

بررسی اثر فشار جزئی اکسیژن بر تشکیل ریخت‌های مختلف نانوساختارهای اکسید روی ساخته‌شده با پلاسمای DC

سعید پرهوده^{۱،*}، منصور فرید^۲، مرتضی زرگر شوشتری^۲
^۱گروه فیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز
^۲گروه فیزیک، دانشگاه شهید چمران اهواز

چکیده

در این تحقیق، ریخت‌های مختلف نانوذرات اکسید روی با استفاده از ایجاد پلاسمای DC در اتمسفر اکسیژن خالص ساخته شدند. برای بررسی اثر فشار جزئی (جمعیت اتم‌های) اکسیژن در زمان شکل‌گیری نانوذرات اکسید روی و همچنین فشار اتمسفر ساخت، نسبت‌های مختلف گازهای اکسیژن و آرگن به عنوان اتمسفر ساخت، مورد استفاده قرار گرفت. تغییر ریخت نانوذرات اکسید روی با استفاده از تغییر نسبت گازهای تشکیل‌دهنده‌ی مورد مطالعه قرار گرفت. ریخت و ساختار نانوذرات ساخته‌شده با استفاده از XRD و SEM مورد مطالعه قرار گرفت. مقایسه‌ی نتایج نشان دادند که ریخت نمونه‌ها به طور مشخص توسط جمعیت اتم‌های اکسیژن حاضر در زمان ساخت (فشار جزئی اکسیژن) تعیین می‌شود. همچنین این مطالعه نشان داد فشار کل اعمالی در محدوده‌ی فشارهای مورد استفاده در این پژوهش، تأثیر کم‌تری در شکل نهایی نانوذرات دارد.

واژه‌های کلیدی: نانوساختار اکسید روی، ریخت‌شناسی، نانوذرات، پلاسمای DC

مقدمه

در سال‌های اخیر اکسید روی (ZnO) در مجامع علمی به عنوان ماده‌ای برای آینده، توجه زیادی را به خود جلب نموده است [۱]. اکسید روی با داشتن یک گاف انرژی پهن حدود ۳/۳۷ الکترون ولتی و یک انرژی بستگی اکسایشی بزرگ ۶۰ میلی الکترون ولتی [۲ و ۳] در دمای اتاق، همچون نیتريد گالیوم (GaN) برای ادوات نوری که در محدوده‌ی طیف آبی و فرابنفش کار می‌کنند، بسیار باارزش می‌باشد [۴]. اکسید روی، ماده‌ی بسیار مناسبی برای دستگاه‌های الکترواپتیکی است که در محدوده‌ی امواج کوتاه کار می‌کنند؛ همچون دیودهای نوری و دیودهای لیزری [۲]. از دیگر مزایای این ماده می‌توان به گستردگی انتخاب در مواد شیمیایی که در فرآیند حکاکی

* نویسنده‌ی مسئول (saeed.parhoodeh@gmail.com)

ترا^۱ آن در دسترس می‌باشد، توان آستانه اندک برای پمپاژ نوری، و سازگاری با محیط‌زیست را نام برد. تمام این موارد، اکسید روی را ماده‌ی مناسبی برای وسایلی مانند حسگرها یا ادواتی همچون دیودهای لیزری فرابنفش کرده است. چندین دهه است که خواص اپتیکی اکسید روی به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است [۵-۱۵]. اکسید روی همچنین دارای کاربرد در سلول‌های خورشیدی [۱۶-۱۹] و رساناهای شفاف می‌باشد [۲۰-۲۲].

مواد و روش‌ها

در حالت کلی، روش‌های سنتز نانوذرات اکسید روی را می‌توان به سه نوع کلی دسته‌بندی کرد؛ روش‌های فاز بخار، سنتز در محلول و روش‌های جامد [۲۳]. هر یک از

رآکتور در ارتباط بودند. یکی از نگهدارنده‌های الکتروود در جای خود ثابت شده بود، اما نگهدارنده‌ی الکتروود دیگر می‌توانست به کمک یک چرخ دنده به سادگی بدون اجازه‌ی نفوذ هوا از خارج به داخل رآکتور و یا بالعکس به سمت راست و چپ حرکت کند. این رآکتور می‌توانست فشارهایی در محدوده 10^{-2} mbar تا ۵ bar را تحمل نماید.

برای ساخت نانوذرات، میله‌های روی با خلوص ۹۹/۹۹۹ به طول تقریبی ۷ سانتی‌متر و قطر تقریبی ۰/۶ سانتی‌متر درون رآکتور قرار داده شد و پس از آن درب‌های رآکتور بسته می‌شد. هوای درون رآکتور تا فشار 10^{-2} mbar تخلیه می‌گردید و سپس اکسیژن به درون رآکتور تا رسیدن به فشار اتمسفر تزریق می‌شد. برای اطمینان از عدم وجود نیتروژن در فضای داخلی رآکتور، این کار تا سه مرتبه تکرار می‌گردید. با اتصال رآکتور به یک منبع جریان (تنظیم بر روی مقدار بیشینه ۳۰۰ آمپر و ولتاژ ۲۴ ولت) و حرکت آهسته الکتروود متحرک به سمت الکتروود دیگر، یک قوس الکتریکی پایدار بین دو الکتروود برقرار می‌گردید. پس از چند ثانیه، جداره‌های داخلی رآکتور با نانوذرات اکسید روی پوشیده می‌شد. نانوذرات تولیدشده از جدار داخلی رآکتور جهت مطالعه و بررسی، جمع‌آوری می‌شدند.

جدول ۱- فشارهای ساخت در اتمسفر اکسیژن خالص

فشار کل (mbar)	فشار گاز اکسیژن (mbar)	
۲۰۰	۲۰۰	۱
۴۰۰	۴۰۰	۲
۶۰۰	۶۰۰	۳
۸۵۰	۸۵۰	۴
۱۰۰۰	۱۰۰۰	۵
۲۰۰۰	۲۰۰۰	۶
۳۰۰۰	۳۰۰۰	۷
۵۰۰۰	۵۰۰۰	۸

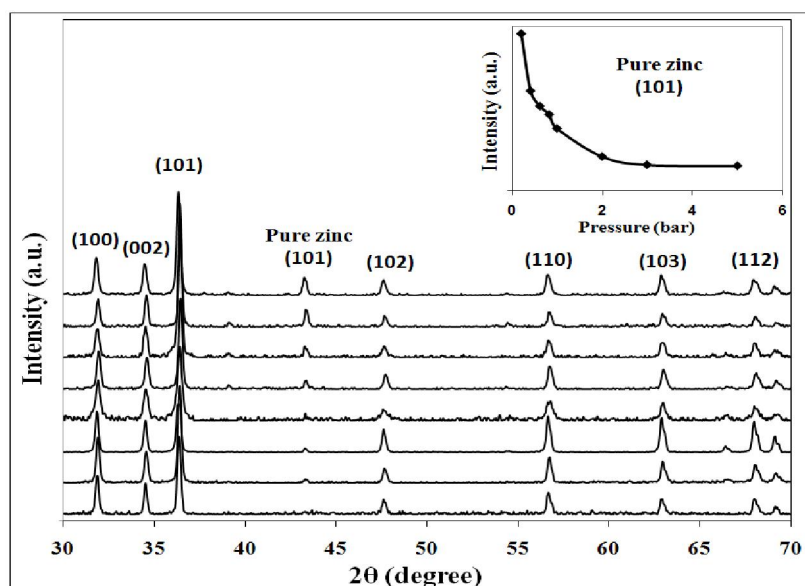
این روش‌ها دارای مزایا و معایبی می‌باشند. از جمله این

1- Wetetching

روش‌ها جهت سنتز نانوذرات اکسید روی می‌توان به روش‌های کند و پاش لیزر پالسی^۱ [۲۴]، مگنترون پلاسمای RF^۲ [۲۵]، تبخیر حرارتی [۲۶]، اسپری پایرولیز^۳ [۲۷]، دیفیوژن فلیم^۴ [۲۸]، سل ژل [۲۹]، هیدروترمال [۳۰]، سونوکیمیکال^۵ [۳۱]، میکروامولاسیون^۶ [۳۲] و بسیاری روش‌های دیگر سنتز شده است. در این میان روش‌هایی همچون رسوب فیزیکی بخار (PVD) و رسوب شیمیایی بخار (CVD) برای دستیابی به ساخت ریخت‌های خاص بیشتر مورد توجه بوده‌اند. روش‌هایی که مبتنی بر ساخت به روش شیمیایی می‌باشند دارای یک اشکال عمومی می‌باشند و آن وجود ردپای مواد اولیه‌ی استفاده‌شده در محصولات نهایی است. شاید وجود ناخالصی کم برای بعضی از کاربردها بدون اشکال باشد، اما در بسیاری از موارد حتی مقدار اندک ناخالصی می‌تواند سبب مخدوش شدن فرآیند مورد نظر بشود. روش ارائه‌شده در این تحقیق، نوعی روش فیزیکی جهت ساخت نانوذرات اکسید روی می‌باشد. این روش دارای چند ویژگی اصلی است که سبب امتیاز آن بر سایر روش‌ها می‌باشد. مزایای اصلی این روش عبارت‌اند از الف) امکان ساخت نانوذرات اکسید روی با خلوص بسیار بالا (بدون به‌کار بردن مواد واسطه)، ب) امکان ساخت نانو ذرات اکسید روی با ریخت‌های متفاوت.

جهت ساخت نانوذرات از یک رآکتور دست‌ساز استفاده شد [۳۳]. رآکتور از یک مخزن به حجمی در حدود 7000 cm^3 تشکیل شده بود که دو پنجره جهت دیدن درون آن در وسط رآکتور تعبیه گردیده بود. هم‌چنین دارای دو نگهدارنده‌ی الکتروود در دو سمت رآکتور بود که به لحاظ الکتریکی با فضای خارج از

- 1- Pulsed laser ablation
- 2- Magnetron RFPlasma
- 3- Spray pyrolysis
- 4- Diffusion flame
- 5- Sonochemical
- 6- Microemulsions



شکل ۱- الگوی پراش اشعه‌ی ایکس نمونه‌های سنتز شده در فشارهای مختلف. الگوها از پایین به بالا به ترتیب مربوط به فشارهای ۵۰۰۰، ۳۰۰۰، ۲۰۰۰، ۱۰۰۰، ۸۵۰، ۶۰۰، ۴۰۰ و ۲۰۰ میلی‌بار می‌باشند. شکل جا داده شده، (بالا) تغییرات شدت قله‌ی اضافی (۱۰۱) مربوط به Zn خالص در نمونه‌ها را با فشارهای مختلف نشان می‌دهد.

تقریباً یکسان و مشابه می‌باشد. تنها تفاوت در الگوهای پراش پرتو ایکس مربوط به ظهور یک قله‌ی جدید که مربوط به قله‌ی اصلی (۱۰۱) روی خالص است. شدت این قله با فشار رآکتور نسبت معکوس دارد، به عبارت دیگر در فشارهای پایین میزان حضور روی خالص در نمونه‌ها بیش‌تر از فشارهای بالا می‌باشد (در فشارهای به حد کافی زیاد، این قله‌ی اضافی به طور کامل محو می‌شود).

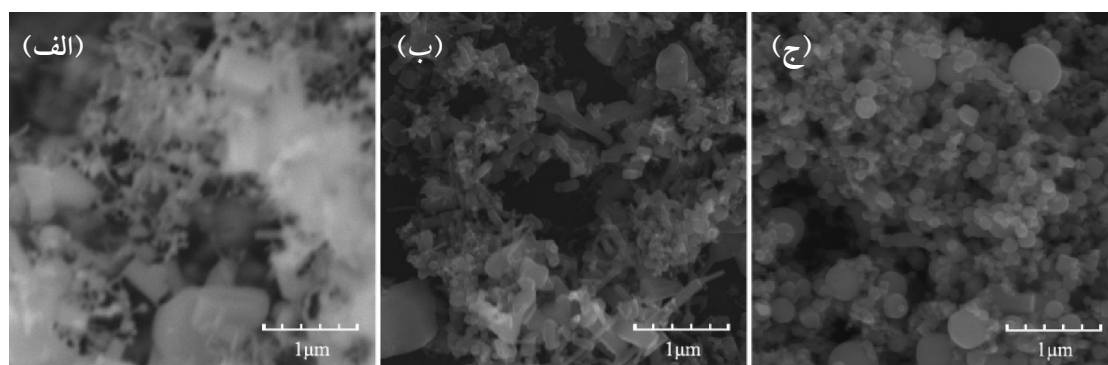
تصاویر SEM تهیه‌شده از نمونه‌های ساخته‌شده در فشارهای مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است. بررسی تصاویر به دست آمده به وضوح نشان می‌دهد که در فشارهای پایین، ریخت نمونه‌ها تمایل به ساختارهای کشیده همچون نانوسیم‌های اکسید روی دارند، اما ساخت در فشارهای بالا منجر به ساختارهای دانه‌ای می‌شوند [۳۴]. در فشارهای میانی (بین حد پایین و بالای فشارهای اعمالی) غالباً آمیزه‌ای از انواع ساختارها همچون ستاره‌ای، سیمی شکل، کروی شکل و شش گوشه‌ای یافت می‌شدند.

بررسی اثر فشار گاز اکسیژن بر شکل‌گیری نانوذرات اکسید روی

جهت بررسی اثر فشار گاز اکسیژن خالص بر ساخت نانوذرات اکسید روی، فشار نهایی رآکتور قبل از برقراری قوس الکتریکی بین الکترودها طبق جدول ۱ تنظیم گردید. همان‌گونه که از جدول مشاهده می‌شود، در این مرحله فشار کل رآکتور و فشار جزئی اکسیژن یکسان می‌باشند. از نمونه‌های تولیدشده در هر فشار تصاویر SEM و همچنین طیف پراش اشعه‌ی ایکس (XRD) تهیه گردید.

مطالعه‌ی ریخت و ساختار بلوری نمونه‌های ساخته‌شده

از نمونه‌های ساخته‌شده در فشارهای مختلف الگوی پراش اشعه‌ی ایکس تهیه گردید. این الگوها در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. الگوی پراش، تشکیل ساختار ورتسایت اکسید روی را برای کلیه‌ی نمونه‌های ساخته‌شده نشان می‌دهد. همچنین الگوی کلی پراش در کلیه‌ی نمونه‌ها



شکل ۲- تصاویر SEM نمونه‌های ساخته‌شده در فشارهای مختلف اکسیژن خالص. به ترتیب حروف الفبا در ۲۰۰، ۸۵۰، ۱۰۰۰ میلی بار.

اکسیژن خالص نشان می‌دهد که در این مورد نیز نمونه‌ها کم و بیش از الگوی رفتاری در تغییر ریخت، مانند نمونه‌های ساخته‌شده در فشارهای متناظر اکسیژن خالص پیروی می‌کنند. یعنی در نمونه‌هایی که فشار جزئی اکسیژن کم می‌باشد، ریخت نمونه‌ها به ساختارهای کشیده تمایل دارد و در فشارهای بالا، نمونه‌ها به شکل دانه‌ای درمی‌آیند. این مسئله بیان می‌کند که شکل نهایی نانوذرات با جمعیت اکسیژن حاضر در هنگام ساخت نانوذرات مرتبط است و به فشار کل وارد بر آن‌ها ارتباط چندانی ندارد.

جدول ۲- فشارهای ساخت در اتمسفر مخلوط اکسیژن و آرگن

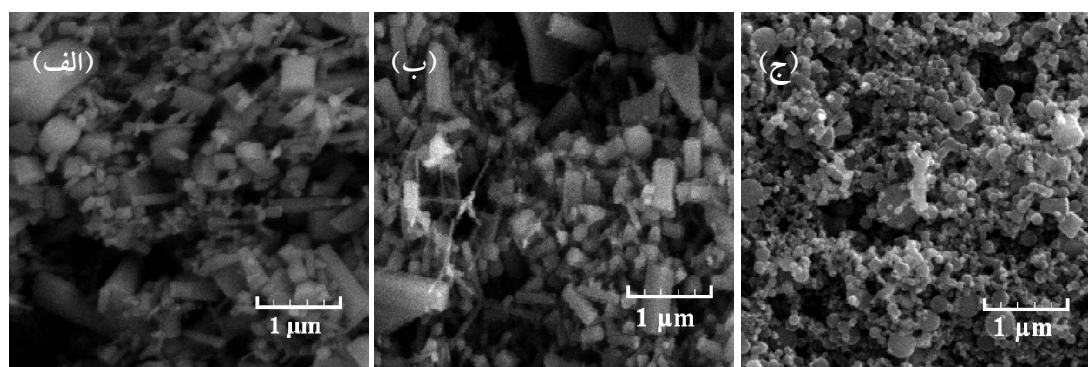
فشار کل (mbar)	فشار گاز اکسیژن (mbar)
۵۰۰۰	۲۰۰
۵۰۰۰	۸۵۰
۵۰۰۰	۳۰۰۰

بررسی اثر اکسیژن در شکل‌گیری ریخت‌های مختلف نانوذرات اکسید روی

جهت بررسی این مسئله که آیا این فشار کلی اعمالی حین ایجاد قوس جهت ساخت نانوذرات ریخت نهایی آن‌ها را تعیین می‌کند یا جمعیت اکسیژن حاضر در محیط (فشار جزئی اکسیژن)، آزمایش جدیدی با افزودن گاز بی‌اثر Ar به عنوان عامل کنترل فشار انجام پذیرفت.

فشار کلی و جزئی رآکتور با استفاده از اتمسفر مخلوط اکسیژن و آرگن طبق جدول ۲ تنظیم گردید. سپس از نمونه‌ها جهت مقایسه با نمونه‌های ساخته‌شده در اتمسفر خالص اکسیژن، تصاویر SEM و پراش اشعه‌ی ایکس (XRD) تهیه گردید. در تمام نمونه‌های ساخته‌شده در این مرحله از آزمایش، فشار کلی رآکتور ۵ bar بود، اما فشار جزئی اکسیژن شبیه مرحله‌ی اول انتخاب شد. بنابراین در این جا تغییر ریخت نانوذرات ساخته‌شده باید ناشی از فشار کل در هنگام ساخت نمونه‌ها باشد.

تصاویر SEM تهیه‌شده از نمونه‌های ساخته‌شده مطابق جدول ۲ در شکل ۳ نشان داده شده است. بررسی این تصاویر و مقایسه‌ی آن‌ها با نمونه‌های ساخته‌شده در فشار



شکل ۳- تصویر SEM نمونه‌های ساخته‌شده در فشار جزئی گاز اکسیژن الف- ۲۰۰ mbar، ب- ۸۵۰ mbar و ج- ۳۰۰۰ mbar و فشار کل ۵۰۰۰ mbar.

نتیجه‌ها و بحث

در تحقیق حاضر نشان داده شد که با کنترل فشار محفظه ساخت، می‌توان ریخت‌های مختلف اکسید روی را تولید نمود. در واقع با تغییر فشار محفظه‌ی ساخت، ریخت‌های مختلف از نانو ذرات اکسید روی (از ریخت‌های سیمی شکل گرفته تا ریخت‌های ستاره‌ای و کروی شکل) با موفقیت ساخته شد. الگوهای XRD نمونه‌های ساخته‌شده با الگوی پراشی که توسط گروه‌های دیگر برای اکسید روی به دست آمده است در توافق کامل بود. چون در این آزمایش، یکی از عوامل شرکت‌کننده در ساختار بلور (اکسیژن) خود عامل کنترل فشار وارد بر بلور در هنگام تشکیل نیز بود، سؤالی مطرح می‌شد؛ که آیا در اینجا این فشار یا نیروی اعمالی بر سطوح بلور است که ریخت نهایی (یا چگونگی رشد بلور) را تعیین می‌کند یا مثلاً تعداد اتم‌های اکسیژن حاضر در لحظه‌ی شکل‌گیری بلور در تعیین ریخت نهایی بلور دخیل می‌باشد؟ با تغییر فشار جزئی گاز اکسیژن (ضمن ثابت نگهداشتن فشار کلی) مشاهده گردید که ریخت نمونه‌ها کم و بیش مشابه ریخت نمونه‌های تولیدشده در اکسیژن خالص می‌باشد (شکل ۳). البته در مورد اخیر، دیگر اثری از قله‌ی مربوط به روی خالص که در الگوی پراش اشعه‌ی ایکس نمونه‌هایی که در فشار کم اتمسفر خالص دیده می‌شد، وجود نداشت.

به این ترتیب، از مقایسه‌ی الگوهای پراش اشعه‌ی ایکس و تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های حاضر با نمونه‌های ساخته‌شده در اتمسفر اکسیژن خالص، به این نتیجه رهنمون می‌شویم که آنچه در شکل‌گیری یک ریخت خاص نانوذرات اکسید روی دخیل است، تراکم (جمعیت) اتم‌های اکسیژن حاضر در لحظه‌ی تشکیل نانوذره می‌باشد، نه فشار کل. فشار کل تنها سبب جلوگیری از پراکنده شدن اتم‌های روی قبل از انجام واکنش با اتم‌های اکسیژن می‌شود. در واقع فشار کل با ایجاد فرصت کافی برای اتم‌های روی برای انجام واکنش با اتم‌های اکسیژن سبب می‌شود تا هیچ یک از اتم‌های روی نتواند به صورت خالص (ترکیب نشده) از منطقه انجام واکنش خارج بشود (بنابراین دیگر شاهد حضور Zn خالص در نمونه‌های ساخته‌شده در فشار کل بالا نیستیم). این فشار با توجه به آزمایش شرح داده‌شده، نقش چندانی در شکل هندسی و ریخت خارجی نانوذرات (در محدوده‌ی فشارهای آزموده شده در این پژوهش) ندارد.

آنچه باید به آن توجه شود این است که غالباً در فرآیند رشد بلور، افزایش یا کاهش فشار اعمال‌شده به اجزاء می‌تواند در فرآیند رشد بلور اثر داشته باشد [۳۵]. در مورد حاضر مسئله متفاوت است، چرا که عامل کنترل فشار (اکسیژن) خود در ساختار بلور قرار می‌گیرد یا به

تراکم‌های کم‌تر اکسیژن، بلور رشد می‌کند. در اینجا لازم به ذکر است که دیگران هم کار ما [۳۴] را تکرار کرده و نتایج مشابهی به دست آورده‌اند [۳۶].

نتیجه‌گیری

روش یادشده در این پژوهش، روشی موفق در ساخت ریخت‌های مختلف نانوذرات اکسید روی می‌باشد. بر اساس نتایج به دست آمده در این پژوهش، ریخت نانوذرات اکسید روی به طور مشخص به فشار جزئی (جمعیت اتم‌های اکسیژن) وابسته است. هم‌چنین این مطالعه نشان داد که فشار کل اعمالی در محدوده‌ی فشارهای مورد استفاده در این پژوهش تأثیر کم‌تری در شکل نهایی نانوذرات دارد.

تشکر و قدردانی

در اینجا بر خود لازم می‌دانیم تا از مجموعه‌ی آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شهید چمران اهواز به خاطر همکاری صمیمانه در انجام آنالیزها و هم‌چنین ستاد فناوری نانو و دانشگاه شهید چمران اهواز به دلیل حمایت مالی از این پژوهش، کمال تشکر و قدردانی را بنماییم.

منابع

- [1] Morkoc, H.; Özgür, Ü; "Zinc Oxide Fundamentals Materials and Device Technology", Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, (2009) 1-2.
- [2] Jain, A.; Sagar, P.; Mehra, R.M.; "Band gap widening and narrowing in moderately and heavily doped n-ZnO films", *Solid-State Electronics* 50 (2006) 1420-1424.
- [3] Sans, J.A.; Sánchez-Royo, J.F.; Segura, A.; "Study of the bandgap renormalization in Ga-doped ZnO films by means of optical

عبارت دیگر خود از اجزاء بلور می‌باشد. آزمایش فوق به وضوح نشان داد که در محدوده‌ی فشارهای به‌کاررفته در آزمایش ما، نیروی اعمالی بر سطوح بلور در هنگام تشکیل نانوذرات، نقش چندانی در رشد و شکل‌گیری ریخت نهایی آن ندارد، زیرا در هر سه آزمایش فوق نیروی اعمالی بر سطوح بلور در حال تشکیل یکسان بوده است (فشار کل در هر سه آزمایش ۵۰۰۰ mbar بود). اگر این نیرو عامل تعیین نحوه‌ی رشد و ریخت نهایی بلور می‌بود، باید در هر سه نمونه ریخت کم و بیش یکسانی را برای نانوذرات شاهد می‌بودیم که در عمل خلاف این مسئله مشاهده گردید.

دلیل افزایش رشد بلورها و تمایل آن‌ها را به رشد در حالت‌هایی که تراکم اتم‌های اکسیژن کم می‌باشد می‌توان با در نظر گرفتن موارد زیر دریافت: ۱- در کلیه آزمایش‌ها تعداد اتم‌های روی واردشده به منطقه‌ی تشکیل بلور تقریباً یکسان است (در تمام نمونه‌ها شرایط ایجاد اتم‌های روی یونیزه یکسان است). ۲- برای تشکیل بلور ZnO اتم‌های اکسیژن و روی باید به نوبت و به تناوب بر روی هسته اولیه قرار بگیرند تا ساختار بلوری شکل بگیرد. ۳- اگر جمعیت یکی از اجزاء سازنده‌ی بلور نسبت به دیگری در لحظه‌ی تشکیل بلور فزونی یابد، این جزء در رقابت با جزء کم جمعیت‌تر شانس بیشتری برای برخورد با هسته‌ی تشکیل‌شده دارد و بنابراین تناوب یادشده در شماره‌ی ۲ را به هم می‌زند. ۴- اگر اجزاء به تناوب به هسته اولیه نرسند، فرآیند رشد بلور در تمام راستاها مخدوش می‌شود و بنابراین بلور نمی‌تواند رشد کند و در نتیجه شکل ظاهری بلور یک شکل رشدنیافته خواهد بود. ۵- اگر بلور بتواند در تمام جهات رشد کند، ریخت بلور به سمت شکل‌های متقارن‌تر پیش می‌رود چرا که وجود عدم تقارن در ریخت ظاهری بلور ناشی از رشد بلور در یک یا چند جهت است. اکنون با در نظر گرفتن موارد یادشده، به سادگی می‌توان دریافت که چرا در هنگامی که تراکم اکسیژن زیاد است، شکل بلور به شکل‌های کروی (بیش‌ترین درجه تقارن) تمایل دارد، حال آن که در

- structural and the optical properties of ZnO nanostructures”, *Applied Surface Science* 256 (2010) 6117-6120.
- [10] Zhang, Z.H.; Qi, X.Y.; Jian, J.K.; Duan, X.F.; “Investigation on optical properties of ZnO nanowires by electron energy-loss spectroscopy”, *Micron* 37 (2006) 229-233.
- [11] Caglar, M.; Ilican, S.; Caglar, Y.; “Influence of dopant concentration on the optical properties of ZnO: In films by sol-gel method”, *Thin Solid Films* 517 (2009) 5023-5028.
- [12] Gu, X.Q.; Zhu, L.P.; Cao, L.; Ye, Z.Z.; He, H.P.; Chu, P.K.; “Optical and electrical properties of ZnO:Al thin films synthesized by low-pressure pulsed laser deposition”, *Materials Science in Semiconductor Processing* 14 (2011) 48-51.
- [13] Pal, U.; Garcia-Serrano, J.; Casarrubias-Segura, G.; Koshizaki, N.; Sasaki, T.; Terahuchi, S.; “Structure and optical properties of M/ZnO (M=Au, Cu, Pt) nanocomposites”, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 81 (2004) 339-348.
- [14] Suwanboon, S.; Amornpitoksuk, P.; “Preparation and characterization of nanocrystalline La-doped ZnO powders through a mechanical milling and their optical properties”, *Ceramics International* 37 (2011) 3515-3521.
- [15] Zhaoyang, W.; Liyuan, S.; Lizhong, H.; “Effect of laser repetition frequency on the structural and optical properties of ZnO thin films by PLD”, *Vacuum* 85 (2010) 397-399.
- absorption under high pressure and photoelectron spectroscopy”, *Superlattices and Microstructures* 43 (2008) 362-367.
- [4] Sun, J.; Feng, Q.; Bian, J.; Yu, D.; Li, M.; Li, C.; Liang, H.; Zhao, J.; Qiu, H.; Du, G.; “Ultraviolet electroluminescence from ZnO-based light-emitting diode with p-ZnO:N/n-GaN:Si heterojunction structure Original Research Article”, *Journal of Luminescence* 131 (2011) 825-828.
- [5] Deng, S.H.; Duan, M.Y.; He, M.; Xu, L.; “Effect of La doping on the electronic structure and optical properties of ZnO”, *Physica B: Condensed Matter* 406 (2011) 2314-2318.
- [6] Zhang, B.; Yao, B.; Wang, S.; Li, Y.; Shan, C.; Zhang, J.; Li, B.; Zhang, Z.; Shen, D.; “Influence of Zn/O ratio on structural, electrical and optical properties of ZnO thin films fabricated by plasma-assisted molecular beam epitaxy”, *Journal of Alloys and Compounds* 503 (2010) 155-158.
- [7] Li, F.M.; Bo, L.T.; Ma, S.Y.; Huang, X.L.; Ma, L.G.; Liu, J.; Zhang, X.L.; Yang, F.C.; Zhao, Q.; “Effects of the oxygen partial pressure and annealing atmospheres on the microstructures and optical properties of Cu-doped ZnO films”, *Superlattices and Microstructures* 51 (2012) 332-342.
- [8] Suwanboon, S.; Amornpitoksuk, P.; Muensit, N.; “Dependence of photocatalytic activity on structural and optical properties of nanocrystalline ZnO powders”, *Ceramics International* 37 (2011) 2247-2253.
- [9] Yang, H.Y.; Lee, S.H.; Kim, T.W.; “Effect of zinc nitrate concentration on the

- transparent contact by reactive rotatable magnetron sputtering for Cu(In,Ga)Se₂ solar modules”, *Thin Solid Films* 519 (2011) 7541-7544.
- [23] Muccillo, E.N.S.; Tadokoro, S.K.; Muccillo, R.; “Physical characteristics and sintering behavior of MgO-doped ZrO₂ nanoparticles”, *Journal Nanopart Res* 6 (2004) 301e5-301e9.
- [24] He, C.; Sasaki, T.; Shimizu, Y.; Koshizaki, N.; “Synthesis of ZnO nanoparticles by pulsed laser ablation in aqueous media and their self-assembly towards spindle-like ZnO aggregates”, *Applied Surface Science* 254 (2008) 2196-2202.
- [25] Wang, S.F.; Tseng, T.Y.; Wang, Y.R.; Wang, C.Y.; Lu, H.C.; “Effect of ZnO seed layers on the solution chemical growth of ZnO nanorod arrays”, *Ceramics International* 35 (2009) 1255-1260.
- [26] Kong, B.H.; Cho, H.K.; “Formation of vertically aligned ZnO nanorods on ZnO templates with the preferred orientation through thermal evaporation”, *Journal of Crystal Growth* 289 (2006) 370-375.
- [27] Breedon, M.; Rahmani, M.B.; Keshmiri, S.H.; Wlodarski, W.; Kalantarzadeh, K.; “Aqueous synthesis of interconnected ZnO nanowires using spray pyrolysis deposited seed layers”, *Materials Letters* 64 (2010) 291293.
- [28] Maric, R.; Oljaca, M.; Vukasinovic, B.; Hunt, A.T.; “Synthesis of oxide nanopowders in nanospray diffusion flames”, *Materials and Manufacturing Processes* 19 (2004) 1143-1156.
- [16] Guérin, V.M.; Rathousky, J.; Pauporté, Th.; “Electrochemical design of ZnO hierarchical structures for dye-sensitized solar cells”, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 102 (2012) 8-14.
- [17] Chen, C.; Yang, P.; Shen, Y.; Ma, S.; Shiu, S.; Hung, S.; Lin, S.; Lin, C.; “The influence of wrinkled ZnO on inverted low bandgap thin film solar cells”, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 101 (2012) 180-185.
- [18] Lu, L.; Li, R.; Fan, K.; Peng, T.; “Effects of annealing conditions on the photoelectrochemical properties of dye-sensitized solar cells made with ZnO nanoparticles”, *Solar Energy* 84 (2010) 844-853.
- [19] Baek, S.; Kim, S.; Shin, J.; Kim, J.H.; “Preparation of hybrid silicon wire and planar solar cells having ZnO antireflection coating by all-solution processes”, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 96 (2012) 251-256.
- [20] Sio, A.D.; Chakanga, K.; Sergeev, O.; Maydell, K.V.; Parisi, J.; Hauff, E.V.; “ITO-free inverted polymer solar cells with ZnO:Al cathodes and stable top anodes”, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 98 (2012) 52-56.
- [21] Crossay, A.; Buecheler, S.; Kranz, L.; Perrenoud, J.; Fella, C.M.; Romanyuk, Y.E.; Tiwari, A.N.; “Spray-deposited Al-doped ZnO transparent contacts for CdTe solar cells”, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 101 (2012) 283-288.
- [22] Menner, R.; Hariskos, D.; Linss, V.; Powalla, M.; “Low-cost ZnO:Al

- [۳۳] فرید، م؛ پرهوده، س؛ حسنی‌متین، م.م؛ کاظمی‌نژاد، ا؛ "تولید کربن ۶۰ و نانولوله‌های کربنی به روش قوس الکتریکی و بررسی اثر میدان مغناطیسی بر افزایش تولید و خلوص نانولوله‌های کربنی"، مجله‌ی علوم دانشگاه شهید چمران اهواز، ۲۶، ۱۳۸۹، ۳۸-۴۴.
- [34] Zargar Shoushtari, M.; Parhoodeh, S.; Farbod, M.; "Fabrication and characterization of zinc oxide nanoparticles by DC arc plasma", *Journal Physics Conference Series* 100 (2008) 052017.
- [35] Sunagawa, I.; "Crystals growth, morphology and perfection", Cambridge University Press New York, (2005).
- [36] Yang, S.L.; Gao, R.S.; Yang, B.; Niu, P.L.; Yu, R.H.; "Morphology-controlled growth of tetrapod ZnO nanostructures by direct arc discharge", *Applied Physics A: Materials Science & Processing* 99 (2010) 9-13.
- [29] Vafaei, M.; SasaniGhamsari, M.; "Preparation and characterization of ZnO nanoparticles by a novel sol-gel route", *Materials Letters* 61 (2007) 3265-3268.
- [30] Wang, Y.; Sun, J.; Fan, X.Y.; Yu, X.; "A CTAB-assisted hydrothermal and solvothermal synthesis of ZnO nanopowders", *Ceramics International* 37 (2011) 3431-3436.
- [31] Jung, S.H.; Jeong, S.H.; "Selective-area growth of ZnO nanorod arrays via a sonochemical route", *Materials Letters* 62 (2008) 3673-3675.
- [32] Lu, H.; Yu, X.; Zeng, Z.; Chen, D.; Bao, K.; Zhang, L.; Wang, H.; Xu, H.; Zhang, R.; "DC-field-induced synthesis of ZnO nanowhiskers in water-in-oil microemulsions", *Ceramics International* 37 (2011) 287-292.