

تأثیر اتمسفر فرآیند پخت روی خواص الکتریکی و نوری لایه نازک نانو ساختار اکسید روی دارای آلایش آلومینیوم و تیتانیم

اکبر اسحاقی

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

اکبر داودی، محمد تجلی، امید میرزایی

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان

(دریافت مقاله ۹۴/۰۹/۲۲ - پذیرش مقاله : ۹۵/۰۱/۱۷)

چکیده

در این تحقیق لایه نازک نانو ساختار اکسید روی دارای آلایش آلومینیوم و تیتانیم (ATZO) به روش سل ژل تهیه گردید. آنالیز فازی توسط تکنیک پراش پرتو ایکس (XRD)، مشاهدات ریز ساختاری و آنالیز عنصری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) و ابزار طیف سنج تفکیک انرژی (EDX) انجام شده و زبری سطح با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج XRD نشان داد که حضور اتمسفر احیایی باعث بهبود بلورینگی لایه نازک ATZO می گردد. همچنین مشخص شد که استفاده از اتمسفر احیایی موجب افزایش متوسط عبور نور از % ۸۶/۳۹ به % ۸۸/۴۱ و کاهش چشمگیر میزان مقاومت ویژه الکتریکی از $13 \times 10^6 \Omega\text{cm}$ تا $0.006 \times 10^6 \Omega\text{cm}$ گردیده است. اندازه دانه لایه های نازک مختلف در محدوده ۲۳ nm الی ۲۹ nm بوده و میزان زبری سطح آنها در حدود ۸ nm اندازه گیری شد. با توجه به میزان شفافیت و مقدار مقاومت ویژه، ATZO دارای قابلیت کاربرد در ترانزیستور های لایه نازک است.

واژه های کلیدی: لایه نازک، اکسید روی آلاییده شده، خواص الکتریکی، خواص نوری.

Effect of Annealing Atmosphere on the Optical and Electrical Properties of Al-Ti Co-doped ZnO Nano-Structured Thin Films

Akbar Eshaghi

Faculty of Materials Science and Engineering, Malek-Ashtar, University of Technology, Shahin shahr, Esfahan, Iran

Akbar Davoodi, Mohammad Tajally, Omid Mirzaee

Faculty of Materials and Metallurgical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

(Received 13 Nov 2015, accepted 5 Mar 2016)

Abstract

Utilizing the sol-gel method, Al-Ti codoped ZnO (ATZO) nanostructured thin films were synthesized. The X-ray diffraction (XRD) analysis, field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) and atomic force microscopy (AFM) methods were used to investigate the structure, morphology and surface roughness of the thin films. From XRD patterns, it was found that reducing atmosphere causes an improvement in the crystallinity of the ATZO thin film. The post annealing process in the reducing atmosphere of 95 % N₂ - 5 % H₂ has revealed that cause a significant reduction of the resistivity from $13 \times 10^6 \Omega\text{cm}$ to $0.006 \times 10^6 \Omega\text{cm}$, along with an increase in transmittance from 86.39% to 88.41%. It was observed that the grain size varies from 23 nm to 29 nm and RMS roughness of the thin films were found to be around 8 nm. According to their optical transparency and resistivity values, ATZO nanostructured thin films can be used in thin film transistors (TFTs).

Keyword: Al-Ti co-doped ZnO, Thin films, Optical properties, Resistivity, Nanostructure, Annealing atmosphere.

E-mail of corresponding author: eshaghi.akbar@gmail.com

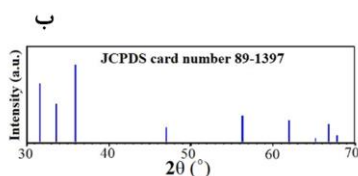
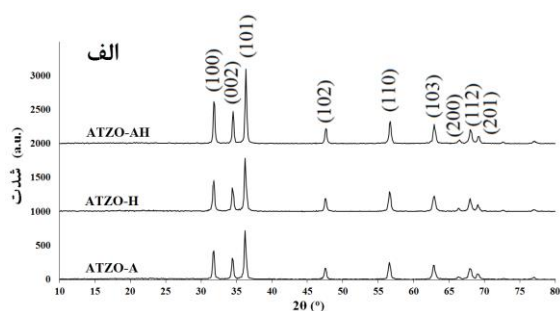
مقدمه

درون ۴۰ میلی لیتر ۲-متوکسی اتانول در حال چرخش روی همزن مغناطیسی اضافه گردید (نسبت مولی دی اتانول آمین به ۲-متوکسی اتانول برابر با یک در نظر گرفته شد). تا ایجاد یک محلول کاملاً شفاف و یکنواخت، همزدن ادامه یافت. در ادامه میزان ۵/۴۸۷ گرم از استات روی به محلول در حال چرخش روی همزن مغناطیسی، به آرامی اضافه شد و تا انحلال کامل استات روی و ایجاد یک محلول کاملاً شفاف و یکنواخت همزدن ادامه یافت. برای افزودن آلومینیوم، مقدار ۰/۱ گرم نترات آلومینیوم به محلول افزوده شد و تا ایجاد یک محلول کاملاً شفاف و یکنواخت همزدن ادامه یافت. با توجه به عدم حلالیت بوتوکساید تیتانیم درون سل اکسید روی، سل حاوی تیتانیم جداگانه تهیه و در ادامه به میزان ۰/۱ at. % به سل اکسید روی اضافه شد. سل تیتانیم با استفاده از اتانول و استیل-استون تهیه گردید [۶]. سپس بالن داخل یک بشر حاوی آب قرار داده می شود. دمای بشر حاوی آب با استفاده از یک همزن مغناطیسی دارای گرمکن به 75°C می رسد. محلول در این دما به مدت یک ساعت نگهداری شده و سپس به آرامی تا دمای محیط سرد شد. در نهایت محلول درون ظرف کدری ریخته شده و قبل از لایه نشانی، به مدت حداقل ۲۴ ساعت نگهداری گردید. در ادامه زیر لایه‌های شیشه‌ای به دقت با کمک مایع ظرفشویی و آب مقطر شسته می شوند. در ادامه با استفاده از اتانول و استون شسته شدند و در نهایت خشک گردیدند. برای پوشش دهی نمونه‌ها از روش غوطه‌وری استفاده گردید. سرعت فرو روی و بالا آمدن زیر لایه برابر با $4/5 \text{ mm/sec}$ تنظیم شد. جهت خشک کردن نمونه‌ها تا دمای 300°C حرارت داده شده و در این دما به مدت ۱۵ دقیق نگهداری شد. نمونه اول (ATZO-A) فقط تحت اتمسفر محیط تا دمای 550°C به مدت ۲ ساعت پخت شد. نمونه دوم (ATZO-H) نیز فقط تحت اتمسفر احیایی (۹۵ درصد حجمی نیتروژن - ۵ درصد حجمی هیدروژن) تا دمای 550°C به مدت ۲ ساعت پخت شد. نمونه سوم

اکسیدهای شفاف هادی و نیمه هادی به دلیل کاربردهای بسیار وسیعشان، امروزه در کانون توجه پژوهشگران واقع شده‌اند [۱]. اکسیدهای شفاف هادی و نیمه هادی، گروهی از مواد هستند که همزمان دارای دو خاصیت شفافیت بالا (بیشتر از ۸۰٪) در بازه نور مرئی (۳۸۰ تا ۷۵۰ نانومتر) و هدایت الکتریکی هستند [۲]. این مواد، بیشتر اکسیدهای فلزی هستند که براساس هدایت الکتریکی که از خود نشان می‌دهند به دو دسته اکسیدهای شفاف هادی و اکسیدهای شفاف نیمه‌هادی تقسیم بندی می شوند [۲]. اکسید ایندیم آلانید شده با قلع (ITO)، بهترین و پرکاربردترین ماده به عنوان اکسید شفاف هادی طی سال‌های اخیر بوده است. اما کمیابی و گران قیمت بودن ایندیم، پایداری شیمیایی ضعیف ITO و سمی بودن آن، سبب شده است تا تحقیقات گسترده‌ای در زمینه یافتن مواد جایگزین برای ITO انجام شود. بهترین و متداول‌ترین جایگزین ITO، اکسید روی آلانید شده با عناصر مختلف است که خواص الکترواپتیکی منحصر به فردی داشته و ماده‌ای ارزان و غیر سمی است [۳]. تاکنون تأثیر افزودن عناصر مختلفی به ساختار ZnO بررسی شده است که موفق‌ترین آن‌ها آلومینیوم بوده است [۴]. در تحقیق نشان داده شد که اکسید روی دارای آلایش آلومینیوم و تیتانیم (ATZO) دارای خواص الکتریکی و نوری بهتری نسبت به اکسید روی خالص (ZnO) و نیز اکسید روی دارای آلایش آلومینیوم (AZO) است [۵]. در این پژوهش به بررسی تأثیر اتمسفر فرآیند پخت روی ساختار، خواص الکتریکی و نوری لایه نازک نانو ساختار اکسید روی دارای آلایش آلومینیوم و تیتانیم پرداخته شده است.

مواد و روش آزمایش‌ها

مواد مورد استفاده در این پژوهش از شرکت مرک آلمان و با خلوص بالا تهیه گردید. در ابتدا مقدار ۲/۴ میلی لیتر از دی اتانول آمین بصورت قطره به قطره و به آهستگی، به



شکل ۱. الف) الگوی پراش پرتو ایکس لایه‌های نازک اکسید روی دارای آلایش آلومینیوم و تیتانیم، با شرایط پخت متفاوت و ب) الگوی استاندارد پراش پرتو ایکس اکسید روی.

موقعیت قله‌های اصلی و فاصله بین صفحات اتمی متناظر، برای لایه‌های نازک ATZO-A، ATZO-H و ATZO-AH در جدول ۱، گزارش شده است. همچنین در جدول ۲، اندازه دانه و نیز پارامترهای شبکه این نمونه‌ها ارایه شده است. همانگونه که از نتایج پیداست، اندازه دانه‌ها در هر دو نمونه ATZO-A و ATZO-H برابر با ۲۳ nm است و تفاوت اتمسفر پخت تغییری در ابعاد دانه‌ها ایجاد ننموده است. اما به نظر می‌رسد انجام عملیات پخت مرحله دوم موجب افزایش اندازه دانه‌ها تا ۲۹ nm در نمونه ATZO-AH شده است. این مطلب، با توجه به افزایش مدت زمان پخت نمونه‌ها قابل توجیه است، در واقع دانه‌ها طی پخت مرحله دوم نیز به رشد خود ادامه داده‌اند. اندازه دانه‌ها به عنوان یک عامل تاثیرگذار بر روی میزان عبور نور (شفافیت) و نیز هدایت الکتریکی لایه‌های نازک مطرح است. با توجه به اثر مخرب مرز دانه‌ها در متفرق کردن الکترون‌ها، بطور کلی می‌توان گفت افزایش اندازه دانه‌ها موجب بهبود شفافیت و نیز هدایت الکتریکی لایه‌های نازک اکسید روی دارای آلایش آلومینیوم و تیتانیم می‌گردد [۹]. مطلب حایز اهمیت دیگر، افزایش پارامترهای شبکه در نمونه‌های ATZO-H و

ATZO-AH ابتدا تحت اتمسفر محیط تا دمای 550°C به مدت ۲ ساعت پخت شده و سپس تحت اتمسفر احیایی (۹۵ درصد حجمی نیتروژن - ۵ درصد حجمی هیدروژن) تا دمای 550°C به مدت ۲ ساعت پخت گردید.

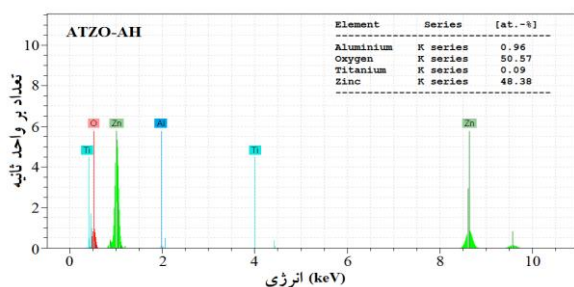
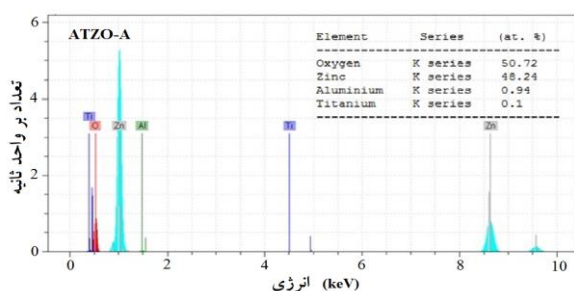
آنالیز فازی توسط ابزار پراش پرتو ایکس PHILIPS PW3040 انجام گرفت. مشاهدات ریخت شناسی و آنالیز عنصری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (MIRA 3-XMU, TESCAN) و ابزار طیف سنج تفکیک انرژی متصل به آن صورت پذیرفت. زبری سطح نمونه‌ها با میکروسکوپ نیروی اتمی (Bruker nano-s 1001) مطالعه شد. طیف عبور نور با استفاده از دستگاه طیف سنج -AvaSpec (Avantes HS2048XL) ارزیابی شده و مقاومت ویژه الکتریکی (ρ) با دستگاه مقاومت سنج (Hameg, programmable LCR-bridge HM8118) اندازه‌گیری گردید.

نتایج و بحث

در شکل ۱ الگوهای پراش پرتو ایکس لایه‌های نازک ATZO-A، ATZO-H و ATZO-AH همراه با کارت مطابق با الگوی استاندارد، نشان داده شده است. همانگونه که از تصویر الگوها پیدا است قله‌ها متعلق به ساختار بلوری هگزاگونال و رتزیات بوده و همه نمونه‌ها کاملاً تک‌فاز هستند. در مقایسه، تفاوت چندانی میان شدت قله‌ها در دو نمونه ATZO-A و ATZO-H مشهود نیست. اما در نمونه ATZO-AH قله‌ها مشخصاً دارای شدت بیشتری هستند. علت افزایش بلورینگی در این نمونه، استفاده از پخت مرحله دوم در اتمسفر احیایی است. قبلاً تاثیر مثبت فرآیند پخت مرحله دوم در افزایش بلورینگی لایه‌های نازک اکسیدروی دارای آلایش منگنز گزارش گردیده است [۷]. نتایج بدست آمده در این قسمت با نتایج سایر پژوهشگران قابل قیاس است [۸].

گیری شده) با درصدهای اسمی عناصر موجود تطابق خوبی دیده می‌شود. نتایج بدست آمده در این قسمت با نتایج سایر پژوهشگران قابل قیاس است [۱۲].

نکته حایز اهمیت اینکه میزان اکسیژن موجود در لایه نازک با انجام پخت مرحله دوم تحت اتمسفر احیایی از ۵۰/۷۲ به ۵۰/۵۷ at. % کاهش یافته است. این نتایج در تطابق با بحث ارایه شده در قسمت قبل، مبنی بر کاهش اکسیژن جذب شده در مرز دانه‌ها است. در پژوهش‌های پیشین مشخص شده است که کاهش میزان اکسیژن جذب شده در مرز دانه‌ها موجب بهبود هدایت الکتریکی می‌گردد. همانگونه که در ادامه شرح داده می‌شود اکسیژن‌های جذب شده در مرز دانه‌ها به عنوان مراکز به دام انداختن الکترون‌ها عمل نموده، لذا کاهش میزان آنها باعث کاهش مقدار هدایت الکتریکی می‌گردد [۱۳، ۱۴].



شکل ۲. نمودار آنالیز عنصری EDX برای لایه های نازک ATZO-A و ATZO-AH، همراه با نتایج.

تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی لایه‌های نازک ATZO-A، ATZO-H، ATZO-AH و ATZO-AH نیز سطح مقطع نمونه ATZO-AH در شکل ۳ نشان داده شده است. همانگونه که در تصاویر مشخص است ذرات

ATZO-AH نسبت به نمونه ATZO-A است. علت افزایش پارامترهای شبکه می‌تواند ایجاد جاهای خالی اکسیژن درون ساختار، بواسطه اتمسفر احیایی باشد. در تحقیق مشابه تشکیل جاهای خالی اکسیژن، در اثر ترکیب هیدروژن با اکسیژن در لایه‌های نازک اکسید روی ثابت شده است [۱۰]. همچنین در پژوهش آقای J.J. Joo کاهش و حذف اکسیژن جذب شده در مرز دانه‌ها بواسطه اعمال اتمسفر احیایی در فرآیند پخت گزارش شده است [۱۱].

جدول ۱. موقعیت قله‌های اصلی و فاصله بین صفحات اتمی نمونه‌های لایه نازک اکسید روی دارای آلایش آلومینیوم و تیتانیوم، با شرایط پخت متفاوت.

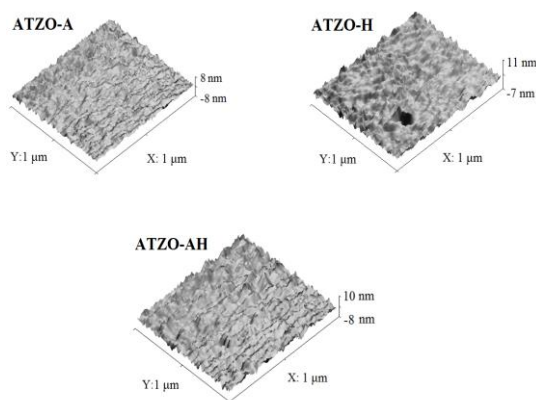
| نمونه | 2θ (°) | | | d (nm) | | |
|---------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | (۱۰۰) | (۰۰۲) | (۱۰۱) | (۱۰۰) | (۰۰۲) | (۱۰۱) |
| ATZO-A | ۳۱/۸۳۵ | ۳۴/۴۷۴ | ۳۶/۳۰۵ | ۰/۲۸۰۸ | ۰/۲۵۹۹ | ۰/۲۴۷۳ |
| ATZO-H | ۳۱/۸۳۰ | ۳۴/۴۶۸ | ۳۶/۲۹۹ | ۰/۲۸۰۸ | ۰/۲۵۹۹ | ۰/۲۴۷۳ |
| ATZO-AH | ۳۱/۸۰۸ | ۳۴/۴۵۲ | ۳۶/۲۸۱ | ۰/۲۸۱۰ | ۰/۲۶۰۰ | ۰/۲۴۷۱ |

جدول ۲. اندازه‌ی دانه و پارامترهای شبکه در لایه‌های نازک اکسید روی دارای آلایش آلومینیوم و تیتانیوم، با شرایط پخت متفاوت.

| نمونه | D(nm) | a(nm) | c(nm) |
|---------|-------|--------|--------|
| ATZO-A | ۲۳ | ۰/۳۲۴۲ | ۰/۵۱۹۶ |
| ATZO-H | ۲۳ | ۰/۳۲۴۳ | ۰/۵۱۹۸ |
| ATZO-AH | ۲۹ | ۰/۳۲۴۵ | ۰/۵۲۰۱ |

به منظور بررسی اثر اتمسفر فرآیند پخت بر روی ترکیب شیمیایی لایه نازک، نمونه‌های ATZO-A و ATZO-AH با استفاده از ابزار طیف سنج تفکیک انرژی، متصل به میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی مورد آنالیز عنصری قرار گرفت که در شکل ۲، نشان داده شده است. همانطور که مشخص است بین درصدهای واقعی (اندازه

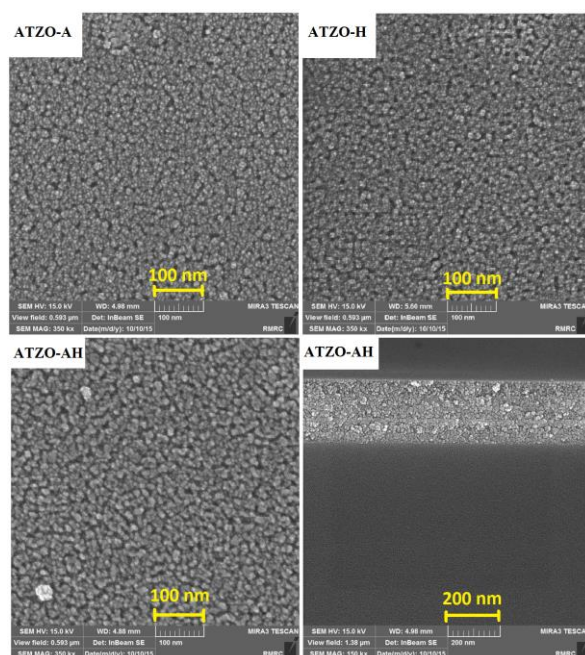
دوم تحت اتمسفر احیایی منجر به تغییر محسوس زبری سطح در لایه‌های نازک اکسید روی دارای آلایش آلومینیوم و تیتانیوم نشده است. میزان RMS اندازه‌گیری شده، برای نمونه‌های ATZO-A، ATZO-H و ATZO-AH به ترتیب برابر با $1/2$ ، $1/5$ و $1/3$ nm است. زبری سطح نیز از عوامل مؤثر بر میزان عبور نور و هدایت الکتریکی در لایه‌های نازک اکسید به شمار می‌رود، بطوری‌که با افزایش زبری سطح، شفافیت لایه نازک و نیز هدایت الکتریکی آن کاهش می‌یابد [۱۱، ۱۶].



شکل ۴. تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی از توپونموداری سطح لایه‌های نازک ATZO-A، ATZO-H و ATZO-AH.

به منظور بررسی تأثیر اتمسفر فرآیند پخت بر روی شفافیت لایه نازک اکسید روی دارای آلایش آلومینیوم و تیتانیوم، در شکل ۵، طیف عبور لایه‌های نازک ATZO-A، ATZO-H و ATZO-AH در محدوده طول موج nm ۳۰۰ تا ۹۰۰ ترسیم شده است. میزان متوسط عبور نور برای نمونه‌های مذکور در جدول ۳، گزارش شده است. همانطور که مشخص است هر سه نمونه دارای شفافیت بالایی در محدوده‌ی طول موج نور مرئی هستند. همچنین انجام فرآیند پخت مرحله دوم تحت اتمسفر احیایی موجب بهبود نسبی شفافیت لایه نازک شده است. اما میزان عبور نور در دو نمونه ATZO-A و ATZO-H تقریباً

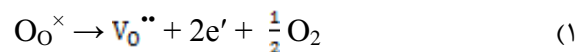
دارای ابعاد یکنواخت بوده و نیز سطح عاری از ریز ترک‌ها است. با مقایسه میان اندازه ذرات نمونه‌ها به نظر می‌رسد که انجام فرآیند پخت مرحله دوم تحت اتمسفر احیایی موجب افزایش اندازه ذرات لایه نازک اکسید روی دارای آلایش آلومینیوم و تیتانیوم شده است، که با نتایج آنالیز XRD مطابقت دارد. با توجه به تصویر سطح مقطع لایه نازک ATZO-AH مشخص است که نمونه دارای سطح یکنواخت بوده و ضخامت آن در حدود ۲۳۰ nm است. ضخامت نمونه دارای تأثیر چشمگیری در میزان عبور نور و نیز هدایت الکتریکی لایه‌های نازک اکسید روی دارد. عموماً با افزایش ضخامت، از شفافیت لایه نازک کاسته شده و به میزان هدایت الکتریکی آن افزوده می‌گردد [۱۵].



شکل ۳. تصویر FE-SEM از سطح لایه‌های نازک ATZO-A، ATZO-H و ATZO-AH و نیز سطح مقطع نمونه ATZO-AH.

تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی لایه‌های نازک ATZO-A، ATZO-H و ATZO-AH در شکل ۴، نشان داده شده است. از مقایسه نمونه‌ها مشخص می‌شود که فرآیند پخت تحت اتمسفر احیایی و یا انجام فرآیند پخت مرحله

اکسیژن با هیدورژن مطابق با سیستم نشانه گذاری کروگر - وینک بصورت زیر خواهد بود:

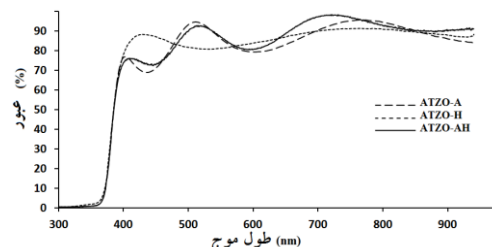


که در رابطه فوق O_2^{\times} نشاندهنده آنیون اکسیژن در مکان مربوط به خود درون ساختار اکسید روی است، $\text{V}_O^{\bullet\bullet}$ جای خالی اکسیژن است که بصورت موضعی دارای دو بار مثبت است و $2e'$ ، تعداد ۲ الکترون آزاد ایجاد شده بر اساس موازنه بارهای الکتریکی در دو سمت واکنش است [۱۰]. در این بین، با توجه به مقاومت ویژه به مراتب کمتر نمونه ATZO-AH به نظر می‌رسد که انجام فرآیند پخت مرحله دوم تحت اتمسفر احیایی موجب بهبود ملموس‌تر هدایت الکتریکی شده است. این مطلب با عنایت به نتایج آنالیز فازی XRD، می‌تواند به تعداد جاهای خالی تشکیل شده بیشتر در نمونه ATZO-AH در قیاس با نمونه ATZO-H مربوط باشد. در ضمن، همانطوری که در قسمت‌های قبلی نشان داده شد نمونه ATZO-AH دارای دانه‌های درشت‌تری نسبت به نمونه ATZO-H است که این مطلب نیز در کاهش مقاومت ویژه سهم است. مشخص شده است که افزایش اندازه دانه می‌تواند موجب کاهش نسبی مقاومت ویژه گردد، که بواسطه کاهش تأثیر مرز دانه‌ها در متفرق نمودن الکترون‌ها رخ می‌دهد [۱۷]. اما با توجه به اختلاف زیاد مقدار مقاومت ویژه الکتریکی در دو نمونه مذکور، به نظر افزایش تعداد جاهای خالی اکسیژن، سهم اصلی و غالب را در بهبود هدایت الکتریکی لایه‌های نازک اکسید روی دارای آلایش آلومینیوم و تیتانیم ایفا نموده است. نتایج بدست آمده در این قسمت با نتایج سایر پژوهشگران قابل قیاس است [۱۸].

نتیجه‌گیری

لایه نازک نانو ساختار اکسید روی دارای آلایش آلومینیوم و تیتانیم به روش سل ژل و با تکنیک غوطه‌وری تهیه

مشابه یکدیگر است. با توجه به مقادیر زبری سطح نسبتاً مشابه نمونه‌ها، می‌توان افزایش شفافیت را به اندازه دانه‌های نسبتاً بزرگتر در نمونه ATZO-AH ارتباط داد [۷].



شکل ۵. طیف عبور لایه‌های نازک اکسید روی با آلایش آلومینیوم و تیتانیم، پخت شده تحت شرایط مختلف.

جدول ۳. متوسط عبور نور و مقاومت ویژه لایه‌های نازک اکسید روی با آلایش آلومینیوم و تیتانیم، پخت شده تحت شرایط مختلف.

| نمونه | عبورنور (%) | مقاومت ویژه Ωcm ($\times 10^6$) |
|---------|-------------|---|
| ATZO-A | ۸۶/۳۹ | ۱۳ |
| ATZO-H | ۸۶/۹۶ | ۰/۰۸۷ |
| ATZO-AH | ۸۸/۴۱ | ۰/۰۰۶ |

جهت مقایسه، مقدار مقاومت الکتریکی لایه‌های نازک ATZO-A، ATZO-H و ATZO-AH در جدول ۳، گزارش شده است. بوضوح تأثیر مثبت اتمسفر احیایی (مخلوط گازی 95 vol. % N2-5 vol. % H2) در حین فرآیند پخت، بر روی هدایت الکتریکی لایه‌های نازک اکسید روی دارای آلایش آلومینیوم و تیتانیم مشاهده می‌گردد. به نظر می‌رسد کاهش چشمگیر مشاهده شده در مقاومت ویژه لایه‌های نازک، به تشکیل جاهای خالی اکسیژن مرتبط است. تشکیل جای خالی اکسیژن موجب ایجاد الکترون‌های آزاد در سیستم، لذا افزایش تعداد حامل‌های جریان می‌گردد. تشکیل جای خالی در اثر واکنش

Journal for Light and Electron Optics, 125 (2014) 5746-5749.

5. A. Davoodi, M. Tajally, O. Mirzaee, A. Eshaghi, *Fabrication and characterization of optical and electrical properties of Al-Ti Co-doped ZnO nano-structured thin film*, Journal of Alloys and Compounds, 657 (2016) 296-301.

6. S. Wang, J. Lian, W. Zheng, Q. Jiang, *Photocatalytic property of Fe doped anatase and rutile TiO₂ nanocrystal particles prepared by sol-gel technique*, Applied Surface Science, 263 (2012) 260-265.

7. X. Zhang, K. Hui, F. Bin, K. Hui, L. Li, Y. Cho, R.S. Mane, W. Zhou, *Effect of thermal annealing on the structural, electrical and optical properties of Al-Ni co-doped ZnO thin films prepared using a sol-gel method*, Surface and Coatings Technology, 261 (2015) 149-155.

8. V. Kumar, V. Kumar, S. Som, A. Yousif, N. Singh, O. Ntwaeaborwa, A. Kapoor, H. Swart, *Journal of colloid and interface science*, 428 (2014) 8-15.

9. R.M. Pasquarelli, D.S. Ginley, R. O'Hayre, *Solution processing of transparent conductors: from flask to film*, Chemical Society Reviews, 40 (2011) 5406-5441.

10. W.-J. Chen, W.-L. Liu, S.-H. Hsieh, Y.-G. Hsu, *Synthesis of ZnO: Al Transparent Conductive Thin Films Using Sol-gel Method*, Procedia Engineering, 36 (2012) 54-61.

11. J.J. Joo, Y.H. Kim, D.S. Paik, D.H. Kang, *Characteristics of ZnO thin films modified by various additives*, in: SPIE OPTO: Integrated Optoelectronic Devices, International Society for Optics and Photonics, (2009) 72170-72170-72179.

12. A. Monemdjou, F.E. Ghodsi, J. Mazloom, *The effects of surface morphology on optical and electrical properties of nanostructured AZO thin films: Fractal and phase imaging analysis*, Journal of Superlattices and Microstructures, 74 (2014) 19-33.

13. T.-Y. Shie, C.-F. Lin, *Improving electrical properties of ZnO thin films by the combination of plasma treatment, post-annealing and doping*, in: Nanotechnology, 2008. NANO'08. 8th IEEE Conference on, IEEE, 2008, 756-759.

گردید. نتایج آنالیز فازی توسط تکنیک پراش پرتو ایکس نشان داد که حضور اتمسفر احیایی موجب افزایش بلورینگی لایه‌های نازک ATZO می‌گردد. نتایج آنالیز عنصری EDX استوکیومتری مناسب و به عبارت دیگر حضور عناصر آلومینیوم و تیتانیوم در ترکیب را تأیید می‌نماید. همچنین مشخص شد اتمسفر احیایی در حین فرآیند پخت مرحله دوم موجب کاهش چشمگیر میزان مقاومت ویژه الکتریکی از $10^6 \Omega\text{cm}$ تا $10^6 \times 0/006 \Omega\text{cm}$ و نیز بهبود نسبی شفافیت گردیده است، لذا پخت مرحله دوم تحت اتمسفر احیایی منجر به بهبود کلی خواص می‌گردد. زبری سطح لایه نازک ATZO در اثر تغییر اتمسفر پخت و نیز پخت مرحله دوم، تغییر محسوسی نداشته است. پخت مرحله دوم موجب افزایش اندازه دانه‌ها از ۲۳ nm الی ۲۹ nm گردیده است. با توجه به میزان شفافیت و مقدار مقاومت ویژه، ATZO دارای قابلیت کاربرد در ترانزیستورهای لایه نازک را دارد.

مراجع

1. P. Chand, A. Gaur, A. Kumar, U.K. Gaur, *Structural, morphological and optical study of Li doped ZnO thin films on Si (100) substrate deposited by pulsed laser deposition*, Ceramics International, 40 (2014) 11915-11923.

2. A. Eshaghi, A. Graeli, *Optical and electrical properties of indium tin oxide (ITO) nanostructured thin films deposited on polycarbonate substrates "thickness effect"*, Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 125 (2014) 1478-1481.

3. A. Eshaghi, M.J. Hakimi, A. Zali, *Fabrication of titanium zinc oxide (TZO) sol-gel derived nanostructured thin film and investigation of its optical and electrical properties*, Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 126 (2015) 5610-5613.

4. A. Eshaghi, M. Hajkarimi, *Optical and electrical properties of aluminum zinc oxide (AZO) nanostructured thin film deposited on polycarbonate substrate*, Optik-International

14. X. Liu, K. Pan, W. Li, D. Hu, S. Liu, Y. Wang, *Optical and gas sensing properties of Al-doped ZnO transparent conducting films prepared by sol-gel method under different heat treatments*, Ceramics International, 40 (2014) 9931-9939.
15. H.P. Chang, F.H. Wang, J.C. Chao, C.C. Huang, H.W. Liu, *Effects of thickness and annealing on the properties of Ti-doped ZnO films by radio frequency magnetron sputtering*, Current Applied Physics, 11 (2011) S185-S190.
16. J. Liu, S. Ma, X. Huang, L. Ma, F. Li, F. Yang, Q. Zhao, X. Zhang, *Effects of Ti-doped concentration on the microstructures and optical properties of ZnO thin films*, Superlattices and Microstructures, 52 (2012) 765-773.
17. Z. Pan, J. Luo, X. Tian, S. Wu, C. Chen, J. Deng, C. Xiao, G. Hu, Z. Wei, *Highly transparent and conductive Sn/F and Al co-doped ZnO thin films prepared by sol-gel method*, Journal of Alloys and Compounds, 583 (2014) 32-38.
18. M. Jiang, X. Liu, *Structural, electrical and optical properties of Al-Ti codoped ZnO (ZATO) thin films prepared by RF magnetron sputtering*, Journal of Applied Surface Science, 255 (2008) 3175-3178.