

Microstructure and optical properties of Fe-doped ZnO thin films deposited by spray pyrolysis

Sharife Gholami, Abolghasem Avazpour*, Ali Modabberasl

Department of Physics, Faculty of Science, Yasouj University, Yasouj, Iran

Received: 18.02.2021 Final revised: 09.05.2021 Accepted: 03.08.2021

Doi link: [10.22055/JRMBS.2021.17018](https://doi.org/10.22055/JRMBS.2021.17018)

Abstract

In the present study, Fe-doped ZnO ($Zn_{1-x}Fe_xO$) thin films were deposited by simple chemical spray pyrolysis technique on glass substrates at substrate temperature of 300 °C. The effect of Fe-doping concentration on the structural, morphological and optical properties of deposited films was studied. The X-ray diffraction (XRD) analyses indicates that all the obtained samples have a hexagonal wurtzite crystal structure without any secondary phases. The atomic force microscopy (AFM) images show that the morphology features changes with the increase of Fe-doping concentration and a denser microstructure and smoother surface obtained. The Fourier transform infrared (FTIR) spectra shows the presence of the stretching vibration mode of ZnO, functional groups, chemical bonding and iron in the doped ZnO thin films. Optical studies indicate that the absorption edge of deposited film shifted towards higher-wavelength direction and their optical band-gaps are decreased with the increase of Fe-doping concentration.

Keywords: Spray pyrolysis, ZnO thin films, Fe-doped, Structure properties, Optical properties

*Corresponding Author: avazpour@yu.ac.ir



ویژگی‌های میکروساختاری و اپتیکی لایه‌های نازک اکسید روی آلایش

یافته با آهن ساخته شده به روش اسپری پیرولیز

شریفه غلامی، ابوالقاسم عوض پور*، علی مدبراصل

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

دریافت: 1399/11/30 ویرایش نهائی: 1400/02/19 پذیرش: 1400/05/12

Doi link: [10.22055/JRMBS.2021.17018](https://doi.org/10.22055/JRMBS.2021.17018)

چکیده

در این پژوهش، لایه‌های نازک اکسید روی آلایش یافته با آهن ($Zn_{1-x}Fe_xO$) با روش ساده و شیمیایی اسپری پیرولیز روی زیرلایه شیشه در دمای زیرلایه $300^\circ C$ ساخته شدند. تأثیر میزان آلایش آهن روی ویژگی‌های ساختاری، ریخت‌شناسی و اپتیکی لایه‌های نازک ساخته شده مورد مطالعه قرار گرفت. تحلیل پراش پرتو ایکس نشان داد که همه نمونه‌های ساخته شده، ساختار بلوری ورتسایت هگزاگونال بدون هیچ گونه فاز ناخالصی دارند. تصاویر میکروسکوپی نیروی اتمی نشان داد که با افزایش میزان آلایش آهن، ویژگی‌های سطحی تغییر می‌کنند و لایه‌های با سطح به هم پیوسته‌تر و میکروساختاری چگال‌تر به دست می‌آید. نتایج طیف سنج مادون قرمز، حضور مدهای ارتعاشی مربوط به ZnO گروه‌های عاملی، پیوندهای شیمیایی و حضور آهن در ساختار را نشان داد. مطالعات اپتیکی نشان داد که با افزایش غلظت آلایش آهن، لبه جذب اپتیکی به سمت طول موج‌های بلندتر جابه‌جا می‌شود و انرژی گاف اپتیکی نیز کاهش می‌یابد.

کلیدواژگان: اسپری پیرولیز، لایه‌های نازک ZnO، آلایش آهن، ویژگی‌های ساختاری، ویژگی‌های اپتیکی

مقدمه

جالبی همانند پیزوالکتریک، پایداری شیمیایی، رسانندگی حرارتی بالا، شفافیت اپتیکی بالا در ناحیه مرئی، زیست‌سازگاری و تحرک‌پذیری بالای الکترون را دارا می‌باشد. همچنین با توجه به کاربردهای وسیع آنها در حسگرهای گازی، صفحات نمایش ابزارهای اپتوالکتریک، الکترودهای رسانای شفاف در سلول‌های خورشیدی، مواد پیزوالکتریک و طراحی‌های اسپیترونیک بسیار مورد توجه هستند [1-5]. به‌منظور بهبود رفتار فیزیکی ZnO به‌عنوان ماده‌ای با پتانسیل

در سال‌های اخیر نیم‌رساناهای اکسید روی¹ (ZnO) با توجه به ویژگی‌های فیزیکی عالی و پتانسیل کاربردی فراوان آنها در زمینه‌های مختلف، بسیار مورد توجه محققان و پژوهشگران قرار گرفته‌اند. ZnO ماده‌ای فراوان، غیرسمی و ارزان نسبت به سایر مواد است. این ماده، نیم‌رسانای نوع n با گاف انرژی پهن و مستقیم 3.37 eV و انرژی پیوندی اکسایتون بالای 60 meV در دمای اتاق می‌باشد [1-2]. این نیم‌رسانا ویژگی‌های

* نویسنده مسئول: avazpour@yu.ac.ir

و لایه‌نشانی چرخشی⁶ [17]، سل-ژل⁷ [12 و 18] استفاده می‌شود. در میان این روش‌ها، اسپری پایرولیز با توجه به مزیت‌هایی همچون سادگی، ارزان بودن و عدم نیاز به تجهیزات خلأ مورد توجه و استفاده بیشتری قرار گرفته است.

این پژوهش با هدف بررسی و مطالعه ارتباط میان میکروساختار و ویژگی‌های ریخت‌شناسی و اپتیکی لایه‌های نازک ZnO آرایش یافته با آهن ($Zn_{1-x}Fe_xO$) انجام گرفت. بدین منظور، لایه‌های نازک $Zn_{1-x}Fe_xO$ با روش اسپری پایرولیز روی زیرلایه شیشه در دمای زیرلایه $300^\circ C$ ساخته شدند و تأثیر میزان غلظت آرایش Fe روی ویژگی‌های ساختاری، ریخت‌شناسی و اپتیکی نمونه‌های ساخته شده با جزئیات مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت.

جزئیات تجربی

در این پژوهش لایه‌های نازک $Zn_{1-x}Fe_xO$ به‌ازای مقادیر 0/1 و 0/08، 0/06، 0/04، 0/02، x = 0 به روش اسپری پایرولیز بر روی زیرلایه‌های شیشه ساخته شدند. تمیزکاری و شستشوی زیرلایه‌ها به ترتیب با استون، اتانول و آب یون‌زدایی شده انجام شد. برای تهیه پیش ماده مورد نظر از مواد اولیه استات روی دو آبه با فرمول شیمیایی $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ کلرید آهن شش آبه با فرمول شیمیایی $(FeCl_3 \cdot 6H_2O)$ با خلوص 99/99% و آب یون‌زدایی شده استفاده شد. ابتدا محلول استات روی با غلظت مولی 0/10 مولار در آب یون‌زدایی شده و 2-پروپانول با نسبت 1 به 4 آب و الکل تهیه و همچنین به‌منظور

کاربردی چندمنظوره برای کاربردهای فوق‌الذکر، آرایش این ماده می‌تواند یک رهیافت مؤثر باشد. آرایش با عناصر مختلف و مناسب می‌تواند منجر به تقویت و کنترل ویژگی‌های ساختاری، الکتریکی و اپتیکی لایه‌های نازک ZnO شود. همچنین با آرایش، تعداد حامل‌های بار و رسانندگی در این لایه‌ها برای کاربردهایی همانند ابزارهای اپتوالکترونیک بهبود می‌یابند [6]. از این رو لایه‌های نازک ZnO آلائیده شده، با توجه به ویژگی‌های عالی اپتیکی و الکتریکی آنها، می‌توانند کاندیدای مناسبی برای تولید لایه‌های اکسید رسانای شفاف¹ (TCO) در سلول‌های خورشیدی باشند.

مطالعات مختلفی در خصوص تأثیر آرایش عناصر مختلف به‌ویژه فلزات واسطه² همانند [7] V، [8] Cr، [9] Co، [10] Ni، [11] Cu و [12] Fe روی لایه‌های نازک ZnO [7-12]، به‌منظور بهبود کیفیت بلوری و بهینه‌سازی یا اصلاح ویژگی‌های این لایه‌ها انجام شده است. با این حال، تعداد پژوهش‌های کمتری به ساخت و مطالعه ویژگی‌های لایه‌های نازک ZnO آلائیده شده با آهن و ساخته شده به روش‌های متفاوت لایه‌نشانی صورت گرفته است. لایه‌های نازک ZnO آرایش یافته با Fe می‌تواند ماده‌ای مهم و مناسب برای کاربردهای چندمنظوره باشد [12]. از این رو مطالعه ویژگی‌های ساختاری، اپتیکی و الکتریکی آن و همچنین ارتباط میان این ویژگی‌ها حائز اهمیت است. برای ساخت لایه‌های نازک از جمله ZnO، از روش‌های فیزیکی و شیمیایی مختلفی همانند اسپاترینگ مگنترون³ [13-14]، لایه‌نشانی لیزر پالسی⁴ [15]، اسپری پایرولیز⁵ [16]، و

⁵ Spray pyrolysis

⁶ Spin coating

⁷ Sol-gel

¹ Transparent conductive oxide

² Transition metals

³ Magnetron sputtering

⁴ Pulsed laser deposition (PLD)

ساخته شده با درصد‌های مختلف آرایش را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل 1 پیداست، تمامی لایه‌های ساخته شده ساختار بس‌بلوری دارند و طیف‌های XRD نمونه‌ها شامل چندین قله مربوط به ساختار بلوری ورتسایت هگزاگونال ZnO مطابق با شماره کارت استاندارد 01-075-1533 می‌باشند. نتایج XRD نشان می‌دهد تمامی لایه‌های نازک ZnO آرایش یافته با آهن، الگوی پراش و قله‌هایی همانند لایه نازک ZnO خالص دارند و با افزایش مقدار x هیچ‌گونه فاز ناخالصی و یا قله جدیدی همانند فازهای FeO، Fe₂O₃، Fe₃O₄ در طیف‌ها ظاهر نمی‌شود. بنابراین مشاهده می‌شود آرایش آهن ساختار بلوری ZnO را در نمونه‌های تهیه شده دستخوش تغییر نکرده است. به عبارت دیگر، همه لایه‌های نازک آرایش یافته ساختار بلوری ورتسایت هگزاگونال دارند. این موضوع نشان می‌دهد که یون‌های آهن به‌طور کامل و مناسب در ساختار ZnO وارد شده و جایگزینی موفقیت‌آمیز یون‌های Fe به‌جای یون‌های Zn در شبکه ZnO صورت گرفته است. نتایج XRD نشان می‌دهد که شدت، موقعیت زاویه‌ای (θ) و اندازه پهنای در نصف ماکزیمم (FWHM) قله (101) با افزایش مقدار x تغییر محسوسی نمی‌کنند. نتایج به‌دست آمده از برخی پژوهش‌های قبلی [16 و 17] نیز نشان می‌دهد که آرایش آهن تا مقدار ده درصد ($x=0.1$) ساختار بلوری ورتسایت هگزاگونال ZnO را در نمونه‌های Zn_{1-x}Fe_xO دستخوش هیچ‌گونه تغییری نمی‌کند. اما افزایش مقدار آرایش آهن بالاتر از ده درصد منجر به ایجاد فاز

افزایش احیای شیمیایی و جهت افزایش حلالیت استات روی، از چند قطره اسید استیک استفاده شد. برای تهیه نمونه‌های جانمایی شده، محلول‌های پیش‌ماده‌ها با افزودن کلرید آهن با غلظت مولی در گستره $0/0 \leq x \leq 0/1$ تهیه شدند. عملیات اسپری و لایه‌نشانی همه نمونه‌ها، از طریق نازل اسپری با ارتفاع 35cm و قطر حدود 0,8mm در دمای زیرلایه 300°C، با آهنگ اسپری 15cc/min به مدت زمان 25 دقیقه و بدون هیچ وقفه‌ای انجام شد. در حین لایه‌نشانی، صفحه داغ دستگاه (زیرلایه نگهدار) به صورت چرخشی حرکت می‌کرد. برای بررسی ویژگی‌های ساختاری نمونه‌ها از الگوی پراش پرتو ایکس¹ (تابش CuK α_1 از دستگاه Rigaku-ultra IV, Japan) استفاده شد. ریخت‌شناسی سطح لایه‌ها با میکروسکوپ نیروی اتمی² (AFM) مدل WITec-Alpha300A, Germany مطالعه شد. به منظور مطالعه ویژگی‌های اپتیکی لایه‌ها از دستگاه طیف سنج مادون قرمز FTIR³-PerkinElmer-spectrum two, USA و دستگاه طیف سنج مدل UV-Vis PerkinElmer lambda 25 در محدوده استفاده شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های ساختاری

لایه‌های نازک Zn_{1-x}Fe_xO با روش اسپری پایرولیز روی زیرلایه شیشه در دمای زیرلایه 300°C ساخته شدند. لایه‌های ساخته شده دارای سطحی پیوسته، یکنواخت و بدون خلل و فرج بودند. شکل 1 الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) مربوط به نمونه‌های

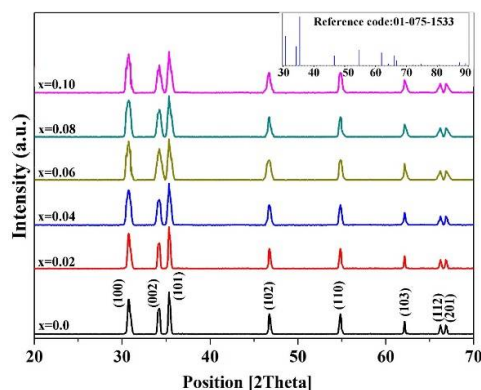
³ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

¹ X-ray diffraction (XRD)

² Atomic force microscopy (AFM)

در ریخت‌شناسی و توپوگرافی سطح لایه‌ها را با افزایش غلظت آرایش نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که سطح نمونه‌های آرایش یافته، حاوی تعداد زیادی جزیره با اندازه‌های مختلف، شکل‌های نامنظم و به صورت جداگانه و به هم پیوسته می‌باشد. با افزایش میزان درصد آرایش ویژگی‌های سطحی تغییر می‌کنند. بدین صورت که تعداد دانه‌ها کاهش می‌یابند و لایه‌های با سطح به هم پیوسته‌تر و میکروساختاری چگال‌تر به دست می‌آید. چنین رفتار ریخت‌شناسی مشابهی برای لایه‌های نازک ZnO:Mn ساخته شده به روش اسپری پایرولیز نیز گزارش شده است [19].

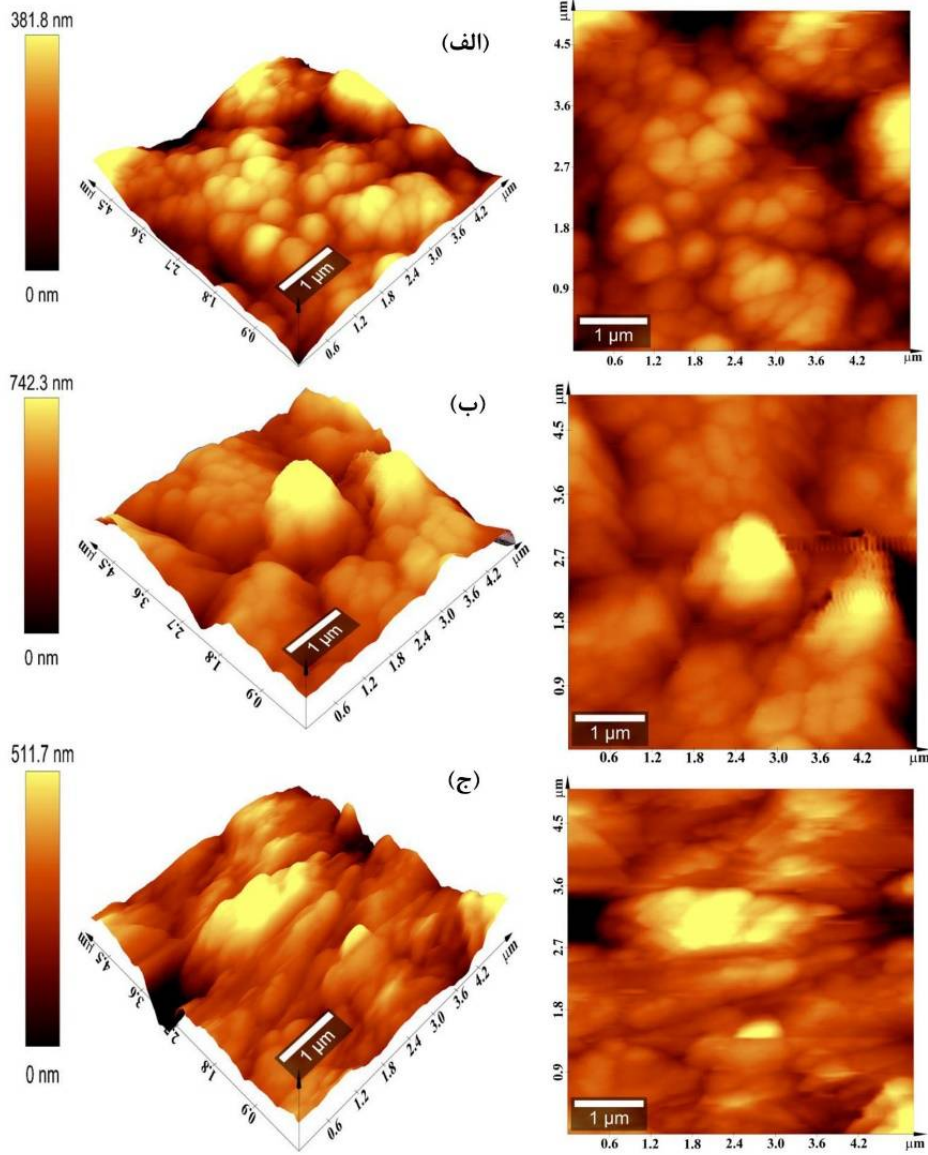
ناخالصی همانند Fe_3O_4 و یا تضعیف کیفیت بلوری نمونه‌های ساخته شده در این پژوهش‌ها شده است. پارامترهای شبکه a , b ($a=b$)، c و نسبت $\frac{c}{a}$ برای لایه‌های نازک تهیه شده محاسبه شدند. این مقادیر برای پارامترهای a , c و نسبت $\frac{c}{a}$ به ترتیب $0,323\text{nm}$, $0,526\text{nm}$ و $1/62$ به دست آمدند. مشاهده شد که این پارامترها برای تمامی نمونه‌ها، مقادیر تقریباً یکسانی دارند. این رفتار در توافق با مشاهدات گزارش شده توسط سایرین است [16]. علت عدم تغییر محسوس در پارامترهای شبکه را می‌توان به اختلاف ناچیز و اندک شعاع‌های یونی مربوط به یون‌های جانشانی شده Fe در موقعیت یون‌های Zn در شبکه و ساختار ZnO نسبت داد. شعاع یونی Fe^{+2} و Fe^{+3} به ترتیب $0,078\text{nm}$ و $0,068\text{nm}$ و شعاع یونی Zn^{+2} مقدار $0,074\text{nm}$ می‌باشد.



شکل 1. الگوی پراش پرتو ایکس لایه‌های نازک $\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}$ به‌ازای مقادیر مختلف x .

مطالعه ریخت‌شناسی

شکل 2 تصاویر میکروسکوپی AFM مربوط به لایه‌های نازک $\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}$ به‌ازای درصدهای مختلف آرایش را نشان می‌دهد. این تصاویر به خوبی تغییرات

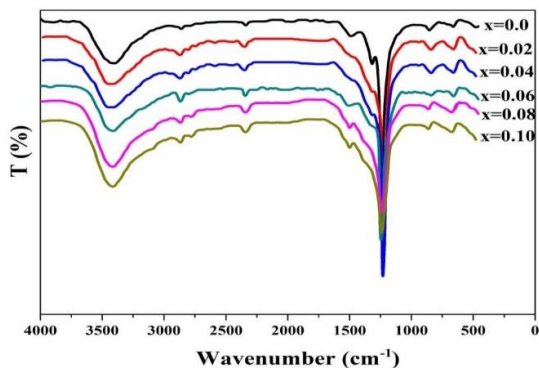


شکل 2. تصاویر دو و سه بعدی AFM مربوط به نمونه‌های الف: $x = 0$ ب: $x = 0.06$ و ج: $x = 0.10$.

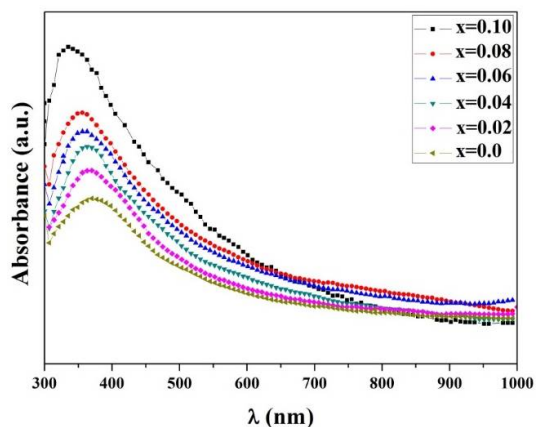
ویژگی‌های اپتیکی

تا 4000cm^{-1} نشان می‌دهد. پیک پهن جذبی واقع در محدوده عدد موجی $3200\text{-}3600\text{ cm}^{-1}$ مربوط به ارتعاش‌های کششی گروه O-H موجود در ترکیب نمونه‌های تهیه شده است [20]. مدهایی که در موقعیت‌های 2754 cm^{-1} و 2960 cm^{-1} مشاهده می‌شوند، مربوط به ارتعاشات خمشی گروه C-H هستند. همچنین پیک جذبی مشاهده شده در محدوده

برای شناسایی پیوندهای موجود در بین مولکول‌ها و بررسی تغییرات ساختاری، از نمونه‌ها طیف FTIR گرفته شد. شکل 3 طیف حاصل از این تحلیل برای نمونه‌های ساخته شده را در بازه عدد موجی 400cm^{-1}

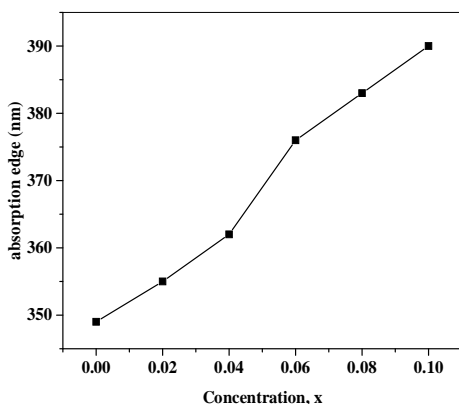


شکل 3. طیف FTIR لایه‌های نازک $Zn_{1-x}Fe_xO$ به‌ازای مقادیر مختلف x .



شکل 4. طیف جذب لایه‌های نازک $Zn_{1-x}Fe_xO$ به‌ازای مقادیر مختلف x

شکل 5 تغییرات تقریبی لبه جذب لایه‌های ساخته شده را برحسب درصد آلیاژ آهن نشان می‌دهد.

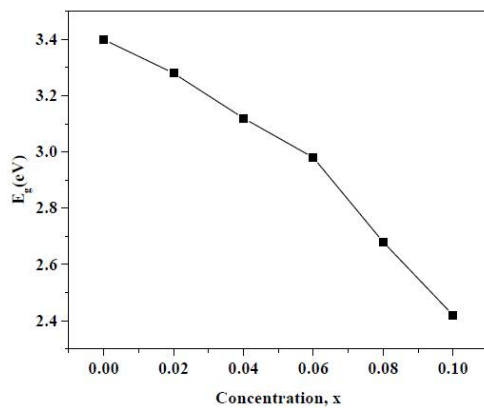


شکل 5. تغییرات لبه جذب نمونه‌ها برحسب مقدار x .

2350 cm^{-1} به دلیل حضور مولکول CO_2 در محیط می‌باشد که در طیف‌ها خود را نشان داده است [21]. مد ارتعاشی موجود در موقعیت حدودی 1550 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی گروه $C=O$ در ترکیب می‌باشد [20]. مد قوی ارتعاشی ظاهر شده در موقعیت حدودی 1250 cm^{-1} را می‌توان به مدهای $Zn-O$ و $Fe-O$ در مکان‌های بین شبکه‌ای در ساختار $Zn_{1-x}Fe_xO$ نسبت داد [6]. مدهای ارتعاشی واقع در محدوده $600-800\text{ cm}^{-1}$ به فرکانس‌های ارتعاشی و کششی مربوط به شبکه $Zn-O$ نسبت داده می‌شوند [21]. این نتایج نشان دهنده جای‌گیری مناسب یون‌های آهن در ساختار ZnO و در مکان‌های بین‌نشینی ZnO می‌باشند و با داده‌های XRD در توافق هستند.

شکل 4 طیف‌های جذب لایه‌های نازک $Zn_{1-x}Fe_xO$ را برحسب x در محدوده طول موج $300-1000\text{ nm}$ نشان می‌دهد. از این شکل پیداست که تمامی لایه‌های ساخته شده دارای جذب قوی در محدوده طول موج‌های $350-400\text{ nm}$ و جذب تقریباً صفر در طول موج‌های بالاتر از 400 nm می‌باشند. همچنین در گستره طول موج‌های $350-400\text{ nm}$ ، افزایش میزان جذب با کاهش طول موج برای همه نمونه‌های ساخته شده نیز مشاهده می‌شود. این امر نشان‌دهنده جذب ذاتی نمونه‌ها به دلیل انتقال مستقیم الکترون‌ها و نشان‌دهنده نیم‌رسانا بودن نمونه‌های ساخته شده با انرژی گاف مستقیم می‌باشد [22 و 23].

برای وضوح بهتر، تغییرات انرژی گاف اپتیکی لایه‌های نازک ساخته شده برحسب غلظت آلیش آهن در شکل 7 نشان داده شده است.



شکل 7. تغییرات انرژی گاف اپتیکی نمونه‌ها برحسب مقدار x.

از این شکل پیداست که انرژی گاف با افزایش x به‌طور تدریجی کاهش می‌یابد. این رفتار با مطالعات دیگران برای لایه‌های نازک $Zn_{1-x}Fe_xO$ ساخته شده با دیگر روش‌های لایه‌نشانی همخوانی دارد [12 و 24]. چنانچه در مرجع [17] اشاره شده است علت کاهش انرژی گاف این لایه‌های نازک، می‌تواند به برهم‌کنش تبدلی s-p و p-d بین الکترون‌های نواری و الکترون‌های جایگزیده اوربیتال d مربوط به یون‌های Fe جایگزین شده در موقعیت یون‌های Zn در شبکه و ساختار ZnO نسبت داده شود. کاهش انرژی گاف اپتیکی با افزایش x، ورود و جانشانی یون‌های آهن را تأیید می‌نماید.

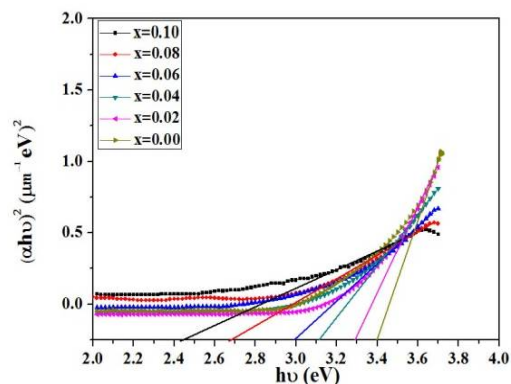
نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر درصدهای مختلف غلظت آلیش آهن روی ویژگی‌های ساختاری، ریخت‌شناسی و اپتیکی لایه‌های نازک $Zn_{1-x}Fe_xO$ ساخته شده

مشاهده می‌شود که با افزایش x، لبه جذب به سمت طول موج‌های بلندتر جابه‌جا می‌شود. این رفتار در توافق با گزارشات دیگران برای لایه‌های نازک $Zn_{1-x}Fe_xO$ ساخته شده به روش‌های مختلف لایه‌نشانی همانند سل-ژل، اسپاترینگ مگنترون و لایه‌نشانی چرخشی می‌باشد [12، 13، 24، 25]. جابه‌جایی مشاهده شده در لبه جذب به سمت طول موج‌های بلندتر را می‌توان به ایجاد نقص‌ها و افزایش آنها در ساختار در اثر آلیش آهن نسبت داد [25 و 13]. برای بررسی دقیق‌تر ویژگی‌های اپتیکی به‌ویژه تغییرات انرژی گاف اپتیکی از رابطه تایوک (مطابق فرمول زیر) استفاده شد [26].

$$\alpha hv = A (hv - E_g)^{1/2} \quad 1$$

در این رابطه A ضریب ثابت، α ضریب جذب اپتیکی، hv انرژی فوتون و E_g انرژی گاف اپتیکی می‌باشد. با برازش خط منحنی $(\alpha hv)^2$ برحسب hv و از روی طول از مبدأ آن می‌توان مقدار گاف اپتیکی را تخمین زد (شکل 6).



شکل 6. تغییرات $(\alpha hv)^2$ برحسب hv مربوط به لایه‌های نازک $Zn_{1-x}Fe_xO$ به‌ازای مقادیر مختلف x.

cost-efficient LED technology, *Proceedings of the IEEE* **98** (2010) 1281-1287. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5430882>

[4] B.-Y. Oh, M.-C. Jeong, T.-H. Moon, W. Lee, J.-M. Myoung, J.-Y. Hwang, D.-S. Seo, Transparent conductive Al-doped ZnO films for liquid crystal displays, *Journal of Applied Physics* **99** (2006) 124505. <https://doi.org/10.1063/1.2206417>

[5] A. Kumar, S.K. Saini, G. Sharma, A.K. Johar, Development and characterization of ZnO thin film for piezoelectric applications, *Materials Today: Proceedings*, **32** (2020) 261-263. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.351>

[6] T. Srinivasulu, K. Saritha, K.R. Reddy, Synthesis and characterization of Fe-doped ZnO thin films deposited by chemical spray pyrolysis, *Modern Electronic Materials* **3** (2017) 76-85. <https://doi.org/10.1016/j.moem.2017.07.001>

[7] M. Koleva, P. Atanasov, N. Nedialkov, H. Fukuoka, M. Obara, Role of vanadium content in ZnO thin films grown by pulsed laser deposition, *Applied Surface Science* **254** (2007) 1228-1231. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.07.180>

[8] S. Yılmaz, M. Parlak, Ş. Özcan, M. Altunbaş, E. McGlynn, E. Bacaksız, Structural, optical and magnetic properties of Cr doped ZnO microrods prepared by spray pyrolysis method, *Applied Surface Science* **257** (2011) 9293-9298. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.05.017>

[9] P. Shishodia, Effect of cobalt doping on ZnO thin films deposited by sol-gel method,

به‌روش اسپری پایرولیزیز بر روی زیر لایه شیشه، مورد بررسی و بحث قرار گرفت. نتایج XRD نشان داد که همه لایه‌های خالص و آلایده شده ساختار بلوری ورتسایت هگزاگونال دارند و هیچ‌گونه فاز ناخالصی یا اضافه‌ای در طیف‌های XRD مشاهده نشد. از تصاویر AFM مشاهده شد که با افزایش میزان آرایش، ویژگی‌های سطحی تغییر می‌کنند و لایه‌های با سطح به‌هم پیوسته‌تر و میکروساختاری چگال‌تر به‌دست می‌آیند. تحلیل FTIR، مدهای ارتعاشی مربوط به ZnO و حضور Fe در ساختار را همراه با دیگر گروه‌های عاملی بدون هیچ‌گونه مد اضافه‌ی مربوط به Fe-O نشان می‌دهد. نتایج بررسی‌های اپتیکی نشان داد که با افزایش میزان آرایش، لبه جذب اپتیکی به‌سمت طول موج‌های بلندتر جابه‌جا می‌شود. همچنین انرژی گاف اپتیکی با افزایش میزان آرایش Fe کاهش می‌یابد.

مرجع‌ها

[1] A. Facchetti, T. Marks, *Transparent electronics: from synthesis to applications*, John Wiley, New York, (2010). <https://www.wiley.com/en-us/exportProduct/pdf/9780470710593>

[2] C.S. Prajapati, Ajay Kushwaha, P.P. Sahay و Experimental Investigation of Spray-Deposited Fe-Doped ZnO Nanoparticle Thin Films: Structural, Microstructural, and Optical Properties, *Journal of Thermal Spray Technology* **22** (2013) 1230-1241. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11666-013-9973-0>

[3] A. Bakin, A. Behrends, A. Waag, H.-J. Lugauer, A. Laubsch, K. Streubel, ZnO-GaN hybrid heterostructures as potential

- [15] D. Chakraborti, J. Narayan, J. Prater, Room temperature ferromagnetism in Zn_{1-x}Cu_xO thin films, *Applied Physics Letters* **90** (2007) 062504. <https://doi.org/10.1063/1.2450652>
- [16] I. Soumahoro, R. Moubah, G. Schmerber, S. Colis, M.A. Aouaj, M. Abd-Lefdil, N. Hassanain, A. Berrada, A. Dinia, Structural, optical, and magnetic properties of Fe-doped ZnO films prepared by spray pyrolysis method, *Thin Solid Films* **518** (2010) 4593-4596. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.12.039>
- [17] U. Alver, T. Kılinc, E. Bacaksız, S. Nezir, Structure and optical properties of Zn_{1-x}Fe_xO thin films prepared by ultrasonic spray pyrolysis, *Materials Science and Engineering B* **138** (2007) 74-77. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2007.01.026>
- [18] S.E. Mousavi Ghahfarokhi, M. Rahimi Larki, I. Kazeminezhad, Effect of annealing temperature on the structural and optical properties bismuth ferrite (BiFeO₃) nanoparticle, *Journal of Research on Many Body Systems* **9** (2019) 179-191. <https://dx.doi.org/10.22055/jrmbms.2019.14600>
- [19] V. Shinde, T. Gujar, C. Lokhande, R. Mane, S.-H. Han, Mn doped and undoped ZnO films: A comparative structural, optical and electrical properties study, *Materials Chemistry and Physics* **96** (2006) 326-330. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.07.045>
- [20] M.M. Ba-Abbad, A.A.H. Kadhum, A.B. Mohamad, M.S. Takriff, K. Sopian, The effect of process parameters on the size of ZnO nanoparticles synthesized via the sol-gel technique, *Journal of Alloys and Compounds* **550** (2013) 63-70. *Thin Solid Films* **612** (2016) 55-60. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2016.05.028>
- [10] X. Zhao, E. Liu, R. Ramanujan, J. Chen, Effects of rapid thermal annealing on structural, magnetic and optical properties of Ni-doped ZnO thin films, *Current Applied Physics* **12** (2012) 834-840. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cap.2011.11.016>
- [11] D.-L. Hou, X.-J. Ye, H.-J. Meng, H.-J. Zhou, X.-L. Li, C.-M. Zhen, G.-D. Tang, Magnetic properties of n-type Cu-doped ZnO thin films, *Applied Physics Letters* **90** (2007) 14250. <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.2719034>
- [12] L. Xu, X. Li, Influence of Fe-doping on the structural and optical properties of ZnO thin films prepared by sol-gel method, *Journal of Crystal Growth* **312** (2010) 851-855. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2009.12.062>
- [13] C. Wang, Z. Chen, Y. He, L. Li, D. Zhang, Structure, morphology and properties of Fe-doped ZnO films prepared by facing-target magnetron sputtering system, *Applied Surface Science* **255** (2009) 6881-6887. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.03.008>
- [14] W. Yanga, J. Liua, Z. Guana, Z. Liua, B.Chena, L. Zhao, Y. Lia, X. Caoa, Xin He, Chi. Zhang., Q. Zenga, Yuechun Fu, Morphology, electrical and optical properties of magnetron sputtered porous ZnO thin films on Si(100) and Si(111) substrates, *Ceramics International* **46** (2020) 6606-6611. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.11.147>

- [24] A. Goktas, I. Mutlu, Y. Yamada, Influence of Fe-doping on the structural, optical, and magnetic properties of ZnO thin films prepared by sol-gel method, *Superlattices and Microstructures* **57** (2013) 139-149.
<https://doi.org/10.1016/j.spmi.2013.02.010>
- [25] A. Rambu, V. Nica, M. Dobromir, Influence of Fe-doping on the optical and electrical properties of ZnO films, *Superlattices and Microstructures* **59** (2013) 87-96.
<https://doi.org/10.1016/j.spmi.2013.03.023>
- [26] M. Kaid, A. Ashour, Preparation of ZnO-doped Al films by spray pyrolysis technique, *Applied surface science* **253** (2007) 3029-3033.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2006.06.045>
- [21] K. Raja, P. Ramesh, D. Geetha, Structural, FTIR and photoluminescence studies of Fe doped ZnO nanopowder by co-precipitation method, *Spectrochimica, acta part A: molecular and biomolecular spectroscopy* **131** (2014) 183-188.
<https://doi.org/10.1016/j.saa.2014.03.047>
- [22] X. Wang, C. Song, D. Li, K. Geng, F. Zeng, F. Pan, The influence of different doping elements on microstructure, piezoelectric coefficient and resistivity of sputtered ZnO film, *Applied Surface Science* **253** (2006) 1639-1643.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2006.02.059>
- [23] K. Vanheusden, C. Seager, W.t. Warren, D. Tallant, J. Voigt, Correlation between photoluminescence and oxygen vacancies in ZnO phosphors, *Applied physics letters* **68** (1996) 403-405.
<https://doi.org/10.1063/1.116699>