

ORIGINAL ARTICLE

Synthesis of $Zn_{1-x}Ni_xO$ Nanostructures by Sol-Gel Method and Investigated Its Structural Properties and Band Gap

Dariush Mehrparvar^{1*}, Masome Naseri Tekyeh², Mohsen Radmehr³

¹ Assistant Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Malayer University, Malayer, Iran.
¹ Ph.D. Student in Condensed Matter Physics, Physics Department, Department of Physics, Faculty of Science, Malayer University, Malayer, Iran.
¹ MSc., Department of Physics, Faculty of Science, Malayer University, Malayer, Iran.

Correspondence

Dariush Mehrparvar
Email: drshmehr@gmail.com

How to cite

Mehrparvar, D. Naseri Tekyeh, M. Radmehr, M. (2024). Synthesis of $Zn_{1-x}Ni_xO$ Nanostructures by Sol-Gel Method and Investigated Its Structural Properties and Band Gap, Optoelectronic, 6(4), 19-26.

ABSTRACT

$Zn_xNi_{1-x}O$ nanostructures successfully synthesized by the sol-gel method using zinc nitrate salt in the impurity percentage range of 3% to 10%. The XRD results showed that changing the impurity percentage could not change the hexagonal structure of the samples, such that nickel-doped zinc oxide nanostructures have a hexagonal structure like pure zinc oxide, which indicates that nickel contamination is placed in the zinc position of the crystal structure. Also, in the samples contaminated with $x=7.5\%$ and 10% , the peak related to the crystal network of nickel oxide observed on the [200] plane. The FT-IR results confirmed the two peaks corresponding to the Ni-O and Zn-O stretching modes in all $Zn_xNi_{1-x}O$ nanostructures. In addition, two functional groups, hydroxyl and carboxyl, observed on the surface of the samples. FESEM results showed that $Zn_xNi_{1-x}O$ nanostructures have a spherical shape and particle size between 30 to 60 nm. Examining the results of the UV-Visible spectrum showed that the band gap of the nanostructures is dependent on the amount of dopant, so that with the change in the concentration of the dopant element nickel, the amount of the energy gap of the nanostructures changed, and the largest energy gap is related to the sample prepared with 3% by weight of the dopant element.

KEYWORDS

Nanostructure, Zinc Oxide, Sol-Gel, Structural Properties, Band Gap.

فصلنامه علمی
اپتوالکترونیک

«مقاله پژوهشی»

سنتر نانوساختارهای $Zn_{1-x}Ni_xO$ به روش سل-ژل و بررسی خواص ساختاری و گاف نواری آنهاداریوش مهرپرور^{1*}، معصومه ناصری تکیه²، محسن رادمهر³

چکیده

نانوساختارهای $Zn_xNi_{1-x}O$ با استفاده از روش سل-ژل با موفقیت با استفاده از نمک نیترات روی در بازه ناخالصی 3 تا 10 درصد سنتز شدند. نتایج XRD نشان داد که تغییر درصد میزان ناخالصی نتوانست ساختار هگزاگونال نانوساختارهای $(Zn_xNi_{1-x}O)$ را تغییر دهد؛ به این صورت که نانوساختارهای اکسید روی آلیبده شده با نیکل، همانند اکسید روی خالص ساختار هگزاگونال دارند؛ که بیان می‌کند آلیبده‌گی نیکل در جایگاه روی ساختار کریستالی جای‌نشین شده است. همچنین در نمونه‌های آلیبده شده با 10% و $x=7/5\%$ ، قله مربوط به شبکه کریستالی اکسید نیکل در صفحه [200] مشاهده شد. نتایج FT-IR دو پیک مربوط به دو مد کششی Ni-O و Zn-O در همه نانوساختارهای $Zn_xNi_{1-x}O$ را تایید کرد. همچنین دو گروه عاملی هیدروکسیل و کربوکسیل نیز روی سطح نمونه‌ها مشاهده شد. نتایج FESEM نشان داد نانوساختارهای $Zn_xNi_{1-x}O$ دارای شکل کروی و اندازه ذرات در ابعاد بین 30 الی 60 نانومتر هستند. بررسی نتایج طیف UV-Visible نشان داد که گاف نواری نانوساختارها به میزان آلیبده وابسته است، به طوری که با تغییر غلظت عنصر آلیبده نیکل مقدار گاف انرژی نانوساختارها تغییر کرد و بیشترین گاف انرژی مربوط به نمونه تهیه شده با درصد وزنی 3 درصد آلیبده است.

واژه‌های کلیدی

نانوساختار، اکسیدروی، سل-ژل، خواص ساختاری، گاف نوری.

1 استادیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران.
2 دانشجوی دکتری، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران.
3 کارشناس ارشد، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران.

نویسنده مسئول:

داریوش مهرپرور

رایانامه: drshmehr@gmail.com

استناد به این مقاله:

داریوش مهرپرور، معصومه ناصری تکیه، محسن رادمهر (1403). سنتر نانوساختارهای $Zn_{1-x}Ni_xO$ به روش سل-ژل و بررسی خواص ساختاری و گاف نواری آنها. فصلنامه علمی اپتوالکترونیک، 6(4)، 19-26.

مقدمه

در گام بعدی، به تحلیل و مشخصه‌یابی نمونه‌های اکسید روی آلاییده با نیکل می‌پردازیم. خواص ساختاری نمونه‌های به دست آمده توسط طیف پراش اشعه ایکس¹ (XRD) میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی² (FESEM)، طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز³ (FT-IR) و طیف‌بینی جذبی فرابنفش - مرئی⁴ (UV-Visible) برای تعیین گاف نواری، بررسی شده است.

روش آزمایشگاهی

جهت تهیه نانوذرات اکسید روی به روش سل-ژل از مواد نیترات روی شش آبه ($Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$)، نیترات نیکل شش آبه ($Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) و پایدارکننده پلی وینیل پیرولیدون⁵ ($(C_6H_9OH)_n$) استفاده شد. پس از توزین مواد اولیه، 2 گرم نمک نیترات روی در 10 میلی لیتر متانول، نمک نیترات نیکل با نسبت‌های وزنی سه، پنج، هفت و نیم و ده درصد در 10 میلی لیتر آب مقطر و مقدار 0/2 گرم PVP⁶ هم در 5 میلی لیتر آب مقطر (با نسبت وزنی 10 به 1 نسبت به نمک نیترات روی) حل شدند (جدول 1). مخلوط محلول نمک روی و نیکل را روی گرماساز قرار می‌دهیم و سپس محلول پایدارکننده PVP را به آرامی به محلول اولیه اضافه می‌کنیم. دمای واکنش را روی 65 درجه سانتیگراد پایدار می‌کنیم تا حلال به آرامی تبخیر شود و ژل تشکیل شود. سپس ژل را در دمای 150 درجه سانتیگراد خشک می‌کنیم. ژل خشک شده را در دمای 300 درجه سانتیگراد درون کوره به مدت 2 ساعت قرار داده شد. ژل خشک شده درون کوره ماند تا به آرامی سرد شود و سپس خارج شد.

جدول 1. توزین مواد اولیه

درصد ناخالصی (%)	نمک نیترات نیکل (گرم)	نمک نیترات روی (گرم)	PVP (گرم)
3	0/06	2	0/20
5	0/10	2	0/20
7,5	0/15	2	0/20
10	0/20	2	0/20

1 X-Ray Diffraction

2 Field Emission Scanning Electron Microscopy

3 Fourier-Transform Infrared Spectroscopy

4 Ultraviolet-Visible Spectroscopy

5 PVP

6 Polyvinylpyrrolidone

در سال‌های اخیر، حوزه سنتز نانومواد و بررسی خواص و کاربرد آن‌ها افزایش یافته است. نانوتکنولوژی حوزه‌ای از پژوهش است که بر اساس تهیه، تجزیه و تحلیل و استفاده از ساختارهایی با ابعاد کمتر از 100 نانومتر در حداقل یک بعد متمرکز است [1]. نیمه هادی‌های اکسید فلزی در رشته‌های مختلف علمی، از جمله: شیمی، فیزیک، پزشکی و مهندسی، به دلیل ویژگی‌های الکتریکی، نوری و مغناطیسی منحصر به فردشان بسیار مهم هستند که در میان اکسیدهای فلزی، اکسید روی از محبوبیت بیشتری برخوردار است [2]. اکسید روی یک نیمه هادی طبیعی منحصر به فرد از نوع n در میان مواد نیمه هادی، دارای پایداری شیمیایی استثنایی، شکاف باند گسترده و مستقیم ($3/37$ الکترون ولت)، انرژی اتصال اکسایش بالا (60 مگا ولت) در دمای پایین و اتاق با ساختار کریستالی شش گوشه است [3, 4]. از طرفی دیگر اکسید روی به دلیل گستره وسیعی از کاربردها از جمله: حسگرهای طیف نور فرابنفش [5, 6]، دارورسانی هدفمند [7]، فعالیت آنتی‌اکسیدانی [8]، حسگرهای زیستی [9] و اصلاح محیط زیست [10] و... توجه تحقیقاتی قابل توجهی را به خود جلب کرده است. ویژگی‌های نانوذرات اکسید روی به کنترل دقیق خواص فیزیکی و شیمیایی از جمله اندازه بلورک، چینش ساختار کریستالی، مورفولوژی، قابلیت پخش و... بستگی دارد [11]. بنابراین در طول تهیه نانومواد، مطالعات قابل توجهی برای کنترل خواص ساختاری و مورفولوژیکی انجام می‌شود [12]. تا به امروز، روش‌های مختلفی برای تهیه نانوساختارهای اکسید روی با مورفولوژی‌های مختلف به همراه عناصر یونی گوناگون برای بهبود خواص نوری، الکتریکی، کاتالیزوری و... استفاده شده است [13-17]. علاوه بر عناصر آلیش، بر اساس روش سنتز نیز می‌توان ساختار و مورفولوژی‌های متفاوتی از نانوساختارهای اکسید روی همانند نانومیله به روش سل-ژل [18]، نانوکُل به روش هیدروترمال [19]، نانوسیم به روش رسوب‌دهی شیمیایی بخار [20]، نانوذرات از روش ته‌نشینی [21] و... تهیه نمود. در نتیجه انتخاب روش سنتز و عنصر نوع ناخالصی بسیار مهم است؛ که باید یک عنصر ناخالصی مناسب و در دسترس و یک روش سنتز مقرون به صرفه و آسان با مدت زمان کوتاه نسبت به پژوهش سایر پژوهشگران، انتخاب گردد. پس در این پژوهش در گام نخست سعی بر سنتز نانوذرات اکسید روی با ناخالصی نیکل با روش سل-ژل که یک روش مقرون به صرفه، تکرارپذیر و در دسترس طی مدت زمان کوتاه است، می‌باشد.

نتایج و بحث

برای تعیین ساختار بلوری نمونه‌ها و محاسبه ثابت‌های شبکه از الگوی پراش پرتو ایکس استفاده کردیم (PHILIPS - مدل دستگاه PW1730 - کشور سازنده: هلند) که از پراش پرتوهای CuK_α با طول موج 15/4 نانومتر در محدوده زاویه‌ای 20-80 درجه بدین منظور استفاده شد. نمودار XRD مربوط به نانوساختارهای اکسیدروی آلیبده با نیکل در شکل 1 نشان داده شده است.

که در آن a و c پارامترهای شبکه هستند، h، k و l شاخص‌های میلر هستند، همچنین d_{hkl} فاصله بین صفحات (hkl) است.

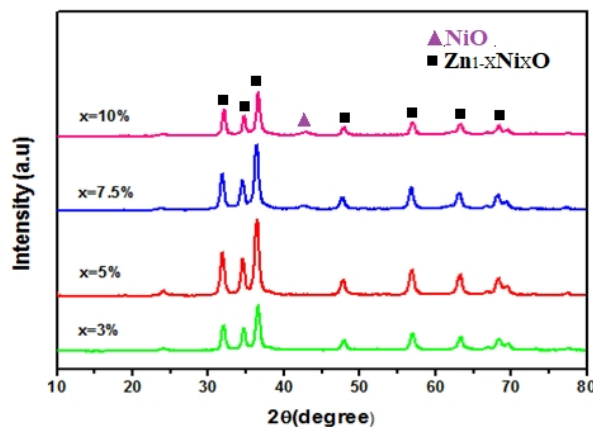
متوسط اندازه بلوری نانوذرات برای پیک [101] با استفاده از فرمول دبای-شرر و پارامترهای شبکه a و c که از الگوهای XRD استخراج شده است در جداول 2 و 3 به ترتیب آمده است.

جدول 2. اثر میزان آلیش بر پارامترهای ساختارهای نانوذرات

Zn _x Ni _{1-x} O				
درصد ناخالصی (%)	a (Å)	c (Å)	D (nm) [101]	
3	3/2200	5/2000	23	
5	3/2417	5/1876	25	
7,5	3/2389	5/1693	20	
10	3/2213	5/2000	24	

از نتایج جدول 2 می‌توان دریافت که درصد میزان ناخالصی باعث تغییر در پارامترهای ساختار می‌شود و به همین دلیل می‌توان بیان داشت با تغییر پارامترهای شبکه، اندازه نانوبلورک‌ها نیز تغییر می‌یابد.

طیف FT-IR (Thermo) مدل دستگاه AVATAR- کشور سازنده: آمریکا) نمونه‌های اکسید روی سنتز شده در محدوده 4000-400 cm⁻¹ در شکل 2 نشان داده شده است. مطابق شکل 2، پیک تیز و قوی در 433 cm⁻¹ و یک پیک در 816 cm⁻¹ در همه نانوساختارهای Zn_xNi_{1-x}O دیده می‌شود به ترتیب مربوط به مد کششی Zn-O [26] و Ni-O [27] نسبت داده شده است.



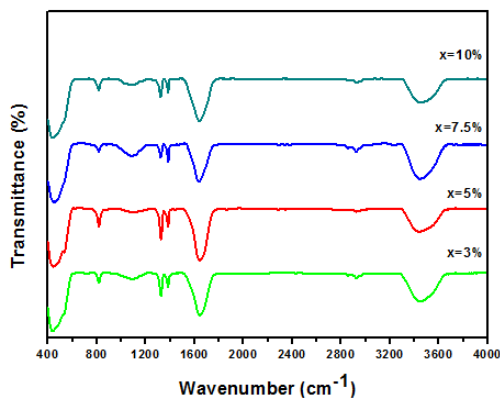
شکل 1. الگوهای XRD نانوساختارهای Zn_xNi_{1-x}O.

اطلاعات به دست آمده از XRD نشان می‌دهد که نانوساختارهای (Zn_xNi_{1-x}O) اکسید روی آلیبده شده با نیکل همانند اکسید روی خالص (ZnO) ساختار ورتزایت شش گوشه دارند که بیان می‌کند آلیبده نیکل نتوانسته ساختار ورتزایت هگزاگونال را تغییر دهد، این الگو مطابق با الگوی کارت استاندارد (01-075-1526) برای اکسید روی است [22]. در نمونه‌های آلیبده شده با غلظت‌های 10% و 7/5% (x=7/5)، قله خیلی کوچک مربوط به ناخالصی نیکل در صفحه براگ [200] در زاویه 2θ = 42 مشاهده شد که چنین قله پراش اضافی مربوط به فاز ثانویه اکسید نیکل است [23]. اندازه متوسط دانه‌ها را می‌توان با استفاده از رابطه دبای-شرر محاسبه گردد [24]:

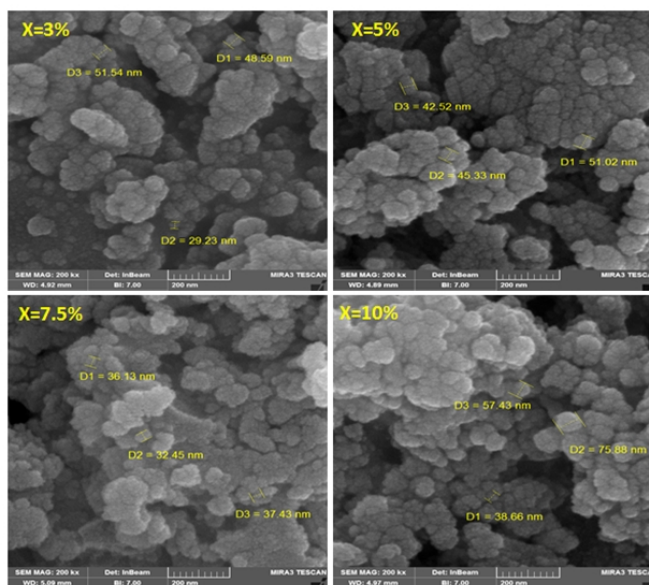
$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta}$$

که در آن D، β، λ و θ به ترتیب اندازه متوسط نانوبلورک، طول موج پرتو ایکس اعمال شده، پهنای نصف قله و زاویه براگ است. همچنین پارامترهای شبکه کریستالی شش ضلعی را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد [25]:

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

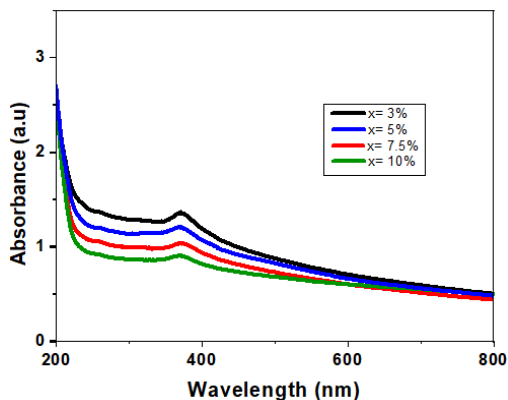


شکل 2. طیف FT-IR نانوساختارهای Zn_xNi_{1-x}O.



شکل 3. تصاویر FESEM نانوساختارهای $Zn_xNi_{1-x}O$.

نمونه‌ها با توجه به عواملی همانند اندازه ذرات، کمبود اکسیژن و نقص در ساختار بلوری می‌تواند متفاوت باشد [29]. از طیف جذبی نمونه‌ها کاملاً آشکار است که در ناحیه 400 تا 800 نانومتر کاملاً شفاف هستند و بین طول موج بین 300 تا 400 نانومتر، جذب با کاهش طول موج افزایش یافته است، که حاکی از جذب ذاتی ناشی از گذارهای مستقیم الکترون‌ها است و بنابراین نمونه‌ها متعلق به نیم رساناهایی با گاف نواری مستقیم هستند [30]. قله قابل مشاهده در همه طیف‌ها مربوط به جذب اکسیژن است. قله جذب اکسیژن برای نمونه‌های آماده شده در طول موج 375-365 نانومتر اتفاق می‌افتد که مربوط به ساختار و ترتیب اکسید روی است [31].



شکل 4. طیف جذب UV-visible نانوساختارهای $Zn_xNi_{1-x}O$.

پیک بین $3200-3600 \text{ cm}^{-1}$ به دلیل مد ارتعاشی گروه عاملی هیدروکسیل که به دلیل آب دوستی ساختار اکسید روی، روی سطح نمونه‌ها قرار دارد و علاوه بر این، دو پیک در 1072 cm^{-1} و 1356 cm^{-1} مشاهده می‌شود که به گروه کربوکسیل تعلق دارند [28] که نشان می‌دهد متانول به شدت در سطح ساختار جذب می‌شود. همچنین با افزودن ناخالصی‌ها، از شدت پیک Zn-O کاسته شده است که به دلیل جایگزینی بسیاری از اتم‌های نیکل در موقعیت شبکه‌ای روی است.

به منظور مطالعه سطح و بررسی ریخت‌شناسی و همچنین اندازه‌گیری اندازه ذرات تولید شده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی استفاده گردید (TESCAN- مدل دستگاه MIRA III- کشور سازنده: جمهوری چک). تصاویر شکل 3 ریخت‌شناسی نمونه‌ها با درصد آرایش مختلف در بزرگ‌نمایی 200 نانومتر را برای نانوساختارهای $Zn_xNi_{1-x}O$ نشان می‌دهد. همان‌طور که از تصاویر شکل 3 پیداست متوسط اندازه ذرات بین 30 تا 60 نانومتر و نانوساختارها دارای شکل کروی هستند.

طیف‌سنجی جذب نوری در ناحیه فرابنفش- مرئی یکی از روش‌های متداول برای بررسی خواص نوری مواد است. این طیف‌سنجی در گستره 300 تا 800 نانومتر صورت می‌گیرد، خواص نوری نانوساختارهای اکسیدروی با استفاده از طیف جذبی UV-Visible بررسی شد که برای نانوساختارهای اکسید روی سنتز شده در شکل 4 نشان داده شده است. جذب

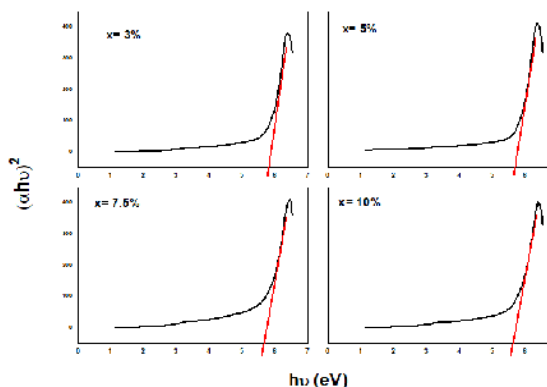
کاهش داشته است. ضریب جذب α از رابطه زیر محاسبه می‌شود [32]:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)$$

که در آن d ضخامت نمونه و T میزان عبور است و از طرفی گاف انرژی با ضریب جذب با رابطه تاوک باهم مرتبط می‌شوند [33]:

$$= A (h\nu - E_g)^n \alpha$$

که E_g گاف انرژی و A یک مقدار ثابت است. n برای نیم رساناهایی با گاف نواری مستقیم و غیرمستقیم به ترتیب 0/5 و 2 است. از رسم نمودار $(\alpha h\nu)^2$ بر حسب $h\nu$ و برون‌یابی قسمت خطی نمودار می‌توان مقدار گاف انرژی را از محل برخورد با محور $h\nu$ به دست آورد (شکل 5).



شکل 5. نمودار $(\alpha h\nu)^2$ بر حسب $h\nu$ نانوساختارهای Zn_xNi_{1-x}O.

جدول 3. مقادیر گاف انرژی نمونه‌های

نانوساختارهای Zn _x Ni _{1-x} O	
درصد ناخالصی (%)	E _g (eV)
3	5/84
5	5/68
7,5	5/66
10	5/61

نتایج مقادیر گاف انرژی در جدول 3 آورده شده است که نشان می‌دهد افزودن ناخالصی سبب افزایش گاف نواری نسبت به نمونه‌های خالص اکسید روی شده است و هرچه میزان درصد ناخالصی افزایش یافته، مقدار گاف انرژی روندی

direct precipitation method. Superlattices and Microstructures, 2015. 85: p. 7-23.

[4] Shamirzaev, T.S., et al., Dynamics of Vacancy Formation and Distribution in Semiconductor Heterostructures: Effect of Thermally Generated Intrinsic Electrons. Nanomaterials, 2023. 13(2): p. 308.

جمع‌بندی

نانوساختارهای Zn_xNi_{1-x}O با استفاده از روش سل - ژل با موفقیت سنتز شدند. روش سل - ژل، به دلیل مقرون به صرفه و در دسترس بودن روش بسیار مفیدی برای تولید نانوساختارها است، این روش نیازی به تجهیزات پیشرفته ندارد و به راحتی می‌تواند با استفاده از تجهیزات موجود در یک آزمایشگاه تحقیقاتی کوچک نیز انجام شود. نتایج XRD نشان داد که تغییر درصد میزان ناخالصی نتوانست ساختار هگزاگونال نانوساختارهای Zn_xNi_{1-x}O تغییر دهد به این صورت که نانوساختار Zn_xNi_{1-x}O اکسید روی آلاینده شده با نیکل همانند اکسید روی خالص (ZnO) ساختار هگزاگونال دارند؛ که بیان می‌کند آلاینده نیکل در جایگاه روی ساختار کریستالی جای‌نشین شده است. در نمونه‌های آلاینده شده با 10% و 7/5% x ، قله مربوط به شبکه کریستالی اکسید نیکل در صفحه [200] مشاهده شد. نتایج FT-IR وجود قله‌های وارون مربوط به دو مد کششی Ni-O و Zn-O در همه نانوساختارهای Zn_xNi_{1-x}O را تایید کرد. همچنین دو گروه عاملی هیدروکسیل و کربوکسیل نیز روی سطح نمونه‌ها مشاهده شد که با افزایش زمان بازپخت و یا زمان واکنش فرآیند می‌توان میزان آنها را کاهش داد. نتایج FESEM نشان داد که نانوساختارهای Zn_xNi_{1-x}O دارای شکل کروی و اندازه ذرات در ابعاد بین 30 الی 60 نانومتر هستند. بررسی نتایج طیف UV-Visible نشان داد که خواص اپتیکی نانوساختارها به میزان آلاینده وابسته است، به طوری که با تغییر غلظت عنصر آلاینده نیکل مقدار گاف انرژی نانوساختارهای Zn_xNi_{1-x}O تغییر کرد و بیشترین گاف انرژی مربوط به نمونه تهیه شده با درصد وزنی 3 درصد آلاینده است.

منابع

- [1] Findik, F., Nanomaterials and their applications. Periodicals of Engineering and Natural Sciences, 2021. 9(3): p. 62-75.
- [2] Wang, Z.L., Nanostructures of zinc oxide. Materials today, 2004. 7(6): p. 26-33.
- [3] Kahouli, M., et al., Structural and optical properties of ZnO nanoparticles prepared by

- [5] Alamdari, S., et al., Preparation and characterization of GO-ZnO nanocomposite for UV detection application. *Optical Materials*, 2019. 92: p. 243-250.
- [6] Inobeme, A., et al., Chemical Nanosensors for Monitoring Environmental Pollution, in *Advanced Application of Nanotechnology to Industrial Wastewater*. 2023, Springer. p. 93-103.
- [7] Anjum, S., et al., Recent advances in zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) for cancer diagnosis, target drug delivery, and treatment. *Cancers*, 2021. 13(18): p. 4570.
- [8] Muthuvel, A., M. Jothibas, and C. Manoharan, Effect of chemically synthesis compared to biosynthesized ZnO-NPs using Solanum nigrum leaf extract and their photocatalytic, antibacterial and in-vitro antioxidant activity. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020. 8(2): p. 103705.
- [9] Adetunji, C.O., et al., Bio-and nanosensors in the food industry. 2022.
- [10] Qamar, M.A., S. Shahid, and M. Javed, Synthesis of dynamic g-C₃N₄/Fe@ ZnO nanocomposites for environmental remediation applications. *Ceramics International*, 2020. 46(14): p. 22171-22180.
- [11] Demir, M., et al., Facile Fabrication of ZnO Nanoparticles for efficient dye degradation: Effect of Adipic Acid in photocatalytic activity. *ChemistrySelect*, 2023. 8(8): p. e202203822.
- [12] Patel, C., et al., Large and uniform single crystals of MoS₂ monolayers for ppb-level NO₂ sensing. *ACS Applied Nano Materials*, 2022. 5(7): p. 9415-9426.
- [13] Cheng, H., et al., Characterization of Al-doped ZnO thermoelectric materials prepared by RF plasma powder processing and hot press sintering. *Ceramics International*, 2009. 35(8): p. 3067-3072.
- [14] Zamiri, R., et al., Er doped ZnO nanoplates: synthesis, optical and dielectric properties. *Ceramics International*, 2014. 40(1): p. 1635-1639.
- [15] Dinesha, M., et al., Structural and dielectric properties of Fe doped ZnO nanoparticles. *Indian Journal of Physics*, 2013. 87: p. 147-153.
- [16] Lotus, A., et al., Effect of aluminum oxide doping on the structural, electrical, and optical properties of zinc oxide (AOZO) nanofibers synthesized by electrospinning. *Materials Science and Engineering: B*, 2010. 166(1): p. 61-66.
- [17] Zamiri, R., et al., Effects of rare-earth (Er, La and Yb) doping on morphology and structure properties of ZnO nanostructures prepared by wet chemical method. *Ceramics international*, 2014. 40(1): p. 523-529.
- [18] Astinchap, B., R. Moradian, and M.N. Tekyeh, Investigating the optical properties of synthesized ZnO nanostructures by sol-gel: The role of zinc precursors and annealing time. *Optik*, 2016. 127(20): p. 9871-9877.
- [19] Sahu, K. and A.K. Kar, Morphological, optical, photocatalytic and electrochemical properties of hydrothermally grown ZnO nanoflowers with variation in hydrothermal temperature. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2019. 104: p. 104648.
- [20] Lupan, O., et al., Synthesis and characterization of ZnO nanowires for nanosensor applications. *Materials Research Bulletin*, 2010. 45(8): p. 1026-1032.
- [21] Raoufi, D., Synthesis and microstructural properties of ZnO nanoparticles prepared by precipitation method. *Renewable Energy*, 2013. 50: p. 932-937.
- [22] Abisha, P., C. Jinitha, and S. Sonia, Hierarchical synthesis of binary ZnO@MWCNTs heterogeneous photocatalyst derived from porous Zn metal organic framework (MOF) template: Study on the effective photodegradation of Congo red (CR) dye. *Current Applied Physics*, 2024.
- [23] Husain, S., et al., Nickel sub-lattice effects on the optical properties of ZnO nanocrystals. *J. Optoelectron. Eng*, 2013:(¹)¹ . p. 28-32.
- [24] Kiziltaş, H., T. Tekin, and D. Tekin, Synthesis, characterization of Fe₃O₄@ SiO₂@ ZnO composite with a core-shell structure and evaluation of its photocatalytic activity. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020. 8(5): p. 104160.
- [25] Parra-Palomino, A.G., Room-temperature synthesis and characterization of highly monodisperse transition metal-doped ZnO nanocrystals. 2006.
- [26] Abhijith, A., A. Srivastava, and A. Srivastava, Synthesis and characterization of magnesium doped ZnO using chemical route. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. IOP Publishing.
- [27] Mohandesi, M., M. Tavakolian, and M.R. Rahimpour, Eggplant as an appreciable bio-template for green synthesis of NiO nanoparticles: Study of physical and photocatalytic properties. *Ceramics International*, 2022. 48(16): p. 22820-22826.
- [28] Xiong, G., et al., Photoluminescence and FTIR study of ZnO nanoparticles: the impurity and defect perspective. *physica status solidi c*, 2006. 3(10): p. 3577-3581.
- [29] Soitah, T.N., Y. Chunhui, and S. Liang, Effect of Fe doping on structural and electrical properties of nanocrystalline ZnO thin films prepared by sol-gel dip coating technique. *Science of Advanced Materials*, 2010. 2(4): p. 534-538.
- [30] Vanheusden, K., et al., Correlation between photoluminescence and oxygen vacancies in ZnO phosphors. *Applied physics letters*, 1996. 68(3): p. 403-405.

- [31] Pudukudy, M. and Z. Yaakob, Facile synthesis of quasi spherical ZnO nanoparticles with excellent photocatalytic activity. *Journal of Cluster Science*, 2015. 26: p. 1187-1201.
- [32] Sharma, S.K., et al., Dependence of band gap on deposition parameters in CdSe sintered films. *Chalcogenide Letters*, 2008. 5(4): p. 73-78.
- [33] Faramawy, A., et al., Structural, optical, magnetic and electrical properties of sputtered ZnO and ZnO: Fe thin films: The role of deposition power. *Ceramics*, 2022. 5(4): p. 1128-1153.