مقاله پژوهشی

Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy

مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران سال سی و سوم، شمارهٔ اول، بهار ۱۴۰۴، از صفحهٔ ۱۶۹ تا ۱۸۰

لایههای نازک اکسید قلع آلاییده با فلوئور دارای شاخص شایستگی بالا رشدیافته به روش گرما کافت افشانه ای: اثر مقدار آلاینده بر ویژگیهای فیزیکی

حسن زارع اصل\*۱، سیدمحمد روضاتی۲

۱ - گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران ۲ - گروه فیزیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران (دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۵/۸، نسخه نهایی: ۱۴۰۳/۷/۲۳)

**چکیده**: لایههای نازک اکسید قلع آلاییده با فلوئور (FTO) با روش گرماکافت افشانهای روی بستر لام شیشهای رشد داده شدند. مقدار آلاینده فلوئور (نسبت اتمی [Sn]/[Sn]) در محلول پیشماده به ترتیب برابر با ۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد اتمی در نظر گرفته شد. با ورود F به ساختار SnO<sub>2</sub>، بافت لایههای نازک دچار تغییراتی شد. این تغییرات عامل اصلی بهبود تحرک حاملهای بار تشخیص داده شد. بهبود تحرک حاملهای بار در کنار افزایش غلظت آنها در اثر جایگزینی <sup>-O</sup>C با <sup>-F</sup>، باعث افزایش قابل توجه رسانندگی در لایههای آلاییده شد. آلاینده F همچنین باعث افزایش شفافیت و جابهجایی لبه جذب لایههای نازک TTO به سمت طول موجهای پایین تر گردید. سرانجام لایه نازک TTO با آلاینده ۳۰ درصد اتمی مقاومت ویژه ۲۰۰ Ω.۲۰ مقاومت سطحی ۶۹ و متوسط عبور ٪۸۷٬۴۷ را فراهم آورد که در نتیجه آن شاخص شایستگی <sup>1-</sup>Ω <sup>-۲</sup>×۱۹/۹ برای آن محاسبه گردید.

واژههای کلیدی: لایه نازک FTO؛ آلاینده؛ مقاومت ویژه؛ عبور؛ شاخص شایستگی؛ گرما کافت افشانهای.

#### مقدمه

دارا بودن همزمان رسانندگی و شفافیت بالا، لایههای نازک اکسید رسانای شفاف (TCO) را به گزینه مطلوب برای بسیاری از کاربردهای فناوری چون سلولهای خورشیدی [۱]، دیودها [۲]، سلولهای الکتروشیمیایی [۳] و پنجرههای هوشمند [۴] snO<sub>2</sub> ،ZnO و ZnO، SnO<sub>2</sub> ،ZnO و SnO<sub>2</sub> ،SnO<sub>2</sub> مح و Jn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> که همه به طور ذاتی نیمرساناهایی از نوع n هستند، پایه غالب اکسیدهای رسانای شفاف هستند [۵]. سازوکار اصلی در ایجاد و افزایش غلظت حاملهای بار آزاد در این مواد، وجود تهیجای اکسیژن در ساختار آنهاست. البته تهیجای اکسیژن خود باعث افزایش جذب در گستره طیفی نور مرئی می شود.

استفاده، میزان رسانندگی و شفافیت در لایههای نازک مورد اشاره رابهینه نمود. از سویی با آلاینده مناسب این مواد، می-توان بدون ایجاد تهیجای اکسیژن، به صورت مؤثر غلظت حاملهای بار آزاد را افزایش داد. بر این اساس، آلاینده ZnO با فلزهای آلومینیوم (Al) و ایندیم (In) به ترتیب منجر به پیدایش لایههای نازک اکسید رسانای شفاف AZO [۶] و پیدایش لایههای نازک اکسید رسانای شفاف (RS) و IZO FTO با عنصر فلوئور (F) به ترتیب OTI [۸] و FTO آلاینده 2nO با عنصر فلوئور (F) به ترتیب OTI [۸] و [۹] را بوجود آوردند. لایههای نازک آلاییده جدید به طور قابل توجهی در هر دو زمینه رسانندگی و شفافیت از اکسیدهای فلزی پایه خود پیشی گرفتند. رسانندگی در نیمرساناها ارتباط مستقیم با دو عامل غلظت

\*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۶۳۷۱۵۹۵۰، پست الکترونیکی: zare@bkatu.ac.ir

Copyright © 2025 The author(s). This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 O O O OInternational License (<u>https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/</u>) Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited

حاملهای بار آزاد و همچنین مقدار تحرک آنها دارد. اگرچه آلاینده اکسیدهای فلزی نیمرسانای ذاتی با فلزهای مناسب باعث افزایش قابل توجه غلظت حامل بار در آنها می گردد، اما بررسیها نشان داده است که حضور فلز به صورت آلاینده در ساختار این مواد باعث ایجاد آشفتگی در نوار رسانش آنها می-شود. این امر باعث محدود شدن مقدار تحرک و در نتیجه شود. این امر باعث محدود شدن مقدار تحرک و در نتیجه مای غیرفلزی چون F، آشفتگی را به نوار ظرفیت محدود مرده و شرایط را برای دستیابی به تحرک بیشتر مهیا میسازد. افزون بر این، FTO در میان اکسیدهای رسانای شفاف تقریبا دارای کمترین مقدار سمیت، کمترین هزینه تولید، بالاترین دوام مکانیکی و شیمیایی و بیشترین پایداری گرمایی است [۱۰].

بر این اساس، در سالهای اخیر پژوهشهایی با هدف یافتن مقدار بهینه آلاینده F در ساختار لایههای نازک SnO<sub>2</sub> و دستیابی همزمان به بالاترین مقدار رسانندگی و شفافیت انجام شده است. بنها و همکاران [۱۱]، مقدار آلاینده F را از ۳ تا ./۲۲ وزنی در لایههای نازک FTO تهیه شده به روش گرما کافت افشانه ای تغییر دادند و ویژگیهای فیزیکی لایهها را بررسی کردند. آنها کمترین مقاومت ویژه (Ω.cm ·۱۰ <sup>۳-</sup>۲×۱)) را برای نمونه با آلاینده ٪۶ وزنی گزارش کردند. توین و همکاران [۱۲] در پژوهشی در سال ۲۰۱۹، با روش افشانه ای فراصوت لایههای نازک FTO را از محلولهای پیشماده دارای مقادير متفاوت F تهيه نمودند. آنها مقاومت ويژه  $\Omega.cm^{-1}$ ۰ برابر با آلاینده F برابر با  $\Lambda \mathcal{F}_{/}$ ۵٬۱ درصد اتمی (۵.%) به دست آوردند. در به روزترین یژوهش انجام شده ییرامون مقدار بهینه آلاینده F در لایههای نازک FTO، رامیرز-آمادور و همکاران [۱۳] پس از تغییر مقدار آلاینده شاخص شایستگی را محاسبه کردند. آنها شاخص شایستگی هک را برابر با  $\Omega^{-1} \cdot \Omega^{-1}$  را برای غلظت مولی .دست آوردند.  $F/Sn = \cdot_{\Lambda}$ 

در این پژوهش از روش گرما کافت افشانه ای برای تهیه لایههای نازک FTO استفاده شد و پس از تعیین دیگر عوامل لایه نشانی افشانه ای بر اساس بررسیهای پیشین [۹، ۱۴]، مقدار بهینه برای آلاینده F به دست آمد. به این منظور، نسبت اتمی [Sn]/[Sn] در محلول پیشماده به ترتیب برابر با ۰، ۲۰، ۳۰ و ٪.۴۰at در نظر گرفته شد. با استفاده از مشخصههای الکتریکی و اپتیکی شاخص شایستگی هک برای هر نمونه لایه

نازک محاسبه شد. مقاومت ویژه Ω.cm ۲۰۱۰×۹۰/۹ و متوسط عبور ٪۸۸/۵۷ برای نمونه با مقدار آلاینده ٪.۳۰a بدست آمد. این مقادیر با بهترین نتایج بدست آمده برای لایههای نازک FTO لایهنشانی شده به روش افشانه ای قابل مقایسه است. افزون بر مشخصهیابیهای الکتریکی و اپتیکی، مشخصههای ساختاری و ریختاری نمونههای FTO رشدیافته نیز بررسی آردید. به این ترتیب افزون بر یافتن مقدار بهینه آلاینده F لایههای نازک FTO با شاخص شایستگی بالا و قابل مقایسه با بهترین نتایج بدست آمده به روش گرما کافت افشانه ای رشد داده شدند.

## مواد و روشها لایه نشانی

برای تهیه محلول پیشماده لایه نازک خالص SnO<sub>2</sub>، از محلول ۰٫۳ M کلرید قلع دوآبه (SnCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O) در ترکیبی از حلال-های اسید کلریدریک (HCl) ۳۷٪، آب و متانول با نسبتهای به ترتیب ۱:۲۹:۱۰ استفاده شد. به این ترتیب که نخست مقدار ۲۵ mCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O از SnCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O در HCl در ۱۰٬۶۷۷ gr شد تا محلولی کاملا شفاف بدست آمد. بررسیها نشان داده است که HCl باعث شکسته شدن پیوندهای قوی یونی SnCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O شده و در نتیجه واکنش میان آنها، مولکول-های به نسبت ناپایدار HSnCl<sub>3</sub> در محلول بوجود میآیند [1۵]. روشن است که حضور این مولکولهای ناپایدار به عنوان منبع قلع در واکنش گرماکافت باعث تسریع فرآیند رشد لایه نازک می شود. البته، وجود HCl اضافی در محلول پیشماده خود ممکن است منجر به تشکیل ترکیبهایی با پایداری بیشتر گردد که لزوم یافتن مقدار بهینه HCl را نشان میدهد. مقدار HCl استفاده شده در این یژوهش با مقادیر بهینه بدست آمده در بررسیهای مشابه همخوانی قابل قبولی دارد [۱۶]. در مرحله بعد، محلول بدست آمده با ۷٬۲۵ ml آب یون زدوده رقیق شد و در پایان، ۲٬۵ ml متانول به محلول پیشماده اضافه گردید. در نتیجه ۱۰ ml محلول پیشماده برای لایهنشانی لایه نازک خالص  $SnO_2$  بدست آمد. به منظور آلاینده F در شبکه بلورى SnO<sub>2</sub>، مقادير متناسب با نسبتهاى اتمى [F]/[Sn] معادل ۰، ۲۰، ۳۰ و ٪.۴۰at از آمونیوم فلوراید (NH4F) به محلول پیشماده اضافه شد (جدول ۱). لایههای ناز ک FTO بدست آمده به ترتیب F3 ،F1 و F4 نامیده شدند.

ضخامت	نسبت اتمی [Sn]/[Sn]	NH <sub>4</sub> F	SnCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O	نام نمونه
nm	at.%	gr	gr	
۳۸۰	•	•	۰ <sub>/</sub> ۶۷۷	F1
41.	۲.	•,• * * *	۰,۶۵۵	F2
۵۱۰	۳.	•,• ٣٢	· ,840	F3
440	۴.	•,• **	۰ <sub>/</sub> ۶۳۵	F4

جدول ۱ مقادیر نمکهای موجود در ml محلول پیشماده استفاده شده در لایهنشانی لایههای نازک FTO بهمراه نام نمونهها

(با گروه فضایی P42/mnm) هستند که با کارت استاندارد شماره ۱۴۴۵–۰۴۱ همخوانی دارند [۱۷]. در هر چهار لایه F1 تا F4، صفحههای بلوری (۱۱۰) و (۲۱۱) دارای شدت غالب هستند اما شدت بیشتر صفحههای بلوری با تغییر مقدار آلاینده F کمی تغییر می کند.

با هدف بررسی کمی تغییر شدت قلههای پراشی ضریب بافت (TC) براساس شدت قلههای XRD مربوط به صفحههای بلوری دارای شاخصهای میلر (*hkl*) (*(Idhkl*)، شدت قلهها در کارت استاندارد شماره ۱۴۴۵–۱۴۴ (*Iodhkl*) و با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد [۱۸].

$$TC(hkl) = \frac{I(hkl) / I_{0}(hkl)}{\frac{1}{N} \sum_{N} I(hkl) / I_{0}(hkl)}$$
(1)

نتایج *TC* بدست آمده برای چهار صفحه بلوری (۱۱۰)، (۲۰۰)، (۲۱۱) و (۳۰۱) در جدول ۲ ارائه شدهاند و همچنین تغییرات آنها برای نمونههای F1 تا F4 در شکل ۲ الف نمایش داده شده است. چنان که دیده می شود، (۲۱۰)TC به تدریج با افزایش مقدار آلاینده F کاهش می یابد و به مقدار کمینه خود در نمونه با آلاینده ۲. at. (F3) می رسد و سپس دوباره در نمونه F4 کمی افزایش می یابد. روند تغییرات (۳۰۱) TC کاملا برعکس است و بیشینه آن در نمونه F3 رخ می دهد.

ثابتهای شبکه (a و c) و حجم یاخته یکه (V) ساختار بلوری چارگوشی برای لایههای نازک FTO با استفاده از فاصله میان صفحههای بلوری (d) (۱۱۰) و (۱۰۱) و روابط زیر محاسبه گردید [۱۹].

$$\frac{1}{d_{hkl}^{2}} = \left(\frac{h^{2} + k^{2}}{a^{2}}\right) + \frac{l^{2}}{c^{2}}$$
(7)

$$V = a^2 c \tag{(7)}$$

سرانجام، ml ۱۰ محلول پیشماده تهیه شده با استفاده از نازل شیشهای روی بستر لام شیشهای پاشیده گردید. طی پاشش محلول پیشماده، زیرلایه باتوسط سطح داغ در دمای ۵<sup>۰</sup>۰۲ نگه داشته شد. برای گاز حامل از هوای پآلاینده و خشک شده با فشار ۰/۹ bar استفاده شد. فاصله نازل تا سطح بستر برابر با ۲۸۷ mm

#### مشخصه يابى

(با لامپ -Cu از پراش سنج X'Pert PRO PANalytical (با لامپ -Cu X با طول موج X (۱/۵۴۲ برای ثبت الگوی پراش پرتوی X (XRD) لایههای نازک FTO بدست آمده در گستره زاویهای (XRD) لایههای نازک FTO بدست آمده در گستره زاویهای (XRD) و گام های °۰/۲۶ استفاده شد. ریختار و ضخامت لایههای To ۲ و گام های °۰/۲۶ با مقادیر متفاوت F، توسط تصاویر To تهیه شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی Tesser X و گام های '۲۶۶ متفاوت F، توسط تصاویر MIRA3-TESCAN-XMU برسی تهیه شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی گردید. برای اندازه گیری ویژگیهای الکتریکی شامل مقاومت گردید. برای اندازه گیری ویژگیهای الکتریکی شامل مقاومت لایههای نازک TESCAN-XMU برسی کردید. برای اندازه گیری ویژگیهای الکتریکی شامل مقاومت پاوو، در دستگاه اثر هال (PhyTech ) قرار داده شدند. مقدار پاوو، در دستگاه اثر هال (PhyTech ) قرار داده شدند. مقدار مول پاوو، در دستگاه اثر هال (PhyTech ) قرار داده شدند. مقدار مول موجی Tesser Phyter Phyter Phyter (Phyter) با طیفسنج نوری Tesser Phyter Phyter

### نتایج و بحث

# ویژگیهای ساختاری

الگوهای XRD لایههای نازک FTO تهیه شده به روش گرما کافت افشانه ای با مقادیر آلاینده متفاوت در شکل ۱ نشان داده شدهاند. هشت قله مشخص در این الگو به ترتیب مروبط به صفحههای بلوری (۱۱۰)، (۱۰۰)، (۲۰۰)، (۲۱۱)، (۲۲۰)، SnO<sub>2</sub> و (۳۰۱) از ساختار بسبلوری چارگوشی SnO<sub>2</sub>



شکل ۱ الگوهای XRD لایههای نازک FTO با مقادیر متفاوت آلاینده F تهیه شده به روش گرما کافت افشانهای

متفاوت فلوئور	، FTO با مقادی	شدہ برای لابہھای ناز ک	گاف اندژی محاسبه	ی و مقادی	های ساختار	حدول ۲ و ث گر
	J			J. J.C.		<u> </u>

گاف انرژی	كرنش	اندازه بلور ک		ثابتهای شبکه			ب بافت	ضريد		نام نمونه
$E_g$ (eV)	<i>E×<sup>F-</sup></i> \ •	<i>D</i> (nm)	$V(Å^3)$	c (Å)	a (Å)	(٣•1)	(711)	(٢٠٠)	(11.)	
٣٫۶٨	۷٫۸۳	٤١	٧١,٢٧	٣,١٨٨	۴,۷۲۸	۲,۲۲۵	۱,۱۱۶	1,427	• ۵۶٫۰	F1
٣,٧٣	۶,۹۴	۴۵	۷۱٫۳۳	٣,١٨٨	۴,٧٣٠	۲,۵۴۳	1,408	۱,۰۰۹	• ,87٣	F2
٣,٧٧	١٣،۵٨	84	۷۱/۳۸	٣,١٨٨	۴,٧٣٢	۲,۶۰۱	1,444	1,511	۰,۵۲۸	F3
۳,۸۸	۸,۴۶	۴۸	۲۱/۴۶	٣٫١٩١	۴,٧٣٢	<b>۲</b> /۲۹۹	١,٣۶٩	1,188	•,87X	F4



شکل ۲ تغییرات الف) ضریب بافت مربوط به صفحههای بلوری (۱۰۰)، (۲۰۰)، (۲۱۱) و (۳۰۱) و ب) اندازه بلورک و کرنش لایههای نازک FTO رشدیافته با مقادیر متفاوت آلاینده F

مقادیر ثابتهای شبکه بلوری برای لایههای F1 تا F4 در جدول ۲ آورده شدهاند. هر سه ثابت شبکه با افزایش آلاینده F در ساختار شبکه SnO<sub>2</sub> به مقدار بسیار ناچیزی افزایش یافتند.

دلیل این تغییرات ناچیز را می توان به نزدیک بودن شعاع یونی دلیل این تغییرات ناچیز را می توان به نزدیک بودن شعاع یونی است F- (۱/۳۶ Å) F- گفتنی است که به دلیل تشابه شعاع یونی و همچنین مقدار نزدیکی انرژی-

های پیوندی Sn-O و Sn-G جایگزینی O با F محتملترین حالت ورود آلاینده F به ساختار SnO<sub>2</sub> شناخته می شود [۲۰]. از جمله دیگر کمیتهای ساختاری که اثر غیر قابل انکاری بر ویژگیهای فیزیکی بلور دارد، اندازه بلورک (D) و همچنین کرنش بهجامانده (3) در شبکه بلوری است. هر دوی این کمیتها باعث پهن شدگی قلههای الگوی XRD می شوند. روش مرسوم برای محاسبه این مقادیر روش ویلیامسون – هال است که براساس پهن شدگی قلههای پراشی و با برازش خطی منحنی بدست آمده، اندازه بلورک (D) و کرنش بهجامانده (3) در شبکه بلوری براورد می شود.

$$\beta_{hkl}\cos\theta = \frac{K\lambda}{D} + 4\varepsilon\sin\theta \tag{(f)}$$

در این رابطه، ثابت K برابر با ۲۰٬۹ طول موج پرتوی (hkl) ه زاویه براگ مربوط به صفحه بلوری (hkl) و  $\beta_{hkl}$  پهنا در نصف شدت بیشینه قلههای الگوی XRD است  $\beta_{hkl}$  پهنا در نصف شدت بیشینه قلههای الگوی XRD است [۲۱]. مقادیر اندازه بلورک و کرنش برآورد شده بر این اساس، برای لایههای نازک FTO با مقادیر متفاوت آلاینده F در جدول ۲ ارائه شده و همچنین تغییرات آنها در شکل ۲ ب نشان داده شده است. چنان که دیده می شود، اندازه بلورک از مقدار ۳۱ ۳۱ برای لایه نازک خالص SNO به مقدار ۳۱ ش مقدار ۳۱ ۳۱ برای لایه نازک خالص SNO به مقدار ۳۱ ش برای لایه نازک FTO با ۲۰٪ آلاینده F افزایش می یابد. با افزایش بیشتر آلاینده، جهشی قابل توجه در اندازه بلورک برای نمونه F3 (۳۱ ۴۶) رخ داده و سرانجام برای نمونه با بیشترین آلاینده (F4) به مقدار ۳۸ ۳۸ کاهش می یابد. رفتار مشابهی برای افزایش اندازه بلورک در لایههای نازک FTO پس از ورود

آلاینده F و کاهش دوباره آن در مقادیر بالای در بسیاری از بررسیها گزارش شده است [۱۲، ۲۲، ۲۳]. روند به نسبت مشابهی برای کرنش وجود دارد. کمترین مقدار کرنش برای لایه نازک F2 برابر با <sup>۴</sup>-۱۰×۶/۹۴ و بیشترین آن برای نمونه F3 برابر با <sup>۳</sup>-۱۰×۱/۳۴ است.

# ویژگیهای ریختشناسی

تصاویر FESEM تهیه شده از مقطع عرضی و ریختار سطح لایههای نازک FTO با مقادیر ۰۰، ۲۰، ۳۰ و ٪۴۰at از آلاینده F1 لایه نشانی شده به روش گرما کافت افشانه ای (نمونه های F1 تا F4) در شکل ۳ آورده شدهاند. به طورکلی هر چهار نمونه دارای ریختار سطح منسجم و فشرده و بدون هرگونه شکاف یا نقص هستند. دانههای با مرز مشخص نیز در سطح هر چهار نمونه دیده می شوند. البته شکل و اندازه دانه ها در نمونه F1 آشکارا متفاوت است. در سطح لایه نازک F1 دو گروه از دانهها، شامل دانههای جزیره شکل با اندازه بزرگتر و دانههایی با شکل برگ با اندازه کوچکتر، رشد کرده است. با ورود آلاینده F، سطح لایه در نمونه F2، به طورکلی تغییر کرده است و دانه-هایی با شکل و توزیع اندازه به نسبت یکسان رشد یافتهاند. شکل دانهها نیز پس از آلاینده F به صورت چاروجهیهای هرمی است. البته در این نمونه همچنان در نواحی محدودی دانههای کوچک برگ شکل دیده می شود. ریختار سطح نمونه-های F3 و F4 نیز شبیه F1 است، اما متوسط اندازه دانهها به صورت پیوسته با افزایش مقدار آلاینده F افزایش یافته و توزیع اندازه آنها نیز یکنواخت در شده است.



شکل ۳ تصاویر FESEM از سطح و مقطع عرضی نمونههای لایه نازک F1، F3 و F4 و

شکل ۳ همچنین به خوبی تغییرات ضخامت لایههای نازک FTO تهیه شده را نشان می دهد. چنان که در جدول ۱ نیز گزارش شده است، ضخامت آنها از ۳۸۰ nm برای لایه نازک SnO<sub>2</sub> خالص به تدريج افزايش مىيابد تا به بيشينه مقدار خود در لایه F3 (۵۱۰ nm) میرسد و دوباره در لایه F4 ۴۴۵) با کمی کاهش همراه است. در پژوهش کوروتکوف و همکاران [۲۴] پیرامون اثر جهتگیریهای غالب بلوری در لايههاى نازك SnO<sub>2</sub>، رابطهاى معكوس ميان مقدار (۲۲/۱۱۰) و ضخامت لایه گزارش شد. در پژوهش ما نیز وضعیت مشابهی دیده می شود. راستای بلوری (۱۱۰) به عنوان فشردهترین صفحه بلورى در ساختار SnO2 شناخته مى شود. اين امر مى-تواند به خوبی افزایش ضخامت درپی کاهش ضریب بافت این صفحه را توضيح دهد. از سويي به نظر ميرسد كه افزايش اندازه بلورک و همچنین افزایش کم حجم یاخته یکه پس از آلایش F تا نمونه F3، نیز می تواند در نتیجه تغییر در بافت لایههای نازک رشدیافته باشد که خود افزایش ضخامت را در

پی دارد. اگرچه روند افزایش حجم یاخته یکه در لایه نازک با ۲۰at./ آلاینده F همچنان ادامه دارد، کاهش اندازه بلورک، افزایش دوباره شدت قله (۱۱۰) و همچنین فاصله گرفتن از شرایط بهینه لایهنشانی به دلیل افزایش مقدار آلاینده، می تواند از جمله دلایل کاهش ضخامت در لایه F4 باشند.

# ويژگىھاي الكتريكى

نمودار تغییرات ویژگیهای الکتریکی شامل مقاومت ویژه، تحرک و غلظت حاملهای بار آزاد برای لایههای TTO با مقادیر متفاوت آلاینده F در شکل ۴ الف نشان داده شده و مقادیر آن ها در جدول ۳ آورده شده است. چنان که دیده می-شود، پس از ورود آلاینده F ، مقدار مقاومت ویژه لایه نازک F2 شود، پس از ورود آلاینده F ، مقدار مقاومت ویژه لایه نازک F2 (۲۰۹-۴۰۲۰ ۹. مقدار قابل توجهی در مقایسه با نمونه F1 (لایه نازک خالص SnO<sub>2</sub> با (۲۰۲×۲۰۱۰) کاهش می یابد. روند کاهش مقاومت ویژه با افزایش آلایش F تا نمونه F4 می یابد. روند کاهش مقاومت ویژه با افزایش آلایش F1 تا نمونه F4 می یابد. مرد کاهش مقاومت ویژه با افزایش آلایش F1 تا نمونه F4 می یابد. مرد کاهش مقاومت ویژه با افزایش آلایش F1 تا نمونه F4 می یابد. مرد کاهش مقاومت ویژه با افزایش آلایش F1 تا نمونه

جدول ۳ مقادیر تحرک، غلظت حامل بار، مقاومت سطحی و ویژه، متوسط عبور و شاخص شایستگی بدست آمده برای لایههای نازک FTO

شاخص شایستگی	متوسط عبور	مقاومت ويژه	مقاومت سطحى	غلظت حامل بار	تحرک	نام نمونه
Φ(×10 <sup>-3</sup> Ω <sup>-1</sup> )	<i>T<sub>av</sub></i> (400-900 nm) %	$ ho$ (×10 <sup>-4</sup> $\Omega$ .cm)	<i>R<sub>sh</sub></i> (Ω/sq)	<i>n</i> (×10 <sup>20</sup> cm <sup>-3</sup> )	μ (cm².V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	
٠٫٢٣٩	۸۱ <sub>/</sub> ۳۷	۲۰۲	۵۳۲	۰, ۲ • ۵	۱۵,۱	F1
۶,۳۴	٨٦, ١٧	14,8	۳۶	۲,۳۴	١٨٫٣	F2
١۶,۵	XY/FY	٨,•٩	18	۳٫۲۵	۲۰,۶	F3
١۴٫٨	$\lambda\lambda_{J}\Delta Y$	٨,٩٣	۲۰	۴٫۰۹	14/1	F4



**شکل ۴** تغییرات الف) ویژگیهای الکتریکی شامل تحرک، غلظت حامل بار و مقاومت ویژه ب) تحرک و نسبت (۲۰۱)/TC(۲۰۱) برای نمونههای F1 ،F2 ،F3 ،F4 ،F4

به طورکلی تغییر مقاومت ویژه ناشی از تغییر غلظت حاملهای بار آزاد و تحرک آنها در ساختار لایههای نازک است [۲۵]. غلظت حاملهای بار آزاد در مواد نیمرسانای نوع n، بیشتر برآمده از تهیجای اکسیژن در ساختار و یا در نتیجه ورود آلاینده مناسب به ساختار بلوری این مواد است [۲۶]. بر این اساس، در لایه نازک خالص SnO<sub>2</sub> بیشتر حاملهای بار آزاد (با غلظت <sup>3</sup>-۲۰۱۹ ۲۰۱۹×۲٫۰۵) باید ناشی از نقص تهیجای اکسیژن باشند. چنان که انتظار می ود، افزودن نمک F به محلول پیشماده و در نتیجه آن جایگزینی اکسیژن در شبکه بلوری SnO<sub>2</sub> باعث افزایش چشمگیر غلظت حامل های بار آزاد می-شود. پیشتر اشاره شد که به دلیل نزدیک بودن مقادیر شعاع یونی  $F^{-}$  و  $O^{2-}$  و همچنین نزدیکی انرژیهای پیوندی Sn-O و ، این جایگزینی بسیار محتمل است. هر جایگزینی  $\mathrm{O}^{2^{-}}$  با Sn-F ·F باعث بوجود آمدن يک الکترون آزاد مي شود. افزايش چشمگیر غلظت حامل بار آزاد حتی در نمونه F2 با کمترین مقدار آلاینده F (۲٫۳۴×۱۰<sup>۲۰</sup> در ۲٫۳۴) نیز دیده می شود. افزایش غلظت حاملهای بار آزاد به طور پیوسته با افزایش آلاینده F در نمونههای F3 و F4 نیز ادامه یافته است. البته چنان که در نمودار تغییرات غلظت حامل بار در شکل ۴ الف دیده می شود، شیب این افزایش در نمونه F4 کاهش مییابد.

بر اساس نتایج بدست آمده، عامل تعیین کننده در کمینه بودن مقاومت ویژه نمونه F3، بیشینه بودن تحرک حامل بار در این لایه نازک است. تحرک نیز مانند غلظت حامل بار با آلاینده r افزایش می یابد اما در نمونه F3 به مقدار بیشینه (<sup>-1</sup>s) F ا ۲۰،۶ میرسد و سپس کاهش مییابد. کاهش قابل توجه تحرک در نمونه F4 بر افزایش غلظت حامل بار در این نمونه غلبه کرده و در نتیجه آن شاهد کاهش مقاومت ویژه در مقایسه با نمونه F3 هستیم. پراکندگی حاملهای بار آزاد در شبکه بلوری عامل محدودکننده تحرک است [۲۷]. حامل های بار آزاد ممکن است از مرزهای میان بلورکها دچار پراکندگی شوند. دلیل این پراکندگی وجود پیوندهای آویزان و در نتیجه سد پتانسیل شکل گرفته در مرز دانههاست. بررسیها نشان داده است که در نیمرساناهای آلاییده به دلیل بی نظمی بوجود آمده در ساختار، مسافت آزاد میانگین حاملهای بار آزاد از چند نانومتر تجاوز نمی کند. از سویی با در نظر گرفتن اندازه بزرگ بلوركها لايههای نازک FTO (۳۸ ۴۱ ۴۱-۶۴) در این پژوهش، پراکندگی از مرز بلورکها نمی تواند عامل اصلی محدودکننده تحرک باشد. در پژوهش ژانگ و همکاران [۲۸] پیرامون سازوکارهای پراکندگی در لایههای نازک اکسید رسانای شفاف

مشخص شده است که برای غلظت حامل های بار آزاد بیشتر از ۵×۱۰۱۸ cm<sup>-3</sup> و دمای بالاتر از K ،۱۰۰ سازوکار غالب برای پراکندگی نوسان شبکه بلوری است. این امر همخوانی خوبی با نتایج بدست آمده در این پژوهش دارد. چنان که در شکل ۴-ب دیده می شود، روند تغییرات تحرک و نسبت TC(۳۰۱)/TC(۱۱۰) کاملا بر هم منطبق هستند. چنان که پیشین تر اشاره شد، کوروتکوف و همکاران از محلولهای پیشماده متفاوت برای رشد لایههای نازک SnO<sub>2</sub> با جهت-گیریهای بلوری غالب متفاوت استفاده کردند. یافتههای آنها نشان داد که بیشترین تحرک حامل بار در لایه نازک با راستای بلوری غالب (۳۰۱) رخ میدهد [۲۴]. افزون بر این، بیشترین فشردگی در ساختار بلوری SnO<sub>2</sub> برای راستای بلوری (۱۱۰) گزارش شده است [۲۴، ۲۹، ۳۰]. بر این اساس، کاهش مقدار TC(110) همزمان با افزایش مقدار (۲۰۱) ۲C، در راستای کاهش پراکندگی حاملهای بار به دلیل نوسان شبکه بلوری است. بر اثر همزمان دو کمیت غلظت حاملهای بار آزاد و تحرک آنها منجر به دستیابی به کمینه مقاومت ویژه در لایه نازک FTO با / ۳۰at. آلاینده F شده است.

# ويژگىھاي اپتيكى

مقادیر عبور و بازتاب آینهوار لایههای نازک FTO با مقادیر متفاوت آلاینده F، در گستره طول موجی ۳۰۰ ۳۰۰ در شکل ۵ نشان داده شده است. دیده می شود که مقدار عبور به صورت پیوسته با افزایش آلایش F بویژه در طول موجهای پایین تر، افزایش می یابد. این امر با وجود افزایش تدریجی ضخامت لايبه از نمونه F1 تا F3 رخ مىدهد. به نظر مىرسد که افزایش کم در طول موجهای بالاتر به دلیل حضور F در ساختار و جایگزینی  $^{-2}O$  با F در لایههای نازک FTO باشد. اما عامل مشهود در بهبود مقدار عبور، جابهجایی لبه جذب لایه-های نازک FTO با افزایش آلایش F به سمت طول موجهای پایینتر است. جابهجایی لبه جذب در نتیجه تغییر در گاف انرژی اتفاق رخ می دهد. از این رو مقدار گاف انرژی ( $E_g$ ) لایه های نازک F1 تا F4 با استفاده از مقادیر بدست آمده برای عبور (T)، بازتاب آینهوار (R) و ضخامت (t) برآورد شد. با استفاده از این مقادیر می توان نخست ضریب جذب (۵) را محاسبه کرد. سپس با برونیابی بخش خطی نمودار <sup>۲</sup>(*ahv*) بر حسب  $h \nu$  (انرژی پرتوی فرودی) تا مقدار صفر روی محور انرژی، ۴=۰ (*ahv*)، مقادیر گاف انرژی به دست میآید [۳۱، ۳۲] (شکل ۶).



شکل ۵ مقادیر تجربی عبور و بازتاب اپتیکی لایههای نازک FTO تهیه شده به روش گرما کافت افشانهای.



شکل P نمودار hv بر حسب hv برای برآورد گاف انرژی لایه های نازک FTO رشدیافته به روش گرما کافت افشانه ای.

مقادیر بدست آمده برای گاف انرژی نمونههای F1 تا F4 در جدول ۲ آورده شده است. چنان که انتظار میرفت، گاف انرژی از مقدار ۳۱٬۶۸ eV برای نمونه F1 (نمونه خالص SnO<sub>2</sub>) به صورت پیوسته تا مقدار ۳۱٬۸۸ eV برای نمونه F4 (با بیشترین

مقدار آلاینده F) افزایش یافته است. در لایههای رسانای شفاف که رسانندگی آنها به دلیل آلاینده بهبود یافته است، سطح فرمی با افزایش مقدار آلایش به سمت مقادیر بالاتر جابهجا میشود [۳۳]. این امر باعث جابهجایی لبه جذب به سمت طول

موجهای کوچکتر و در نتیجه افزایش گاف انرژی میشود. به این پدیده جابهجایی بورستین-موس میگویند [۶]. روند مشابه در افزایش پیوسته گاف انرژی و غلظت حاملهای بار آزاد گویای اثر این پدیده بر مقدار گاف انرژی لایه نازک FTO تهیه شده به روش افشانهای در این پژوهش است. سرانجام دیده شد که با افزایش آلاینده از نمونه F1 تا نمونه F4، متوسط عبور در گستره طول موجی mr ۴۰۰–۹۰۰ به ترتیب از ٪۸۱/۳۷ تا ٪۸۵/۵۷ افزایش یافته است (جدول ۳).

# شاخص شایستگی

با هدف کمی سازی اثر هر یک از عوامل رسانندگی و عبور در لایه های نازک رسانای شفاف، شاخص شایستگی با رویکردهای متفاوتی استفاده شد. مقادیر بالای شاخص شایستگی در مرحله اول نشان دهنده رسانندگی و شفافیت بالا در لایه نازک رسانای شفاف است و در مرحله بعد نشان می دهد که این دو کمیت در شفاف است و در مرحله بعد نشان می دهد که این دو کمیت در ارتباط با هم در حالت بهینه قرار دارند. یکی از مرسوم ترین شفافیت طراحی شده، شاخص شایستگی که با تاکید بر میزان شفافیت طراحی شده، شاخص شایستگی هک، RSh مقدار عبور لایه نازک مورد نظر است [۳۴]. در این بررسی، T به صورت نازک مورد ر گستره طول موجی ۴۰۰ ۴۰۰ در نظر گرفته شده است و به همراه مقاومت سطحی و شاخص شایستگی هک محاسبه شده برای چهار لایه FTO تهیه شده

به روش افشانهای در جدول ۳ آورده شده است. مقادیر آشکارا نشان می دهند که تفاوت چشمگیری میان شاخص شایستگی لایه نازک خالص SnO2 ( $-1 \cdot \Omega - 1 - 3 \times (7,79)$  و لایه های نازک با آلاینده F وجود دارد. با ورود F در نمونه F2، شاخص شایستگی بیش از بیست برابر می شود ( $1 - \Omega - 1 - 7 \times 7,79$ ). شایستگی بیش از بیست برابر می شود ( $1 - \Omega - 1 - 7 \times 7,79$ ). مقاومت مقدار شاخص شایستگی مربوط به نمونه F3 ( $1 - 1 \cdot \Omega - 1 - 7 \times 7,79$ ). مقاومت سطحی این لایه پس از آلایش F است. اگرچه متوسط مقاومت سطحی این لایه پس از آلایش F است. اگرچه متوسط عبور در نمونه F4 کمی از نمونه F3 باعث پیشی گرفتن آن شده توجه مقاومت سطحی در نمونه F3 باعث پیشی گرفتن آن شده

شاخص شایستگی بدست آمده در این پژوهش برای نمونه F3 در مقایسه با بهترین نتایج بدست آمده برای لایههای نازک FTO تهیه شده به روش افشانه ای، قابل توجه است. به منظور مقایسه، در جدول ۴ نتایج برخی از بهترین لایههای نازک FTO تهیه شده به روش افشانه ای با مقادیر شاخص شایستگی قابل توجه گردآوری شده است [۱۳، ۳۵–۳۸]. از آنجا که در برخی از این بررسیها از بیشینه عبور نقطهای در محاسبه شاخص شایستگی استفاده شده است، شاخص شایستگی F3 با در نظر گرفتن بیشینه عبور نقطهای نیز محاسبه و در جدول ۴ گزارش شده است.

مرجع	شاخص شایستگی	عبور	مقاومت ويژه	مقاومت سطحى	
	$\Phi$ (×10 <sup>-3</sup> $\Omega$ <sup>-1</sup> )	T (%)	$ ho$ ( $\Omega$ .cm)	<i>Rsh</i> (Ω/sq)	
اين پژوهش	١۶,۵	۸۷٬۴۷ (۹۰۰-۴۰۰ nm)	۸, • ۹× <sup>۴-</sup> ۱ •	18	
اين پژوهش	۳۴,•۶	(بیشینه عبور) ۹۴٬۰۳	۸, • ۹× <sup>۴-</sup> ۱ •	18	
[1٣]	٣۴٫۵	(بیشینه عبور) ۸۲	۱,٩•× <sup>۴-</sup> ۱•	۴٫۵	
[٣۵]	۲٠,۲٩	۸۳٫۷۸ (۵۵۰ nm)	-	٨,۴	
[٣۶]	١٣/١	۸۷ (۵۵۰ nm)	•, <b>\Y</b> \$**• <b>)</b> •	۱۸,۹	
[٣٧]	۲,۶	٧٩	$\lambda_{1} \mathbf{P} \times \mathbf{P}_{1}$	-	
[٣٨]	۵٫٩	۷۴ (۵۵۰ nm)	۱ • <sub>/</sub> • × <sup>۴–</sup> ۱ •	۲,۴	

جدول ۴ مقایسه مقدار رسانندگی و عبور نمونه F3 با بهترین نتایج بدست آمده برای لایههای نازک FTO تولید شده به روش افشانهای.

to silicon wafer solar cells", Thin Solid Films 555 (2014) 28-32.

https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.08.109

[2] Asl, H.Z., Rozati, S.M., "Some physical properties of n-IZO/p-CuO thin film heterojunction diodes completely made by spray pyrolysis", Journal of Materials Science: Materials in Electronics 29 (2018) 4365-4372. https://doi.org/10.1007/s10854-017-8385-1

[3] Belaidi, A., Chaqour, S.M., Gorochov, O., Neumann-Spallart, M., "Photoelectrochemical and physical properties of titanium dioxide films obtained by aerosol pyrolysis", Materials Research 39 599-608. Bulletin (2004)https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2003.12.012 [4] Chu, J., Li, X., Cheng, Y., Xiong, S., "Electrochromic properties of Prussian Blue nanocube film directly grown on FTO substrates by hydrothermal method", Materials Letters 258 (2020)126782. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.126782

[5] Pakniyat, S., Motevalizadeh, L., Jami, S., "The effect of Ga-doping on the structural and optical properties of ZnO thin films prepared by spray pyrolysis (in Persian)", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 27 (2019) 747-752. https://doi.org/10.29252/ijcm.27.3.747

[6] Malekiyan, M., Fadavieslam□, M., Ardyanian, m., "Investigation of the structural, optical and gas sensing properties of Aluminum doped zinc -oxide nanoparticles synthesized by solvo-thermal method", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 27 (2019) 975-984. https://doi.org/10.29252/ijcm.27.4.975

[7] Asl, H.Z., Rozati, S.M., "High-Performance Spray-Deposited Indium Doped ZnO Thin Film: Structural, Morphological, Electrical, Optical, and Photoluminescence Study", Journal of Electronic Materials 47 (2018) 3568-3576. https://doi.org/10.1007/s11664-018-6201-1

[8] Hinna, M., Hartiti, B., Gouya, A., Labrim, H., Fadili, S., Tahri, M., Belfhailli, A., Siadat, M., Thévenin, P., "Synthesis of ITO thin films by Spray pyrolysis based on Taguchi design", Materials Today: Proceedings 66 (2022) 447-455. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.323

[9] Asl, H.Z., Rozati, S.M., "Influence of texture coefficient on the electrical properties of spraydeposited fluorine-doped tin oxide thin film", برداشت

روش گرما کافت افشانهای برای رشد لایههای ناز ک FTO با شاخص شایستگی بالا استفاده شد. مقدار آلاینده F در لایههای تهیه شده به ترتیب ۰، ۲۰، ۳۰ و ٪. ۴۰at (نمونههای F2،F1)، F2 F3 و F4) انتخاب شد. در نتیجه تغییر در مقدار آلاینده F3 اندازه بلورک و کرنش بهجامانده در ساختار بلوری لایههای FTO، نخست افزایش یافت و در نمونه F3 به بیشترین مقدار خود رسید، سیس در نمونه F4 کمی کاهش دیده شد. مقادیر ضریب بافت برای لایههای FTO تهیه شده محاسبه گردید. دیده شد که رابطه مستقیم میان تغییرات بوجود آمده در بافت لایههای نازک FTO و تحرک حامل های بار در آن ها وجود دارد. این امر غلبه اثر پراکندگی حامل های بار به دلیل نوسان-های شبکه بلوری را در لایههای FTO نشان میدهد. با افزایش مقدار آلاینده F، مقدار عبور ایتیکی به صورت پیوسته تا حدی افزایش یافت. جابهجایی لبه جذب و در نتیجه افزایش گاف انرژی در اثر یدیده جابهجایی بورستین-موس، دلیل عمده افزایش عبور بود. افزایش پیوسته غلظت حاملهای بار درپی افزایش آلایش F و بیشنه بودن تحرک در نمونه F3، منجر به دستیابی به مقاومت ویژه Δ،۰۹×۴-۱۰ گردید. با در نظر گرفتن متوسط عبور قابل توجه ٪۸۷٬۴۷ در گستره طول موجی ۹۰۰-۴۰۰ nm، شاخص شایستگی Ω-1×۱٬۶۵ برای نمونه F3 بدست آمد. این مقدار قابل مقایسه با بهترین مقادیر شاخص شایستگی بدست آمده برای لایههای نازک FTO است. با توجه به مزایای روش لایهنشانی گرما کافت افشانه ای شامل مقرون به صرفه بودن و امکان استفاده در تولید انبوه، لایههای FTO تولید شده می توانند گزینه مناسبی برای استفاده در دستگاههای بر یایه TCO باشند.

#### قدردانی

نویسندگان از حمایت مالی دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان (قرارداد پژوهانه شماره ۳/۲/۶۹۳۲) قدردانی مینمایند.

مراجع

[1] Djessas, K., Bouchama, I., Gauffier, J.L., Ayadi, Z.B., "Effects of indium concentration on the properties of In-doped ZnO films: Applications [17] Gaber, A., Attia, S.Y., Salem, A.M.S., Mohamed, S.G., El-Hout, S.I., "Microwaveassisted fabrication of SnO2 nanostructures as electrode for high-performance pseudocapacitors", Journal of Energy Storage 59 (2023) 106358. https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106358

[18] Asl, H.Z., Rozati, S.M., "Photoluminescence and Optical Properties of CuO Thin Films Deposited via Spray Pyrolysis: Influence of Substrate Temperature", JTAP 18 (2024) 182421-182432.

https://doi.org/10.57647/j.jtap.2024.1802.21

[19] Padmaja, B., Dhanapandian, S., Ashokkumar, K., Krishnakumar, N., "Cobalt ions doped SnO2 nanoparticles for enhanced photocatalytic and supercapacitor applications", Inorganic Chemistry Communications 155 (2023) 110948. https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.110948

[20] Zhang, B., Tian, Y., Zhang, J.X., Cai, W.,
"The role of oxygen vacancy in fluorine-doped SnO2 films", Physica B: Condensed Matter 406 (2011)
1822-1826.

https://doi.org/10.1016/j.physb.2011.02.037

[21] Rozati, S.M., Seyed Hashemi, S.A., "Fabrication and characterization of physical and electrochemical properties of ZnO/ZnS and ZnO/ZnS/ZnO nanostructured composite thin films", Iranian Journal of Crystallography and 795-810. Mineralogy 31 (2023)https://doi.org/10.61186/ijcm.31.4.795

[22] Benhaoua, B., Abbas, S., Rahal, A., Benhaoua, A., Aida, M.S., "Effect of film thickness on the structural, optical and electrical properties of SnO2: F thin films prepared by spray ultrasonic for solar cells applications", Superlattices and Microstructures 83 (2015) 78-88. https://doi.org/10.1016/j.spmi.2015.03.017

[23] Moholkar, A.V., Pawar, S.M., Rajpure, K.Y., Bhosale, C.H., Kim, J.H., "Effect of fluorine doping on highly transparent conductive spray deposited nanocrystalline tin oxide thin films", Applied Surface Science 255 (2009) 9358-9364. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.07.035

[24] Korotkov, R.Y., Ricou, P., Farran, A.J.E., "Preferred orientations in polycrystalline SnO2 films grown by atmospheric pressure chemical vapor deposition", Thin Solid Films 502 (2006) 79-87. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.07.248 Journal of Materials Science: Materials in Electronics 32 (2021) 1668-1676. https://doi.org/10.1007/s10854-020-04936-w

[10] Gordon, R.G., "Criteria for Choosing Transparent Conductors", MRS Bulletin 25 (2000) 52-57. https://doi.org/10.1557/mrs2000.151

[11] Benhaoua, A., Rahal, A., Benhaoua, B., Jlassi, M., "Effect of fluorine doping on the structural, optical and electrical properties of SnO2 thin films prepared by spray ultrasonic", Superlattices and Microstructures 70 (2014) 61-69. https://doi.org/10.1016/j.spmi.2014.02.005

[12] Tuyen, L.T.C., Jian, S.-R., Tien, N.T., Le, P.H., "Nanomechanical and Material Properties of Fluorine-Doped Tin Oxide Thin Films Prepared by Ultrasonic Spray Pyrolysis: Effects of F-Doping", Materials 12 (2019) 1665. https://doi.org/10.3390/ma12101665

[13] Ramírez-Amador, R., Alvarado-Pulido, J.J., Martínez-Hernández, H.P., Cortes- Maldonado, R., Alcántara-Iniesta, S., Flores-Carrasco, G., Ojeda-Durán, E., Malik, O., Morales-de la Garza, L., Méndez-Rojas, M.Á., Panecatl-Bernal, Y., Luna-López, J.A., López-Salazar, P., "Study of fluorinedoped tin oxide thin films deposited by pneumatic spray pyrolysis and ultrasonic spray pyrolysis: a direct comparison", Materials Research Express 10 (2023) 066402. https://doi.org/10.1088/2053-1591/acda1a

[14] Asl, H.Z., Rozati, S.M., "High-quality spraydeposited fluorine-doped tin oxide: effect of film thickness on structural, morphological, electrical, and optical properties", Applied Physics A 125 (2019) 689. https://doi.org/10.1007/s00339-019-2943-8

[15] Abdelkrim, A., Rahmane, S., Abdelouahab, O., Abdelmalek, N., Brahim, G., "Effect of solution concentration on the structural, optical and electrical properties of SnO 2 thin films prepared by spray pyrolysis", Optik - International Journal for Light and Electron Optics 127 (2016) 2653-2658. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.11.232

[16] Smith, A., Laurent, J.-M., Smith, D.S., Bonnet, J.-P., Clemente, R.R., "*Relation between* solution chemistry and morphology of SnO2-based thin films deposited by a pyrosol process", Thin Solid Films 266 (1995) 20-30. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0040-6090(95)06648-9 [32] Tajabor, N., Alinejad, M.R., Iranmanesh, P., "Preparation of SrTiO3 thin films by spray pyrolysis technique and study of their structural and optical properties (in Persian)", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 16 (2008) 225-232.

[33] Mahmoudi, T., Masoudi, M., "An experimental and theoretical study on the physical properties of Al doped ZnO thin films (in Persian)", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 27 (2019) 487-494. https://doi.org/10.29252/ijcm.27.2.487

[34] Shinde, S.S., Shinde, P.S., Pawar, S.M., Moholkar, A.V., Bhosale, C.H., Rajpure, K.Y., "Physical properties of transparent and conducting sprayed fluorine doped zinc oxide thin films", Solid State Sciences 10 (2008) 1209-1214. https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2007.11 .031

[35] Wang, L.K., Chen, J.J., Yu, J.Y., Zhao, H.L., Yang, J.K., "Highly textured spray-deposited SnO2:F films with high haze for solar cells", Vacuum 169 (2019) 108879. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.108879

Mahmoudiamirabad, [36] Ζ., Eshghi, Н., "Achievements of high figure of merit and infra-red reflectivity in SnO2:F thin films using spray pyrolysis technique", **Superlattices** and Microstructures (2021)152 106855. https://doi.org/10.1016/j.spmi.2021.106855

[37] Thomas, R., Mathavan, T., Ganesh, V., Yahia, I.S., Zahran, H.Y., AlFiafy, S., Kathalingam, A., "Investigation of erbium co-doping on fluorine doped tin oxide via nebulizer spray pyrolysis for optoelectronic applications", Optical and Quantum Electronics 52 (2020) 248. https://doi.org/10.1007/s11082-020-02376-8

[38] Memarian, N., Rozati, S.M., Elamurugu, E., Fortunato, E., "*Characterization of SnO2:F thin films deposited by an economic spray pyrolysis technique*", physica status solidi (c) 7 (2010) 2277-2281. https://doi.org/10.1002/pssc.200983738. [25] Asl, H.Z., Rozati, S.M., "Spray-deposited CuO:In2O3 nanocomposite thin film: Enhancement in electrochemical performance", Journal of Alloys and Compounds 928 (2022) 167211.

https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167211

[26] Karthick, P., Saravanakumar, K., Sanjeeviraja, C., Jeyadheepan, K., "Realization of highly conducting and transparent SnO2 thin films by optimizing F/Sn molar ratio for electrochemical applications", Thin Solid Films 713 (2020) 138362. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2020.138362

[27] Calnan, S., Tiwari, A.N., "High mobility transparent conducting oxides for thin film solar cells", Thin Solid Films 518 (2010) 1839-1849. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.09.044

[28] Zhang, D.H., Ma, H.L., "Scattering mechanisms of charge carriers in transparent conducting oxide films", Applied Physics A 62 (1996) 487-492.

https://doi.org/10.1007/bf01567122

[29] Zhu, B.L., Liu, F., Li, K., Lv, K., Wu, J., Gan, Z.H., Liu, J., Zeng, D.W., Xie, C.S., "Sputtering deposition of transparent conductive F-doped SnO 2 (FTO) thin films in hydrogen-containing atmosphere", Ceramics International 43 (2017) 10288-10298.

https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.05.058

[30] Kumar, M., Kumar, A., Abhyankar, A.C., "Influence of texture coefficient on surface morphology and sensing properties of W-doped nanocrystalline tin oxide thin films", ACS applied materials & interfaces 7 (2015) 3571-3580. https://doi.org/10.1021/am507397z

[31] Javadian, A., Fadavieslsm, M.R., "Effect of substrate temperatures, spray rates, solution volumes, and nickel concentration on structural and optical properties of NiO thin films prepared by spray pyrolysis", Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 31 (2023) 165-182. https://doi.org/10.52547/ijcm.31.1.165