مروری بر متداول‌ترین روش‌های سنتز و فرآوری فیلم‌های نازک اکسید روی

مسعود سبزی*، **رقیه کلانتری‌پور**

باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، دزفول، ایران

مهندس مسعود سبزی، نویسنده‌ی مسئول مقاله، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول

* mas.metallurg88@gmail.com

چکیده: در این پژوهش به بررسی متداول‌ترین روش‌های سنتز و فرآوری فیلم‌های نازک اکسید روی پرداخته شده است. فیلم‌های نازک اکسید روی به دلیل مقاومت پایین، خواص پیزوالکتریکی مناسب، شفافیت بالا در ناحیه مرئی و وجود جنبه‌های تزیینی، دارای کاربردهای وسیعی در ادوات نیمه رساناها، دستگاه‌های موج آکوستیکی و وسایل اپتیکی - آکوستیکی می‌باشند. درمجموع فیلم‌های نازک اکسید روی دارای ویژگی‌های اپتیکی و الکتریکی خوبی بوده و همچنین هزینه‌های ساخت پایینی دارند. روش‌های رسوب گذاری متفاوتی مانند کند و پاش، رسوب گذاری باریکه مولکولی، رسوب گذاری فاز بخار، تبخیر حرارتی، تبخیر واکنشی، رسوب گذاری بخار شیمیایی، اسپری پایرولیزر و فرآیند سل - ژل برای ساخت فیلم‌های نازک اکسید روی به کار می‌روند.

کلمات کلیدی: اکسید روی، سنتز و فرآوری، فیلم‌های نازک.

۱- مقدمه

روی عنصری است شیمیایی با علامت اختصاری Zn که دارای عدد اتمی ۳۰ است. روی فلزی است به رنگ سفید متمایل به آبی که بر اثر رطوبت هوا تیره رنگ می‌شود و در حین احتراق رنگ سبز براقی تولید می‌کند. روی بعد از آهن، آلومینیوم و مس، چهارمین فلز مورد استفاده در دنیا می‌باشد. از موارد استفاده روی می‌توان آلیاژهای مختلف و فولاد گالوانیزه را نام برد. روی یکی از عناصر شیمیایی جدول تناوبی است که نماد آن Zn و عدد اتمی آن ۳۰ می‌باشد. روی فلزی است با چگالی ۱/۷ گرم بر سانتی متر مکعب و نقطه ذوب ۴۱۹ درجه سانتیگراد و نقطه جوش ۹۱۱ درجه سانتیگراد. فلز روی یکی از فلزات اصلی در دنیای امروزاست. اگرچه فراوانی زیادی ندارد (۷۶ میلیونیم پوسته زمین)، تولید سالیانه ۸/۵ میلیون تن روی، آن را بعد از آهن، آلومینیم و مس در مقام چهارم قرار داده است. بیشترین کاربرد روی، به عنوان پوشش محافظ به منظور تأخیر در خوردگی و سخت کاری سطح فولاد است. اما روی در ساخت آلیاژهای برنج و آلیاژهای ریختگی تحت فشار Zn نیز استفاده می‌شود [۳ – ۱].

اکسید روی، پودری سفید مایل به زرد و بسیار نرم، همراه با سطح ویژه بسیار بالا است. نانوپودر اکسید روی با شکل ذرات و توزیع دانه بندی کنترل شده بسیار مطلوب بوده و برای ساخت سرامیک‌هایی با ریزساختار بهینه و خواص کاربردی پیشرفته مورد نیاز می‌باشد. اکسید روی نانومتری را می‌توان از طریق روش‌هایی مانند میکروامولسیون، روش سنتز کلوییدی، رسوب دهی، روش‌های سل ژل و سنتز حرارتی با اسپری تولید کرد. روی اکسید یا اکسید روی (ZINC OXIDE) که در کتابهای کهن توتیا نامیده می‌شود، ترکیب غیرآلی با فرمول ZnO و به شکل پودری سفید رنگ و غیرمحلول در آب است. اخیراً اکسید روی (ZnO) در انجمن‌های علمی به عنوان یک مادهٔ آینده‌دار ، توجه بسار زیادی به خود جلب کرده است. با این وجود تا حد زیادی با نام غلط به عنوان ZnO به طور گسترده‌ای از سال ۱۹۳۵ مورد مطالعه و بررسی قرار داده شده است [۶ – ۳].

با بسیاری از صنایع فعلی ما و پیشرفت روز به روز زندگی، از لحاظ اساس و کاربرد، این ماده (ZnO) مورد مطالعه و بررسی قرار داده شده است. شهرت و معروفیت زیاد این ماده ناشی از رشد و توسعه تکنولوژی و فناوری ساخت لایه‌های واحد (کریستالی) و همبافته با کیفیت بسیار بالا

[Downloaded from jicers.ir on 2025-09-01]

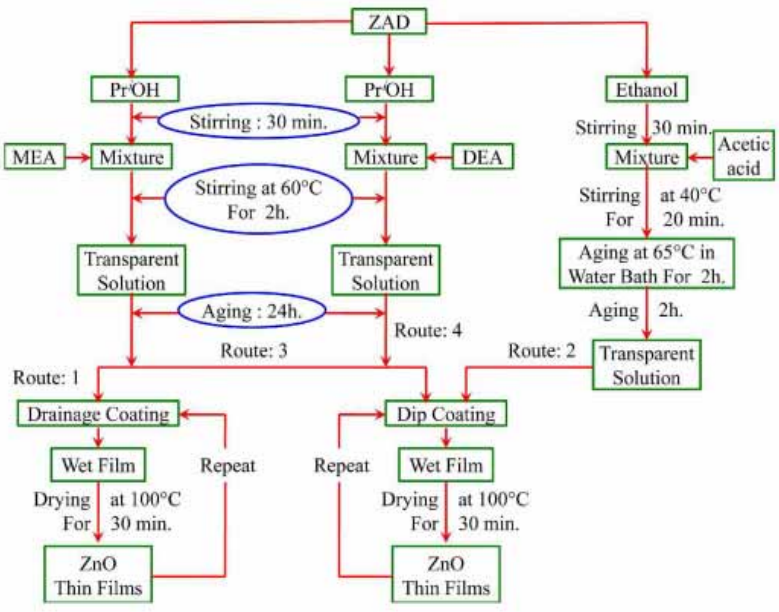
[DOR: 20.1001.1.17353351.1398.4.60.1.3]

می‌باشد که باعث تحقق این امر شده است که ZnO به عنوان وسایل و ابزار آلات الکترونیکی و نوری مورد استفاده قرار گرفته است. با فاصله باند زیاد ۳/۴ev و القاء الزام آور و بسیار زیاد انرژی ۶۰ mev در دمای اتاق، ZnO مانند GaN نقش مهمی در ابزار آلات و وسایل نوری فرابنفش و آبی ایفا می‌کند. با این حال در این کاربردها، ZnO نسبت به GaN از چندین مزیت برخوردار می‌باشد که مهمترین آنها القاء بسیار الزام آور انرژی و قابلیت رشد و بزرگ شدن مواد واحد بلوری (کریستالین) می‌باشد [۶ – ۵].
اکسید روی یکی از موادی است که به خاطر پتانسیل بالا در کاربردهای مختلف در دو دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. اکسید روی، نیمه رسانایی با گاف انرژی مستقیم و پهن در حدود ۳/۳ mev در دمای اتاق است که در مقیاس نانو دارای خواصی مانند فوتولومینسانس و لیزر، اپتیک غیر خطی و پیزوالکتریسیته، مقاومت غیر خطی بالا و پایداری مکانیکی خوب است. نانو ذرات اکسید روی از نظر جذب اشعه ماوراء بنفش نیز دارای کاربردهای ویژه‌ای می‌باشند که از آن جمله می‌توان به کاربرد آنها در پمادهای سوختگی و کرم‌های ضدآفتاب به عنوان جذب کننده قوی پرتو UV و فوتوکاتالیست برای حذف آلودگی‌های محیط زیست اشاره کرد [۷ و ۵ و ۲].

۲- روش‌های سنتز و فرآوری فیلم‌های نازک اکسید روی

۲-۱- روش سل- ژل

روش سل- ژل به دلیل داشتن مزیت‌های فراوانی از جمله توانایی ایجاد فیلم در سطوح نسبتاً کوچک، کنترل استوکیومتری بالا، هزینه‌های پایین تولید و ... نسبت به سایر روش‌ها به طور وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. خواص اپتیکی و ساختاری فیلم‌های نازک اکسید روی به طور مستقیم به پارامترهای فیزیکی و شیمیایی مانند تکنیک رسوب گذاری، فرآیند خشک سازی، دمای بازپخت، PH محلول، غلظت محلول و ... بستگی دارد. فیلم‌های نازک اکسید روی که به روش سل – ژل تهیه شده‌اند، دارای ساختار آمورفی هستند و هیچ قله‌ای در فاز کریستالی آنها دیده نمی‌شود. تمام نمونه‌هایی که تحت این شرایط تهیه شده‌اند نیز بدین صورت دارای ساختار آمورف هستند. می‌توان فیلم‌های نازک اکسید روی متخلخل را با استفاده از رویه‌های مناسب روش سل – ژل و تکنیک پوششی فروکشی به دست آورد. خو اص اپتیکی و ساختاری فیلم‌های نازک تهیه شده، به شدت به شرایط تهیه آنها بستگی دارد. ساختار فیلم‌های نازک با تغییر روش تهیه سل و همچنین تکنیک لایه‌نشانی تغییر می‌کند. زمانی که از اتانول و اسید اسیتیک به ترتیب به عنوان حلال و کاتالیزور استفاده می‌شود، سطح فیلم نایکنواخت و زبر بدست می‌آید. اگر از دی اتانول امین به جای مونو اتانول امین استفاده شود و تکنیک غوطه‌وری نیز به کار گرفته شود، سطح فیلم‌ها کاملاً یکنواخت و صاف به دست می‌آید [۱۰ و ۹ و ۸ و ۲].



شکل ۱- سیکل کاری تهیه‌ی فیلم‌های نازک اکسید روی با استفاده از نمونه‌ها و تکنیک‌های مختلف روش سل – ژل [۸].

[Downloaded from jicers.ir on 2025-09-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1398.4.60.1.3]

۲-۲-روش سنتز احتراقی

سنتز احتراقی در محلول (SCS) فرآیند ساده و سریعی است که اخیراً گسترش یافته و سنتز نانومواد گوناگونی را درپی دارد. این روند شامل یک فرآیند گرمازای ردوکسی (اکسیداسیون – احیا) بین محلول همگن اکسید کننده‌ها (بطور مثال نیترات‌های فلزی) و سوخت‌های مختلف (بطور مثال اوره، گلایسین و هیدرازیدها) می‌باشد و بطور موفقیت آمیزی برای سنتز اکسیدهای فلزی نانوساختار مورد استفاده قرار می‌گیرد. بسته به نوع ماده اولیه و نیز شرایط مورد استفاده برای سازماندهی فرآیند، سنتز احتراقی در محلول ممکن است که به دو صورت احتراق لایه به لایه و احتراق حجمی صورت گیرد [۱۰ و ۹ و ۶].

بطور خلاصه مزایای روش سنتز احتراقی در محلول شامل موارد زیر است [۱۳ – ۱۱]:

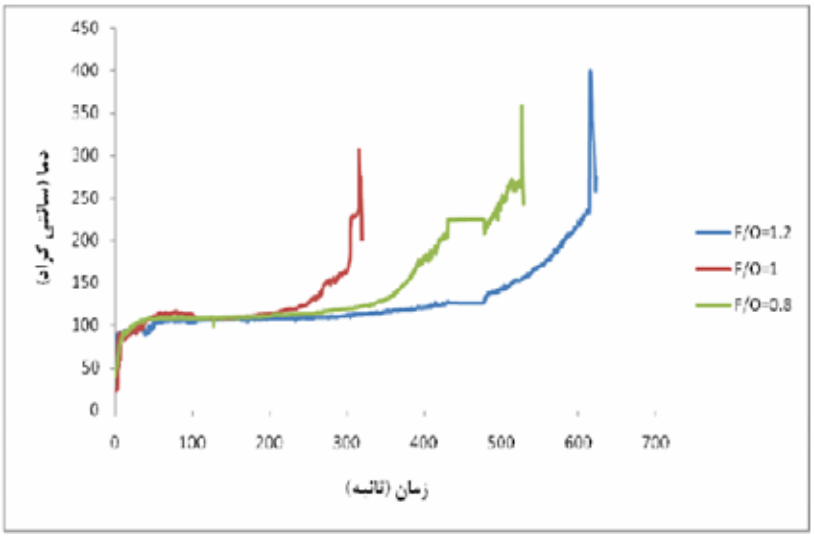
۱- بعلت حل شدن مواد اولیه در آب، اختلاط مواد اولیه در مقیاس مولکولی امکان پذیر است. بنابراین، تشکیل ترکیب موردنظر در مقیاس مولکولی امکان پذیر است.

۲- دمای بالای واکنش باعث تولید ماده‌ای خالص و بلوری می‌شود. ضمن اینکه دمای بالا به همراه سرعت سرمایش سریع، باعث می‌شود که بتوان به فازهای دما بالا دست یافت.

۳- زمان کوتاه فرآیند و تشکیل محصولات گازی در حین واکنش احتراق، مانع از رشد ذرات شده و باعث تشکیل پودر با اندازه نانومتری و سطح ویژه بالا می‌گردد.

۴- ساده بودن تجهیزات مورد استفاده در این روش، هزینه نسبتاً کم مواد اولیه، تک مرحله‌ای بودن فرآیند سنتز و صرفه‌جویی در انرژی از مزیت‌های دیگر روش سنتز احتراقی در محلول می‌باشد.

در تحقیقات صورت گرفته مشخص گردیده است که اکسید روی نانو ساختار بطور موفقیت‌آمیزی به روش سنتز احتراقی در محلول تولید می‌شود. بررسی‌ها نشان داده است که فاز اصلی در اکسید روی با نسبت سوخت به اکسید کننده ۰/۸، ۱، ۱/۲ و ۱/۳، فاز هگزاگونال است. نتایج نشان داده است که با افزایش نسبت سوخت به اکسید کننده، ابتدا اندازه کریستالیست‌ها افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همچنین دمای احتراق (T_c) برای نمونه‌های با نسبت سوخت به اکسید کننده برابر با ۰/۸، ۱ و ۱/۲ به ترتیب ۳۵۸/۱۴، ۳۰۴/۷۴ و ۳۹۹/۴۵°C و همچنین دمای اشتعال (T_{ig}) به ترتیب ۲۶۴/۹۲، ۲۳۱/۸۹، ۲۳۲/۹۱°C اندازه‌گیری شده است [۱۴ و ۱۶ و ۵].



شکل ۲- نمودار دمای واکنش بر حسب زمان انجام آن برای نمونه‌های اکسید روی با نسبت سوخت به اکسید کننده برابر ۰/۸، ۱ و ۱/۲ [۱۲].

۲-۳- روش استفاده از کانی‌های اکسید روی

ذرات نانو اکسید روی در صنایع مختلف اعم از غذایی، دارویی، لاستیک‌سازی، الکترونیکی و موارد مشابه کاربرد فراوانی پیدا کرده است. این ماده با استفاده از روش‌های گوناگون و جدید بعبارت دیگر با ابتکارات نوین در دنیا در حال ساخت می‌باشد و آثار مکتوب

[Downloaded from jicers.ir on 2025-09-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1398.4.60.1.3]

سالانه محققان گویای این امر است. در این زمینه تعدادی از محققین [۱۲ – ۹] به بررسی تولید ذرات نانوی اکسید روی و خصوصیات پیوند آن پرداختند. آنها ذرات نانو اکسید روی را از طریق ترسیب هموژنی بدست آوردند. برای جلوگیری از تجمع و آگلومراسیون ذرات روی و اصلاح سطح موثر از روش پیوند پلی متیل متاکریلیت استفاده کردند. بدین صورت که ابتدا با یک عامل تزویج کننده سطح ذرات اکسید روی را عمل آوری می‌کردند که باعث ایجاد پیوندهای دوتایی در سطح ذرات اکسید روی می‌شد و از آگلومراسیون جلوگیری می‌کرد. آنها دریافتند که افزایش غلظت مونومر می‌تواند باعث افزایش پیوند ذرات شود و افزودن بعضی از سطح سازها در تفرق ذرات موثر واقع شده است.

تعدادی دیگر از محققین [۱۵ و ۱۱ و ۲] طی یک مطالعه ذرات اکسید روی را از طریق ترسیب در یک محیط واسطه ارگانیکی ژلاتینی بدست آوردند. ذرات نانو اکسید روی مستقیماً از طریق ژل آگار شامل سولفات روی تحت تاثیر یون‌های -OH بدست می‌آیند، ساختار باندی نانواکسید روی تولید شده با اشکال ستاره‌ای، بیضوی و کروی از طریق ترسیب دوره‌ای همسو با تأثیر و پخش -OH تولید می‌شود. ذرات با اشکال ستاره و بیضوی از طریق فرآیند انحلال ماده‌ای که از پیش ترسیب ZnSO (OH) 3Zn بدست آمده بوجود می‌آیند. ابعاد بدست آمده بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ نانو متراند.

در تحقیق صورت گرفته در زمینه‌ی تهیه ی نانو اکسید روی از کانی‌های اکسید روی [۱۶ و ۴]، ابتدا کنسانتره اکسید روی در دو مرحله سرد وگرم تصفیه و عناصر ناخالص آن جدا گردید و محلول سولفات روی حاصل جهت تولید پودر نانو اکسید روی مورد استفاده قرار گرفت. سپس پارامترهای موثر در تولید پودر نانوی اکسید روی است، مورد بررسی قرار گرفت. به همین منظور شش پارامتر دما، غلظت‌های NaOH، Na_2CO_3 و $ZnSO_4$، زمان انجام واکنش و سرعت همزدن در ۴ سطح طراحی شد که در این حالت شرط بهینه زمانی حاصل شد که غلظت سولفات روی، کربنات سدیم و هیدروکسید سدیم برابر ۱مول بر لیتر و دمای انجام واکنش برابر ۹۰ درجه سانتیگراد باشد. همچنین عوامل زمان و سرعت همزن تأثیر چندانی در پاسخ هدف نداشتند. یعنی تاثیر عواملی نظیر زمان انجام واکنش و سرعت همزدن در سطوح انتخابیشان وقتی که سایر پارامترها در سطح بهینه خود قرار دارند آشکار نمی‌شود. در نهایت با انجام یک آزمایش با شرایط بهینه مشخص شد که در پودر بدست آمده فقط پیک‌های ZnO مشاهده می‌شود و پودر بدست آمده دارای ابعاد ۷۰ تا ۱۵۰ نانومتر است.

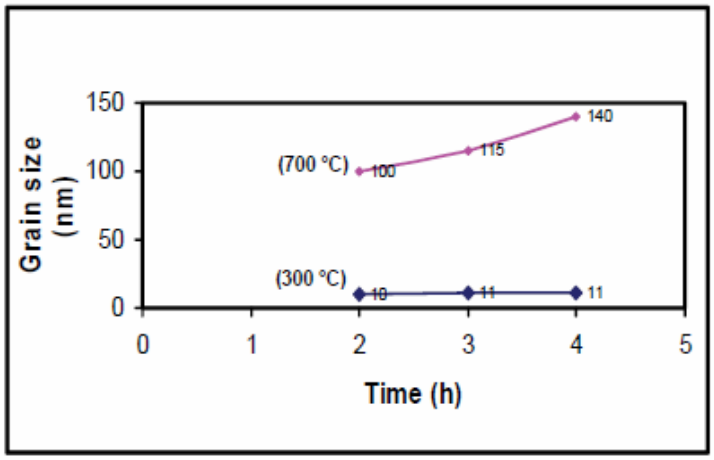
۲-۴-فرآیند ژلاسیون

ذرات، لوله‌ها و سیم‌ها با اندازه نانومتری، طیف وسیعی از خصوصیات الکتریکی و نوری را به نمایش می‌گذارند. اکسید روی با توجه به تأثیرات منحصربفرد خود با مورفولوژی‌های مختلف، کاربردهای وسیع بالقوه‌ای را در سیم‌های مقاومت الکتریکی، حسگرهای گازی، سرامیک‌ها، دستگاه‌های نوری و الکتریکی دارا هستند. بنابراین کنترل سنتز و مورفولوژی نانو ذرات ZnO اخیراً توجه زیادی را به خود جلب کرده است. همچنین نانو پودر ZnO میله‌ای شکل، کاربرد بسیاری در تهیه نانوکامپوزیت‌ها دارد. امروزه از نانولوله‌ها به عنوان تقویت کننده کامپوزیت‌های فیبری و پلیمری استفاده می‌شود. این کار با مخلوط نمودن نانولوله‌ها با پایه‌های پلیمری مختلف صورت می‌گیرد که این عمل منجر به ایجاد پیوندهای واندروالس بین نانولوله‌ها و پلیمر می‌شود. نانوکامپوزیت‌های تهیه شده با نانومیله‌های ZnO مزایای فراوانی دارند که باعث ارتقاء سطح کیفیت، مقاومت مکانیکی و فیزیکی ماتریس پلیمر می‌شود. نکته‌ای که در این نوع کامپوزیت‌ها مهم است، این است که در ساخت این نوع کامپوزیت‌ها باید سعی شود نانومیله‌های ZnO که در ماتریس پلیمر توزیع می‌شوند، یکنواخت باشد و میله‌های استفاده شده با طول بلندتر و قطر کمتر باشد، زیرا نحوه آرایش میله‌ها جهت یکنواخت شدن در زمینه پلیمری مهم است [۱۵ – ۸].

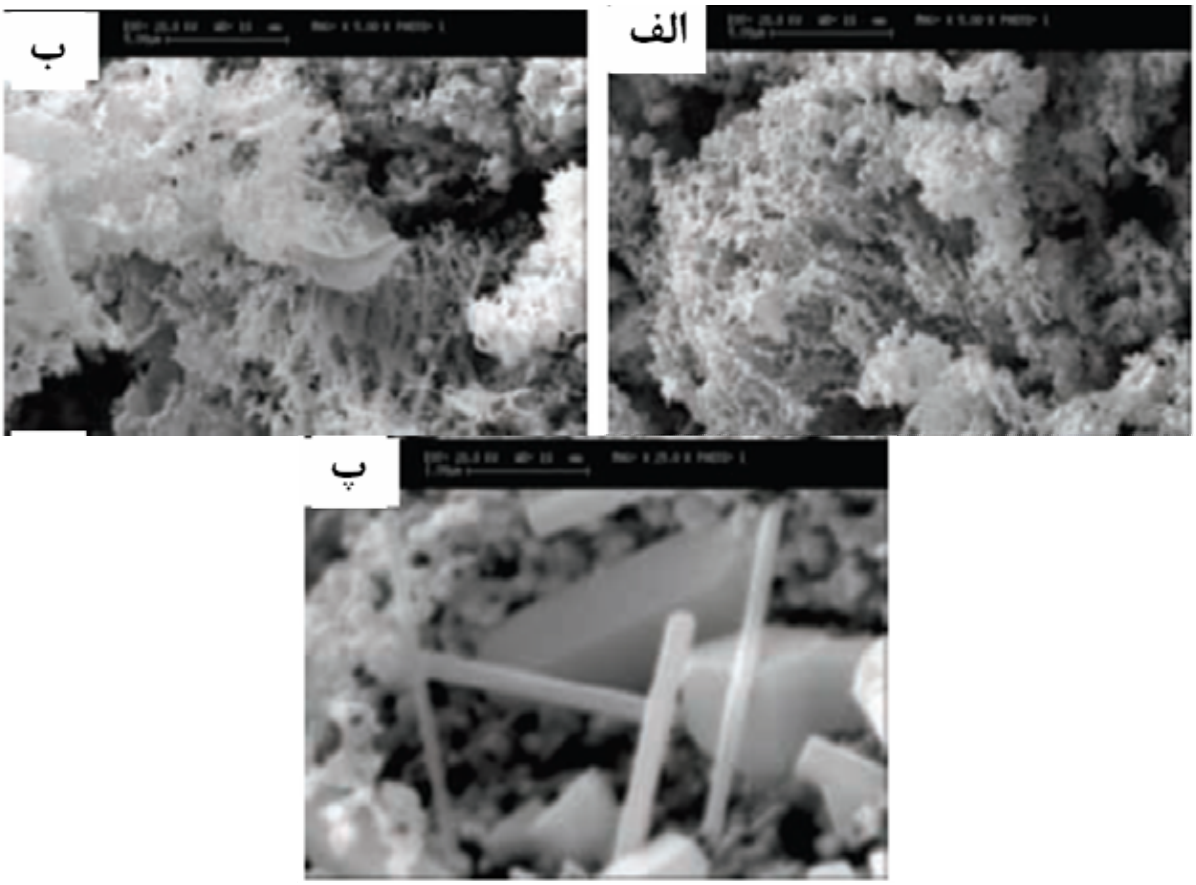
برای سنتز نانوپودرها روش‌های مختلفی وجود دارد که به طور کلی به سه دسته فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی تقسیم بندی می‌شوند. در روش ژلاسیون، ژل پلیمری تشکیل می‌شود که در مقایسه با روش سل–ژل، چون از نمک‌های معدنی به جای آلکوکسیدهای فلزی گران قیمت و آب نیز به جای حلال‌های آلی استفاده می‌شود، اقتصادی‌تر می‌باشد. در تحقیقات صورت گرفته [۱۸ و ۱۷ و ۱۱ و ۷]، سنتز نانو ذرات ZnO با مورفولوژی شبه میله‌ای دوشاخه‌ای با استفاده از روش ژلاسیون انجام شده است. فازیابی، اندازه کریستالیت‌ها و مورفولوژی پودر ZnO سنتز شده به ترتیب با XRD و SEM بررسی شده‌اند. نتایج اشعه پراش ایکس نشان می‌دهد که نانوذرات ZnO سنتز شده به صورت ساختمان کریستالی ورتزیت درآمده‌اند. همه‌ی پیک‌ها را می‌توان با فاز اکسید طبیعی روی مطابقت داد که دلالت بر خلوص بالای نانو ذرات ZnO بدست آمده دارد. تصاویر میکروسکوپ SEM

[Downloaded from jicers.ir on 2025-09-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1398.4.60.1.3]

نشان می‌دهد که نانو ذرات ZnO به صورت یک بعدی رشد نموده و تشکیل شبه میله‌ها را می‌دهند. نمونه‌ای که در ۶۰۰°C تکلیس شده، مورفولوژی میله‌ای شکل دارد. همچنین، دانه‌های نانومتری بسیاری در میان نانوساختارها برای نمونه‌های تکلیس شده در دماهای ۴۰۰°C و ۵۰۰°C به مدت ۳ ساعت وجود دارد که این ریزدانه‌ها در دماهای بالاتر یکی بعد از دیگری به یکدیگر متصل می‌شوند. بنابراین مورفولوژی میله‌ای نانو ذرات ZnO، به دمای تکلیس و غلظت آب موجود در محلول پیش ساخته بستگی دارد و پیدا کردن بهترین دمای تکلیس و میزان غلظت آب، تأثیر زیادی در تشکیل نانوساختارهای ZnO دارد. همچنین کنترل میزان PH و زمان تکلیس بر اندازه دانه نانومیله‌های اکسید روی تأثیر مستقیم دارد. با اعمال شرایط بهینه سنتز، می‌توان نانومیله‌های منحصربفرد ZnO تولید کرد که در نانوکامپوزیت‌های سرامیکی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین نانومیله‌های دوشاخه‌ای سنتز شده در کار حاضر، می‌تواند روزنه جدیدی را بر روی دنیای نانوتکنولوژی باز کند.



شکل ۳- اندازه دانه پودر ZnO بر حسب زمان تکلیس در دو دمای مختلف [۱۸].



شکل ۴- تصاویر SEM نانو ذرات ZnO در دماهای: الف) ۴۰۰°C، ب) ۵۰۰°C، پ) ۶۰۰°C [۱۸].

[Downloaded from jicers.ir on 2025-09-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1398.4.60.1.3]

۲-۵-روش تجزیه حرارتی

اکسیدروی یکی از موادی است که به خاطر پتانسیل بالا در کاربردهای مختلف در دو دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. اکسیدروی نیمه رسانایی با گاف انرژی مستقیم و پهن در حدود ۳/۳۷ الکترون ولت در دمای اتاق است که در مقیاس نانو دارای خواصی مانند فوتولومینسانس و لیزر، اپتیک غیرخطی و پیزوالکتریسیته، مقاومت غیر خطی بالا و پایداری مکانیکی خوب است. نانوذرات اکسیدروی از نظر جذب اشعه ماوراءبنفش نیز دارای کاربردهای ویژه‌ای می‌باشندکه از آن جمله می‌توان به کاربرد آنها در پمادهای سوختگی و کرم‌های ضدآفتاب به عنوان جذب کننده قوی پرتو UV و فوتوکاتالیست برای حذف آلودگی‌های محیط زیست اشاره کرد [۱۹ و ۸ و ۶ و ۱].

در یکی از تحقیقات انجام شده [۲۰]، روش تجزیه حرارتی دی هیدرات استات روی برای ساخت نانو ساختارهای اکسیدروی به کار گرفته شد. برای ساخت نانوساختارها از دی هیدرات استات روی (Zn(CH3COO)2.2H2O) که پودری سفیدرنگ با جرم مولی M=219/49gr/mol می‌باشد، استفاده شد. به منظور ساخت نانوساختارها، مقداری از دی هیدرات استات روی در یک کروزه قرار داده شد و در کوره گذاشته شد. سپس کوره تا دمای ۳۰۰°C گرم شد و برای مدت ۱ تا ۱۵ ساعت در این دما گذاشته شد. در این روش آهنگ گرم کردن کوره اهمیت زیادی دارد، به گونه‌ای که آهنگ گرم کردن در مقدار ماده‌ی محصول و همچنین تشکیل فازهای ناخواسته تأثیر زیادی دارد. در هر بار سنتز دو نوع محصول به دست می‌آید: ۱- پودر سفید رنگ متخلخلی که در دیواره‌ها و اطراف کروزه قرار دارد و ۲- پودر خاکستری رنگ که به سختی به کف ظرف کروزه چسبیده است. مواد ساخته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی، پراش اشعه ایکس و طیف FT-IR مشخصه‌یابی شدند. در نهایت نتایج نشان دادند که نانوساختارهای تولید شده بدون هیچگونه ناخالصی و با مورفولوژی بسیار متنوع تولید شده‌اند. در این روش فرآیند تجزیه دی‌هیدرات استات روی در دو فاز جامد و بخار انجام می‌شود و این امر منجر به تولید نانوذرات، نانوسیم‌ها و نانودیسک‌ها با اندازه یکنواخت و مورفولوژی یکسان می‌گردد.

۳- نتیجه‌گیری

الف) اکسید روی، نیمه‌رسانایی با گاف انرژی در حدود ۳/۳mev در دمای اتاق است که در مقیاس نانو دارای خواصی مانند فوتولومینسانس و لیزر، اپتیک غیرخطی و پیزوالکتریسیته، مقاومت غیرخطی بالا و پایداری مکانیکی خوب است.

ب) فیلم‌های نازک اکسید روی به دلیل مقاومت پایین، خواص پیزوالکتریکی مناسب، شفافیت بالا در ناحیه مرئی و وجود جنبه‌های تزیینی، دارای کاربردهای وسیعی در ادوات نیمه رساناها، دستگاه‌های موج آکوستیکی و وسایل اپتیکی- آکوستیکی می‌باشند. در مجموع فیلم‌های نازک اکسید روی دارای ویژگی‌های اپتیکی و الکتریکی خوبی بوده و دارای هزینه‌های ساخت پایینی هستند.

ج) روش‌های سنتز و فرآوری متفاوتی مانند کند و پاش، رسوب گذاری باریکه مولکولی، رسوب گذاری فاز بخار، تبخیر حرارتی، تبخیر واکنشی، رسوب گذاری بخار شیمیایی، اسپری پایرولیزز و فرآیند سل- ژل برای ساخت فیلم‌های نازک اکسید روی به کار می‌روند.

مراجع

[1] Mendil, R., Ben Ayadi, Z., Djessas, K., "Effect of solvent medium on the structural, morphological and optical properties of ZnS nanoparticles synthesized by solvothermal route", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 678, pp. 87–92, 2016.

[2] Liu, Z., Li, R., Jiang, R., Li, X., Zhang, M., "Effects of Al addition on the structure and mechanical properties of Zn alloys", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 687, pp. 885–892, 2016.

[3] Tao, J. and et al., "Enhanced optical and photocatalytic properties of Ag quantum dots-sensitized nanostructured TiO2/ZnO heterojunctions", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 688, Part A, pp. 605–612, 2016.

[4] Moulahi, A., Sediri, F., "Controlled synthesis of nano-ZnO via hydro/solvothermal process and study of their optical properties", Optik - International Journal for Light and Electron Optics, Vol. 127, No. 19, pp. 7586–7593, 2016.

[Downloaded from jicers.ir on 2025-09-01]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1398.4.60.1.3]

[5] Umar, A., Algarnic, H., Kim, S. H., Al-Assiri, M. S.," Time dependent growth of ZnO nanoflowers with enhanced field emission properties", Ceramics International, Vol. 42, No. 11, pp. 13215–13222, 2016.
[6] Berge, D. and et al., "Improved photoluminescence emission and gas sensor properties of ZnO thin films", Ceramics International, Vol. 42, No. 12, pp. 13555–13561, 2016.
[7] Coleman, V. A. and Jagadish, C., "Basic Properties and Applications of ZnO", Zinc Oxide Bulk, Thin Films and Nanostructures, Chapter 1, pp. 1-20, 2006.
[۸] آبسالان، ح.، اسمعیلی قدس، ف.، "مطالعهٔ مقایس‌های فیلم‌های نازک اکسید روی، تهیه شده با روش‌های مختلف سل–ژل"، مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۱۱، شمارهٔ ۴، ص ۴۲۸ – ۴۲۳، زمستان ۱۳۹۰.
[9] Wang, Y., Ma, Q., Jia, H., Wang, Z., " One-step solution synthesis and formation mechanism of flower-like ZnO and its structural and optical characterization", Ceramics International, Vol. 42, No. 9, pp. 10751–10757, 2016.
[10] Yang, Y. and rt al., "Facile synthesis of ZnO/Ag nanocomposites with enhanced photocatalytic properties under visible light", Materials Letters, Vol. 180, pp. 97–100, 2016.
[11] Deng, J. and rt al., " Facile synthesis and enhanced ethanol sensing properties of the brush-like ZnO–TiO2 heterojunctions nanofibers", Sensors and Actuators B: Chemical, Vol 184, pp. 21–26, 2013.
[۱۲] دانشجو، م.، هنربخش رئوف، ع.، وحدتی خاکی، ج.، "بررسی عوامل موثر بر فرآیند تولید اکسید روی نانو ساختار به روش سنتز احتراقی در محلول"، پنجمین همایش مشترک انجمن مهندسین متالورژی و جامعه علمی ریخته‌گری ایران، ص ۱۰ – ۱، ۱۳۹۰.
[13] Yang, Y. and rt al., "A simple hydrothermal synthesis of flower-like ZnO microspheres and their improved photocatalytic activity", Materials Letters, Vol. 180, pp. 55–58, 2016.
[14] Shi, R., Yang, P., Dong, X., Ma, Q., Zhang, A., "Growth of flower-like ZnO on ZnO nanorod arrays created on zinc substrate through low-temperature hydrothermal synthesis", Applied Surface Science, Vol. 264, pp. 162–170, 2013.
[15] Dongying, F., Gaoyi, H., Yang, F., Zhang, T., Chang, Y., Liu, F., "Seed-mediated synthesis and the photo-degradation activity of ZnO–graphene hybrids excluding the influence of dye adsorption", Applied Surface Science, Vol. 283, pp. 654–659, 2013.
[۱۶] خدادادی، ا.، قیطاسی، ر.، مرادخانی، د.، کلینی، س. ج.، مرزبان، م.، "بررسی عوامل موثر در تولید پودر نانو اکسید روی از کانی‌های اکسید روی"، نشریه علمی–پژوهشی مهندسی معدن، دوره سوم، شماره پنجم، ص ۸۹ – ۷۹، سال ۱۳۸۷.
[17] Fan, F. and et al., "Synthesis and gas sensing properties to NO2 of ZnO nanoparticles", Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 185, pp. 377–382, 2016.
[۱۸] منافی، ص.، روحانی، ع. ا.، بدیعی، س. ح. و صالحی، ا.، "تهیه و سنتز نانو ساختارهای ZnO با استفاده از فرآیند ژلاسیون و بررسی ریزساختارهای آن"، مجله تحقیقات مواد نانوکامپوزیتی، شماره ۱، ص ۲۶ – ۲۱، ۱۳۸۸.
[19] Chrissanthopoulos, A. and et al., "ZnO/zeolite hybrid nanostructures: synthesis, structure, optical properties, and simulation", Thin Solid Films, Vol. 555, pp. 21–27, 2014.
[۲۰] فربد، م.، جعفرپور، ع.، مقبل الحسین، م.، "ساخت نانوساختارهای اکسید روی از روش تجزیه حرارتی دی هیدرات استات روی"، مقاله نامه کنفرانس فیزیک ایران، ص ۱۹۸۶ – ۱۹۸۳، ۱۳۹۰.

[Downloaded from jicers.ir on 2025-09-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1398.4.60.1.3]