

مقاله پژوهشی

سال بیست و نهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۰، از صفحه ۵۰۵ تا ۵۱۸

ویژگی‌های ساختاری، اپتیکی و الکتریکی نانوکامپوزیت‌های ZnO/CuO

مونا مهربانی^{*}، مرتضی ایزدی فرد^{*}، محمد ابراهیم قاضی

دانشکده فیزیک و مهندسی هسته‌ای، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

(دریافت مقاله: ۹۹/۷/۵، نسخه نهایی: ۹۹/۸/۲۸)

چکیده: در این کار، نانوکامپوزیت‌های ZnO/CuO به روش‌های نهشت بخار شیمیایی (CVD)، نهشت بخار فیزیکی (PV) و کندوپاش بسامد رادیویی بر زیرلایه‌های سیلیکونی (Si) سنتز شده و سپس ویژگی‌های ساختاری، اپتیکی و الکتریکی آن‌ها بررسی گردید. بررسی طرح‌های پرتوی X نمونه‌ها تشکیل فاز مخلوط شش‌گوشی اکسیدروی (ZnO) و فاز تک میلی اکسیدمس (CuO) و در نتیجه کامپوزیت ZnO/CuO تهیه شده به همه روش‌ها را تأیید کرد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی اثر میدانی (FESEM) نشان داد که ریختار کامپوزیت تهیه شده به روش CVD متفاوت از دو روش PV و کندوپاش بوده و شامل نانو رشته‌هایی با قطر متوسط ۴۰۰ nm است. بررسی‌های اپتیکی کامپوزیتها نشان داد که گاف نواری آن‌ها در گستره ۲۱۸ eV - ۲۰۵ eV قرار دارد که بزرگ‌تر از گاف نواری اکسید مس (۱/۲ eV) و کوچک‌تر از گاف نواری اکسیدروی (۳/۳ eV) است. همچنین کامپوزیت‌های سنتز شده به روش‌های CVD و PV به ترتیب دارای کمترین و بیشترین بازنابندگی در گستره نور مرئی و نزدیک قرمز هستند. براساس طیف نورتابی (PL) کامپوزیت تهیه شده به روش PV در دمای اتاق، این نمونه دارای قله‌های نشری با شدت نسبی قابل توجه در گستره فرابنفش و مرئی است. بررسی‌های الکتریکی نمونه‌ها نیز نشان داد که کامپوزیت ZnO/CuO سنتز شده به روش کندوپاش دارای کمترین مقاومت الکتریکی و کامپوزیت سنتز شده به روش CVD دارای بیشترین مقاومت الکتریکی هستند. بررسی پاسخ نوری کامپوزیت‌ها نیز آشکار شد که نمونه ZnO تهیه شده به روش PV و نانوکامپوزیت ZnO/CuO تهیه شده به روش کندوپاش دارای بیشترین پاسخ نوری هستند. براساس نتایج این پژوهش، بهطور کلی ویژگی‌های ساختاری و اپتیکی و الکتریکی و همچنین ریختار نانوکامپوزیت‌های ZnO/CuO به طور قابل ملاحظه‌ای به روش سنتز آن‌ها بستگی دارد.

واژه‌های کلیدی: نانوکامپوزیت ZnO/CuO ؛ کندوپاش؛ نهشت بخار فیزیکی؛ نهشت بخار شیمیایی؛ ویژگی‌های اپتیکی؛ ویژگی‌های الکتریکی؛ ویژگی‌های ساختاری.

چشمی داشته است. در گذشته، ZnO به عنوان رقیق کننده رنگ‌های روغنی و برای بالا بردن کیفیت کاغذها نیز به کار می‌رفته است. بررسی ویژگی‌های اکسیدروی به عنوان ماده‌ای کاربردی از سال ۱۹۳۵ میلادی با شروع رشد مواد نیمرسانا آغاز شده است [۱۰]. پژوهش‌ها در این زمینه از سال ۱۹۹۰ به اوج خود رسید. ZnO یک ترکیب نیمرسانای غیرآلی نوع n با بستگی اکسیتونی بالا [۱۱]، پودری سفید رنگ است که در آب و الكل حل نمی‌شود. اکسید روی به روش‌های

مقدمه در دهه‌های اخیر، ساخت نانو ساختارهای بر پایه اکسیدهای فلزی چون اکسیدروی (ZnO) به عنوان مواد جدید در ساخت و تهیه ابزاری مانند حسگرهای گازی، مولدهیدروژنی، سلول-های خورشیدی، دیودهای لیزری، دیودهای نورگسیل (LED) و کاتالیزورهای نوری [۹-۱۰] بسیار مورد توجه بوده است. توتیا که امروزه با نام اکسیدروی در ساخت برخی شامپوها و پودرهای بچه استفاده می‌شود، در قدیم نیز کاربردهای فراوانی از جمله در تهیه فلز برنج و یا سرمه برای تقویت چشم و بیماری‌های

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۲۶۷۳۲۶۰۱، نامبر: ۰۲۳۳۲۳۹۵۲۷۰، پست الکترونیکی: mizadifard@shahroodut.ac.ir

اکسیدهای فلزی چون ZnO/CuO بهدلیل تخریب فوتوکاتالیزوری بالا و عدم آلودگی محیط برای تصفیه آلودگی-های آب اهمیت سیاری دارند [۱۷]. ترکیب ZnO با نیمرسانایی با گاف نواری متفاوت چون CuO تشکیل پیوندگاه نامتجانس p-n و افزایش جدایش الکترون و حفره (کاهش آهنگ بازترکیب) می‌تواند باعث افزایش جذب فوتونی و فعالیت فوتوکاتالیزوری در مقایسه با هریک از ترکیب‌های ZnO و یا CuO شود [۱۸، ۱۹]. کامپوزیت‌هایی که از ترکیب نیمرسانایی با گاف نواری بزرگ (مانند $ZnOZnO$) و گاف نواری باریک (مانند $CuOCuO$) شکل می‌گیرند می‌توانند افرون بر کاهش گاف نواری (نسب به گاف نواری بزرگتر)، باعث افزایش جذب نور خورشید شده و در نتیجه به طور موثرتری در سلول‌های خورشیدی استفاده شوند [۲۰]. بررسی‌های اخیر نشان داده‌اند که کامپوزیت ZnO/CuO در مقایسه با نیمرسانای ZnO خواص حسگری گازی بهتری نشان می‌دهد [۲۱]. در این پژوهش، کامپوزیت‌های ZnO/CuO به سه روش متفاوت نهشت فیزیکی بخار (PVD)، نهشت شیمیایی بخار (CVD) و کندوپاش بر زیرلايه‌های سیلیکونی تهیه شدند و ویژگی‌های ساختاری، ریختاری، اپتیکی و الکتریکی آن‌ها با استفاده از روش‌های مشخصه یابی مناسب بررسی گردید.

بخش آزمایشگاهی

سترنز نانو کامپوزیت ZnO/CuO

روش نهشت بخار شیمیایی

نهشت بخار شیمیایی از روش‌هایی است که به طور نسبی پیشرفت‌های سیاری داشته است. در این روش، یک ماده جامد از واکنش شیمیایی در فاز بخار یا بر سطح یک زیرلايه به وجود می‌آید. در ساده‌ترین حالت این روش، با ورود گاز یا گازهای محافظه دستگاه واکنش‌های شیمیایی روی (یا در نزدیکی) سطوح داغ رخ می‌دهند و در نتیجه یک لایه نازک بر سطح زیرلايه رسوب می‌کند. واکنش دهنده که معمول به آن‌ها گازهای پیش ماده گفته می‌شود در دمای مناسب و داغ شدن محفوظه، اغلب از یک گاز خنثی مثل آرگون (Ar) به عنوان رقیق کننده (حامل) استفاده می‌شود. سرانجام می‌توان گفت که CVD یک نام عمومی برای گروهی از فرآیندهاست که باعث ایجاد یک لایه نازک توسط واکنش شیمیایی بر زیرلايه می‌شود [۲۲، ۲۳].

در این کار، پیش از فرایند رشد، نخست زیرلايه‌های مورد استفاده برای از بین بردن چربی و ناخالصی‌های احتمالی از سطح آن‌ها شسته شدند. برای این منظور، نخست زیرلايه‌های

مرسوم چون نهشت بخار شیمیایی، سل-ژل و تجزیه گرمایی افشاره ای^۱ به سادگی تهیه می‌شود. اکسیدروی بسیار پایدار است بهطوری که در دمای حدود $1975^{\circ}C$ به بخارروی و اکسیژن تبدیل می‌شود. اتم Zn دارای عدد اتمی ۳۰ است و اکسیژن با عدد اتمی ۸ الکترونگاتیوی بالاتری نسبت به Zn دارد، که این باعث جذب الکترون‌های ظرفیت Zn به سمت اکسیژن می‌شود. اکسیدروی با توجه به فرایند سنتز ممکن است با ریختارهای مختلفی چون نانو سیم‌ها، نانو میله‌ها، نانو لوله‌ها و نانو صفحه‌ها ظاهر شود. پژوهش‌های انجام شده پیرامون اکسیدروی وجود سه ساختار بلوری متفاوت ورتسایت، بلندروی^۲ و سنگ نمک را برای این ماده نشان داده‌اند که از میان آن‌ها، ساختار ورتسایت، ساختار پایدار اکسیدروی در دما و فشارهای معمولی است [۱۰، ۹]. این شبکه از دو زیرشبکه از یون‌های Zn^{2+} و O^{2-} تشکیل شده که یون‌های Zn با یون‌های O و برعکس در بر گرفته می‌شوند. ZnO در ابعاد نانو یک نیمرسانای شفاف با درخشندگی بالاست. ZnO دارای رسانندگی نوع n بوده و بدليل سازگاری با محیط زیست یک کاتالیزور نوری نیمرسانا است که به طور گسترده در صنایع مختلف استفاده می‌شود. پژوهش‌های اخیر می‌دهند که پوشاندن سطح نانو ساختارهای اکسیدروی با یک نیمرسانای مناسب دیگر می‌تواند منجر به تولید کامپوزیتی با ویژگی‌های بهبود یافته نسبت به اکسیدرس، اکسیدمس (CuO) با داشتن ویژگی‌های کاربردی قابل توجه انتخاب مناسب برای این منظور است [۱۴، ۱۳، ۹]. CuO که اغلب به صورت پودری قرمز رنگ یافت می‌شود یک نیمرسانای مستقیم نوع p بوده که در شرایط معمولی دارای ساختار بلوری تک میلی است و در گروه اکسیدهای فلزی واسط قرار دارد. بدليل ویژگی‌های جالب توجه CuO از جمله گاف نواری باریک (حدود $1/2\text{ eV}$ در دمای اتاق)، ضریب جذب نوری بالا، رسانش الکتریکی و گرمایی بالا، پایداری بالا و فعالیت ضد میکروبی، این ترکیب یک گزینه بسیار مناسب برای استفاده در زمینه‌های مختلف فناوری چون حسگرهای گازی، سلول‌های خورشیدی، وسایل ضبط مغناطیسی، ابزار اپتوالکترونیکی و کاتالیزورهاست [۱۵]. CuO را می‌توان به روش‌های مختلفی چون CuO روش الکتروشیمیایی، سل-ژل، رسوب فیزیکی، تبخیر گرمایی و کندوپاش تهیه کرد [۱۶]. به طور کلی، نانو کامپوزیت‌های شامل

1- Spray heat treatment

2- Zincblende

روش بیان شده شسته داده شدن. سپس نانوساختارهای اکسیدروی به روش PVD با قرار دادن $50\text{ }\mu\text{m}$ قرص Zn در قایق دستگاه زیر خلاً با فشار 10^{-4} Torr و اعمال جریان 240 A بر زیرلایه‌های سیلیکونی رشد داده شدن. لایه‌های نهشته شده در یک کوره استوانه‌ای به مدت ۳ ساعت در دمای 500°C در جو گاز اکسیژن با نرخ شارش 50 sccm بازپخت شدند. به این ترتیب انتظار می‌رفت که یک لایه ZnO بر زیرلایه سیلیکونی به ضخامت حدود 300 nm تشکیل شده باشد. در ادامه کار، با قرار دادن $20\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$ و اعمال جریان A تبخیر گرمایی زیر خلاً 10^{-4} Torr در قایق دستگاه $153\text{ }^\circ\text{C}$ ، یک لایه Cu بر لایه‌های ZnO تهیه شده لایه نشانی شد. نمونه‌های ZnO/Cu بدست آمده دوباره در یک کوره استوانه‌ای زیر خلاً به مدت ۱ ساعت در دمای 400°C در جو گازهای آرگون (Ar) با نرخ شارش 135 sccm و اکسیژن با نرخ شارش 20 sccm قرار داده شدن تا سرانجام لایه‌های کامپوزیتی ZnO/CuO تشکیل شوند.

روش کندوپاش

لایه نشانی بروش کندوپاش یک روش لایه‌نشانی از بالا به پایین و به طور ذاتی یک روش پوشش‌دهی در خلاً است. در عمل ماده مورد نظر برای لایه نشانی (ماده هدف) در مقابل زیرلایه در یک فشار اولیه قرار می‌گیرد. معمول‌ترین شیوه تامین یون، عبور مداوم گازی چون آرگون است که فشار را به $1\text{ - }100$ تور افزایش داده و باعث تشکیل پلاسمما می‌شود. در اینکار پتانسیل منفی بین $0\text{ - }5\text{ kV}$ تا 5 kV ولت به هدف اعمال می‌شود. یون‌های ستادبار انرژی جنبشی بالایی دارند به طوری که رسیدن به این سطح انرژی با گرمادهی به نمونه امکان پذیر نیست. افزون بر این، به لایه ایجاد شده ذرات مختلف اما کم انرژی مثل اتم‌های هدف و یون‌های برگشتی گاز آلاینده برخورد می‌کنند.

در لایه نشانی به روش فیزیکی کندوپاش امواج رادیویی (RF) نیز از زیرلایه‌های سیلیکونی استفاده شد که نخست به همان روش پیشین شسته شدن. سپس لایه نشانی به روش کندوپاش با استفاده از ماده هدف ZnO انجام شد. در این روش فاصله زیرلایه تا هدف 7 cm ، فشار خلاً در محفظه کندوپاش 10^{-4} Torr ، $133\times 10^{-5}\text{ Torr}$ ، توان کندوپاش 100 W و فشار کاری برابر با 10^{-5} Torr استخاب شدند. کندوپاش در حضور گاز آرگون (Ar) با نرخ شارش 15 sccm انجام شد که طی آن لایه نازکی به ضخامت حدود 297 nm از ZnO بر زیرلایه‌های سیلیکونی تشکیل گردید. در مرحله بعد با استفاده از هدف

سیلیکونی (Si) نوع n با راستای بلوری (۱۰۰) به مدت 10 min دقیقه در محلول آب و اتانول در حمام فرماحتی قرار داده شدن. پس از آبکشی با آب مقطر، سیلیکون‌ها به مدت ۲ دقیقه در اسید هیدروفلوئوریک (HF) رقیق شده غوطه‌ور شده و پس از آبکشی دوباره با آب مقطر، در محلول اسید نیتریک (HNO_3) و آب مقطر به مدت ۲ دقیقه جوشانیده شدن. سرانجام پس از آبکشی پایانی، خشک شدن. به قطر 7 cm و طول 120 cm برای رشد نمونه‌ها، 2 g پودر روی خالص (از مرک با خلوص 99.99%) درون بوته‌ای از جنس آلومینا ریخته شد و در مرکز کوره استوانه‌ای قرار داده شد. فاصله بوته از زیرلایه در حالت بهینه 16 cm انتخاب شد و از گاز آرگون (Ar) خالص به عنوان گاز حامل و از اکسیژن خالص به عنوان گاز واکنش دهنده استفاده گردید. فشار محفظه طی فرایند لایه نشانی 10^{-4} Torr بود و دمای محفظه با نرخ گرمایی 135 sccm به دمای 800°C رسانیده شد. نرخ شارش گاز اکسیژن به درون محفظه راکتور واکنش 20 sccm و مدت زمان لایه نشانی 80 min دقیقه انتخاب شد به این ترتیب، یک لایه سفید یا شیری رنگ از ZnO به ضخامت حدود $5\text{ }\mu\text{m}$ میکرون روی سطح زیرلایه نهشته شد. در مرحله بعد، یک لایه مس (Cu) به روش کندوپاش در فشار کاری 10^{-3} Torr با نرخ شارش $10\times 3\times 7.2\text{ sccm}$ گاز آرگون برابر با 15 sccm به مدت 10 min تبخیر شد. سپس، نمونه 20 sccm گاز آرگون و شارش 135 sccm اکسیژن در دمای 400°C به مدت یک ساعت بازپخت شد تا سرانجام کامپوزیت ZnO/CuO تشکیل شود.

روش نهشت بخار فیزیکی

برای ایجاد پوشش‌هایی با کیفیت بالا از روش‌های لایه نشانی در خلاً لایه نشانی بخار فیزیکی (PVD) می‌توان استفاده کرد. از جمله اشاره کرد که تبخیر گرمایی بر پایه مقاومت الکتریکی از انواع روش‌های PVD است. در این نوع لایه‌نشانی، با اعمال جریان بالایی به قایق در بردارنده ماده هدف در خلاً قایق تا دمای $2000\text{ - }1000$ درجه سانتیگراد گرم شده و ماده اصلی تبخیر می‌شود. اختلاف فشار میان محلی که ماده منبع و زیرلایه می‌گردد. برای تبخیر گرمایی موثر باید فشار بخار ماده زیرلایه می‌گردد. برای تبخیر گرمایی موثر باید فشار بخار ماده منبع در دمای قایق مقدار قابل قبولی باشد [۲۴]. در این کار نیز از زیرلایه‌های سیلیکونی معرفی شده در بخش ۱-۱-۲ استفاده شد و پیش از شروع فرایند رشد، زیر لایه‌ها مانند

استاندارد ۱۴۵۱-۳۶، تشکیل ساختار تکمیلی اکسید مس (کارت استاندارد ۰۶۱-۰۵) را نیز تایید می‌کنند [۲۵-۲۷]. بنابراین ساختارهای ZnO و نانوکامپوزیت‌های ZnO/CuO به روشهای مختلف شکل گرفته‌اند. همچنین در الگوی XRD نمونه‌ها قله‌های کوچک پراش مربوط به فاز ناخالصی SiO_2 نیز دیده می‌شود که ممکن است مربوط به زیرلایه‌های سیلیکونی استفاده شده باشند. با استفاده از رابطه ویلیامسون-هال:

$$\beta \cos \theta = \frac{0.9\lambda}{D} + 4\varepsilon \sin \theta \quad (1)$$

و با رسم منحنی $\frac{\beta \cos \theta}{\sin \theta}$ و بازش خطی آنها، اندازه متوسط بلورک‌ها (D) و کرنش میکروسکوپی در شبکه بلوری (E) کامپوزیت‌های سنتز شده محاسبه شدن [۲۸، ۲۹]. (شکل ۲).

در رابطه (۱) β پهنای قله پراش در نیم شدت بیشینه و طول موج پرتوی X مورد استفاده $1,540.4 \text{ \AA}$ (۱۰۰۲) هستند. در رسم نمودارهای ویلیامسون-هال برای کامپوزیت تهیه شده به روش CVD بر پایه از قله‌های پراش (۱۰۰)، (۰۰۲)، (۰۰۴) و (۰۰۶) برای فاز ZnO و (۱۱۰)، (۰۰۲)، (۰۰۰) و (۰۰۴) برای PVD CuO رسم شدند. برای کامپوزیت تهیه شده به روش PVD نیز از قله‌های پراش (۰۰۲)، (۰۰۰) و (۱۱۰) برای فاز ZnO از (۱۱۰)، (۰۰۰) و (۰۰۲) برای فاز CuO و همچنین برای کامپوزیت تهیه شده به روش کندوپاش از قله‌های پراش (۰۰۰)، (۰۰۲) و (۰۰۴) برای فاز ZnO و از (۱۰۰)، (۰۰۲) و (۰۰۴) برای فاز CuO استفاده شد. اندازه متوسط بلورک‌ها و کرنش‌های شبکه بلوری محاسبه شده برای نمونه‌ها در جدول ۱ گزارش شده‌اند. دیده می‌شود که کرنش در نمونه ZnO تهیه شده به روش‌های PVD و کندوپاش و همچنین نانوکامپوزیت‌های تهیه شده به روش‌های CVD و کندوپاش منفی بوده که نشانگر تراکمی بودن کرنش در این نمونه‌هاست. تغییرات اندازه بلورک‌ها با تغییرات کرنش در شبکه بلوری همخوانی دارد و بنابراین تغییر در اندازه بلورک‌ها را می‌توان به تغییر در کرنش شبکه بلوری به علت تشکیل نقص‌های بلوری چون در رفتگی‌ها نسبت داد. اندازه بلورک نمونه‌ی اکسید مس سنتز شده به روش PVD نسبت به سایر نمونه‌ها بزرگتر است، اما به طور کلی کامپوزیت ZnO/CuO تهیه شده با روش کندوپاش با توجه به مقدار نزدیک اندازه بلورک‌های اکسید مس و اکسیدروی و رابطه منطقی آنها با مقدار کرنش‌های بدست آمده در مقایسه با سایر نمونه‌ها بلورینگی بهتری دارد.

Cu، یک لایه مس بر ZnO نهشته شده ایجاد شد. برای اینکار، فاصله ماده هدف تا لایه‌های ZnO cm 7×10^{-3} ، فشار محفظه کندوپاش (DC) در خلا 10^{-3} Torr ، فشارکاری $0.3 \times 7.2 \text{ A}$ ، جریان 0.3×10^{-3} ولت برای ۱۰ دقیقه با نرخ لایه نشانی 50 \AA آنگسترم بر دقیقه انتخاب شدند. در ادامه، نمونه ZnO/Cu تهیه شده در معرض شارش گازهای آرگون و اکسیژن با نرخ‌های به ترتیب 135 sccm و 20 sccm در دمای 400°C به مدت یک ساعت بازپخت شد تا نانوکامپوزیت ZnO/CuO بدست آید.

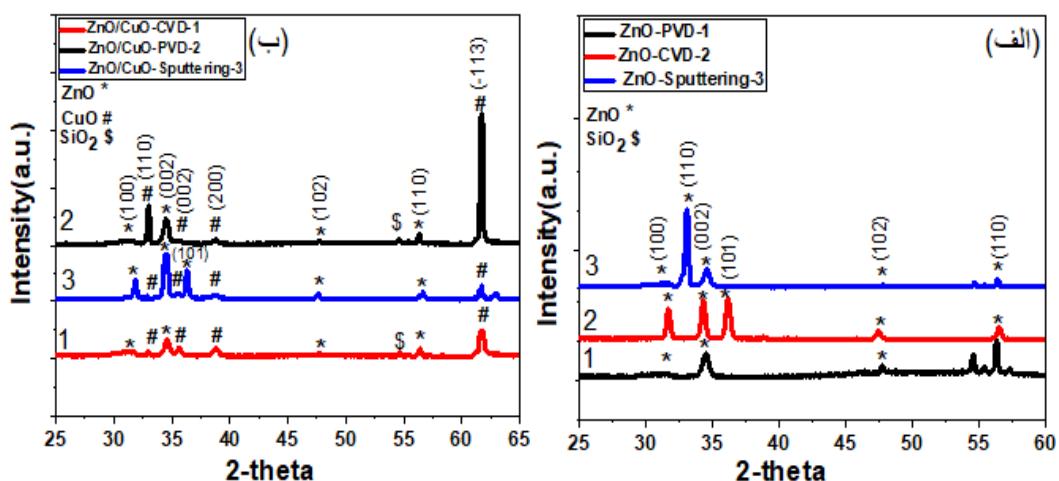
روش‌های مشخصه‌یابی

به منظور بررسی ویژگی‌های ساختاری کامپوزیت‌های تهیه شده به سه روش بیان شده، طیف‌های پراش پرتوی ایکس (XRD) آنها با استفاده از مدل Advanced-D Bruke شرکت با پرتوی $\text{Cu} - \text{K}\alpha$ با طول موج $1.540.4 \text{ \AA}$ در گسترده زاویه‌ای $2\theta=8.0^\circ - 50^\circ$ با اندازه گام 0.04° و زمان روبش 15 s در دمای 20°C ثبت گردید. برای بررسی ریختار لایه‌ها، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی اثر میدان (FESEM) با میکروسکوپ MIRA3 TESCAN از سطح و مقطع لایه‌ها تهیه شد. برای بررسی ویژگی‌های نمونه‌ها، طیف‌های عبور، جذب و بازتاب در ناحیه طول موجی $1100 - 1900 \text{ nm}$ با طیف سنج دو باریکه‌ای ناحیه مرئی و فرابنفش (UV-Vis-) Shimadzo ۱۸۰۰ و با طیفسنج فلورسانس Shimadzo RF- طیف‌های نورتابی (PL) اندازه‌گیری شد. ویژگی‌های الکتریکی نمونه‌ها نیز با یک دستگاه پتانسیومتری مدل PGS ۲۰۶۵ اندازه گیری گردید.

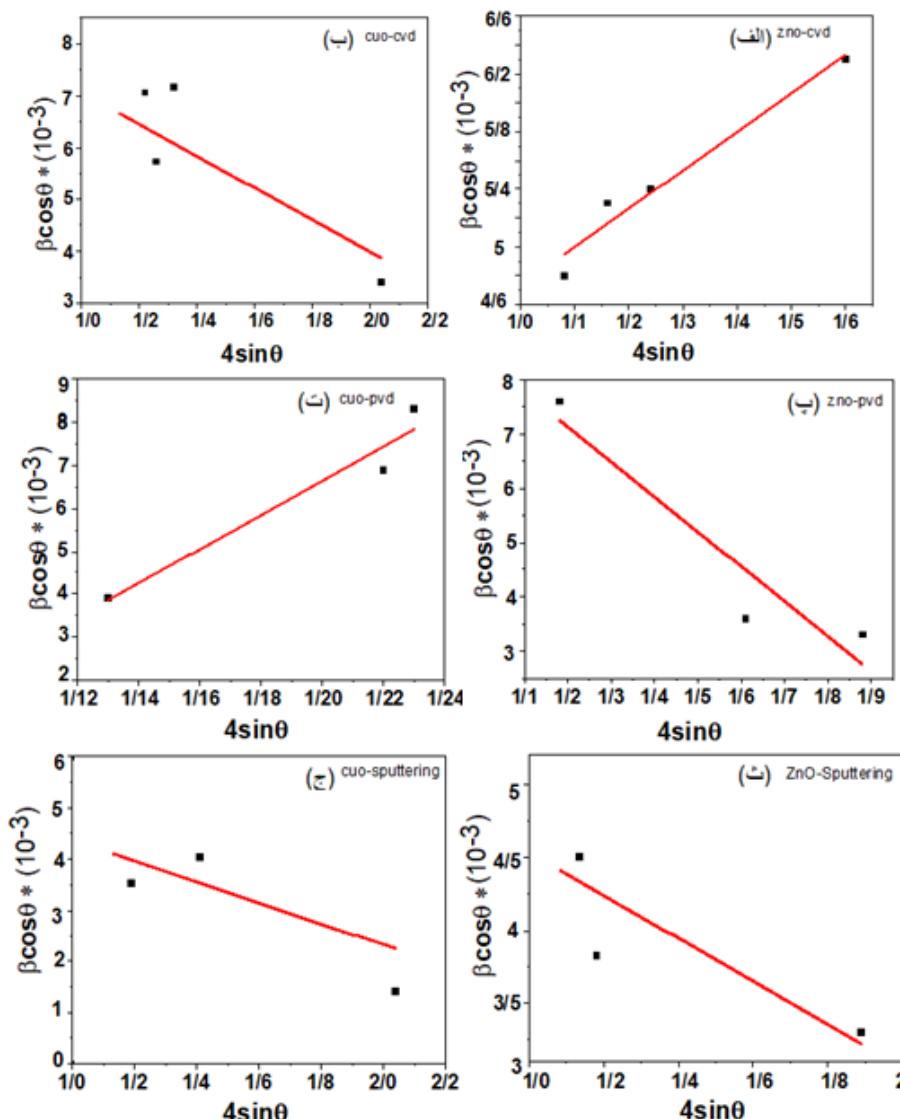
بحث و بررسی

ویژگی‌های ساختاری

طرح‌های پراش پرتو X لایه‌های ZnO و ZnO/CuO سنتز شده در شکل ۱ نشان داده شده است. در الگوی XRD نمونه تهیه شده به روش CVD قله‌های پراش از صفحه‌های (۱۱۰)، (۰۰۰)، (۰۰۲) و (۰۰۴) تشکیل ساختار تکمیلی اکسید مس با ثابت‌های شبکه $a=4.684 \text{ \AA}$ و $b=3.425 \text{ \AA}$ و $c=5.129 \text{ \AA}$ مطابق با کارت استاندارد ۰۶۱-۰۵ و همچنین قله‌های (۱۰۰)، (۰۰۰) و (۱۱۰) تشکیل ساختار ششگوشی اکسیدروی با ثابت‌های شبکه $a=b=3.249 \text{ \AA}$ و $c=5.206 \text{ \AA}$ مطابق با کارت استاندارد ۱۴۵۱-۳۶ را نشان می‌دهند. الگوهای پراش کامپوزیت‌های ZnO/CuO تهیه شده به روش‌های PVD و کندوپاش نیز افرون بر تشکیل ساختار ششگوشی ZnO (کارت



شکل ۱ الگوهای پراش پرتو ایکس از (الف) نمونه‌های ZnO و (ب) کامپوزیت‌های ZnO/CuO تهیه شده به روش‌های PVD,CVD و کندوپاش.



شکل ۲ نمودارهای ویلیامسون-هال برای فازهای ZnO و CuO در نانوکامپوزیت‌های ZnO/CuO تهیه شده به روش‌های : (الف و ب) CVD ، (ب و ت) PVD ، (ث و ج) کندوپاش.

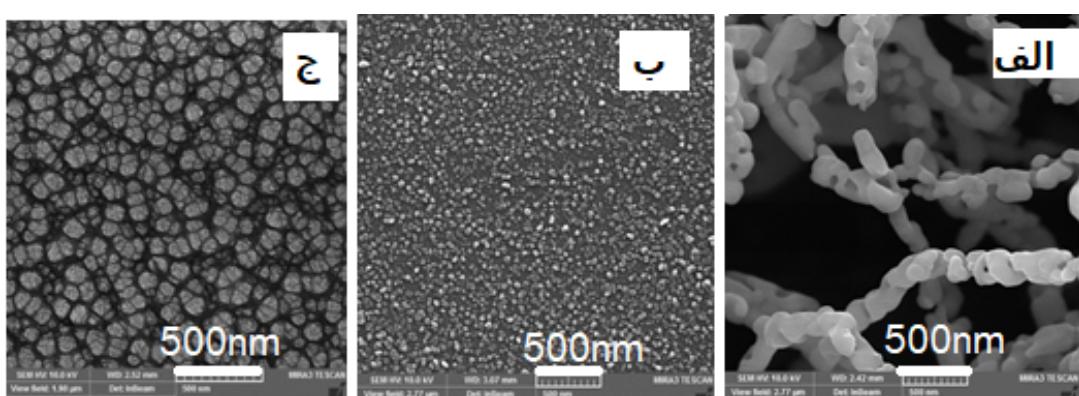
جدول ۱ مشخصه‌های ساختاری کامپوزیت‌های ZnO/CuO سنتز شده.

نمونه (روش سنتز)	اندازه متوسط بلورک (nm) (±5%)		کرنش ($\times 10^{-3}$)	
	ZnO	CuO	ZnO	CuO
CVD	۲۵,۷	۲۹,۲	۲	-۳
PVD	۱۸,۲	۳۹,۶	-۶	۴
کندوپاش	۳۰,۱	۳۳,۲	-۱,۵	-۲

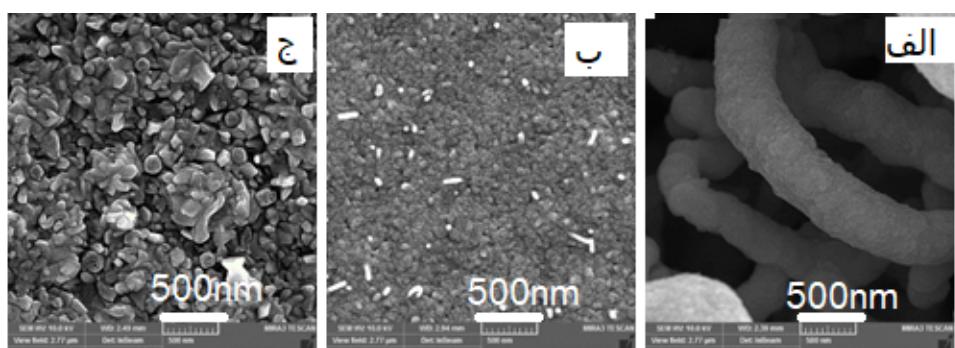
حدود ۳۰۰ نانومتر (شکل ۵ ب) و ضخامت کامپوزیت ZnO/CuO حدود ۵۰۰ نانومتر است (شکل ۶ ب). تصویر FESEM از سطح نمونه‌های تهیه شده به روش کندوپاش نیز تشکیل نانوذرات اکسیدروی اندازه متوسط ۱۰۰ نانومتر بر زیرلایه Si با را نشان می‌دهد (شکل ۳ پ). در این نمونه، اکسیدمیس (CuO) پس از انباست به صورت نانو پولک‌هایی شامل ذرات بزرگتر با اندازه متوسط ۲۰۰ nm سطح نانو ذرات اکسیدروی و فضاهای خالی بین نانوذرات آن را پوشانیده و کامپوزیت ZnO/CuO تشکیل شده است (شکل ۴ ب). بر پایه تصویر FESEM از سطح مقطع این نمونه نیز، ضخامت لایه ZnO (شکل ۵ پ) حدود ۲۷۰ nm است که پس از انباست اکسید مس، ضخامت کامپوزیت ZnO/CuO به حدود ۱ μm رسیده است (شکل ۶ پ). مقایسه تصاویر از FESEM سطح کامپوزیت‌های ZnO/CuO تهیه شده به روش‌های مختلف نشان داد که ریختار نمونه‌های تهیه شده به روش CVD شامل نانو رشتلهای کامپوزیت ZnO/CuO بوده که سطح زیرلایه را پوشانیده‌اند؛ ریختار کامپوزیت‌های ZnO/CuO سنتز شده به دو روش دیگر متفاوت و شامل ساختار دانه‌ای (روش PVD) و پولکی (روش کندوپاش) است.

بررسی ریختار

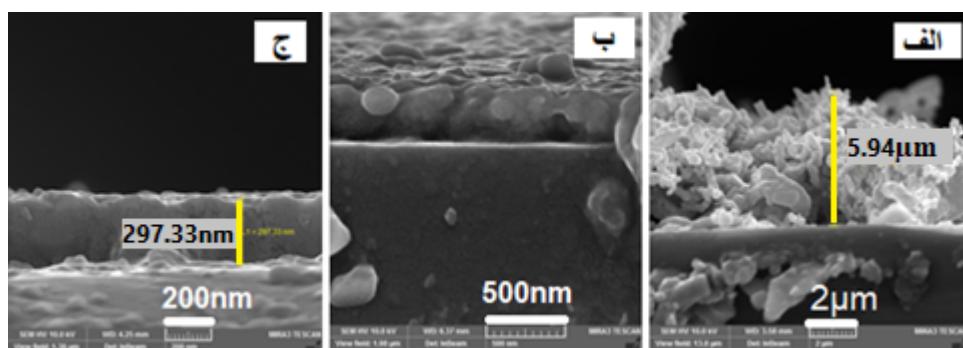
تصویر FESEM مربوط به لایه ZnO تهیه شده به روش CVD (شکل ۳ الف) نشان می‌دهد که این لایه از نانو رشتلهای اکسیدروی (با قطر متوسط ۲۵۰ nm) که حفره‌هایی نیز در سطح آنها دیده می‌شود تشکیل شده است. همچنین از تصویر ZnO/CuO از سطح کامپوزیت FESEM سنتز شده به روش CVD (شکل ۴ الف) دیده می‌شود که ذرات اکسید مس (CuO) با اندازه حدود ۵۰ nm سطح نانو رشتلهای اکسیدروی را پوشانیده‌اند و قطر نانو لوله‌ها به حدود ۴۰۰ nm رسیده است. تصویر FESEM از مقطع این نمونه نشان داد که لایه ZnO خالص ضخامتی حدود ۵/ $۵ \mu\text{m}$ دارد (شکل ۵ الف) که با حضور CuO و تشکیل کامپوزیت (شکل ۶ الف) این مقدار به حدود ۱۲ μm افزایش یافته است. همچنین بررسی ریختار اکسیدروی تهیه شده به روش PVD (شکل ۳ ب) حضور نانو ذراتی با اندازه متوسط ۴۵ نانومتر را در این نمونه نشان می‌دهد. تصویر FESEM کامپوزیت تهیه شده روی این لایه نشان داد که نانوذرات اکسید مس (CuO) پس از انباست با اندازه کمتر از حدود ۳۰ نانومتر سطح نانو ذرات اکسیدروی و همه فضای خالی آن را پوشانیده‌اند (شکل ۴ ب). بر پایه تصاویر FESEM از سطح مقطع این نمونه‌ها، ضخامت لایه اکسیدروی



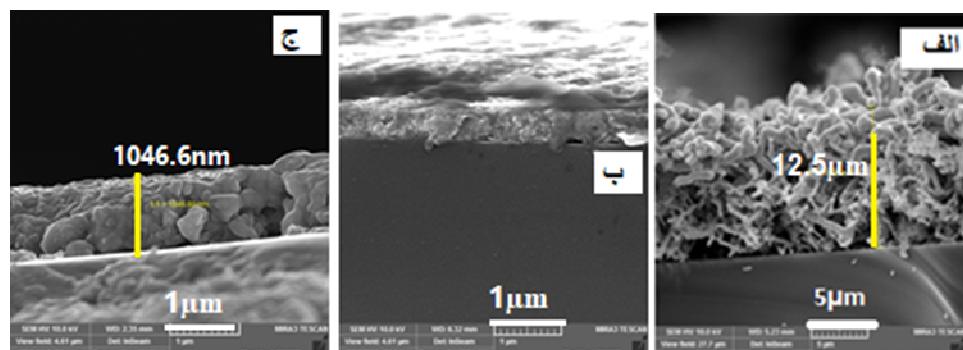
شکل ۳ تصاویر FESEM از سطح لایه‌های ZnO تهیه شده به روش‌های: (الف) CVD (ب) PVD (ج) کندوپاش.



شکل ۴ تصاویر FESEM از سطح نانوکامپوزیت‌های ZnO/CuO تهیه شده به روش‌های: (الف) CVD، (ب) PVD و (پ) کندوپاش.



شکل ۵ تصاویر FESEM از مقطع عرضی لایه‌های ZnO تهیه شده به روش‌های: (الف) CVD، (ب) PVD و (پ) کندوپاش.



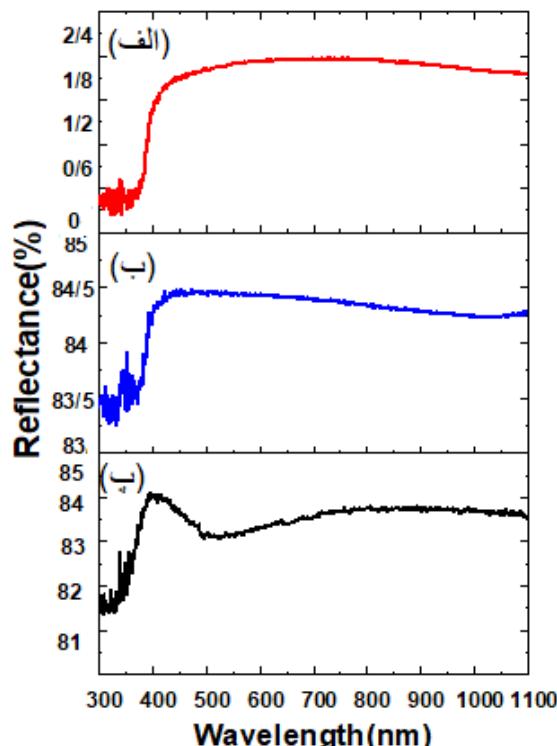
شکل ۶ تصاویر FESEM از مقطع عرضی نانو کامپوزیت‌های ZnO/CuO تهیه شده به روش‌های (الف) CVD و (ب) PVD، (پ) کندوپاش.

نانومتر دیده می‌شود که ممکن است به نقص‌های شبکه بلوری مربوط باشد. به طور کلی، بازتاب از سطح کامپوزیت‌های تهیه شده به روش‌های PVD و کندوپاش در مقایسه با کامپوزیت سنتز شده به روش CVD بسیار بیشتر است. این امر چنان‌که در تصاویر FESEM از سطح لایه‌ها دیده می‌شود، می‌تواند به نوع دانه‌بندی متفاوت این دو نمونه در مقایسه با نمونه سنتز شده به روش CVD مربوط باشد [۳۰، ۹]. رفتار طیف‌های بازتاب کامپوزیت‌های ZnO/CuO سنتز شده به دو روش PVD و کندوپاش و CVD به نسبت یکسان و متفاوت از طیف بازتاب کامپوزیت سنتز شده به روش CVD است. میزان بازتاب همه

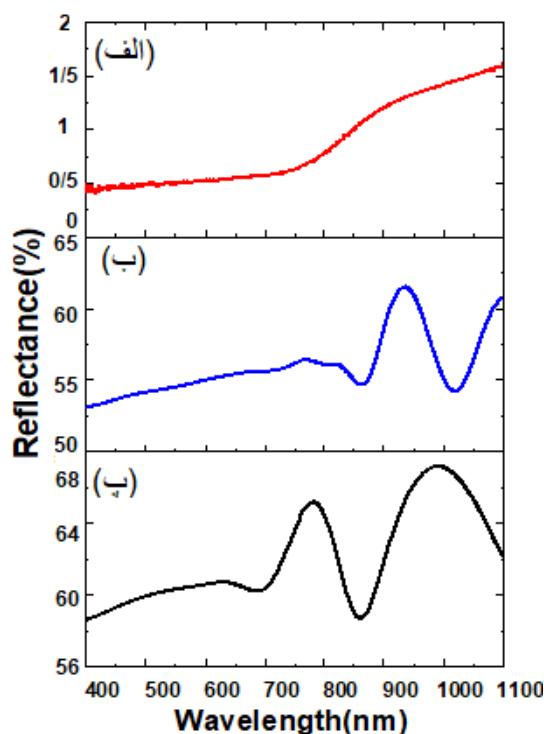
ویژگی‌های اپتیکی
طیف‌های بازتاب (R) لایه‌های ZnO و ZnO/CuO تهیه شده با هر سه روش به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده‌اند. دیده می‌شود که با توجه به سطح براق لایه‌های ZnO سنتز شده به روش‌های PVD و کندوپاش، میزان بازتاب از سطح این نمونه‌ها در ناحیه مرئی به طور قابل توجهی بیشتر از سطح لایه ZnO سنتز شده به روش CVD است. همچنین طیف بازتاب لایه ZnO سنتز شده به روش PVD کمی متفاوت از دو نمونه دیگر است؛ در طیف بازتاب این لایه یک کاهش محسوس در میزان بازتاب در طول موج حدود ۷۰۰

روش کندوپاش و PVD می‌تواند به دلیل یکنواختی فصل مشترک این لایه‌ها در مقایسه با لایه سنتر شده به روش CVD باشد.

کامپوزیت‌ها در حدود طول موج نزدیک به گاف نواری اکسید مس (حدود ۹۰۰ نانومتر) به طور قابل توجهی کاهش یافته است. رفتار نوسانی طیف بازتاب نمونه‌های سنتر شده به دو



شکل ۷ طیف‌های بازتاب از لایه‌های ZnO سنتر شده به روش‌های (الف) CVD و (ب) کندوپاش و (پ) PVD



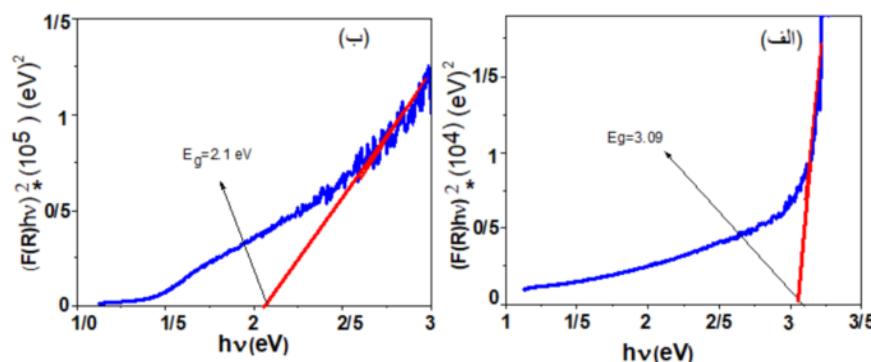
شکل ۸ طیف‌های بازتاب از نانو کامپوزیت‌های ZnO/CuO سنتر شده به روش‌های: (الف) CVD . (ب) کندوپاش و (پ) PVD

های PVD (شکل ۱۰) و کندو پاش (شکل ۱۱) نیز به ترتیب برابر با 3.11 eV و 3.06 eV به دست آمدند که پس از کامپوزیت شدن، به ترتیب به 2.18 eV و 2.05 eV کاهش یافته‌اند. به این ترتیب، برای همه نمونه‌ها گافنواری ZnO پس از انباسته CuO از ناحیه فرابنفش به ناحیه مرئی کاهش یافته است که این به تشکیل کامپوزیت‌های ZnO/CuO مربوط است [۳۱-۳۳]. این تغییرات گاف نواری می‌تواند بیانگر مناسب بودن این کامپوزیت‌ها در بهبود فعالیت فوتولالیزوری در ناحیه نور مرئی و نیز برای کاربرد در سامانه فتوولتاکی باشد.

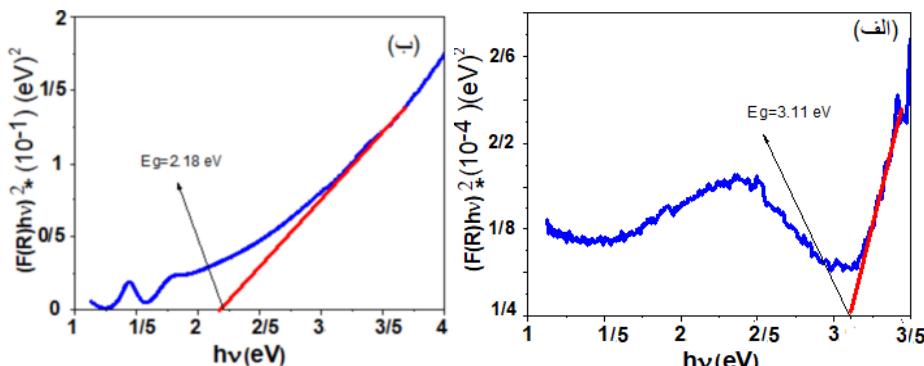
گاف نواری نمونه‌ها با استفاده ازتابع کوبلکا-مانک محاسبه شد:

$$F(R) = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad (2)$$

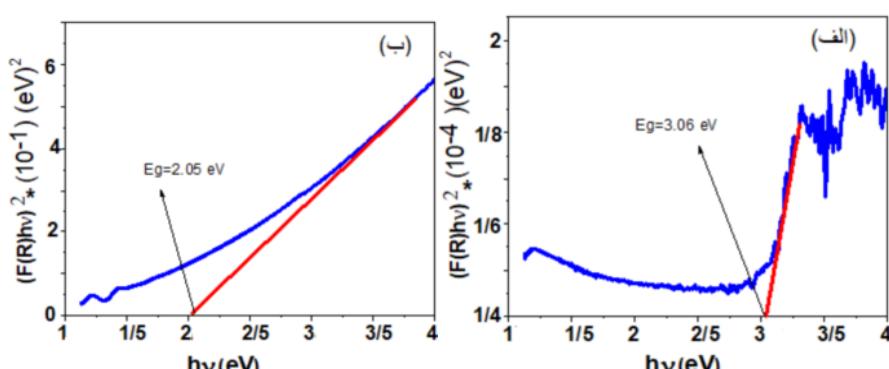
برای این کار، نخست نمودار $(F(R)hv)^2$ (انرژی فوتون فرویدی) برای هریک از نمونه‌ها رسم شد. سپس از برونيایی قسمت خطی این نمودارها با محور انرژی، گافهای نواری به دست آمدند. برای نمونه ZnO خالص تهیه شده به روش CVD، گاف نواری 3.09 eV برآورد شد که پس از انباسته اکسید مس، این مقدار به 2.1 eV کاهش می‌یابد (شکل ۹). گافهای نواری لایه‌های ZnO خالص تهیه شده به روش -



شکل ۹ نمودارهای $h\nu$ - $(F(R)hv)^2$ برای محاسبه گاف نواری (الف) لایه ZnO و (ب) نانو کامپوزیت ZnO/CuO سنتز شده به روش CVD.



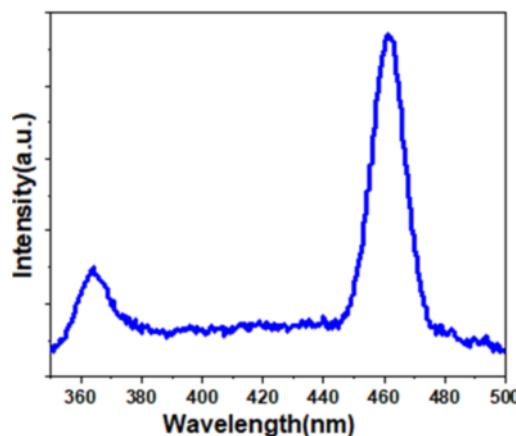
شکل ۱۰ نمودارهای $h\nu$ - $(F(R)hv)^2$ برای محاسبه گاف نواری (الف) لایه ZnO تک، (ب) نانو کامپوزیت ZnO/CuO سنتز شده به روش PVD.



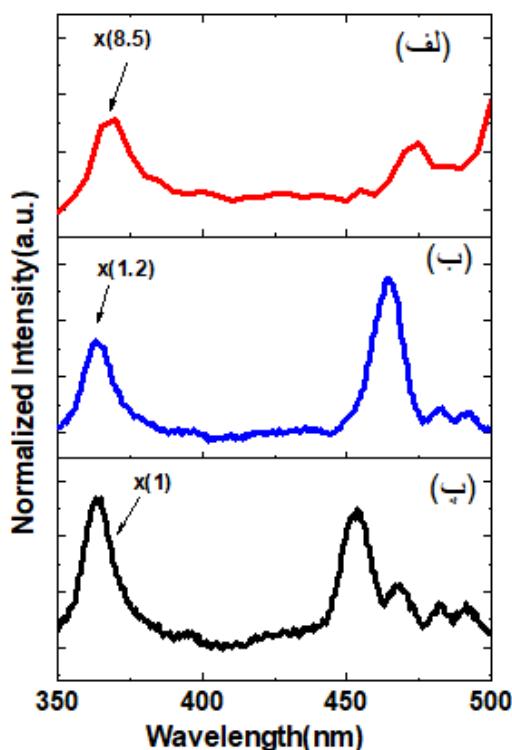
شکل ۱۱ نمودارهای کوبلکا-مانک $(F(R)hv)^2$ - $h\nu$ برای محاسبه گاف (الف) لایه ZnO و (ب) نانو کامپوزیت ZnO/CuO نواری سنتز شده در روش کندوپاش.

بهنجار شده نمونه‌ها (شکل ۱۳) نشان می‌دهد که بهطور کلی، شدت نسبی قله‌های ظاهر شده در ناحیه مرئی (۴۰۰-۵۰۰ nm) و ناحیه فرابنفش (حدود ۳۶۵ nm) برای نمونه سنتز شده به روش PVD نسبت به نمونه‌های تهییه شده به دو روش دیگر بیشتر است. شدت نسبی طیف‌های PL در ناحیه مرئی و فرابنفش نشان می‌دهد که کامپوزیت‌های سنتز شده برای استفاده در وسایل اپتوالکترونیکی مناسب هستند [۹، ۳۴-۳۶].

برای بررسی بیشتر ویژگی‌های اپتیکی نمونه‌ها، طیف‌های PL لایه‌های ZnO و کامپوزیت‌های ZnO/CuO در دمای اتاق با طول موج تحریک ۲۸۰ nm ثبت شدند (شکل‌های ۱۲ و ۱۳). در همه طیف‌ها، قله ناشی از جذب در ناحیه حدود ۳۷۵ nm اکسیدروی (طول موج حدود ۳۷۵ nm) به خوبی دیده می‌شود. سایر قله در طیف‌های PL (در گستره طول موجی ۴۰۰-۴۵۰ nm) به جذب در ترازهای مربوط به نقص‌های شبکه بلوری در نزدیکی گاف نواری مربوط هستند. مقایسه طیف‌های



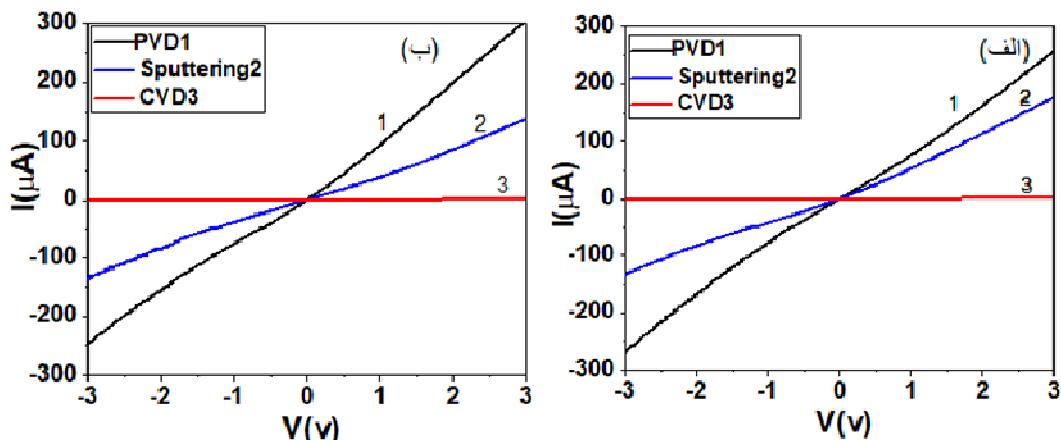
شکل ۱۲ طیف PL (در دمای اتاق) لایه ZnO سنتز شده به روش کندوپاش.



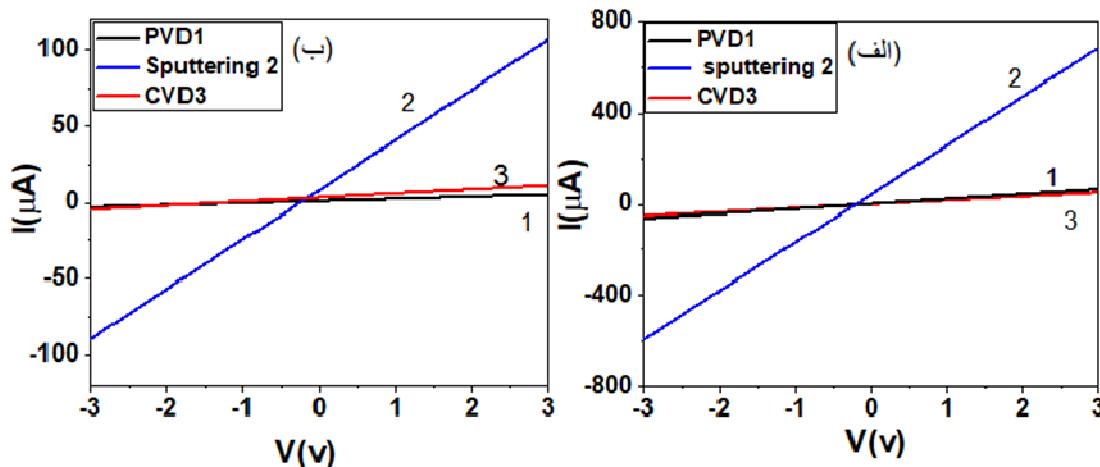
شکل ۱۳ طیف‌های PL بهنجار شده برای نانو کامپوزیت‌های ZnO/CuO تهییه شده به روش‌های (الف) CVD، (ب) کندوپاش و (پ) PVD. برای مقایسه شدت نسبی قله‌ها، ضرایب بهنجارش روی نمودارها آورده شده‌اند.

این رفتار در نمودار جریان- ولتاژ نمونه‌ها در روشنایی نیز دیده می‌شود. مقایسه نمودارهای جریان- ولتاژ نانو کامپوزیت‌های ZnO/CuO تهیه شده به روش‌های مختلف (شکل ۱۵) نشان می‌دهد که نمونه‌های رشد یافته به روش‌های PVD و CVD دارای کمترین مقدار جریان تاریکی و روشنایی هستند. همچنین کامپوزیت سنتز شده به روش کندوپاش دارای بیشترین جریان تاریکی و روشنایی است و نسبت به دو روش دیگر مقاومت الکتریکی کمتری دارد [۳۷، ۲۵]. در این بررسی، پاسخ نوری نمونه‌ها نیز با محاسبه نسبت جریان الکتریکی در روشنایی به جریان الکتریکی در تاریکی به دست آمد که نتایج در جدول ۲ آورده شده‌اند. دیده می‌شود که نمونه ZnO شده به روش PVD و نانوکامپوزیت ZnO/CuO تهیه شده به روش کندوپاش بیشترین پاسخ نوری را دارند.

ویژگی‌های الکتریکی
به منظور بررسی ویژگی‌های الکتریکی نمونه‌ها، تغییرات جریان- ولتاژ (I-V) نمونه‌ها در گستره -۳ تا ۳ ولت زیر تابش نور و در تاریکی توسط یک دستگاه پتانسیومتر استات اندازه‌گیری شدند. نمودارهای جریان- ولتاژ لایه‌های ZnO رشد یافته به روش‌های PVD، CVD و کندوپاش در روشنایی و تاریکی در شکل ۱۴ نشان داده شده‌اند. مقاومت الکتریکی لایه‌ها با استفاده از شبیه نمودارها به دست آمدند که نتایج در جدول ۲ گزارش شده است. دیده می‌شود که لایه‌های ZnO سنتز شده به روش‌های PVD و CVD به ترتیب دارای بیشترین و کمترین جریان تاریکی هستند. دلیل این امر به احتمال بسیار می‌تواند جذب سطحی بیشتر اکسیژن در لایه سنتز شده به روش CVD نسبت به سایر لایه باشد که نتیجه آن به وجود آمدن لایه تخلیه بزرگتری نسبت به دو روش دیگر است. مشابه



شکل ۱۴ نمودارهای جریان- ولتاژ لایه‌های ZnO سنتز شده به روش‌های PVD، CVD و کندوپاش در (الف) روشنایی و (ب) تاریکی.



شکل ۱۵ نمودارهای جریان- ولتاژ نانوکامپوزیت‌های ZnO/CuO سنتز شده به روش‌های PVD، CVD و کندوپاش (الف) روشنایی و (ب) تاریکی.

جدول ۲ مقاومت الکتریکی و پاسخ نوری نمونه‌های ZnO/CuO و کامپوزیت‌های ZnO سنتز شده در این کار.

نمونه‌ها (روش تهییه)	مقاومت در روش‌نایی ($\times 10^5 \Omega$) (± 0.05)		مقاومت در تاریکی ($\frac{1}{\Omega} \times 10^5 \Omega$) (± 0.05)		پاسخ نوری	
	ZnO	ZnO/CuO	ZnO	ZnO/CuO	ZnO	ZnO/CuO
CVD	۲.۲	۴۲	۱.۵	۳۶	۰.۶۶	۰.۱۸
PVD	۰.۱۲	۴۰	۰.۲	۳.۸	۱.۷۰	۰.۳۴
کندوپاش	۰.۱۶	۵.۴	۰.۱۴	۰.۳	۱.۳۷	۰.۶۸

تهییه شده به روش کندوپاش (با گاف نواری کمتر و بلورک‌های بزرگتر) دارای کمترین مقاومت الکتریکی و بیشترین پاسخ نوری است. براساس نتایج به دست آمده در این کار، به طور کلی ویژگی‌های ساختاری، اپتیکی و الکتریکی ریختار و نانوکامپوزیت‌های ZnO/CuO بسیار وابسته به روش سنتز آنهاست.

مراجع

- [1] Mehta S. K., et al. "Ultra-high sensitive hydrazine chemical sensor based on low-temperature grown ZnO nanoparticles." *Electrochimica acta* 69 (2012): 128-133.
- [2] Fatemi Hengameh, et al. "Apple-biomorphic synthesis of porous ZnO nanostructures for glucose direct electrochemical biosensor.", *Current Applied Physics* 12.4 (2012): 1033-1038.
- [3] Khan Sher Bahadar, et al. "Low-temperature growth of ZnO nanoparticles: photocatalyst and acetone sensor.", *Talanta* 85.2 (2011): 943-949.
- [4] Anas S., et al. "Sintering of surfactant modified ZnO-Bi2O3 based varistor nanopowders.", *Ceramics International* 36.8 (2010): 2351-2358.
- [5] Zhu Ping, et al. "Biomedical applications of functionalized ZnO nanomaterials: From biosensors to bioimaging.", *Advanced Materials Interfaces* 3.1 (2016): 1500494.
- [6] Zang Zhigang, Xiaosheng Tang, "Enhanced fluorescence imaging performance of hydrophobic colloidal ZnO nanoparticles by a facile method" *Journal of Alloys and Compounds* 619 (2015): 98-101.
- [7] Zang Zhigang, et al. "Femtosecond laser direct writing of microholes on roughened ZnO for

برداشت

در این پژوهش، لایه‌های نانوکامپوزیت ZnO/CuO به سه روش PVD، CVD و کندوپاش بر زیرلایه‌های سیلیکونی نوع n با راستای بلوری (۱۰۰) تهییه شده و ویژگی‌های ساختاری، اپتیکی، الکتریکی ریختار و آن‌ها بررسی گردید. نتایج نشان دادند که همه کامپوزیت‌های تشکیل شده شامل ساختارهای ششگوشی ZnO و تکمیلی CuO هستند. مقایسه نتایج نشان داد که کامپوزیت‌های ZnO/CuO سنتز شده به روش کندوپاش دارای بهترین بلورینگی در مقایسه با نمونه‌های سنتز شده به دو روش دیگر هستند. همچنین ریختار نمونه‌های تهییه شده با روش‌های مختلف تفاوت بسیار محسوسی از خود نشان می‌دهند؛ نمونه‌های سنتز شده به روش‌های PVD و کندوپاش به ترتیب دارای ساختار دانه‌ای و پولکی بوده در حالی که نانو کامپوزیت‌های سنتز شده به روش CVD شامل نانو رشته‌هایی مرکب از ذرات CuO هستند که سطح و درون نانو لوله‌های ZnO را دربر گرفته‌اند. همچنین بررسی‌های اپتیکی نمونه‌ها نشان داد که گاف نواری کامپوزیت‌های تشکیل شده گستره ۲۰۵-۲۱۸ eV بین گافهای نواری نیمرساناهای ZnO و CuO هستند. همچنین بازتاب از سطح کامپوزیت‌های سنتز CVD شده به روش‌های PVD و کندوپاش در مقایسه با روش CVD بسیار بیشتر است که این امر می‌تواند به ریختار سطح نمونه‌ها مربوط باشد. بررسی طیفهای نورتایی نمونه‌ها در دمای اتاق نشان داد که با توجه به شدت نسبی قله‌های PL در ناحیه مرئی (۴۵۲nm) و فرابنفش (۳۶۴nm)، کامپوزیت‌های تهییه شده برای کاربردهای اپتوالکترونیکی مناسب هستند. مقایسه ویژگی‌های الکتریکی این نمونه‌ها نیز نشان داد که کامپوزیت

- heterojunction with enhanced photocatalytic activity.",* J. Phys. Chem. C. 122 (2018): 9531–9539.
- [19] P.S. Kumar, M. Selvakumar, S.G. Babu, S. Induja, S. Karuthapandian, "CuO/ZnO nanorods: An affordable efficient p-n heterojunction and morphology dependent photocatalytic activity against organic contaminants.", J. Alloys Compd. 701 (2017): 562-573.
- [20] Barokah S., Widiarti N., "Photocatalytic activity CuO-ZnO on oxidation reaction of PhenolIndo.", J. Chem Sci. 4 (2015): 88
- [21] Wang J.X., Sun X.W., Yang Y., AKyaw K.K., Huang X.Y., Yin J.Z., Wei J., Demir H.V., "Free-standing ZnO-CuO composite nanowire array films and their gas sensing properties.", Nanotechnology 22 (2011): 325704.
- [22] Yan Xiu-Tian, Yongdong X.u., "Chemical vapour deposition: an integrated engineering design for advanced materials", Springer Science & Business Media, 2010.
- [23] Dion CA Dorval, Jason Robert Tavares, "Photo-initiated chemical vapor deposition as a scalable particle functionalization technology (a practical review).", Powder technology 239 (2013):484-491.
- [24] Ohering M., "Materials science of thin films deposition and structure.", (2002): 215.
- [25] Fu Qiu-Ming, et al. "Self-powered ultraviolet photodetector based on ZnO nanorod arrays decorated with sea anemone-like CuO nanostructures.", Materials Letters 222 (2018): 74-77.
- [26] López-Romero S., M. García-H., "Photoluminescence and structural properties of ZnO nanorods growth by assisted-hydrothermal method.", (2013).
- [27] Huang Michael H., et al. "Catalytic growth of zinc oxide nanowires by vapor transport.", Advanced Materials 13.2 (2001): 113-116.
- [28] Prabhu Yendrapati Taraka, et al. "X-ray analysis by Williamson-Hall and size-strain plot methods of ZnO nanoparticles with fuel variation", World Journal of Nano Science and Engineering 2014 (2014).
- [29] Monshi Ahmad, Mohammad Reza Foroughi, Mohammad Reza Monshi, "Modified Scherrer equation to estimate more accurately nano-
output power enhancement of InGaN light-emitting diodes.", Optics letters 41.15 (2016): 3463-3466.
- [8] Chen Yalu, et al. "A CuO-ZnO nanostructured p-n junction sensor for enhanced N-butanol detection.", RSC advances 6.3 (2016): 2504-2511.
- [9] Khan Muhammad Arif, et al. "Catalyst-free fabrication of novel ZnO/CuO core-Shell nanowires heterojunction: Controlled growth, structural and optoelectronic properties", Applied Surface Science 435 (2018): 718-732.
- [10] Jagadish Chennupati, Stephen J., Pearton eds., "Zinc oxide bulk, thin films and nanostructures: processing, properties, and applications", Elsevier, 2011.
- [11] Zeng Zaiping, et al. "Linear and nonlinear optical properties of ZnO/ZnS and ZnS/ZnO core shell quantum dots: effects of shell thickness, impurity, and dielectric environment", Journal of Applied Physics 114.2 (2013): 023510.
- [12] Zhai Jing, et al. "Core-shell structured ZnO/SiO₂ nanoparticles: preparation, characterization and photocatalytic property." Applied Surface Science 257.2 (2010): 393-397.
- [13] Abraham Nelsa, et al. "Dye sensitized solar cells using catalytically active CuO-ZnO nanocomposite synthesized by single step method.", Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy 200 (2018): 116-126.
- [14] Kim Jaehyun, Wooseok Kim, Kijung Yong, "CuO/ZnO heterostructured nanorods: photochemical synthesis and the mechanism of H₂S gas sensing.", The Journal of Physical Chemistry C 116.29 (2012): 1568215691.
- [15] Filipič G., U. Cvelbar, "Copper oxide nanowires: a review of growth" Nanotechnology 23.19 (2012): 194001.
- [16] Paul Somdatta, et al. "Investigation of the comparative photovoltaic performance of n-ZnO nanowire/p-Si and n-ZnO nanowire/p-CuO heterojunctions grown by chemical bath deposition method.", Optik 164 (2018):745-752.
- [17] Zangeneh H., Zinatizadeh A.A.L., Habibi M., Akia M., Isa M.H., "Photocatalytic oxidation of organic dyes and pollutants in wastewater using different modified titanium dioxides: A comparative review.", J. Ind. Eng. Chem. 26 (2015): 1-36
- [18] L. Zhu, H. Li, Z. Liu, P. Xia, Y. Xie, D. Xiong, "Synthesis of the 0D,3D CuO/ZnO

- Suman L. Jain, "Visible light induced α -amino acid synthesis from carbon dioxide using nanostructured ZnO/CuO heterojunction photocatalyst.", *Materialia* 12 (2020): 100777.
- [34] Allabergenov Bunyod, et al. "Effective control over near band-edge emission in ZnO/CuO multilayered films.", *Optical Materials Express* 7.2 (2017): 494-502.
- [35] Lavin Alexis, et al. "High proportion ZnO/CuO nanocomposites: Synthesis, structural and optical properties, and their photocatalytic behavior", *Surfaces and Interfaces* 17 (2019): 100367.
- [36] Tang Chunmei, et al. "Facile synthesis and nanoscale related physical properties of core-shell structured CuO/ZnO nanorods on Si substrate", *Applied Surface Science* 509 (2020): 144903.
- [37] Park Young Jae, et al. "Solution-processed multidimensional ZnO/CuO heterojunction as ultraviolet sensing", *Optical Materials Express* 5.8 (2015): 1752-1758.

- crystallite size using XRD.", *World journal of nano science and engineering* 2.3 (2012): 154-160.
- [30] Li Hong, et al. "Synthesis and investigation of novel ZnO-CuO core-shell nanospheres", *Materials Letters* 174 (2016): 99-101.
- [31] Kumaresan N., M. Maria Angelin Sinthiya, K. Ramamurthi, R. Ramesh Babu, K. Sethuraman, "Visible light driven photocatalytic activity of ZnO/CuO nanocomposites coupled with rGO heterostructures synthesized by solid-state method for RhB dye degradation.", *Arabian Journal of Chemistry* 13, no. 2 (2020): 3910-3928.
- [32] Sharma Mahima, Mrinal Poddar, Yash Gupta, Subhasha Nigam, Devesh Kumar Avasthi, Rainer Adelung, Reza Abolhassani, Jacek Fiutowski, Monika Joshi, Yogendra Kumar Mishra, "Solar light assisted degradation of dyes and adsorption of heavy metal ions from water by CuO-ZnO tetrapodal hybrid nanocomposite.", *Materials Today Chemistry* 17 (2020): 100336.
- [33] Saini Sandhya, Yendrapati Taraka Prabhu B., Sreedhar Pankaj Kumar Prajapati, Ujjwal Pal,