

ساخت آشکارساز نوری فرابنفش مبتنی بر نانوساختارهای اکسید روی و ناخالصی کلسیم با استفاده از روش سل-ژل

دکتر زهیر کردرستمی^۱ سیده صحیفه سجادی^۲

۱- استادیار- دانشکده مهندسی برق- الکترونیک- دانشگاه صنعتی شیراز- شیراز- ایران

kordrostami@sutech.ac.ir

دانشجوی کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- الکترونیک- دانشگاه صنعتی شیراز- شیراز- ایران

s.sajjadi62@yahoo.com

چکیده: در این مقاله یک آشکارساز نوری فرابنفش با استفاده از نانوساختارهای اکسید روی ساخته شده است. مراحل ساخت ارزان، کیفیت بالای نانوساختارها و نتایج مطلوب آشکارساز نوری از ویژگی های مهم روش پیشنهادی می باشد. نانوساختارهای اکسیدروی با استفاده از روش سل-ژل رشد یافته اند. جهت افزایش حساسیت حسگر، ناخالصی کلسیم به آنها افزوده شده است. نتایج حاصل از XRD نشان می دهد که نانوساختارهای بدست آمده عاری از هرگونه ناخالصی و فاز اضافی هستند. تصاویر SEM نیز بیانگر آن است که افزودن آلایند کلسیم سبب کاهش اندازه نانوساختارهای اکسید روی می گردد. طیف EDS نشان می دهد عنصر کلسیم در نمونه آلاییده شده موجود است. به منظور بررسی ویژگی های نوری نانوساختارها از طیف نگاری فوتولمینسانس (PL) استفاده گردید. نتایج حاصل از آزمایش PL دلالت بر کاهش انرژی شکاف باند نانوساختارهای اکسید روی در طی فرآیند آلایش با کلسیم دارد. همچنین نتایج حاصل از رامان و XRD حاکی از کاهش کریستالینگی نانوساختارها با افزایش میزان غلظت آلایند کلسیم می باشند. نتایج اندازه گیری جریان نوری حسگر ماورابنفش در حالت گذرا بیانگر آنست که جریان در معرض روشنایی بسیار بیشتر از جریان در حالت تاریکی است. آشکارساز حساسیت خوبی دارد و همچنین با افزودن ناخالصی کلسیم حساسیت آن افزایش می یابد.

کلمات کلیدی: آشکارساز نوری، فرابنفش، نانوساختار، اکسید روی، سل-ژل، جریان نوری.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۹/۱

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۶/۱۰

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر زهیر کردرستمی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - شیراز - بلوار مدرس - دانشگاه صنعتی شیراز - دانشکده مهندسی برق - الکترونیک

شود که منجر به تولید نانو ساختارها، افزاره‌های نوری و الکترونیکی گوناگون از نانو ساختارهای اکسید روی گردیده است [۹، ۱۰].

یکی از روش‌های تغییر خواص نوری و الکتریکی یک نیمه‌رسانا، آرایش آن با ناخالصی‌های مختلف است [۸]. دلایل متعددی برای آرایش نانو ساختارهای اکسید روی وجود دارد. اولاً اکسید روی دارای گاف انرژی بزرگی در میان نیمه هادی‌ها می‌باشد، از این‌رو ناخالصی‌ها می‌توانند چندین باند انرژی میانی بین باند ظرفیت و باند هدایت تشکیل دهند که هر کدام از این ترازهای میانی می‌توانند منبعی برای گسیل فوتون با انرژی‌های مختلف باشند. ثانیاً اکسید روی ذاتاً نیمه هادی نوع n می‌باشد که این ویژگی سبب می‌شود که کارایی نانو ساختارهای حاصل از آن محدود باشد. از این‌رو آرایش اکسید روی و تغییر انرژی شکاف باند آن از اهمیت خاصی برخوردار می‌شود [۱۱]. در مقاله حاضر تغییرات حاصله در مورفولوژی و خواص ساختاری اکسید روی ناشی از افزودن ناخالصی کلسیم بررسی گردیده است. این مقاله به ساخت یک حسگر نوری ماورابنفش با استفاده از نانو ساختارهای اکسید روی می‌پردازد و تاثیر تغییر غلظت آلاینده کلسیم بر خواص نوری آن را مورد مطالعه قرار می‌دهد.

۲- روش ساخت و آرایش نانو ساختارها

در این مقاله نانو ساختارهای اکسید روی خالص و آلیایده با کلسیم ۲٪، ۴٪ و ۶٪ با استفاده از روش سل-ژل رشد داده شده‌اند. برای این منظور از پودر نیترات روی $(Zn(NO_3)_2)$ ، پودر نیترات کلسیم $(Ca(NO_3)_2)$ ، ژلاتین و آب دو بار یونیزه شده استفاده گردیده است.

جهت تهیه نانو ساختارهای اکسید روی آلیایده با کلسیم، ابتدا ژلاتین در دمای $60^\circ C$ به صورت تدریجی به بشر حاوی آب مقطر مستقر در کریستالیزور حاوی روغن سیلیکون اضافه گردید و این محلول حدود ۱ ساعت به هم زده شد. زمانی که دما نزدیک به $80^\circ C$ رسید، نیترات روی و نیترات کلسیم به این ظرف اضافه گردید و دما در $80^\circ C$ ثابت نگه داشته شد.

بعد از گذشت حدود ۴ ساعت یک ژل کاراملی رنگ ایجاد گردید. سپس این ژل در کوره به مدت ۵/۵ ساعت در دمای $550^\circ C$ حرارت داده شد. در انتهای این فرآیند پودر بسیار نرم ZnO تشکیل گردید.

۳- مشخصه‌یابی نانو ساختارهای آرایش یافته

پس از انجام مراحل ساخت، پودرهای بدست آمده توسط دستگاه‌های شناسایی مختلفی مانند میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، الگوی پراش اشعه ایکس (XRD)، فوتولمینسانس (PL)، رامان و EDS مورد مطالعه قرار گرفتند. همچنین جریان نوری (photocurrent) آشکارساز ساخته شده اندازه گیری گردیده است.

در طول دهه پیش، محققان دریافته‌اند که نانو ساختارهای نیمه رسانا نقش مهمی در توسعه فناوری نانو ایفا می‌کنند. در حقیقت این مواد، جذابترین بخش از نانو مواد هستند که کاربرد آنها در ساخت انواع سنسورهای گازی، زیست حسگرها، ترانزیستورهای اثر میدانی، دیودهای گسیل نور (LED)، سلولهای خورشیدی و نانو ژنراتورها می‌باشد [۱-۴]. نانو ساختارهای نیمه رسانا به جهت خواص منحصر به فرد نوری که از خود نشان می‌دهند، امروزه موضوع تحقیقات بسیاری می‌باشند و از این رو با توسعه و تحقیق در این زمینه، قطعات اپتوالکترونیکی متعددی ساخته شده است. این کاربردها و خواص جدید نانو ساختارهای نیمه رسانا توجه جوامع علمی و صنعتی را به خود جلب کرده است. ویژگی مهم این دسته از مواد این است که رسانایی آنها با برانگیختگی نوری، تغییر دما و میزان افزایش ناخالصی به نحو قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند. از ویژگی‌های بسیار مهم مواد نیمه رسانا، کاربرد های اپتوالکترونیکی است. یکی از مهمترین مشخصات این مواد که آنها را از فلزات و عایق‌ها متمایز کرده است، اندازه گاف انرژی (Eg) آنهاست. این ویژگی طول موج‌هایی از نور را مشخص می‌کند که توسط نیمه رساناها جذب یا گسیل می‌شوند. به دلیل اینکه گاف های انرژی مواد نیمه رسانا نسبتاً متنوع می‌باشند، می‌توان توسط آنها دیودهای انتشار دهنده نور و لیزرهایی با طول موج‌هایی در محدوده مادون قرمز (IR) تا ماورای بنفش (UV) به وجود آورد. ویژگی‌های الکترونیکی و نوری مواد نیمه رسانا توسط ناخالصی‌هایی که به آنها افزوده می‌شود به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر قرار می‌گیرد. نانو ساختارهای یک بعدی و دو بعدی به جهت نسبت سطح به حجم بالا می‌توانند گزینه‌های مناسبی برای به کارگیری در افزاره‌های نوری باشند. در نانو ساختارهای نیمه رسانا، نسبت مساحت سطح به حجم (حدود $10^4 m^{-1}$ برای نانوسیم‌ها) بسیار بیشتر از این نسبت در مواد توده (حدود $10^2 m^{-1}$) می‌باشد [۵]. ابعاد نانو و نسبت سطح به حجم بالا به دلیل ایجاد نقص‌های سطحی و همچنین تحریک ترازهای سطحی منجر به حساسیتی شدید در ادوات ساخته شده با نانو ساختارها می‌گردد.

اکسیدروی به سبب گاف انرژی زیاد (حدود $3.23 eV$ در دمای اتاق) و انرژی اکسایش بالا (حدود $60 meV$ در دمای اتاق) یک ماده عالی برای ساخت افزاره‌های اپتیکی که با نور فرا بنفش و آبی کار می‌کنند می‌باشد. اکسید روی این قابلیت را نشان داده که می‌تواند به شکل نانو ساختارهایی متنوعی در بیاید.

نانو ساختارهای اکسید روی دارای ویژگی‌های الکتریکی و نوری منحصر به فردی از جمله تنوع در رسانایی الکتریکی، شفافیت بالا، پیروالکتریسیته، انرژی شکاف باند بزرگ، خاصیت فرومغناطیسی در دمای اتاق و حساسیت شیمیایی بالا می‌باشند [۶، ۷]. این خواص باعث شده تا در سالیان اخیر مطالعات گسترده‌ای بر روی اکسید روی انجام

۱-۳- جنس و اندازه نانوساختارها

ساختار کریستالی نانوساختارهای اکسید روی به دست آمده توسط آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD, Phillips PW3040/60) دارای آند مسی و طول موج تحریک 1.5406 \AA ، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. طیف XRD نانو ساختارهای اکسید روی خالص و آلاینده شده با کلسیم در شکل ۱ نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، پیک‌های پراشی ایجاد شده کاملاً با موقعیت پیک اکسید روی مطابقت دارند و هیچگونه پیک اضافی مربوط به هر گونه ناخالصی و یا ترکیب ناخواسته دیگری از قبیل اکسید کلسیم و غیره مشاهده نمی شود.

موقعیت پیک‌های نمونه آلاینش یافته با کلسیم نسبت به نمونه خالص دارای جابجایی به سمت زوایای کوچکتر است. این جابجایی ناشی از شعاع های یونی متفاوت یون های روی و کلسیم پدید می آید و به دلیل جایگزینی بعضی از یون های Zn^{2+} با Ca^{2+} در هر ترکیب ایجاد می شود. اتم های ناخالصی با شعاع های یونی متفاوت نسبت به Zn^{2+} در شبکه بلوری اکسید روی جایگزین می شوند، از این رو جابجایی در زوایای پیکها مشاهده می شود. شعاع یونی Ca^{2+} (۱ آنگستروم) بزرگتر از شعاع یونی Zn^{2+} (۰.۷۴ آنگستروم) است. بنابراین آلاینش با Ca سبب تغییر تدریجی در زاویه پیک به سمت زوایای کوچکتر می گردد [۳].

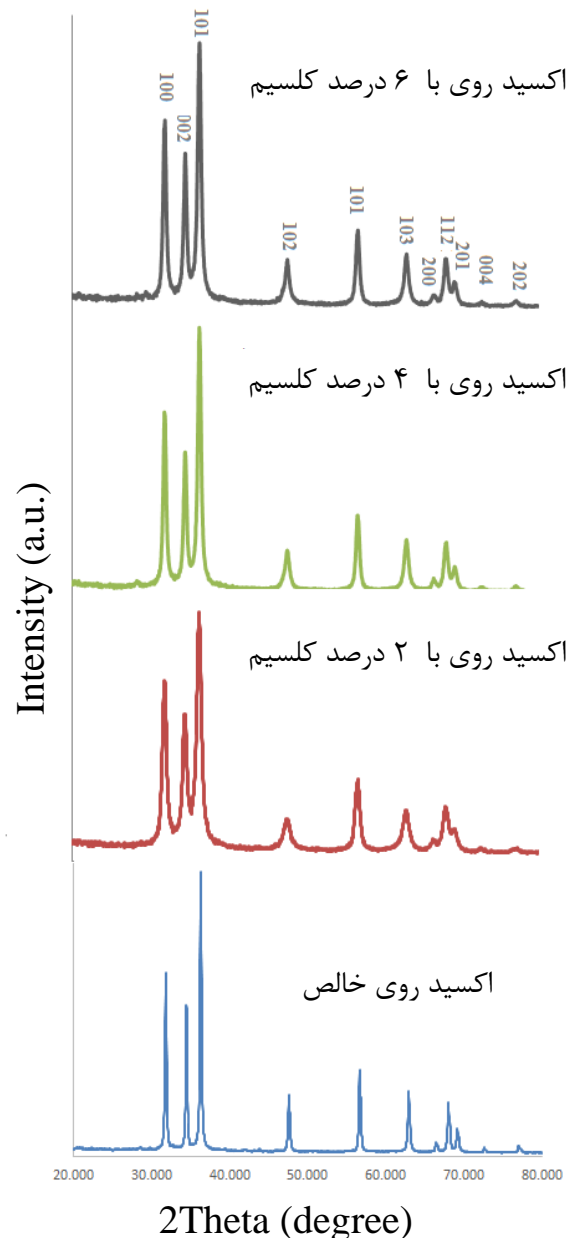
همچنین در طی فرایند آلاینش FWHM پیک ها نیز نسبت به نوع خالص افزایش یافته است، که این نشان دهنده ی کاهش کیفیت کریستالی نانوذرات اکسیدروی آلاینده شده نسبت به نمونه خالص می باشند. متوسط سایز کریستالی نانوذرات نیز به وسیله ی استفاده از رابطه شرر، بصورت ذیل اندازه گیری می شود:

$$D = k\lambda / (\beta_{hkl} \cos\theta) \quad (1)$$

در این معادله k ضریب شکل، β_{hkl} پهنای پیک در نصف شدت ماکزیمم، λ طول موج تشعشع (در اینجا برابر با 1.5406 \AA)، θ زاویه براگ و D متوسط سایز کریستال می باشد. مشاهده می گردد که پهنای پیک ها در نمونه های آلاینده شده بیشتر از نمونه خالص است و از این رو و با توجه به معادله ی ۱ می توان نتیجه گرفت که فرآیند آلاینش منجر به کاهش اندازه کریستال ذرات نسبت به نمونه خالص می گردد.

به این ترتیب افزایش پهنای پیک نمونه های آلاینده شده با کلسیم نسبت به نمونه خالص، بیانگر کاهش اندازه نانوساختارهای اکسید روی در طی آلاینش با کلسیم است.

همچنین با افزایش میزان ناخالصی، اندازه ذرات کوچکتر می گردد و می توان نتیجه گرفت که کاهش اندازه ذرات رابطه مستقیمی با افزایش غلظت آلاینده کلسیم در ساختار اکسید روی آلاینده شده دارند. طبق نظریه گروه فضایی که ویژگی‌های هندسی و تقارنی ساختار کریستالی مواد را تشریح می کند، اکسید روی تک کریستال متعلق به گروه فضایی C_{4v} با ۲ واحد فرمولی برای سلول یکه و هشت سری حالت‌های فونونی نوری در نقطه Γ از ناحیه بریلیونی است.



شکل (۱): طیف (XRD) اکسید روی خالص و با درصد‌های مختلف ناخالصی کلسیم

این تصاویر مجددا تایید می کنند که اندازه نانوساختارهای آلاییده شده در طی فرآیند آرایش با کلسیم نسبت به اکسید روی خالص کاهش یافته است.

شکل ۳ همچنین نشان می دهد که در طی فرآیند آرایش با کلسیم، با افزایش میزان ناخالصی، اندازه نانوساختارهای آلاییده شده کاهش یافته است. این نتیجه با نتیجه حاصل از XRD نشان داده شده در شکل ۱ کاملا مطابقت دارد.



شکل (۳): تصویر SEM نانو ساختارهای اکسید روی آلاییده با الف) ۲٪ و ب) ۶٪ کلسیم

۳-۳- ساختار کریستالی - مولکولی

برای مطالعه خواص نوری و به منظور بررسی ساختار کریستالی نانوساختارهای اکسید روی و اطمینان از تشکیل مولکول های ترکیبی روی، کلسیم و اکسیژن ($Zn_{(1-x)}Ca_xO$)، آنالیز رامان در دمای اتاق با استفاده از لیزر Nd: YLF و طول موج تحریک 532 nm صورت گرفت.

طیف اندازه گیری شده رامان برای درصد های مختلف ناخالصی در شکل ۴ نشان داده شده است. همانگونه که می توان مشاهده نمود، پیک قوی E_2 در حدود 437cm^{-1} نمونه ها یک پیک مشخص برای شبکه شش وجهی ZnO می باشد.

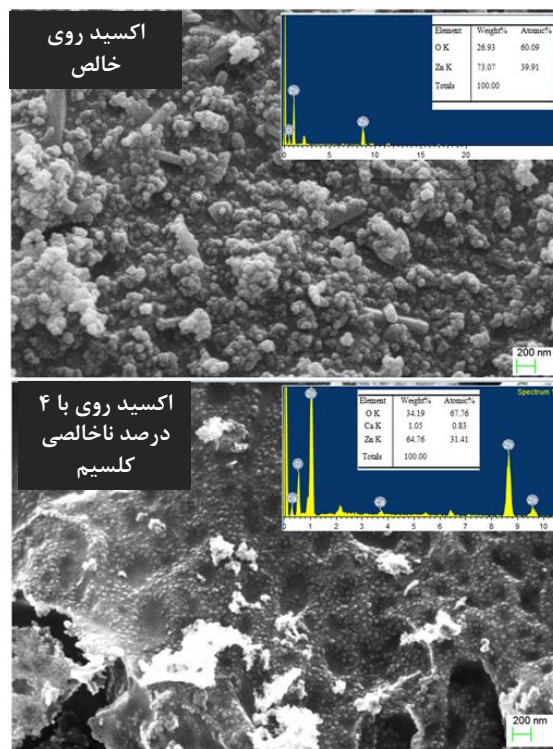
۳-۲- تصاویر SEM و اندازه نانوساختارها

نانوساختارهای اکسید روی حاصله توسط میکروسکوپ گسیل میدانی الکترونی روبشی (SEM, Hitachi S4160) مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. ابتدا نانوساختارهای اکسید روی خالص و آلاییده شده با ۴٪ کلسیم مشخصه یابی شده است.

تصویر حاصل از عکسبرداری SEM این نانوساختارهای در شکل ۲ نشان داده شده است. این تصاویر نشان می دهند که اندازه نانوساختارهای آلاییده شده با کلسیم نسبت به نمونه خالص کاهش یافته است.

علاوه بر این، تصاویر EDS ضمیمه شده در بالای تصاویر SEM، بخوبی نشان می دهد که عنصر کلسیم در نمونه آلاییده شده موجود است.

مشاهده این عنصر در طیف EDS نمونه آلاییده شده و عدم مشاهده هرگونه پیک اضافی در طیف XRD این نمونه در کنار جابجایی و تغییر شدت پیک ها بخوبی بیانگر نفوذ و جانشینی کلسیم در ساختار اکسید روی می باشد.

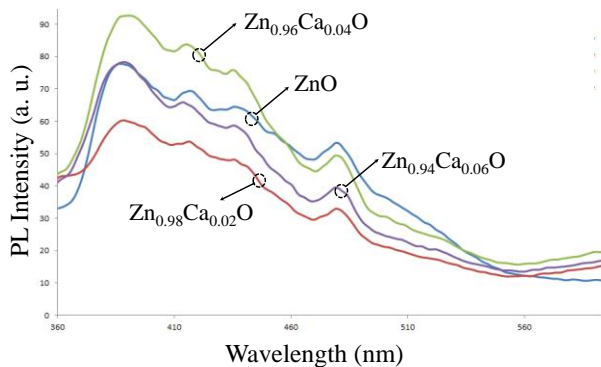


شکل (۲): تصویر SEM و آنالیز EDS نانو ساختارهای اکسید روی الف) خالص و ب) آلاییده با ۴ درصد کلسیم

در مرحله بعد تصویر SEM نانوساختارهای آلاییده شده با ۲ درصد و ۶ درصد کلسیم بررسی شده است. تصویر حاصل از عکسبرداری SEM این نانوساختارها در شکل ۳ نشان داده شده است.

ناخالصی کلسیم صورت گرفت (LS55 Perklin Elmer). شکل ۵ طیف PL نانو ساختارهای اکسید روی خالص و با آلیاژ را نشان می‌دهد.

همچنین موقعیت پیک‌ها روی شکل ۵ و انرژی شکاف باند متناظر آنها برای نمونه‌های اکسید روی خالص و با ناخالصی کلسیم در جدول ۱ آورده شده است.



شکل (۵): طیف فوتولومینسانس مربوط به نمونه‌های اکسید روی خالص و آلیاژ با ۰.۲٪، ۰.۴٪ و ۰.۶٪ کلسیم

جدول (۱): مشخصات پیک‌های PL نانو ساختارهای اکسید روی خالص و آلیاژ

UV	انرژی شکاف باند	ترکیب
۳۸۶/۵ nm	۳/۲۱۳ eV	ZnO
۳۸۸ nm	۳/۲۰۹ eV	Zn _{0.98} Ca _{0.02} O
۳۸۸/۵ nm	۳/۱۹۶ eV	Zn _{0.96} Ca _{0.04} O
۳۹۰ nm	۳/۱۸۴ eV	Zn _{0.94} Ca _{0.06} O

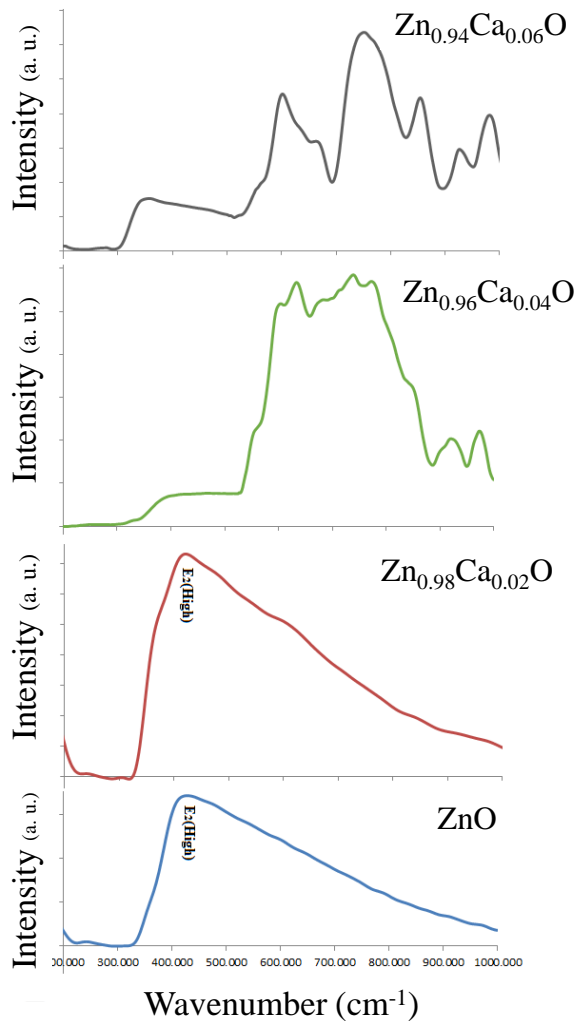
همان‌طور که جدول ۱ نشان می‌دهد نمونه‌های آلیاژ شده در مقایسه با نمونه بدون آلیاژ دارای گاف انرژی کوچکتری می‌باشند. اکسید روی تمایل به تشکیل نواقص ذاتی Interstitial مثل Zn شبکه‌ای (Zn_i) و نواقص از نوع Vacancy مثل جای خالی اکسیژن (O_v) دارد. این نواقص از طریق گسیل‌های مختلف بر طیف PL اکسید روی تأثیرگذار است.

اصولاً اکسید روی توده‌ای دارای دو طیف گسیلی است. گسیل اول، گسیل UV است که به علت بازترکیب تابشی اکسایتون‌های آزاد رخ می‌دهد. گسیل دوم، گسیل سطح عمیق (DLE) نامیده می‌شود و به گسیل نزدیک لبه نوار (NBE) نیز معروف است و به نوعی بیانگر میزان انرژی شکاف باند نیمه‌رسانا نیز می‌باشد، که با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E_g = hc/\lambda \quad (2)$$

که در آن h ثابت پلانک، c سرعت نور، λ طول موج و E_g گاف انرژی می‌باشد.

نتایج اندازه‌گیری رامان نشان می‌دهد که پیک E₂(high) در نمونه خالص و با ناخالصی ۲٪ کلسیم بسیار قوی می‌باشد ولی در ناخالصی‌های بالا (۰.۴٪ و ۰.۶٪) ضعیف‌تر می‌گردد. وجود حالت E₂(high) در طیف رامان اکسید روی نشان دهنده ساختار کریستالی شش‌وجهی منتظم اکسید روی است. این پیک در همه نانو ساختارها وجود دارد، ولی با افزایش میزان ناخالصی این پیک کاهش و بطور کلی زوال می‌یابد به طوری که می‌توان گفت نمونه‌های آلیاژ شده از کریستالینگی کمتری نسبت به نمونه خالص برخوردارند.

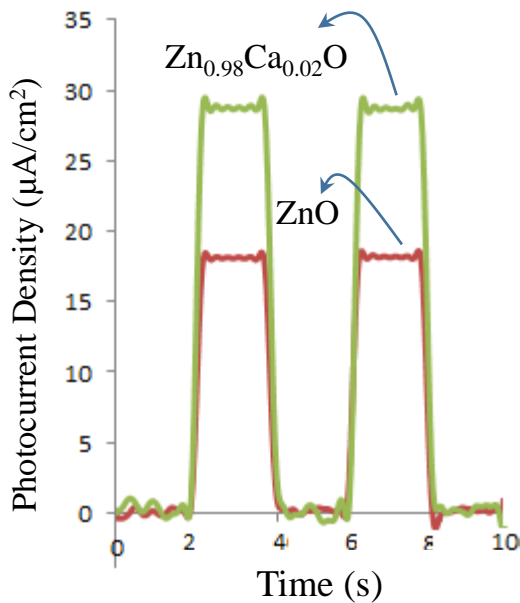


شکل (۴): تصاویر آنالیز Raman مربوط به نمونه‌های اکسید روی خالص و آلیاژ با ۰.۲٪، ۰.۴٪ و ۰.۶٪ کلسیم

۳-۴- ساختار کریستالی - مولکولی

جهت بررسی شکاف باند نمونه‌های ساخته شده تحت آزمایش فوتولومینسانس (PL) قرار داده شده‌اند. آنالیز PL در دمای اتاق با استفاده از لامپ زنون به عنوان منبع تابش و طول موج تحریک ۳۴۰ nm برای مطالعه طیف گسیلی نانو ساختارهای اکسید روی با

های اندازه گیری شده مشخص است که مقدار جریان نوری در حالت تاریک بسیار اندک می باشد در حالی که در معرض پرتو فرا بنفش جریان برای اکسید روی خالص حدود $18 \mu A/cm^2$ می باشد. این مقدار جریان برای نمونه آلاینده شده با کلسیم به حدود $29 \mu A/cm^2$ رسیده است که نشان می دهد آشکار ساز ساخته شده دارای حساسیت مناسبی می باشد. همانگونه که مشاهده می گردد حساسیت به اندازه $39/7\%$ در نمونه آلاینده شده با کلسیم نسبت به نمونه خالص افزایش یافته است.



شکل (۷): منحنی جریاندهی نوری حسگر نوری ماورابنفش مبتنی بر نانو ساختار اکسیدروی خالص و آلاینده ۲ درصد بر کلسیم تحت شدت ثابت 100 mW/cm^2

نتایج این مقاله نشان می دهد که نانوساختارهای ساخته شده دارای ویژگی های مورد نظر بوده است. همچنین حسگر فرابنفش ساخته شده دارای خروجی های مطلوب از جمله نسبت جریان روشن به تاریک بالا می باشد.

۶- نتیجه گیری

نانوساختارهای اکسید روی خالص به منظور ساخت آشکار ساز نوری فرابنفش رشد داده شد. جهت افزایش حساسیت حسگر فرابنفش ناخالصی کلسیم به نانوساختارها اضافه گردید. کلیه مراحل رشد و افزایش ناخالصی به روش سل-ژل انجام گردیده است. نتایج مشخصه یابی ها نشان داد که نانوساختارهای اکسید روی به درستی شکل گرفته و اتم های کلسیم نیز به خوبی اضافه شده اند و ساختار مولکولی مورد نظر ایجاد گردیده است. اضافه کردن ناخالصی اندازه نانوساختارها را کاهش داده و شکاف باند را کوچکتر نموده است. برای ساخت حسگر فرابنفش، نانوساختارها به همراه کیتوسان به صورت یک لایه روی شیشه قرار گرفت و الکتروگذاری انجام گردید. نتایج اندازه گیری جریان نوری نشان داد که آشکار ساز نوری پیشنهادی دارای نسبت

۴- آشکار ساز فرابنفش ساخته شده

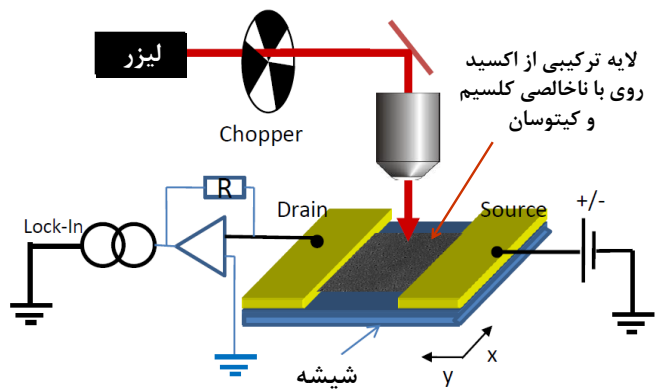
جهت ساخت حسگر نوری از نانوپودرهای تولید شده، از ترکیب نانوپودرهای حاصله با کیتوسان استفاده شده است. کیتوسان یک پلیمر رساناست و مشتقی از گلوکان با واحدهای تکرار شونده کیتین ($C_6H_{11}NO_4$) است که از جوشاندن کیتین در محلول پتاس (KOH) با غلظت مشخص به دست می آید.

در این روش مقدار $0/1$ گرم از هر نانوپودر را با مقدار $0/4$ سی سی از محلول کیتوسان رقیق شده با سدیم هیدروکسید (NaOH) و آب دو بار یونیزه شده ($0/5 \text{ w/v}\%$) ترکیب کرده سپس به مدت ۸ دقیقه درون حمام التراسونیک قرار می گیرد تا خوب ترکیب شوند، سپس بر روی بسترهای شیشه ای شفاف ریخته می شوند. در انتها نیز بر روی آنها الکتروگذاری می گردد [۳]. آشکار ساز ساخته شده در قسمتی از شکل ۶ مربوط به اندازه گیری جریان نوری نشان داده شده است.

۵- اندازه گیری جریان دهی نوری

در این قسمت با استفاده از نمونه های لایه نشانی شده (نمونه خالص و نمونه با ناخالصی ۲ درصد کلسیم) آشکار ساز نوری فرابنفش ساخته شده است و جریان نوری (Photocurrent) آنها اندازه گیری گردیده است.

جریاندهی نوری نمونه های لایه نشانی شده تحت یک منبع نور مرئی با شدت تابش (100 mW/cm^2) و در ولتاژ تحریک ۲ ولت اندازه گیری گردیده است. شکل ۶، طرز اندازه گیری جریان نوری و نحوه بایاس کردن آشکار ساز فرابنفش نشان داده شده است.



شکل (۶): طرز اندازه گیری جریان نوری و نحوه بایاس کردن آشکار ساز فرابنفش

شکل ۷ منحنی جریان نوری حسگر نوری فرا بنفش ساخته شده تحت شدت ثابت 100 mW/cm^2 را نشان می دهد. محور عمودی مقدار چگالی جریان بر حسب $\mu A/cm^2$ را نشان می دهد. با توجه به جریان

Saedi, A, Yousefi, R, Jamali-Sheini, F, Khorsand Zak, A, Cheraghizade, M, Mahmoudian, M.R, Baghchesara, M.A and Shirmardi Dezaki, A, "XPS studies and photocurrent applications of alkali-metals-doped ZnO nanoparticles under visible illumination conditions", Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, Vol. 79, pp. 113-118, 2016.

جریان روشن به تاریک بالایی می باشد و با افزودن ناخالصی کلسیم حساسیت آشکارساز نوری افزایش می یابد. در ای مقاله یک روش ارزان با کیفیت بالا و نتایج مطلوب پیشنهاد گردیده است. مراحل ذکر شده در این مقاله برای ساخت حسگرهای نوری مشابه قابل استفاده است.

مراجع

- [۱] سعید علیائی، احمد محب زاده، "طراحی حسگر زیستی کریستال فوتونی مبتنی بر نانوتشدیدگر"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد ۱۳ شماره ۴، صفحه ۸۱-۸۸، سال ۱۳۹۵.
- [۲] محمد جواد کیانی، مسلم زارع، "طراحی و ساخت حسگر اکسید قلع با حساسیت بالا به روش سل ژل و تکنیک لایه نشانی چرخشی"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد ۱۱، شماره ۲، صفحه ۴۳-۴۸، سال ۱۳۹۳.
- [۳] لیدا احمدخانی، ربابه عباسی، "بهبود چگالی جریان و افزایش کارایی سلول خورشیدی پلیمری HT:PCBM_۲P با استفاده از نانومیله اکسید روی"، مجله پژوهش فیزیک ایران، جلد ۱۷، شماره ۳، صفحه ۳۳۷-۳۴۳، سال ۱۳۹۶.
- [۴] محمدجواد کیانی، علیرضا صالحی، "لایه نشانی نازک سنسور گازی مبتنی برنیمه هادی اکسید قلع با روش غوطه وری، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد ۱۳، شماره ۴، صفحه ۶۵-۷۰، سال ۱۳۹۳.
- [۵] عبدالرحمان حسینی فر، "تثبیت آنزیم گلوکز اکسیداز بر روی نانو ساختارگرافن جهت استفاده در بیوسنسور قند خون"، مجله دانشگاه علوم پزشکی اجا، جلد ۱۰، شماره ۴، صفحه ۳۲۹-۳۳۸، سال ۱۳۹۱.
- [۶] علی ریحانی، محمدرضا خانلری، وحید واحدی، "خواص اپتیکی و ساختاری میله‌های شش گوشه اکسید روی رشد داده شده به روش نشست بخار شیمیایی"، مجله پژوهش فیزیک ایران، جلد ۱۴، شماره ۲، صفحه ۱۴۸-۱۵۳، سال ۱۳۹۳.
- [۷] سعید صفا، میلاد اصغری، سعادت مختاری، روح اله عظیمی راد، "بهبود عملکرد حسگر گازی نانومیله های اکسیدروی کپسوله شده با یک لایه اکسیدروی آلاییده با ناخالصی کروم در برابر بخار اتانول"، مجله پژوهش فیزیک ایران، جلد ۱۷، شماره ۴، صفحه ۵۶۱-۵۷۱، سال ۱۳۹۶.
- [۸] محمدمهدی خاتمی، مجید شالچیان، محمدرضا کلاهدوز، "تحلیل و بهبود جریان حالت خاموش نانو ماسفت کرنشی دوماحوره سیلیکانی نوع p با کنترل چگالی ناخالصی زیرلایه مجازی"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد ۱۳، شماره ۴، صفحه ۴۱-۵۰، سال ۱۳۹۵.
- [9] Z. H. Wang, H. C. Yu, C. C. Yang, H. T. Yeh, and Y. K. Su, "Low-Frequency Noise Performance of Al-Doped ZnO Nanorod Photosensors by a Low-Temperature Hydrothermal Method", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 64, pp. 3206-3212, 2017.
- [10] S. J. Young and Y. H. Liu, "High Response of Ultraviolet Photodetector Based on Al-Doped ZnO Nanosheet Structures", IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 23, pp. 1-5, 2017.