

بررسی ویژگی‌های ساختاری و الکتریکی لایه‌های نازک پنتاکسید وانادیوم آلاییده با ایندیوم تهیه‌شده به روش گرما کافت افشانه‌ای

راحله پیله‌ور شهری، سونیا شافعی، شکوفه طباطبائی یزدی*

گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۹۸/۲/۱۴، نسخه نهایی: ۹۸/۵/۲۶)

چکیده: نانوساختارهای پنتاکسید وانادیوم آلاییده با درصدهای وزنی مختلف ایندیوم (۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ at.% در محلول) به روش گرما کافت افشانه‌ای (اسپری پایرولیزیز) تهیه شدند. لایه‌های نازک تهیه شده به کمک پراش پرتو ایکس (XRD)، تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آزمایش اثر هال مشخصه‌یابی شدند. نتایج XRD نشان داد که لایه‌های نازک در فاز چارگوشی بلوری می‌شوند. افزایش مقدار ایندیوم به شدت منجر به افزایش بی‌نظمی نانوساختارها و کاهش اندازه بلورک‌ها شده به طوری که اندازه بلورک‌ها با افزودن ۳۰٪ وزنی ایندیوم به پنتاکسید وانادیوم تا بیش از ۵۰٪ نسبت به نمونه خالص کاهش یافته است. تصاویر SEM لایه‌ها را نانوساختارهای تک‌فاز تشکیل شده از نانومیل و نانوتسمه‌هایی با پهنای متوسط ۱۰۰-۵۰ nm نشان داد. اندازه‌گیری‌های اثر هال نشان داد که نمونه‌های مورد بررسی همه نیم‌رسانای نوع n هستند و مقاومت آنها با افزایش ایندیوم افزایش یافته است که این را نیز می‌توان به افزایش بی‌نظمی ساختاری نمونه‌ها نسبت داد.

واژه‌های کلیدی: نانوساختارهای پنتاکسید وانادیوم؛ ایندیوم؛ اسپری پایرولیزیز؛ لایه نازک نیم‌رسانای شفاف.

مقدمه

وانادیوم یک نیم‌رسانای نوع n با گاف نوری مستقیم و پهن حدود ۲/۴ الکترون ولت در ناحیه مرئی طیف بوده [۶]، دارای ساختار لایه‌ای، پایداری شیمیایی و گرمایی خوبی است و از این رو برای کاربردهای اپتوالکترونیک، از جمله آشکارسازی نوری و کلیدزنی فوتوالکتریکی سریع مورد توجه است [۸،۷]. دیده شده است که ویژگی‌های مختلف V_2O_5 با ورود برخی کاتیون‌های مهمان تغییر می‌کند. از این رو، پژوهشگران به طور گسترده بر ساخت و مشخصه‌یابی الکتریکی، اپتیکی، الکتروشیمیایی و الکتروکرومیک لایه‌های نازک V_2O_5 در حضور آلاینده‌هایی چون نیکل، منگنز، فلئور، تیتانیوم، تانتالوم، گوگرد، قلع، منیزیوم و مولیبدن متمرکز شده‌اند. برای مثال، گزارش شده است که افزودن Ag، Al، Na، Cu و Fe به V_2O_5 باعث بهبود ویژگی‌های الکتروشیمیایی آن می‌شود [۹-۱۳]. همچنین دیده شده است که اکسیدهای وانادیوم

اکسیدهای وانادیوم با ظرفیت‌های گوناگون خود شامل VO ، VO_2 ، V_2O_3 و V_2O_5 به دلیل داشتن ویژگی‌های جالب-توجه از جمله گاف نوری به نسبت بزرگ، ساختار لایه‌ای، پایداری گرمایی و شیمیایی خوب، خواص برجسته الکتروکرومیک، ترموکرومیک و ترموالکتریکی، بسیار مورد توجه پژوهشگران هستند [۲،۱]. این ترکیبات به‌ویژه در حالت لایه نازک ماده مناسبی برای کاربردهای صنعتی چون حسگرهای گازی، سیستم‌های نمایشگر، وسایل کلیدزنی اپتیکی و الکتریکی، قطعات الکتروکرومیک، صافی‌های رنگی و پنجره‌های هوشمند هستند [۳-۵] و از این رو در سال‌های اخیر موضوع پژوهش‌های گسترده‌ای بوده‌اند. در میان ترکیبات مختلف اکسید وانادیوم، پنتاکسید وانادیوم، V_2O_5 ، اکسید اشباع شده با بالاترین حالت اکسایشی و پایداریترین آنهاست. پنتاکسید

* نویسنده مسئول. تلفن: ۰۵۱۳۸۷۶۳۶۴۷، پست الکترونیکی: sh_tatababai3@yahoo.com

دستگاه D8-Advance Bruker با تابش Cu-K α با طول موج ۰/۱۵۴۰۶ نانومتر تهيه شد. براي بررسي ريزساختار نمونه‌ها از میکروسکوپ الکتروني روبشي (SEM) مدل LEO1450VP مجهز به طيفسنج انرژی پاشيده پرتوي ایکس (EDX) استفاده شد. مشخصه‌های الکتریکي لایه‌ها نیز به کمک آزمایش اثر هال بر نمونه‌های الکتروگذار شده با آلومینیوم به روش تبخیر گرمایی انجام شد.

بحث و بررسی

مشخصه‌های ساختاری لایه‌ها

شکل ۱ الگوهای پراش پرتو ایکس نانوساختارهای پنتاکسید واندیوم آلاییده با درصد‌های وزنی متفاوت ایندیوم را نشان می‌دهد. چهار قله آشکار شده در الگوهای XRD، هرچند برخی شدت کمی دارند، با قله‌های براگ (۲۰۰)، (۲۴۰)، (۲۴۱) و (۴۰۰) گزارش شده برای فاز چارگوشی β -V₂O₅ (کارت JCPDS به شماره ۱۰۷۴-۰۴۵-۰۰) و کارهای دیگران [۲۰] همخوانی دارند. هیچ قله‌ای مربوط به مواد اولیه یا فاز ثانویه در طیف‌های XRD دیده نمی‌شود که نشان‌دهنده تشکیل لایه‌های بسبب‌تک‌فاز β -V₂O₅ با ساختار چارگوشی است. چنانکه دیده می‌شود، ساختار لایه‌ها با افزودن ایندیوم حتی تا ۳۰٪ وزنی تغییر نکرده است. بیشتر بودن شدت قله پراشی (۲۰۰) در نمونه پنتاکسید واندیم خالص و نمونه‌های آلاییده با ایندیوم تا ۲۰٪ وزنی رشد این نمونه‌ها در راستای ترجیحی (۲۰۰) و تشکیل یک ساختار لایه‌ای را نشان می‌دهد. در حالی که ایندیوم ساختار بلوری لایه‌ها را تغییر نداده اما اثر افزودن ایندیوم به صورت کاهش قابل‌ملاحظه شدت این قله پراشی و به عبارتی، افت بلورینگی دیده می‌شود. کاهش نظم بلوری را می‌توان با انتقال اتم‌های واندیوم به جایگاه‌های بین‌شبه‌ای در اثر افزایش جانمایی ایندیوم توضیح داد. افزون بر این، اثر افزودن ایندیوم به صورت تغییر تدریجی راستای آسان رشد از (۲۰۰) به سمت (۲۴۰) نیز آشکار شده است. در لایه‌های با مقدار آلایش کم (کمتر از ۲۰٪ وزنی)، قله (۲۰۰) غالب است که به نظم بهتر اتم‌ها در این صفحه اشاره دارد. با افزایش مقدار ایندیوم، شدت قله (۲۰۰) و به عبارتی توزیع فضایی سمت-گیری بلورک‌ها در راستای (۲۰۰) کاهش می‌یابد، به طوری که قله‌های (۲۰۰)، (۲۴۰) و (۲۴۱) با شدت نزدیک به هم ظاهر می‌شوند. این نشان‌دهنده وجود صفحات ارجح برای اشغال توسط اتم‌های ایندیوم است.

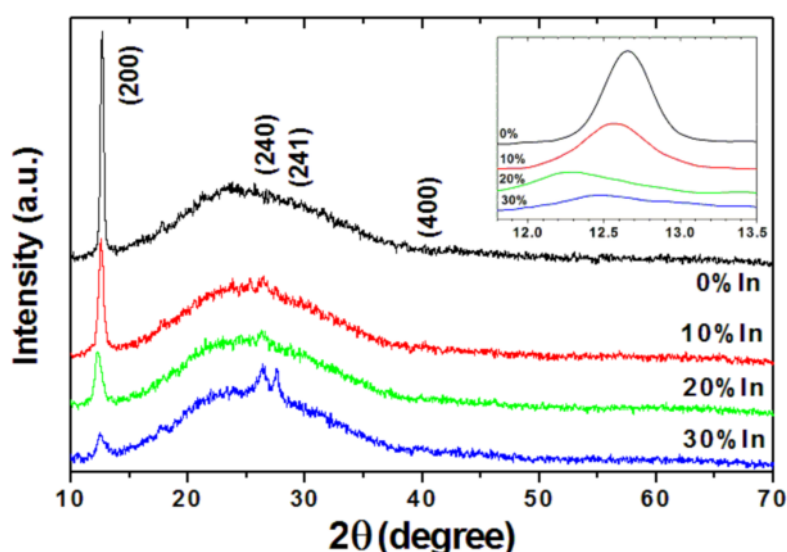
آلاییده با Ag و Na گاف نواری کمتری نسبت به V₂O₅ دارند [۱۳]. یو و همکاران تاثیر ناخالصی منگنز را بر لایه‌های نازک پنتاکسید واندیوم به کار رفته در باتری‌های لیتیوم بررسی نمودند و افزایش بازده در حضور ناخالصی را مشاهده کردند [۱۴]. جیلاکشی و همکاران ویژگی‌های ساختاری و الکتروشیمیایی لایه‌های نازک V₂O₅ را در حضور ناخالصی نیکل بررسی نمودند و بهبود ۲۰ درصدی ظرفیت خازنی و چگالی انرژی را مشاهده کردند [۱۵]. جاسم و همکاران نیز رسانش الکتریکي و اپتیکی لایه‌های نازک V₂O₅ در حضور ناخالصی‌های Ce و Nd را آزمایش کردند [۱۶]. اعتمادی و همکاران پنتاکسید واندیوم با ناخالصی سربوم را به روش سل ژل تهيه نمودند و نشان دادند که افزایش ناخالصی سربوم باعث بهبود رفتار الکتروشیمیایی V₂O₅ می‌شود [۱۷]. موسوی و همکاران نیز ویژگی‌های فیزیکی مختلف لایه‌های نازک پنتاکسید واندیوم در حضور آلاینده‌های گوگرد و فلئور را بررسی کردند [۱۹، ۱۸].

بر اساس بررسی‌های انجام شده، تا کنون پنتاکسید واندیوم در حضور ناخالصی ایندیوم تهيه و بررسی نشده است. در این پژوهش برای نخستین بار، پنتاکسید واندیوم آلاییده با ایندیوم به روش گرما کافت افشانه‌ای (اسپری پایرولیز) که یک روش به نسبت ساده و مقرون به صرفه است تهيه شد و اثر In بر ویژگی‌های ساختاری و الکتریکي این ترکیب بررسی گردید.

روش تجربی

در این پژوهش، لایه‌های نازک پنتاکسید واندیوم خالص و آلاییده با ایندیوم (۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ at.% در محلول) به روش تجزیه گرمایی افشانه‌ای (اسپری پایرولیز) نهشته شدند. برای تهيه محلول اولیه ۰/۱ مولار، مقدار مناسب کلرید واندیوم (VCl₃) در آب مقطر به خوبی حل شد و به منظور انحلال بهتر، چند قطره اسید هیدروکلریک (HCl) به محلول اضافه شد. پس از تهيه محلول پایه، ایندیوم با درصد‌های وزنی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ به آن اضافه شد. محلول‌ها با آهنگ ۵ ml/min بر لام‌های شیشه‌ای بر صفحه چرخان با سرعت ۴۵ دور در دقیقه و دمای ۳۳۰ °C در فاصله ۳۵ cm از نازل پاشیده شدند. به منظور لایه‌نشانی یکنواخت‌تر، از هوا با فشار ۲/۵ atm به عنوان گاز حامل استفاده شد.

به منظور بررسی فاز و ساختار بلوری لایه‌ها، طیف پراش پرتو ایکس (XRD) نمونه‌ها در گستره زاویه‌ای ۱۰-۷۰° = 2 θ با



شکل ۱ طیف XRD لایه‌های پنتا اکسید وانادیوم با درصد‌های مختلف ایندیوم. تصویر داخلی نمای بزرگ‌شده قله (۲۰۰) در گستره $2\theta = 11.8 - 13.5^\circ$ را نشان می‌دهد.

های V_2O_5 تهیه شده نانوبلورین هستند و متوسط اندازه دانه-های آنها ۱۱-۲۵ nm است. اندازه متوسط بلورک‌ها که به این ترتیب برآورد شده‌اند در جدول ۱ ارائه شده است. دیده می‌شود که افزودن ایندیوم به لایه‌های پنتااکسید وانادیوم موجب کاهش اندازه بلورک‌ها و به عبارتی مانع رشد بلور شده است. اعتمادی و همکاران نیز کاهش اندازه بلورک‌های V_2O_5 را با آرایش یون سریوم مشاهده کردند [۱۷].

چگالی دررفتگی‌ها (طول دررفتگی در واحد حجم) که معیاری از مقدار نقایص بلوری است از رابطه $\delta = 1/D^2$ [۲۲] محاسبه شد. مقادیر به دست آمده در جدول ۱ گزارش شده‌اند. دیده می‌شود که با افزایش مقدار ایندیوم، چگالی دررفتگی‌ها در لایه‌ها افزایش می‌یابد که این با کاهش اندازه بلورک‌ها و به عبارتی افت بلورینگی همخوانی دارد.

با توجه به شکل ۱، دیده می‌شود که با افزایش مقدار ایندیوم، افزون بر کاهش شدت قله پراش اصلی (۲۰۰)، پهنای آن نیز افزایش یافته است. افزایش پهنای قله به کاهش اندازه بلورک‌ها اشاره دارد. میانگین اندازه بلورک‌ها (D) بر اساس داده‌های طیف‌های XRD و با استفاده از رابطه شرر تعیین شد [۲۱]:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

که در این رابطه، K ثابت شرر یا ضریب شکل بلور است که در اینجا ۰/۹ در نظر گرفته شد و λ طول موج پرتو ایکس به کار رفته مربوط به تابش $CuK\alpha$ برابر با ۰/۱۵۴ nm، θ زاویه یک پراش اصلی (در اینجا (۲۰۰)) و β پهنای آن قله در نیم‌ارتفاع بیشینه برحسب رادیان است. به این ترتیب، دیده شد که لایه

جدول ۱ داده‌های XRD و مشخصه‌های ساختاری لایه‌های نازک پنتااکسید وانادیوم آلاپیده با مقادیر مختلف ایندیوم.

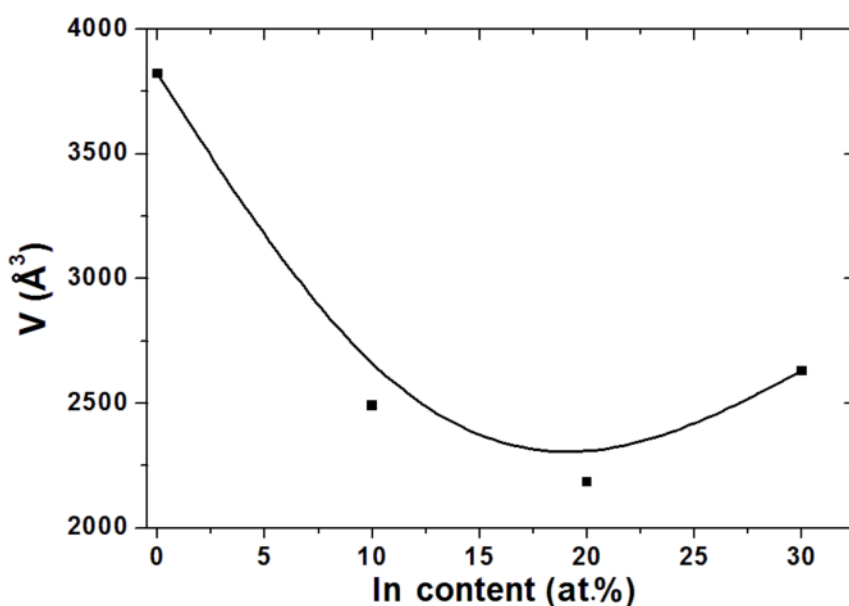
نمونه	hkl	2θ (°)	d (Å)	D (nm)	δ (line/Å ^۲)	ثابت شبکه (Å)	V (Å ^۳)
V_2O_5	(۲۰۰)	۱۲/۷	۶/۹۹	۲۵	۰/۴۹۸	$a=13.98$ $c=19.56$	۳۸۲۲/۸۳
	(۲۴۱)	۲۸/۹	۳/۰۹				
$V_2O_5:In 10 \text{ at.}\%$	(۲۰۰)	۱۲/۴	۷/۱۳	۱۷	۱/۰۵۰	$a=14.27$ $c=12.23$	۲۴۹۰/۴۰
	(۲۴۱)	۲۸/۹	۳/۰۹				
$V_2O_5:In 20 \text{ at.}\%$	(۲۰۰)	۱۲/۳	۷/۱۹	۱۳	۲/۰۲۲	$a=14.38$ $c=10.56$	۲۱۸۳/۶۰
	(۲۴۱)	۲۹/۰	۳/۰۸				
$V_2O_5:In 30 \text{ at.}\%$	(۲۰۰)	۱۲/۵	۷/۰۸	۱۱	۲/۵۳۲	$a=14.15$ $c=13.13$	۲۶۲۸/۹۳
	(۲۴۱)	۲۹/۰	۳/۰۸				

آورده شده و تغييرات آن بر حسب مقدار اينديوم در ساختار V_2O_5 در شکل ۲ رسم شده است. چنانکه دیده می‌شود با آلايش اينديوم، نخست حجم ياخته يکه کاهش می‌يابد تا در لايه V_2O_5 با حدود ۲۰٪ وزني اينديوم کمينه می‌شود و سپس با آلايش بيشتر لايه‌ها (تا ۳۰٪ وزني) حجم ياخته يکه آنها افزايش می‌يابد. اين رفتار که برای لايه‌های SnO_2 آلاييده با Cr نیز دیده شده است [۲۳] می‌تواند به تفاوت سازوکارهای جاننشانی اينديوم در ساختار V_2O_5 برای مقادير کمتر (کمتر از ۲۰٪ وزني) و بيشتر اينديوم اشاره داشته باشد. اينديوم دارای حالت اکسایشی ۳+ است؛ جاننشانی V^{+5} با آن، منجر به حذف برخی يون‌های اکسيژن از ترکيب برای ايجاد تعادل بار الکتریکی می‌شود. از آنجا که يون اکسيژن (با شعاع يونی $\text{\AA}$ ۰/۵۴) و اينديوم ($\text{\AA}$ ۰/۸۰) است [۲۴]، اين امر می‌تواند موجب کاهش حجم شبکه شود. اين در حالی است که دليل انبساط جزئی شبکه در اثر آلايش مقادير بيشتر اينديوم (بیش از ۲۰٪ وزني) می‌تواند اشغال جایگاه‌های بين‌شبکه‌ای باشد. از طرفی، تهیج‌های اکسيژن ايجاد شده در اثر ورود يون‌های اينديوم می‌توانند منجر به بی‌نظمی ساختاری شوند که انبساط یک نتیجه احتمالی آن است.

اثر ديگر آلايش اينديوم در لايه‌های V_2O_5 از نمای بزرگ- شده قله‌های پراشی به صورت جابه‌جایی جزئی زاويه پراش روشن می‌شود. تصوير داخلي شکل ۱ نمای بزرگ‌شده قله پراشی اصلی (۲۰۰) را در گستره زاويه‌ای $11.8^\circ - 13.5^\circ = 2\theta$ نشان می‌دهد. چنانکه دیده می‌شود، با افزودن اينديوم به ساختار V_2O_5 ، قله‌های پراشی نخست (تا ۲۰٪ وزني) کمی به سمت زاويه‌های کوچکتر و سپس با افزايش بيشتر اينديوم (بیش از ۲۰٪ وزني) به سمت زاويه‌های بزرگتر جابه‌جا می‌شوند. تغيير در مکان قله‌ها نشان‌دهنده تغيير در فواصل بين- صفحه‌ای (d) يا به عبارتی تغيير در حجم ياخته بلوری است. اين بدین معناست که با آلايش اينديوم، نخست حجم ياخته يکه کاهش می‌يابد تا در لايه V_2O_5 با حدود ۲۰٪ وزني اينديوم کمينه می‌شود و سپس با آلايش بيشتر لايه‌ها (تا ۳۰٪ وزني) حجم ياخته يکه آنها افزايش می‌يابد. ثابت‌های شبکه a و c نمونه‌های مورد بررسی بر اساس فاصله دسته صفحات با شاخص ميلر (hkl) با استفاده از رابطه زیر محاسبه شدند [۲۰]:

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2)$$

ثابت‌های شبکه بلوری لايه‌های V_2O_5 خالص و آلاييده با اينديوم در جدول ۱ ارائه شده‌اند. حجم ياخته يکه چارگوشی نیز بر اساس $V = a^2c$ محاسبه شد که مقادير آن در جدول ۱



شکل ۲ تغييرات حجم ياخته يکه در لايه‌های پنتا اکسيد واناديوم با مقادير مختلف اينديوم.

الکترون‌ها هستند که چگالی آنها با اندازه‌گیری ولتاژ هال (V_H) و با استفاده از رابطه زیر تعیین شد [۲۵]:

$$V_H = \frac{IB}{ent} \quad (۳)$$

در این رابطه، n چگالی حامل‌ها، I جریان الکتریکی طولی، B میدان مغناطیسی اعمالی، در اینجا $T = 0.5$ ، ضخامت لایه و e بار الکتریکی الکترون است. ضخامت لایه‌ها بر اساس اندازه‌گیری‌های اپتیکی تعیین شد (در آینده منتشر خواهد شد) که مقادیر به‌دست آمده در جدول ۲ ارائه آورده شده‌اند. چگالی الکترون‌ها به همراه مقاومت ورقه‌ای (R_s) و مقاومت ویژه (ρ) لایه‌ها که به روش دوسوزنی استاندارد در دمای اتاق اندازه‌گیری شدند در جدول ۲ ارائه شده‌اند. دیده می‌شود که مقاومت ویژه نمونه‌ها با افزایش درصد وزنی آلایندۀ ایندیوم افزایش می‌یابد که این را می‌توان به افزایش بی‌نظمی ساختاری، در نتیجه کاهش اندازه دانه‌ها و بی‌شکل (آمورف شدن) ساختار نسبت داد.

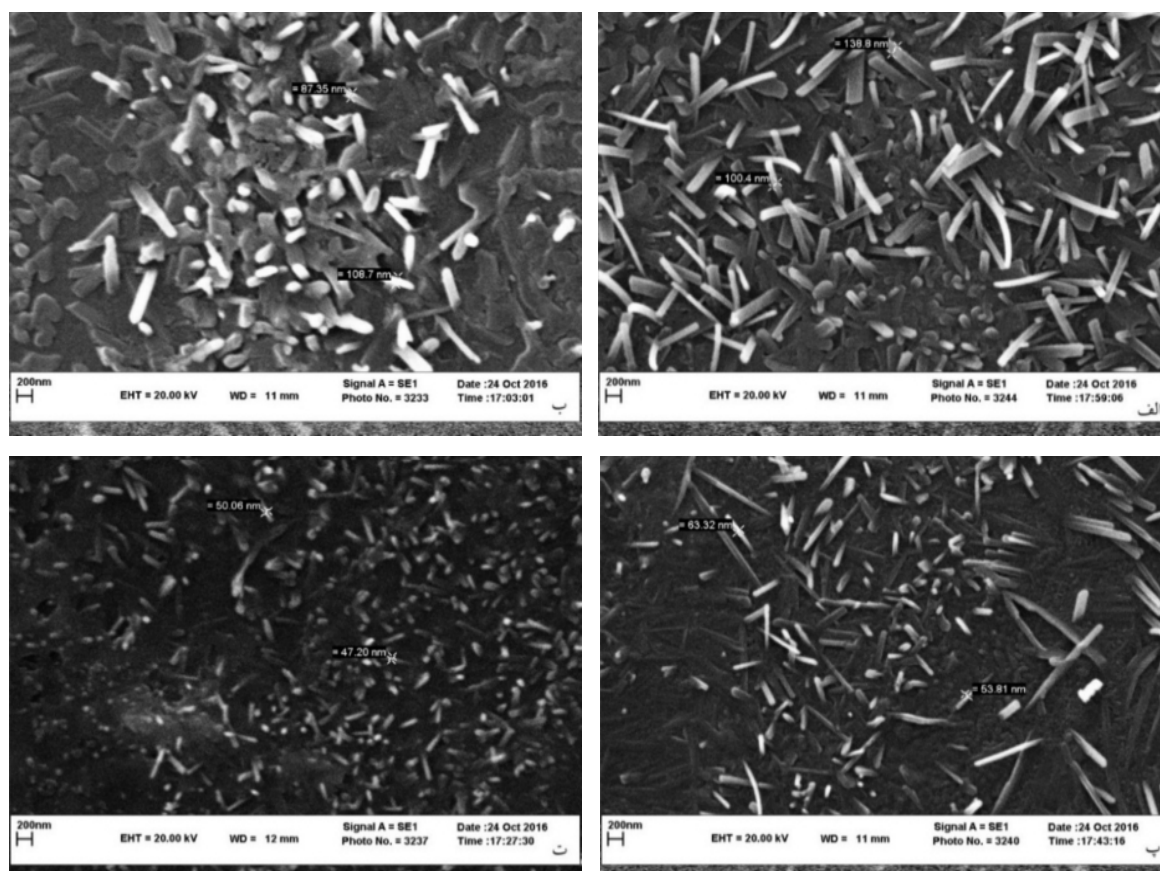
ریخت‌شناسی و تجزیه عنصری سطح لایه‌ها

تصاویر تهیه شده از سطح لایه‌های با مقادیر مختلف ایندیوم با میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل ۳ آورده شده‌اند. این تصاویر اثر افزودن ایندیوم به ساختار را به صورت افزایش بی‌نظمی نشان می‌دهند. چنانکه دیده می‌شود، لایه‌ها از نانوساختارهایی به شکل نانومیل و نانوتسمه تشکیل شده‌اند که با افزایش ناخالصی، اندازه نانومیل‌ها و نانوتسمه‌ها کاهش یافته و پهنای متوسط آنها از ۱۰۰ به ۵۰ نانومتر رسیده است.

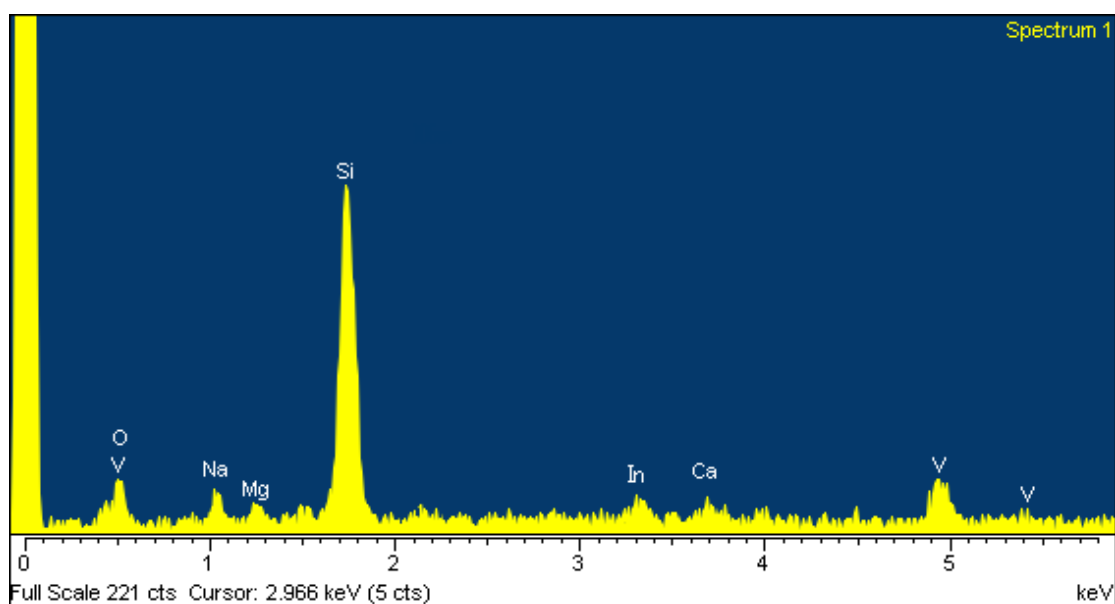
طیف‌های EDX لایه‌ها با نشان دادن قله‌های مربوط به V ، O و In ، تشکیل فاز $V_2O_5:In$ را تأیید می‌کنند. طیف EDX مربوط به لایه پنتاکسید وانادیوم آلاییده با ۳۰٪ وزنی ایندیوم، برای نمونه، در شکل ۴ آورده شده است.

ویژگی‌های الکتریکی لایه‌ها

با انجام آزمایش هال مشخص شد که لایه‌های مورد بررسی همه نیمرسانای نوع n بوده و حامل‌های بار اکثریت آنها



شکل ۳ تصاویر SEM لایه‌های پنتاکسید وانادیوم (الف) خالص، (ب) با ۱۰٪ (پ) ۲۰ و (ت) ۳۰ درصد وزنی ایندیوم.



شکل ۴ طيف EDX لايه پنتاکسيد واناديوم با ۳۰ درصد وزني اينديوم در محلول.

جدول ۲ ويژگي‌هاي الکتریکي لايه‌هاي نازک پنتاکسيد واناديوم آلاييده با مقادير مختلف اينديوم، به همراه ضخامت آنها.

نمونه	t (nm)	$R_s (\Omega)$	$\rho (\Omega \cdot \text{cm})$	$n (10^{20} \text{ m}^{-3})$
V_2O_5	۲۳۳	1.4×10^6	۳۲.۶۲	۳.۳
$\text{V}_2\text{O}_5:\text{In} 10 \text{ at. \%}$	۲۲۰	2.9×10^6	۶۳.۸	۳.۵
$\text{V}_2\text{O}_5:\text{In} 20 \text{ at. \%}$	۲۳۱	2.9×10^6	۶۶.۹۹	۳.۳
$\text{V}_2\text{O}_5:\text{In} 30 \text{ at. \%}$	۲۲۰	2.9×10^6	۶۳.۸	۳.۵

برداشت

لايه‌هاي نازک نانوساختاري پنتاکسيد واناديوم خالص و آلاييده با اينديوم با درصدهاي وزني ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ در محلول به روش تجزيه گرمایی افشانه‌اي (اسپري پايروليز) بر بستر شیشه-ای در دمای °C ۴۳۰ و غلظت محلول اولیه ۰.۱ mol/lit و آهنگ لايه‌نشانی ۵ ml/min تهيه شدند. با استفاده از الگوهاي پراش پرتو ایکس، تشکیل لايه‌هاي بسيلور فاز $\beta\text{-V}_2\text{O}_5$ با ساختار چارگوشي تايد شد. نتايج بررسي‌هاي ساختاري و ريزساختاري نشان داد که لايه‌ها از نانوميله‌ها و نانوتسمه‌هاي با قطر ۵۰-۱۰۰ nm تشکیل شده‌اند و افزايش اينديوم منجر به افزايش بي‌نظمي و کاهش اندازه بلورک‌ها تا بيش از ۵۰٪ شده

است. مقاومت ويژه لايه‌ها نيز با حضور اينديوم افزايش يافته است که اين را می‌توان به افزايش بي‌نظمي نسبت داد.

مراجع

- [1] Xu Y., Schoonen M.A., "The absolute energy positions of conduction and valence bands of selected semiconducting minerals", Am. Mineral. 85 (2000) 543-556.
- [2] Luo Z., Wu Z., Xu X., Du M., Wang T., Jiang Y., "Impact of substrate temperature on the microstructure, electrical and optical properties of sputtered nanoparticle V_2O_5 thin films", Vacuum 85 (2010) 145-150.
- [3] Ramana C.V., Hussain O.M., Srinvasalu Naidu B., Julien C., Balkanski M., "Physical investigations on electron-beam evaporated

- of pulsed-laser deposited V_2O_5 Thin films”, J. Mater. Process. Technol **209** (2009) 2421–2427.
- [14] Yu D.M., Zhang S.T., Liu D.W., Zhou X.Y., Xie S.H., Zhang Q.F., Liu Y.Y., Cao G.Z., “Effect of manganese doping on Li-ion intercalation properties of V_2O_5 films”, J. Mater. Chem. **20** (2010) 10841-10846.
- [15] Jeyalakshmi K., Vijayakumar S., Purushothaman K.K., Muralidharan G., “Nanostructured nickel doped β - V_2O_5 thin films for supercapacitor applications”, Mater. Res. Bull. **48** (2013) 2578-2582.
- [16] Jassim I. K., Rzaiz J.M., Ali I. M., Ibrahim I. M., “Influence of Nd and Ce doping on the structural, optical and electrical properties of V_2O_5 thin films”, Iraqi J. Phys. **14** (2016) 73-82.
- [17] Etemadi B., Mazloom J., Ghodsi F.E., “Phase transition and surface morphology effects on optical, electrical and lithiation/delithiation behavior of nanostructured Ce-doped V_2O_5 thin films”, Mater. Sci. Semicond. Process. **61** (2017) 99-106.
- [18] Mousavi M., Khorrami Gh. H., Kompany A., Tabatabai Yazdi Sh., “Structural, optical and electrochemical properties of F-doped vanadium oxide transparent semiconducting thin films”, Appl. Phys. A **123** (2017) 755(6).
- [19] Mousavi M., Kompany A., Shahtahmasebi N. and Bagheri Mohagheghi M. M., “Effect of S-doping on structural, optical and electrochemical properties of vanadium oxide thin films prepared by spray pyrolysis”, Phys. Scripta **88** (2013) 065701-065706.
- [20] Acosta D., Pérez A., Magaña C. and Hernández F., “ V_2O_5 thin films deposited by RF magnetron sputtering: the influence of oxygen content in physical properties”, J. Mater. Sci. Eng. A **6** (2016) 81-87.
- [21] Cullity B.D., “Elements of X-ray Diffraction”, Addison-Wesley Publishing Company Inc., California, 1956.
- [22] Iranmanesh P., Tabatabai Yazdi Sh., Mehran M., Saeednia S., “Superior magnetic properties of Ni ferrite nanoparticles synthesized by capping agent-free one-step coprecipitation route at vanadium pentoxide films” Mater. Sci. Eng. B. **52** (1998) 32-40.
- [4] Bouzidi A., Benramdane N., Nakrela A., Mathieu C., Khelifa B., Desfeux R., and Da Costa A., “First synthesis of vanadium oxide thin films by spray pyrolysis technique”, Mater. Sci. Eng. B **95** (2002) 141-147.
- [5] Fujita Y., Miyazaki K., Tatsuyama C., Jpn., “On the electrochromism of evaporated V_2O_5 films”, J. Appl. Phys **24** (1985) 1082-1086.
- [6] Adarsh Rag S., Shivaram Sh., Deena S., Richards E.J., Dhayal Raj A., Kumar S.V., Thiagarajan K., “Optical and structural properties of V_2O_5 thin films Prepared by sol-gel dipping process”, J. NanoSci. Nanotechnol **1**(2012) 3-6.
- [7] Tamang R., Varghese B., Tok E.S., Mhaisalkar S., Sow C.H., “Sub-band gap energy photoresponse of individual V_2O_5 nanowires”, Nanosci. Nanotechnol. Lett **4** (2012) 716-719.
- [8] Lu J., Hu M., Tian Y., Guo C., Wang C., Guo S., Liu Q., “Fast visible light photoelectric switch based on ultralong single crystalline V_2O_5 nanobelt”, Opt. Exp **20** (2012) 6974-6979.
- [9] Zhan S., Wei Y., Bie X., Wang C., Du F., Chen G., Hu F., “Structural and electrochemical properties of Al^{3+} doped V_2O_5 nanoparticles prepared by an oxalic acid assisted soft chemical method”, J. Alloys Compd **502** (2010) 92–96.
- [10] Coustier F., Passerini S., Smyrl W. H., “Dip-coated silver-doped V_2O_5 xerogel hosts as cathode materials for lithium intercalation”, J. Solid State Ionics **100** (1997) 247–258.
- [11] Giorgetti M., Berrettoni M., Smyrl W.H., “Doped V_2O_5 -based cathode materials: where does the doping metal go? An X-ray absorption spectroscopy study.”, Chem. Mater **19** (2007) 5991–6000.
- [12] Farcy J., Maingot S., Soudan P., Pereira-Ramos J.P., Baffier N., “Electrochemical properties of the mixed oxide $Fe_{0.11}V_{2.05}O_{5.16}$ as a Li intercalation compound”, Solid State Ionic **99** (1997) 61–69.
- [13] Iida Y., Kanno Y., “Doping effect of M (M = Nb, Ce, Nd, Dy, Sm, Ag, and/or Na) on the growth

- [24] R.D. Shannon, "*Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides*", Acta Crystallographica A32 (1976) 751-767.
- [25] Sze S.M., "*Physics of Semiconductor Devices*", John Wiley and Sons New York (1981).
- different pH values*", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 449 (2018) 172-179.
- [23] Bagheri Mohagheghi M.M., Tabatabai Yazdi Sh., Mousavi M., "*Transport, structural and optical properties of SnO₂ transparent semiconductor thin films alloyed with chromium: Carrier type conversion*", J. Mater. Sci.: Mater. Electron. 28 (2017) 13328-13335.