

## خواص اپتیکی و ساختاری میله‌های شش گوشه اکسید روی رشد داده شده به روش نشست بخار شیمیایی

وحید واحدی، علی ریحانی و محمدرضا خانلری

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

پست الکترونیکی: reyhani@sci.ikiu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۲۵؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۳/۲/۲۲)

### چکیده

در این پژوهش، میله‌های هرمی شش گوشه اکسید روی نانوساختار با کیفیت ساختاری و اپتیکی بالا از طریق یک روش ساده مبتنی بر نشست بخار شیمیایی پودر Zn بدون استفاده از هیچ کاتالیز فلزی، رشد داده شدند. ریخت‌شناسی سطح نمونه‌ها با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مشخص گردید. نتایج حاصل از آنالیز XRD نشان داد میله‌های هرمی اکسید روی دارای ساختار ورتزایت با قله ترجیحی قوی (۰۰۲) می‌باشد. بررسی خواص اپتیکی نمونه‌ها با استفاده از طیف فوتولومینسانس، یک قله قوی گسیل فرابنفش در ۳۸۰ نانومتر را نشان داد. کیفیت و عناصر تشکیل‌دهنده میله‌های هرمی اکسید روی با استفاده از طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) در دمای اتاق تعیین گردید. همچنین ساز و کار رشد میله‌های هرمی شش گوشه اکسید روی به‌طور مختصر بحث شده است.

**واژه‌های کلیدی:** اکسید روی، نانوساختار، میله‌های هرمی شش گوشه، نشست بخار شیمیایی، خواص اپتیکی و ساختاری

### ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، مواد نانوساختار اکسید روی به‌عنوان یک نیم‌رسانای پرکاربرد توجه بسیار زیادی را به خود جلب کرده است. اکسید روی دارای یک گاف نواری پهن و مستقیم (۳.۳۷ eV) و انرژی بستگی اکسایتونی بالا (در حدود ۶۰ meV) در دمای اتاق می‌باشد که این خواص منحصر به فرد، نانوساختارهای اکسید روی را به‌عنوان یک کاندیدای مهم جهت کاربرد در دیودهای گسیل‌کننده نور (LED)، نانو لیزرهای فرابنفش، آشکارسازهای نوری، سلول‌های خورشیدی

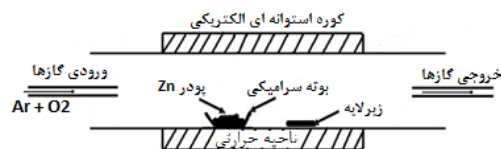
رنگدانه‌ای و حسگرهای گازی معرفی می‌کند [۱-۴].

جهت رشد نانوساختارهای اکسید روی تکنیک‌های مختلفی به مانند سل-ژل [۵]، افشانه پیرولیز [۶]، کند و پاش [۷]، لایه نشانی لیزر تپ [۸]، هیدروترمال [۹] و انباشت بخار شیمیایی (CVD) [۱۰] به‌کار برده شده است. در میان روش‌های رشد نانوساختارهای اکسید روی، نشست بخار شیمیایی دارای مزیت‌های فراوانی از جمله خلوص بالای نمونه، دستیابی به انواع ریخت‌شناسی‌های جدید جهت کاربرد در وسایل گوناگون و هزینه تولید پایین‌تر می‌باشد. تاکنون تلاش‌های فراوانی جهت

در این پژوهش میله‌های هرمی شش گوشه اکسید روی نانوساختار با کیفیت ساختاری و اپتیکی بالا از طریق یک روش ساده مبتنی بر نشست بخار شیمیایی پودر Zn بدون استفاده از هیچ کاتالیستی، به‌طور موفقیت‌آمیزی رشد داده شدند. همچنین در طول فرآیند رشد از هیچ‌گونه تجهیزات خلایی استفاده نگردید که امتیاز دیگری در روش رشد به‌کار گرفته شده می‌باشد. نمونه‌های رشد داده شده با ساختار میله‌های هرمی، به جهت کیفیت بالای اپتیکی، ساختاری و همچنین ریخت‌شناسی منحصر به فردشان می‌توانند در وسایل مختلف اپتیکی و اپتوالکترونیکی مورد استفاده قرار گیرند. به‌علاوه فرآیند رشد نمونه‌ها بر پایه ساز و کار جامد-بخار (VS) بحث شده است.

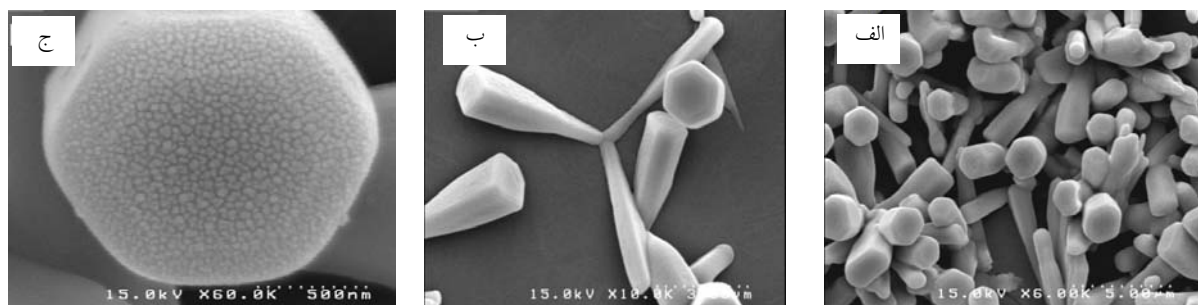
## ۲. مواد و روش تحقیق

میله‌های هرمی شش گوشه اکسید روی نانوساختار توسط روش نشست بخار شیمیایی با استفاده از پودر Zn خالص (Merck ۹۹٫۹۹٪) در یک کوره افقی الکتریکی رشد داده شدند. از یک لوله کوارتز با قطر ۵ cm و طول ۱۱۰ cm قرار گرفته درون کوره الکتریکی به‌عنوان محفظه واکنش استفاده شد. مقدار ۰٫۵ گرم از پودر Zn درون بوتله‌ای از جنس سرامیک ریخته شده و در مرکز کوره استوانه‌ای قرار گرفت. شیشه‌های تختی از جنس کوارتز آمورف (ساخت کشور آلمان) در ابعاد ۱ cm × ۱ cm و با ضخامت ۱ mm به‌عنوان زیرلایه با قابلیت تحمل دمای مد نظر استفاده گردید. پیش از شروع فرآیند رشد، ابتدا زیر لایه‌ها با مواد شوینده تمیز و به‌مدت ۱۰ دقیقه به‌ترتیب در محلول الکل و استون در حمام التراسونیک جهت از بین بردن چربی‌ها و ناخالصی‌ها قرار داده شدند. سپس به‌مدت ۲۰ دقیقه در آب دی-یونیزه در حمام التراسونیک شستشو و خشک شدند. فاصله مواد چشمه از زیرلایه‌ها در حدود ۲ cm بود. طرحواره دستگاه رشد مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. از گاز آرگون خالص به‌عنوان گاز حامل و از اکسیژن خالص به‌عنوان گاز واکنش‌دهنده استفاده گردید. واکنش در فشار اتمسفر و بدون استفاده از هیچ کاتالیستی انجام پذیرفت. دمای محفظه واکنش با نرخ گرمایی ۲۰°C/min تحت



شکل ۱. طرحواره دستگاه رشد میله‌های هرمی اکسید روی به‌روش نشست بخار شیمیایی.

دستیابی به ساختارهای متنوع اکسید روی از جمله نانوذره، نانو میله، نانوسیم، نانو لوله، نانو گل و نانو فنر از طریق تکنیک نشست بخار شیمیایی توسط محققان مختلف صورت گرفته است [۱۱-۱۳]. رشد نانومیله‌های هم جهت اکسید روی بر روی زیرلایه‌های سیلیکان و یا قوت کبود در دمای ۷۰۰°C با استفاده از پودر Zn توسط سیریویستا و همکارانش گزارش شده است [۱۴]. اخیراً لیان و همکارانش با مخلوط کردن پودرهای اکسید روی خالص و گرافیت با خلوص بالا موفق به رشد نانو میله‌های گل شکل بر روی بستر سیلیکانی در دمای ۹۰۰°C شدند [۱۵]. همچنین ژانگ و همکارانش به بررسی نانومیله‌های رشد یافته بر روی سطوح مختلف طلا، نیکل، سیلیکان و سیلیکان نیتراژ پرداخته‌اند [۱۶]. جای سینگ و همکارانش تشکیل نانومیله‌های اکسید روی بر روی بستر فیلم اکسید روی و مشخصه‌های گسیل میدانی آن را گزارش کرده‌اند [۱۷]. همچنین ما در پژوهش پیشین، نانوسیم‌های اکسید روی را توسط یک روش ساده و مقرون به صرفه، از طریق اکسیداسیون حرارتی لایه‌های نازک Zn در محیط هوا به‌طور موفقیت‌آمیزی رشد داده‌ایم [۱۸]. در این مقاله اثر دمای اکسیداسیون حرارتی لایه‌های نازک Zn بر روی رشد و خواص ساختاری نانوسیم‌های اکسید روی بررسی شده است و دمای ۶۰۰°C، به‌عنوان دمای بهینه معرفی گشته است. به هر جهت در مقایسه با پژوهش‌های صورت گرفته جهت رشد چنین نانوساختارهایی، مطالعات صورت گرفته پیرامون رشد میله‌های هرمی شش گوشه اکسید روی نسبتاً کمتر بوده است. همچنین در اکثر این موارد از دستگاه خلاء بالا و یا کاتالیست جهت رشد نانوساختارهای اکسید روی استفاده شده است که باعث حضور ناخالصی در محصول نهایی می‌گردد.



شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از میله‌های هرمی شش گوشه اکسید روی تهیه شده در محیط اکسیژن با (الف) مقیاس  $5\ \mu\text{m}$ ، (ب) از کناره‌های سطح زیر لایه با مقیاس  $3\ \mu\text{m}$  و (ج) با مقیاس  $500\ \text{nm}$  جهت نشان دادن سطح مقطع شش گوشه ساختارها.

میانگین اندازه ابتدای این نانومیله‌های هرمی برابر با  $350\ \text{nm}$  می‌باشد که هر چه به انتهای آن نزدیک‌تر می‌شویم، قطر آن افزایش می‌یابد. انتهای این ساختارها کاملاً به شکل شش ضلعی (شش گوشه) می‌باشد. میانگین طول نانومیله‌ها و قطر انتهای آنها به ترتیب  $4/3\ \mu\text{m}$  و  $1/4\ \mu\text{m}$  است. اکسید روی از لحاظ ساختاری در حالت پایدار، ساختار شش گوشه ورتسایت دارد. تشکیل میله‌های هرمی شش گوشه در محیط اکسیژن می‌تواند نشان‌دهنده کیفیت ساختاری بالای نمونه‌های رشد یافته، باشد. شکل ۲- (ب) تصویر SEM ساختارهای رشد یافته در کناره زیرلایه کوارتز را نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصویر مشخص است، از به هم چسبیدن ابتدای سه میله هرمی شش گوشه ساختار جالبی شکل گرفته است که در علم نانو، اصطلاحاً به آن tripod گفته می‌شود. همچنین در شکل ۲- (ج) تصویر سطح مقطع شش گوشه این ساختارها با دقت بالاتر (مقیاس  $500\ \text{nm}$  نانومتر) نشان داده شده است.

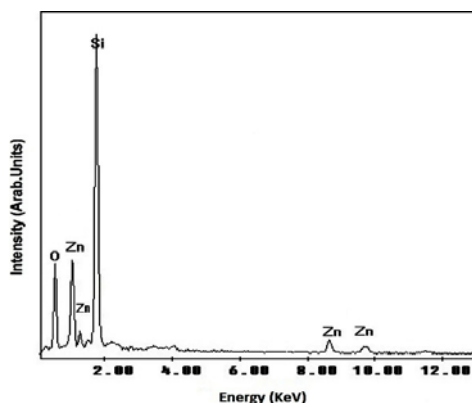
شکل ۳ طیف پراش پرتوی ایکس میله‌های هرمی شش گوشه رشد داده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. تمامی قله‌های موجود در طیف پراش، به خوبی معرف ساختار بلوری شش گوشه ورتزایت اکسید روی با جهت‌گیری ترجیحی ( $002$ ) می‌باشند (مطابقت با کارت استاندارد شماره ۱۴۵۱-۳۶). قله پراش تیز و برجسته در  $2\theta = 34/53^\circ$  مربوط به صفحه ( $002$ ) اکسید روی می‌باشد و نشان می‌دهد که نانوساختارهای رشد یافته جهت‌گیری ترجیحی محور  $c$  دارند و عمود بر سطح زیرلایه رشد کرده‌اند [۱۹]. هیچ قله پراشی ناشی از ناخالصی یا

شارش گاز آرگون با نرخ  $70\ \text{sccm}$  به دمای  $950^\circ\text{C}$  رسید. در این دما، گاز اکسیژن با نرخ شارش  $80\ \text{sccm}$  به مدت ۲۰ دقیقه به درون محفظه واکنش فرستاده شد. در این مرحله از واکنش، زیرلایه‌های کوارتز در دمای  $900^\circ\text{C}$  قرار داشتند. سپس کوره الکتریکی خاموش شد و پس از رسیدن به دمای محیط، نمونه‌ها از داخل محفظه خارج شدند. مشاهدات اولیه نشان داد که لایه بسیار نازک سفید رنگی، سطح زیرلایه کوارتز را پوشانده است که نشان‌دهنده تشکیل نانوساختارهای اکسید روی می‌باشد.

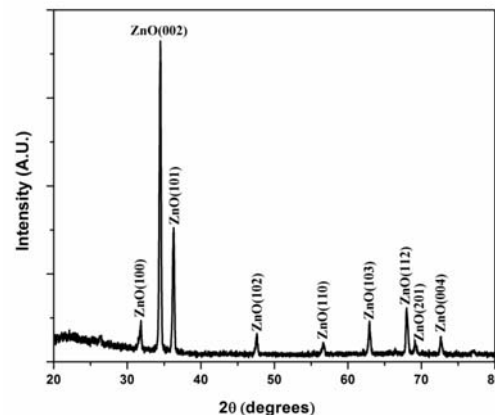
ریخت‌شناسی سطح نانوساختارها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل S۴۱۶۰ ساخت شرکت هیتاچی ژاپن تعیین شد. خواص ساختاری نمونه‌ها با دستگاه پراش پرتوی ایکس (XRD) مدل Pw ۱۸۰۰ ساخت شرکت Philips هلند بررسی گردید. خواص اپتیکی میله‌های هرمی اکسید روی با استفاده از طیف فوتولومینسانس در دمای اتاق توسط دستگاه لومینسانس مولکولی مدل Varian Cary Eclipse و طول موج تحریک  $325\ \text{nm}$  نانومتر مطالعه شد. طیف تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) نمونه‌ها توسط دستگاه طیف سنج مدل Bruker-Vertex مطالعه شد.

### ۳. نتایج و بحث

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نانوساختارهای اکسید روی تشکیل شده بر روی زیر لایه کوارتز توسط تکنیک نشست بخار شیمیایی در شکل ۲ نشان داده شده است. این نانوساختارها به شکل میله‌های هرمی شش گوشه می‌باشند.



شکل ۴. طیف EDX حاصل از میله‌های هرمی شش گوشه اکسید روی.



شکل ۳. طیف پراش پرتوی ایکس میله‌های هرمی شش گوشه اکسید روی رشد داده شده از طریق روش نشست بخار شیمیایی.

شده است. قله Si مربوط به عنصر تشکیل دهنده زیرلایه کوارتز می‌باشد. همان‌طور که از شکل قابل مشاهده است، در طیف EDX نمونه‌ها به جز اکسیژن و روی عنصر دیگری یافت نشد. هیچ قله دیگری ناشی از ناخالصی دیده نشد که نشان دهنده رشد میله‌های هرمی شش گوشه اکسید روی با درجه خلوص نسبتاً بالا می‌باشد. این نتایج، یافته‌های حاصل از آنالیز پراش پرتوی ایکس را تأیید می‌کند.

طیف فوتولومینسانس میله‌های هرمی شش گوشه اکسید روی با استفاده از یک لامپ زنون به‌عنوان منبع تحریک با طول موج ۳۲۵ nm حاصل شد. شکل ۵ طیف فوتولومینسانس میله‌های هرمی اکسید روی را در دمای اتاق نشان می‌دهد. به‌طور کلی دو قله مهم در طیف فوتولومینسانس نانوساختارهای اکسید روی ظاهر می‌گردد: یک قله نشری در ناحیه فرابنفش که به دلیل بازترکیب اکسایتون‌های آزاد از یک فرآیند برخوردی اکسایتون-اکسایتون ظاهر می‌گردد و به‌عنوان نشر لبه نوار نزدیک (NBE) شناخته شده است. قله دیگر، نشر-تراز-عمیق یا نشر سبز نام دارد که در ناحیه مرئی و به‌علت حضور اتم‌های Zn بین‌جایگاهی<sup>۱</sup> و جاهای خالی اکسیژن ظاهر می‌شود [۲۳]. در طیف فوتولومینسانس میله‌های هرمی رشد داده شده توسط روش نشست بخار شیمیایی در

Zn فلزی اضافی در طیف پراش پرتوی ایکس نمونه‌ها مشاهده نشد که بیانگر رشد نانوساختارهای اکسید روی به‌صورت نسبتاً خالص می‌باشد.

ثابت‌های شبکه شش گوشه میله‌های هرمی رشد داده شده با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردیدند: [۲۰]

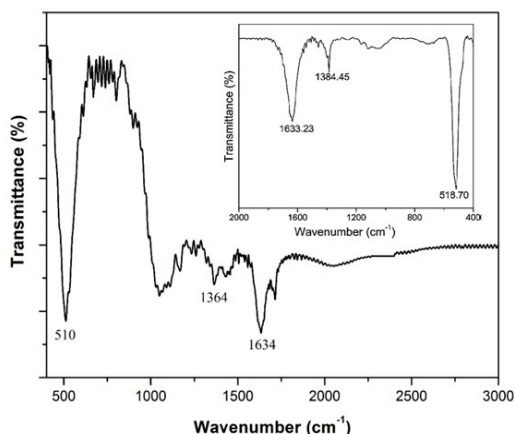
$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left( \frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (1)$$

در این رابطه  $h$ ،  $k$  و  $l$  اندیس‌های میلر صفحات،  $d$  فاصله بین صفحات بلوری،  $a$  و  $c$  ثابت‌های شبکه شش گوشه می‌باشند. با قرار دادن اندیس‌های میلر قله پراش ترجیحی ZnO ( $h=0, k=0, l=2$ ) در رابطه (۱)، به رابطه ساده زیر دست می‌یابیم:

$$c = 2d_{002} \quad (2)$$

با انجام محاسبات بالا، مقدار ثابت‌های شبکه  $a$  و  $c$  ساختار شش گوشه ZnO به ترتیب  $3.24 \text{ \AA}$  و  $5.19 \text{ \AA}$  به دست آمد که در توافق بسیار خوبی با مقادیر گزارش شده توسط دیگر محققان است [۲۱]. لازم به ذکر است که مقادیر استاندارد ثابت‌های شبکه  $a$  و  $c$  ساختار شش گوشه اکسید روی (مربوط به کارت استاندارد شماره ۱۴۵۱-۳۶) به ترتیب برابر با  $3.24 \text{ \AA}$  و  $5.20 \text{ \AA}$  گزارش شده است [۲۲].

در شکل ۴ طیف EDX میله‌های هرمی اکسید روی رشد داده شده به منظور تعیین عناصر تشکیل دهنده آن نشان داده

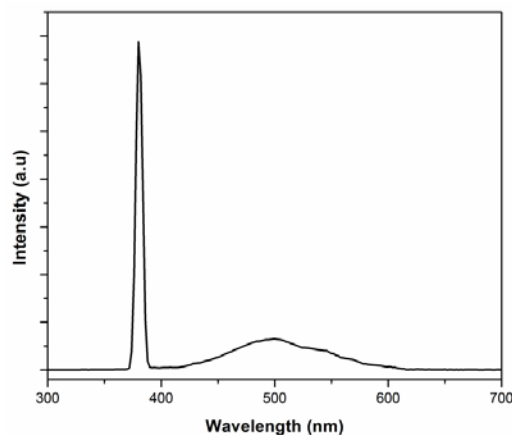


شکل ۶. طیف FTIR میله‌های هرمی شش گوشه اکسید روی رشد داده شده. تصویر الحاقی در قسمت بالایی شکل، طیف FTIR استاندارد نانومیله‌های اکسید روی را جهت مقایسه نشان می‌دهد [۲۱].

این پژوهش، یک قله قوی و با شدت بالا در ناحیه فرابنفش در طول موج  $380\text{ nm}$  و قله ضعیف و پهن در اطراف  $500\text{ nm}$  مشاهده می‌گردد. قله نشر فرابنفش در طیف فوتولومینسانس به کیفیت ساختارهای رشد داده شده بستگی دارد. به طوری که اگر کیفیت بلوری نانو ساختارهای رشد داده شده بهبود یابد، شدت قله فرابنفش نیز افزایش می‌یابد [۲۴]. علاوه بر این، دای و همکارانش در پژوهشی به این نتیجه رسیدند که اگر تمرکز جای خالی اکسیژن در نمونه‌های رشد داده شده کاهش بیابد، یک قله نشر فرابنفش قوی و تیز به همراه یک قله سبز ضعیف و پهن در طیف فوتولومینسانس ظاهر می‌شود [۲۵]. شدت نسبی بالای قله فرابنفش نسبت به قله نشر سبز، نشان‌دهنده کیفیت بلوری بالا و میزان نقایص ساختاری بسیار کم میله‌های هرمی شش گوشه اکسید روی می‌باشد. این نتایج با یافته‌های حاصل از آنالیز پراش پرتوی ایکس تأیید می‌شود. کیفیت و عناصر تشکیل‌دهنده میله‌های هرمی اکسید روی با استفاده از طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) در دمای اتاق در محدوده  $400\text{ cm}^{-1}$  تا  $3000\text{ cm}^{-1}$  تعیین گردید. شکل ۶، طیف تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) میله‌های هرمی شش گوشه اکسید روی را برحسب عدد موج نشان می‌دهد. در طیف FTIR حاصل، سه پیوند جذبی برجسته در اطراف  $510\text{ cm}^{-1}$ ،  $1364\text{ cm}^{-1}$  و  $1634\text{ cm}^{-1}$  وجود دارد. قله جذبی در اطراف  $510\text{ cm}^{-1}$  مربوط به پیوند جذبی Zn-O می‌باشد و مشخصه فاز شش گوشه ورتزایت اکسید روی خالص است [۲۶]. دو پیوند جذبی دیگر در اطراف  $1364\text{ cm}^{-1}$  و  $1634\text{ cm}^{-1}$  در طیف IR میله‌های هرمی نیز مرتبط با اکسید روی می‌باشد [۲۷]. این قله‌ها به ارتعاشات کششی Zn-O در بلور اکسید روی نوع شش گوشه ورتزایت نسبت داده شده است [۲۸]. قله عمده دیگری در طیف مشاهده نشده است که تصدیق می‌کند نانومیله‌های هرمی رشد داده شده در محیط اکسیژن، اکسید روی نسبتاً خالص می‌باشند. این نتایج یافته‌های حاصل از آنالیز پراش پرتوی ایکس (XRD) را تأیید می‌کند. همچنین به جهت مقایسه با یک نمونه استاندارد، طیف FTIR مربوط به نانومیله‌های اکسید روی که توسط لیبنگ فنگ و همکارانش [۲۱] گزارش شده است؛ در تصویر الحاقی شکل ۶ (سمت راست، بالا) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پیوندهای جذبی در این تصویر به ترتیب در اطراف  $510\text{ cm}^{-1}$ ،  $1364\text{ cm}^{-1}$  و  $1634\text{ cm}^{-1}$  می‌باشند. در نتیجه طیف FTIR حاصل از میله‌های هرمی شش گوشه در این پژوهش، در توافق بسیار خوبی با نمونه‌های استاندارد گزارش شده است.

#### ۴. ساز و کار رشد

از میان دو ساز و کار پذیرفته شده اصلی جهت رشد



شکل ۵. طیف فوتولومینسانس (PL) میله‌های هرمی شش گوشه اکسید روی رشد داده شده.

از میان دو ساز و کار پذیرفته شده اصلی جهت رشد

گوشی‌های اکسید روی بر روی سطح زیرلایه کوارتز می‌شود.

## ۵. نتیجه‌گیری

میله‌های هرمی شش گوشه‌ی اکسید روی نانوساختار با کیفیت ساختاری و اپتیکی بالا از طریق روش نشست بخار شیمیایی پودر Zn بدون استفاده از هیچ کاتالیست فلزی، با موفقیت رشد داده شدند. تعیین ریخت‌شناسی سطح با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که نانو ساختارهای اکسید روی به شکل میله‌های هرمی شش گوشه می‌باشند که هر چه به انتهای آن نزدیک‌تر می‌شویم، قطر آن افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از آنالیز XRD، ساختار شش گوشه‌ی ورتسایت اکسید روی با قله ترجیحی قوی (۰۰۲) را نشان داد که بیانگر جهت‌گیری ترجیحی محور c نمونه‌های رشد یافته می‌باشد. طیف فوتولومینسانس نمونه‌ها در دمای اتاق حضور یک قله قوی گسیل فرابنفش و یک قله با شدت پایین و پهن در ناحیه مرئی را نشان داد. مطالعات طیف‌سنجی FTIR نشان داد که قله جذبی در اطراف  $510\text{ cm}^{-1}$  مربوط به پیوند جذبی Zn-O می‌باشد و مشخصه فاز شش گوشه‌ی ورتزایت اکسید روی خالص است. همچنین فرآیند رشد میله‌های هرمی شش گوشه‌ی اکسید روی از ساز و کار رشد بخار- جامد (VS) پیروی می‌کند. نمونه‌های رشد داده شده با ساختار هرمی، به جهت کیفیت بالای اپتیکی، ساختاری و همچنین ریخت‌شناسی منحصر به فردشان می‌توانند در وسایل مختلف اپتیکی و اپتوالکترونیکی مورد استفاده قرار گیرند.

ساختارهای یک بعدی، ساز و کار رشد بخار- مایع- جامد (VLS)، یک فرآیند وابسته به کاتالیست می‌باشد که در آن یک ذره کاتالیست فلزی به‌عنوان یک عامل تشکیل مایع عمل می‌کند [۲۹]. در فرآیند رشد میله‌های هرمی شش گوشه‌ی اکسید روی به‌روش حاضر از هیچ کاتالیستی استفاده نشده است، و همچنین هیچ قطره آلیازی در بالا، انتها یا لبه هرم‌ها در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مشاهده نشد. بنابراین فرآیند رشد می‌تواند براساس ساز و کار بخار- جامد (VS) توجیه شود [۳۰]. ساز و کار رشد میله‌های هرمی شش گوشه به دو بخش عمده تقسیم می‌شود: تشکیل هسته و رشد [۳۱]. هنگامی که دمای محفظه واکنش به بالاتر از  $500^{\circ}\text{C}$  می‌رسد (دمای ذوب Zn فلزی  $419.5^{\circ}\text{C}$  می‌باشد)، بخار Zn از مواد چشمه حاصل می‌شود. بخار Zn توسط گاز حامل آرگون انتقال داده می‌شود و تمامی سطح زیرلایه را به‌صورت فیلم Zn پوشش می‌دهد. سپس فیلم Zn لایه نشانی شده، شروع به هسته‌سازی می‌کند که منجر به تشکیل هسته‌های Zn بر روی سطح زیرلایه می‌شود. هنگامی که دما به  $950^{\circ}\text{C}$  می‌رسد، با فرستادن گاز اکسیژن به درون محفظه، این هسته‌های Zn اکسید شده و به شکل هسته‌های اکسید روی با ریخت‌شناسی دانه‌ای یا شش گوشه‌ی درمی‌آیند. پس از فرآیند تشکیل هسته، بخار Zn و اکسیژن در فاز گازی با معادله شیمیایی ساده  $Zn(g) + O_2(g) \rightarrow ZnO(g)$  واکنش می‌دهند. بخارهای ZnO و همچنین دیگر مشتقات حاصل ( $ZnO_x$ ) بر روی هسته‌های اکسید روی از پیش تشکیل شده در ادامه واکنش رسوب می‌کند که منجر به رشد بیشتر و تشکیل میله‌های هرمی شش

## مراجع

1. L Chow, O Lupan, H Heinrich, and G Chai, *Appl. Phys. Lett.* **94** (2009) 163105.
2. M A Zimmler, T Voss, C Ronning, and F Capasso, *Appl. Phys. Lett.* **94** (2009) 241120.
3. M H Zhao, Z Z Ye, and S X Mao, *Phys. Rev. Lett.* **102** (2009) 045502.
4. S Yun, J Lee, J Yang, and S Lim, *Physica B* **405** (2010) 413.
5. A Chiappini, C armellini, A Chiasera, M Ferrari, R Guider, Y Jestin, L Minati, E Moser, G Nunzi Conti,
6. S Pelli, R Retoux, G C Righini, and G Speranza, *J. Non-Cryst. Solids* **355** (2009) 1132.
7. M T Htay, Y Tani, Y Hashimoto, and K Ito, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* **20** (2009) 341.
8. M A Hernández, R Alvaro, S Serrano, and J L Costa-Krämer, *Nanoscale Res. Lett.* **24** (2011) 437.
9. B Q Cao, M Lorenz, A Rahm, H Wenckstem, C Czekalla, J Lenzner, G Benndorf, and M Grundmann, *Nanotechnology* **18** (2007) 455707.

20. D Raoufi, and T Raoufi, *Applied Surface Science* **225** (2009) 5812.
21. L Feng, A Liu, M Liu, Y Ma, J Wei, and B Man, *Journal of Alloys and Compounds* **492** (2010) 427.
22. H Tang, Z Ye, L Zhu, H He, B Zhao, Y Zhang, M Zhi, and Z Yang, *Physica E* **40** (2008) 507.
23. A Umar, E K Suh, and Y B Hahn, *Solid State Communications* **139** (2006) 447.
24. D M Bagnall, Y F Chen, Z Zhu, T Yao, S Koyama, M Y Shen, and T Goto, *Appl. Phys. Lett.* **73** (1998) 1038.
25. Y Dai, Y Zhang, Y Q Bai, and Z L Wang, *Chem. Phys. Lett.* **375** (2003) 96.
26. L Wu, Y Wu, and W Lü, *Physica E* **28** (2005) 76.
27. M Chang, X L Cao, H B Zeng, and L D Zhang, *Chem. Phys. Lett.* **446** (2007) 370.
28. S C Lyu, Y Zhang, H Ruh, H J Lee, H W Shim, and E K Suh, *Chem Phys Lett.* **363** (2002) 134.
29. A Umar, J P Jeong, E K Suh, and Y B Hahn, *Korean J. Chem. Eng.* **23** (2006) 860.
30. P Yang and C M Lieber, *J. Mater. Res.* **12** (1997) 2981.
31. S Kim, A Umar, and Y B Hahn, *Korean J. Chem. Eng.* **22** (2005) 489.
9. H Jiang, J Q Hu, F Gu, and C Z Li, *J. Alloys Compd.* **478** (2009) 550.
10. N Zhang, R Yi, R R Shi, G H Gao, G Chen, and X H Liu, *Mater. Lett.* **63** (2009) 496.
11. P X Gao, Y Ding, and Z L Wang, *Nano Lett.* **3** (2003) 1315.
12. J J Wu, S C Liu, C T Wu, K H Chen, and L C Chen, *Appl. Phys. Lett.* **81** (2002) 1312.
13. Y J Zhang, N L Wang, S P Gao, R R He, S Miao, J Liu, J Zhu, and X Zhang, *Chem. Mater.* **14** (2002) 3564.
14. K M K Srivatsa, D Chhikara, and M S Kumar, *J. Mater. Sci. Technol.* **27** (2011) 701.
15. J H Zheng, Q Jiang, and J S Lian, *Applied Surface Science*, **257** (2011) 5083.
16. J. Zheng J. Chew, Richard A. Brown, Thierry G G Maffei, and L Li, *Materials Letters* **72** (2012) 60.
17. J Singh, S S Patil, M A More, D S Joag, R S Tiwari, and O N Srivastava, *Applied Surface Science* **256** (2010) 6157.
18. M R Khanlary, V Vahedi, and A Reyhani, *Molecules* **17** (2012) 5021.
19. M Girtan, G G Rusu, S Dabos-Seignon, and M Rusu, *Applied surface science* **254** (2008) 4179.