

طراحی و ساخت حسگر اپتیکی رطوبت بر پایه رشد میکرو/نانومیله‌های ZnO روی تار نوری سونش داده شده

سعید آزاد^۱، رقیه پرویزی^{۱*}، آذر دخت مظاهری^۲، محمد حسن یوسفی^۳، ابراهیم صادقی^۱

^۱ گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

^۲ پژوهشکده اپتیک و لیزر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان، اصفهان، ایران

^۳ گروه نانوفیزیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

در این تحقیق حسگر نوری رطوبت به صورت ارزان و با حساسیت بالا توسط رشد میکرو/نانومیله‌های ZnO به روش آبی-حرارتی روی تار نوری ساخته شد. حسگرهای تارنوری که بر مبنای پرتوهای محو شونده طراحی شده‌اند، اگر توسط نانو ساختارها پوشیده شوند حساسیت حسگر را بسیار بهبود می‌بخشند. در این تحقیق میکرو/نانومیله‌های ZnO به طور یکنواخت و بسیار متراکم روی تار نوری رشد داده شد. با اعمال رطوبت ضریب شکست اطراف تار نوری تغییر کرده و منجر به تغییر شدت نور خروجی می‌شود. تغییرات شدت نور که متناسب با میزان رطوبت می‌باشد توسط آشکارساز نوری ثبت گردید. زمان پاسخ و بازگشت پذیری حسگر اندازه‌گیری شده و مشاهده گردید که توانایی رطوبت سنجی در سطح قابل قبولی وجود دارد (۱۰٪-۱۰۰٪). همچنین اثرات استفاده از منبع نور لیزر و منبع نور گسترده سفید در حساسیت حسگر مطالعه شده است. ساختار و ریخت نانومیله‌های ZnO توسط آنالیزهای پراش اشعه ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مطالعه گردید.

کلیدواژگان: حسگر تار نوری، نانومیله ZnO، حسگر رطوبت، تار نوری سونش داده شده، آبی-حرارتی

مقدمه

شیمیایی [۴]، رسوب دهی فیزیکی بخار [۵]، رسوب دهی شیمیایی بخار [۶]، هم بافته پرتو مولکولی [۷]، لایه نشانی پالس لیزری [۸]، کندوپاش^۱ [۹]. از میان این روش‌ها روش رسوب دهی فیزیکی بخار نیازمند دمای بالا بوده همچنین کاتالیست و ناخالصی وارد نانو ساختارهای ZnO می‌شود. بنابراین با احتمال کمی مناسب زیرلایه‌های آلی انعطاف‌پذیر برای کاربردهای الکترونیکی آینده می‌باشند. روش‌های لایه نشانی پالس لیزری و کندوپاش نیز کنترل‌پذیری و تکرارپذیری

اکسید روی (ZnO) یکی از پرکاربردترین نیم رساناهای گروه II-VI، با گاف نواری پهن ۳٫۷۳ eV (در دمای ۳۰۰K) و انرژی بستگی اکسیتونی بالای ۶۰ meV می‌باشد که آن را برای کاربردهای متنوع اپتوالکترونیکی همچون نانو حسگرهای با کارایی بالا [۱]، سلول‌های خورشیدی [۲]، صفحات نمایش لمسی و مواد فوتوکاتالیست مناسب می‌سازد [۳]. نانو ساختارهای یک بعدی ZnO با روش‌های متنوع بسیاری ساخته شده‌اند همچون روش‌های مرطوب

* نویسنده مسئول: parvizi.r@yu.ac.ir

^۱ sputtering

است [۱۲]. به طور مشابه کاربرد آرایه‌های نانومیله‌های ZnO به عنوان پوشش بیرونی غلاف تارهای نوری LPG به منظور حس کردن اتانول توسط کنستانتاکی و همکاران گزارش شده است [۱۳]. همچنین مقاله در مورد حسگر تار نوری اسید اوریک توسط رشد میکرومیله‌های ZnO روی تار نوری پلیمری در سال ۲۰۱۴ منتشر شده است، که به بررسی خاصیت حسگری پرداخته و به بهبود عملکرد حسگر با شرط فرآیند دانه‌گذاری ZnO پیش از رشد، می‌انجامد [۱۴]. در این مقاله دمای رشد ۶۰ درجه سانتیگراد گزارش شده که دمای مناسبی برای دستیابی به رشد انبوه نیست و دمای مناسب رشد انبوه ۹۵ درجه می‌باشد. البته اگر این دما به تار نوری پلیمری اعمال شود باعث تضعیف عملکرد تار نوری می‌شود، در این راستا سعی شده است حسگر ساخته شده در این تحقیق از نوعی تار نوری استفاده شود که دمای ۹۵ درجه روی آن اثر منفی نگذارد. همچنین نور انتقال یافته در مسافت‌های طولانی نسبت به تار نوری پلیمری افت کمتری خواهد داشت و باعث افزایش دقت حسگر می‌شود. در ضمن با استفاده از منبع نور گسترده سفید بجای لیزر هلیوم نئون، نوسانات و مدت زمان به تعادل رسیدن منبع نور کاهش پیدا کرده است. در این کار امکان رطوبت‌سنجی توسط تارنوری مولتی‌مود که روی آن نانومیله‌های ZnO به گونه بسیار منظم و انبوه به روش آبی-حرارتی (این روش ارزان و زیست سازگار است و محصولات حاصل از این روش از خلوص بالایی برخوردار هستند) رشد داده شده‌اند بررسی می‌گردد. نقطه عطف این تحقیق رشد نانومیله‌ها روی تار نوری سونش داده شده به صورت انبوه و یکنواخت بدون استفاده از ماده پایدار کننده و یا مواد با خاصیت چسبندگی بالا به منظور ثابت نگه‌داشتن دانه‌های ZnO می‌باشد. در ضمن تاکنون اثر رطوبت روی چنین حسگر تار نوری مطالعه نشده است.

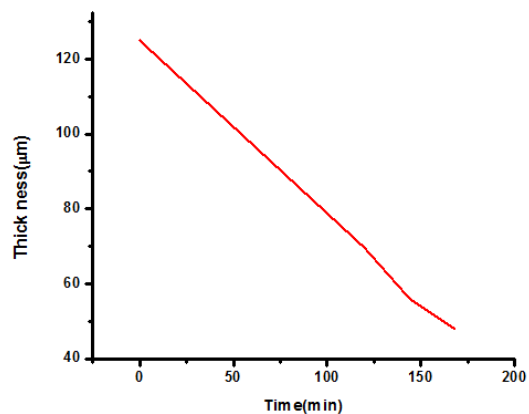
ضعیف‌تری نسبت به روش‌های قبلی دارند. در مقایسه با روش‌های بالا روش‌های شیمیایی مرطوب به دلایل متعددی جذاب‌تر هستند: آن‌ها هزینه کمی دارند، توانایی تولید انبوه را دارند، رشد در دمایی نسبتاً پائینی روی می‌دهد سازگار با زیرلایه‌های آلی انعطاف‌پذیر بوده همچنین پارامترهای متنوع بسیاری وجود دارند که با تغییر آن‌ها می‌توان به گونه مؤثری ریخت و خواص محصول نهایی را کنترل کرد [۱۰]. روش‌های شیمیایی مرطوب به عنوان یک روش بسیار توانمند و تطبیق‌پذیر برای رشد نانوساختارهای یک بعدی ZnO می‌باشد. در این مقاله رشد نانوساختارهای ZnO از طریق یکی از روش‌های شیمیایی مرطوب که آبی-حرارتی نام دارد انجام شده است.

اگرچه مقالات بسیاری درباره رشد نانومیله‌های ZnO روی سطوح مسطح وجود دارد ولی مقالات اندکی در مورد رشد این نانوساختار روی سطوح خمیده و تار نوری منتشر شده است. در این مقاله رشد نانوساختار بدون استفاده از مواد پایدارکننده و مواد بسیار گران که به عنوان ماده چسبناک برای نگه‌داشتن نانوساختار روی تار نوری به کار می‌رود، انجام شده است، که خود صرفه اقتصادی و سادگی فرآیند رشد را به دنبال دارد.

نانومیله‌های ZnO با داشتن ضریب شکست بیشتر از تار نوری می‌توانند در تارهای نوری سونش داده شده به عنوان عامل ارتقاء دهنده خاصیت حسگری به کار برده شوند. بر این اساس اخیراً حسگرهای نوری جدیدی بر پایه رشد نانوساختارها روی تار نوری به منظور تشخیص گازها، اندازه‌گیری دما، فشار و همچنین در بیو حسگرهای نوری بررسی شده‌اند [۱۱]. گروه لئو گزارشی در مورد ساخت حسگر رطوبت بر مبنای رشد نانومیله‌های ZnO روی تار نوری منتشر کرده‌اند. در این مقاله به افزایش حساسیت حسگر در اثر برهم‌کنش نور با نانوساختار و تغییر ضریب شکست محیط اطراف تار نوری هنگام اعمال رطوبت اشاره شده

مواد و روش آزمایش

تار نوری به‌کار برده شده در این مقاله تار نوری مخابراتی مولتی‌مود با قطر هسته ۵۰ میکرون و ضخامت غلاف ۱۲۵ میکرون و از جنس سیلیکا می‌باشد. ابتدا روکش پلیمری محافظ تار نوری توسط استریپر برداشته شد. در مرحله بعد با اسید هیدروفلوریک ۲۰٪ سونش داده شد و به ضخامت ۶۰ میکرون رسید. نمودار آهنگ سونش تار نوری در دمای محیط توسط اسید هیدروفلوریک ۲۰٪ در شکل ۱ رسم شده است. سپس توسط استات روی دو آب [CH₃COO) Zn*2H₂O] و هیدروکسید سدیم [NaOH] دانه‌گذاری گردید [۱۲]. در مرحله بعدی به‌روش آبی-حرارتی رشد نانومیل‌های ZnO روی تار نوری توسط محلول رشد حاوی نیترات روی شش آب [N₂O₆ Zn*6H₂O] و هگزا متیلن تترامین [C₆H₁₂N₄] انجام گردید. تمام مواد استفاده شده در مراحل دانه‌گذاری و رشد از شرکت مرک آلمان خریداری شده است.



شکل ۱. نمودار سونش تار نوری مولتی‌مد در دمای محیط توسط اسید هیدروفلوریک ۲۰٪.

دانه‌گذاری

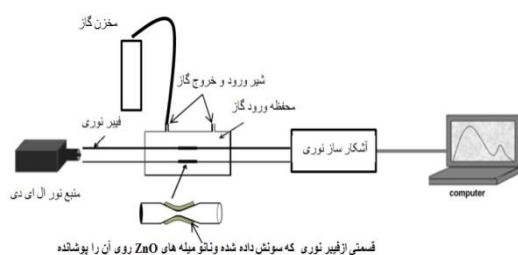
نانوذرات ZnO که در مرحله دانه‌گذاری استفاده می‌شوند از ترکیب استات روی دو آب [Zn*2H₂O] و هیدروکسید سدیم [(CH₃COO)₂NaOH]

به‌دست آمده‌اند. ابتدا ۷۰ سی‌سی محلول ۰/۰۱ مولار استات روی دوآبه در متانول تهیه گردید و به‌وسیله همزن مغناطیسی تا دمای ۶۰ درجه هم‌زده شد، سپس ۳۵ سی‌سی محلول ۰/۰۱ مولار هیدرواکسید سدیم در متانول به آرامی به محلول استات روی اضافه گردید، در انتها یک محلول بی‌رنگ به‌دست آمد. در این مرحله نانوذراتی با قطر کمتر از ۱۰۰ نانومتر ساخته شد. دانه‌گذاری روی تار نوری توسط محلول حاصل انجام گردید، تارهای نوری به آرامی در محلول قرار گرفته و با دقت و به‌گونه یکنواخت از محلول بیرون آورده شدند. که منجر به قرارگیری ذراتی با اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر شده، این ذرات تأثیر به‌سزایی در جهت رشد و انبوهی نانومیل‌ها دارند، به‌گونه‌ای که ذرات ZnO که در محلول رشد شکل می‌گیرند با احتمال بیشتر روی دانه‌های ZnO رسوب می‌کنند و قطر نانومیل‌ها تقریباً به اندازه قطر دانه‌های ZnO می‌باشد [۱۵].

رشد آبی-حرارتی نانومیل‌های ZnO روی

تار نوری

به‌منظور ساخت نانومیل‌های ZnO، ۱۰۰ سی‌سی محلول آبی با غلظت‌های برابر ۰/۰۱ مولار از نیترات روی شش آب [N₂O₆ Zn*6 H₂O] و هگزا متیلن تترامین [C₆H₁₂N₄] (مرسوم‌ترین نسبت برای رشد نانومیل‌های عمودی) استفاده گردیده است [۱۶]. نیترات روی شش آب منبع تأمین یون‌های Zn²⁺ و هگزا متیلن تترامین منبع تولید یون‌های OH⁻ می‌باشد با ترکیب این دو ماده یون‌های Zn(OH)⁺، Zn(OH)₂ یا Zn(OH)₃⁻ با فراوانی وابسته به پارامترهایی نظیر غلظت Zn²⁺ و مقدار pH، به‌وجود می‌آید. مکانیزم شکل‌گیری ZnO در روابط زیر نشان داده شده است [۱۷-۱۸].

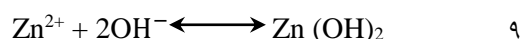
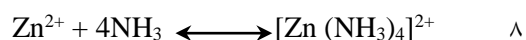
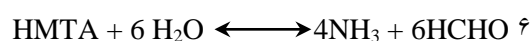
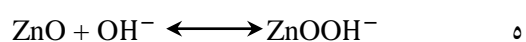
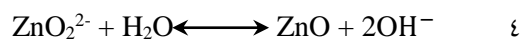
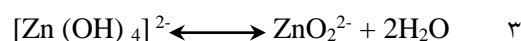
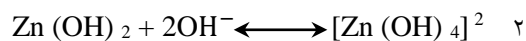
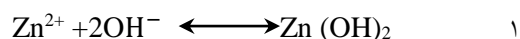


شکل ۲. چیدمان آزمایش برای مشاهده امکان رطوبت سنجی توسط حسگر تارنوری سونش یافته که روی آن نانومیله های ZnO رشد داده شده است.

تار نوری بر مبنای بازتاب کلی که درون آن روی می دهد نور ورودی را انتقال می دهد البته تمام نوری که وارد فیبر شده به انتهای دیگر آن منتقل نمی شود مقداری از نور که به قسمت غلاف فیبر نفوذ می کند که پرتوهای محو شونده نامیده می شوند. ضریب شکست نانومیله های ZnO بیش از ضریب شکست تار نوری می باشد، بنابراین امکان نفوذ نور محیط بیرون از غلاف تار نوری و برهم کنش با محیط اطراف غلاف فراهم می گردد. در نتیجه از نظر تئوری با رشد نانوساختارهای مناسب می توان حسگرهای نوری با حساسیت بالا طراحی کرد. در مرحله دیگر، اثر برهم کنش نور با نانومیله های ZnO و تغییر ضریب شکست محیط اطراف فیبر در هنگام اعمال گاز، شدت نور خروجی تغییر کرده و مقدار آن ممکن است کم و یا زیاد شود و در نهایت تغییرات آن توسط آشکار ساز نوری ثبت می شود.

مشخصه یابی

الگوی پراش اشعه ایکس نانومیله های ZnO رشد داده شده بر روی تارنوری توسط دستگاه XRD مدل (X' Pert Pro PANalytical) با آند مس و طول موج 1.54 \AA مورد مطالعه قرار گرفت (شکل ۲). اندازه، ریخت و انبوهی نانومیله ها توسط میکروسکوپ الکترونی (SEM) مدل WEGA3 ESCAN بررسی گردید. همچنین عملکرد حسگر یک بار توسط لیزر

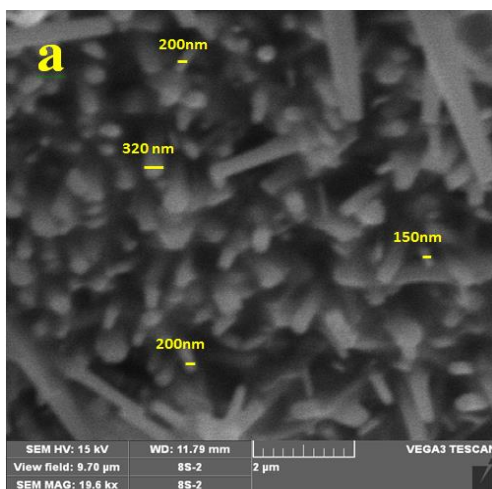
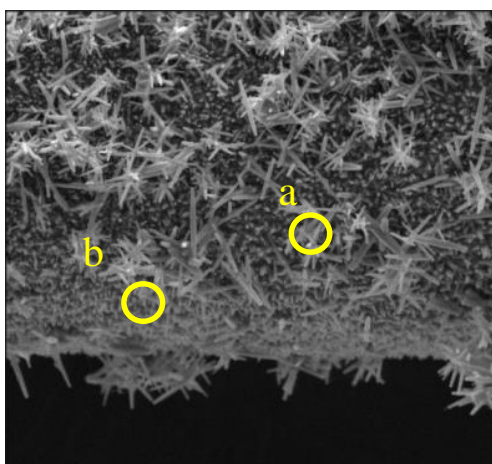


محلول رشد در ظرف آبی-حرارتی ریخته شد و تارهای نوری دانه گذاری شده در وضعیت مناسب در ظرف قرار گرفتند. محلول حاصل در آن در دمای 90°C به مدت ۵ ساعت قرار داده شد. در طی این مدت تمام مواد اولیه مصرف شده و حالت چسبندگی مناسب نانومیله های ZnO به تار نوری ایجاد می گردد. تارهای نوری بعد از رشد از محلول بیرون آورده شده و توسط آب دوبار یونیزه شسته شدند تا نمک های قرار گرفته روی نانومیله ها به کلی حذف شوند، سپس در دمای محیط خشک گردیدند.

چیدمان آزمایش

همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است نور از یک سر تار نوری مولتی مود وارد شده و بعد از برهم کنش با نانومیله های ZnO از انتهای دیگر فیبر خارج می شود و تغییرات شدت نور خروجی توسط آشکار ساز نوری ثبت می گردد.

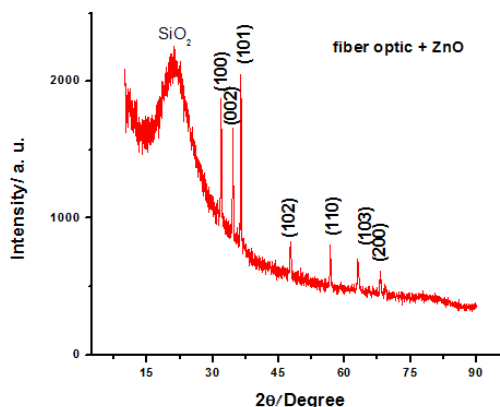
شرایط واکنش حاصل می‌گردد، یکی از موارد بهینه‌سازی دانه‌گذاری اولیه است. در صورتی که دانه‌گذاری انجام شده باشد، احتمال رشد ذرات ایجاد شده در محلول روی محل دانه‌ها بیشتر می‌گردد، همچنین نانومیله‌هایی با قطر مشابه دانه‌ها ایجاد می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد دو نوع ساختار ایجاد شده است نخست ساختارهایی که روی دانه‌ها به وجود آمده‌اند با قطر ۱۵۰-۲۵۰ نانومتر و طول ۱-۲ میکرومتر و دوم میکروساختارهایی با قطر ۵۰۰ نانومتر-۱٫۵ میکرومتر و طول ۵ تا ۷ میکرومتر که روی ساختار اولیه، و در غیاب مکان‌های جوانه‌زنی (دانه‌های اولیه) رشد کرده‌اند.



هلیوم-نئون و بار دیگر توسط منبع نور سفید رنگ ثبت شده و با هم مقایسه گردید.

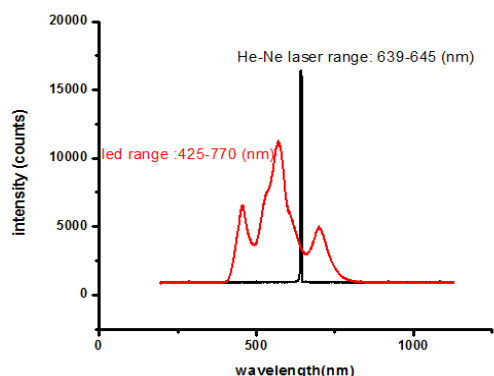
نتایج و بحث

نتایج حاصل از پراش اشعه ایکس نشان از تشکیل فاز ZnO با ساختار ورتسایت و رشد ترجیحی در جهت (۱۰۱) را داشت، که در تطابق کامل با کارت شماره ۰۱٫۰۷۵٫۰۵۷۶ بود (شکل ۳). اندازه بلورک‌ها از رابطه شرر محاسبه گردید و تقریباً ۴۵ نانومتر به دست آمد.

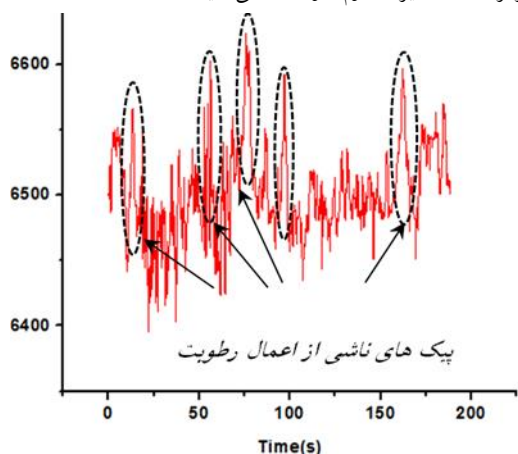


شکل ۳. الگوی پراش اشعه ایکس نانومیله‌های ZnO

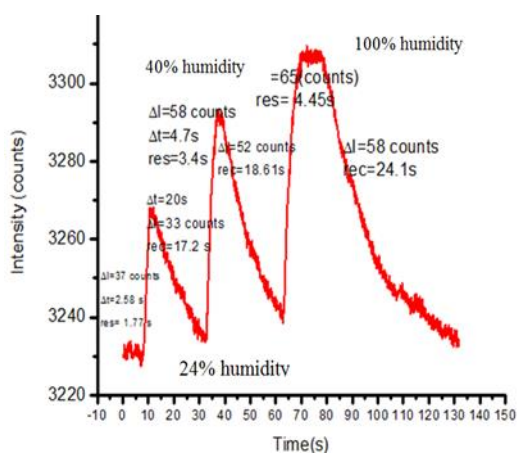
شکل ۴ تصویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی می‌باشد که نشان دهنده رشد یکنواخت و بسیار انبوه نانومیله‌های ZnO روی تار نوری مولتی مود سونش یافته، می‌باشد. رشد انبوه نانومیله‌ها در سرتاسر فیبر بیانگر دقت و کیفیت رشد می‌باشد. رشد روی زیر لایه‌های استوانه‌ای در مقالات محدودی گزارش شده است که در آنها از امکانات و مواد گران برای تثبیت ذرات دانه‌گذاری شده روی فیبر استفاده شده است [۱۹]. ولی در این مقاله از هیچ ماده گران و یا امکانات خاصی استفاده نشده است. انجام رشد یکنواخت در فاز محلول (روش آبی-حرارتی) نیازمند دقت و کنترل دما، ارتفاع محلول و نحوه قرارگیری تار نوری در محلول می‌باشد که با آزمون و خطای بسیار و بهینه‌سازی



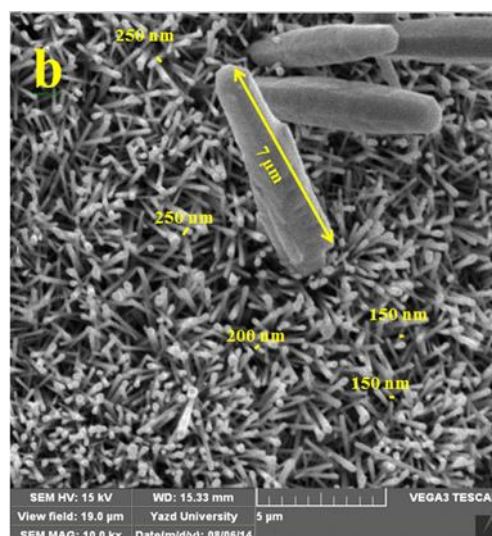
شکل ۵. گستره طول موج‌های مربوط به منبع نور LED (منحنی قرمز رنگ) و لیزر هلیوم-نئون (منحنی سیاه رنگ)



شکل ۶. نمودار تغییرات شدت نور با گذشت زمان در اثر اعمال رطوبت با درصدهای مختلف هنگامی که منبع نور لیزر هلیوم-نئون اعمال شده است.



شکل ۷. نمودار تغییرات شدت نور با گذشت زمان در اثر اعمال رطوبت با درصدهای مختلف (پیک اول ۲۴٪، پیک دوم ۴۰٪، پیک سوم ۱۰۰٪ رطوبت) هنگامی که منبع نور LED سفید بوده است.

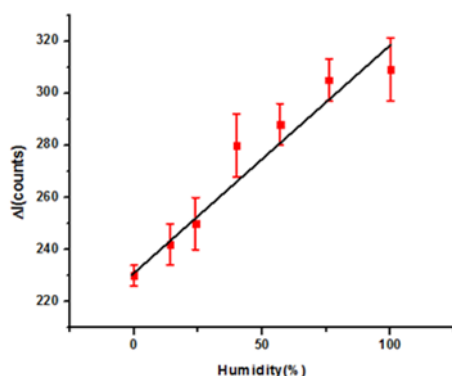


شکل ۸. تصویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی نشان دهنده سطح تار نوری است که روی آن ZnO با قطر ۱۵۰-۳۲۰ نانومتر (با اکثریت ۲۰۰ نانومتر) و طول ۱ میکرون و میکرومیله‌های ZnO رشد داده شده‌اند: شکل a و b: بزرگ‌نمایی بخش‌هایی از تار نوری، که روی آن نانو/میکرو میله‌های ZnO رشد داده شده‌اند.

در شکل ۵ نمودار محدوده طول موجی نور لیزر و نور LED نشان داده شده است. رطوبت با درصدهای مختلف به تار نوری اعمال گردید، و فرآیند رطوبت‌سنجی با تغییر شدت نور خروجی توسط آشکار ساز نوری ثبت گردید. درصد رطوبت اعمال شده توسط حسگر تجاری اندازه‌گیری شده است، در شکل ۶ تغییرات شدت نور با گذشت زمان در هنگام ورود رطوبت به محفظه با درصدهای مختلف نشان داده شده است که توسط لیزر هلیوم-نئون مورد مطالعه قرار گرفته و همان‌طور که مشاهده می‌شود شدت ناشی از نوسانات نور لیزر به حدی است که تغییرات شدت نور ناشی از اعمال رطوبت به سختی قابل تشخیص می‌باشد، ولی هنگامی که از منبع نور LED استفاده شده است نوسان ناشی از منبع نور بسیار کاهش یافته و تغییرات شدت نور ناشی از اعمال رطوبت به‌وضوح خود را نشان می‌دهد (شکل ۷).

رطوبت در سه مرحله و با درصدهای مختلف به تار نوری اعمال شده است. نمودار حاصل بیانگر مدت زمان پاسخ دهی ۱/۷ تا ۴/۵ ثانیه و زمان بازگشت پذیری ۱۷ تا ۲۴ ثانیه می‌باشد (زمان پاسخ/بازگشت پذیری: مدت زمانی که شدت نور خروجی از ۱۰ درصد به ۹۰ درصد بیشینه خود می‌رسد و بالعکس [۲۳]) که با تغییر درصد رطوبت از ۲۴ تا ۱۰۰ تغییر می‌کند. زمان‌های ثبت شده پاسخ و زمان بازگشت پذیری نسبت به حسگرهای الکتریکی گزارش شده، که در حد چند دقیقه می‌باشد، بسیار مناسب و قابل قبول است. لازم به ذکر است به دلیل اینکه رطوبت اعمال شده آهسته وارد محفظه می‌شد شدت نور آهسته همراه با آن تغییر می‌کرد و پاسخ‌دهی سیستم هم‌زمان با ورود رطوبت مشاهده گردید.

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود متناسب با میزان درصد رطوبت اعمال شده شدت نور تغییر کرده است. میزان افزایش و درصد شدت نور خروجی بستگی به نحوه رشد ساختارهای اکسید روی و میزان رطوبت اعمال شده دارد. با افزایش درصد رطوبت شدت نور خروجی نیز متناظر با آن به صورت خطی افزایش یافته است.



شکل ۸. نمودار تغییرات شدت نور خروجی بر حسب تغییر درصد رطوبت.

دلیل این بهبود عملکرد می‌تواند احتمالاً ناشی از این موارد باشد: الف) واگرایی نور LED نسبت به نور لیزر هلیوم-نئون ب) گستره فرکانسی بیشتر نور LED نسبت به نور لیزر (شکل ۵، ج) یکنواختی شدت نور منبع LED نسبت به نور لیزر. بر اساس مراحل ارائه شده رشد آبی-حرارتی نانومیله‌های اکسید روی روی تار نوری، این نانوساختار به نوعی لایه خارجی غلاف فیبر تبدیل شده، به طوری که همراه با دیگر نواحی فیبر (یعنی هسته و غلاف سیلیکایی فیبر) در فرآیند انتقال نور شرکت می‌کند. کسری از پرتوهای نور که بدون لایه اکسید روی از غلاف سیلیکایی فیبر خارج می‌شدند، با حضور نانوساختار اکسید روی، به محیطی با ضریب شکست بالاتر، $n=1.9$ ، برخورد کرده و درون تار بازتاب می‌شود. تفاوت ضریب شکست این محیط نسبت به هوای اطراف (با $n=1$) سبب گیر افتادن نور در این ناحیه بر اساس اثر بازتابش داخلی کلی شده و منجر به انتقال نور بیشتری از محیط فیبر (پوشیده شده از نانومیله‌های اکسید روی) می‌شود. در واقع این لایه ساخته شده نشسته نور به خارج از فیبر را خیلی کمتر می‌کند. با اعمال رطوبت با ضریب شکست ۱/۳، هیدروژن موجود در مولکول آب با پیوند هیدروژنی با اکسیژن‌های موجود در ZnO ترکیب می‌شود. بنابراین ضریب شکست ماده و شرایط انتقال نور را تحت تأثیر قرار می‌دهد. پیوندهای ایجاد شده فرآیند بازتابش داخلی بهتری را فراهم می‌کنند و نوری که وارد این محیط شده با شدت بیشتری نسبت به حالت قبل از اعمال رطوبت به درون فیبر بازمی‌گردد. پس شدت نور خروجی هنگام اعمال رطوبت افزایش می‌یابد. در حضور برخی دیگر از انواع گازها بر مبنای ضریب شکست آنها، ممکن است شدت نور خروجی کاهش یا افزایش یابد. [۲۰-۲۲].

simple way of thermal evaporation, *Applied Physics Letters* 81 (2002) 757–759.

[6] H. Yuan, Y. Zhang, Preparation of well-aligned ZnO whiskers on glass substrate by atmospheric MOCVD, *Journal of Crystal Growth* 263 (2004) 119–124.

[7] Y.W. Heo, V. Varadarajan, M. Kaufman, K. Kim, D. P. Norton, F. Ren, P. H. Fleming, Site-specific growth of ZnO nanorods using catalysis-driven molecular-beam epitaxy, *Applied Physics Letters* 81 (2001) 3046–3048.

[8] Y. Sun, G.M. Fuge, M.N.R. Ashfold, Growth of aligned ZnO nanorod arrays by catalyst-free pulsed laser deposition methods, *Chemical Physics Letters* 396 (2004), 21–26.

[9] W.T. Chiou, W.Y. Wu, J.M. Ting, Growth of single crystal ZnO nanowires using sputter deposition, *Diamond and Related Materials* 12 (2003), 1841–1844.

[10] K. Govender, D.S. Boyle, P.B. Kenway, P. O'Brien, Understanding the factors that govern the deposition and morphology of thin films of ZnO from aqueous solution, *Journal of Materials Chemistry* 14 (2004) 2575–2591.

[11] W. James, R. Tatam, Fiber optic sensors with nano-structured coatings, *Journal of Optics A* 8 (2006)

[12] L. Yanjuan, Growth of well-arrayed ZnO nanorods on thinned silic fiber and application for humidity sensing, *Optical Society of America* 20 (2012).

[13] M. Konstantaki, An ethanol vapor detection probe based on a ZnO nanorod coated optical fiber LPG, *Optics Express* 20 (2012) 19404-1941.

[14] M. Batumalay, Z. Harith, H.A. Rafeie, F. Ahmad, M. Khasanah, S. W. Harun, R. M. Nor, and H. Ahmad, Tapered plastic optical fiber coated with ZnO nanostructures for the measurement of uric acid concentrations and changes in relative humidity, *Sensors and Actuators A Physical* 210 (2014) 190-196.

نتیجه گیری

در این تحقیق، ساخت و بهینه‌سازی یک حسگر نوری رطوبت با حساسیت بالا توسط رشد میکرو/نانومیله‌های ZnO به روش آبی-حرارتی روی تار نوری مورد بررسی قرار گرفت. با تغییری که با اعمال رطوبت در ضریب شکست محیط اطراف فیبر ایجاد می‌شد، شدت نور خروجی نیز به صورت خطی تغییر می‌کند. این تغییرات در این کار با بررسی رفتار عناصر به کار رفته در چیدمان حسگر بهینه‌سازی شد. بهبود عملکرد حسگر در اثر استفاده از منبع نور LED نسبت به لیزر هلیوم-نئون به وضوح نشان داده شد و مدت زمان پاسخ‌دهی ۱٫۷ تا ۴٫۵ ثانیه و زمان بازگشت‌پذیری ۱۷ تا ۲۴ ثانیه ثبت گردید.

سپاس‌گزاری

از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه‌های یاسوج و صنعتی مالک اشتر، به ترتیب به دلیل پشتیبانی مالی و حمایت به عمل آمده قدردانی می‌گردد.

مرجع‌ها

[1] P.H. Yeh, Z. Li, Z.L. Wang, Schottky-gated probe-free ZnO nanowire biosensor, *Advanced Materials* 21 (2009) 4975–4978.

[2] B. Weintraub, Y.G. Wei, Z.L. Wang, Optical fiber/ nanowire hybrid structures for efficient three-dimensional dye-sensitized solar cells, *Angew. Chemie International Edition* 48 (2009) 8981–8985.

[3] J. Anderson, J. Chris, G Van de Walle, Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor, *Reports on Progress in Physics* 72 (2009) 29

[4] R.A. Laudise, A.A. Ballman, Hydrothermal synthesis of zinc oxide and zinc sulfide, *The Journal of Physical Chemistry* 64 (1960) 688–691.

[5] B.D. Yao, Y.F. Chan, N. Wang, Formation of ZnO nanostructures by a

- [15] B. Sunandan, D. Joydeep, Effect of seeded substrates on hydrothermally grown ZnO nanorods, *Journal of Sol-Gel Technology* 50 (2009) 456-464.
- [16] B. Sunandan, D. Joydeep, Hydrothermal growth of ZnO nanostructures, *Science and Technology of Advanced Materials* 10 (2009)
- [17] L.N. Demianets, D.V. Kostomarov, Mechanism of zinc oxide single crystal growth under hydrothermal conditions, *Annales de Chimie Science des Matériaux* 26 (2001) 193-198.
- [18] M.N.R. Ashfold, R.P. Doherty, The kinetics of the hydrothermal growth of ZnO nanostructures, *Thin Solid Films* 515 (2007) 8679-8683.
- [19] J. Bae, M.K. Song, Fiber supercapacitors made of nanowire-fiber hybrid structures for wearable/flexible energy storage, *Angewandte Chemie International Edition* 50 (2011) 1683-1687.
- [20] M. El-Sherif, Lalitkumar Bnansal, Jianming Yuan, Fiber optic sensors for detection of toxic and biological threats, *sensors* 7 (2007) 3100-3118.
- [21] Anna. Og. Dikovska, P.A. Atanasov, A.Ts. Andreev, B.S. Zafirova, E.I. Karakoleva, T.R. Stoyanchov, ZnO thin film on the side polished optical fiber for gas sensing applications, *Applied surface science* 254 (2007) 1087-1090.
- [22] T.L. Yeo, T. Sun, K.T.V. Grattan, Fiber-optic sensor technologies for humidity and moisture measurement, *Sensors and actuators A* 144 (2008) 208-295
- [23] Y. Shizhuo, B.R. Paul, T.S. Yu Francis, Fiber optic sensors, *CRC Press New York* (2008).

Optical humidity sensor design and manufacturing based on the growth of micro/nano rods of ZnO on the etched fiber

**Saeed Azad¹, Roghayeh Parvizi^{1,*}, Azar Dokht Mazaheri², Mohammad Hasan Yousefi³,
Ebrahim Sadeghi¹**

¹Department of Physics, College of Sciences, Yasouj University, Yasouj, Iran

²Optic and Laser Research Center, University Institute of Applied Science, Isfahan, Iran

³Nano Physics Department, University Institute of Applied Science, Isfahan, Iran

Abstract

In this research, a cheap and high sensitive humidity optical sensor was made by the growth of micro and nano rods of ZnO on the fiber optic using hydrothermal method. Fiber optic sensors which are designed on the basis of evanescent waves covered with nanostructures would improve sensitivity of sensors significantly. Condensed and uniform Micro/nano rods of ZnO were grown on the fiber optic. By exerting humidity, the refractive index around the fiber would change which leads to the variation in the output light intensity. Variation of light intensity which corresponds to the concentration of the humidity is recorded by optical detector. Response and recover time of sensor was measured and observed that the ability of sensing is at an acceptable level (100%-10%). Additionally, the effect of laser and white LED light sources on the sensor sensitivity was studied. Structure and morphology of ZnO nano rods were studied by X-ray diffraction and scanning electron microscope analysis.

Keywords: Fiber optic sensor, ZnO nanorod, Humidity sensor, Etched fiber optic, Hydrothermal