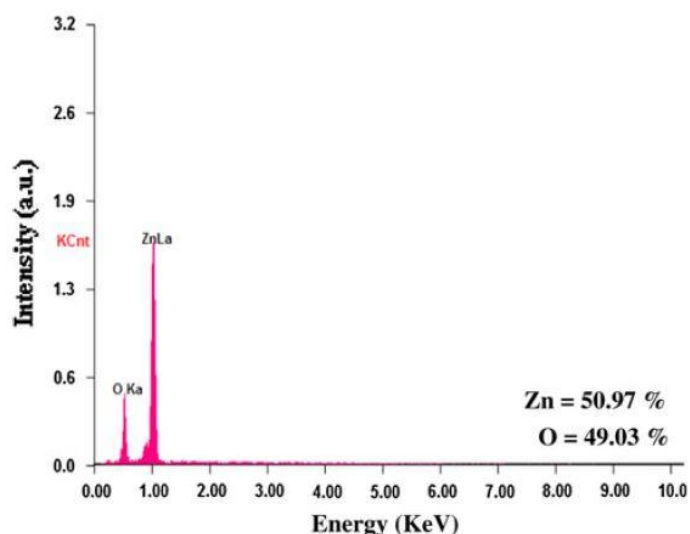
تمام قله‌های پراش در الگو مربوط تشکیل فاز شش گوشه ZnO است. با افزایش غلظت، شدت بازتاب قله (۰۰۲) افزایش می‌یابد که باعث تمایل بیشتر نانومیله‌های ZnO به عمودی واقع شدن بر بستر می‌شود. شکل (۱۰-۳) تصاویر SEM از نانومیله‌های ZnO با غلظت‌های مختلف به روش رسوب گذاری شیمیایی را نشان می‌دهد. شکل (۳-۸-الف) نشان دهنده تشکیل نانومیله‌های ZnO با محلول با غلظت 0.03 M مولار رشد داده شده با روش رسوب حمام شیمیایی است، متوسط قطر و طول نانومیله‌ها به ترتیب در حدود 100 nm و $1\text{ }\mu\text{m}$ است [۵۳].



شکل ۳-۸: تصاویر SEM از نانومیله‌های ZnO رشد داده شده در غلظت‌های متفاوت: الف) ۰/۰۳ مولار،

ب) ۰/۰۵ مولار، ج) ۰/۰۷ مولار [۵۳].

شکل (۳-۸-ب) نشان دهنده تشکیل نانومیله‌های ZnO با محلول با غلظت ۰/۰۵ مولار است. قطر و طول آن به ترتیب در حدود ۱۲۰ nm و ۲/۲ μm هستند. شکل (۳-۸-ج) تصویر SEM از نانومیله‌های ZnO تهیه شده با محلول با غلظت ۰/۰۷ مولار است که دارای قطر ۱۳۵ nm و طول ۳ μm هستند. آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی ایکس (EDS) نانومیله‌های ZnO در شکل (۳-۹) آمده است که حضور ۵۰/۹۷٪ روی و ۴۹/۰۳٪ اکسیژن در ترکیب ZnO را نشان می‌دهد [۵۳].



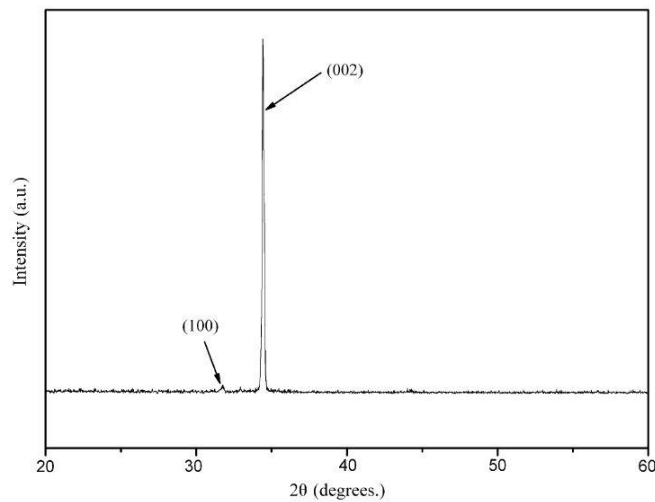
شکل ۳-۹: نمودار از طیف EDS نانومیله‌های ZnO [۵۳].

۳-۴ رشد آرایه‌های منظم نانومیله ZnO در دمای پایین به روش رسوب گذاری حمام شیمیایی تحت شرایط کنترلی

در تحقیق دیگری چینگوی لی و همکارانش^{۲۴} [۵۴] با استفاده از روش رسوب گذاری حمام شیمیایی بر زیرلایه سیلیکونی نانومیله‌های ZnO را سنتز کردند. زیرلایه‌های سیلیکون در حمام اولتراسونیک با متیل بنزن، استون، اتانول و آب مقطر تمیز شدند. سپس زیرلایه سیلیکون با استفاده از محلول ۲٪ هیدروفلوریک اسید برای از بین بردن لایه اکسیدی باقی مانده شسته شد. به منظور ساخت نانومیله‌های عمودی، ابتدا لایه بذر ZnO با ضخامت ۳۰ نانومتر با استفاده از روش کندوپاش مغناطیسی فرکانس رادیویی (RF) سنتز شد. ۵۰ ml محلول آبی متشکل از روی استات و هگزامتیلن تترامین به عنوان محلول لایه‌نشانی برای رشد نانومیله‌های ZnO استفاده شد. غلظت استات روی در محدوده ۱۰ تا ۵۰ میلی‌لیتر و نسبت مولی استات روی و هگزامتیلن تترامین ۱:۱ نگه داشته شد.

²⁴ Qingwei Li et al

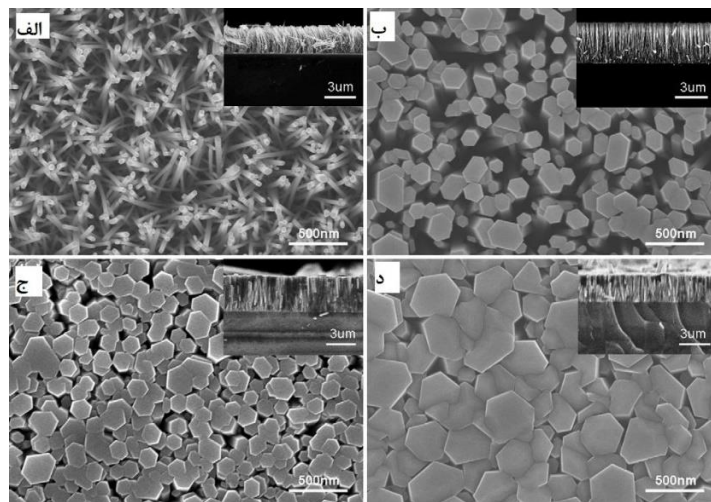
سپس محلول به یک ظرف شیشه‌ای منتقل و زیرلایه به صورت عمودی در آن معلق شدند. در پایان رشد، زیرلایه از محلول خارج شده و چندین بار با آب مقطر آبکشی و سپس با گاز نیتروژن در دمای اتاق خشک شدند. شکل (۳-۱۰) الگو XRD آرایه‌های نانومیله‌های رشد داده شده را نشان می‌دهند. قله پراش از صفحات (۰۰۲) در الگوی XRD غالب است که رشد در امتداد محور C را نشان می‌دهد. در این کار اثر غلظت ماده اولیه بر ریخت‌شناسی نانومیله‌های بررسی شد.



شکل ۳-۱۰: الگوی XRD از آرایه‌های نانومیله ZnO رشد داده شده [۵۴].

شکل (۳-۱۲) تصاویر SEM نانومیله ZnO رشد داده شده با غلظت متغیر ماده اولیه از ۱۲/۵ تا ۵۰ میلی‌مولار را نشان می‌دهد. دما و مدت رشد به ترتیب 90°C و ۵ ساعت انتخاب شد. بررسی تصاویر SEM نشان داد که ریخت‌شناسی و نسبت ابعاد آرایه‌های نانومیله ZnO به طور قابل توجهی به غلظت ماده اولیه بستگی دارد. شکل (۳-۱۱-الف) نشان می‌دهد که نانومیله ZnO به طور متوسط دارای قطر ۵۰ nm و طول ۲۶۰۰ nm هستند اما وقتی غلظت ماده اولیه ۱۲/۵ میلی‌مولار شد، جهت‌گیری ترجیحی ضعیف می‌شود [۵۴]. با این حال برای نمونه‌هایی با غلظت ماده اولیه بالاتر آرایه‌های متراکمی از نانومیله‌های ZnO با ساختار ورتسایت به صورت عمودی مرتب

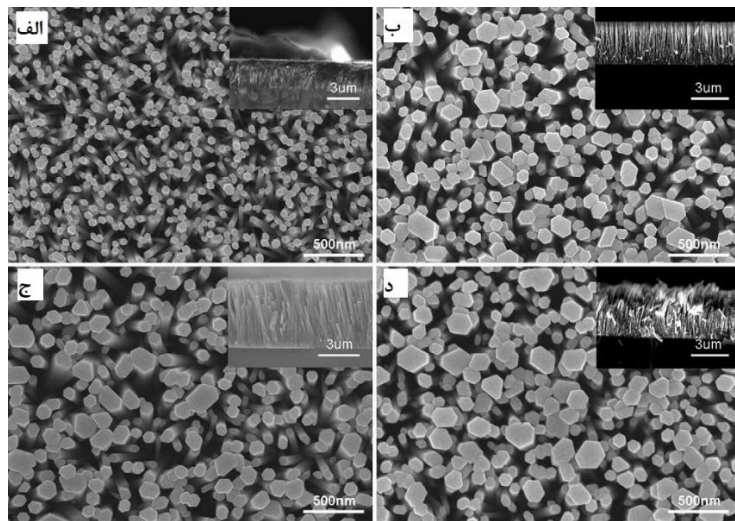
شده و به صورت یکنواخت روی زیرلایه سیلیکونی توزیع شده است. وقتی غلظت ماده اولیه از ۲۵ میلی مولار به ۵۰ میلی مولار تغییر یافت قطر متوسط نانومیله‌های ZnO از ۱۶۰ nm به ۴۶۰ nm افزایش یافت. با این حال، طول طول نانومیله‌های ZnO روند کاملاً متضادی را با قطر متوسط نشان داد. وقتی غلظت ماده اولیه افزایش یافت طول متوسط نانومیله‌های ZnO از ۴۳۰۰ nm به ۲۵۰۰ nm کاهش یافت که می‌توان این تغییرات را در شکل (۳-۱۱-ب-د) مشاهده کرد.



شکل ۳-۱۱: تصاویر SEM از نانومیله ZnO سنتز شده در غلظت‌های ماده اولیه مختلف: الف) ۱۲/۵ میلی مولار، ب) ۲۵ میلی - مولار، ج) ۳۷/۵ میلی مولار، د) ۵۰ میلی مولار. دمای رشد و زمان به ترتیب 95°C و ۵ ساعت بود [۵۴].

برای بررسی اثر دمای رشد روی ریخت‌شناسی آرایه‌های نانومیله ZnO، رشد آرایه‌های این نانومیله به روش رسوب حمام شیمیایی روی زیرلایه سیلیکونی از دمای 65°C تا 95°C با غلظت اولیه بهینه ۲۵ mM برای ۵ ساعت انجام شد. تصاویر مربوط به رشد نانومیله‌های ZnO مربوط به هر دما در شکل (۳-۱۲) نشان داده شده است. این تصاویر نشان می‌دهند که تقریباً تمامی نانومیله‌های ZnO بدون در نظر گرفتن دمای رشد به صورت عمودی روی بستر رشد کرده‌اند. تصاویر SEM از سطح نمونه‌ها نشان می‌دهند که نانومیله‌ها به شکل منشور شش گوشه هستند، نانومیله‌ها در دماهای مختلف در امتداد صفحه (۰۰۱) رشد می‌کنند. با این حال، دمای رشد تاثیر زیادی

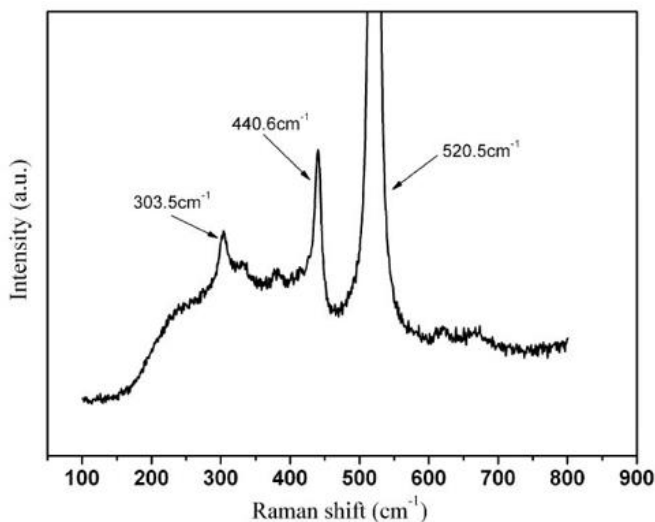
بر قطر، طول و نسبت ابعاد نانومیله دارد. همان طور که در شکل (۳-۱۲-الف-د) نشان داده شده است، میانگین قطر، طول و نسبت ابعاد به طور قابل توجهی با افزایش دمای رشد افزایش می‌یابد. قطر متوسط از ۷۰ nm به ۱۶۰ و طول آن‌ها به طور قابل توجهی از ۴۰۰ تا ۴۳۰۰ نانومتر افزایش یافت. این نشان می‌دهد که نرخ رشد نسبت به دما در امتداد صفحه (۰۰۱) در مقایسه با نرخ رشد در امتداد صفحات (۱۰۱) و (۱۰۰) از حساسیت بیشتری برخوردار است. بنابراین، تغییر دمای رشد یک ابزار مهم دیگر برای کنترل ریخت‌شناسی نانومیله‌های ZnO است.



شکل ۳-۱۲: تصاویر SEM از آرایه‌های نانومیله ZnO رشد داده شده با زمان‌های رشد متفاوت: الف) ۳ ساعت، ب) ۵ ساعت، ج) ۶ ساعت، د) ۹ ساعت. غلظت ماده اولیه و دمای رشد به ترتیب ۲۵ میلی‌مولار و 95°C بودند [۵۴].

طبق گزارشات قبلی، مدت زمان رشد یکی دیگر از ابزارهای کنترلی در رشد آرایه‌های نانومیله ZnO است. شکل (۳-۱۳) تصاویر SEM از رشد نانومیله‌های ZnO روی زیرلایه سیلیکونی در یک بازه زمانی ۳ تا ۹ ساعت را نشان می‌دهد. غلظت ماده اولیه و دمای رشد به ترتیب ۲۵ mM و 95°C بودند. وقتی زمان رشد از ۳ به ۵ ساعت افزایش می‌یابد، متوسط قطر و طول نانومیله‌های ZnO به ترتیب از ۶۰ nm به ۱۶۰ nm و از ۲۵۰۰ nm به ۴۳۰۰ nm افزایش می‌یابند. با این حال، هنگامی که مدت زمان رشد از ۷ به ۹ ساعت افزایش و ادامه پیدا می‌کند، هیچ تغییر قابل

ملاحظه‌ای در ریخت‌شناسی و متوسط قطر نانومیله‌ها مشاهده نمی‌شود. این نتایج نشان داد که رشد مستمر و مداوم نانومیله‌های ZnO در حدود ۵ ساعت می‌تواند تمام شود [۵۴]. طیف‌های رامان برای تعیین نظم بلور و نقص‌های ساختاری بسیار حساس و پرکاربرد هستند. شکل (۳-۱۳) یک طیف عادی رامان در محدوده 900-cm^{-1} برای نانومیله‌های ZnO بر زیرلایه سیلیکونی را نشان می‌دهد. قله‌های واقع در موقعیت‌های 303.5 cm^{-1} و 520.5 cm^{-1} به مدل‌های ارتعاشی سیلیکون نسبت داده می‌شوند و قله واقع در موقعیت 440.6 cm^{-1} موسوم به مد E_2 است، که یک مشخصه ذاتی برای ZnO در فاز ورتسایت است.



شکل ۳-۱۳: طیف رامان نانومیله ZnO رشد داده شده [۵۴].

۳-۵ ساخت سلول خورشیدی هسته-پوسته‌ای ZnO/CdTe

توسعه قطعات فتوولتایی یک راه حل امیدوار کننده برای مقابله با افزایش تقاضای انرژی است. در مقایسه با سلول‌های خورشیدی سیلیکونی، سلول‌های خورشیدی لایه نازک بر پایه نیمرساناهایی مانند CdTe، CIGS و CZTS، می‌توانند مصرف مواد را به صورت چشمگیری کاهش دهند. فرآیند ساخت ساده و اقتصادی از مزایای قابل توجه سلول‌های خورشیدی لایه نازک هستند. سلول‌های خورشیدی لایه نازک CdTe به دلیل کارایی بالا و عملکرد

پایدار، یکی از بهترین کاندیدها برای سیستم‌های خورشیدی در مقیاس بزرگ هستند. در این کار نانوسیم‌های ZnO بر بستر FTO با استفاده از روش رسوب گذاری حمام شیمیایی سنتز شدند و سپس نانوذرات CdTe با استفاده از روش کندوپاش مغناطیسی (RF) بر روی نانوسیم‌های ZnO انباشت شدند [۳۱].

۳-۵-۱ رشد نانوسیم‌های ZnO

نانوسیم‌های ZnO با استفاده از روش رسوب گذاری حمام شیمیایی بر بستر FTO رشد داده شدند. زیرلایه FTO ($1/5 \times 1/5 \text{ cm}^2$) در محلول اتانول و استون در حمام التراسونیک به مدت ۱۵ دقیقه پاک شدند. برای رشد نانوسیم‌های ZnO، آلومینیوم اکسیدروی (AlZnO) به عنوان لایه بذری با استفاده از روش کندوپاش به ضخامت ۱۵ نانومتر پوشش‌دهی شد. در این کار فشار اولیه برابر $10^{-6} \times 9/2$ Torr، شار گاز آرگون برابر ۱۵ sccm، توان فرکانس رادیویی ۲۰۰ W و فشار کاری برابر $10^{-2} \times 2/5$ Torr بود. قبل از اینکه بسترها خارج شوند محفظه کندوپاش در خلا تا دمای اتاق خنک می‌شود. مرحله بعد آماده سازی محلول آبی اولیه برای رشد نانوسیم‌های ZnO است. بنابراین، یک محلول آبی با استفاده از نیترات روی (۲۴ میلی‌مولار) و هگزامتیلن تترامین (۱۶ میلی‌مولار) به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر تهیه شد. بستر حاوی بذری در محلول با دمای 85°C قرار گرفت. فرآیند رشد برای دستیابی به نانوسیم-ها با ZnO با طول ۴ میکرومتر سه بار تکرار شد [۳۱].

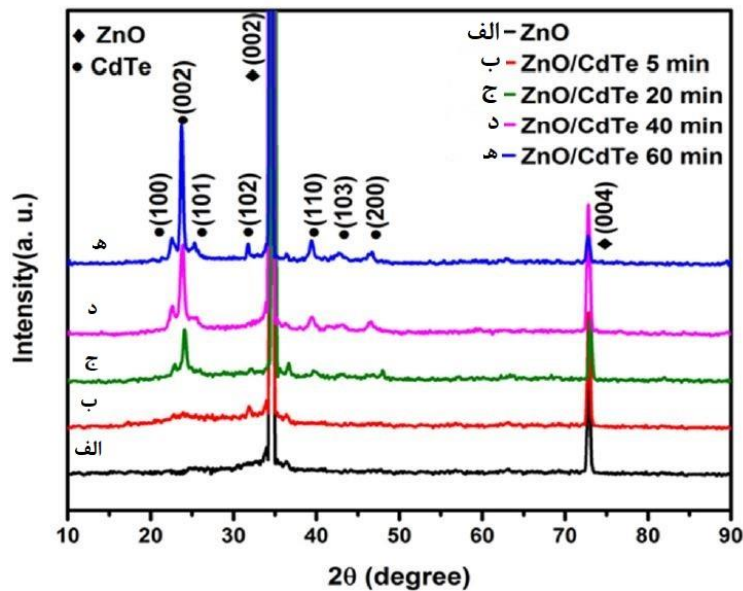
۳-۵-۲ تهیه هسته-پوسته ZnO / CdTe نانوسیم‌های

برای ساخت پیوندگاه از ZnO/CdTe، نانوذرات CdTe نوع p بر بستر حاوی نانوسیم‌های ZnO و CdSe با استفاده از روش کندوپاش مغناطیسی (RF) با مدت زمان پوشش‌دهی مختلف انباشت شدند. فشار اولیه محفظه دستگاه $10^{-6} \times 5$ Torr و فاصله بین ماده هدف و بستر ۷ cm بود. گاز آرگون با شار ۳۰ sccm وارد محفظه شده و توان منبع تغذیه فرکانس رادیویی ۱۰۰ W انتخاب شد. فشار کاری در حین پوشش‌دهی برابر $10^{-2} \times 2$ Torr بود.

نمونه‌های کندوپاش شده با مدت زمان پوشش‌دهی ۵، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه قبل از خارج شدن از دستگاه در دمای اتاق خنک شدند. پیوندگاه‌های تهیه شده در محلول CdCl_2 و متانول خیس داده شدند و سپس در دمای 400°C به مدت ۱ ساعت در هوا باز پخت شدند [۳۱].

۳-۵-۴ خواص ساختاری

الگوی XRD نانوسیم‌های ZnO و CdTe /نانوسیم‌های ZnO با مدت زمان‌های مختلف پوشش‌دهی برای نانوذرات CdTe (۵، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه) در شکل (۳-۱۴) نشان داده شده است. قله‌های پراش نانوسیم‌های ZnO تشکیل فاز ورتسایت اکسید روی را نشان می‌دهد. قله‌ها در موقعیت‌های $34/83^\circ$ و $72/67^\circ$ متناظر با پراش از صفحات (۰۰۲) و (۰۰۴) ساختار بلوری نانوسیم‌های ZnO بعد از انباشت نانوذرات CdTe در الگوی XRD نمونه‌ها دیده می‌شوند. علاوه بر این، الگوی پراش نانوسیم‌های ZnO رشد داده شده در امتداد محور C به روش رسوب گذاری حمام شیمیایی را نشان می‌دهد. انباشت نانوذرات CdTe روی نانوسیم‌های ZnO با مدت زمان پوشش‌دهی ۵ دقیقه، دو قله در موقعیت‌های $23/85^\circ$ و $32/64^\circ$ را ایجاد می‌کند. بالا رفتن مدت زمان پوشش‌دهی باعث ایجاد قله‌های پراش جدید در موقعیت‌های $42/85^\circ$ ، $22/61^\circ$ ، $23/64^\circ$ ، $25/11^\circ$ ، $23/72^\circ$ ، $40/42^\circ$ و $76/45^\circ$ که به ترتیب متناظر با پراش از صفحات (۱۰۰)، (۰۰۲)، (۱۰۱)، (۱۰۲)، (۱۱۰)، (۱۰۳) و (۲۰۰) می‌شوند. علاوه بر این، با افزایش زمان رسوب گذاری نانوذرات CdTe به ۴۰ و ۶۰ دقیقه، قله‌های پراش قوی‌تری را نمایش می‌دهند که نشان دهنده تجمع نانوذرات CdTe موجود بر سطح نانوسی ZnO است. نانوذرات CdTe پوشش‌دهی شده، دارای ساختار ورتسایت بدون هیچ فاز اضافی هستند، علاوه بر این، نتایج نشان داد که وجود لایه CdSe تاثیری بر نتایج XRD ندارد [۳۱].

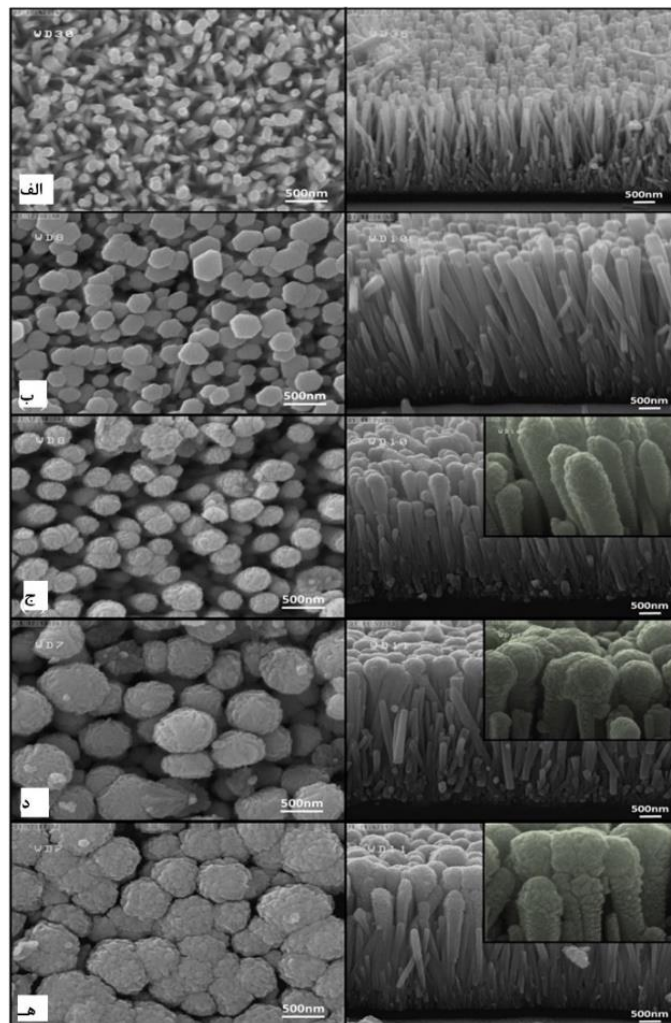


شکل ۳-۱۴: طیف‌های XRD نانوسیم‌های ZnO و ZnO ترئین شده با CdTe سنتز شده در زمان‌های متفاوت (۵، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه) [۳۱].

۳-۵-۵ ریخت‌شناسی نمونه‌ها

تصاویر FESEM نانوسیم‌های ZnO و نانوذرات CdTe/نانوسیم‌های ZnO در شکل (۳-۱۵) نشان داده شده‌اند. شکل (۳-۱۵-الف) تصاویر SEM از سطح و مقطع از نانوسیم‌های ZnO را به وضوح نشان می‌دهد. ساختارهای شش گوشه و در امتداد محور C نانوسیم‌ها با موفقیت بر بستر FTO به روش رسوب گذاری حمام شیمیایی رشد داده شده‌اند. طول و قطر متوسط نانوسیم‌های ZnO به ترتیب $4 \mu\text{m}$ و 70 nm هستند. شکل (۳-۱۵-ب - ه) نمای از سطح و مقطع از پیوندگاه هسته-پوسته CdTe/نانوسیم‌های ZnO در مدت زمان‌های پوشش‌دهی مختلف (۵، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه) را نشان می‌دهند. نانوذرات CdTe پوشش داده شده در مدت ۵ دقیقه به شکل منظم سطح نانوسیم‌های ZnO را پوشش داده‌اند و شکل شش گوشه نانوسیم‌ها بدون تغییر باقی مانده است. با افزایش مدت زمان پوشش‌دهی نانوذرات CdTe به ۲۰ دقیقه شاهد افزایش پوشش CdTe بر سطح نانوسیم‌های ZnO از

بالا به پایین شد، اگر چه مقدار قابل توجهی از ذرات بر روی نانوسیم‌ها قرار گرفته‌اند. پوسته ضخیم‌تر در مدت زمان پوشش‌دهی ۴۰ و ۶۰ دقیقه مطابق شکل (۳-۱۵-د و ه) بدست آمد.



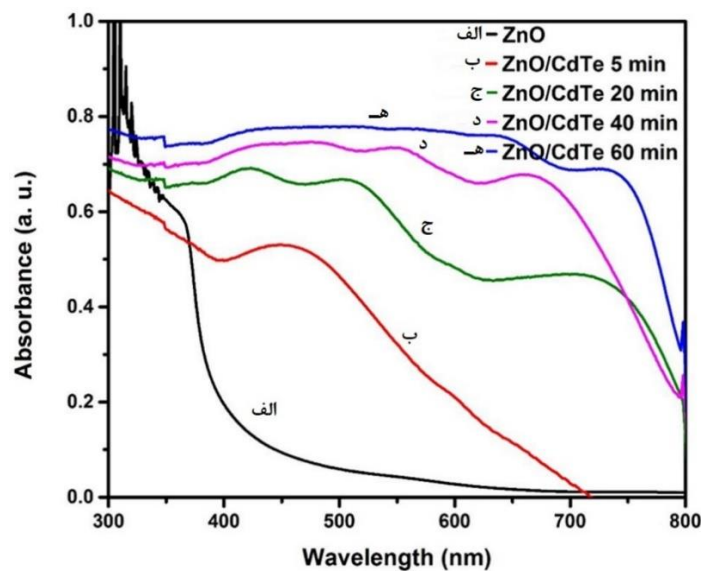
شکل ۳-۱۵: تصاویر FESEM، الف) آرایه‌های نانوسیم‌های ZnO و ب، ج، د، ه) نانوسیم‌های ZnO پوشش‌دهی شده با نانوذرات

CdTe در زمان‌های مختلف به ترتیب ۵، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه [۳۱].

رشد دانه شعاعی از هسته مرکزی به ساختار گل مانند در بالای نانوسیم‌ها منتهی می‌شود و این کار تا زمانی که به هم متصل شوند ادامه پیدا می‌کند و یک شبکه پیوسته از ساختارهای گلی بوجود آورده‌اند [۳۱].

۳-۵-۶ خواص اپتیکی

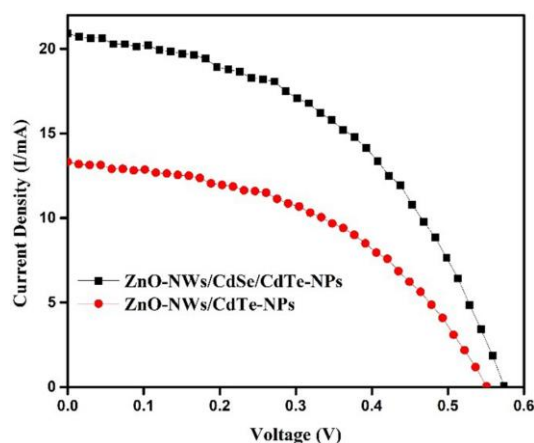
جذب نوری نمونه‌ها در محدوده طول موجی ۴۰۰ تا ۸۰۰ نانومتر می‌تواند در انتخاب بهترین پیوندگاه برای تولید یک سلول خورشیدی هسته-پوسته کمک کند. شکل (۳-۱۶) طیف‌های جذبی مرئی-فرابنفش نانوسیم‌های ZnO پوشش داده شده با نانوذرات CdTe در چهار زمان پوشش‌دهی مختلف (۵، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه) را نشان می‌دهد. این بررسی توانایی بالای جذب در تمام ساختارهای رشد داده شده در محدوده طول موج فرابنفش را نشان می‌دهد، با این وجود، نانوسیم‌های ZnO با توجه به لبه جذب واقع در حدود ۳۸۰ nm، با گاف نواری ۳/۳ eV جذب پایین‌تر را نسبت به محدوده مرئی نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۶: نمایی از طیف جذبی فرابنفش-مرئی از نانوسیم‌های ZnO و نانوسیم‌های ZnO پوشش داده شده با نانوذرات CdTe در زمان‌های پوشش‌دهی مختلف (۵، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه) [۳۱].

با افزایش رسوب گذاری تا زمان ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه، لبه جذب به ۷۸۰ nm منتقل می‌شود که گاف نواری CdTe است و به طور قابل توجهی در مقایسه با جذب نوری نانوسیم‌های ZnO در محدوده مرئی، گسترش یافته است. علاوه بر این، افزایش جذب نوری ساختار هسته-پوسته می‌تواند ناشی از ضخامت بالاتر آن بواسطه افزایش زمان

پوشش‌دهی نانوذرات باشد. ساختار هسته-پوسته نانوسیم‌های CdTe /ZnO (۶۰ دقیقه) بالاترین مقدار جذب در محدوده مرئی را نشان می‌دهد، که آن را به یک کاندیدای مناسب برای ساخت سلول خورشیدی تبدیل می‌کند. علاوه بر این پیوندگاه هسته-پوسته نانوسیم‌های CdTe /ZnO دارای یک گاف نواری هم‌راستا با برتری در محدود کردن الکترون‌ها و حفره‌ها از یکدیگر هستند. در نتیجه الکترون‌های تولید شده از CdTe (پوسته) به ZnO (هسته) و سپس به سمت اتصال FTO جریان پیدا می‌کنند، در حالی که حفره‌های باقی‌مانده در CdTe توسط اتصال طلا/نیکل در پشت نمونه، جمع‌آوری می‌شوند. الکترون‌ها می‌توانند در نقص‌های سطحی ZnO به دام افتند و به راحتی با حفره‌های CdTe ترکیب می‌شوند. برای غلبه بر این مشکل یک لایه نازک CdSe به عنوان لایه مسدود کننده برای جلوگیری از ترکیب حفره‌ها در محل اتصال اضافه شد. شکل (۳-۱۷) نشان دهنده تراکم جریان-ولتاژ بین دو سلول خورشیدی با FTO /نانوسیم ZnO /CdSe /نانوذرات CdTe (۶۰ دقیقه) /Au/Ni و FTO /نانوسیم‌های ZnO /نانوذرات CdTe (۶۰ دقیقه) /Au /Ni که تحت شبیه‌ساز خورشیدی با نور مرئی AM ۱/۵ (100 mw cm^{-2}) اندازه‌گیری شده است را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۷: مشخصات ولتاژ-جریان دو سلول خورشیدی هسته-پوسته، نانوسیم‌های ZnO / CdSe / نانوذرات CdTe (۶۰ دقیقه)

و نانوسیم‌های ZnO / نانوذرات CdTe (۶۰ دقیقه) [۳۱].

فصل چهارم:

روش‌های رشد و مراحل آزمایشگاهی سنتز نمونه‌ها

۴-۱ بخش اول: روش‌های رشد

۴-۱-۱ مقدمه

دو نوع فرآیند اساسی پوشش‌دهی فیزیکی و شیمیایی در تهیه لایه‌های نازک وجود دارد. پوشش‌دهی فیزیکی شامل استفاده از ابزار مکانیکی و ترمودینامیکی برای تولید فیلم از فاز جامد است. ماده‌ای که لایه از آن تشکیل می‌شود در یک محفظه خلا و در یک محیط پر انرژی قرار می‌گیرد. قرارگیری در این محیط باعث جدا شدن ذرات ماده از سطح آن می‌شود. در نتیجه این ذرات روی بستر سردی که در مسیر ذرات واقع شده است، پوشش‌دهی می‌شوند. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های تبخیر گرمایی^{۲۵}، روش کندوپاش^{۲۶}، پوشش‌دهی به روش لیزر پالسی^{۲۷} اشاره کرد. پوشش‌دهی شیمیایی شامل یک سیال است که در سطح جامد دستخوش تغییرات شیمیایی می‌شود و در نتیجه روی سطح زیرلایه یک لایه نازک جامد را به جا می‌گذارد. این روش در فازهای مایع و گاز انجام می‌شود. پوشش‌دهی از فاز مایع نیز شامل فرآیندهای الکتریکی و مکانیکی می‌باشد. در روش‌های فیزیکی محلول لایه-نشانی مربوط را به صورت‌های مختلف مانند لایه‌نشانی جرقه‌زنی کاتودیک^{۲۸}، اسپری^{۲۹} و سل-ژل^{۳۰} بر روی زیرلایه مورد نظر پوشش‌دهی می‌کنند [۵۵].

²⁵ Thermal Evaporation

²⁶ Sputtering Method

²⁷ Laser Pulse Coating

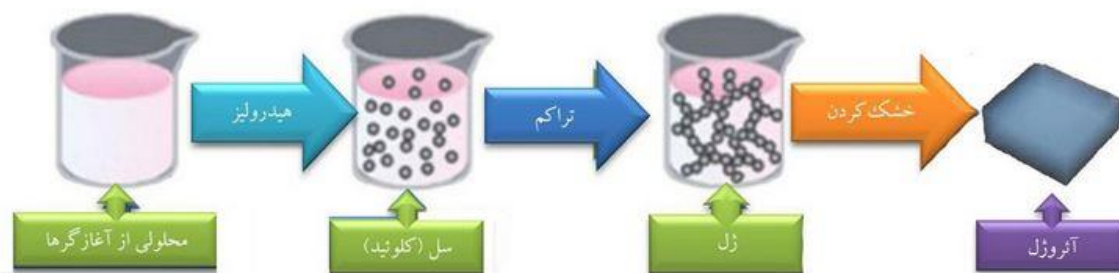
²⁸ Cathodic Arc Coating

²⁹ Spray

³⁰ Sol-gel

۴-۱-۲ پوشش دهی به روش سل-ژل (sol-gel)

در شیمی سل-ژل، پیش ماده‌های مولکولی به ذراتی با ابعاد نانومتری تبدیل می‌شوند. عبارت سل-ژل برای توصیف گسترده‌ایی از فرآیندها که در آن ژل‌ها از تعلیق کلوئیدی^{۳۱} سل‌ها تولید می‌شوند به کار می‌رود. سل طبق تعریف به پخش ذرات کلوئیدی و یا پلیمری در داخل مایعات اطلاق می‌شود. سل-ژل روش شیمیایی فیزیکی است که در آن عمل انباشت از فاز مایع صورت می‌گیرد و شامل گذار از فاز مایع (سل) به یک فاز جامد (ژل) می‌باشد [۵۶]. فرآیند سل-ژل، یک روش سنتز پایین به بالا محسوب می‌شود. در این فرآیند، محصولات نهایی در اثر انجام تعدادی واکنش شیمیایی برگشت ناپذیر به وجود می‌آیند. در طی این واکنش‌ها، مولکول‌های همگن اولیه (سل) به یک مولکول نامحدود، سنگین و سه بعدی به نام ژل تبدیل می‌شوند. تبدیل سل به ژل طی یک فرآیند موسوم به فرآیند تراکم، انجام و منجر به تولید ژل خیس می‌شود. شکل (۴-۱) طرحواره‌ای از مراحل تبدیل سل به ژل را نشان می‌دهد [۳۲].



شکل ۴-۱: طرحواره‌ای از مراحل مختلف سل-ژل [۳۲].

در فرآیند سل-ژل، تبدیل سل به ژل معمولاً با تغییر pH یا تغییر غلظت محلول انجام می‌شود. از مزیت‌های اصلی فرآیند سل-ژل می‌توان به خلوص بالای محصول تولیدی، توزیع باریک اندازه ذرات و دستیابی به نانو ساختاری

³¹ Keloid

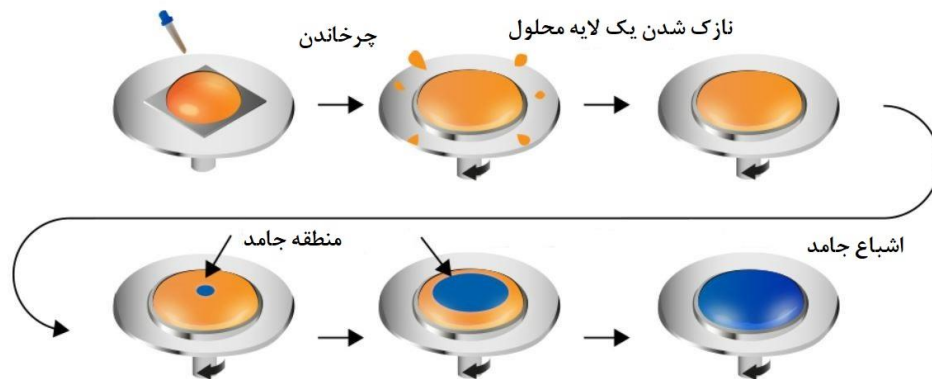
یکنواخت در دمای پایین اشاره کرد. معمولاً از این روش، برای سنتز نانو اکسیدهای فلزی استفاده می‌شود. امکان ایجاد لایه نازک با ضخامت ۵۰ - ۵۰۰ نانومتر، با روش سل-ژل وجود دارد. برای این منظور، می‌توان از روش‌های مختلف پوشش‌دهی مانند پوشش‌دهی چرخشی^{۳۲} و پوشش‌دهی غوطه‌وری^{۳۳} استفاده کرد [۳۲].

۴-۱-۲-۱ پوشش‌دهی چرخشی

طرحواره فرآیند پوشش‌دهی چرخشی در شکل (۴-۲) معرفی می‌شود. این روش وابسته به نیروی گریز از مرکز است. در این روش، بستر بر روی صفحه دواری که قابل چرخیدن است قرار می‌گیرد و محکم (که به وسیله اعمال یک خلاء) به آن می‌چسبد. سپس مقدار معینی از محلول حاوی ماده در مرکز زیرلایه قرار داده می‌شود و صفحه شروع به چرخش می‌کند. در اثر چرخش زیرلایه، یک لایه بسیار نازک از ماده مورد نظر بر سطح آن پخش می‌شود و پس از خشک شدن بستر، ماده پوشش داده شده بر زیرلایه، پوشش‌دهی می‌شود. پوشش‌دهی چرخشی، لایه‌هایی با ضخامت قابل تنظیم و یکنواخت را ایجاد می‌کند. ضخامت لایه نهایی و ویژگی‌های دیگر به طبیعت ماده پوشش داده از قبیل چسبندگی، آهنگ خشک شدن، کشش سطحی و پارامترهای انتخاب شده برای فرآیند چرخشی بستگی دارد. یکی از خاصیت مهم در پوشش‌دهی چرخشی، تکرار پذیری است [۵۸].

³² Spin-coating

³³ Dip-coating



شکل ۴-۲: طرحواره‌ای از فرآیند پوشش‌دهی چرخشی [۵۷].

۴-۱-۳ پوشش‌دهی به روش رسوب گذاری حمام شیمیایی (CBD) ۳۴

رسوب گذاری حمام شیمیایی نامی است که به تکنیک‌های مختلفی اطلاق می‌شود که با غوطه‌ور کردن زیرلایه (یک یا چند بارها) در محلول پیش‌ساز (اغلب آبی) می‌توان لایه‌هایی از ترکیبات جامد معدنی غیر فلزی جامد روی زیرلایه تولید کرد. کنترل دما (معمولاً کمتر از 100°C)، pH و غلظت محلول، فاز جامد را برای خارج کردن و تشکیل لایه بر روی بستر، اغلب بدون هیچ گونه عملیات حرارتی بعدی ایجاد می‌کند. تولید چنین پوشش‌هایی در دمای کمتر از 100°C باعث می‌شود موادی که قادر به تحمل درجه حرارت بالا مانند پلیمرها نیستند، پوشش داده می‌شوند. تجهیزات مورد نیاز CBD بسیار ساده‌تر از تجهیزات مورد استفاده برای پوشش‌دهی لایه در روش فاز بخار است [۵۹]. یکی از اشکالات این روش، اتلاف محلول پس از هر بار پوشش‌دهی است. در میان روش‌های پوشش‌دهی مختلف، روش رسوب گذاری حمام شیمیایی، لایه‌هایی سخت، یکنواخت، مسنجم و پایداری را ایجاد می‌کند، که توسط فرآیند نسبتاً ساده‌تری تکرار پذیر است [۶۰].

³⁴ Chemical bath deposition

۴-۱-۴ پوشش‌دهی به روش کندوپاش^{۳۵}

روش کندوپاش یکی از انواع روش‌های پوشش‌دهی فیزیکی از فاز بخار محسوب می‌شود. مانند سایر روش‌های پوشش‌دهی فیزیکی تحت خلا، روش کندوپاش نیز شامل تبخیر ماده منبع، انتقال بخار از منبع به بستر و تشکیل لایه نازک روی بستر با انباشت بخار منبع مورد نظر است. در روش کندوپاش، برای این که ماده منبع به فاز بخار خود منتقل می‌شود، از برهمکنش فیزیکی ذره‌هایی که ماده منبع یا هدف^{۳۶} برخورد می‌کنند، استفاده می‌شود. ماده هدف که به ولتاژ منفی متصل است، نقش کاتد را دارد. با بمباران و برخورد ذرات پر انرژی به سطح هدف، اتم‌ها یا مولکول‌های آن از سطح جدا شده و به بیرون پرتاب می‌شوند و در میدان ایجاد کننده پلاسما شتاب می‌گیرند. زیرا لایه به ولتاژ مثبت متصل است و در واقع آند است و لایه‌ای از جنس هدف روی آن انباشت می‌شود. در این روش، ابتدا فشار اولیه به 10^{-6} و 10^{-10} تور می‌رسد و از آنجایی که متداول‌ترین شیوه برای فراهم کردن یون و تولید پلاسما، عبور مداوم گازی مانند آرگون است، با ورود این گاز به محفظه، فشار به ۱ تا ۱۰۰ تور افزایش می‌یابد. گاز یا مخلوطی از گازهای مختلف با فشاری حدود چند تا چند صد میلی‌تور را به داخل محفظه کندوپاش وارد می‌شوند. از آنجایی که آرگون نسبت به سایر مواد کندوپاش کننده سنگین‌تر است، ضریب نشر ثانویه بزرگتری دارد یعنی می‌تواند اتم‌ها یا مولکول‌های بیشتری را از سطح هدف جدا کند، از این رو متداول‌ترین گازی است که برای تولید پلاسما در روش کندوپاش به کار برده می‌شود. چنانچه ولتاژ منبع تغذیه مستقیم^{۳۷} (DC) باشد، کندوپاش مستقیم نام دارد و معمولاً برای پوشش‌دهی فلزات به کار گرفته می‌شود. برای پوشش‌دهی مواد عایق و نیمرسانا از پتانسیل فرکانس رادیویی (RF)^{۳۸} استفاده می‌شود. از مزایای روش کندوپاش این است که هر ماده‌ای را می‌توان با این روش تبخیر و پوشش‌دهی کرد. بنابراین بسیاری از مواد که طی یک فرآیند شیمیایی قابل تولید

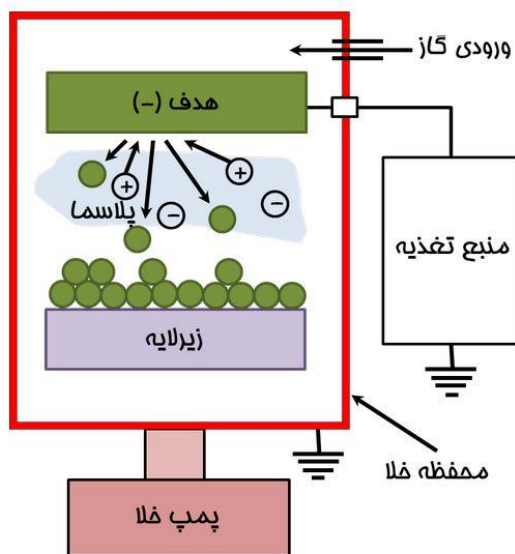
^{۳۵} Sputtering

^{۳۶} Target

^{۳۷} Direct Current

^{۳۸} Radio Frequency

نیستند یا برای تبخیر حرارتی به گرما زیادی نیاز دارند، با استفاده از روش کندوپاش می‌توانند پوشش‌دهی شوند [۶۱]. از معایب این روش، کاهش سرعت پوشش‌دهی و محدودیت در استفاده برای زیرلایه‌های بزرگ است. شکل (۳-۴) طرحواره‌ای از یک دستگاه کندوپاش را نشان می‌دهد.

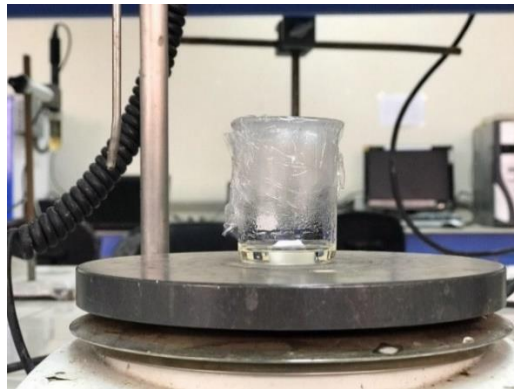


شکل ۳-۴: شمایی از سیستم لایه‌نشانی کندوپاش [۶۱].

۲-۴ بخش دوم: روش‌های سنتز

در این بخش به نحوه تهیه لایه بذر ZnO به روش سل-ژل چرخشی و نانومیله‌های ZnO به روش رسوب گذاری حمام شیمیایی بر زیرلایه‌های شیشه‌ای (لام میکروسکوپی) و FTO با ضخامت ۱/۶ mm و مقاومت سطحی در حدود ۱۵Ω پرداخته می‌شود. نانومیله‌های ZnO با مقادیر pH و مدت زمان لایه‌نشانی متفاوت، سنتز شدند. در انتها ساختار کامپوزیت ZnO/CdTe با استفاده از روش کندوپاش تهیه شد. برای ساخت محلول لایه‌نشانی ZnO از استات روی دی هیدراته $Zn(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ به عنوان پیش ماده، ۲-متوکسی اتانول $C_3H_8O_2$ به عنوان حلال و مونواتانول‌آمین $C_6H_{15}NO$ (MEA) به عنوان پایدار ساز استفاده شد. تمام مواد استفاده شده ساخت

شرکت مرک^{۳۹} بودند. نسبت مولی مونواتانول آمین به استات روی دی هیدراته ۱:۱ انتخاب شد. غلظت استات روی دی هیدراته ۰/۳۵ مولار است. برای تهیه سل به حجم ۱۰ ml ، ۰/۷۶ g از پودر استات روی دی هیدراته، ۱۰ ml از محلول ۲-متوکسی اتانول و ۰/۲۳ میلی لیتر از محلول مونواتانول آمین در یک بشر ریخته شد و بر روی همزن مغناطیسی به مدت ۲ ساعت در دمای ۶۰ °C برای بدست آمدن یک محلول شفاف و یکنواخت، شکل (۴-۴)، هم خورد. قبل از استفاده از محلول لایه نشانی دمای آن به دمای اتاق پاینده شد.



شکل ۴-۴: نمایی از محلول لایه نشانی بذر ZnO تهیه شده.

برای حذف هرگونه آلودگی از سطح زیرلایه و به منظور بالا بردن کیفیت مکانیکی و چسبندگی لایه به زیرلایه شیشه‌ای، قبل از فرآیند پوشش دهی عمل تمیز کاری انجام شد. برای پاک کردن زیرلایه‌های شیشه‌ای از آلودگی ابتدا این زیرلایه‌ها را با استفاده از مایع ظرفشویی شستشو دادیم، سپس در محلولی از آب مقطر، اتانول و استون به مدت حدود ۱۰ دقیقه در دستگاه آلتراسونیک قرار داده شدند. سپس آن‌ها را با آب مقطر آبکشی کرده و با استفاده از سشوار خشک شدند. برای پاک کردن زیرلایه‌های FTO ابتدا آن را با استفاده از مایع ظرفشویی شسته، سپس با آب مقطر آبکشی و در محلولی از آب مقطر و اتانول به مدت حدود ۱۶ دقیقه در دستگاه آلتراسونیک قرار داده شد. در انتها بسترها با آب مقطر آبکشی و با سشوار خشک شدند.

³⁹ Merk

۴-۲-۱ نحوه رشد بذر ZnO

در این تحقیق برای رشد بذر ZnO از دستگاه اسپین چرخشی، استفاده شده است، شکل (۴-۵). در این دستگاه بستر با اعمال خلا در محل مربوط محکم شده و سپس محلول لایه‌نشانی به وسیله یک قطره چکان به سطح زیرلایه انتقال داده می‌شود



شکل ۴-۵: دستگاه پوشش‌دهی چرخشی واقع در آزمایشگاه نانوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود.

سرعت چرخش در فرآیند لایه‌نشانی ۳۰۰۰ rpm و مدت چرخش نیز ۲۰ ثانیه تنظیم شد. پس از لایه‌نشانی فرآیند خشک‌سازی به مدت ۱۰ دقیقه در یک کوره الکتریکی در دمای ۳۰۰ °C انجام شد. برای داشتن ضخامت کافی، فرآیند پوشش‌دهی و خشک‌سازی ۹ بار تکرار شد. در نهایت لایه حاصل در دمای ۵۰۰ °C به مدت ۱ ساعت بازپخت شد.

۴-۲-۲ تهیه محلول لایه‌نشانی جهت رشد نانومیله‌های ZnO

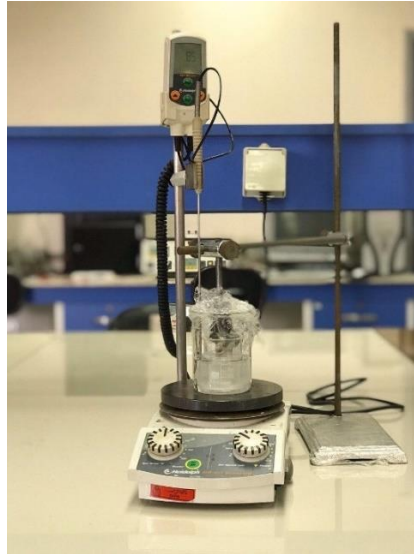
برای رشد نانومیله‌های ZnO، از روش رسوب گذاری حمام شیمیایی استفاده شد. برای تهیه محلول لایه‌نشانی از نیترات روی $Zn(NO_3)_2$ و هگزامتیلن تترامین $C_6H_{12}N_4$ ساخت شرکت مرک به عنوان پیش ماده، استفاده شد. از

آب مقطر دو بار یونیزه شده به عنوان حلال استفاده شد. برای تهیه ۶۰ ml محلول لایه‌نشانی با غلظت ۰/۰۷ ، ۰/۶۲ گرم از نیترات روی و ۰/۲۹ گرم از هگزامتیلن تترامین را هر کدام جداگانه در ۳۰ ml آب مقطر دو بار یونیزه شده حل و بر روی هم‌زن مغناطیسی به مدت ۳۰ دقیقه در دمای اتاق هم‌خوردند. سپس محلول هگزامتیلن تترامین قطره قطره به محلول نیترات روی در حال چرخش اضافه شد. محلول حاصل به مدت ۱ ساعت در دمای ۷۰ °C بر روی هم‌زن مغناطیسی هم‌می‌خورد، شکل (۴-۶). بعد از یک ساعت محلول در دستگاه آلتراسونیک در دمای ۷۰ °C به مدت ۲۰ دقیقه قرار داده شد تا محلول همگنی بدست آید. برای اندازه‌گیری pH محلول از یک pH سنج، مدل Metrohm استفاده شد. نانومیله‌های ZnO با استفاده از محلول لایه‌نشانی با مقادیر pH برابر ۵/۵ و ۱۱ سنتز شدند. فرآیند رشد به ترتیب با پارامترهای: pH= ۵/۵ و ۳ ساعت مدت زمان پوشش‌دهی، pH= ۱۱ و ۳ ساعت مدت زمان پوشش‌دهی و pH= ۱۱ و ۵ ساعت مدت زمان پوشش‌دهی، انجام می‌شود. دمای رشد (C) ۸۵ و غلظت محلول (۰/۰۷ مولار) برای تمام نمونه‌ها ثابت بود.



شکل ۴-۶: محلول نیترات روی و هگزامتیلن تترامین.

برای تغییر pH از محلول آمونیاک ۲۵٪ ساخت شرکت مرک استفاده شد. بعد از آماده‌سازی محلول، زیرلایه‌ها به صورت عمودی با استفاده از یک گیره، شکل (۴-۷) در محلول تحت دمای ۸۵ °C قرار داده شدند.



شکل ۴-۷: نمایی از فرآیند پوشش‌دهی نانومیله‌های ZnO به روش رسوب گذاری حمام شیمیایی.

برای تغییر pH از محلول آمونیاک ۲۵٪ ساخت شرکت مرک استفاده شد. بعد از آماده سازی محلول، زیرلایه‌ها به صورت عمودی با استفاده از یک گیره، شکل (۴-۷) در محلول تحت دمای 85°C قرار داده شدند. برای یکنواخت سازی دمای کل محلول، ظرف حاوی محلول را در یک ظرف بزرگتر که حاوی آب بود قرار داده شد. بعد از اتمام هر یک از فرآیندهای پوشش‌دهی زیرلایه را از محلول بیرون آورده و اجازه می‌دهیم خنک شود، سپس آن را با آب مقطر آبکشی کرده و جهت خشک سازی به مدت ۱ ساعت در یک کوره در دمای 200°C قرار داده شدند.

۴-۲-۵ تهیه لایه کامپوزیت ZnO/CdTe

برای تهیه لایه کامپوزیت ZnO/CdTe از روش کندوپاش استفاده شد. بسترهای FTO مورد استفاده همان زیر-لایه‌هایی هستند که بر روی آن‌ها نانومیله‌های ZnO به روش رسوب گذاری حمام شیمیایی سنتز شدند. برای پوشش‌دهی CdTe از ماده هدف CdTe با خلوص ۹۹/۹۹۹٪ و قطر ۲ اینچ، ساخت شرکت Kurt J. Lesker استفاده شد. ابتدا زیرلایه‌ها را در محل نگهداری قرار می‌دهیم. فاصله محل نگهداری تا محل ماده هدف ۷ cm تنظیم شد. سپس درب محفظه بسته و فشار داخلی محفظه را به 5×10^{-5} Torr کاهش یافت. با وارد کردن گاز بی اثر آرگون

با نرخ ۳۰ sccm به درون محفظه فشار درون محفظه را به 2×10^{-2} Torr افزایش یافت. فرآیند پوشش‌دهی در این تحقیق با استفاده از توان ۱۰۰ W انجام شد. فرآیند پوشش‌دهی در دمای اتاق صورت می‌گیرد و مدت زمان پوشش‌دهی برای تمام نمونه‌ها ۱۰ دقیقه بود. بعد از اتمام فرآیند پوشش‌دهی، نمونه‌ها به مدت ۷ ثانیه در محلول CdCl_2 خیسانده شده و سپس در کوره خلا قرار داده شدند. سپس گاز بی اثر آرگون را با نرخ ۱۰۰ sccm وارد کوره شد، نمونه‌ها در دمای 400°C به مدت ۱ h باز پخت شدند.

فصل پنجم:

نتایج حاصل از مشخصه‌یابی نمونه‌های سنتز شده

۵-۱ مقدمه

در این فصل به بررسی خواص ساختاری، مورفولوژی سطح، اپتیکی و الکتریکی نمونه‌های لایه بذر اکسید روی سنتز شده (بخش ۵-۲) و نانومیله‌های اکسید روی در سنتز شده در (بخش‌های (۵-۳)، (۵-۴)، (۵-۵)) پرداخته شده است. در ادامه در بخش (۵-۶) به بررسی نانومیله اکسید روی پوشش داده شده با کادمیوم تلوراید برای کاربرد در سلول خورشیدی می‌پردازیم. مشخصات نمونه‌های مربوط در جدول (۵-۱) گزارش شده است.

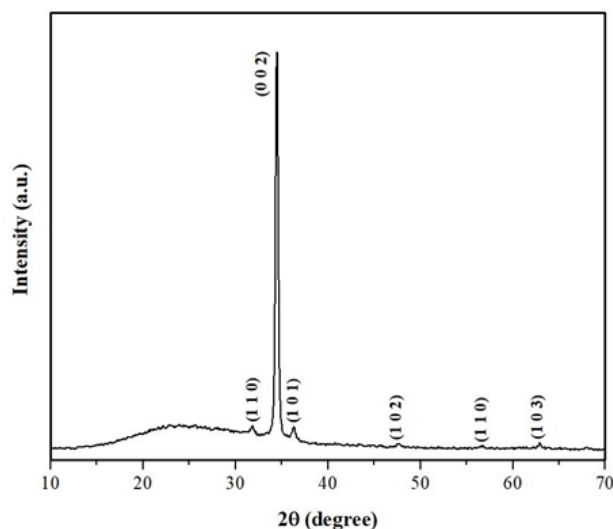
جدول ۵-۱: مشخصات نمونه‌های تهیه شده در شرایط مختلف.

نمونه	pH	مدت زمان لایه‌نشانی	نوع زیرلایه	روش لایه نشانی	ضخامت لایه
NB1	۵/۵	۳ ساعت	شیشه	رسوب گذاری حمام شیمیایی	۲/۶۵ μm
NB2	۱۱	۳ ساعت	شیشه	رسوب گذاری حمام شیمیایی	۳/۲۵ μm
NB3	۱۱	۵ ساعت	شیشه	رسوب گذاری حمام شیمیایی	۵/۴۵ μm
Z1	۵/۵	۳ ساعت	FTO	رسوب گذاری حمام شیمیایی	۱ μm
Z2	۱۱	۳ ساعت	FTO	رسوب گذاری حمام شیمیایی	۴ μm
Z3	۱۱	۵ ساعت	FTO	رسوب گذاری حمام شیمیایی	۵/۴ μm
FZ1		نمونه Z1 پوشش داده شده با کادمیوم تلوراید		کندوپاش	۲/۸ μm
FZ2		نمونه Z2 پوشش داده شده با کادمیوم تلوراید		کندوپاش	۵/۲ μm
FZ3		نمونه Z3 پوشش داده شده با کادمیوم تلوراید		کندوپاش	۵/۷ μm

۲-۵ بررسی خواص ساختاری، مورفولوژی سطح، اپتیکی لایه اکسید روی بذر رشد داده شده به روش پوشش دهی چرخشی بر زیر لایه شیشه.

۱-۲-۵ الگوی پراش پرتو ایکس (XRD)

شکل (۱-۵) الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) لایه اکسید روی بذر را نشان می‌دهد. طیف XRD بدست آمده برای لایه نشانگر تشکیل لایه بلوری اکسید روی شامل قله‌های مربوط به پراش از صفحات (۰ ۰ ۲)، (۱ ۰ ۰)، (۰ ۱ ۰)، (۱ ۰ ۲)، (۱ ۱ ۰) و (۱ ۰ ۳)، با ساختار ورتسایت (فاز شش گوشه و گروه فضایی: P63mc) مطابق با کارت استاندارد (JCPDS ۰۱۰-۷۹۰-۲۰۵) است. با مقایسه شدت قله‌های پراش دیده می‌شود که راستای (۰ ۰ ۲) راستای ترجیحی بلور می‌باشد. با تحلیل این داده‌ها می‌توان به اطلاعات مهمی از جمله اندازه بلورک‌ها (D) با استفاده از رابطه شرر (معادله ۲-۲)، فاصله بین صفحات بلوری (d) (معادله ۱-۲)، میزان کرنش (ε) (معادله ۲-۳) و چگالی درفتگی‌ها (σ) (معادله ۴-۲) دست یافت که نتیجه این محاسبات در جدول (۲-۵) گزارش شده است.



شکل ۱-۵: طیف XRD لایه بذر اکسید روی رشد داده شده به روش لایه نشانی چرخشی.

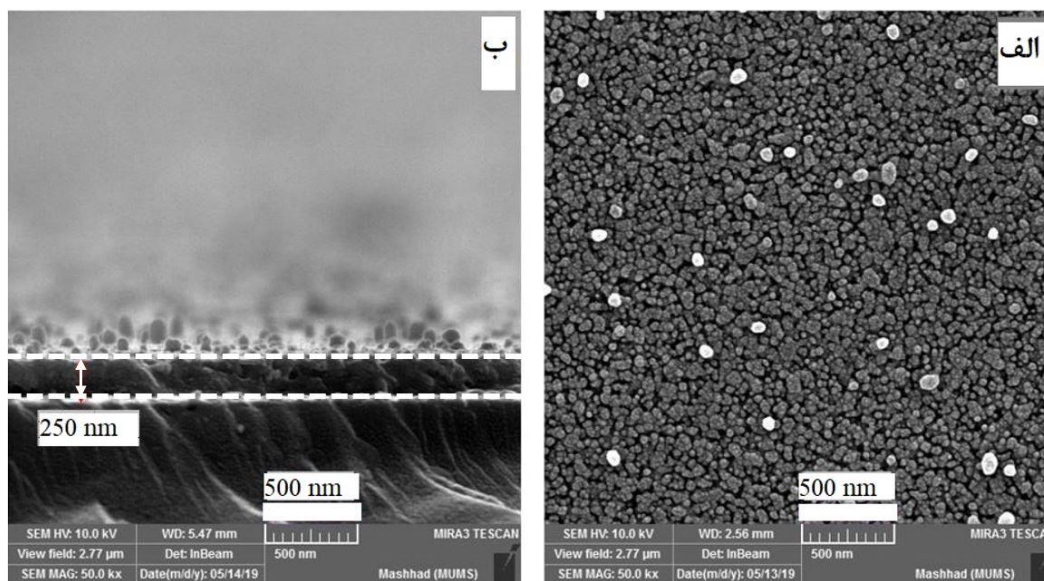
لازم به ذکر است قله پهن مشاهده شده در تصویر XRD در محدوده 20° - 30° مربوط به زیر لایه شیشه‌ای است.

جدول ۲-۵: نتایج بدست آمده از پراش پرتو X از لایه بذر و ضخامت لایه.

صفحه	D (nm)	d (nm)	ϵ	$\sigma \times 10^{-3}$ (nm) ⁻²	FWHM (°)	ثابتهای شبکه Å	ضخامت nm
(۰۰۲)	۲۵/۱	۰/۲۶۵	۰/۰۲	۱/۵	۰/۳۵۲	a=b=3.06 c= 5.22	۲۵۰

۲-۲-۵ بررسی مورفولوژی

شکل (۲-۵) تصاویر FESEM الف) دید از بالا (سطح) و ب) دید از پهلو (مقطع)، از نانوذرات اکسید روی رشد داده شده به روش پوشش دهی چرخشی با ۳۰۰۰ دور بر دقیقه و مدت چرخش ۲۰ ثانیه را نشان می دهد.

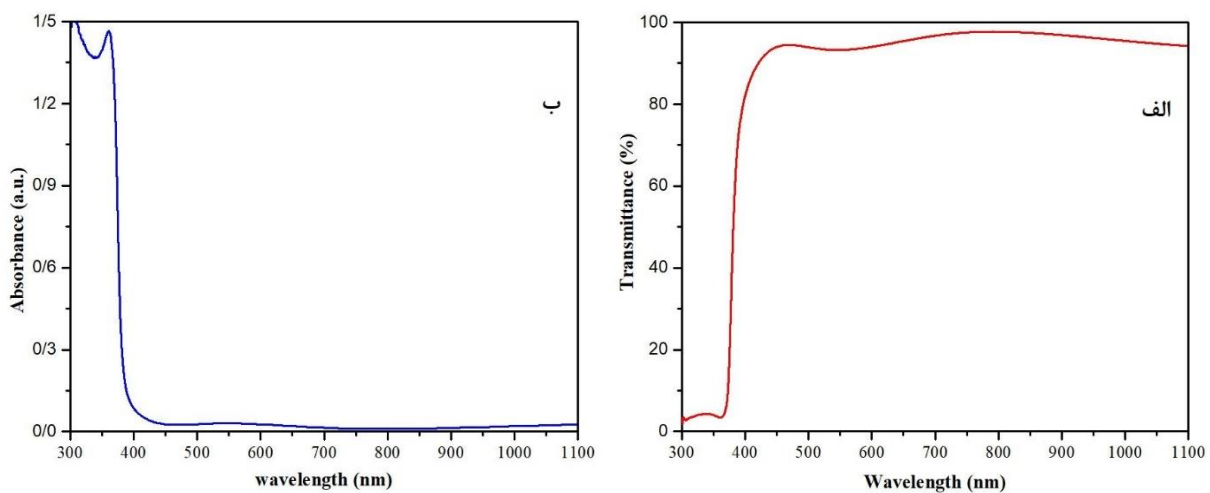


شکل ۲-۵: نمایی از تصاویر FESEM الف) دید از بالا ب) دید از پهلو از نانوذرات اکسید روی در مقیاس 500 nm.

با استفاده از تصاویر FESEM از مقطع ضخامت لایه ۲۵۰ nm اندازه‌گیری شد. ساختار لایه بذر شامل ذرات نسبتاً یکنواختی به اندازه متوسط ۶۰ nm می‌باشد. سطح لایه بذر همچنین شامل ذرات پراکنده نسبتاً بزرگتری با ابعاد متوسط ۷۰ nm می‌باشد. این ذرات در تصویر FESEM به رنگ روشن‌تر دیده می‌شوند.

۵-۲-۳ خواص اپتیکی

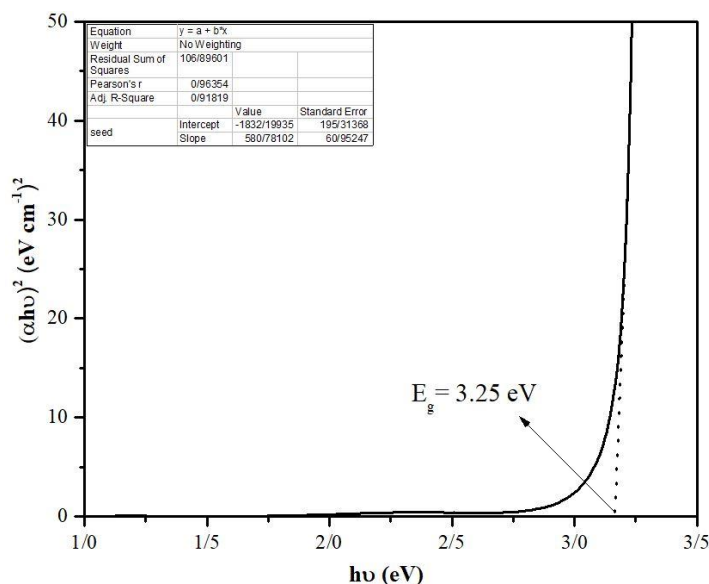
جهت بررسی خواص نوری نمونه، طیف‌های عبور (T) و جذب (A) در بازه طول موجی ۳۰۰-۱۱۰۰ nm اندازه‌گیری شد که نتایج آن در تصاویر (۵-۳-الف و ب) نشان داده شده است.



شکل ۵-۳: نمایی از طیف‌های الف عبور ب جذب، لایه اکسید روی بذر.

مقدار متوسط طیف عبور نور برای لایه اکسید روی در محدوده مرئی (۴۰۰-۸۰۰ nm)، حدود ۹۳٪ است که این میزان عبور نشان دهنده شفافیت بالای لایه بذر می‌باشد. از شکل (۵-۳-ب) مشاهده می‌شود لبه جذب لایه در محدوده طول موجی ۳۷۰ nm رخ می‌دهد. با استفاده از طیف تراگسیل لایه می‌توان گاف نواری را محاسبه کرد. برای این منظور با توجه به روابط (۲-۷) و (۲-۸) ابتدا ضریب جذب (α) و سپس با استفاده از آن گاف نواری محاسبه شدند. ضخامت لایه با توجه به تصویر دید از پهلو FESEM شکل (۵-۲-ب) ۲۵۰ nm تخمین زده شد.

شکل (۴-۵) نمودار $(\alpha h\nu)^2$ بر حسب انرژی فرودی فوتون برای لایه بذر اکسید روی را نشان می‌دهد. مقدار گاف نواری بدست آمده برای لایه بذر اکسید روی 3.25 eV است که در توافق با مقادیر گزارش شده برای لایه‌های نازک ZnO می‌باشد.



شکل ۴-۵: نمودار $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ برای لایه اکسید روی بذر.

۳-۵ بررسی خواص ساختاری، مورفولوژی، اپتیکی و الکتریکی نانومیله‌های اکسید روی رشد یافته بر بستر شیشه‌ای

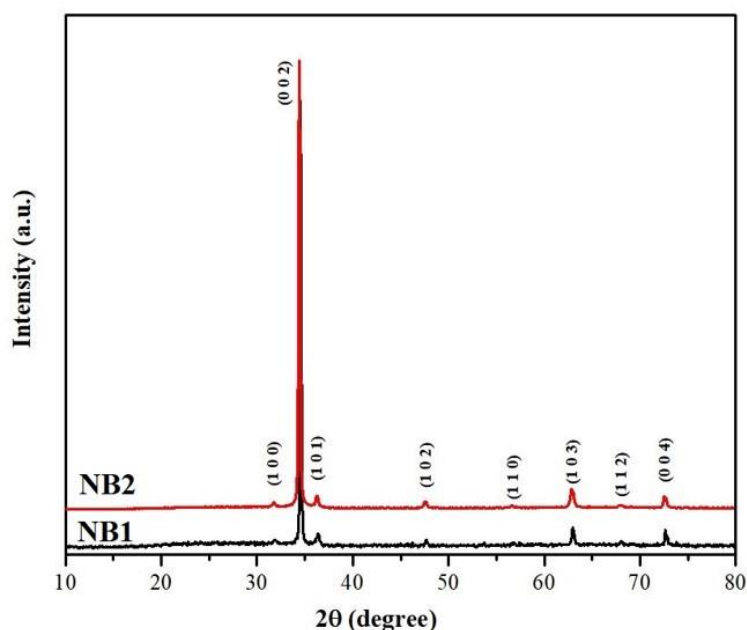
در این بخش به بررسی خواص نانومیله‌های اکسید روی سنتز شده به روش رسوب‌دهی حمام شیمیایی در شرایط مندرج در جدول ۱-۵ مختلف، که هر یک از این شرایط در جدول ۱-۵ توضیح داده شده‌اند پرداخته شده است (NB1، NB2، NB3). در ادامه به مقایسه و بررسی نمونه‌های NB1 با NB2 و سپس نمونه‌های NB2 با NB3 می‌پردازیم.

می‌پردازیم

۵-۳-۱ مقایسه خواص فیزیکی دو نمونه‌های NB1 و NB2 (بررسی اثر pH محلول لایه‌نشانی)

۵-۳-۱-۱ الگوی پراش پرتو ایکس (XRD)

تشکیل ساختار بلوری و نوع آن و نیز جهت‌یابی صفحات بلوری نانومیله‌های اکسید روی را می‌توان توسط تفرق سنج پرتو X تعیین کرد. شکل (۵-۵) طیف XRD نانومیله‌های اکسید روی تهیه شده به روش رسوب حمام شیمیایی در دو pH متفاوت را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۵: الگوهای XRD نانومیله‌های اکسید روی سنتز شده در دو pH متفاوت (NB1 و NB2).

الگوهای XRD نشانگر تشکیل لایه بلوری اکسید روی با قله‌های مربوط به پراش صفحات (۰ ۰ ۲)، (۱ ۰ ۰)، (۱ ۰ ۰ ۰)، (۱ ۰ ۲)، (۱ ۰ ۳)، (۱ ۱ ۰)، (۱ ۱ ۲) و (۰ ۰ ۴)، در فاز ورتسایت با گروه فضایی: P63mc مطابق با کارت استاندارد (JCPDS 010-790-205) است. با مقایسه شدت قله‌های پراش دیده می‌شود که راستای ترجیحی جهت-گیری رشد بلور راستای (۰ ۰ ۲) با ثابت‌های شبکه $a = 3.01 \text{ \AA}$ و $c = 5.22 \text{ \AA}$ می‌باشد. با توجه به شکل (۵-۵) ملاحظه می‌شود که با افزایش pH از ۵/۵ به ۱۱ شدت قله مربوط به صفحه (۰ ۰ ۲) افزایش یافته است. با تحلیل

داده‌ها می‌توان به اطلاعات مهمی از جمله فاصله صفحات (d) (از معادله ۲-۱)، اندازه بلورکها (D) با استفاده از رابطه شرر (معادله ۲-۲)، میزان کرنش در شبکه بلوری (ε) (معادله ۳-۲) و چگالی درفتگی‌ها (σ) (معادله ۴-۲) دست یافت که نتیجه این محاسبات در جدول (۳-۵) گزارش شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش pH اندازه متوسط بلورکها کاهش یافته است.

جدول ۳-۵: نتایج بدست آمده از تحلیل الگوهای XRD از نمونه‌های مورد مطالعه و ضخامت لایه‌ها.

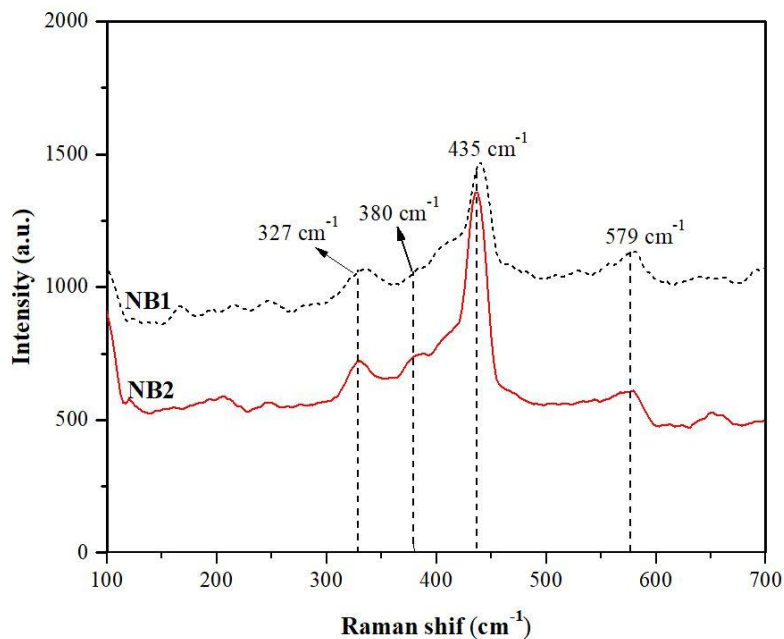
نمونه	صفحه	D (nm)	d (nm)	$\epsilon \times 10^{-3}$	$\sigma \times 10^{-4} (\text{nm})^{-2}$	FWHM (°)	ثابتهای شبکه Å	ضخامت μm
NB1	(۰ ۰ ۲)	۵۲/۱	۰/۲۶	۲/۲	۳/۶	۰/۱۶۴۶	a = b = 3 c = 5.2	۲/۶۵
NB2	(۰ ۰ ۲)	۴۱/۶	۰/۲۶	۲/۸	۵/۷۵	۰/۲۰۲۴	a = b = 3 c = 5.2	۳/۲۵

۵-۳-۱-۲-۵ طیف‌سنجی رامان

طیف‌های رامان نمونه‌های NB1 (خط مقطع) و NB2 (خط ممتد) در شکل (۵-۶) نشان داده شده است. مطالعات نشان می‌دهد که مدهای فعال رامان برای بلورهای اکسید روی مدهای E_1 ، $2E_2$ و A_1 هستند. مدهای قطبی A_1 و E_1 می‌توانند به دو مد اپتیکی عرضی (TO^{40}) و طولی (LO^{41}) تقسیم شوند. مد E_2 غیرقطبی و از دو مد فرکانس بالا و پایین تشکیل شده است [۶۲]. در طیف رامان نمونه‌ها قله‌های قوی‌تری در 327 cm^{-1} ، 380 cm^{-1} ، 435 و 579 cm^{-1} مشاهده می‌شود.

⁴⁰ Transverse optical

⁴¹ Longitudinal optical



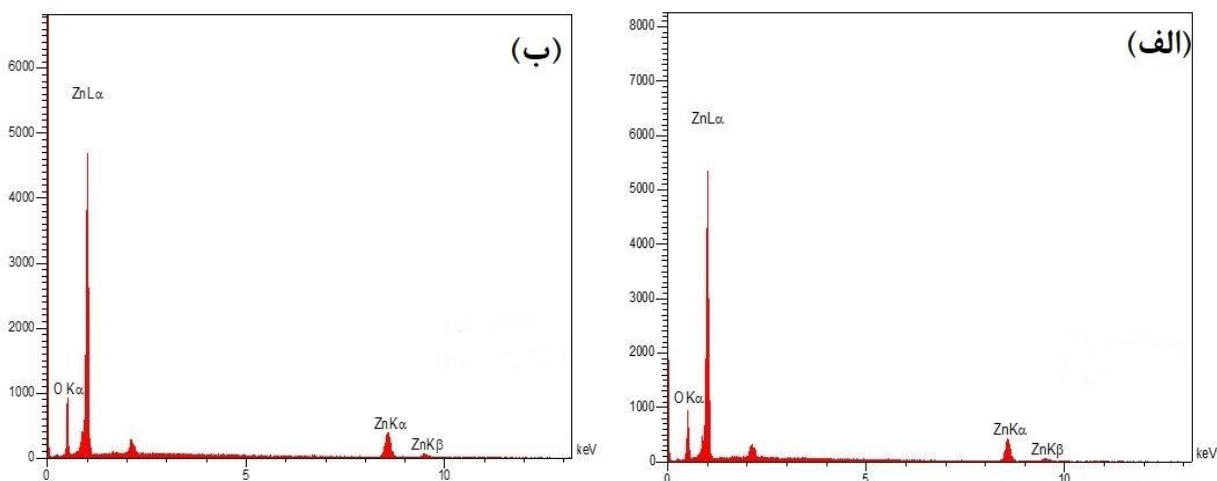
شکل ۵-۶: طیف‌های رامان نمونه‌های NB1 و NB2.

قله شدید در 435 cm^{-1} مربوط به مد E_2 (فرکانس بالا) است که ساختار ورتسایت نانومیله‌های اکسید روی را تایید می‌کند. قله 579 cm^{-1} واقع در بین مد نوری A_1 و E_1 ناشی از نقص اکسیژن است. قله در 380 cm^{-1} به مد عرضی A_1 اختصاص داده می‌شود و به دلیل ماهیت ناهمسانگرد در ثابت نیرو ظاهر می‌شود. قله 327 cm^{-1} به دلیل تقارن مدهای A_1 ناشی از فرآیند آکوستیکی قوی^{۴۲} به وجود می‌آید [۶۲]. مقایسه طیف‌های رامان دو نمونه نشان می‌دهد که با افزایش میزان pH قله‌های کمی تیز تر و قوی تر شده‌اند.

۵-۳-۱-۳-۵ طیف سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس (EDS)

شکل (۵-۷-الف و ب) تجزیه و تحلیل ترکیبی نانومیله‌های اکسید روی نمونه‌های NB1 و NB2 را نشان می‌دهد. درصد‌های وزنی و اتمی نمونه‌ها در جدول (۵-۴) گزارش شده‌اند. با توجه به این نتایج مشاهده می‌شود با افزایش pH میزان حضور Zn در نمونه NB2 نسبت به نمونه NB1 قدری افزایش یافته است.

⁴² Acoustic Overtone



شکل ۵-۷: طیف پراش انرژی پرتو ایکس برای نمونه (الف) NB1 و (ب) NB2.

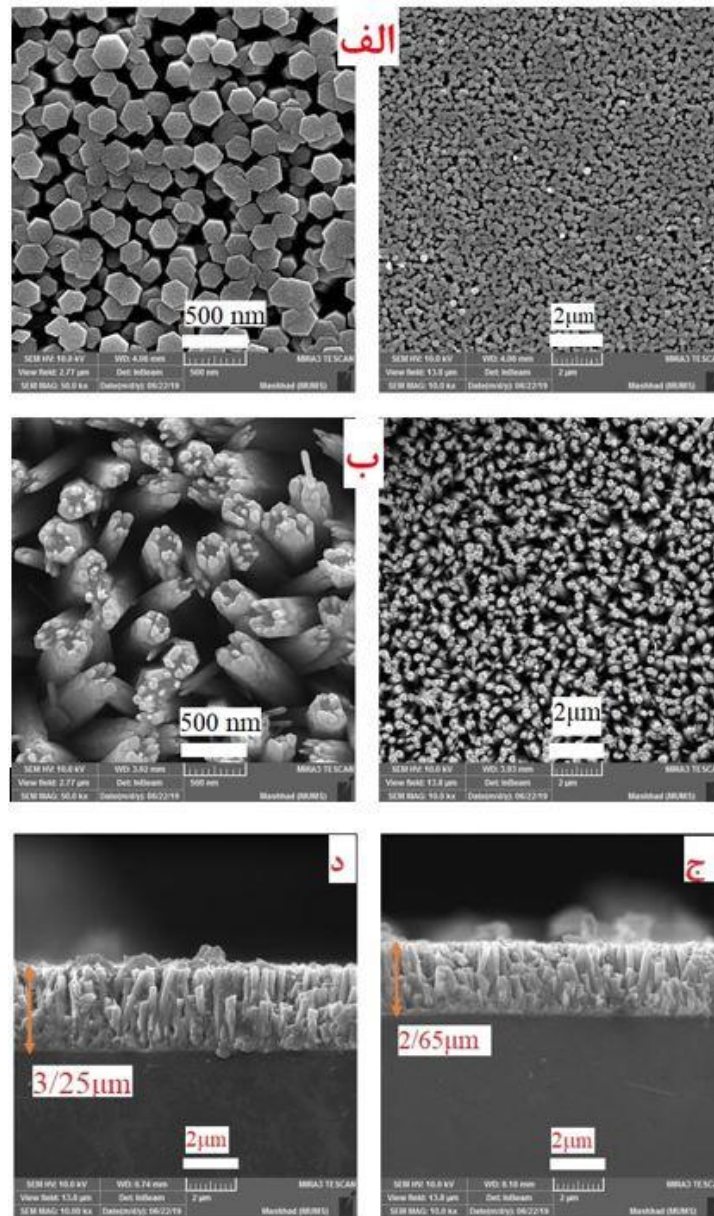
جدول ۵-۴: نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های EDS برای دو نمونه NB1 و NB2.

نمونه	درصد اتمی (A%)		درصد وزنی (W%)	
	Zn	O	Zn	O
NB1	۲۲/۱۴	۷۷/۸۶	۵۳/۷۴	۴۶/۲۶
NB2	۲۳/۶۵	۷۶/۳۵	۵۵/۸۶	۴۴/۱۴

۴-۱-۳-۵ بررسی مورفولوژی

برای بررسی مورفولوژی نانومیله‌های اکسید روی سنتز شده تصاویر FESEM آن‌ها ثبت شدند (شکل ۵-۸). نانومیله‌های سنتز شده با محلول در pH=۵/۵ دارای قطر و طول متوسط به ترتیب ۲۲۰ nm و ۲/۴ μm هستند. با افزایش pH به ۱۱ قطر و طول متوسط به ترتیب به ۲۵۰ nm و ۳ μm افزایش یافت. ضخامت

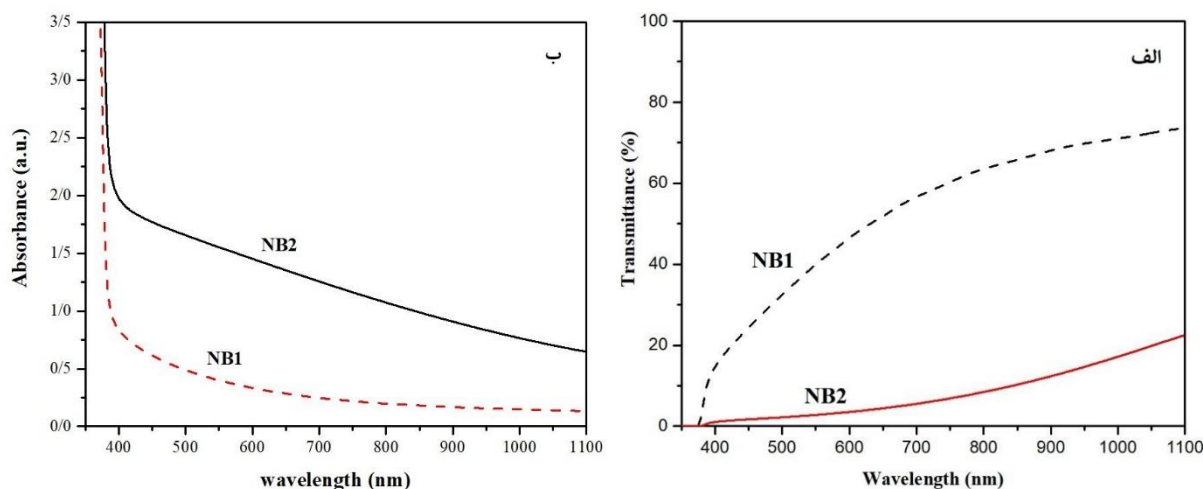
نمونه‌های NB1 و NB2 با توجه به تصویر دید از پهلو FESEM (شکل‌های ۵-۸-ج و د) به ترتیب $2/65 \mu\text{m}$ و $3/25 \mu\text{m}$ با احتساب لایه بذر (250 nm) اندازه‌گیری شدند.



شکل ۵-۸: تصاویر FESEM (الف) دید از بالا نمونه NB1 (ب) دید از بالا نمونه NB2 (ج) دید از پهلو نمونه NB1 (د) دید از پهلو نمونه NB2 در مقیاس‌های 500 nm و $2 \mu\text{m}$.

۵-۳-۱-۵ بررسی خواص اپتیکی

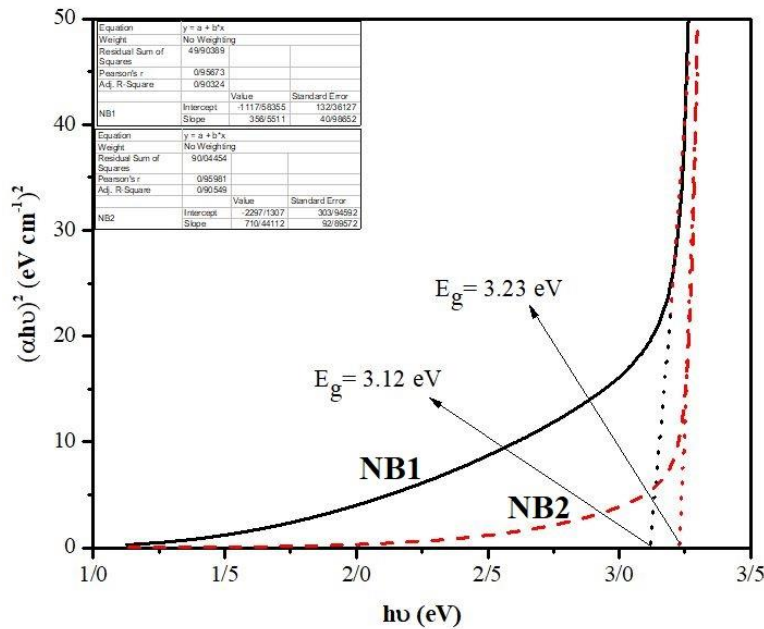
شکل (۵-۹-الف و ب) طیف‌های عبور و جذب نمونه‌های NB1 و NB2 را بر حسب تابعی از طول موج در محدوده ۳۰۰-۱۱۰۰ nm نشان می‌دهد.



شکل ۵-۹: تصاویر الف) طیف‌های عبور نمونه‌های NB1 و NB2 و ب) طیف‌های جذب نمونه‌های NB1 و NB2.

میزان عبور در نمونه NB1 (بیش از حدود ۵۰٪) به طور قابل توجهی از نمونه NB2 بیشتر است. کاهش ضریب عبور نور در نمونه NB2 نسبت به نمونه NB1 می‌تواند بدلیل ضخامت بیشتر لایه در نمونه NB2 ($3/25 \mu\text{m}$) در مقایسه با لایه نمونه دیگر ($2/65 \mu\text{m}$) و تغییرات مربوط به مورفولوژی سطح لایه‌ها (شکل ۵-۸-الف و ب) و نیز اندازه بلورک‌ها در این لایه‌ها (جدول ۵-۳) باشد. نمونه NB1 با سطح یکنواخت‌تر و هموار و نیز اندازه بلورک بزرگتر نسبت به نمونه NB2 که دارای تخلخل بیشتر در سطح و اندازه بلورک کوچکتری است، عبور اپتیکی بیشتری از خود نشان می‌دهد. طیف‌های جذب نمونه‌ها نشان می‌دهد که با افزایش pH نمونه از مقدار ۵/۵ به ۱۱ لبه جذب نمونه نیز از طول موج ۲۷۴ nm به ۳۸۱ nm منتقل می‌شود. با استفاده از طیف تراگسیل لایه‌ها می‌توان گاف نواری را محاسبه کرد. برای این منظور با توجه به روابط (۲-۷) و (۸-۲) ابتدا ضریب جذب (α) و سپس با

استفاده از آن گاف نواری محاسبه شدند. شکل (۱۰-۵) نمودار $(\alpha h\nu)^2$ برحسب انرژی فرودی فوتون برای دو نمونه NB1 و NB2 را نشان می‌دهد.

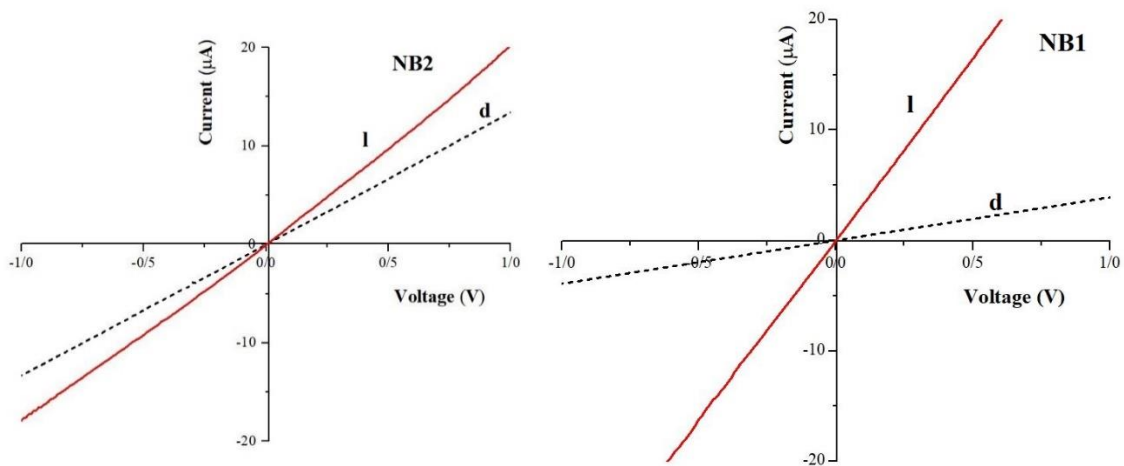


شکل ۵-۱۰: نمودارهای $h\nu - (\alpha h\nu)^2$ نمونه‌های NB1 و NB2.

گاف نواری نمونه‌های NB1 و NB2 به ترتیب 3.12 eV و 3.23 eV بدست آمدند یعنی با افزایش pH از $5/5$ به 11 گاف نواری افزایش یافته که ممکن است به دلیل اثر حبس کوانتومی باشد.

۵-۳-۱-۴ بررسی خواص الکتریکی

در این بخش برای بررسی خواص الکتریکی نمونه‌ها از اندازه‌گیری‌های ولتاژ-جریان و اثر هال استفاده شده است. نمودار جریان-ولتاژ نمونه‌ها در بازه -1 تا 1 ولت تحت تابش نور فرابنفش و در تاریکی توسط دستگاه پتاسیواستات اندازه‌گیری شد. شکل‌های (۵-۱۱-الف و ب) نمودارهای جریان-ولتاژ در شرایط تاریکی و روشنایی نمونه‌های را برای نمونه‌های NB1 و NB2 نشان می‌دهند. منحنی‌های I-V بدست آمده همگی خطی (اهمی) هستند.



شکل ۵-۱۱: نمودار جریان-ولتاژ در شرایط تاریکی و روشنایی دو نمونه NB1 و NB2.

رفتار فوتوالکتریکی نمونه‌ها در شرایط تاریکی (I_{dark}) و روشنایی (I_{light}) تحت تابش نور با نور فرابنفش مورد بررسی قرار گرفت. $I_{\text{photon}} / I_{\text{dark}}$ که نشان دهنده پاسخ گویی الکتریکی به فوتون‌های فرودی است، مقایسه نتایج نشان می‌دهد که با افزایش pH از ۵/۵ به ۱۱ نسبت $I_{\text{photon}} / I_{\text{dark}}$ کاهش یافته است. اندازه‌گیری‌های اثر هال نشان می‌دهد که نمونه‌های NB1 و NB2 لایه‌های اکسید روی رشد داده شده به روش رسوب حمام شیمیایی از نوع n هستند. همچنین مقادیر مقاومت ویژه (ρ)، رسانندگی (σ)، تحرک (μ)، غلظت حامل‌ها (n) و ضریب هال (R_H) اندازه‌گیری اثر هال در جدول (۵-۵) گزارش شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که افزایش pH محلول لایه‌نشانی باعث کاهش تراکم حامل‌ها و کاهش رسانندگی شده است.

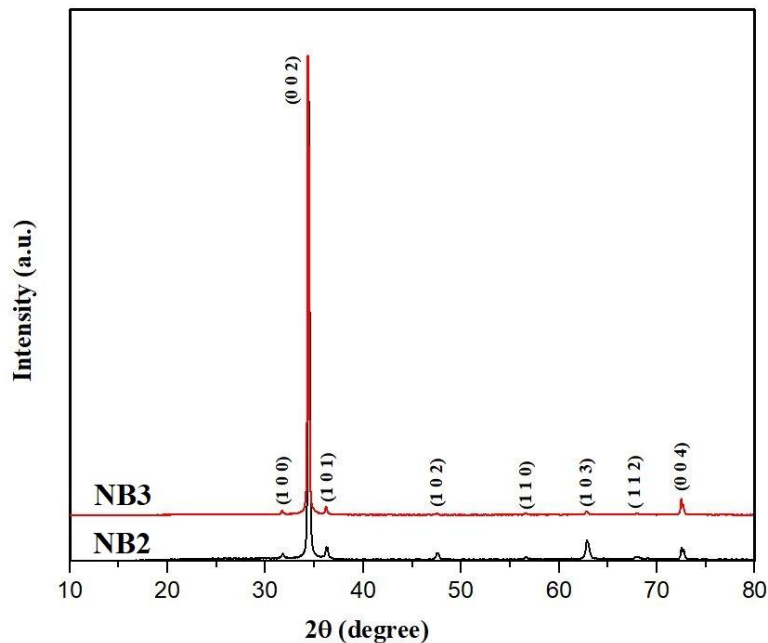
جدول ۵-۵: پارامترهای الکتریکی اندازه‌گیری شده در آنالیز اثر هال و پاسخ نوری برای نمونه‌های NB1 و NB2.

نمونه	NB1	NB2
$n (cm^{-3})$	$-2/83 \times 10^{+17}$	$-1/36 \times 10^{+16}$
$\mu (\frac{cm^2}{V.s})$	$5/38 \times 10^{-1}$	2/01
$\rho (\Omega.cm)$	$2/28 \times 10^{+2}$	$4/11 \times 10^{+1}$
$\sigma (\Omega^{-1} cm^{-1})$	$2/44 \times 10^{-2}$	$4/39 \times 10^{-3}$
$R_H (cm^{-3}/c)$	$0/220 \times 10^{+2}$	$0/459 \times 10^{+3}$
$I_{\text{photon}} / I_{\text{dark}}$	7/57	0/5

۵-۳-۲ خواص فیزیکی نمونه‌های NB2 و NB3 (بررسی اثر زمان لایه‌نشانی)

۵-۳-۲-۱ طیف پراش پرتو ایکس (XRD)

در شکل (۵-۱۲) الگوهای XRD نانومیله‌های اکسید روی تهیه شده به روش رسوب حمام شیمیایی در دو مدت زمان لایه‌نشانی ۳ ساعت (NB2) و ۵ ساعت (NB3) نشان داده شده است. الگوهای حاصل نشانگر تشکیل لایه بلوری اکسید روی با قله‌های مربوط به پراش از صفحات (۰ ۰ ۰)، (۱ ۰ ۰)، (۰ ۰ ۲)، (۱ ۰ ۱)، (۱ ۰ ۲)، (۱ ۱ ۰)، (۱ ۰ ۳)، (۱ ۱ ۲) و (۰ ۰ ۴)، ساختار ورتسایت با اکسید روی با گروه فضایی: P63mc و ثابت‌های شبکه $a = 3/1 \text{ \AA}$ و $c = 5/22$ مطابق با کارت استاندارد (JCPDS 010-790-205) می‌باشند



شکل ۵-۱۲: طیف‌های XRD نانومیله‌های اکسید روی رشد داده شده در مدت زمان لایه‌نشانی ۳ (NB2) و ۵ ساعت (NB3).

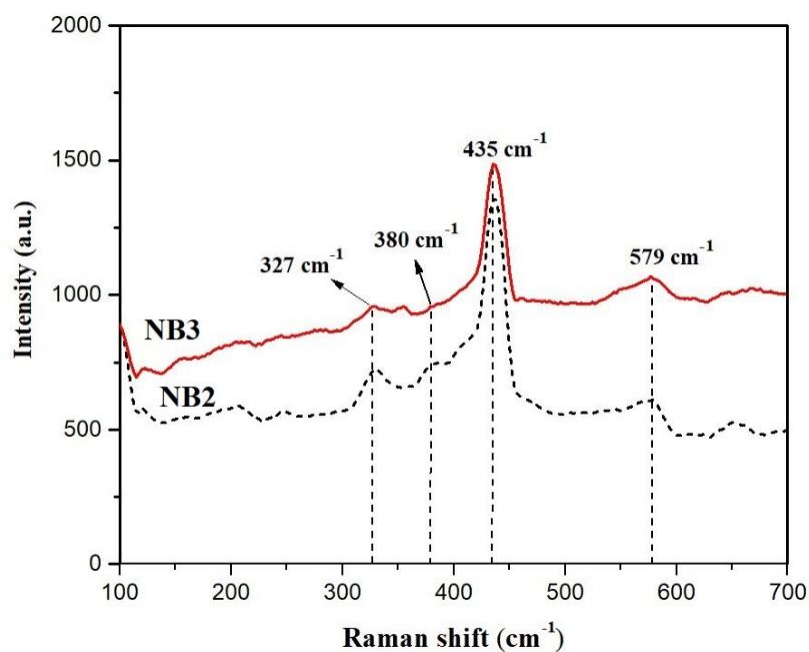
. مقایسه الگوهای پراش نشان می‌دهد که در هر نمونه راستای ترجیحی رشد بلور راستای $(0\ 0\ 2)$ می‌باشد. همچنین با افزایش مدت زمان لایه‌نشانی از ۳ ساعت به ۵ ساعت ارتفاع نسبی قله مربوط به صفحه $(0\ 0\ 2)$ کمی افزایش یافته است. با استفاده از داده‌های حاصل از الگوهای پراش دو نمونه فاصله صفحات بلوری (d) (از معادله ۱-۲)، اندازه متوسط بلورک‌ها (D) با استفاده از رابطه شرر (معادله ۲-۲)، میزان کرنش در شبکه بلوری (ϵ) (معادله ۳-۲) و چگالی درفتگی‌ها (σ) (معادله ۴-۲) برای دو نمونه محاسبه شدند که نتایج آن این در جدول (۵-۶) گزارش شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش زمان لایه‌نشانی از ۳ ساعت به ۵ ساعت اندازه متوسط بلورک‌ها کاهش یافته است.

جدول ۵-۶: نتایج بدست آمده با استفاده از الگوی XRD نمونه‌های مورد مطالعه و ضخامت لایه‌ها.

نمونه	صفحات	D (nm)	d (nm)	$\epsilon \times 10^{-3}$	$\sigma \times 10^{-4} (\text{nm})^{-2}$	FWHM ($^{\circ}$)	ثابت‌های شبهه \AA	ضخامت μm
NB2	(۰ ۰ ۲)	۴۱/۶	۰/۲۶	۲/۸	۵/۷۵	۰/۲۰۲۴	a = b = 3 c = 5.2	۳/۲۵
NB3	(۰ ۰ ۲)	۳۳/۵	۰/۲۶	۳/۶	۸/۹	۰/۲۵۳۳	a = b = 3 c = 5.18	۵/۴۵

۵-۳-۲-۲ طیف‌سنجی رامان

طیف‌های رامان ثبت شده در شکل (۵-۱۳) نشان داده شده است.

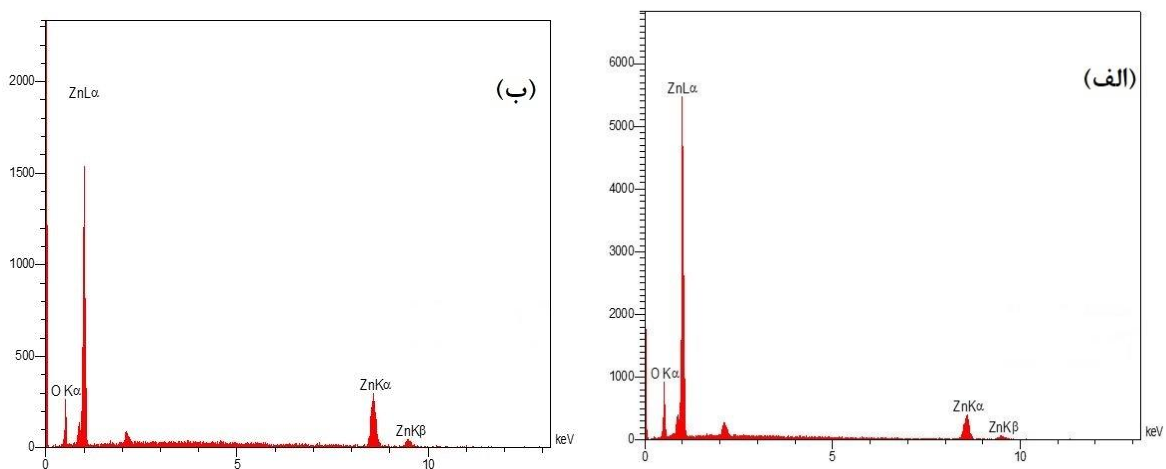


شکل ۵-۱۳: طیف‌های رامان نمونه‌های NB2 و NB3.

در طیف‌های رامان هر دو نمونه قله‌های قوی‌تر در جابجایی‌های رامان 327 cm^{-1} ، 380 cm^{-1} ، 435 cm^{-1} و cm^{-1} 579 مشاهده می‌شوند. قله در 435 cm^{-1} مربوط به مد E_2 (فرکانس بالا) ساختار ورتسایت نانومیله‌های اکسید رو می‌باشد. قله در 380 cm^{-1} به مد عرضی A_1 نسبت داده می‌شود که به دلیل ماهیت ناهمسانگرد ثابت نیرو ظاهر می‌شود. قله 327 cm^{-1} نیز از تقارن مدهای A_1 ناشی از فرآیندهای آکوستیکی قوی ایجاد می‌شوند [۶۲]. قله در موقعیت 579 cm^{-1} واقع در بین دو مد نوری A_1 و E_1 ناشی از نقص‌های وابسته به اتم‌های اکسیژن است. مقایسه طیف‌های رامان دو نمونه نشان می‌دهد افزایش مدت زمان لایه‌نشانی قله 435 cm^{-1} اکسید روی تضعیف شده است.

۵-۳-۲-۳- طیف سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس (EDS)

در شکل (۵-۱۴- الف و ب) طیف‌های EDS نمونه‌های نانومیله‌های اکسید روی الف) NB2 و ب) NB3 را نشان می‌دهد. نتایج بدست آماده مندرج در جدول (۵-۷) نشان می‌دهد که با افزایش مدت زمان لایه‌نشانی درصد اتمی Zn در نمونه NB3 به تعداد قابل توجهی (حدود ۱۶٪) افزایش یافته است.



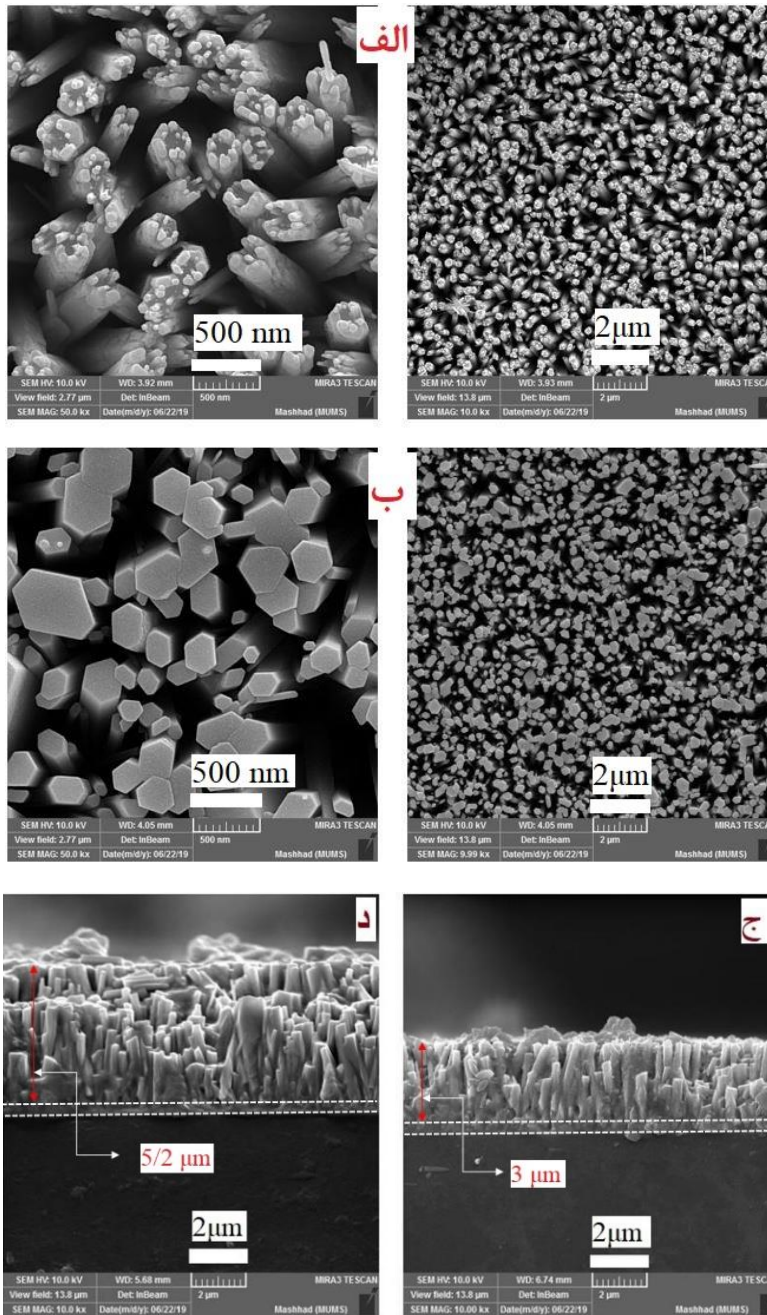
شکل ۵-۱۴: طیف پراش انرژی پرتو ایکس برای نمونه NB2 (الف) و نمونه NB3 (ب).

جدول ۵-۷: نتایج حاصل از طیف سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس برای دو نمونه NB2 و NB3.

نمونه	درصد اتمی (A%)		درصد وزنی (W%)	
	Zn	O	Zn	O
NB2	۲۳/۶۵	۷۶/۳۵	۵۵/۸۶	۴۴/۱۴
	۳۹/۱۹	۶۰/۸۱	۷۲/۴۸	۲۷/۵۲

۵-۳-۲-۴ بررسی مورفولوژی

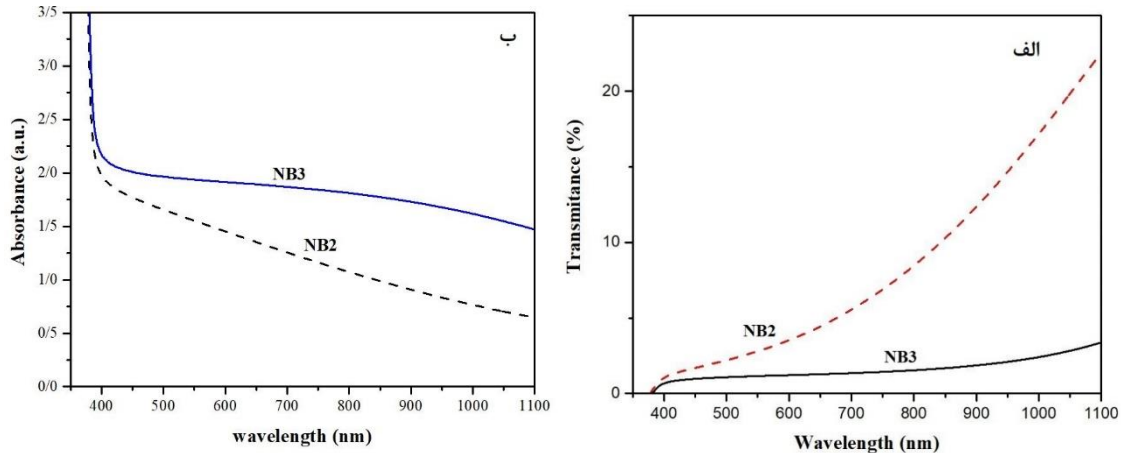
برای بررسی مورفولوژی نمونه‌ها تصاویر FESEM از سطح نمونه‌ها با مدت زمان لایه‌نشانی متفاوت، ثبت گردید شکل (۵-۱۵). بررسی تصاویر FESEM نمونه‌ها نشان می‌دهد که نانومیله‌های تهیه شده در مدت زمان لایه‌نشانی ۳ ساعت دارای قطر و طول متوسط به ترتیب ۲۵۰ nm و ۳ μm هستند در حالی که نانومیله‌های تهیه شده در مدت زمان لایه‌نشانی ۵ ساعت دارای قطر و طول متوسط به ترتیب به ۳۷۲ nm و ۵/۲ μm می‌باشند. به این ترتیب همانگونه که انتظار داریم با افزایش مدت زمان لایه‌نشانی از ۳ به ۵ ساعت طول و قطر متوسط نانومیله‌ها افزایش قابل توجهی یافته‌اند. سطح نمونه NB2 شامل بسته‌هایی از نانومیله‌هایی که موازی هم رشد کرده‌اند می‌باشد در حالی که در نمونه NB3 شاهد حضور نانومیله‌هایی مجزا از هم و با مقطع شش گوشه هستیم. ضخامت نمونه‌های NB2 و NB3 با توجه به تصویر دید از پهلو FESEM (شکل‌های ۵-۱۵-ج و د) با احتساب لایه اکسید روی بذر (۲۵۰ nm) برای نمونه‌های NB2 و NB3 به ترتیب ۳/۲۵ μm و ۵/۴۵ μm اندازه‌گیری شدند.



شکل ۵-۱۵: تصاویر FESEM (الف) دید از بالا نمونه NB2 (ب) دید از بالا نمونه NB3 (ج) دید از پهلو نمونه NB2 (د) دید از پهلو نمونه NB3 در مقیاس‌های 500 nm و 2 μm.

۵-۳-۲-۵ بررسی خواص اپتیکی

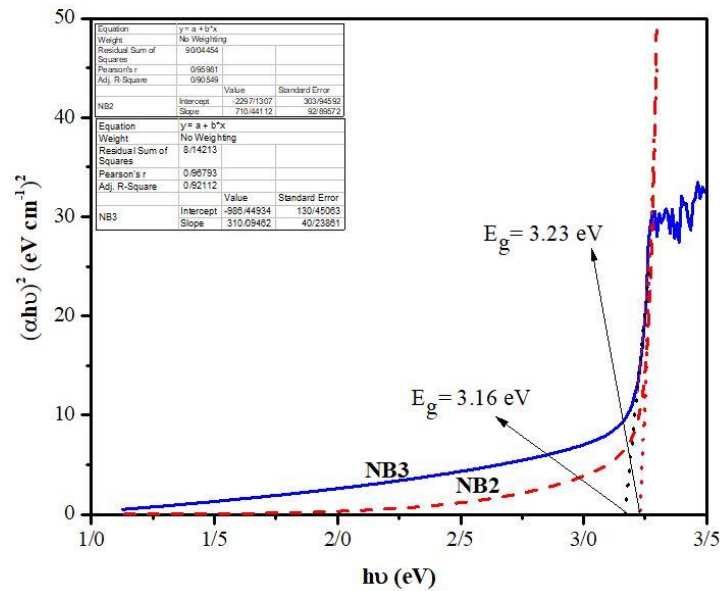
شکل‌های (۵-۱۶-الف و ب) طیف‌های عبور و جذب لایه‌های نمونه‌های NB2 و NB3 را بر حسب تابعی از طول موج در محدوده ۳۰۰-۱۱۰۰ nm نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۶: تصاویر الف) طیف‌های عبور و ب) طیف‌های جذب نمونه‌های NB2 و NB3.

کاهش ضریب عبور نوری در نمونه NB3 نسبت به نمونه NB2 (شکل ۵-۱۶-الف) به خوبی با تغییرات مربوط به مورفولوژی لایه‌ها (شکل ۵-۱۵-الف و ب) و نیز اندازه بلورک‌ها در این لایه‌ها (جدول ۵-۶) سازگار است به شکلی که نمونه NB2 با سطح یکنواخت‌تر و هموارتر نسبت به نمونه NB3 که دارای تخلخل بیشتر در سطح، عبور اپتیکی بیشتر از خود نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۵-۱۶-ب) با افزایش مدت زمان لایه‌نشانی از ۳ ساعت به ۵ ساعت در محدوده نور مرئی شاهد افزایش میزان جذب هستیم. با استفاده از طیف تراکسیل لایه‌ها گاف نواری آنها با استفاده از روابط (۲-۷) و (۲-۸) محاسبه شدند. ضخامت لایه‌ها با توجه به تصویر دید از پهلو شکل (۵-۱۵، ج و د) برای نمونه NB2 حدود $3/25 \mu\text{m}$ و برای نمونه NB3 حدود $5/45 \mu\text{m}$ اندازه‌گیری شدند. شکل (۵-۱۷) نمودار $(\alpha h\nu)^2$ بر حسب انرژی فرودی فوتون را برای دو نمونه NB2 و NB3 نشان می‌دهد. با افزایش مدت زمان لایه‌نشانی از ۳ ساعت به ۵ ساعت گاف نواری از مقدار $3/23 \text{ eV}$ برای نمونه NB2 به مقدار $3/16 \text{ eV}$ برای

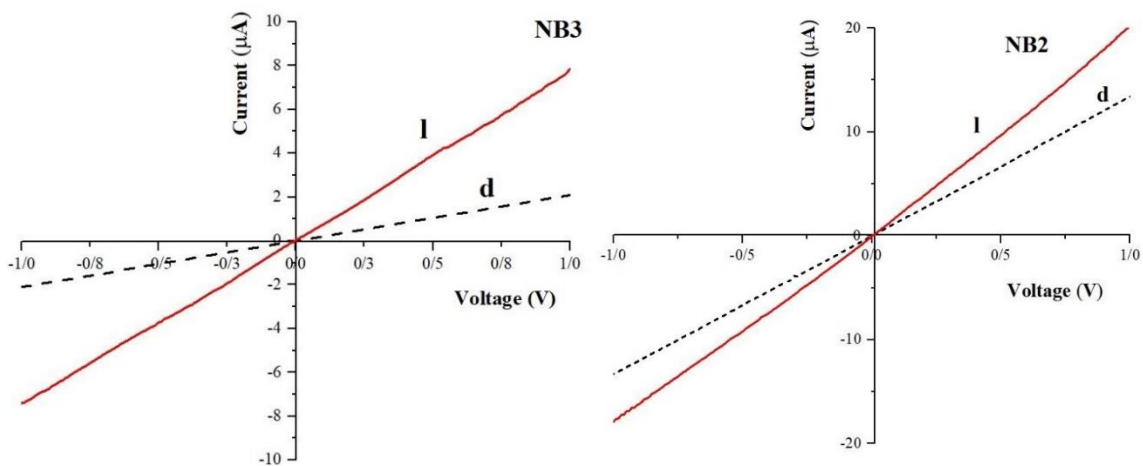
نمونه NB3 کاهش یافته است. کاهش گاف نواری ممکن است به دلیل افزایش نقایص بلوری مانند چگالی درفتگی باشد (جدول ۵-۶).



شکل ۵-۱۷: نمودارهای $h\nu - (\alpha h\nu)^2$ نمونه‌های NB2 و NB3.

۵-۳-۲-۶ بررسی خواص الکتریکی

برای بررسی خواص الکتریکی نمونه‌ها از اندازه‌گیری‌های ولتاژ-جریان (I-V) و اثر هال استفاده شد. نمودار جریان-ولتاژ نمونه‌ها در بازه ۱- تا ۱ ولت در تاریکی و روشنایی تحت تابش نور فرابنفش توسط دستگاه پتاسیواستات، اندازه‌گیری شد. شکل (۵-۱۸-الف و ب) تصاویر نمودارهای مربوطه را نشان می‌دهد. نتایج بررسی رفتار فوتو-رسانایی نمونه‌ها در شرایط تاریکی و روشنایی در جدول (۵-۸) ذکر شده است. بررسی پاسخ نوری در نمونه‌ها (نسبت $I_{\text{photon}} / I_{\text{dark}}$) نشان می‌دهد که با افزایش مدت زمان لایه‌نشانی از ۳ ساعت به ۵ ساعت پاسخ نمونه‌ها افزایش یافته است. اندازه‌گیری‌های اثر هال نشان می‌دهد که نمونه‌های NB2 و NB3 نیمرسانای نوع n هستند. همچنین اندازه‌گیری‌های اثر هال در جدول (۵-۸) نشان می‌دهند که افزایش زمان لایه‌نشانی باعث کاهش تراکم حامل‌ها و رسانندگی شده است.



شکل ۵-۱۸: نمودارهای جریان-ولتاژ تاریکی و روشنایی برای دو نمونه NB2 و NB3.

جدول ۵-۸: پارامترهای الکتریکی اندازه‌گیری شده در آنالیز اثر هال و پاسخ نوری برای نمونه‌های NB2 و NB3.

نمونه	NB2	NB3
$n (cm^{-3})$	$-1/36 \times 10^{+16}$	$-4/84 \times 10^{+15}$
$\mu (\frac{cm^2}{V.s})$	۲/۰۱	۴/۶۵
$\rho (\Omega.cm)$	$2/28 \times 10^{+2}$	$2/77 \times 10^{+5}$
$\sigma (\Omega^{-1} cm^{-1})$	$4/39 \times 10^{-3}$	$3/61 \times 10^{-3}$
$R_H (cm^{-3}/c)$	$0/459 \times 10^{+3}$	$0/129 \times 10^{+4}$
$I_{\text{photon}} / I_{\text{dark}}$	۰/۵	۲/۷۵

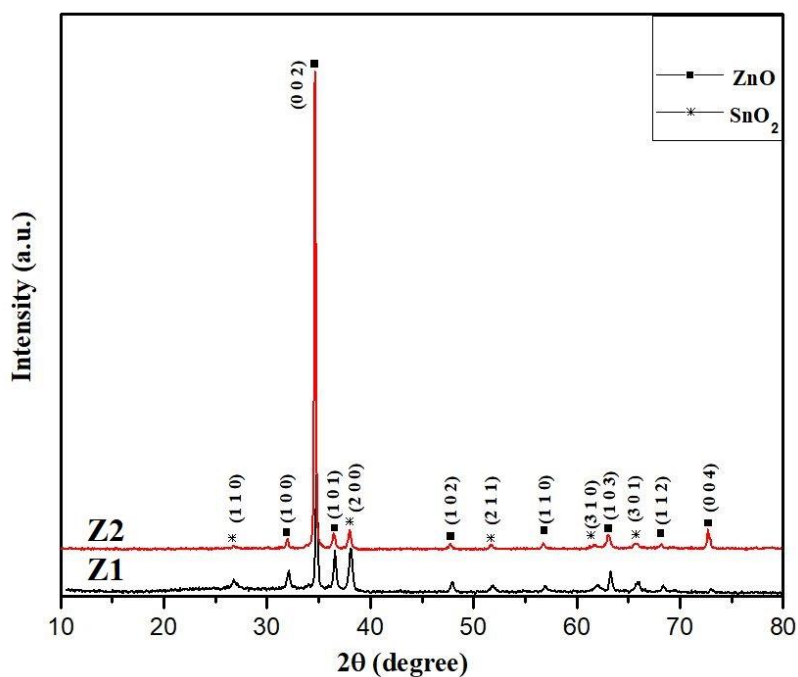
۴-۵ بررسی خواص ساختاری، مورفولوژی، اپتیکی و الکتریکی نانومیله‌های اکسید روی رشد یافته بر بستر FTO

در این بخش به بررسی نانومیله‌های اکسید روی رشد داده شده به روش رسوب حمام و با شرایط ذکر شده جدول (۱-۵) می‌پردازیم. در ادامه به مقایسه و بررسی نمونه‌های Z1 و Z2 و سپس نمونه‌های Z2 و Z3 می‌پردازیم. نمونه‌های Z1 و Z2 در زمان‌های لایه‌نشانی یکسانی (۳ ساعت) لیکن با محلول‌های دارای pH متفاوت (به ترتیب ۵/۵ و ۱۱) سنتز شده‌اند. نمونه‌های Z2 و Z3 در زمان‌های لایه‌نشانی متفاوت (به ترتیب ۳ و ۵ ساعت) لیکن با محلول‌های دارای pH یکسان سنتز شده‌اند.

۴-۵-۱ مقایسه خواص فیزیکی دو نمونه Z1 و Z2 (بررسی اثر pH محلول لایه‌نشانی)

۴-۵-۱-۱ طیف پراش پرتو ایکس (XRD)

شکل (۱۹-۵) الگوهای XRD نانومیله‌های اکسید روی تهیه شده به روش رسوب حمام شیمیایی توسط محلول‌های لایه‌نشانی با pH برابر ۵/۵ و ۱۱ را نشان می‌دهد. الگو پراش نشانگر تشکیل ساختار شش گوشه (ورتسایت) اکسید روی با قله‌های مربوط به پراش از صفحات (۰ ۰ ۰)، (۰ ۰ ۲)، (۱ ۰ ۱)، (۱ ۰ ۲)، (۱ ۰ ۰)، (۱ ۱ ۰)، (۱ ۰ ۳)، (۱ ۱ ۲) و (۰ ۰ ۴)، هستند. ساختارهای تشکیل شده دارای گروه فضایی: P63mc مطابق با کارت استاندارد (JCPDS 010-790-205) می‌باشند. در الگوی پراش نمونه‌ها همچنین می‌توان الگوی پراش ساختار بلوری SnO₂ با قله‌های مربوط به پراش از صفحات (۱ ۱ ۰)، (۱ ۰ ۱)، (۲ ۰ ۰)، (۲ ۱ ۱)، (۳ ۱ ۰)، (۳ ۰ ۱) با فاز چهار گوشه و گروه فضایی: P42/mnm مطابق با کارت استاندارد (JCPDS 00-046-1088) را نیز مشاهده کرد که به حضور SnO₂ در زیرلایه FTO مربوط می‌باشد. که با توجه به الگوهای XRD ثبت شده مشاهده می‌شود راستای ترجیحی رشد بلور راستای (۰ ۰ ۲) با ثابت‌های شبکه $a=3/01 \text{ \AA}$ و $c=5/22 \text{ \AA}$ می‌باشد. مقایسه الگوهای پراش نشان می‌دهد که با افزایش pH محلول لایه‌نشانی از ۵/۵ به ۱۱ ارتفاع قله مربوط به صفحه (۰ ۰ ۲) افزایش یافته است.



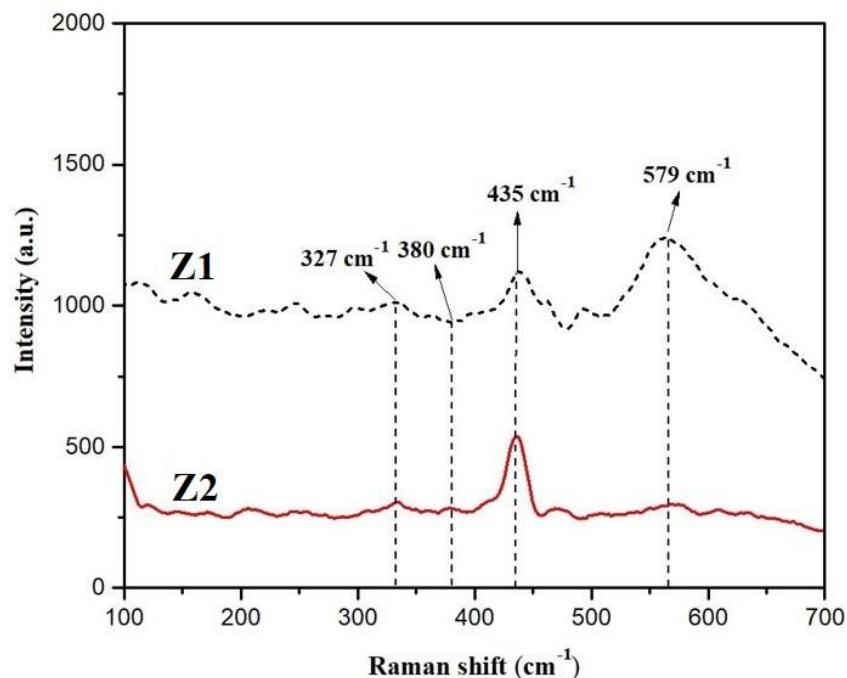
شکل ۵-۱۹: الگوهای XRD نانومیله‌های اکسید روی رشد داده شده در دو متفاوت الف) ۵/۵ (نمونه Z1) و ب) ۱۱ (نمونه Z2). با استفاده از داده‌های استخراج شده از الگوهای پراش و روابط مربوطه پارامترهای ساختاری نمونه محاسبه شدند که نتایج آن در جدول ۵-۹ گزارش شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش pH محلول لایه‌نشانی اندازه بلورک‌ها قدری کاهش یافته است.

جدول ۵-۹: پارامترهای ساختاری محاسبه شده با استفاده از الگوهای پراش نمونه‌های مورد مطالعه و ضخامت لایه‌ها.

نمونه	صفحه	D (nm)	d (nm)	$\epsilon \times 10^{-3}$	$\sigma \times 10^{-4} (\text{nm})^{-2}$	FWHM (°)	ثابت‌های شبکه	ضخامت μm
Z1	(۰ ۰ ۲)	۴۹/۵	۰/۲۶	۲/۴۲	۴/۰۸	۰/۱۷۱۹۰	a=b=3 c=5.23	۱
Z2	(۰ ۰ ۲)	۴۶/۸۶	۰/۲۵	۲/۴۸	۴/۵۵	۰/۱۸۳۳۹	a=b=2.88 c=5.18	۴

۵-۴-۱-۲ طیف‌سنجی رامان

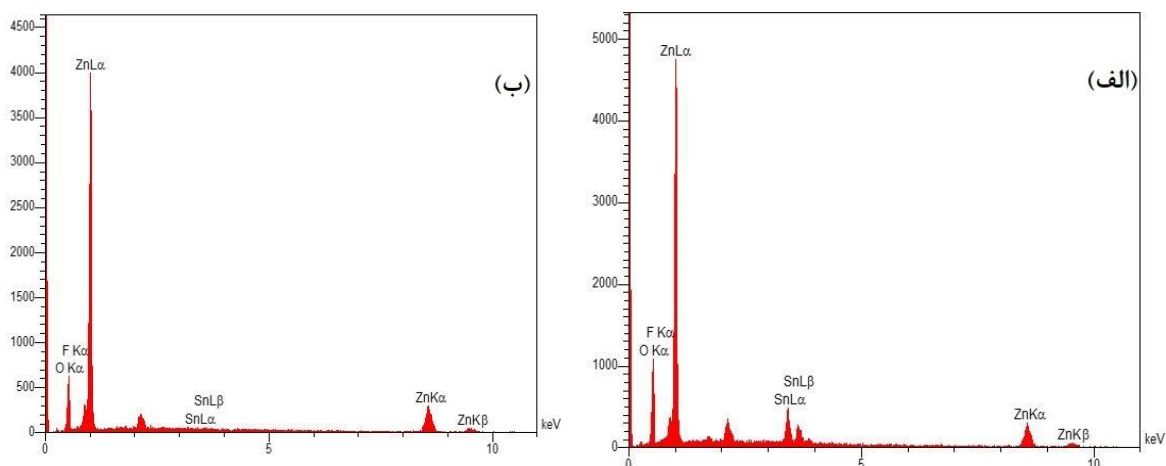
طیف‌های رامان نمونه‌های Z1 و Z2 در شکل شکل (۵-۲۰) نشان داده شده است. طیف‌های رامان نمونه‌ها قله‌های برجسته‌ای در 327 cm^{-1} ، 380 cm^{-1} ، 435 cm^{-1} و 579 cm^{-1} را نشان می‌دهد. همانگونه که برای نمونه‌های قبلی اشاره شد قله در 435 cm^{-1} مربوط به مد E_2 (فرکانس بالا) به ساختار شش گوشه اکسید روی مربوط است. قله در 579 cm^{-1} که واقع در بین مدهای نوری A_1 و E_1 می‌باشد به نقص‌های اکسیژن نسبت داده می‌شود. که در نمونه Z2 شدت آن کاهش یافته است. قله در جابجایی رامان 380 cm^{-1} نیز مد عرضی A_1 طیف رامان اکسید روی بوده که به ماهیت ناهمسانگرد بودن ثابت نیرو مربوط شده است. قله در 327 cm^{-1} نیز به تقارن مد A_1 ناشی از فرآیند آکوستیکی قوی مربوط می‌شود [۶۵]. با توجه به دو طیف نتیجه می‌شود که با افزایش میزان pH در نمونه Z2، قله‌های تیز و قوی‌تری حاصل شده است.



شکل ۵-۲۰: طیف‌های رامان مربوط به نمونه‌های Z1 و Z2.

۵-۴-۱-۳ طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS)

شکل (۵-۲۱-الف و ب) نتایج EDS مربوطه به نمونه‌های Z1 و Z2 را نشان می‌دهد. درصد وزنی و درصد اتمی عناصر روی و اکسیژن در جدول ۵-۱۰ گزارش شده است. با توجه نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود با افزایش مدت زمان لایه‌نشانی درصد اتمی Zn نسبت به O در نانومیه‌های اکسید روی سنتز شده افزایش یافته است. حضور درصد کمی از عناصر Sn و F نیز در طیف‌های EDS مشاهده شدند که به زیرلایه استفاده شده (FTO) تعلق دارند.



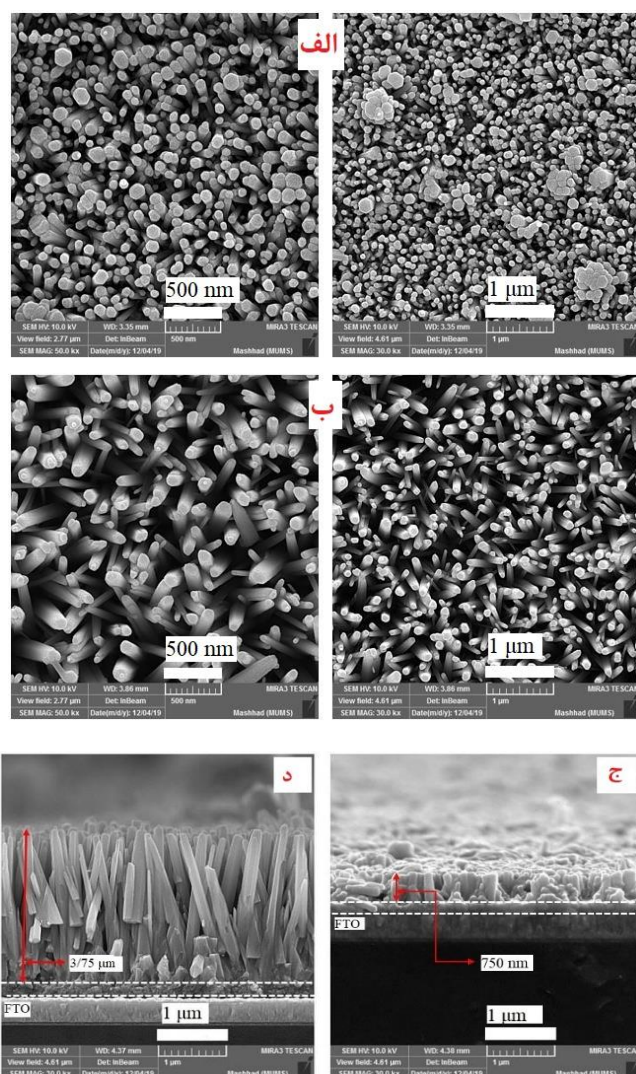
شکل ۵-۲۱: طیف‌های پراش انرژی پرتو ایکس برای نمونه (الف) Z1 و نمونه (ب) Z2.

جدول ۵-۱۰: درصد وزنی و اتمی موجود در نمونه‌های Z1 و Z2 استخراج شده از اندازه‌گیری‌های EDS.

نمونه	درصد اتمی (A%)				درصد وزنی (W%)			
	Zn	O	Sn	F	Zn	O	Sn	F
Z1	۲۷/۵۴	۶۳/۸۵	۶/۲	۲/۳۹	۴۹/۹۲	۲۸/۳۳	۲۰/۴۹	۱/۲۶
	۴۸/۲۷	۵۰/۳۷	۱/۱۷	۰/۲	۷۸/۷۴	۲۰/۱۱	۰/۶	۰/۵۵

۵-۴-۱-۴ بررسی مورفولوژی

برای بررسی مورفولوژی نمونه‌ها تصاویر FESEM از نانومیله‌های رشد داده شده اکسید روی با pH متفاوت، ثبت گردید. تصاویر دید از بالا، در شکل‌های (۵-۲۲-الف و ب) در دو مقیاس ۵۰۰ nm و ۱ μm و تصاویر دید از پهلو در شکل‌های (۵-۲۲-ج و د) با مقیاس ۱ μm ثبت شدند.

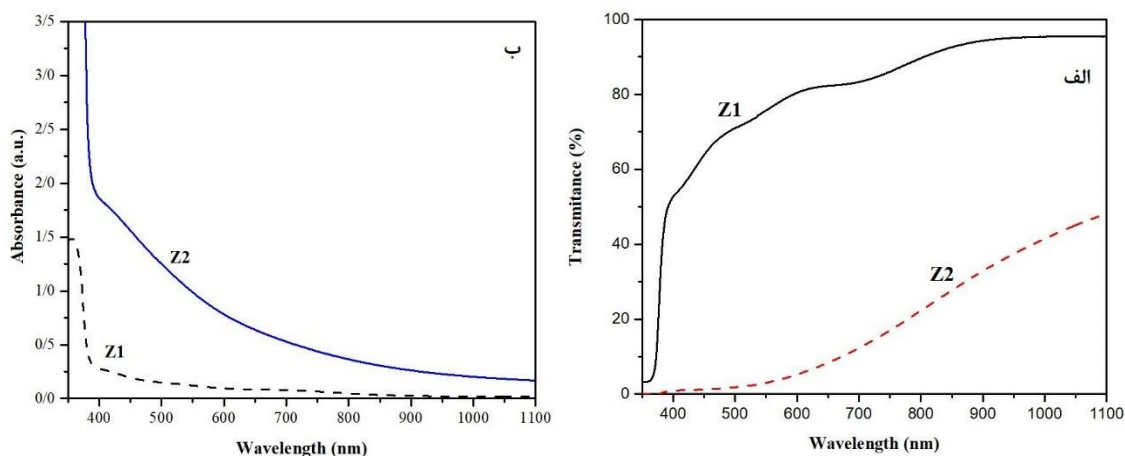


شکل ۵-۲۲: تصاویر FESEM (الف) دید از بالا برای نمونه Z1 (ب) دید از بالا برای نمونه Z2 (ج) دید از پهلو برای نمونه Z1 (د) دید از پهلو برای نمونه Z2.

بررسی تصاویر FESEM نشان می‌دهد که نانومیله‌های تهیه شده توسط محلول با $\text{pH}=5/5$ دارای متوسط قطر و طول به ترتیب 84 nm و 750 nm و نانومیله‌های تهیه شده توسط محلول با $\text{pH}=11$ دارای قطر و طول متوسط به ترتیب 122 nm و $3/75 \mu\text{m}$ می‌باشند. مقایسه تصاویر FESEM نشان می‌دهد که با افزایش میزان pH از $5/5$ به 11 تراکم میله‌ها کاسته شده و ضمن افزایش میزان تخلخل قطر متوسط و طول نانومیله‌ها به طور قابل توجهی افزایش یافته است. در هر دو نمونه نانومیله‌ها دارای مقطع شش گوشه هستند.

۵-۱-۴-۵ بررسی خواص اپتیکی

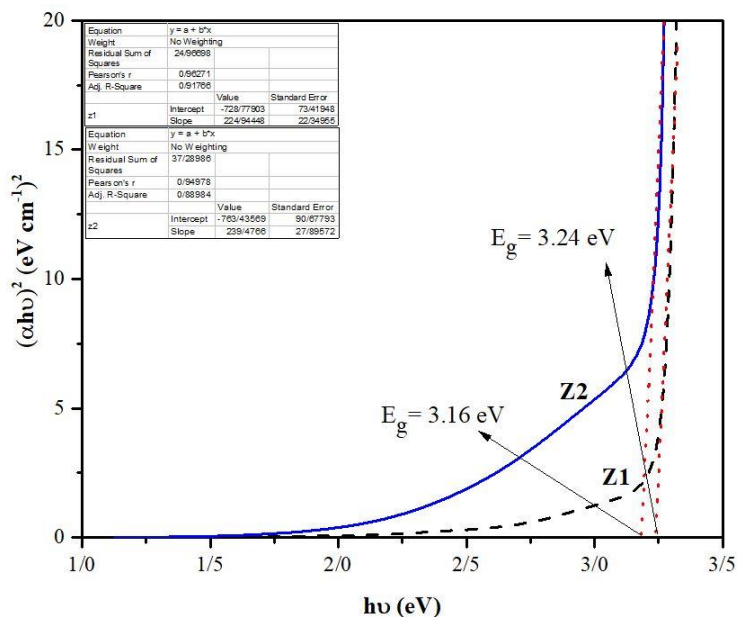
شکل (۵-۲۳-الف و ب) طیف‌های عبور و جذب نمونه‌های $Z1$ و $Z2$ را بر حسب تابعی از طول موج در محدوده طول موجی $300-1100 \text{ nm}$ نشان می‌دهد.



شکل ۵-۲۳: تصاویر الف) طیف‌های عبور نمونه‌های $Z1$ و $Z2$ ب) طیف‌های جذب نمونه‌های $Z1$ و $Z2$.

میزان عبور در نمونه $Z1$ به طور قابل توجهی از نمونه $Z2$ در محدوده طول موجی اندازه‌گیری شده بیشتر است که این ممکن است هم به ضخامت کمتر نمونه $Z1$ ($1 \mu\text{m}$) و هم مورفولوژی ساختاری آن مربوط باشد که البته با توجه به اختلاف قابل توجه ضخامت این نمونه با نمونه $Z2$ ($4 \mu\text{m}$) اثر ضخامت در میزان عبور غلبه دارد. مقایسه

نمودارهای جذب نشان می‌دهد که لبه جذب نمونه Z2 نسبت به نمونه Z1 دارای یک جابجایی قرمز کوچک است که می‌تواند به دلیل کاهش گاف نواری نمونه Z2 نسبت به نمونه Z1 باشد. با افزایش pH محلول لایه‌نشانی از ۵/۵ به ۱۱ در محدوده نور مرئی شاهد افزایش میزان جذب هستیم. با استفاده از طیف تراگیسیل لایه‌ها گاف نواری آن‌ها را با استفاده از روابط (۷-۲) و (۸-۲) محاسبه شدند. شکل (۵-۲۴) نمودار $(\alpha h\nu)^2$ برحسب انرژی فرودی فوتون را برای دو نمونه Z1 و Z2 نشان می‌دهد.

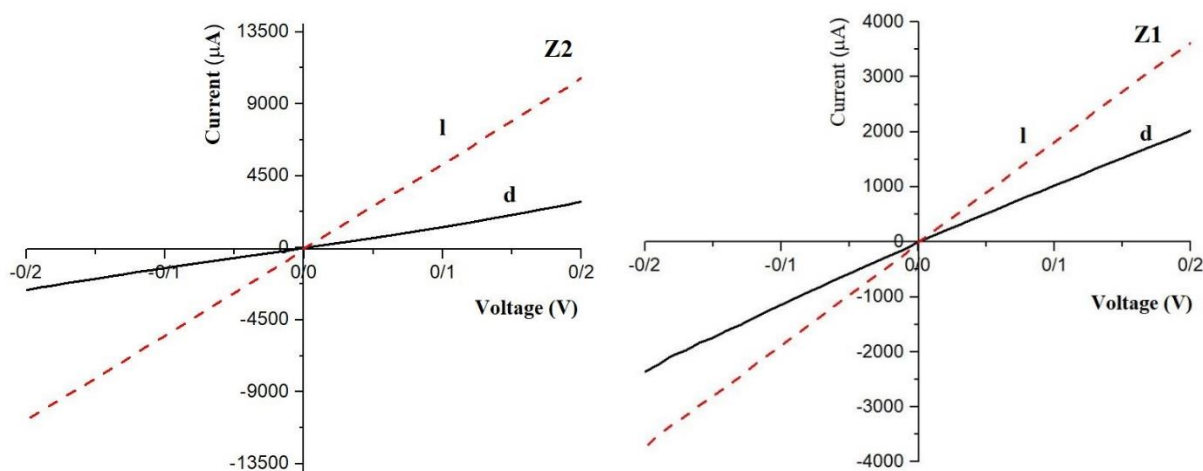


شکل ۵-۲۴: نمودارهای $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ برای نمونه‌های سنتز شده توسط محلول با pH مختلف (نمونه Z1) و ۱۱ (نمونه Z2).

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش pH از ۵/۵ در (نمونه Z1) به ۱۱ (نمونه Z2) گاف نواری از ۳/۲ eV به ۳/۱۶ eV کاهش یافته است. که این کاهش می‌تواند به دلیل افزایش نقایص بلوری مانند چگالی درفتگی‌ها در این نمونه باشد (جدول ۵-۹).

۵-۴-۱-۶ بررسی خواص الکتریکی

برای بررسی خواص الکتریکی نمونه‌ها از اندازه‌گیری‌های ولتاژ-جریان (I-V) و اثر هال استفاده شد. نمودار جریان-ولتاژ نمونه‌ها در بازه -0.2 تا 0.2 ولت در تاریکی و روشنایی تحت تابش نور فرابنفش توسط دستگاه پتاسیواستات شکل (۲-۷)، اندازه‌گیری شد. شکل (۵-۲۵ الف و ب) تصاویر نمودارهای مربوطه را نشان می‌دهد. رفتار فوتو-رسانایی نمونه‌ها در شرایط تاریکی و روشنایی تحت تابش نور با شدت فرابنفش مورد بررسی قرار گرفت و نتایج در قالب جدول (۵-۱۱) گردآوری شد.



شکل ۵-۲۵: نمودار جریان-ولتاژ تاریکی و روشنایی برای دو نمونه Z1 و Z2.

بررسی پاسخ نوری نمونه‌ها (نسبت $I_{\text{photon}} / I_{\text{dark}}$) که نشان می‌دهد که با افزایش pH از ۵/۵ به ۱۱ پاسخ نمونه‌ها افزایش یافته است (جدول ۵-۱۱). اندازه‌گیری‌های اثر هال نشان می‌دهد که نمونه‌های Z1 و Z2 نیمرسانا نوع n هستند. همچنین اندازه‌گیری‌های اثر هال (جدول ۵-۱۱) نشان می‌دهد پارامترهای الکتریکی اندازه‌گیری شده به قابل توجهی تحت تاثیر خواص الکتریکی زیرلایه FTO می‌باشد. در نتیجه امکان بررسی الکتریکی لایه‌های ZnO انباشت شده روی زیرلایه FTO از طریق این داده‌ها میسر نگردید.

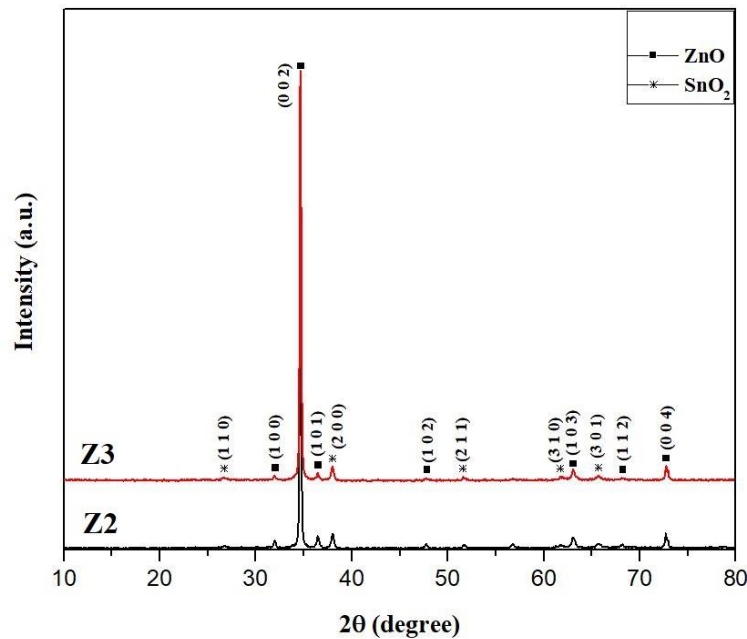
جدول ۵-۱۱: پارامترهای الکتریکی اندازه‌گیری شده در آنالیز اثر هال و پاسخ نوری برای نمونه‌های Z1 و Z2.

نمونه	Z1	Z2	زیر لایه FTO
$n (cm^{-3})$	$-5/26 \times 10^{+19}$	$-3/0.2 \times 10^{+19}$	$-3/9 \times 10^{+20}$
$\mu (\frac{cm^2}{V.s})$	34/8	33/3	23/4
$\rho (\Omega.cm)$	$3/41 \times 10^{-3}$	$6/21 \times 10^{-3}$	$6/67 \times 10^{-4}$
$\sigma (\Omega^{-1} cm^{-1})$	29/3	161	$1/5 \times 10^3$
$R_H (cm^{-3}/c)$	0/11	0/20	4/16
$I_{\text{photon}} / I_{\text{dark}}$	0/79	3	-

۵-۴-۲ مقایسه خواص فیزیکی دو نمونه Z2 و Z3 (بررسی اثر زمان لایه‌نشانی)

۵-۴-۲-۱ طیف پراش پرتو ایکس (XRD)

شکل (۵-۲۶) الگوی XRD نانومیله‌های اکسید روی تهیه شده به روش رسوب حمام شیمیایی در دو مدت زمان لایه‌نشانی ۳ ساعت (Z2) و ۵ ساعت (Z3) را نشان می‌دهد. الگوهای حاصل نشانگر تشکیل لایه بلوری اکسید روی با قله‌های مربوط به پراش از صفحات (۰ ۰ ۰)، (۰ ۰ ۲)، (۱ ۰ ۱)، (۱ ۰ ۲)، (۱ ۰ ۰)، (۱ ۱ ۰)، (۱ ۰ ۳)، (۱ ۱ ۲) و (۰ ۴ ۰)، ساختار ورتسایت اکسید روی با گروه فضایی: P63mc و با ثابت‌های شبکه $a = 3/01 \text{ \AA}$ و $c = 5/22 \text{ \AA}$ مطابق با کارت استاندارد (JCPDS 010-790-205) می‌باشند.



شکل ۵-۲۶: طیف‌های XRD نانومیله‌های اکسید روی رشد داده شده در دو مدت زمان رشد متفاوت الف) ۳ ساعت (نمونه Z2) و ب) ۵ ساعت (نمونه Z3).

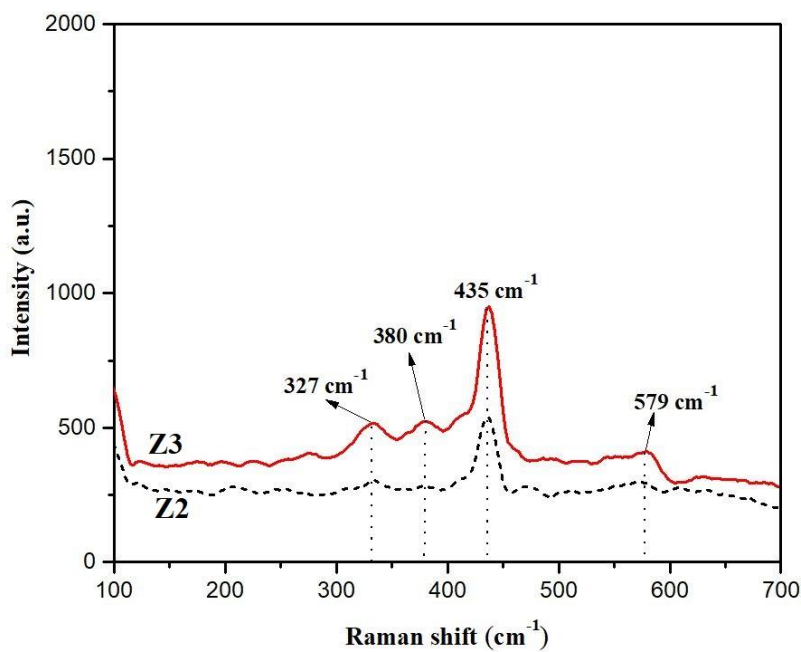
در الگوی پراش نمونه‌ها همچنین می‌توان الگوی پراش ساختار بلوری ماده SnO_2 با قله‌های مربوط به پراش از صفحات (110) (101) (200) (211) (310) (103) (301) (112) و (004) با فاز چهار گوشه و گروه فضایی: P42/mnm مطابق با کارت استاندارد (JCPDS 00-046-1088) را نیز مشاهده کرد که به حضور SnO_2 در زیرلایه FTO مربوط می‌باشد. با توجه به الگوی XRD ثبت شده مشاهده می‌شود که راستای ترجیحی رشد بلور راستای (002) با ثابت‌های شبکه $a = 3.7 \text{ \AA}$ و $c = 5.2 \text{ \AA}$ می‌باشد. مقایسه الگوهای پراش نشان می‌دهد که با افزایش مدت زمان لایه‌نشانی از ۳ ساعت به ۵ ساعت ارتفاع قله مربوط به صفحه (002) افزایش یافته است. با استفاده از داده‌های استخراج شده از الگوهای پراش با استفاده از روابط مربوطه پارامترهای ساختاری نمونه‌ها محاسبه شدند که نتایج آن در جدول ۵-۱۲ گزارش شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که با افزایش مدت زمان لایه‌نشانی از ۳ ساعت (نمونه Z2) به ۵ ساعت (نمونه Z3) اندازه بلورک‌ها کاهش یافته است.

جدول ۵-۱۲: پارامترهای ساختاری محاسبه شده با استفاده از الگوی پراش نمونه‌های مورد مطالعه و ضخامت لایه‌ها.

نمونه	صفحه	D (nm)	d (nm)	$\epsilon \times 10^{-3}$	$\sigma \times 10^{-4}$ (nm) ⁻²	FWHM (°)	ثابت‌های شبکه Å	ضخامت μm
Z2	(۰۰۲)	۴۸/۸	۰/۲۵	۲/۴۸	۴/۵	۰/۱۸۳۳۹	a = b = 2.88 c = 5.18	۴ μm
Z3	(۰۰۲)	۴۵/۴	۰/۲۵	۲/۵۶	۴/۸	۰/۱۸۴۹۹	a = b = 2.88 c = 5.18	۵/۴ μm

۵-۴-۲-۲ طیف‌سنجی رامان

طیف‌های رامان نمونه‌های Z2 و Z3 در شکل ۵-۲۷ نشان داده شده است. در طیف‌های رامان نمونه‌ها قله‌های قوی در 327 cm^{-1} ، 380 cm^{-1} ، 435 cm^{-1} و 579 cm^{-1} را نشان می‌دهد.

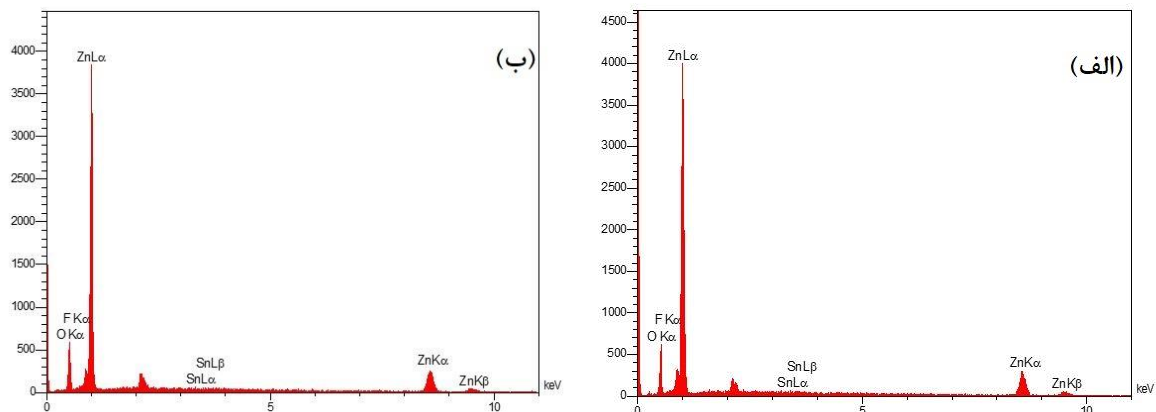


شکل ۵-۲۷: طیف‌های رامان مربوط به نمونه‌های Z2 و Z3.

همانگونه که برای نمونه‌های قبلی اشاره شد قله در 435 cm^{-1} مربوط به مد E_2 (فرکانس بالا) ساختار شش گوشه اکسید روی است. قله در 579 cm^{-1} که واقع در بین مدهای نوری A_1 و E_1 می‌باشد ناشی از نقص اکسیژن است. قله در جابجایی 380 cm^{-1} نیز مد عرضی A_1 طیف رامان اکسید روی بوده که به ماهیت ناهمسانگرد بودن ثابت نیرو مربوط شده است. قله در 327 cm^{-1} نیز به تقارن مد A_1 ناشی از فرآیند آکوستیکی قوی مربوط می‌شود [۶۲]. با توجه به دو طیف نتیجه می‌شود که با افزایش زمان لایه‌نشانی در نمونه Z3، قله‌های تیز و قوی‌تری برای نمونه حاصل شده است.

۵-۴-۲-۳ طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS)

شکل (۵-۲۸-الف و ب) نتایج EDS مربوط به نمونه‌های Z2 و Z3 را نشان می‌دهد. درصد وزنی و درصد اتمی عناصر روی و اکسیژن در جدول ۵-۱۳ گزارش شده است.



شکل ۵-۲۸: طیف پراش انرژی پرتو ایکس برای نمونه (الف) Z2 و (ب) نمونه Z3.

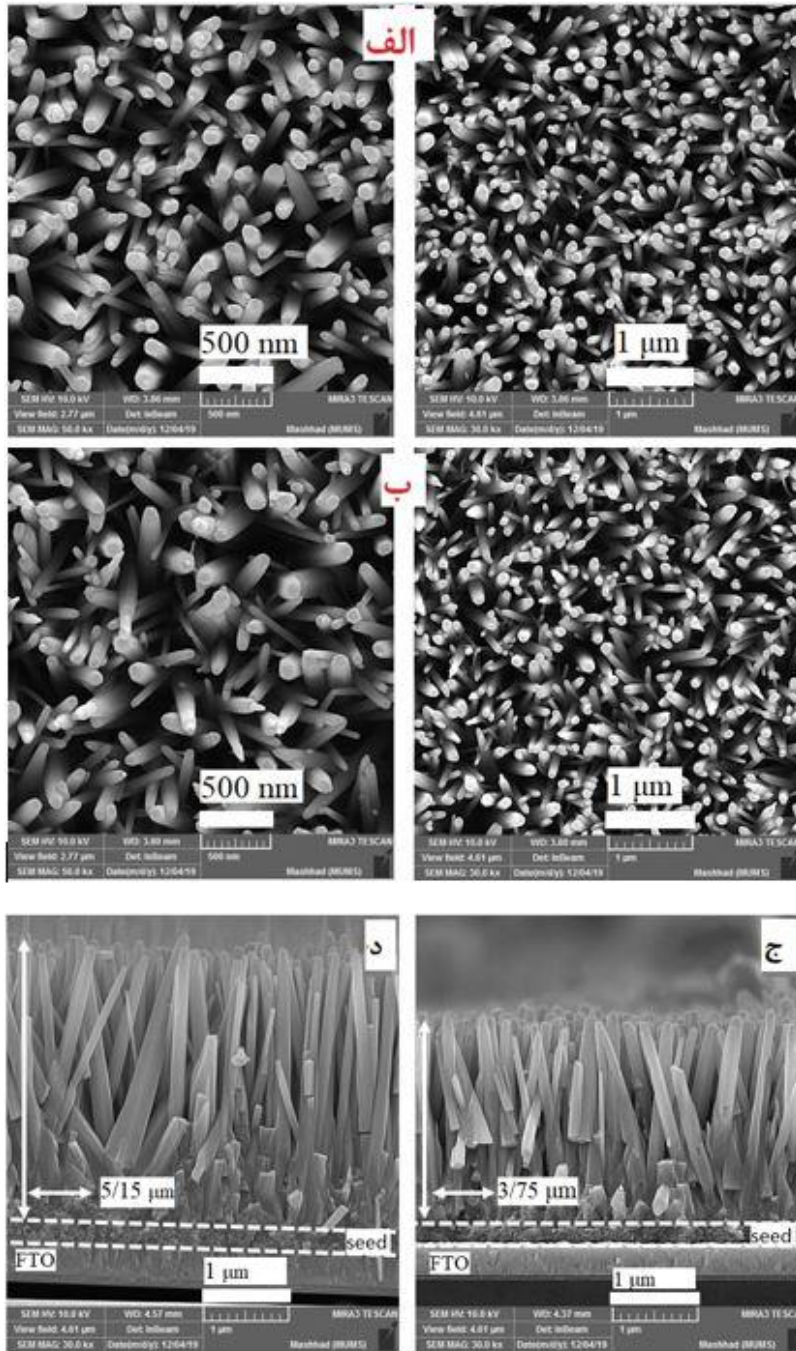
با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود با افزایش مدت زمان لایه‌نشانی درصد اتمی Zn نسبت به O در نانومیله‌های اکسید روی سنتز شده کمی افزایش یافته است. حضور درصد کمی از عناصر Sn و F که در طیف‌های EDS مشاهده شدند به زیرلایه استفاده شده (FTO) تعلق دارند.

جدول ۵-۱۳: درصد وزنی و اتمی عناصر موجود در نمونه‌های Z2 و Z3 استخراج شده از اندازه‌گیری‌های EDS.

نمونه	درصد اتمی (A%)				درصد وزنی (W%)			
	Zn	O	Sn	F	Zn	O	Sn	F
Z2	۴۸/۲۷	۵۰/۳۷	۱/۱۷	۰/۲	۷۸/۷۴	۲۰/۱۱	۰/۶	۰/۵۵
Z3	۴۸/۷۴	۴۹/۵۶	۰/۱۳	۱/۵۸	۷۹/۱۸	۱۹/۷	۰/۳۷	۰/۷۴

۵-۴-۲-۴ بررسی مورفولوژی

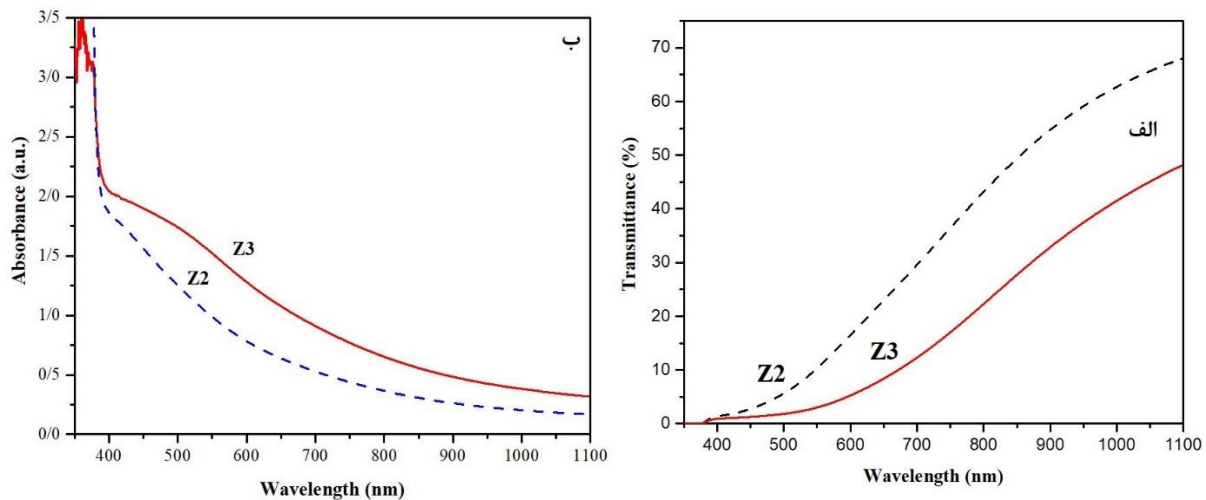
برای بررسی مورفولوژی نمونه‌ها تصاویر FESEM از سطح نانومیله‌های رشد داده شده اکسید روی با مدت زمان لایه‌نشانی متفاوت ثبت گردید. تصاویر دید از بالا، در شکل‌های (۵-۲۹-الف و ب) در دو مقیاس nm ۵۰۰ و ۱ μm و تصاویر دید از پهلو در شکل‌های (۵-۲۹-ج و د) در مقیاس ۲ μm ثبت شدند. بررسی تصاویر FESEM نمونه‌ها نشان می‌دهد که نانومیله‌های تهیه شده در مدت زمان لایه‌نشانی ۳ ساعت (نمونه Z2) دارای قطر و طول متوسط به ترتیب ۱۲۲ nm و ۳/۷۵ μm هستند در حالی که نانومیله‌های تهیه شده در مدت زمان لایه‌نشانی ۵ ساعت (نمونه Z3) دارای قطر و طول متوسط به ترتیب به ۱۴۸ nm و ۵/۱۵ μm می‌باشند. به این ترتیب همانگونه که انتظار داریم با افزایش مدت زمان لایه‌نشانی از ۳ به ۵ ساعت قطر و طول متوسط نانومیله‌ها افزایش یافته‌اند، از تراکم میله‌ها کاسته شده و میزان تخلخل افزایش می‌یابد. در هر دو نمونه نانومیله‌هایی با مقطع شش گوشه مشاهده می‌شوند.



شکل ۵-۲۹: تصاویر FESEM الف) دید از بالا برای نمونه Z2 (ب) دید از بالا برای نمونه Z3 (ج) دید از پهلو برای نمونه Z2 (د) دید از پهلو برای نمونه Z3.

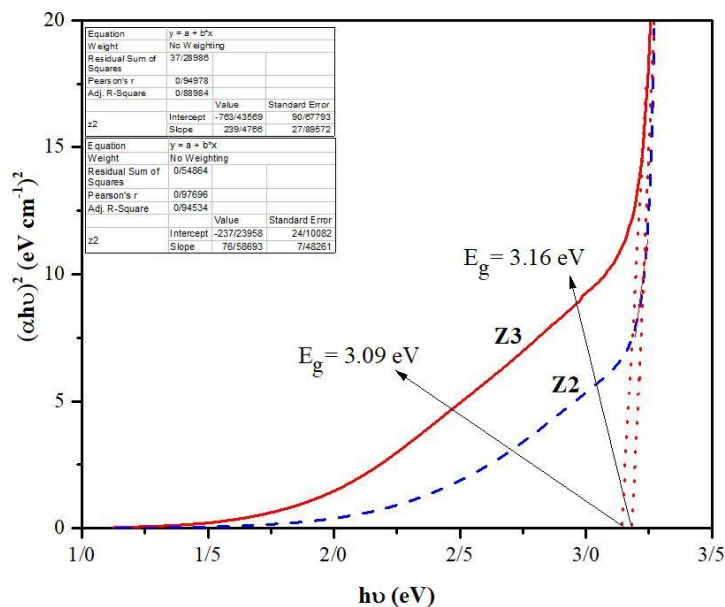
۵-۴-۲-۳ بررسی خواص اپتیکی

شکل (۵-۳۰-الف و ب) طیف‌های عبور و جذب نمونه‌های Z2 و Z3 را بر حسب تابعی از طول موج در محدوده طول موجی ۱۱۰۰-۳۰۰ nm نشان می‌دهد. روند تغییرات دو نمونه در سراسر ناحیه طول موجی اندازه‌گیری شده رفتار یکسانی از خود نشان می‌دهند. لیکن درصد عبور در سراسر ناحیه طول موجی اندازه‌گیری شده در نمونه Z2 بیشتر است. حداکثر عبور در نمونه Z2 به حدود ۶۵٪ می‌رسد. کاهش میزان عبور نمونه Z3 می‌تواند به دلیل افزایش ضخامت این نمونه (۵/۴ μm) نسبت به نمونه دیگر (۴ μm) با احتساب لایه بذر (۲۵۰ nm)، باشد.



شکل ۵-۳۰: تصاویر الف) طیف‌های عبور نمونه‌های Z2 و Z3 ب) طیف‌های جذب نمونه‌های Z2 و Z3

شکل (۵-۳۱) نمودار $(\alpha h\nu)^2$ بر حسب انرژی فرودی فوتون برای دو نمونه Z2 و Z3 را نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش مدت زمان لایه‌نشانی از ۳ ساعت (نمونه Z2) به ۵ ساعت (نمونه Z3) گاف نواری از مقدار ۳/۱۶ eV به مقدار ۳/۰۹ eV کاهش یافته است که این کاهش می‌تواند به دلیل افزایش نقایص بلوری مانند چگالی درفتگی‌ها در این نمونه باشد (جدول ۵-۱۲).



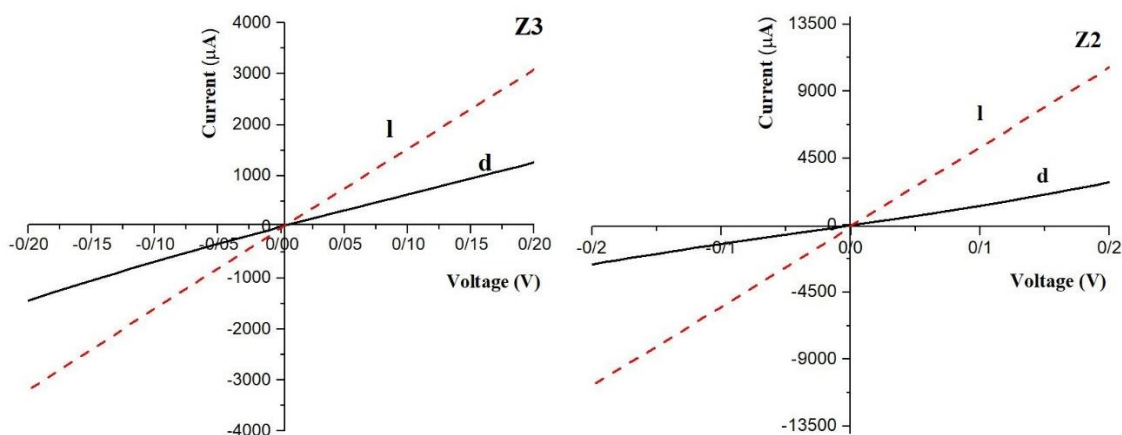
شکل ۵-۳۱: نمودارهای $(\alpha hv)^2$ - $h\nu$ برای نمونه‌های سنتز شده در دو زمان لایه‌نشانی ۳ ساعت (نمونه Z2) و ۵ ساعت (نمونه Z3).

۵-۴-۲-۴ بررسی خواص الکتریکی

برای بررسی خواص الکتریکی نمونه‌ها از اندازه‌گیری‌های ولتاژ-جریان استفاده شده است. نمودار جریان-ولتاژ نمونه‌ها در بازه -0.2 تا 0.2 ولت در تاریکی و روشنایی تحت تابش فرابنفش توسط دستگاه پتاسیواستات، اندازه‌گیری شد. شکل (۵-۳۲ الف و ب) تصاویر نمودارهای مربوطه را نشان می‌دهد. بررسی پاسخ نوری نمونه‌ها (نسبت $I_{\text{photon}} / I_{\text{dark}}$) نشان می‌دهد که با افزایش مدت زمان لایه‌نشانی از ۳ ساعت به ۵ ساعت پاسخ نمونه‌ها افزایش یافته است (جدول ۵-۱۴).

جدول ۵-۱۴: پاسخ نوری برای دو نمونه Z2 و Z3

نمونه	Z2	Z3
$I_{\text{photon}} / I_{\text{dark}}$	۳	۱/۴



شکل ۵-۳۲: نمودارهای جریان-ولتاژ تاریکی و روشنایی برای دو نمونه Z2 و Z3.

۵-۵ بررسی خواص ساختاری، مورفولوژی، اپتیکی و الکتریکی نانومیله‌های اکسید روی رشد یافته بر بسترهای شیشه‌ای و FTO

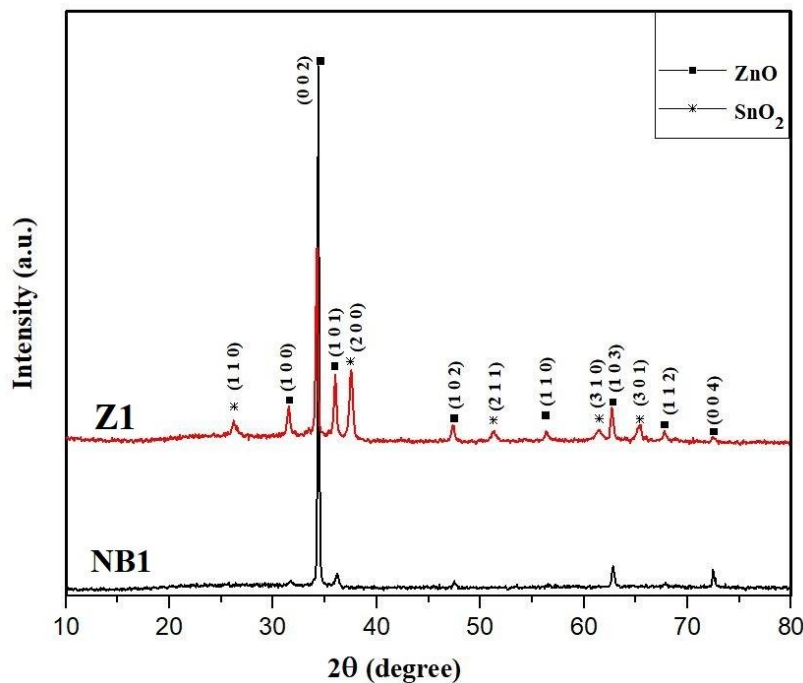
در این بخش به مقایسه نمونه‌های رشد داده شده به روش رسوب گذاری حمام شیمیایی بر بستر شیشه‌ای (NB1)، NB2 و NB3) و نمونه‌های رشد داده شده بر بستر FTO (Z1، Z2 و Z3) پرداخته می‌شود.

۵-۵-۱ مقایسه خواص فیزیکی دو نمونه NB1 و Z1

۵-۵-۱-۱ طیف پراش پرتو ایکس (XRD)

تشکیل ساختار بلوری و نوع آن و نیز جهت‌یابی صفحات بلوری نانومیله‌های اکسید روی را می‌توان توسط تفرق سنج پرتو X تعیین کرد. الگوهای XRD نانومیله‌های اکسید روی تهیه شده به روش رسوب بر دو بستر شیشه‌ای (NB1) و FTO (Z1) در شکل (۵-۳۳) نشان داده شده‌اند. الگوهای XRD نشانگر تشکیل لایه بلوری اکسید روی با قله‌های مربوط به پراش صفحات (۰ ۰ ۲)، (۱ ۰ ۰)، (۰ ۰ ۴)، (۱ ۰ ۱)، (۱ ۰ ۲)، (۱ ۱ ۰)، (۱ ۰ ۳)، (۱ ۱ ۲) و (۰ ۰ ۴)، در فاز ورتسایت با گروه فضایی: P63mc مطابق با کارت استاندارد (JCPDS 010-790-205) در هر دو نمونه است.

همچنین می‌توان الگوی پراش ساختار بلوری SnO_2 با فاز چهار گوشه و گروه فضایی: P42/mnm مطابق با کارت استاندارد (JCPDS 00-046-1088) که مربوط به نمونه با زیرلایه FTO (نمونه Z1) می‌باشد را دید. با مقایسه شدت قله‌های پراش دیده می‌شود که راستای ترجیحی رشد بلور برای هر دو نمونه راستای (۰ ۰ ۲) با ثابت‌های شبکه $a = ۳/۰۱ \text{ \AA}$ و $c = ۵/۲۲ \text{ \AA}$ می‌باشد. با توجه به الگوهای راستای ترجیحی رشد بلور در نمونه‌ای که دارای بستر شیشه‌ای است نسبت به نمونه‌ای که بر بستر FTO رشد داده شده است دارای قله‌ای بلندتر است اما در مورد دیگر قله‌ها، قله‌های مربوط به نمونه Z1 نسبت به قله‌های مربوط به نمونه NB1 قوی‌تر هستند.



شکل ۵-۳۳: الگوهای XRD نانومیله‌های اکسید روی رشد داده شده بر دو بستر متفاوت الف) شیشه‌ای و ب) FTO.

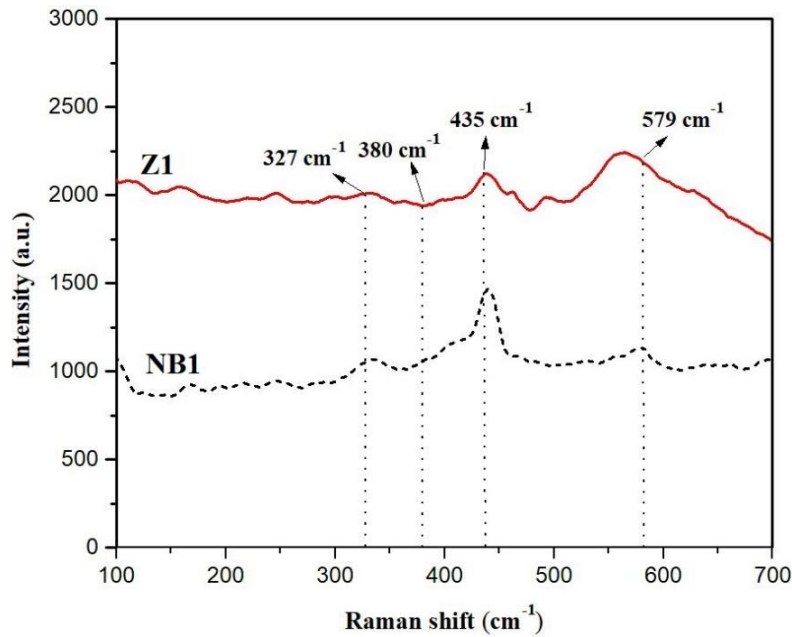
با استفاده از داده‌های استخراج شده از الگوهای پراش و روابط مربوطه، پارامترهای ساختاری نمونه‌ها محاسبه شدند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که اندازه بلورک‌ها در نمونه Z1 نسبت به نمونه NB1 کوچکتر هستند. این نتایج در جدول ۵-۱۵ گزارش شده‌اند.

جدول ۵-۱۵: پارامترهای ساختاری محاسبه شده با استفاده از الگوهای پراش نمونه‌های مورد مطالعه و ضخامت لایه‌ها.

نمونه	صفحه	D (nm)	d (nm)	$\varepsilon \times 10^{-3}$	$\sigma \times 10^{-4} (\text{nm})^{-2}$	FWHM (°)	ثابت‌های شبكة Å	ضخامت μm
NB1	(۰ ۰ ۲)	۵۲/۱	۰/۲۶	۲/۲	۳/۶	۰/۱۶۴۶	a = b = 3 c = 5.2	۲/۶۵
Z1	(۰ ۰ ۲)	۴۹/۵	۰/۲۶	۲/۴	۴/۰.۸	۰/۱۷۱۹۰	a = b = 3 c = 5.2	۱

۵-۵-۱-۲ طیف‌سنجی رامان

طیف‌های رامان نمونه‌ها قله‌های برجسته‌ای در 327 cm^{-1} ، 380 cm^{-1} ، 435 cm^{-1} و 579 cm^{-1} را نشان می‌دهد. قله در موقعیت 435 cm^{-1} به مد E_2 به ساختار شش گوشه اکسید روی مربوط است. قله در 579 cm^{-1} که واقع در بین مدهای نوری A_1 و E_1 می‌باشد به نقص‌های اکسیژن نسبت داده می‌شود. قله در جابجایی رامان cm^{-1} 380 نیز مد عرضی A_1 طیف رامان اکسید روی بوده که به ماهیت ناهمسانگرد بودن ثابت نیرو مربوط شده است. قله در 327 cm^{-1} نیز به تقارن مد A_1 ناشی از فرآیند آکوستیکی قوی مربوط می‌شود [۶۲]. در شکل (۵-۳۴) طیف دو نمونه از نانومیله‌های اکسید روی رشد داده شده بر دو بستر متفاوت با هم مقایسه شده است. طیف به شکل خط مقطع متعلق به نمونه NB1 و طیف به شکل خط ممتد متعلق به نمونه Z1 می‌باشد. با توجه به دو طیف نتیجه می‌شود که در موقعیت‌های 327 cm^{-1} ، 380 cm^{-1} و 435 cm^{-1} نمونه NB1 دارای قله‌های قوی‌تر نسبت به نمونه Z1 ولی در موقعیت 579 cm^{-1} نمونه Z1 دارای قله‌ی قوی‌تری است.

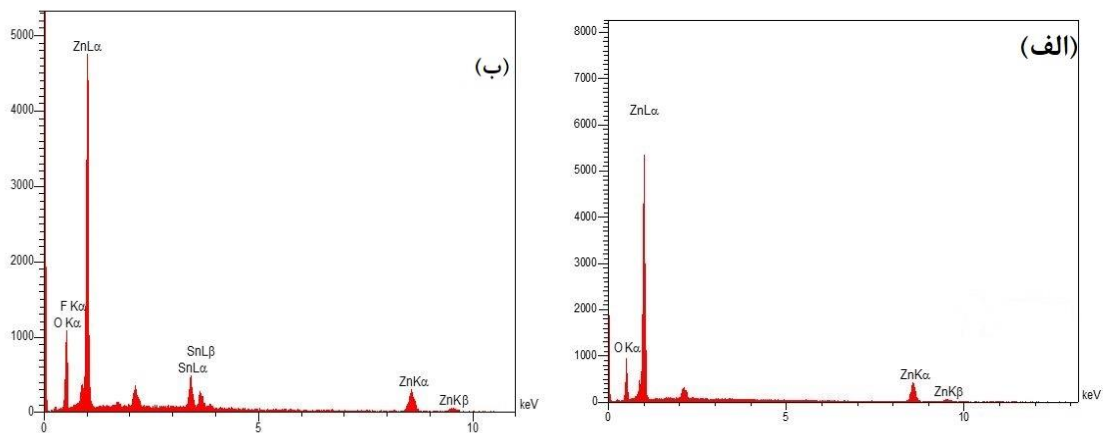


شکل ۳۴-۵: طیف‌های رامان مربوط به نمونه‌های Z1 و NB1

۵-۱-۳ طیف سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس (EDS)

شکل (۵-۳۵ الف و ب) نتایج EDS مربوط نمونه‌های اکسید روی الف) رشد داده بر بستر شیشه‌ای (NB1) و ب)

رشد داده شده بر بستر FTO (Z1) را نشان می‌دهد.



شکل ۳۵-۵: طیف پراش انرژی پرتو ایکس برای الف) نمونه NB1 و ب) نمونه Z1

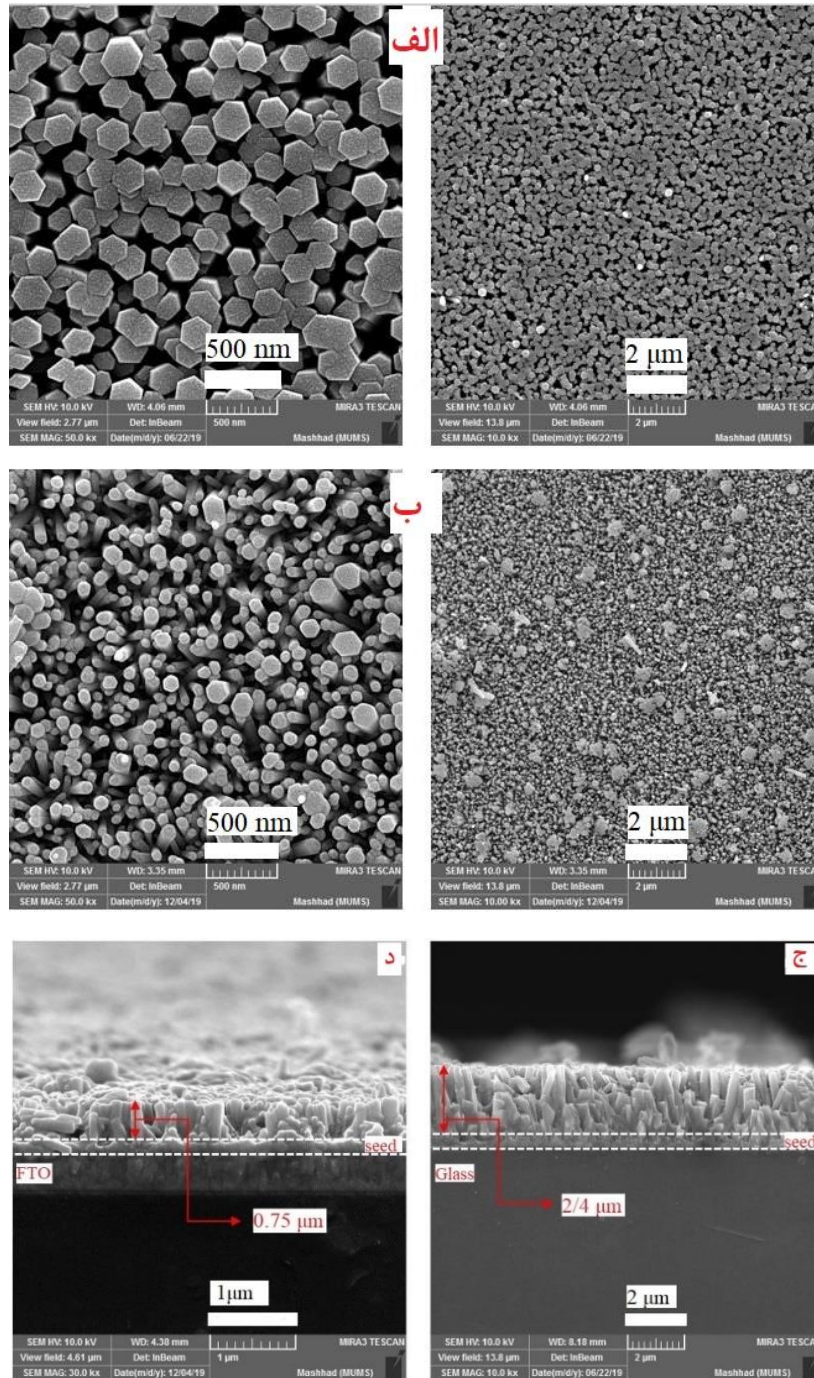
درصد وزنی و درصد اتمی عناصر روی و اکسیژن در جدول ۵-۱۶ گزارش شده است.

جدول ۵-۱۶: نتایج حاصل از طیف سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس برای دو نمونه NB1 و Z1.

نمونه	درصد اتمی (A%)				درصد وزنی (W%)			
	Zn	O	Sn	F	Zn	O	Sn	F
NB1	۲۲/۱۴	۷۴/۸۶	-	-	۵۳/۲۶	۴۶/۲۶	-	-
Z1	۲۷/۵۴	۶۳/۸۵	۶/۲	۲/۳۹	۴۹/۹۲	۲۸/۳۳	۲۰/۴۹	۱/۲۶

۵-۱-۵-۴ بررسی مورفولوژی

برای بررسی مورفولوژی نمونه‌های NB1 و Z1 تصاویر FESEM ثبت گردید. تصاویر دید از بالا، شکل (۵-۳۶) - الف و ب) برای هر دو نمونه در دو مقیاس ۵۰۰ nm و ۲ μm و تصاویر دید از پهلو شکل (۵-۳۶-ج و د) با مقیاس‌های ۱ μm و ۲ μm وجود دارند. دمای رشد، pH، زمان لایه نشانی و غلظت محلول ثابت هستند. نانومیله‌های تهیه شده بر بستر شیشه‌ای دارای قطر و طول متوسط به ترتیب ۲۲۰ nm و ۲/۴ μm و در نانومیله‌های تهیه شده بر بستر FTO قطر و طول متوسط به ترتیب به ۸۴ nm و ۰/۷۵ μm کاهش یافتند. همچنین مشاهده می‌شود که نانومیله‌های رشد داده شده بر بستر FTO نسبت به نانومیله‌های رشد داده شده بر بستر شیشه‌ای دارای تراکم کمتر و تخلخل بیشتر هستند. ضخامت نمونه‌های NB1 و Z1 با توجه به تصویر دید از پهلو FESEM (شکل ۵-۳۶-ج و د) به ترتیب ۲/۶۵ μm و ۱ μm با احتساب لایه بذری (۲۵۰ nm) اندازه‌گیری شدند.

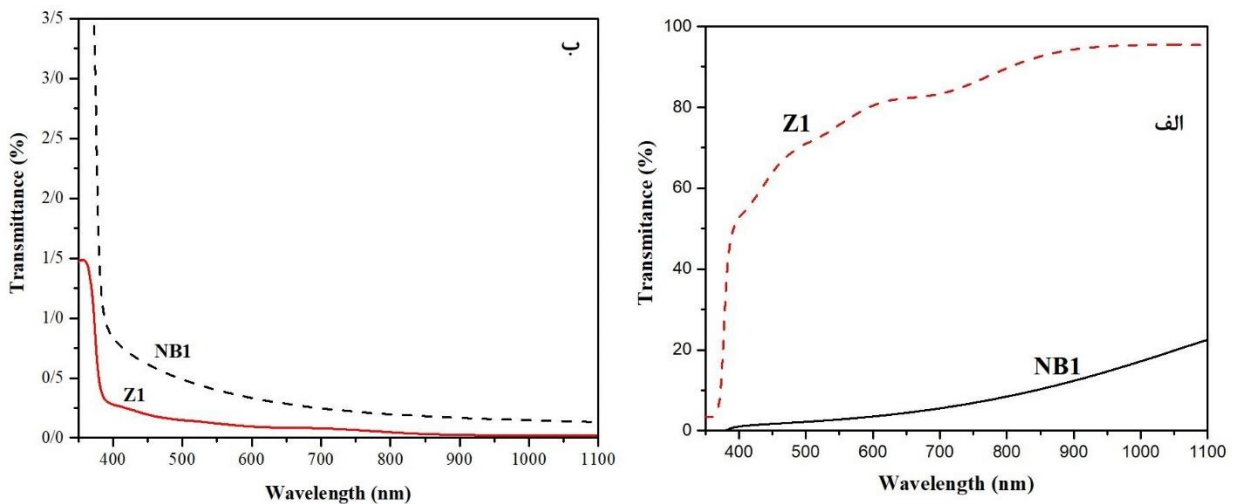


شکل ۵-۳۶: تصاویر FESEM (الف) دید از بالا نمونه NB1 (ب) دید از بالا نمونه Z1 (ج) دید از پهلو نمونه NB1 (د) دید از پهلو نمونه

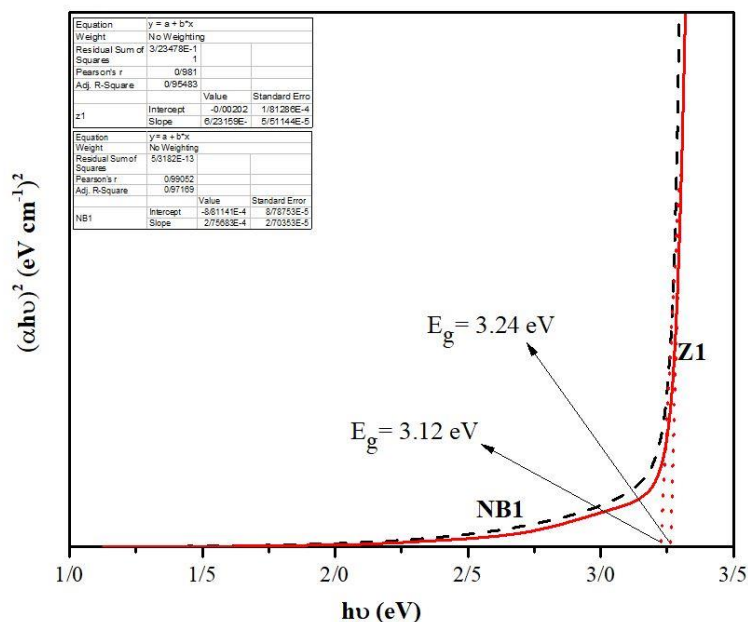
.Z1

۵-۱-۵-۵ بررسی خواص اپتیکی

شکل (۵-۳۷-الف و ب) طیف‌های عبور و جذب لایه‌های اکسید روی رشد داده شده به روش رسوب حمام شیمیایی در دو نمونه NB1 و Z1 را بر حسب تابعی از طول موج در محدوده ۱۱۰۰-۳۰۰ nm نشان می‌دهد. کاهش ضریب عبور در نمونه NB1 نسبت به نمونه Z1 می‌تواند بدلیل ضخامت بیشتر لایه در نمونه NB1 (۲/۶۵ μm) در مقایسه با لایه نمونه دیگر (۱ μm) و تغییرات مربوط به مورفولوژی سطح لایه‌ها (شکل ۵-۳۵) و نیز بزرگ‌تر بودن اندازه بلورک‌ها در نمونه NB1 نسبت به نمونه Z1 باشد. با توجه به شکل (۵-۳۶-ب) مشاهده می‌شود که میزان جذب در نمونه با بستر شیشه‌ای بیشتر از نمونه با بستر FTO است. با استفاده از طیف جذب لایه‌ها می‌توان گاف نواری را محاسبه کرد. برای این منظور با توجه به روابط (۲-۷) و (۲-۸) ابتدا ضریب جذب (α) و سپس با استفاده از آن گاف نواری را محاسبه می‌کنیم. شکل (۵-۳۸) نمودار $(\alpha h\nu)^2$ بر حسب انرژی فرودی فوتون برای دو نمونه NB1 و Z1 را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۳۷: تصاویر الف) طیف‌های عبور نمونه‌های NB1 و Z1 ب) طیف‌های جذب نمونه‌های NB1 و Z1.

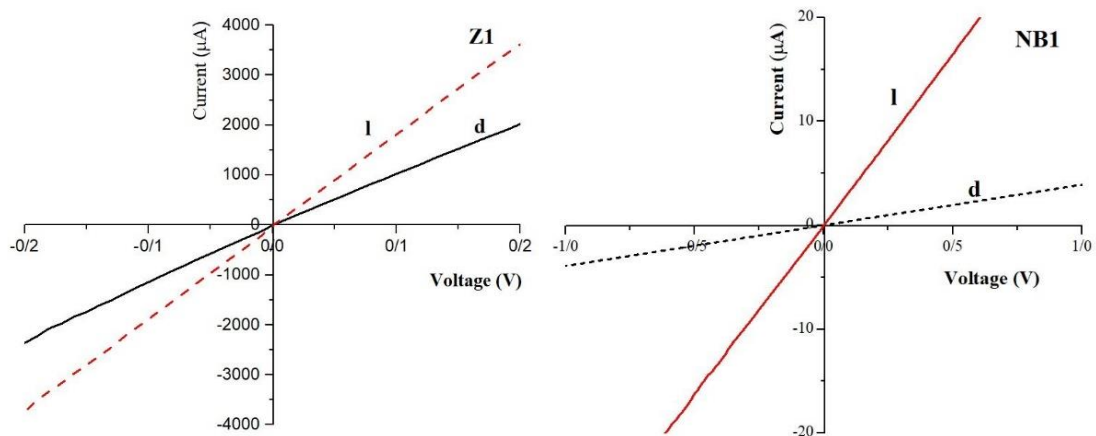


شکل ۵-۳۸: نمودارهای $h\nu - (\alpha h\nu)^2$ نمونه‌های NB1 و Z1

گاف نواری مربوط به نمونه Z1 ($3/24 \text{ eV}$) نسبت به نمونه NB1 ($3/12 \text{ eV}$) قدری افزایش یافت که می‌تواند مربوط به اثر حبس کوانتومی باشد.

۵-۱-۵-۶ بررسی خواص الکتریکی

در این بخش برای بررسی خواص الکتریکی نمونه‌ها از اندازه‌گیری‌های ولتاژ-جریان استفاده شده است. نمودار جریان-ولتاژ نمونه‌ها در بازه $-0/2$ تا $0/2$ ولت در تاریکی و تحت تابش نور فرابنفش توسط پتاسیواستات اندازه‌گیری شد. شکل‌های (۵-۳۹ الف و ب) نمودارهای جریان-ولتاژ در شرایط تاریکی و روشنایی را برای نمونه‌های NB1 و Z1 نشان می‌دهد. رفتار فوتوالکتریکی نمونه‌ها در شرایط تاریکی (I_{dark}) و روشنایی (I_{light}) تحت تابش نور فرابنفش مورد بررسی قرار گرفت. $I_{\text{photon}} / I_{\text{dark}}$ نشان دهنده پاسخ نوری الکتریکی به فوتون‌های فرودی است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد مقدار $I_{\text{photon}} / I_{\text{dark}}$ برای نمونه NB1 بیشتر از نمونه Z1 است.



شکل ۵-۳۹: نمودار جریان-ولتاژ تاریکی و روشنایی دو نمونه NB1 و Z1

جدول ۵-۱۷: پاسخ نوری برای دو نمونه NB1 و Z1

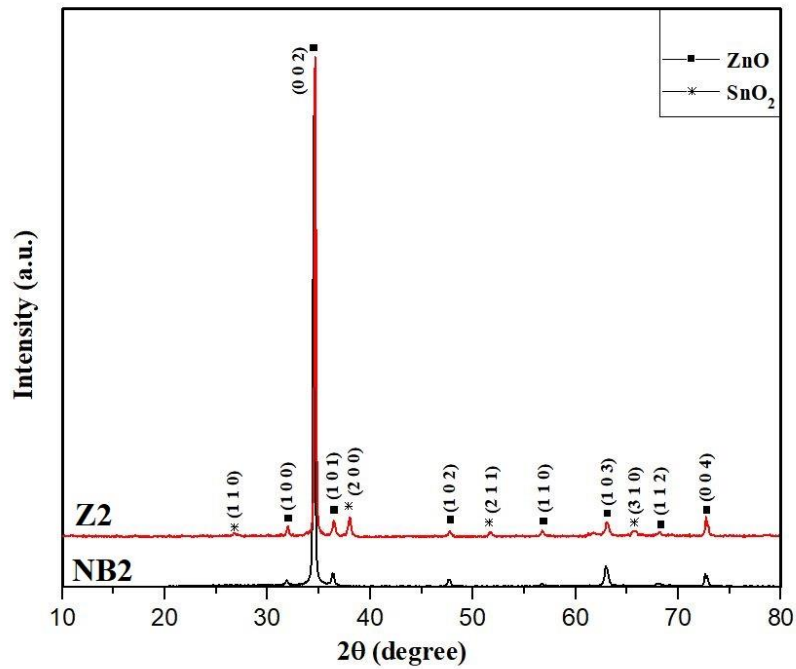
نمونه	NB1	Z1
$I_{\text{photon}} / I_{\text{dark}}$	۷/۵۷	۰/۷۹

۵-۵-۲ مقایسه خواص فیزیکی دو نمونه NB2 و Z2

۵-۵-۲-۱ طیف پراش پرتو ایکس (XRD)

تشکیل ساختار بلوری و نوع آن و نیز جهت‌یابی صفحات بلوری نانومیله‌های اکسید روی را می‌توان توسط پراش پرتو X تعیین کرد. شکل (۵-۴۰) الگوهای XRD نانومیله‌های اکسید روی تهیه شده به روش رسوب بر دو بستر شیشه‌ای (NB2) و FTO (Z2) را نشان می‌دهد. الگوهای XRD نشانگر تشکیل لایه بلوری اکسید روی با قله‌های مربوط به فاز ورتسایت با گروه فضایی: P63mc مطابق با کارت استاندارد (JCPDS 010-790-205) در هر دو نمونه

است. می‌توان الگوی پراش ساختار بلوری SnO_2 با فاز چهار گوشه و گروه فضایی: $P42/mnm$ مطابق با کارت استاندارد (JCPDS 00-046-1088) که مربوط به نمونه با زیرلایه FTO (نمونه Z2) می‌باشد را دید.



شکل ۵-۴۰: الگوهای XRD نمونه‌های NB2 و Z2.

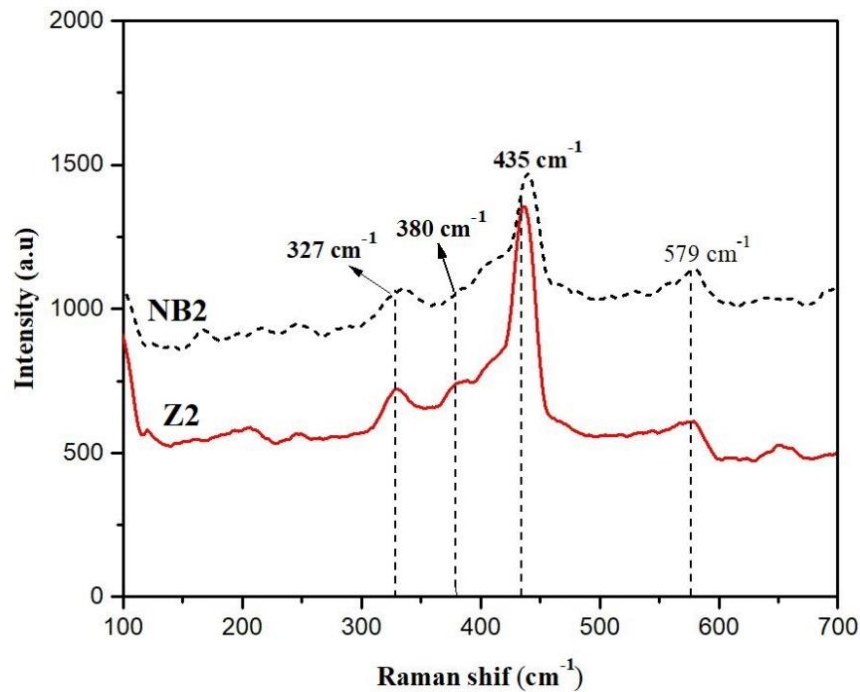
راستای ترجیحی رشد بلور برای هر دو نمونه راستای $(0 \ 0 \ 2)$ با ثابت‌های شبکه $a = 3.71 \text{ \AA}$ و $c = 5.22 \text{ \AA}$ می‌باشد. راستای ترجیحی رشد بلور در نمونه NB2 نسبت به نمونه Z2 دارای قله‌ای بلندتر است. با استفاده از داده‌های استخراج شده از الگوهای پراش و روابط مربوطه، پارامترهای ساختاری نمونه‌ها محاسبه شدند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که اندازه بلورک‌ها در نمونه Z1 نسبت به نمونه NB1 کوچکتر هستند. این نتایج در جدول ۵-۱۸ گزارش شده‌اند.

جدول ۵-۱۸: پارامترهای ساختاری محاسبه شده با استفاده از الگوهای پراش نمونه‌های مورد مطالعه و ضخامت لایه‌ها.

نمونه	صفحه	D (nm)	d (nm)	$\epsilon \times 10^{-3}$	$\sigma \times 10^{-4} \text{ (nm)}^{-2}$	FWHM ($^{\circ}$)	ثابت‌های شبه‌ \AA	ضخامت μm
NB2	(۰ ۰ ۲)	۴۱/۶	۰/۲۶	۰/۰۰۲۸	۳/۶	۰/۲۰۲۴	a = b = 3 c = 5.2	۳/۲۵
Z2	(۰ ۰ ۲)	۴۶/۸	۰/۲۵	۰/۰۰۲۴۸	۴/۵	۰/۱۸۳۳	a = b = 3 c = 5.2	۴

۵-۵-۲-۲ طیف‌سنجی رامان

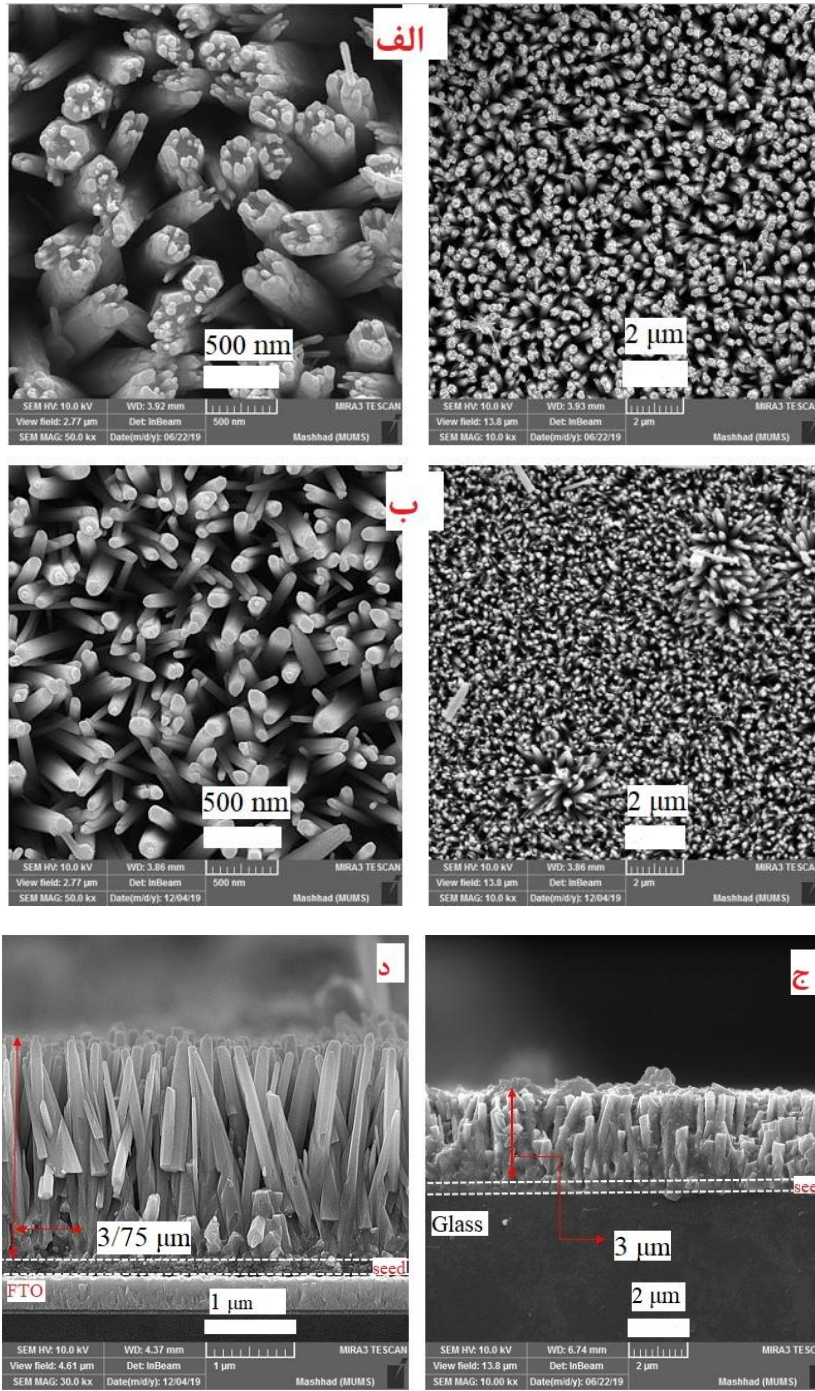
طیف‌های رامان نمونه‌های NB2 و Z2 (شکل ۵-۴۱) قله‌های برجسته‌ای در ۳۲۷ cm^{-1} ، ۳۸۰ cm^{-1} ، ۴۳۵ cm^{-1} و ۵۷۹ cm^{-1} را نشان می‌دهد. قله در موقعیت ۴۳۵ cm^{-1} با مد E_2 به ساختار شش گوشه اکسید روی مربوط است. قله در ۵۷۹ cm^{-1} که واقع در بین مدهای نوری A_1 و E_1 می‌باشد به نقص‌های اکسیژن نسبت داده می‌شود. قله در جابجایی رامان ۳۸۰ cm^{-1} نیز مد عرضی A_1 طیف رامان اکسید روی بوده که به ماهیت ناهمسانگرد بودن ثابت نیرو مربوط شده است. قله در ۳۲۷ cm^{-1} نیز به تقارن مد A_1 ناشی از فرآیند آکوستیکی قوی مربوط می‌شود [۶۲]. طیف به شکل خط مقطع متعلق به نمونه NB2 و طیف به شکل خط ممتد متعلق به نمونه Z2 می‌باشد. با توجه به دو طیف نتیجه می‌شود در تمام موقعیت‌ها نمونه NB2 دارای قله‌های قوی‌تر نسبت به نمونه Z2 است.



شکل ۵-۴۱: طیف‌های رامان مربوط به نمونه‌های NB2 و Z2.

۵-۲-۵-۵ بررسی مورفولوژی

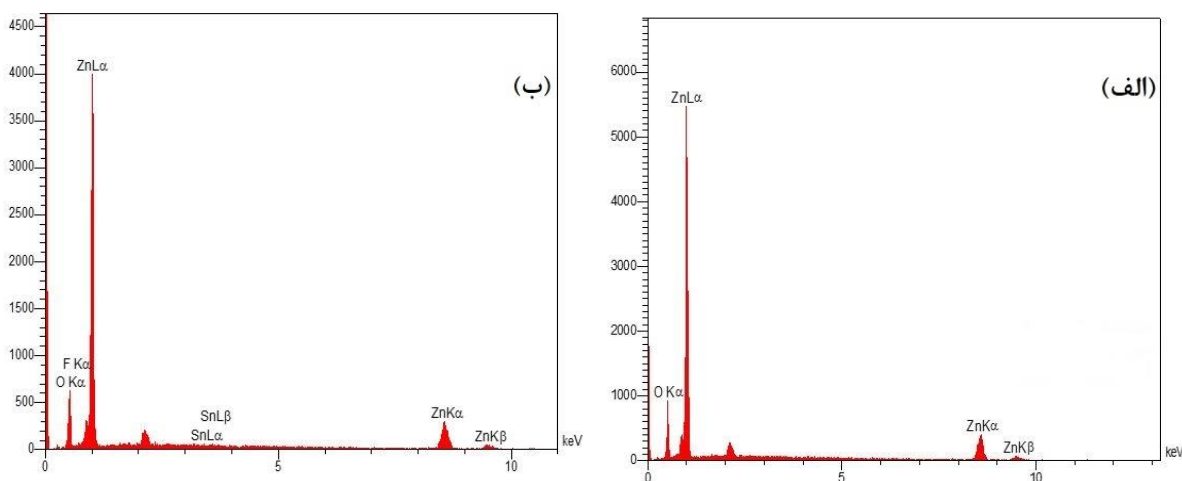
برای بررسی مورفولوژی، تصاویر FESEM از نمونه‌های NB2 (شکل ۵-۴۲-الف) و Z2 (شکل ۵-۴۲-ب) ، ثبت گردید. تصاویر دید از بالا، (شکل ۵-۴۲، الف و ب) برای هر دو نمونه در دو مقیاس ۵۰۰ nm و ۲ μm و تصاویر دید از پهلو (شکل ۵-۴۲-ج و د) با مقیاس‌های ۱ μm و ۲ μm ثبت شدند. دمای رشد، pH، زمان لایه نشانی و غلظت محلول ثابت هستند. نانومیله‌های تهیه شده بر بستر شیشه‌ای دارای قطر و طول متوسط به ترتیب ۳۲۸ nm و ۳ μm هستند. نانومیله‌های تهیه شده بر بستر FTO دارای قطر و طول متوسط به ترتیب ۱۲۲ nm و ۳/۷۵ μm هستند. ضخامت نمونه‌های NB2 و Z2 با توجه به تصویر دید از پهلو FESEM (شکل ۵-۴۲-ج و د) با احتساب لایه اکسید روی بذر (۲۵۰ nm) برای نمونه‌های NB2 و Z2 به ترتیب ۳/۲۵ μm و ۴ μm اندازه‌گیری شد.



شکل ۵-۴۲: تصاویر FESEM (الف) دید از بالا برای نمونه NB2 (ب) دید از بالا برای نمونه Z2 (ج) دید از پهلو برای نمونه NB2 (د) دید از پهلو برای نمونه Z2.

۵-۲-۳ طیف سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس (EDS)

شکل (۵-۴۳-الف و ب) طیف‌های EDS نمونه‌های NB2 و Z2 را نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده در قالب جدول (۵-۱۹) قابل ملاحظه هستند.



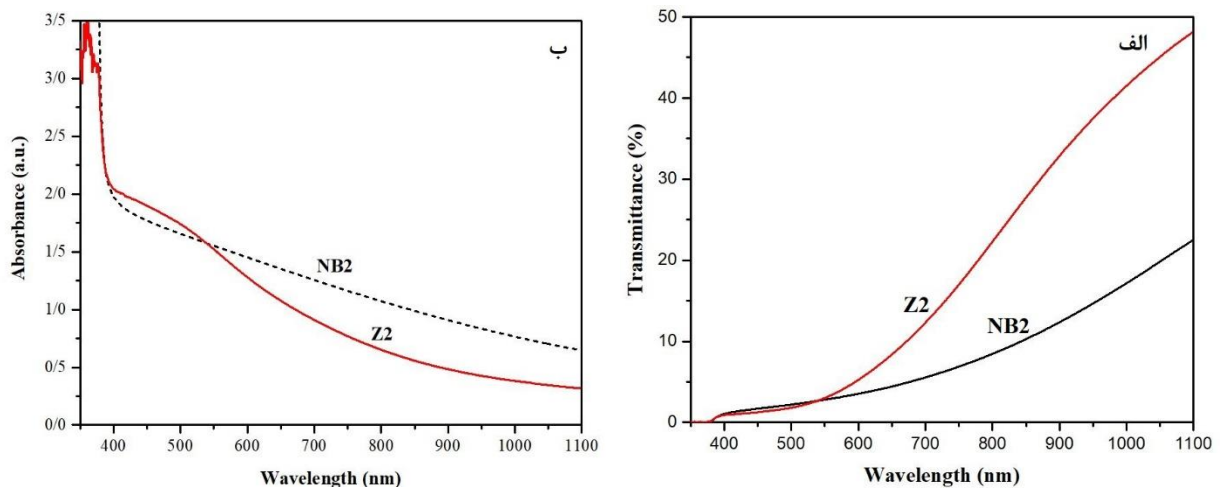
شکل ۵-۴۳: طیف‌های پراش انرژی پرتو ایکس برای نمونه (الف) NB2 و (ب) Z2

جدول ۵-۱۹: نتایج حاصل از طیف سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس برای دو نمونه NB2 و Z2.

نمونه	درصد اتمی (A%)				درصد وزنی (W%)			
	Zn	O	Sn	F	Zn	O	Sn	F
NB2	۲۳/۶۵	۷۶/۳۵	-	-	۵۵/۸۶	۴۴/۱۴	-	-
Z2	۴۸/۲۷	۵۰/۳۷	۱/۱۷	۰/۲	۷۸/۷۴	۲۰/۱۱	۰/۶	۰/۵۵

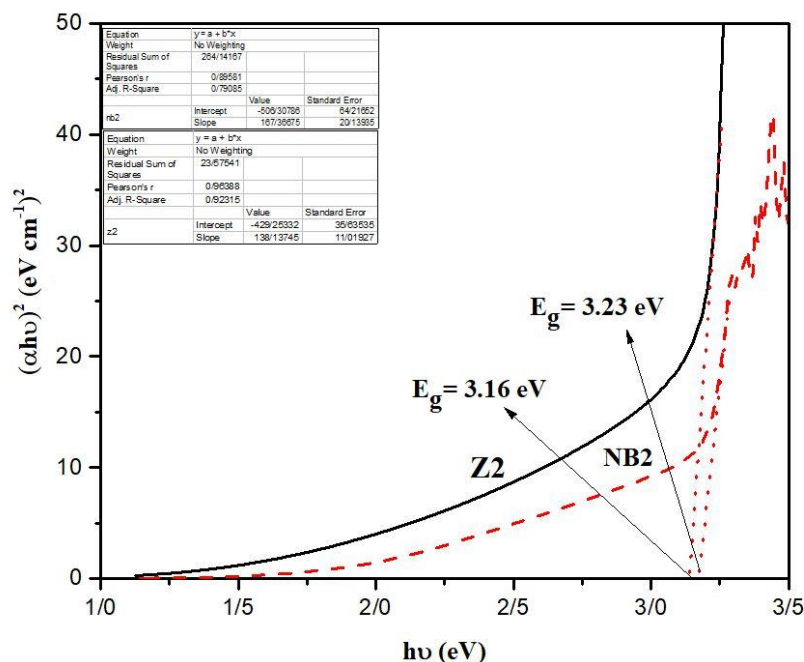
۵-۲-۳ بررسی خواص اپتیکی

شکل (۵-۴۴-الف و ب) طیف‌های عبور و جذب نمونه‌های NB2 و Z2 را بر حسب تابعی از طول موج در محدوده ۳۰۰-۱۱۰۰ nm نشان می‌دهد. کمتر بودن میزان عبور در نمونه NB2 بدلیل پراکندگی بیشتر بدلیل تخلخل بیشتر در نمونه NB2 نسبت به نمونه Z2 است. شکل (۵-۴۴-ب) نشان می‌دهد که میزان جذب در نمونه NB2 به مقدار اندکی از نمونه Z2 بیشتر است.



شکل ۵-۴۴: تصاویر الف) طیف عبور نمونه‌های NB2 و Z2 ب) طیف جذب نمونه‌های NB2 و Z2.

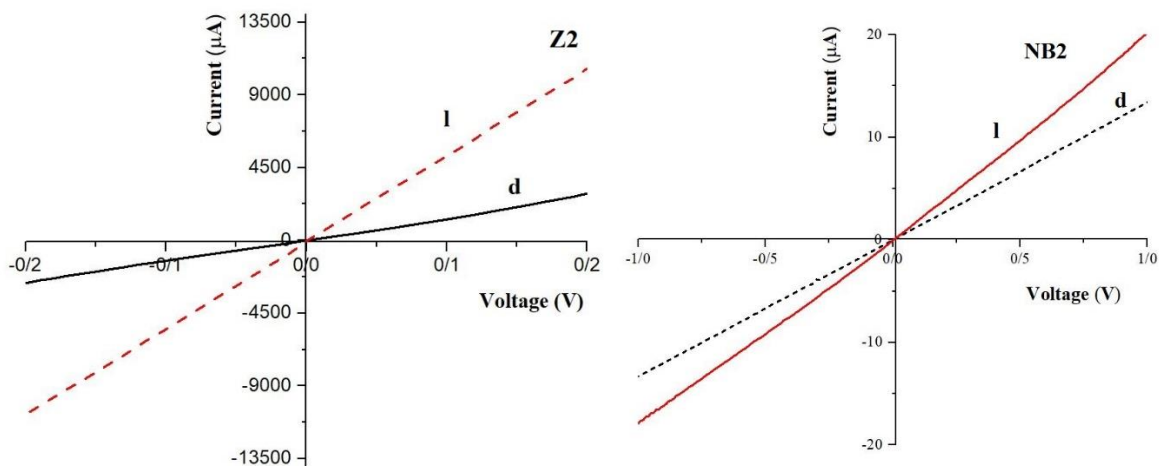
با استفاده از طیف جذب لایه‌ها می‌توان گاف نواری را محاسبه کرد. برای این منظور با توجه به روابط (۲-۷) و (۸-۸) ابتدا ضریب جذب (α) و سپس با استفاده از آن گاف نواری را محاسبه می‌کنیم. شکل (۵-۴۵) نمودار $(\alpha h\nu)^2$ بر حسب انرژی فرودی فوتون برای دو نمونه NB2 و Z2 را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که گاف نواری مربوط به نمونه با بستر شیشه‌ای (NB2) برابر $3/23$ eV و برای نمونه با بستر FTO (Z2) برابر با $3/16$ eV است.



شکل ۵-۴۵: نمودارهای $h\nu - (\alpha h\nu)^2$ نمونه‌های NB2 و Z2

۵-۲-۴ بررسی خواص الکتریکی

برای بررسی خواص الکتریکی نمونه‌ها از اندازه‌گیری‌های ولتاژ-جریان استفاده شد. نمودار جریان-ولتاژ نمونه‌ها در بازه $0/2 - 0/2$ ولت در تاریکی و روشنایی تحت تابش نور فرابنفش توسط پتاسیواستات اندازه‌گیری شد. شکل (۴۶-۵-الف و ب) تصاویر نمودارهای جریان-ولتاژ تاریکی و روشنایی مربوطه را نشان می‌دهد. رفتار فوتوالکتریکی نمونه‌ها در شرایط تاریکی و روشنایی تحت تابش نور با شدت فرابنفش مورد بررسی قرار گرفت و نتایج در قالب جدول (۵-۲۰) گردآوری شد. نتایج بررسی پاسخ نوری نمونه‌ها (نسبت $I_{\text{photon}} / I_{\text{dark}}$) نشان می‌دهد مقدار I_{photon} برای نمونه Z2 بیشتر از نمونه NB2 است.



شکل ۵-۴۶: نمودارهای جریان-ولتاژ در شرایط تاریکی و روشنایی برای دو نمونه NB2 و Z2.

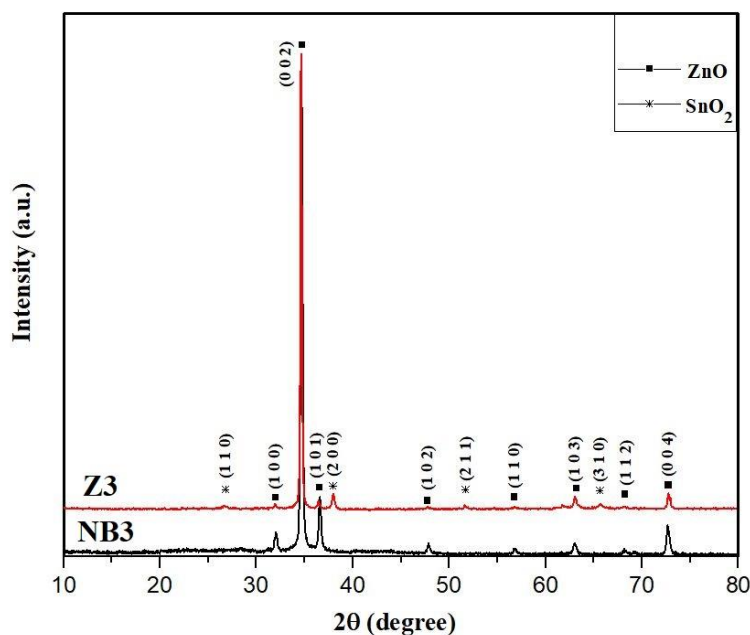
جدول ۵-۲۰: پاسخ نوری برای دو نمونه NB2 و Z2.

نمونه	NB2	Z2
$I_{\text{photon}} / I_{\text{dark}}$	۰/۵	۳

۵-۵-۳ مقایسه خواص فیزیکی دو نمونه NB3 و Z3

۵-۵-۳-۱ طیف پراش پرتو ایکس (XRD)

تشکیل ساختار بلوری و نوع آن و نیز جهت یابی صفحات بلوری نانومیله‌های اکسید روی را می‌توان توسط تفرق سنج پرتو X تعیین کرد. شکل (۵-۴۷) الگوهای XRD نانومیله‌های اکسید روی تهیه شده به روش رسوب بر دو بستر شیشه‌ای (NB3) و FTO (Z3) را نشان می‌دهد. این الگوها نشانگر تشکیل لایه بلوری اکسید روی با قله‌های مربوط به پراش صفحات از (۰ ۰ ۰)، (۱ ۰ ۰)، (۰ ۰ ۲)، (۱ ۰ ۱)، (۱ ۰ ۲)، (۱ ۱ ۰)، (۱ ۰ ۳)، (۱ ۱ ۲) و (۰ ۰ ۴)، با ساختار ورتسایت با گروه فضایی: P63mc مطابق با کارت استاندارد (JCPDS 010-790-205) است.



شکل ۵-۴۷: الگوهای XRD نمونه‌های NB3 و Z3

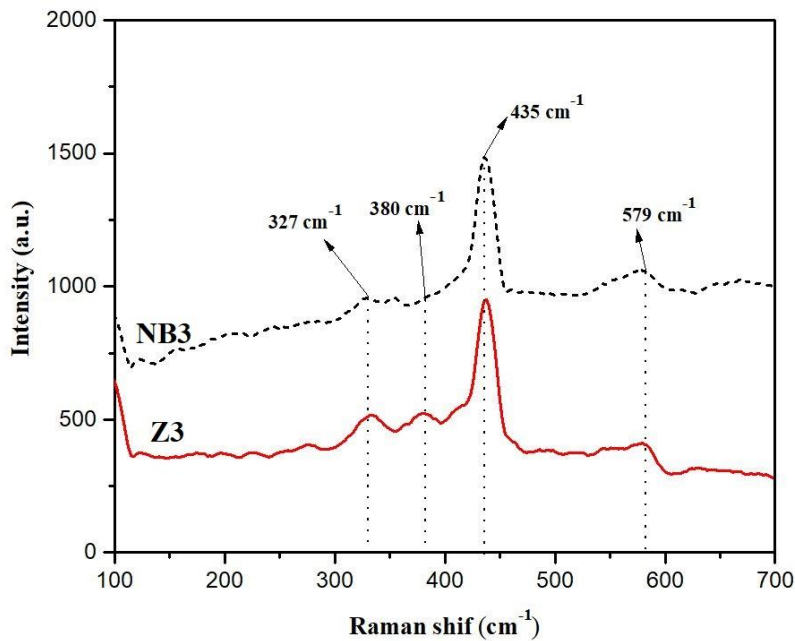
همچنین می‌توان الگوی مربوط SnO_2 با قله‌های مربوط به پراش صفحات از $(1\ 1\ 0)$ $(1\ 0\ 1)$ $(2\ 0\ 0)$ $(2\ 1\ 1)$ $(3\ 1\ 0)$ $(3\ 0\ 1)$ با ساختار چهار گوشه با گروه فضایی: $P42/mnm$ مطابق با کارت استاندارد (JCPDS 00-046-1088) که مربوط به زیرلایه می‌باشد را دید. راستای ترجیحی رشد بلور برای هر دو نمونه راستای $(0\ 0\ 2)$ با ثابت‌های شبکه $a = 3.71\ \text{\AA}$ و $c = 5.22\ \text{\AA}$ می‌باشد. با توجه به شکل (۵-۴۷، الف و ب) ملاحظه می‌شود که راستای ترجیحی رشد بلور در نمونه NB3 نسبت به نمونه Z3 دارای قله‌ای بلندتر است. با تحلیل داده‌ها می‌توان به اطلاعات مهمی از جمله فاصله صفحات (d) (از معادله ۲-۱)، اندازه بلورکها (D) با استفاده از رابطه شرر (معادله ۲-۲)، میزان کرنش (ϵ) (معادله ۲-۳) و چگالی درفتمگی‌ها (σ) (معادله ۲-۴) دست یافت که نتیجه این محاسبات در جدول (۵-۲۱) قابل مشاهده است.

جدول ۵-۲۱: نتایج بدست آمده از تحلیل الگوهای XRD از نمونه‌های مورد مطالعه و ضخامت لایه‌ها.

نمونه	صفحه	D (nm)	d (nm)	$\varepsilon \times 10^{-3}$	$\sigma \times 10^{-4} (\text{nm})^{-2}$	FWHM (°)	ثابت‌های شبکه Å	ضخامت μm
NB3	(۰ ۰ ۲)	۳۳/۵	۰/۲۶	۳/۶	۸/۹	۰/۲۵۳۳	a = b = 3 c = 5.18	۵/۴۵
Z3	(۰ ۰ ۲)	۴۵/۴	۰/۲۵	۲/۵	۴/۸	۰/۱۸۴۹۹	a = b = 3 c = 5.2	۵/۴

۵-۵-۳-۲ طیف‌سنجی رامان

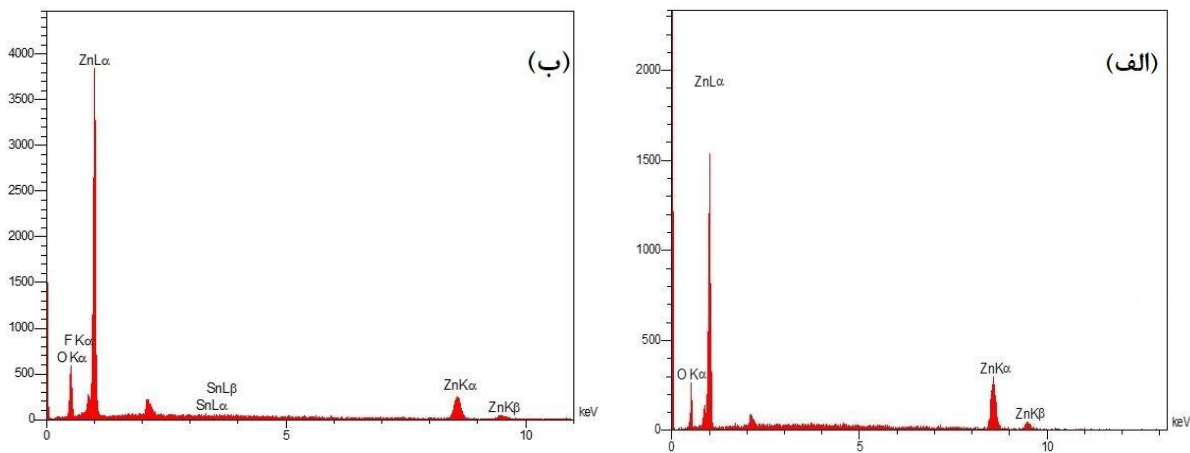
طیف‌های رامان نمونه‌های NB3 (خط مقطع) و Z3 (خط ممتد) در شکل (۵-۴۸) نشان داده شده است. مطالعات نشان می‌دهد که مدهای فعال رامان برای بلورهای اکسید روی مدهای E_1 ، $2E_2$ و A_1 هستند. در طیف‌های رامان هر دو نمونه قله‌های قوی‌تر در جابجایی‌های رامان 327 cm^{-1} ، 380 cm^{-1} ، 435 cm^{-1} و 579 cm^{-1} مشاهده می‌شوند. قله در 435 cm^{-1} مربوط به مد E_2 (فرکانس بالا) است که ساختار ورتسایت نانومیله‌های اکسید روی را تایید می‌کند. قله در 380 cm^{-1} به مد عرضی A_1 نسبت داده می‌شود که به دلیل ماهیت ناهمسانگرد ثابت نیرو ظاهر می‌شود. قله 327 cm^{-1} نیز از تقارن مدهای A_1 ناشی از فرآیندهای آکوستیکی قوی ایجاد می‌شوند [۶۲]. قله در موقعیت 579 cm^{-1} واقع در بین دو مد نوری A_1 و E_1 ناشی از نقص‌های وابسته به اتم‌های اکسیژن است. مقایسه طیف‌های رامان دو نمونه نشان می‌دهد که قله در موقعیت 435 cm^{-1} در نمونه (Z3) نسبت به نمونه (NB3) قوی‌تر است.



شکل ۴۸-۵: طیف‌های رامان برای نمونه‌های NB3 و Z3.

۵-۳-۳-۵ طیف سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس (EDS)

شکل (۵-۴۹-الف و ب) تجزیه و تحلیل ترکیبی نمونه‌های الف) NB3 و ب) Z3 را نشان می‌دهد. درصد وزنی و اتمی نمونه‌ها در جدول (۵-۲۲) گزارش شده‌اند.



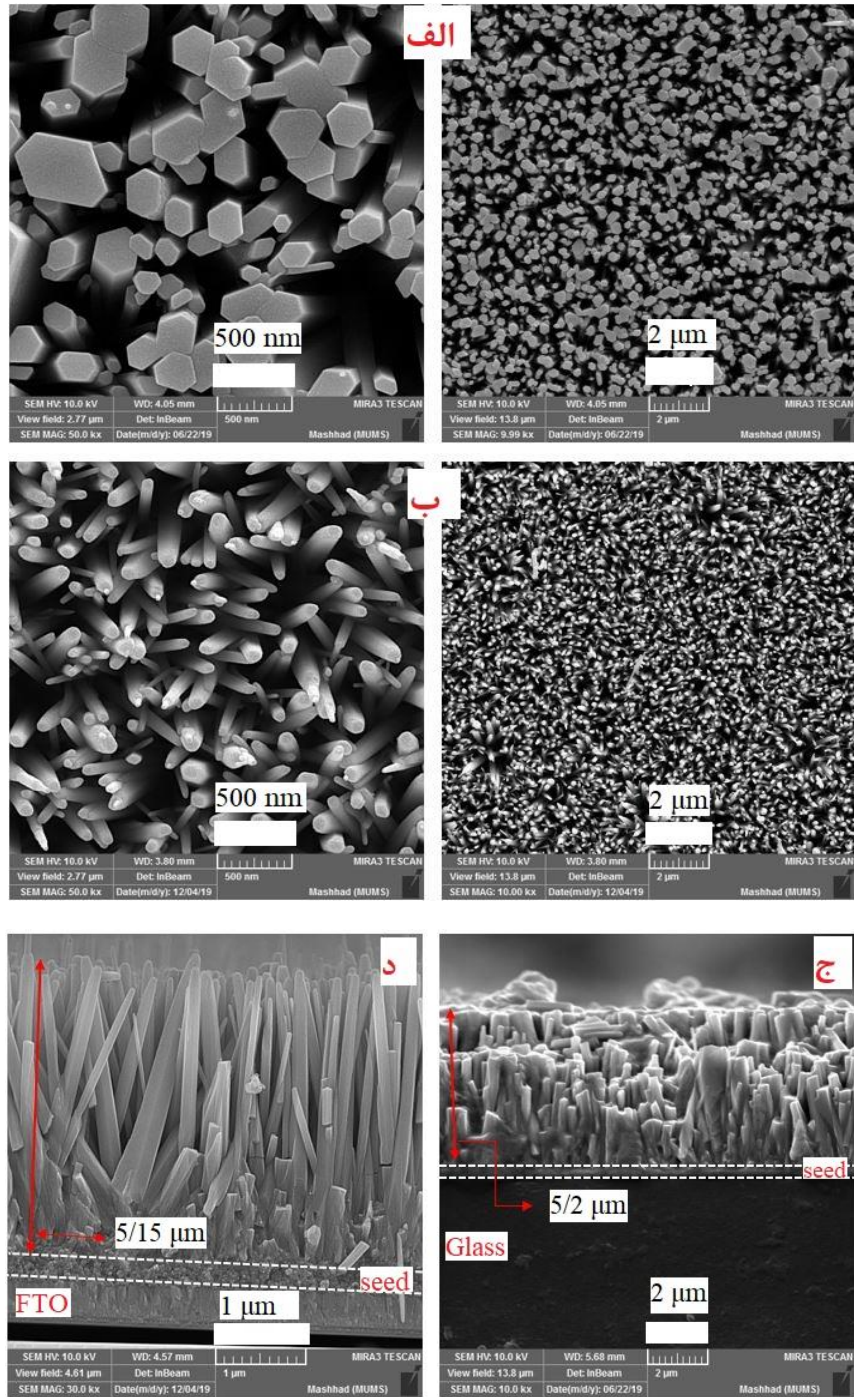
شکل ۴۹-۵: طیف پراش انرژی پرتو ایکس برای الف) نمونه NB3 و ب) نمونه Z3.

جدول ۵-۲۲: نتایج حاصل از طیف سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس برای دو نمونه NB3 و Z3.

نمونه	درصد اتمی (A%)				درصد وزنی (W%)			
	Zn	O	Sn	F	Zn	O	Sn	F
NB3	۳۹/۱۹	۶۰/۸۱	-	-	۷۲/۴۸	۲۷/۵۲	-	-
Z3	۴۸/۷۴	۴۹/۵۶	۰/۱۳	۱/۵۸	۷۹/۱۸	۱۹/۷	۰/۳۷	۰/۷۴

۵-۵-۳-۴ بررسی مورفولوژی

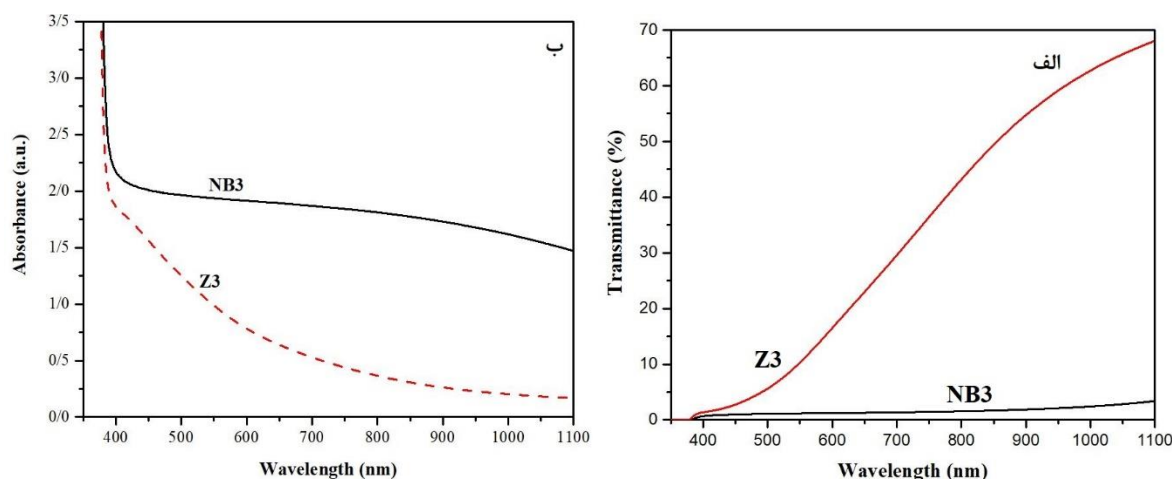
برای بررسی مورفولوژی تصاویر FESEM از نمونه‌های NB3 (شکل ۵-۵۰-الف) و Z3 (شکل ۵-۵۰-ب)، ثبت گردید. تصاویر دید از بالا، برای هر دو نمونه در دو مقیاس ۵۰۰ nm و ۲ μm و تصاویر دید از پهلو شکل با مقیاس ۲ μm و ۱ μm ثبت شد. دمای رشد، pH، مدت زمان لایه نشانی و غلظت محلول ثابت هستند. نمونه NB3 دارای قطر و طول متوسط به ترتیب ۳۷۲ nm و ۵/۲ μm و نمونه Z3 دارای قطر و طول متوسط به ترتیب به ۱۴۸ nm و ۵/۱۵ μm هستند. ضخامت نمونه‌های NB3 و Z3 با توجه به تصویر دید از پهلو FESEM (شکل ۵-۵۰-ج و د) با احتساب لایه اکسید روی بذر (۲۵۰ nm) به ترتیب ۵/۴۵ μm و ۵/۴ μm اندازه‌گیری شد.



شکل ۵-۵۰: تصاویر FESEM (الف) دید از بالا نمونه NB3 (ب) دید از بالا نمونه Z3 (ج) دید از پهلو نمونه NB3 (د) دید از پهلو نمونه Z3

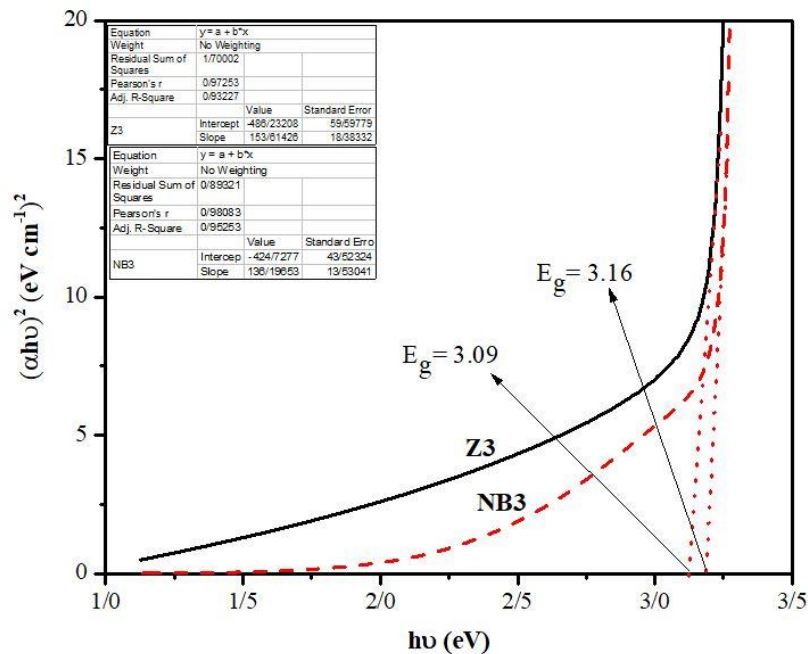
۵-۳-۵-۵ بررسی خواص اپتیکی

شکل (۵-۱-۵) الف و ب) طیف‌های عبور و جذب نمونه‌های NB3 و Z3 را در محدوده ۳۰۰-۱۱۰۰ nm نشان می‌دهد. کاهش ضریب عبور نوری در نمونه با بستر شیشه‌ای (NB3) نسبت به نمونه با بستر FTO (Z3) را می‌توان با توجه به ضخامت ($5/45 \mu\text{m}$) و تخلل بیشتر نمونه (NB3) نسبت به نمونه (Z3) توجیه کرد.



شکل ۵-۱-۵: تصاویر الف) طیف عبور برای نمونه‌های NB3 و Z3 ب) طیف جذب برای نمونه‌های NB3 و Z3

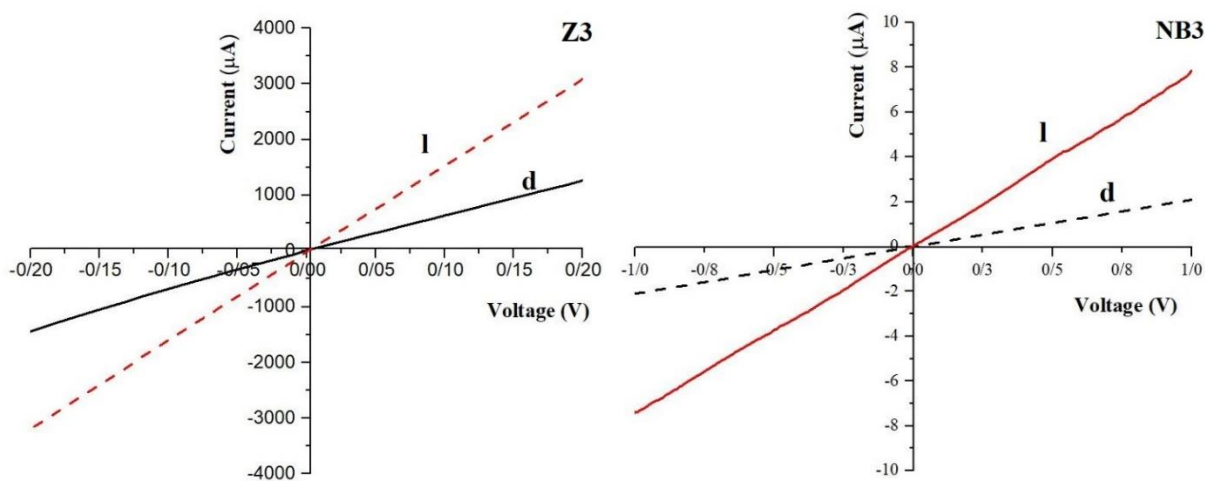
با توجه به شکل (۵-۱-۵) ب) میزان جذب در نمونه NB3 بیشتر از نمونه Z3 است. با استفاده از طیف تراگسیل دو نمونه می‌توان گاف نواری را محاسبه کرد. برای این منظور ابتدا ضریب جذب (α) و سپس با استفاده از آن گاف نواری را محاسبه می‌کنیم. شکل (۵-۲) نمودار $(\alpha h\nu)^2$ بر حسب انرژی فرودی فوتون برای دو نمونه NB3 و Z3 را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که گاف نواری مربوط به نمونه با بستر شیشه‌ای (NB3) برابر $3/16 \text{ eV}$ و برای نمونه با بستر FTO (Z3) برابر با $3/09 \text{ eV}$ است.



شکل ۵-۵: نمودارهای $h\nu - (\alpha h\nu)^2$ نمونه‌های Z3 و NB3.

۵-۳-۶ بررسی خواص الکتریکی

برای بررسی خواص الکتریکی نمونه‌ها از اندازه‌گیری‌های ولتاژ-جریان استفاده شده است. نمودار جریان-ولتاژ نمونه‌ها در بازه -0.2 تا 0.2 در تاریکی و تحت تابش نور فرابنفش توسط پتاسیواستات اندازه‌گیری شد. شکل (۵-۵۳ الف و ب) نمودارهای جریان-ولتاژ تاریکی و روشنایی نمونه‌های Z3 و NB3 را نشان می‌دهد. رفتار فوتوالکتریکی نمونه‌ها در شرایط تاریکی (I_{dark}) و روشنایی (I_{light}) تحت تابش نور با شدت فرابنفش مورد بررسی قرار گرفت و نتایج در قالب جدول (۵-۲۳) گردآوری شد. نتایج بررسی پاسخ نوری نمونه‌ها (نسبت I_{photon} / I_{dark}) نشان می‌دهد مقدار I_{photon} / I_{dark} برای نمونه NB3 بیشتر از نمونه Z3 است.



شکل ۵-۵: نمودارهای جریان-ولتاژ در شرایط تاریکی و روشنایی برای دو نمونه NB3 و Z3 .

جدول ۵-۲۳: پاسخ نوری برای دو نمونه NB3 و Z3.

نمونه	NB3	Z3
$I_{\text{photon}} / I_{\text{dark}}$	۲/۷۵	۱/۴

۵-۶ بررسی مورفولوژی و خواص ساختاری، اپتیکی و الکتریکی نانومیله‌های اکسید روی پوشش داده شده با کادمیوم تلوراید (FTO/ZnO/CdTe)

۵-۶-۱ مقدمه

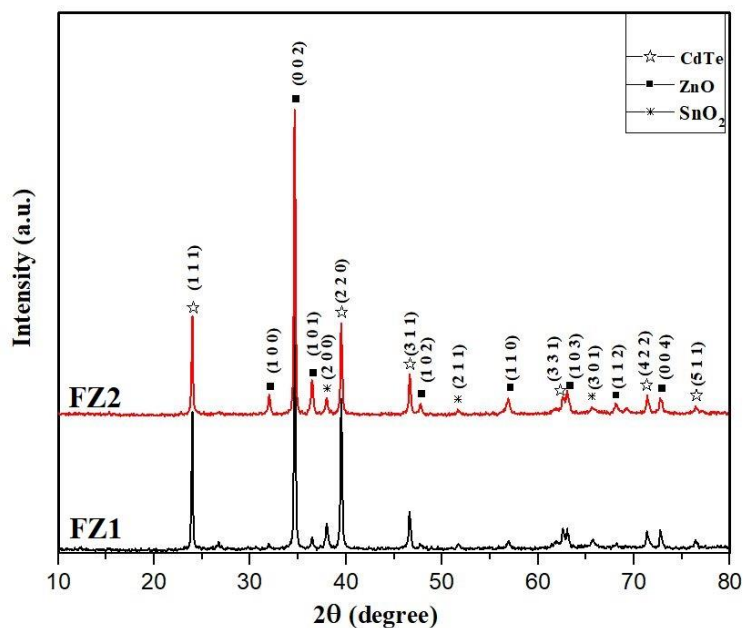
در این بخش به بررسی خواص فیزیکی نانومیله‌های اکسید روی رشد یافته بر بستر FTO به روش رسوب گذاری حمام شیمیایی که با کادمیوم تلوراید پوشیده شده‌اند پرداخته شده است. کادمیوم تلوراید به روش کندوپاش بر نانومیله‌های اکسید روی پوشش دهی شده‌اند. لایه‌نشانی به کمک دستگاه کندوپاش در فشار کاری 2×10^{-2} Torr، توان ۱۰۰ W و به مدت زمان ۱۰ دقیقه در دمای محیط صورت گرفت. نمونه‌های تهیه شده با FZ1، FZ2 و FZ3

نام‌گذاری شده‌اند (جدول ۵-۱). در ادامه خواص ساختاری، مورفولوژی، اپتیکی و الکتریکی این نمونه‌ها مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۵-۶-۲ مقایسه خواص فیزیکی دو نمونه FZ1 و FZ2 (بررسی اثر تغییر pH محلول لایه - نشانی)

۵-۶-۲-۱ طیف پراش پرتو ایکس (XRD)

الگوهای XRD نمونه‌ها در شکل (۵-۵۴) نشان داده شده است. الگوهای XRD هر دو نمونه بدست آمده نشانگر تشکیل ساختار شش گوشه اکسید روی مطابق با کارت استاندارد (JCPDS 010-790-205) و همچنین، قله‌های ساختار مکعبی کادمیوم تلوراید با گروه فضایی F-43m با ثابت‌های شبکه $a=b=c=6.9\text{\AA}$ مطابق با کارت استاندارد JCPDS 00-0150-0770 می‌باشد.



شکل ۵-۵۴: الگوهای XRD نمونه‌های FZ1 و FZ2 (نانومیله‌های پوشش یافته با CdTe سنتز شده با محلول لایه‌نشانی دارای pHهای مختلف ۵/۵ و ۱۱).

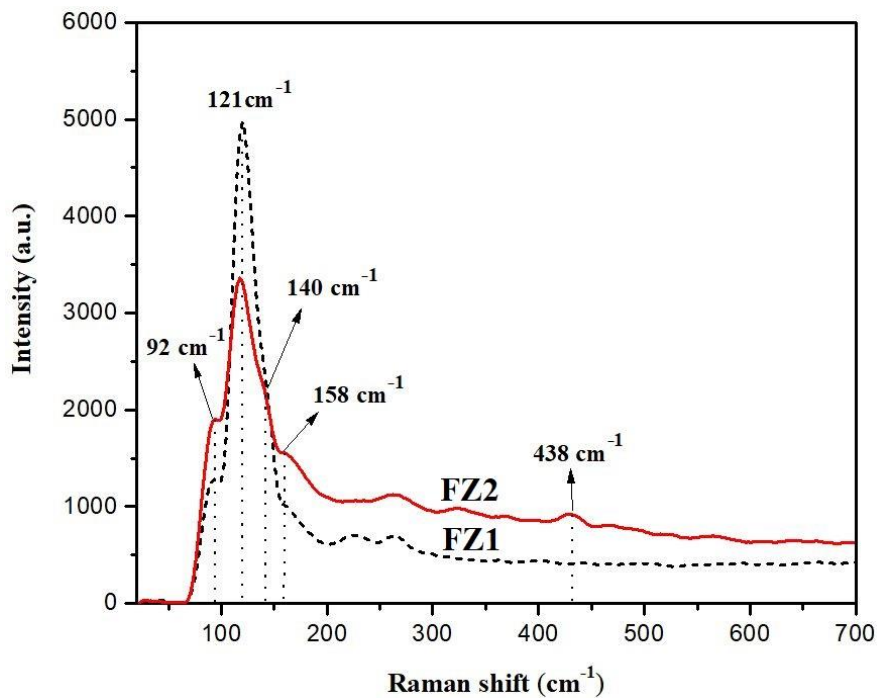
بعضی قله‌های SnO_2 (مربوط به زیرلایه) با فاز چهارگوشی مطابق با کارت استاندارد (JCPDS 00-046-1088) نیز در الگوهای XRD نمونه‌ها دیده می‌شود. راستای ترجیحی رشد نمونه‌ها همچنان راستای (۰ ۰ ۲) اکسید روی می‌باشد. همچنین شدت نسبی قله‌های پراش از صفحات (۱ ۱ ۱) و (۲ ۲ ۰) کادمیوم تلوراید از سایر قله‌های پراش مربوط به این ساختار بزرگ‌تر است. در نمونه FZ1 به دلیل پوشش ضخیم‌تر CdTe روی نانومیله‌های ZnO قله‌های پراش ساختار CdTe از شدت نسبی بزرگ‌تر برخوردار هستند. با استفاده از داده‌های استخراج شده از الگوهای پراش، پارامترهای ساختاری نمونه‌ها مانند اندازه متوسط بلورک‌ها (D)، میزان کرنش در شبکه بلوری (ϵ) و چگالی درفتگی‌ها (σ) به کمک روابط معرفی شده مربوط محاسبه شدند که نتایج آن در جدول ۵-۲۴ گزارش شده است.

جدول ۵-۲۴: پارامترهای ساختاری محاسبه شده با استفاده از الگوهای XRD نمونه‌های FZ1 و FZ2 و ضخامت لایه‌ها.

نمونه	لایه	صفحات پراش	D (nm)	d (nm)	$\epsilon \times 10^{-3}$	$\sigma \times 10^{-4}$ (nm) ⁻²	FWHM (°)	ثابت‌های شبکه Å	ضخامت μm
FZ1	ZnO	(۰ ۰ ۲)	۴۸/۶۳	۰/۲۵۸	۲/۴	۴/۲	۰/۱۷۴۸	a = b = 3.03 c = 5.18	۱
	CdTe	(۱ ۱ ۱)	۴۳/۴	۰/۳۷۵	۲/۵	۵/۹	۰/۲۰۷۹	a = b = c = 6.37	۱/۶
FZ2	ZnO	(۰ ۰ ۲)	۴۲/۹	۰/۲۵۸	۲/۷	۴/۱	۰/۱۹۹۵	a = b = 3.03 c = 5.2	۴
	CdTe	(۱ ۱ ۱)	۳۹/۶۵	۰/۳۷	۲/۶	۸/۳	۰/۲۱۸۴	a = b = c = 6.29	۱/۲

۵-۶-۲-۲ طیف‌سنجی رامان

طیف‌های رامان نمونه‌های FZ1 و FZ2 در شکل (۵-۵۵) نشان داده شده است. در طیف رامان هر دو نمونه قله 438 cm^{-1} مربوط به مد E_2 اکسید روی قابل مشاهده است. تعداد زیادی از قله‌های رامان مربوط به تشکیل کادمیوم تلوراید در جابجایی‌های رامان زیر 200 cm^{-1} وجود دارند. به طور خاص سه قله تیز در 92 cm^{-1} ، 121 cm^{-1} و 140 cm^{-1} و یک شانه (قله ضعیف‌تر) در 158 cm^{-1} در محدوده جابجایی‌های رامان کم مشاهده می‌شود. قله‌های رامان 92 cm^{-1} و 121 cm^{-1} به ترتیب مربوط به دو مدهای فونونی E و A_1 تلوریوم بلوری هستند. همچنین قله در 140 cm^{-1} به برهم‌نهی مد E تلوریوم بلوری و حالت عرضی نوری (TO) کادمیوم تلوراید نسبت داده شده است. قله ضعیف مشاهده شده محدود به 158 cm^{-1} احتمالاً همان مد طولی نوری (LO) مربوط به ساختار بلوری کادمیوم تلوراید است [۶۳].



شکل ۵-۵۵: طیف‌های رامان مربوط به نمونه‌های FZ1 و FZ2.

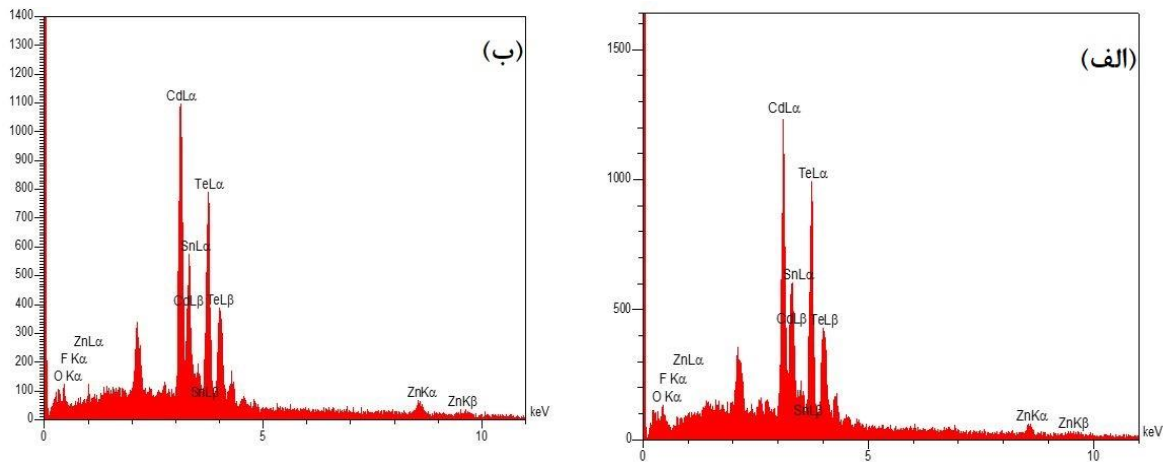
مقایسه طیف‌های رامان نمونه‌های FZ1 و FZ2 نشان می‌دهد که قله‌های مربوط به طیف ساختار کادمیوم تلوراید در نمونه FZ1 تیز تر و قوی تر از قله‌های نظیر در نمونه FZ2 است. به طور عکس ملاحظه می‌شود قله رامان مربوط به ساختار اکسید روی در نمونه FZ2 نسبت به قله مشابه نمونه FZ1 قوی تر است که با نتایج بدست آمده از الگوی XRD نمونه‌ها مطابقت دارد.

۵-۶-۲-۴ طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS)

در شکل (۵-۵۶ الف و ب) نمودارهای EDS نمونه‌های FZ1 و FZ2 نشان داده شده است و نتایج حاصل در جدول ۵-۲۵ گزارش شده است. حضور عناصر Zn، O، Cd، و Te در طیف‌های EDS می‌تواند موید تشکیل کامپوزیت ZnO-CdTe در هر نمونه باشد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که با افزایش pH محلول لایه‌نشانی درصد اتمی عناصر Zn و O افزایش و درصد اتمی عناصر Cd و Te کاهش یافته است. ضخامت کمتر لایه CdTe و تشکیل هسته-پوسته ZnO-CdTe می‌تواند از دلایل این مسئله باشد.

جدول ۵-۲۵: نتایج حاصل از طیف سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس برای دو نمونه FZ1 و FZ2.

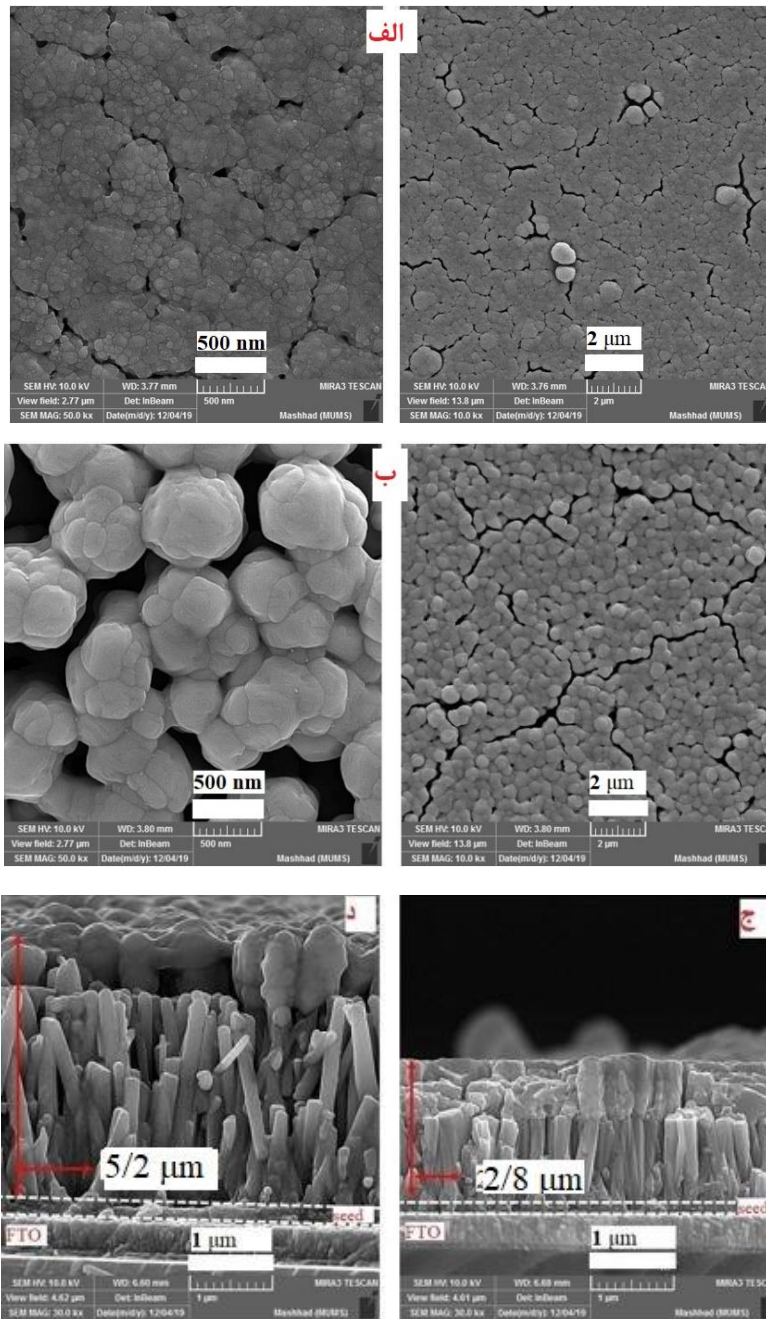
نمونه	درصد اتمی (A%)						درصد وزنی (W%)					
	Zn	O	Cd	Te	Sn	F	Zn	O	Cd	Te	Sn	F
FZ1	۶/۵۵	۱۰/۲۲	۳۸/۱۴	۴۴/۹۷	۰/۰۱	۰/۱۲	۴/۰۳	۱/۵۴	۴۰/۳۷	۵۴/۰۳	۰/۰۱	۲/۰۲
FZ2	۸/۲۵	۲۴/۵۱	۳۲/۴۷	۳۴/۱۹	۰/۴۷	۰/۱۱	۵/۹۹	۴/۳۶	۴۰/۵۴	۴۸/۴۷	۰/۶۲	۰/۰۲



شکل ۵-۵: طیف‌های پراش انرژی پرتو ایکس برای نمونه‌های الف (FZ1) و ب (FZ2).

۵-۶-۲-۴ بررسی مورفولوژی

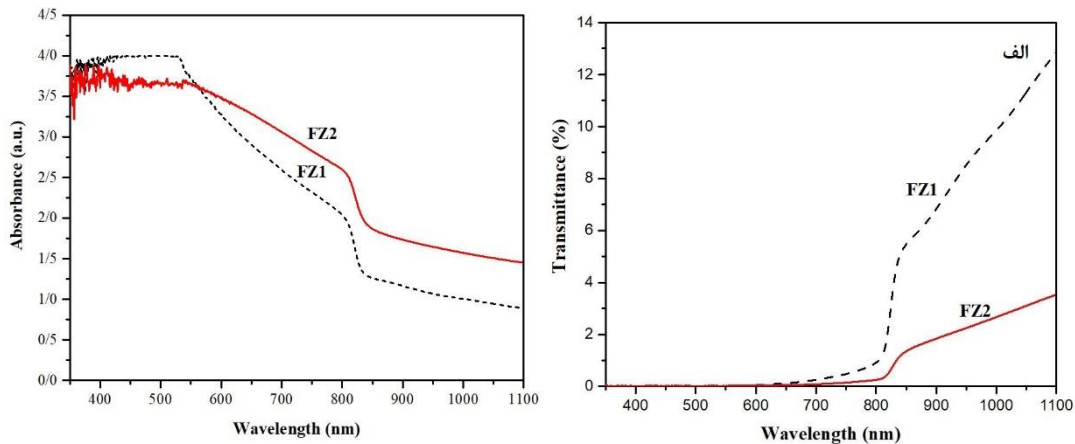
تصاویر FESEM دید از بالا برای نمونه‌های FZ1 و FZ2 در مقیاس‌های ۵۰۰ nm و ۲ μm و همچنین تصاویر FESEM دید از پهلو این دو نمونه در مقیاس ۱ μm در شکل (۵-۵۷) نشان داده شده است. با توجه به ضخامت لایه‌های اکسید روی قبل از پوشش‌دهی (به ترتیب ۱ μm و ۴ μm) می‌توان گفت که ضخامت لایه CdTe باقیمانده در سطح نانومیله‌های اکسید روی به ترتیب حدود ۱/۶ μm و ۱/۲۵ μm باشد. لازم به ذکر است که این ضخامت بدون در نظر گرفتن مقدار CdTe نفوذ کرده در بین نانومیله‌ها که باعث تشکیل هسته-پوسته اکسید روی-کادمیوم تلوراید شده است می‌باشد.



شکل ۵-۵۷: تصاویر FESEM الف) دید از بالا نمونه FZ1 ب) دید از بالا نمونه FZ2 ج) دید از پهلو نمونه FZ1 د) دید از پهلو نمونه FZ2 .

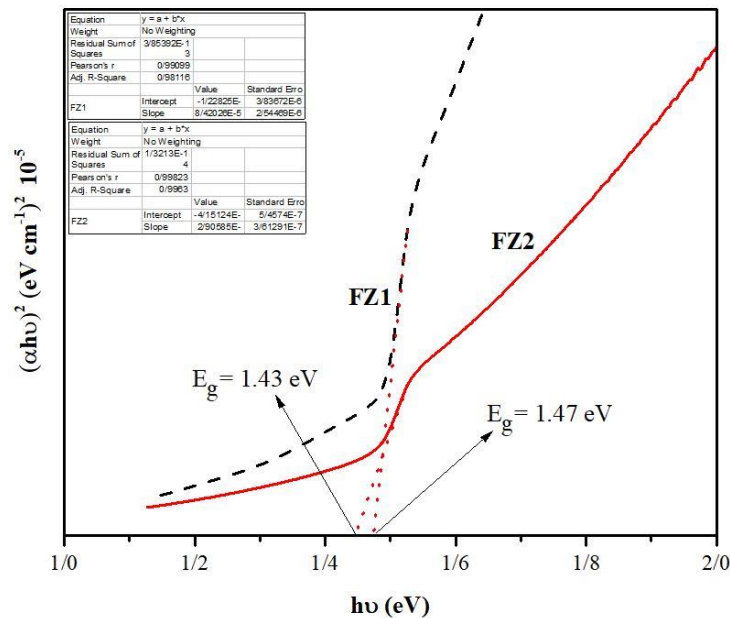
۵-۶-۳ بررسی خواص اپتیکی

شکل (۵-۵۸-الف و ب) طیف‌های عبور و جذب نمونه‌های FZ1 و FZ2 را بر حسب تابعی از طول موج در محدوده ۳۰۰-۱۱۰۰ nm نشان می‌دهد.



شکل ۵-۵۸: طیف‌های الف) عبور و ب) جذب نمونه‌های FZ1 و FZ2.

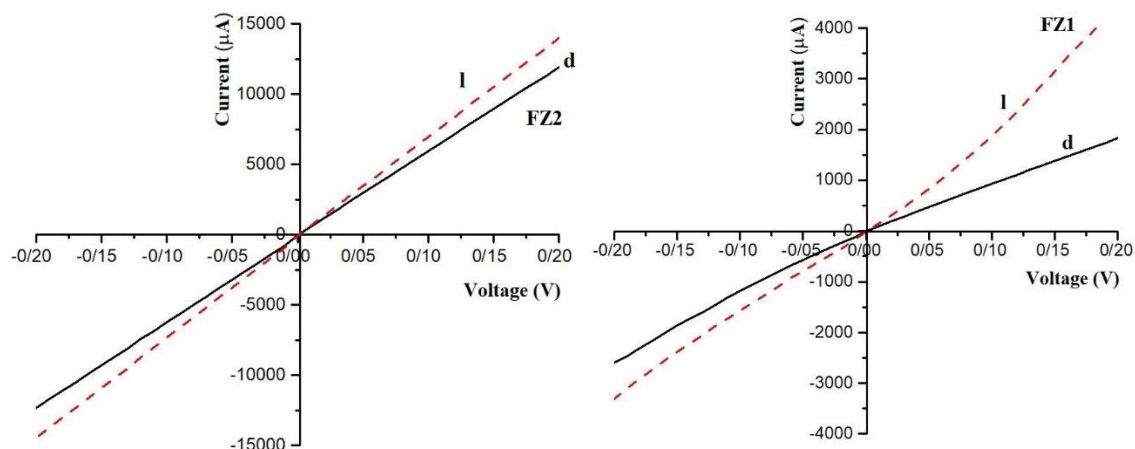
بررسی طیف‌های عبور نشان می‌دهد که در همه ناحیه طول موجی اندازه‌گیری شده که میزان عبور در نمونه FZ1 بیشتر از نمونه FZ2 است. بیشتر بودن میزان عبور در نمونه FZ2 را نسبت به نمونه FZ1 به ضخامت کمتر نمونه مربوط کرد. با توجه به شکل (۵-۵۸-ب) مشاهده می‌شود که میزان جذب در نمونه FZ2 بیشتر از نمونه FZ1 است. با استفاده از طیف‌های جذب لایه‌ها گاف نواری نمونه‌ها به کمک روابط (۲-۷) و (۲-۸) بدست آمدند. شکل (۵-۵۹) نمودارهای $(\alpha h\nu)^2$ بر حسب انرژی فرودی فوتون برای هر دو نمونه FZ1 و FZ2 رسم شده‌اند. در برازش قسمت خطی این منحنی با محور انرژی گاف نواری نمونه‌ها بدست آمدند. در نمودارهای $h\nu - (\alpha h\nu)^2$ گذار در نزدیکی لبه جذب CdTe مشاهده می‌شود. نتایج بدست آمده گاف‌های با انرژی ۱/۴۷ eV مربوط به نمونه FZ1 برابر و ۱/۴۳ eV برای نمونه FZ2 است. افزایش اندک گاف نواری در نمونه FZ2 نسبت به نمونه FZ1 مربوط اثر حبس کوانتومی است.



شکل ۵-۵: نمودارهای $(\alpha h\nu)^2$ - $h\nu$ برای نمونه‌های FZ1 و FZ2.

۵-۶-۲-۴ بررسی خواص الکتریکی

برای بررسی خواص الکتریکی نمونه‌ها از اندازه‌گیری مشخصه جریان-ولتاژ در نمونه‌ها نمودارهای جریان-ولتاژ (I-V) نمونه‌ها در بازه -0.2 تا 0.2 ولت شرایط تاریکی و تحت تابش نور فرابنفش و با استفاده از یک دستگاه پتاسیواستات در شکل (۲-۷)، نشان داده شده است. شکل (۵-۶۰-الف و ب) نمودارهای جریان-ولتاژ تاریکی و روشنایی نمونه‌های FZ1 و FZ2 را نشان می‌دهد. پاسخ نمونه‌ها در شرایط تاریکی و روشنایی (نسبت $I_{\text{photon}} / I_{\text{dark}}$) برای هر دو نمونه اندازه‌گیری شدند که نتایج آن در جدول ۵-۲۶ آمده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که نمونه FZ1 دارای پاسخ نور به مراتب بهتری نسبت به نمونه FZ2 دارد. لذا این نمونه کاندیدای مناسب‌تری برای کاربردهای اپتوالکترونیک می‌باشد.



شکل ۵-۶۰: نمودارهای جریان-ولتاژ در شرایط تاریکی و روشنایی برای دو نمونه FZ1 و FZ2.

جدول ۵-۲۶: پاسخ نوری برای دو نمونه FZ1 و FZ2 .

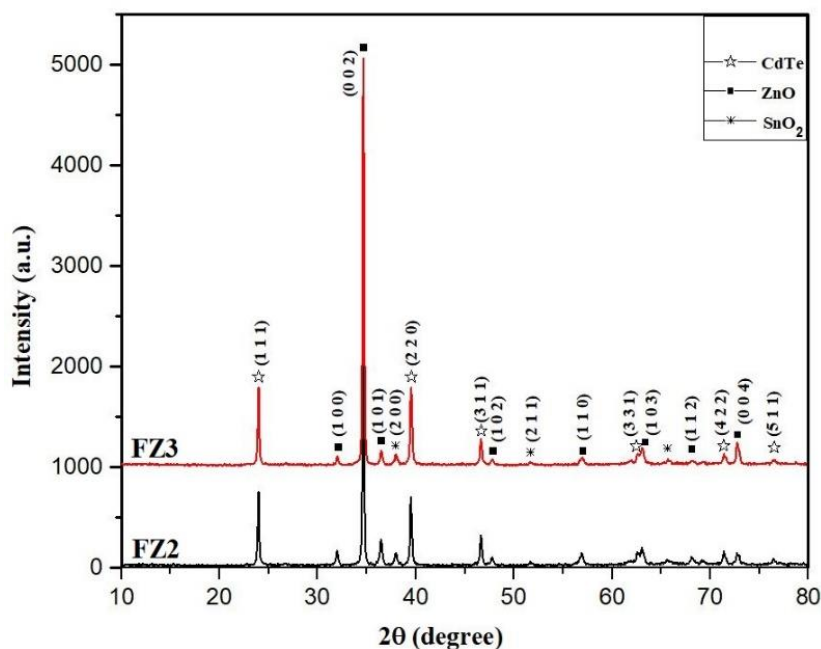
نمونه	FZ1	FZ2
$I_{\text{photon}} / I_{\text{dark}}$	۱/۲	۰/۱۷

۵-۶-۳ مقایسه خواص فیزیکی دو نمونه FZ2 و FZ3 (بررسی اثر زمان لایه‌نشانی)

۵-۶-۳-۱ طیف پراش پرتو ایکس (XRD)

الگوهای XRD نمونه‌ها در شکل ۵-۶۱ نشان داده شده است. الگوهای XRD هر دو نمونه بدست آمده نشانگر قله‌های پراش مربوط به ساختار شش گوشه اکسید روی مطابق با کارت استاندارد (JCPDS 010-790-205) و همچنین قله‌های پراش ساختار مکعبی کادمیوم تلوراید با ساختار مکعبی با گروه فضایی F-43m با ثابت شبکه $a=b=c= 6/9 \text{ \AA}$ مطابق با کارت استاندارد (JCPDS 00-015-0770) می‌باشد. بعضی قله‌های مربوط فاز چهارگوشه SnO_2 (مربوط به زیرلایه) مطابق با کارت استاندارد (JCPDS 00-046-1088) هم در الگوهای XRD نمونه‌ها دیده

می‌شود. راستای ترجیحی رشد نمونه‌ها همچنان راستای (۲ ۰ ۰) اکسید روی می‌باشد. همچنین شدت نسبی قله‌های پراش از صفحات (۱ ۱ ۱) و (۲ ۲ ۰) کادمیوم تلوراید از سایر قله‌های پراش مربوط به این ساختار بزرگ‌تر است.



شکل ۵-۶: الگوهای XRD نمونه‌های FZ2 و FZ3 (نانومیله‌های پوشش داده با CdTe سنتز شده در دو زمان لایه‌نشانی ۳ و ۵ ساعت).

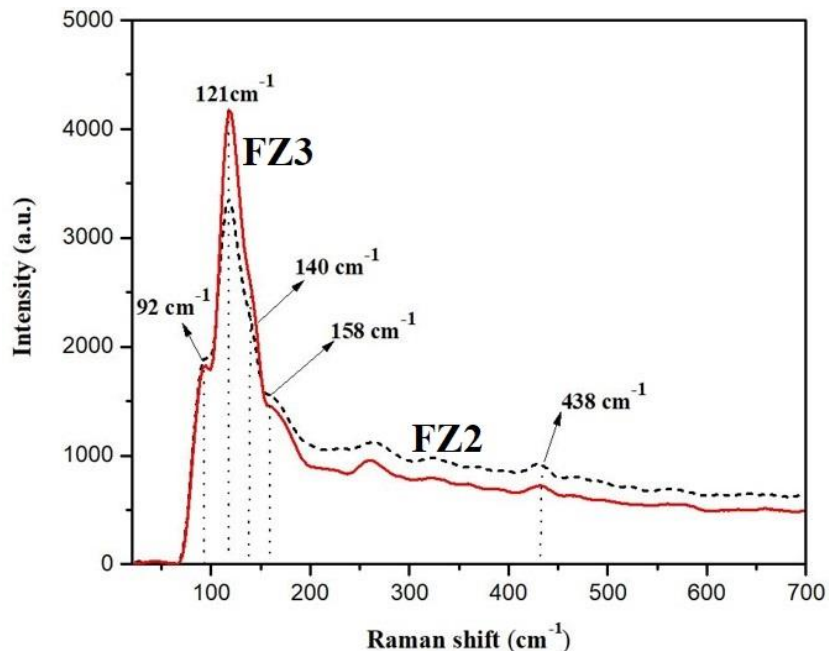
در نمونه FZ2 به دلیل پوشش ضخیم‌تر CdTe روی نانومیله‌های ZnO قله‌های پراش ساختار CdTe از شدت نسبی بزرگ‌تری نسبت به نمونه FZ3 برخوردار هستند. با استفاده از داده‌های استخراج شده از الگوهای پراش، پارامترهای ساختار نمونه‌ها مانند فاصله صفحات (d)، اندازه بلورکها (D)، میزان کرنش (ε) و چگالی درفنگی‌ها (σ) به کمک روابط معرفی شده مربوطه محاسبه شدند که نتایج حاصل در جدول ۵-۲۷ گزارش شده است.

جدول ۵-۲۷: نتایج بدست آمده از پراش پرتو X از نمونه‌های مورد مطالعه و ضخامت لایه‌ها.

نمونه	لایه	صفحه	D (nm)	d (nm)	$\epsilon \times 10^{-3}$	$\sigma \times 10^{-4}$ (nm) ⁻²	FWHM (°)	ثابت‌های شبکه Å	ضخامت μm
FZ2	ZnO	(۰ ۰ ۲)	۴۲/۹	۰/۲۵۸	۲/۷	۴/۱	۰/۱۹۹۵	a = b = 3.03 c = 5.18	۴
	CdTe	(۱ ۱ ۱)	۳۹/۶۵	۰/۳۷	۲/۶	۸/۳	۰/۲۱۸۴	a = b = c = 6.29	۱/۲
FZ3	ZnO	(۰ ۰ ۲)	۴۴/۲۱	۰/۲۵۸	۲/۶	۵/۱	۰/۱۹۱۱	a = b = 3.03 c = 5.18	۵/۴
	CdTe	(۱ ۱ ۱)	۴۱/۲	۰/۳۷	۲/۷	۶/۹	۰/۲۲۳۹	a = b = c = 6.29	۰/۳

۵-۶-۳-۲ طیف‌سنجی رامان

شکل ۵-۶۲ طیف‌های رامان نمونه‌های FZ2 و FZ3 را نشان می‌دهد. در طیف رامان برای هر دو نمونه FZ2 و FZ3 قله 438 cm^{-1} مربوط به مد E_2 اکسید روی است. تعداد زیادی از قله‌های رامان مربوط به تشکیل کادمیوم تلوراید در جابجایی‌های رامان زیر 200 cm^{-1} وجود دارند. به طور خاص سه قله تیز در 92 cm^{-1} ، 121 cm^{-1} و 140 cm^{-1} و یک شانه (قلعه ضعیف‌تر) در 158 cm^{-1} در محدوده جابجایی‌های رامان کم آشکار شده است. قله‌های رامان 92 cm^{-1} و 121 cm^{-1} به ترتیب مربوط به دو مدهای فونونی E و A_1 تلوریوم بلوری هستند [۶۳]. شانه مشاهده شده در طیف رامان در محدوده 158 cm^{-1} به احتمال زیاد می‌تواند با مد طولی نوری (LO) مربوط به ساختار بلوری کادمیوم تلوراید در ارتباط باشد [۶۳].



شکل ۵-۶۲: طیف‌های رامان مربوط به نمونه‌های FZ2 و FZ3.

مقایسه طیف‌های رامان نمونه‌های FZ2 و FZ3 نشان می‌دهد که قله‌های مربوط به طیف رامان ساختار کادمیوم تلوراید در نمونه FZ3 تیز تر و قوی تر از قله‌های همین طیف در نمونه FZ2 است و همچنین ملاحظه می‌شود قله رامان مربوط به ساختار اکسید روی در نمونه FZ2 نسبت به نمونه FZ3 قوی تر است. این نتایج با نتایج بدست آمده از الگوی‌های XRD نمونه‌ها مطابقت دارد.

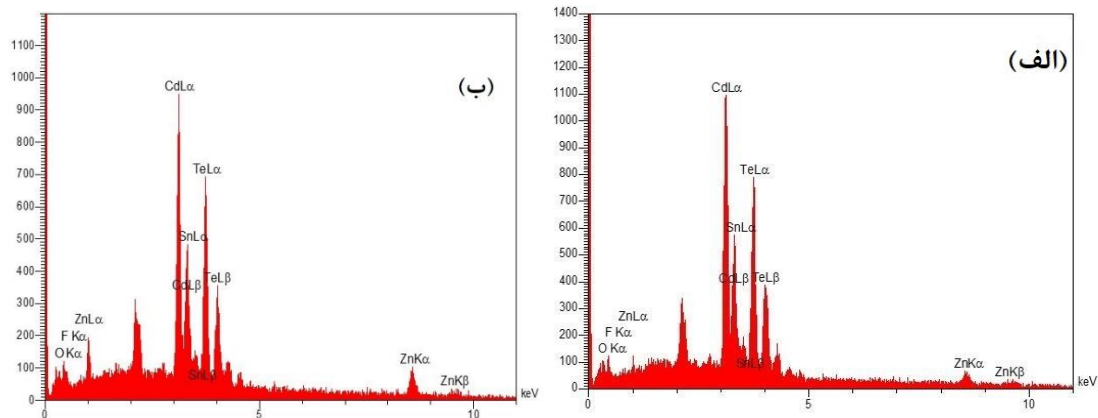
۵-۶-۲-۳ طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS)

در شکل (۵-۶۳-الف و ب) نمودار EDS نمونه‌های FZ2 و FZ3 نشان داده شده است. درصد عناصر موجود در نمونه‌های FZ2 و FZ3 با استفاده از اندازه‌گیری‌های EDS در جدول ۵-۲۸ گزارش شده است. اندازه‌گیری‌های EDS حضور عناصر غالب Zn و O و Cd و Te را به همراه درصد کمی از عناصر Sn و F به زیرلایه باشند را در هر دو نمونه تایید می‌کنند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که برای نمونه‌ای که لایه CdTe بر نانومیله‌های سنتز

شده در زمان لایه‌نشانی ۵ ساعت انباشت شده است درصد اتمی عناصر O ، Sn ، Te و کاهش و درصد اتمی Zn افزایش یافته‌اند.

جدول ۵-۲۸: نتایج حاصل از طیف سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس برای دو نمونه FZ2 و FZ3.

نمونه	درصد اتمی (A%)						درصد وزنی (W%)					
	Zn	O	Cd	Te	Sn	F	Zn	O	Cd	Te	Sn	F
FZ2	۸/۲۵	۲۴/۵۱	۳۲/۴۷	۳۴/۱۹	۰/۴۷	۰/۱۱	۵/۹۹	۴/۳۶	۴۰/۵۴	۴۸/۴۷	۰/۶۲	۰/۰۲
FZ3	۱۶/۳۳	۲۲/۱۶	۲۸/۹۵	۳۲/۰۵	۰/۳۷	۰/۱۲	۱۲/۱۱	۴/۰۲	۳۶/۹۲	۴۶/۴۱	۰/۶۲	۰/۰۲



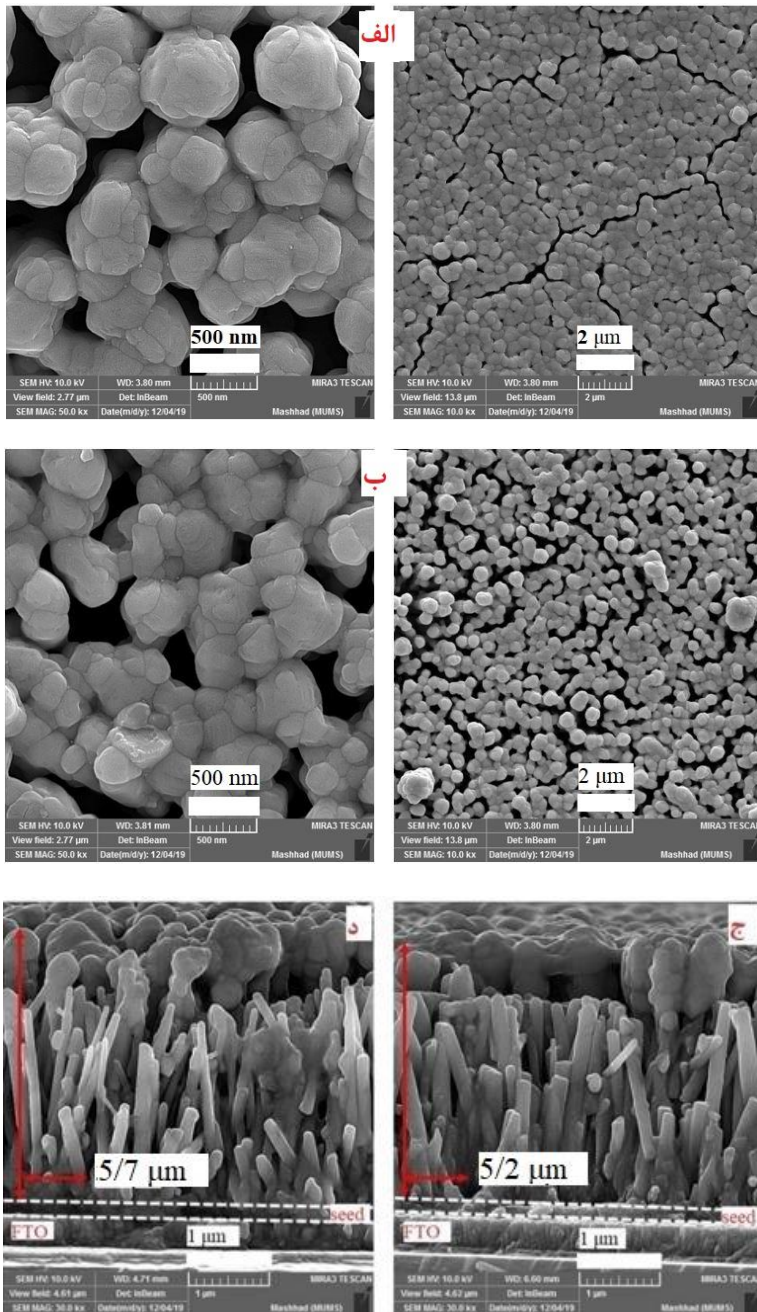
شکل ۵-۶۳: طیف‌های پراش انرژی پرتو ایکس برای نمونه‌های الف (FZ2 و ب) FZ3.

۵-۶-۲-۴ بررسی مورفولوژی

برای بررسی مورفولوژی نمونه‌های FZ2 و FZ3 تهیه شده، از آنالیز FESEM استفاده شد. در شکل (۵-۶۴-الف و

ب) تصاویر دید از بالا دو نمونه FZ2 و FZ3 در مقیاس‌های ۵۰۰ nm و ۲ μm و در شکل‌های (۵-۶۴-ج و د)

تصاویر دید از پهلو این نمونه‌ها در مقیاس $1\ \mu\text{m}$ نشان داده شده است.



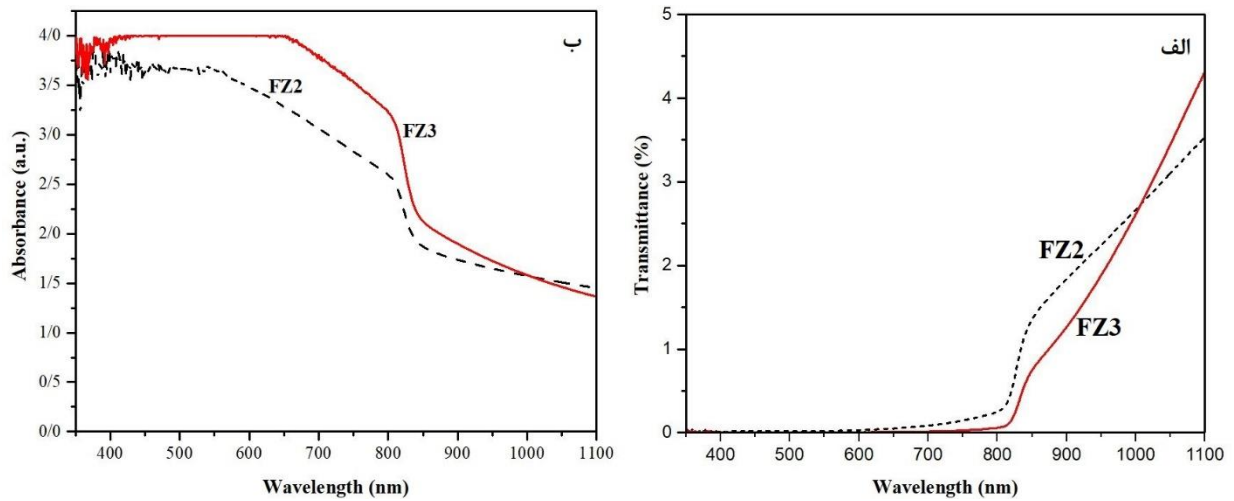
شکل ۵-۶۴: تصاویر FESEM (الف) دید از بالا نمونه FZ2 (ب) دید از بالا نمونه FZ3 (ج) دید از پهلو نمونه FZ2 (د) دید از پهلو نمونه

FZ3

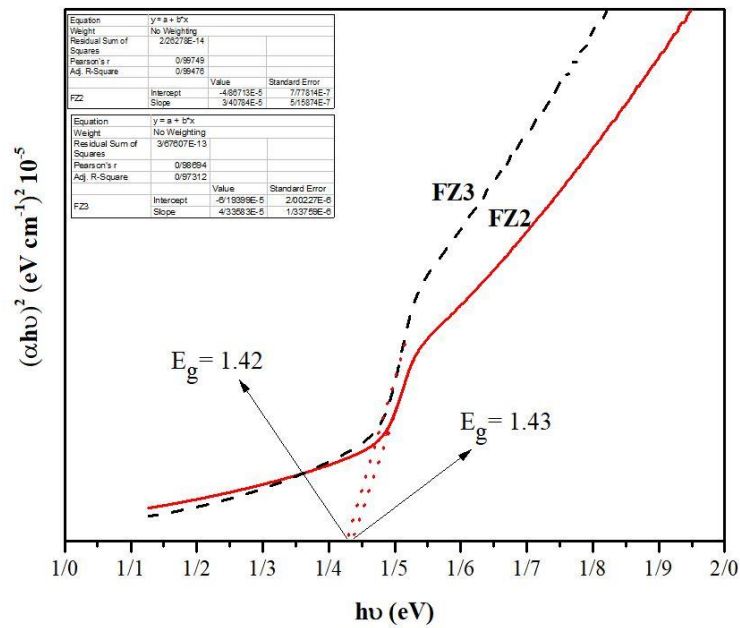
تصاویر از مقطع لایه‌ها نشان می‌دهد که نمونه FZ2 و FZ3 دارای ضخامت‌هایی به ترتیب برابر $5/2 \mu\text{m}$ و $5 \mu\text{m}$ هستند. این ضخامت با احتساب ضخامت بذر و نانومیله‌های ZnO می‌باشد که پس از کسر ضخامت لایه‌ها، ضخامت لایه CdTe در دو نمونه، FZ2 و FZ3 به ترتیب برابر $1/2 \mu\text{m}$ و 300 nm می‌باشند. تصاویر FESEM از سطح لایه‌نشانی می‌دهد که در هر نمونه سطح نانومیله‌های اکسید روی توسط لایه‌ای از CdTe پوشیده شده است. البته CdTe مقداری در میان نانومیله‌ها نفوذ کرده و یک ساختار هسته-پوسته ZnO-CdTe را نیز ایجاد کرده است. با توجه به تصاویر FESEM از سطح در مقیاس بزرگ‌تر ($2 \mu\text{m}$) به نظر می‌رسد که لایه CdTe در نمونه FZ2 پوشش ضخیم‌تری را روی سطح نانومیله‌ها ایجاد کرده است در حالی که در نمونه FZ3 به نظر می‌رسد که CdTe بیشتر سطح چند نانومیله را به طور مجزا پوشش داده باشد، به عبارت دیگر خلل و فرج روی سطح نمونه FZ3 بیشتر از نمونه FZ2 است.

۵-۶-۳-۶ بررسی خواص اپتیکی

شکل (۵-۶۵-الف و ب) طیف‌های عبور و جذب نمونه‌های FZ2 و FZ3 بر حسب تابعی از طول موج در محدوده $1100-300 \text{ nm}$ نشان داده شده است. بررسی طیف‌های عبور نشان می‌دهد که در همه ناحیه طول موجی اندازه-گیری شده میزان عبور در نمونه FZ2 به مقدار اندکی بیشتر از نمونه FZ3 است. بیشتر بودن میزان عبور در نمونه FZ2 را می‌توان به کمتر بودن ضخامت این نمونه نسبت به نمونه FZ3 ارتباط داد. با توجه به شکل (۵-۶۵-ب) مشاهده می‌شود که میزان جذب در نمونه FZ3 بیشتر از نمونه FZ2 است. با استفاده از طیف‌های جذب لایه‌ها می‌توان گاف نواری را محاسبه کرد. برای این منظور با استفاده از روابط (۲-۷) و (۲-۸) نمودار $(\alpha h\nu)^2$ بر حسب انرژی فوتون فرودی برای دو نمونه FZ2 و FZ3 رسم شده‌اند (شکل ۵-۶۳). نتایج بدست آمده گاف‌های با انرژی $1/43 \text{ eV}$ برای نمونه FZ2 و $1/42 \text{ eV}$ برای نمونه FZ3 بدست می‌دهد. تغییر اندک میزان گاف نواری را می‌توان به افزایش اندک در نقص‌های بلوری مانند چگالی درفتگی ارتباط داد.



شکل ۵-۶: طیف‌های الف) عبور و ب) جذب نمونه‌های FZ2 و FZ3



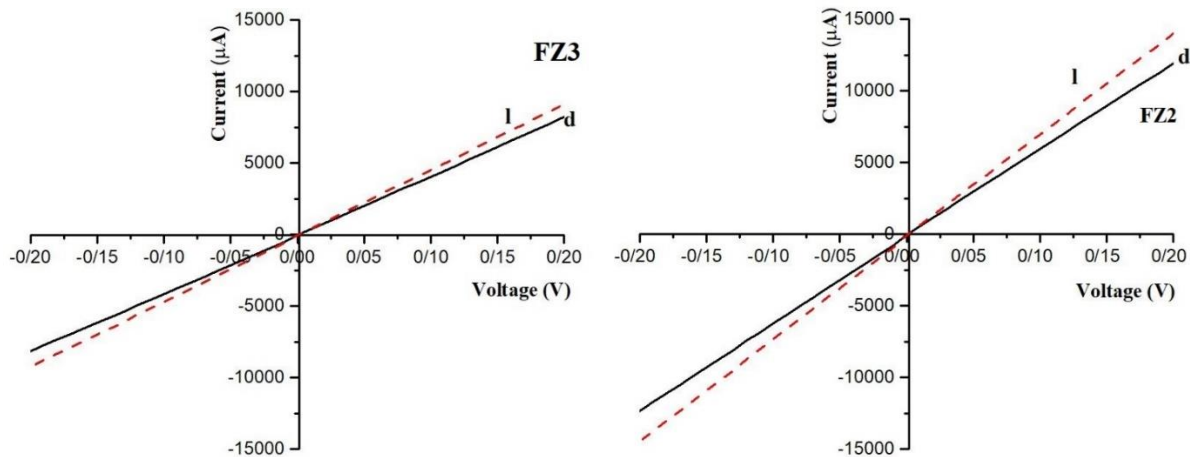
شکل ۵-۶: نمودارهای $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ برای نمونه‌های FZ2 و FZ3.

۵-۶-۲-۶ بررسی خواص الکتریکی

برای بررسی خواص الکتریکی نمونه‌ها از اندازه‌گیری جریان-ولتاژ در نمونه‌ها و همچنین اثر هال استفاده شد.

نمودارهای جریان-ولتاژ (I-V) نمونه‌ها در بازه $0.2- -0.2$ تا 0.2 ولت تحت شرایط تاریکی و تابش نور فرابنفش با

استفاده از یک دستگاه پتاسیواستات شکل (۲-۷)، نشان داده شده است (شکل ۵-۶۷). پاسخ نمونه‌ها در شرایط تاریکی و روشنایی (نسبت $I_{\text{photon}} / I_{\text{dark}}$) برای هر دو نمونه اندازه‌گیری شدند که نتایج آن در جدول ۵-۲۹ آمده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که نمونه FZ2 دارای پاسخ نور به مراتب بهتری نسبت به نمونه FZ3 دارد.



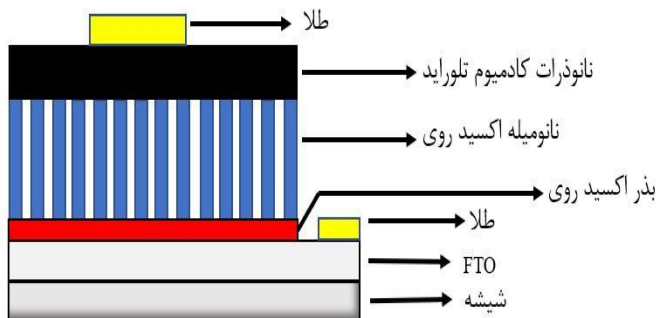
شکل ۵-۶۷: نمودارهای جریان-ولتاژ در شرایط تاریکی و روشنایی برای دو نمونه FZ3 و FZ2.

جدول ۵-۲۹: پاسخ نوری برای دو نمونه FZ2 و FZ3.

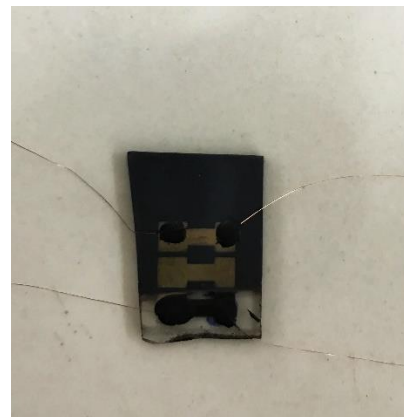
نمونه	FZ2	FZ3
$I_{\text{photon}} / I_{\text{dark}}$	۰/۱۷	۰/۱۱

۵-۷ خواص فتوولتایی

شکل ۵-۶۸ نشان‌دهنده تصاویر الف) سلول خورشیدی با ساختار ZnO-CdTe و ب) طرح شماتیکی از ساختار سلول تهیه شده می‌باشد. آنالیزهای مربوط به یک سلول خورشیدی جهت محاسبه بازده سلول در دو شرکت شریف سولار و نانوشات صورت گرفت. متأسفانه بدلیل وجود مشکلاتی در ساختار نمونه نتیجه‌ای از آنالیز (J-V) حاصل نشد. نبود زمان کافی مانع از بررسی و رفع اشکالات سلول خورشیدی تهیه شده، شد.



(ب)



(الف)

شکل ۵-۶۸: تصاویر الف) سلول خورشیدی ZnO-CdTe تهیه شده و ب) طرح شماتیک سلول خورشیدی تهیه شده.

۵-۸ نتیجه گیری

در این پایان نامه ابتدا بذر اکسید روی با استفاده از روش سل-ژل چرخشی رشد داده شد. سپس با استفاده از روش رسوب گذاری حمام شیمیایی نانومیله‌های اکسید روی با pH، مدت زمان لایه‌نشانی و همچنین بستر متفاوت (شیشه‌ای و FTO) رشد داده شده‌اند. در ادامه برای ایجاد یک لایه جاذب مناسب نانوذرات کادمیوم تلوراید با استفاده از روش کندوپاش روی نانومیله‌های اکسید روی رشد داده شده در شرایط مختلف، پوشش‌دهی شد. نتایج بدست آمده به طور خلاصه به شرح زیر می‌باشد:

الف) بررسی تاثیر pH بر خواص فیزیکی نانومیله‌های اکسید روی بر بستر شیشه‌ای و FTO

با بررسی مورفولوژی سطح ملاحظه می‌شود که با افزایش میزان pH، قطر و طول متوسط نانومیله‌های اکسید روی رشد یافته بر هر دو زیرلایه افزایش می‌یابند، همچنین شاهد افزایش تخلخل در سطح نمونه‌ها با افزایش pH هستیم. تحلیل داده‌های طیف XRD نشان می‌دهد که در هر دو نمونه رشد داده شده بر زیرلایه شیشه‌ای و FTO

، راستای ترجیحی راستای (۰ ۰ ۲) است، افزایش میزان pH باعث افزایش ارتفاع قله مربوط به صفحه (۰ ۰ ۲) شد. افزایش میزان pH باعث کاهش در اندازه بلورکها و افزایش در میزان درفتگی و همچنین افزایش جزئی در میزان کرنش مربوط به صفحه (۰ ۰ ۲) شد. با توجه به نتایج طیفسنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس، ملاحظه می شود که افزایش pH باعث افزایش درصد اتمی Zn و کاهش درصد اتمی O شد. طیف رامان نشان می دهد که ، نمونه با زیرلایه شیشه ای با $pH = 11$ دارای قله های قوی تری نسبت به نمونه با $pH = 5/5$ است. اما در نمونه با زیرلایه FTO، قله ها با موقعیت 327 ، 380 و 435 cm^{-1} در $pH = 11$ نسبت به نمونه با $pH = 5/5$ قوی تر هستند اما در مورد قله با موقعیت 579 cm^{-1} این نتیجه صادق نیست و در $pH = 5/5$ شاهد قله قوی تری نسبت به $pH = 11$ هستیم. با توجه به طیف تراگیل نمونه ها ملاحظه می شود میزان عبور با افزایش pH کاهش می یابد ، این کاهش، در نمونه با زیرلایه شیشه ای نسبت به نمونه با زیرلایه FTO بیشتر است. همچنین با افزایش میزان pH در هر دو نمونه با زیرلایه شیشه ای و FTO گاف نواری کاهش یافته است. با توجه نتایج حاصل از آنالیز اثر هال ملاحظه می شود در نمونه با زیرلایه شیشه ای با افزایش میزان pH، غلظت و رسانایی کاهش و تحرک الکترون ها افزایش یافته است.

ب) بررسی تاثیر مدت زمان لایه نشانی بر خواص فیزیکی نانومیله های اکسید روی بر بستر

شیشه ای و FTO

با بررسی مورفولوژی ملاحظه می شود که با افزایش مدت زمان لایه نشانی ، قطر و طول متوسط نانومیله های اکسید روی رشد یافته بر هر دو زیرلایه افزایش می یابند، همچنین شاهد افزایش تخلخل در سطح نمونه ها با افزایش مدت زمان لایه نشانی هستیم. تحلیل داده های طیف XRD نشان می دهد که در هر دو نمونه رشد داده شده بر زیرلایه شیشه ای و FTO، راستای ترجیحی راستای (۰ ۰ ۲) است، افزایش مدت زمان لایه نشانی باعث افزایش ارتفاع

قله مربوط به صفحه (۲ ۰ ۰) شده است. افزایش مدت زمان لایه‌نشانی باعث کاهش در اندازه بلورکها و افزایش در میزان دررفتگی و همچنین افزایش در میزان کرنش مربوط به صفحه (۲ ۰ ۰) شد. با توجه به نتایج طیف‌سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس، ملاحظه می‌شود افزایش مدت زمان لایه‌نشانی باعث افزایش درصد اتمی Zn و کاهش درصد اتمی O شد. طیف رامان نشان می‌دهد که، نمونه با زیرلایه شیشه‌ای با مدت زمان رشد ۳ ساعت در موقعیت‌های ۳۲۷، ۳۸۰ و 435 cm^{-1} نسبت به نمونه رشد داده شده در ۵ ساعت دارای قله‌های تیز و قوی‌تری است اما قله در موقعیت 579 cm^{-1} در نمونه با مدت زمان ۵ ساعت رشد نسبت به نمونه ۳ ساعت رشد قوی‌تر است. در نمونه با زیرلایه FTO تمام قله‌ها در مدت زمان رشد ۵ ساعت نسبت به مدت زمان ۳ ساعت برتری دارند. با توجه به طیف تراگیسل مشاهده می‌شود. با افزایش مدت زمان لایه‌نشانی در هر دو نمونه با زیرلایه شیشه‌ای و FTO، میزان عبور کاهش و جذب افزایش یافته است. گاف نواری در نمونه با زیرلایه شیشه‌ای با افزایش مدت زمان لایه‌نشانی، در نمونه با زیرلایه FTO با افزایش مدت زمان لایه‌نشانی، کاهش پیدا کرده است. با توجه نتایج حاصل از آنالیز اثر هال ملاحظه می‌شود در نمونه با زیرلایه شیشه‌ای با افزایش مدت زمان لایه‌نشانی غلظت کاهش و تحرک الکترون‌ها و رسانایی افزایش یافته‌اند.

ج) بررسی نمونه‌های نانومیله اکسید روی پوشش داده شده توسط نانوذرات کادمیوم

تلوراید

با بررسی مورفولوژی برای دو نمونه FZ1 و FZ2 نتیجه می‌شود نمونه FZ1 دارای سطح یکنواخت‌تر نسبت به نمونه FZ2 است و همچنین در نمونه FZ2 شاهد تخلخل بیشتر نسبت نمونه FZ1 هستیم. این تفاوت‌ها تحت تاثیر نانومیله‌های اکسید روی رشد داده در دو pH ۵/۵ و ۱۱ می‌باشد. تحلیل داده‌های الگو XRD نشانگر تشکیل لایه‌های بلوری اکسید روی ساختار شش وجهی با راستای ترجیحی (۲ ۰ ۰) و همچنین تشکیل لایه‌های بلوری

کادمیوم تلوراید ساختار مکعبی با راستای ترجیحی (۲۰۲) است. نانوذرات کادمیوم تلوراید پوشش داده شده بر نمونه Z1 دارای قله‌های بلندتری نسبت الگو نانوذرات کادمیوم تلوراید پوشش داده شده بر نمونه Z2 هستند. تضعیف قله‌های نانوذرات کادمیوم تلوراید پوشش داده شده بر نمونه Z2 نسبت نمونه Z1 می‌تواند بدلیل طول بلندتر نانومیلها اکسید روی نمونه Z1 نسبت به نمونه Z2 باشد. اندازه بلورک برای هر دو ساختار در نمونه FZ1 نسبت به FZ2 عدد بزرگ‌تری می‌باشد. با توجه به آنالیز رامان نتیجه می‌شود نانوذرات کادمیوم تلوراید پوشش داده شده بر نمونه Z1 قله‌های تیز و قوی‌تری نسبت به نانوذرات کادمیوم تلوراید پوشش داده شده بر نمونه Z2 هستند. طیف تراگسیل نشان می‌دهد که میزان عبور و جذب در نمونه FZ2 نسبت به نمونه FZ1 بیشتر است که می‌تواند به دلیل طول بلندتر نانومیلها در نمونه FZ2 باشد. گاف نواری در نمونه FZ2 نسبت به نمونه FZ1 کاهش پیدا کرده است. با بررسی مورفولوژی دو نمونه FZ2 و FZ3 نتیجه می‌شود نمونه FZ2 دارای سطح یکنواخت‌تر نسبت به نمونه FZ3 است و همچنین در نمونه FZ3 شاهد تخلخل بیشتر نسبت نمونه FZ2 هستیم. این تفاوت‌ها بدلیل رشد نانومیل‌های اکسید روی در دو مدت زمان لایه‌نشانی ۳ و ۵ ساعت می‌باشد. تحلیل داده‌های الگو XRD نشانگر تشکیل لایه‌های بلوری اکسید روی ساختار شش وجهی با راستای ترجیحی (۲۰۰) و همچنین تشکیل لایه‌های بلوری کادمیوم تلوراید ساختار مکعبی با راستای ترجیحی (۲۰۲) است. نانوذرات کادمیوم تلوراید پوشش داده شده بر نمونه Z2 دارای قله‌های بلندتری نسبت طیف نانوذرات کادمیوم تلوراید پوشش داده شده بر نمونه Z3 هستند. تضعیف قله‌های نانوذرات کادمیوم تلوراید پوشش داده شده بر نمونه FZ3 نسبت نمونه FZ2 می‌تواند بدلیل طول بلندتر نانومیلها اکسید روی نمونه Z3 نسبت به نمونه Z3 باشد. اندازه بلورک برای هر دو لایه در نمونه FZ2 نسبت به FZ3 عدد بزرگ‌تری می‌باشد. به طیف تراگسیل نمونه FZ3 دارای گاف نواری کمتری نسبت به نمونه FZ2 است. نتایج بدست آمده از آنالیز جریان-ولتاژ نشان می‌دهد نمونه FZ1 نسبت

به دو نمونه دیگر دارای حساسیت نوری بالاتری است از همین رو کاندید مناسبی برای استفاده به عنوان یک سلول خورشیدی است.

۹-۵ پیشنهادات جهت ادامه تحقیقات و مطالعات تکمیلی

- بررسی‌های بیشتر در مورد عدم نتیجه گیری سلول خورشیدی و ساخت سلول‌های خورشیدی تهیه شده
- بررسی اثر تغییر غلظت و دمای لایه‌نشانی نانومیله‌های اکسید روی
- بررسی اثر بازپخت در نانومیله‌های اکسید روی
- بررسی اثر پوشش‌دهی کادمیوم تلوراید در مدت زمان کمتر در بازده سلول خورشیدی
- لایه نشانی TiO_2 یا CdSe بین دو لایه ZnO و CdTe و بررسی اثر آن در بازده سلول خورشیدی

- [1] C. P. Poole and F. J. Owens, Introduction to nanotechnology. J. Wiley, 2003.
- [2] K. Chopra and A. Maini, "Thin films and their applications in military and civil sectors," 2010.
- [3] رازقی زاده، علیرضا (۱۳۹۰). فیزیک لایه های نازک. تهران: انتشارات دانشگاه پیام نور .
- [4] Wang, Q. H., Kalantar-Zadeh, K., Kis, A., Coleman, J. N., & Strano, M. S. (2012). Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides. *Nature nanotechnology*, 7(11), 699
- [5] Fan, Z., & Lu, J. G. (2005). Zinc oxide nanostructures: synthesis and properties. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 5(10), 1561-1573.
- [6] Pearton, S. J., Norton, D. P., Ip, K., Heo, Y. W., & Steiner, T. (2005). Recent progress in processing and properties of ZnO. *Progress in materials science*, 50(3), 293-340.
- [7] Liu, Z., Lei, E., Ya, J., & Xin, Y. (2009). Growth of ZnO nanorods by aqueous solution method with electrodeposited ZnO seed layers. *Applied Surface Science*, 255(12), 6415-6420.
- [8] Vaseem, M., Umar, A., & Hahn, Y. B. (2010). ZnO nanoparticles: growth, properties, and applications. *Metal oxide nanostructures and their applications*, 5(1).
- [9] Raji, R., & Gopchandran, K. G. (2017). ZnO nanostructures with tunable visible luminescence: effects of kinetics of chemical reduction and annealing. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 2(1), 51-58.
- [10] Khan, I., Saeed, K., & Khan, I. (2019). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(7), 908-931.
- [11] Y. Ding, Z. L. Wang, T. Sun, and J. Qiu, "Zinc-blende ZnO and its role in nucleating wurtzite tetrapods and twinned nanowires," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, no. 15, p. 153510, Apr. 2007.
- [12] Y. Ding, K. C. Pradel, and Z. L. Wang, "In situ transmission electron microscopy observation of ZnO polar and non-polar surfaces structure evolution under electron beam irradiation," *J. Appl. Phys.*, vol. 119, no. 1, p. 015305, Jan. 2016.

- [13] Kumar, V., Ntwaeaborwa, O. M., Soga, T., Dutta, V., & Swart, H. C. (2017). Rare earth doped zinc oxide nanophosphor powder: a future material for solid state lighting and solar cells. *Acs Photonics*, 4(11), 2613-2637.
- [14] Hoffman, R. L., Norris, B. J., & Wager, J. F. (2003). ZnO-based transparent thin-film transistors. *Applied Physics Letters*, 82(5), 733-735.
- [15] Thitima, R., Patcharee, C., Takashi, S., & Susumu, Y. (2009). Efficient electron transfers in ZnO nanorod arrays with N719 dye for hybrid solar cells. *Solid-State Electronics*, 53(2), 176-180.
- [16] Devi, G. S., Subrahmanyam, V. B., Gadkari, S. C., & Gupta, S. K. (2006). NH₃ gas sensing properties of nanocrystalline ZnO based thick films. *Analytica Chimica Acta*, 568(1-2), 41-46.
- [17] Frerichs, R. (1947). The photo-conductivity of "incomplete phosphors". *Physical Review*, 72(7), 594.
- [18] Harayama, A., Ichinohe, Y., Odaka, H., Watanabe, S., Takahashi, T., Tajima, H., ... & Tomonaka, T. (2015). A portable Si/CdTe Compton camera and its applications to the visualization of radioactive substances. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 787, 207-211.
- [19] J. Bailar and A. Trotman-Dickenson, *Comprehensive inorganic chemistry*. 1973.
- [20] Luque, A., & Hegedus, S. (Eds.). (2011). *Handbook of photovoltaic science and engineering*. John Wiley & Sons.
- [21] Aven, M., & Prener, J. S. (Eds.). (1967). *Physics and Chemistry of Two-Six Compounds*. North-Holland Publ.
- [22] A. J. Strauss, "The physical properties of cadmium telluride THE PHYSICAL PROPERTIES OF CADMIUM TELLURIDE," *Rev. Phys. Appl.*, vol. 12, no. 2, pp. 167–184, 1977.
- [23] Němec, P., Šimurda, M., Němec, I., Sprinzl, D., Formanek, P., & Malý, P. (2006). Highly luminescent CdSe nanocrystalline films prepared by chemical bath deposition. *Journal of crystal growth*, 292(1), 78-86.
- [24] Benlattar, M., Oualim, E. M., Harmouchi, M., Mouhsen, A., & Belafhal, A. (2005). Radiative properties of cadmium telluride thin film as radiative cooling materials. *Optics communications*, 256(1-3), 10-15.

- [25] Shah, N. A., Ali, A., Aqili, A. K. S., & Maqsood, A. (2006). Physical properties of Ag-doped cadmium telluride thin films fabricated by closed-space sublimation technique. *Journal of crystal growth*, 290(2), 452-458.
- [26] Morales-Acevedo, A. (2006). Thin film CdS/CdTe solar cells: research perspectives. *Solar Energy*, 80(6), 675-681.
- [27] Ramiro, J., Perea, A., Trigo, J. F., Laaziz, Y., & Camarero, E. G. (2000). Pulsed laser deposition and electrodeposition techniques in growing CdTe and $Cd_xHg_{1-x}Te$ thin films. *Thin Solid Films*, 361, 65-69.
- [28] Sotelo-Lerma, M., Zingaro, R. A., & Castillo, S. J. (2001). Preparation of CdTe coatings using the chemical deposition method. *Journal of Organometallic Chemistry*, 623(1-2), 81-86.
- [29] Meuris, A., Limousin, O., & Blondel, C. (2011). Characterization of polarization phenomenon in Al-Schottky CdTe detectors using a spectroscopic analysis method. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 654(1), 293-299.
- [30] Morales-Acevedo, A. (2006). Can we improve the record efficiency of CdS/CdTe solar cells?. *Solar energy materials and solar cells*, 90(15), 2213-2220.
- [31] Akbarnejad, E., Nayeri, F. D., & Ghoranneviss, M. (2018). Core-shell solar cell fabrication using heterostructure of ZnO-nanowires arrays decorated with sputtered CdTe-nanoparticles. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 51(9), 095105.
- [32] www.nano.ir.
- [33] N. Ashcroft and N. Mermin, "Solid State Physics, chapter 5-The reciprocal Lattice," 1976.
- [34] Jeffery, G. A. (1957). *Elements of x-ray diffraction* (Cullity, BD).
- [35] A. Taylor, "X-ray Metallography," 1961.
- [36] A. Jalali, M. R. Vaezi, N. Naderi, F. Taj Abadi, and A. Eftekhari, "Investigating the effect of sol-gel solution concentration on the efficiency of silicon solar cells: role of ZnO nanoparticles as anti-reflective layer," *Chem. Pap.*, Jul. 2019.
- [37] Chander, S., & Dhaka, M. S. (2016). Impact of thermal annealing on physical properties of vacuum evaporated polycrystalline CdTe thin films for solar cell applications. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 80, 62-68.

- [38] James, M. R., & Cohen, J. B. (1980). The measurement of residual stresses by X-ray diffraction techniques. In *Treatise on Materials Science & Technology* (Vol. 19, pp. 1-62). Elsevier.
- [39] Geert-Jan Janssen, Information on the FESEM (Field-emission Scanning Electron Microscope) Radboud University Nijmegen, www.sem.com.
- [۴۰] م. کرباسی، (۱۳۸۸)، میکروسکوپ الکترونی روبشی و کاربردهای آن در علوم مختلف و فناوری نانو، چاپ اول، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، اصفهان.
- [41] “P. J. G. J. H. R. Beanland, (2001), *Electron Microscopy and Analysis* - Goodhew - Taylor USA and Canada.”
- [۴۲] ط. رحیمی اقدام، ز. شریعتی نیا (۱۳۹۷)، مشخصه یابی نانوساختارها: از اصول تا تفسیر نتایج، چاپ دوم، مرکز انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.
- [43] B. Clark, T. Frost, and M. Russell, *UV Spectroscopy: Techniques, instrumentation and data handling*. 1993.
- [44] Ilican, S., Caglar, Y., & Caglar, M. (2006). Effect of the substrate temperatures on the optical properties of the Cd 0.22 Zn 0.78 S thin films by spray pyrolysis method. *Physica Macedonica*, 56, 43-48.
- [45] Foo, K. L., Kashif, M., Hashim, U., & Liu, W. W. (2014). Effect of different solvents on the structural and optical properties of zinc oxide thin films for optoelectronic applications. *Ceramics International*, 40(1), 753-761.
- [46] P. Vandenabeele, *Practical Raman Spectroscopy - An Introduction*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2013.
- [47] F. J. Holler, D.A. Skoog, and S.R. Crouch, (2007), *Principles of instrumental analysis*. Belmont: Thomson. .
- [48] M. Amer, “Raman spectroscopy, fullerenes and nanotechnology,” 2010.
- [49] “J. Singh, *Semiconductor Optoelectronics*, Mc Grow-Hill Inc (1995).”
- [50] S. Sze and K. Ng, *Physics of semiconductor devices*. 2006.
- [51] Caglar, M., Ilican, S., Caglar, Y., & Yakuphanoglu, F. (2009). Electrical conductivity and optical properties of ZnO nanostructured thin film. *Applied surface science*, 255(8), 4491-4496.

- [52] Foo, K. L., Kashif, M., Hashim, U., & Liu, W. W. (2014). Effect of different solvents on the structural and optical properties of zinc oxide thin films for optoelectronic applications. *Ceramics International*, 40(1), 753-761.
- [53] M. Thambidurai, N. Muthukumarasamy, D. Velauthapillai, and C. Lee, "Chemical bath deposition of ZnO nanorods for dye sensitized solar cell applications," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 24, no. 6, pp. 1921–1926, Jun. 2013.
- [54] Li, Q., Bian, J., Sun, J., Wang, J., Luo, Y., Sun, K., & Yu, D. (2010). Controllable growth of well-aligned ZnO nanorod arrays by low-temperature wet chemical bath deposition method. *Applied Surface Science*, 256(6), 1698-1702.
- [۵۵] زارقی زاده، ع.، ۱۳۸۸، فیزیک لایه های نازک، دانشگاه پیام، تهران، ص ۱۴ تا ۴۱ (همان منبع: ۴۱ تا ۱۰۵).
- [56] Cullity, B. D. (1956). *Elements of X-ray Diffraction*. Addison-Wesley Publishing.
- [57] www.spincoating.com/en/featured-items/how-to-do-a-sol-gel-coating-using-spin-coating-technique/205.
- [58] D. W. Schubert and T. Dunkel, "Spin coating from a molecular point of view: its concentration regimes, influence of molar mass and distribution," *Mater. Res. Innov.*, vol. 7, no. 5, pp. 314–321, Oct. 2003.
- [59] M. R. De Guire, L. P. Bauermann, H. Parikh, and J. Bill, "Chemical Bath Deposition," in *Chemical Solution Deposition of Functional Oxide Thin Films*, Vienna: Springer Vienna, 2013, pp. 319–339.
- [60] J. Cheng, D. Fan, H. Wang, B. Liu, Y. Zhang, and H. Yan, "Chemical bath deposition of crystalline ZnS thin films," *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 18, no. 7, pp. 676–679, Jul. 2003.
- [61] www.edu.nano.ir.
- [62] A. Bhunia, P. Jha, D. Rout, and S. Saha, "Morphological properties and raman spectroscopy of ZnO nanorods," 2016.
- [63] V. Consonni et al., "Improvement of the physical properties of ZnO/CdTe core-shell nanowire arrays by CdCl₂ heat treatment for solar cells," *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–13, 2014.
- [64] O. Madelung, "Semiconductors: Data Handbook. 2004," Springer.

Abstract

Nanostructured metal oxide semiconductors such as ZnO are a group of relatively inexpensive compounds for photovoltaic applications that can be used to meet widespread demand. In this thesis, ZnO nanorods were synthesized by a chemical bath deposition (CBD) method. ZnO nanorods were prepared by varying the deposition parameters such as pH (5.5 and 11), deposition time (3 and 5h) and substrate type (glass and FTO). Then the structural, morphological, optical and electrical properties of the samples were investigated. Analysis of the XRD patterns showed that all samples have the wurtzite structure of ZnO with (0 0 2) preferential direction. FESEM images of samples showed that as pH and deposition time increase, the average diameter and length of nanorods also increase. Examination of the optical properties of the samples revealed that with increasing pH, the bandgap of the sample deposited on the glass/FTO substrate increases/decreases. Hall effect measurements confirmed the n-type conductivity for all samples. With increasing pH, the concentration of carriers decreased in both samples (on glass and FTO substrates), on the other side the mobility of the carriers increased. As the pH increased, the optical response of the sample with a glass substrate decreased and for the sample with the FTO substrate, it increased. Also, with increasing deposition time the optical response of the samples with glass and FTO substrates increased and decreased, respectively. To investigate the photovoltaic properties of ZnO nanorods (with FTO substrates), a layer of the CdTe was deposited on nanorods by a sputtering method. The XRD results showed that all of the samples have a ZnO wurtzite structure and CdTe cubic structure. The study of the FESEM images of the samples showed that the ZnO nanorods are covered by CdTe. Optical properties of the samples indicated that the growth condition of the ZnO layer effects on the bandgap

of ZnO/CdTe structure. Current-voltage analysis showed that sample with ZnO nanorods deposition with pH=5.5 and 3 h of deposition time has a higher optical response, so this sample is more suitable for solar cell application.

Keywords: ZnO nanorods, CdTe, Nanostructures, Chemical bath deposition, Sputtering, Solar cell



**Shahrood University of
Technology**

Faculty of Physics and Nuclear Engineering

M.Sc. Thesis in Nano Physics

Synthesis and characterization of Zinc Oxide nanostructures for solar cells applications

By:

Saed Alipour

Supervisors:

Dr. Morteza Izadi Fard

Dr. Mohamad Ebrahim Ghazi

January 2020