

مطالعه‌ی خواص نوری خطی و غیرخطی مرتبه سوم نانوکامپوزیت TiO_2/ZnO آزاده حقیقت زاده^{۱*}، نسرين غزکوب^۲^۱ مرکز تحقیقات مهندسی سطح پیشرفته و نانومواد، گروه فیزیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران^۲ گروه فیزیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایرانStudy of linear and third-order nonlinear optical properties of TiO_2/ZnO nanocompositeAzadeh Haghghatzadeh^{*1}, Nasrin Ghazkoob²¹ Advanced Surface Engineering and Nano Materials Research Center, Department of Physics, Ahvaz Branch, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran² Department of Physics, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

Abstract

In this study, structural characteristics and linear and nonlinear optical properties of TiO_2/ZnO nanocomposite were investigated. In the first step, TiO_2/ZnO composite nanostructure was prepared via a two-stage chemical co-precipitation approach by adding TiO_2 nanoparticles into an aqueous solution containing zinc acetate precursor. In a second step, pure TiO_2 and ZnO nanoparticles were synthesized by a co-precipitation method to investigate the presence portion of the basic structures on linear and nonlinear optical properties of TiO_2/ZnO nanocomposite. Phase identification and chemical analysis of as-synthesized nanostructures were performed by X-ray diffraction (XRD) crystallography and Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy. Elemental properties of samples were studied by energy dispersive X-ray spectrometer (EDS) and surface mapping recorded by field emission scanning electron microscopy (FE-SEM). The morphological studies of the as-synthesized nanocomposite were analyzed by transmission electron microscopy (TEM). Linear optical studies were carried out to achieve the optical absorption edges and band-gap energies using UV-Vis spectra. Standard single-beam Z-scan technique with open-aperture (OA) and closed-aperture (CA) setups was utilized to determine nonlinear refraction index and nonlinear absorption coefficients, respectively. The optical nonlinear results showed a third-order optical susceptibility from the order of 10^{-4} esu under 532 nm laser radiations.

Keywords: Nanocomposite, Titanium dioxide, Zinc oxide, Z-scan setup, The third-order susceptibility

Received: 11/07/2022

Accepted: 18/08/2022

چکیده

در این مطالعه، مشخصه‌های ساختاری و خواص نوری خطی و غیرخطی نانوکامپوزیت TiO_2/ZnO مورد تحقیق قرار گرفتند. در گام اول، نانو ساختار کامپوزیتی TiO_2/ZnO در طی یک فرایند دو مرحله‌ای به روش هم‌رسوبی شیمیایی با اضافه کردن نانو ذرات TiO_2 به محلول آبی حاوی پیش ماده استات روی تهیه شد. در گام دوم جهت بررسی چگونگی سهم حضور ساختارهای پایه ای بر خواص نوری خطی و غیرخطی نانو کامپوزیت TiO_2/ZnO ، نانو ذرات خالص TiO_2 و ZnO با استفاده از روش هم‌رسوبی ساخته شدند. مشخصه‌یابی فازی و تحلیل شیمیایی نانو ساختارهای ساخته شده با استفاده از مشخصه یابی پراش پرتو ایکس (XRD) و طیف سنجی تبدیل فوریه فروسرخ (FT-IR) انجام شد. خواص عنصری نمونه‌ها توسط تحلیل عنصری نقطه‌ای (EDS) و تحلیل عنصری صفحه‌ای (Mapping) ثبت شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FE-SEM) مطالعه شد. مطالعات ریخت شناسی نانوکامپوزیت با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) تفهیر شد. مطالعات نوری خطی جهت مشخص نمودن انرژی ناحیه ممنوعه و مشخص کردن طول موج بیشینه جذب نمونه ها توسط طیف سنجی مرئی-فرا بنفش (UV-Vis) انجام شد. روش استاندارد روبش-z تک پرتویی با چیدمان‌های درجه باز و بسته به ترتیب برای تعیین ضرایب جذب و شکست نوری غیرخطی استفاده شد. نتایج نوری غیرخطی، پذیرفتاری غیرخطی مرتبه سوم از مرتبه ی 10^{-4} esu را تحت تابش های لیزری 532 nm نشان داد.

واژه‌های کلیدی: نانوکامپوزیت، دی اکسید تیتانیوم، اکسید روی،

چیدمان روبش-z، پذیرفتاری غیرخطی مرتبه سوم

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۷

* نویسنده مسئول: آزاده حقیقت زاده

نشانی: اهواز، مرکز تحقیقات مهندسی سطح پیشرفته و نانومواد، گروه فیزیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی
پست الکترونیکی: azadeh.haghghatzadeh.physics@gmail.com, a.haghghatzadeh@iauhvaz.ac.ir

۱. مقدمه

تولید مواد نوری غیرخطی به علت کاربردهای وسیع در زمینه‌های گوناگون همانند ابزارهای غیرخطی تمام نوری شامل سویچ‌های نوری، مبدل‌های فرکانسی و محدودکنندگان نوری به سرعت در حال افزایش است [۱]. مواد نیم‌رسانای نانو مقیاس با طبیعت کوانتومی منحصر به فرد که برگرفته از اثرات مربوط به پدیده محدودکنندگی کوانتومی است، در طول دهه‌های گذشته به عنوان یکی از گروه‌های بالقوه جالب برای موادی با ویژگی‌های نوری غیرخطی در نظر گرفته شده‌اند [۲،۳]. با افزایش علاقه به مواد نیم‌رسانا برای کاربردهای غیرخطی، توجه محققان بسیاری به دی‌اکسید تیتانیوم با مشخصه‌های نوری مطلوب از جمله یک ضریب شکست بالای مستقل از شدت با بزرگی در حدود $2/7$ جلب شده است [۴]. برای مثال، پژوهشگران نتایج تحقیقاتی متعددی را در خصوص رفتارهای نوری غیرخطی نانو ساختارهای دی‌اکسید تیتانیوم ارائه داده‌اند. در تحقیقی، لو-هو^۱ و همکارانش وابستگی پاسخ نوری غیرخطی نانو ذرات TiO_2 فاز آاناتاز را به شکل نانو ذرات و همچنین شدت پرتوهای لیزری تابیده شده گزارش کرده‌اند [۵]. در پژوهشی دیگر، سالینراج^۲ و همکارانش نانو ذرات TiO_2 را با استفاده از روش سل - ژل تهیه کرده و اثرات دمای حرارت دهی را بر روی ضرایب جذب غیرخطی آن‌ها مطالعه کرده‌اند [۶]. پذیرفتاری غیرخطی از جمله مؤلفه‌های بسیار مهم برای شناسایی خواص نوری محیط‌های غیرخطی است که جهت استفاده در کاربردهای صنعتی تحت مطالعه قرار می‌گیرد. در این خصوص، هاشیموتو^۳ و همکارانش پذیرفتاری‌های غیرخطی مرتبه سوم کوچکی در حدود $2 \times 10^{-12} esu$ و $2/4 \times 10^{-11} esu$ را به ترتیب برای فیلم‌های TiO_2 فاز روتایل و آاناتاز تهیه شده به روش سل - ژل گزارش کرده‌اند [۷]. با این وجود، گایورونسکی^۴ و همکارانش در تحقیقی دیگر پاسخ‌های نوری غیرخطی بسیار

بزرگی در حدود $2 \times 10^{-9} esu$ را برای پذیرفتاری مرتبه سوم نانو ذرات دی‌اکسید-تیتانیوم فاز آاناتاز ساخته شده به روش سل - ژل تخمین زده‌اند. آن‌ها پاسخ غیرخطی بزرگ نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم فاز آاناتاز تهیه شده را به اکسیتون‌های تشدیدی مربوط به حالت‌های الکترونیکی نقص‌های سطحی برآمده در ساختار کریستالی نانو ذرات TiO_2 نسبت داده‌اند [۸]. در این میان، روش‌های گوناگونی جهت افزایش بازدهی غیرخطی نیم‌رساناها پیشنهاد شده است. روش‌های ترکیبی همانند استفاده از ساختارهای نامتجانس در ترکیب با اکسیدهای فلزی و مواد پلیمری، پذیرفتاری غیرخطی نیم‌رساناها را جهت استفاده‌های کاربردی در صنعت و تکنولوژی بهبود می‌بخشند [۹]. اکسید روی با انرژی اتصال اکسیتونی بزرگ^۵ [۱۰] و طبیعت حرکت الکترونی بالا^۶ [۱۱] از جمله نیم‌رساناهای پرمفردار برای افزایش دادن خواص غیرخطی نوری است. والیگاتالا^۷ و همکارانش طی پژوهشی جذب غیرخطی افزایش یافته‌ای در حدود $2/6 \times 10^{-9} cm/W$ را به همراه ویژگی‌های محدودکنندگی نوری برای کریستال‌های تک فوتونی اکسید روی ساخته شده به روش اسپاترینگ RF گزارش کرده‌اند [۱۲]. علاوه بر این، ننگ^۸ و همکارانش در پژوهشی دیگر، آرایه‌های نانو ذرات Au/ZnO را با استفاده از روش لیتوگرافی بر روی زیرلایه‌های کوارتز پوشش دهی کرده و خواص نوری غیرخطی آن‌ها را با بدست آوردن پذیرفتاری مرتبه سوم به بزرگی $1/27 \times 10^{-7} esu$ مطالعه کرده‌اند [۱۳]. در تحقیقی که توسط یریمپان^۹ و همکارانش انجام شده است، اثرات بهبودبخشی غیرخطی نانو ذرات ZnO در اضافه شدن به نانوکامپوزیت‌های $ZnO-SiO_2$ و $ZnO-CdS$ به خوبی مشاهده شده است [۱۴]. در این زمینه، ضریب شکست غیرخطی افزایش یافته‌ای بعد از اضافه کردن نانو ذرات TiO_2 به نانو کریستال‌های ZnO در ساختار کامپوزیتی ZnO/TiO_2 بدست آمده است [۱۴]. همچنین هان^{۱۰} و

⁶ High electron mobility nature

⁷ Valligatala

⁸ Ning

⁹ Irimpan

¹⁰ Han

¹ Lu-Hu

² Saalinraj

³ Hashimoto

⁴ Gayvoronsky

⁵ Large excitonic binding energy

سانتریفیوژ با سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه جمع آوری و پس از شستشو با آب یون‌زدایی شده و اتانول ۹۹٪ در دمای 80°C به مدت ۲۴ ساعت خشک شد. در نهایت محصول بدست آمده در کوره الکتریکی و در دمای 350°C به مدت ۲ ساعت تحت عملیات حرارتی قرار گرفت.

در مرحله دوم برای تهیه کردن نانوکامپوزیت TiO_2/ZnO ، 1.752g از استات روی دو آبه در 250 mL آب یون‌زدایی شده حل و پس از ۳۰ دقیقه هم زدن، 0.1997 g پودر دی اکسید تیتانیوم از پیش ساخته شده به محلول بدست آمده اضافه و تحت هم زدن پیوسته قرار گرفت. در طول این مدت 250 mL محلول آبی 0.1 M از هیدروکسید سدیم قطره قطره به محلول تحت هم زدن اضافه شد. پس از ۵ ساعت هم زدن، با استفاده از یک دستگاه سانتریفیوژ با سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه فرایند رسوب‌گیری به مدت ۱۰ دقیقه انجام شد. رسوب بدست آمده پس از شستشو با اتانول، به مدت ۱۲ ساعت در دمای 90°C خشک و به مدت ۲ ساعت در کوره الکتریکی تحت عملیات حرارتی با دمای 450°C قرار گرفت. در پایان نیز به منظور انجام مطالعات مقایسه‌ای، نانوذرات ZnO تنها با حذف مرحله اضافه کردن پودر دی اکسید تیتانیوم تهیه شدند.

۲.۳. مشخصه‌یابی نمونه‌ها

از پراش سنج پرتو ایکس مدل D8 DAVANCE با ولتاژ 40KV و جریان 30 mA ساخت شرکت BRUKER با لامپ مسی و طول موج 1.54056 \AA جهت انجام آزمایش‌های تشخیص فازی بهره‌گیری شد. شناسایی عنصری نمونه‌ها بر اساس تحلیل عنصری نقطه‌ای (EDS) و توزیع فراوانی عناصر (Mapping) توسط آشکارساز SAMAX نصب شده بر روی میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FE-SEM) مدل MIRA III ساخت شرکت TESCAN انجام شد. از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مدل EM10C-100KV ساخت ZEISS جهت مطالعات ریخت شناسی استفاده شد. ساختار شیمیایی نمونه‌ها توسط طیف سنج تبدیل فوریه فرو سرخ

همکارانش به منظور تحقیق کردن اثرات تغییرات درصد Zn بر روی ضریب جذب غیرخطی نوری، لایه‌های نازک کامپوزیتی ZnO-TiO_2 را با نسبت‌های اتمی Zn/Ti مختلف تهیه کرده‌اند [۱۵].

بررسی‌های انجام شده لزوم مطالعه چگونگی بستگی مشخصه‌های نوری غیرخطی در ساختارهای نامتجانس را به مواد تشکیل دهنده ترکیبی آشکار می‌کنند. لذا، در پژوهش حاضر نانوکامپوزیت TiO_2/ZnO با استفاده از روش هم‌رسوبی تهیه شده و وابستگی پذیرفتاری غیرخطی مرتبه سوم در آن به سهم حضور ساختارهای پایه ای TiO_2 و ZnO تحقیق شد. در این مقاله، پس از تکمیل بررسی‌های ساختاری از جمله مطالعات فازی، عنصری، شیمیایی و ریخت شناسی، خواص نوری خطی و غیرخطی وابسته به شدت، شامل ضریب جذب دوفوتونی و ضریب شکست غیرخطی با استفاده از روش تجربی رویش-Z بررسی شدند.

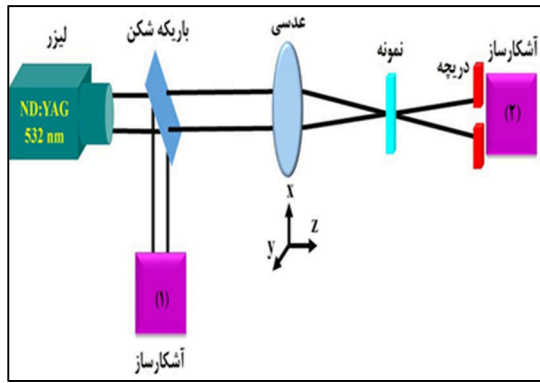
۲. فعالیت‌های تجربی

۲.۱. مواد اولیه

در پژوهش حاضر از تترا ان بوتیل ارتو تیتانات (97% $\text{Ti}(\text{C}_4\text{H}_9\text{O})_2$ ، استات روی دو آبه (98% $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ، استیک اسید (97% $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$ ، هیدروکسید سدیم (98% NaOH) و اتانول (99% $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) خریداری شده از شرکت مرک جهت تهیه نانو ذرات کامپوزیت TiO_2/ZnO استفاده شد. همچنین از آب یون‌زدایی شده در طول فرایندهای آزمایشگاهی بهره‌گیری شد.

۲.۲. ساخت نانوکامپوزیت‌های TiO_2/ZnO

نانوکامپوزیت دوتایی TiO_2/ZnO به روش هم‌رسوبی در طی دو مرحله تهیه شد. در مرحله اول برای تهیه نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم، $3/2\text{ mL}$ از پیش ماده تترا ان بوتیل ارتو تیتانات و $4/2\text{ mL}$ استیک اسید به ترتیب در 20 mL و 5 mL اتانول 99% حل شده و به مدت ۳۰ دقیقه در دمای اتاق تحت هم زدن پیوسته قرار گرفتند. محلول استیک اسید بدست آمده قطره قطره به محلول حاوی تترا ان بوتیل ارتو تیتانات اضافه و با یک همزن مغناطیسی به مدت ۲ ساعت در دمای اتاق هم زده شد. رسوب سفید رنگ حاصل توسط دستگاه



شکل ۱- آرایش تجربی چیدمان روبش-Z

برای اندازه‌گیری ضریب جذب غیر خطی مطابق با چیدمان دریاچه باز، نمونه آماده شده در راستای محور Z (محور نوری) در مجاورت کانون حرکت داده شد. جهت اندازه‌گیری ضریب شکست غیرخطی، دریاچه‌ای با کمیت عبور $S = 0.13$ در مقابل آشکارساز فوتونی ۲ (چیدمان دریاچه بسته) قرار داده شد. به منظور آماده سازی نمونه‌ها، مقدار مشخصی از نمونه‌ها در حلال آبی ریخته شده و به سل کوارتزی با ضخامت $1mm$ اضافه شد.

نمونه‌های تهیه شده با مشخصه‌های نوری غیرخطی، چگالی تابشی انتقال یافته غیریکنواختی را ناشی از فرایندهای جذب چند فوتونی در مجاورت نقطه کانونی برای هر یک از چیدمان‌های باز و بسته نشان می‌دهند. در چیدمان دریاچه بسته، اگر نمونه نوری آزمایش شده باعث همگرایی باریکه لیزری شود، اثرات معروف به خودکانونگی را نشان داده و در نقش یک عدسی مثبت عمل می‌کند. اثرات خودکانونگی در منحنی تغییرات گذار نور بر حسب فاصله روبش نمونه (Z)، با حضور دره و قله‌ای که به ترتیب پیش و پس از کانون قابل تشخیص است، نشان داده می‌شود. با این وجود اگر نمونه نوری آزمایش شده باعث واگرایی باریکه لیزری شود، اثرات معروف به خودواکانونگی را نشان داده و در نقش یک عدسی منفی عمل می‌کند. اثرات خودواکانونگی در منحنی تغییرات گذار نور بر حسب فاصله روبش نمونه (Z)، با حضور قله و دره‌ای که به ترتیب پیش و پس از کانون قابل تشخیص است، مشخص می‌شود.

البته در چیدمان دریاچه باز، نمونه‌های نوری با مشخصه جذب غیرخطی، در منحنی تغییرات گذار خود بر حسب Z،

(FT-IR) مدل RXII ساخت شرکت Perkin Elmer مطالعه شد. مشخصه‌های نوری خطی بر اساس تحلیل‌های طیف جذبی مرئی - فرابنفش توسط دستگاه-AVASPEC-2048 TEC با چیدمان AVALAMP DH-S بررسی شدند. خواص نوری غیر خطی ترکیبات ساخته شده نیز توسط دستگاه روبش-Z مطالعه شدند.

۴.۲. چیدمان آزمایشگاهی

برای اندازه‌گیری پذیرفتاری غیرخطی مرتبه سوم نانوکامپوزیت TiO_2/ZnO ، نانوذرات TiO_2 و ZnO تهیه شده از روش روبش-Z با چیدمان دریاچه باز و بسته استفاده شد. بخش‌های حقیقی و موهومی پذیرفتاری غیرخطی نوری مرتبه سوم ($\chi^{(3)}$) به ترتیب طبق معادلات ۱ و ۲ به ضریب شکست غیرخطی (n_2) و ضریب جذب غیرخطی (β) مرتبط می‌باشند [۱۶]:

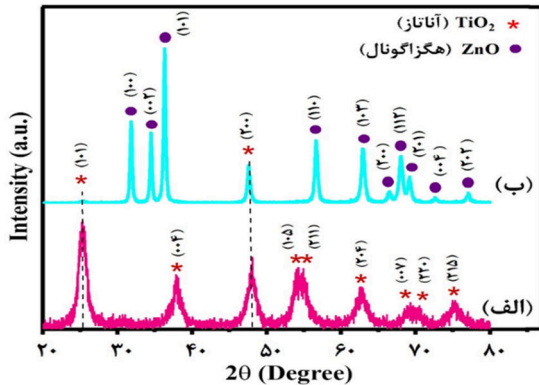
$$Re(\chi^{(3)}) = \frac{4\epsilon_0 cn_0^2 n_2}{3} \quad (1)$$

$$Im(\chi^{(3)}) = \frac{\epsilon_0 cn_0^2 \beta}{3\pi} \quad (2)$$

در جایی که، n_0 ضریب شکست مستقل از شدت، c سرعت نور در خلا و ϵ_0 پذیرفتاری الکتریکی خلا می‌باشند. براساس تئوری روبش-Z، ضرایب جذب و شکست غیرخطی مواد نوری را می‌توان به ترتیب با استفاده از چیدمان‌های دریاچه باز و بسته به صورت تجربی اندازه‌گیری کرد.

شکل ۱، آرایش تجربی چیدمان استفاده شده جهت اندازه‌گیری کمیت‌های نوری غیرخطی نانوکامپوزیت‌های TiO_2/ZnO را نشان می‌دهد. جهت انجام آزمایش از لیزر ND:YAG تپی با طول موج عملگری 532 nm ، پهنای زمانی 10 ns ، نرخ تکرار 10 KHz و توان $12/2\text{ mW}$ استفاده شد. باریکه لیزر قبل از کانونی شدن توسط عدسی همگرا کننده‌ای با فاصله کانونی 11 cm ، با استفاده از یک باریکه شکن به دو بخش تقسیم شد. بخشی از باریکه با عنوان باریکه مرجع به سمت آشکارساز فوتونی ۱ برای اندازه‌گیری افت و خیزهای پرتو لیزر هدایت شد. بخش باقی مانده پس از عبور از عدسی به نمونه برخورد کرده و در نهایت توسط آشکارساز ۲ ثبت شد.

(ب) نیز مطابق با کارت مرجع ۰۰-۰۳۶-۱۴۵۱ تشکیل فاز اکسید روی هگزاگونال بدون ناخالصی را نشان می دهد.



شکل ۲ - تصویر الگوهای پراش پرتو ایکس (الف) نانو ذرات TiO_2 ، (ب) نانو ذرات ZnO و (ج) نانوکامپوزیت TiO_2/ZnO

مقایسه الگوی پراش پرتو ایکس نمایش داده شده در شکل ۲ (ج) با الگوی پراش TiO_2 خالص، حضور قله های اضافی در ساختار TiO_2 را بعد از اتمام مرحله دوم فرایند ساخت نشان می دهد. قله های تشکیل شده در مرحله دوم، مطابق با کارت مرجع به شماره ۰۰-۰۳۶-۱۴۵۱ تشکیل ساختار اکسید روی هگزاگونال را علاوه بر ساختارهای دی اکسید تیتانیوم فاز آناتاز ((۱۰۱)) و ((۲۰۰)) در نمونه TiO_2/ZnO ساخته شده نشان می دهند. اندازه ریزبلورک های نمونه TiO_2 و ZnO خالص و همچنین نانوکامپوزیت TiO_2/ZnO با استفاده از رابطه دبای-شرر [۲۰] و به ترتیب بر اساس صفحه فازی ((۱۰۱)) مربوط به TiO_2 آناتاز و همچنین صفحه ((۱۰۱)) مربوط به ZnO هگزاگونال به ترتیب $23nm$ ، $20nm$ و $28nm$ بدست آمد.

۲.۳. بررسی تحلیل عنصری

شکل ۳ و ۴ تحلیل عنصری نمونه های ساخته شده را نشان می دهد. تحلیل عددی مربوط به توزیع های فراوانی اتمی (A%) و وزنی (W%) عناصر تشکیل دهنده نمونه های ساخته شده را نیز می توان در جدول ۱ مشاهده نمود. همانگونه که از مشخصه یابی عنصری نقطه ای (EDS) و اطلاعات فهرست شده در جدول ۱ مشخص است، هیچ گونه ناخالصی در نانو ذرات TiO_2 و ZnO تهیه شده وجود ندارد. نتایج تحلیل عنصری نانوکامپوزیت TiO_2/ZnO ساخته شده بر پایه مشخصه یابی عنصری نقطه ای (EDS) و

روندی را به سمت حضور یک دره یا یک قله در نقطه کانونی عدسی همگرا کننده نمایش می دهند. ظهور یک دره یا یک قله در فاصله کانونی به ترتیب، بیانگر افزایش یا کاهش در فرایند جذب غیرخطی است. رفتارهای افزایشی و کاهش مشاهده شده در اطراف فاصله کانونی که با افزایش شدت پرتو لیزر ورودی رخ می دهند، به ترتیب پدیده های جذب اشباع و جذب اشباع معکوس اتفاق افتاده در نمونه های غیر خطی آزمایش شده را توصیف می کنند [۱۷]. تحت شرایطی که جذب دو فوتونی حاکم است، ضریب جذب و شکست غیر خطی به ترتیب از روابط ۳ و ۴ بدست می آیند [۹، ۱۸]:

$$\beta = \frac{q_0(1 + (\frac{z}{z_0})^2)}{I_0 L_{eff}} \quad (3)$$

$$\Delta T(z) = 0.406(1 - s)^{0.27} (2\pi/\lambda) n_2 I_0 L_{eff} \quad (4)$$

جایی که، q_0 به گذار بهنجار شده $T(z)$ و همچنین L_{eff} به طول موثر نمونه با ضریب جذب خطی α مطابق معادلات ۵ و ۶ ارجاع داده می شوند [۱۹]:

$$T(z) = 1 - \frac{q_0}{2\sqrt{2}} \quad (5)$$

$$L_{eff} = \frac{(1 - \exp(-\alpha L))}{\alpha} \quad (6)$$

که در آن L ضخامت نمونه است. همچنین λ $z_0 = \frac{\pi}{\omega_0^2}$ طول پراش پرتو و $k = 2\pi/\lambda$ بردار موج است. با در نظر گرفتن کمر پرتو، $z_0 = \frac{\pi}{\omega_0^2}$ طول پراش (z_0) و همچنین شدت پرتو در کانون (I_0) به ترتیب $1/\text{cm}$ و $6.216 \times 10^6 \mu\text{m}$ اندازه گیری شدند.

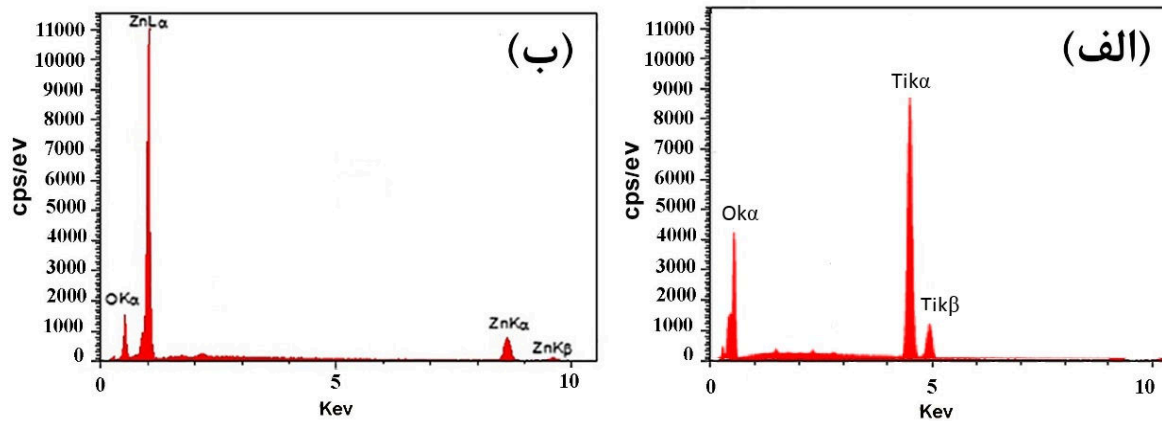
۳. بحث و نتایج

۳.۱. بررسی تحلیل فازی

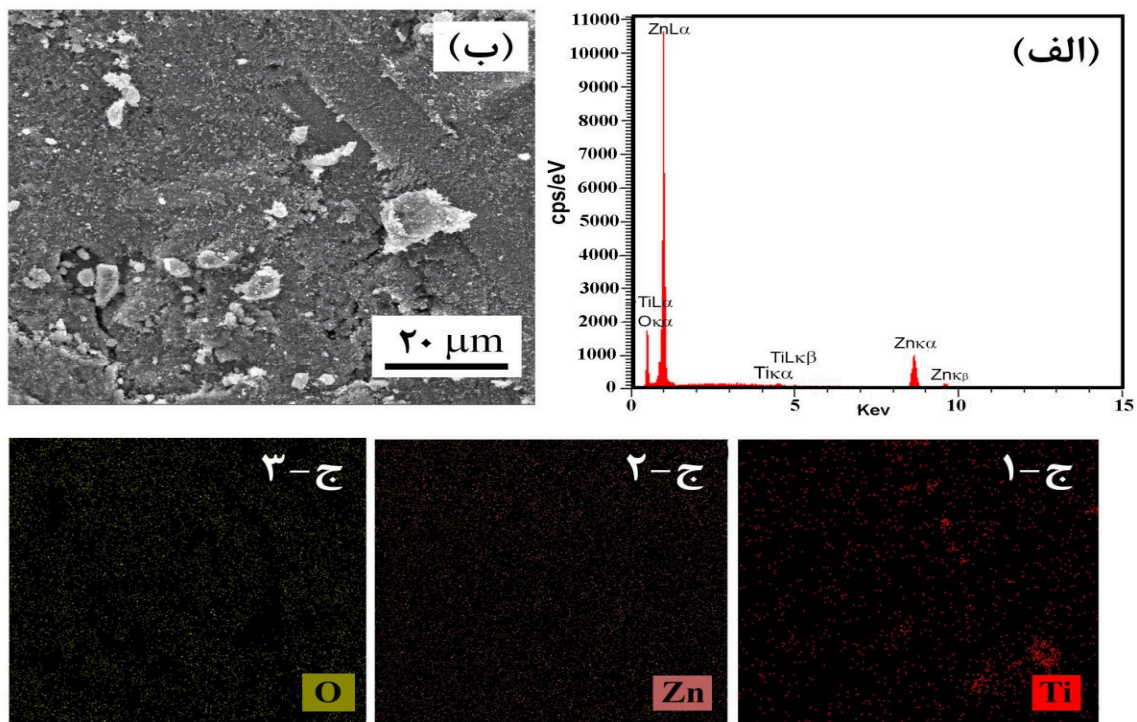
الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه های ساخته شده در گستره 2θ از ۲۰ تا ۸۰ درجه در شکل ۲ نشان داده شده اند. الگوی پراش پرتو ایکس نشان داده شده در شکل ۲ (الف) مطابق با کارت مرجع ۰۰-۰۲۱-۱۲۷۲ تشکیل فاز خالص آناتاز دی اکسید تیتانیوم را در مرحله اول ساخت نانو ذرات کامپوزیتی تایید می کند. الگوی پراش پرتو ایکس شکل ۲

می‌دهند. فراوانی ارائه شده، توزیع یکنواخت و همپوشانی مناسب نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم و اکسید روی را در نمونه ساخته شده نشان می‌دهد. با این وجود، از اطلاعات عددی ارائه شده در جدول ۱، می‌توان شکل‌گیری نانوکامپوزیت TiO_2/ZnO با درصد وزنی بالاتر ساختارهای ZnO نسبت به ساختارهای TiO_2 را نتیجه گرفت. نتیجه حاصل از تحلیل عنصری نانوکامپوزیت ساخته شده، مشاهدات حاصل از الگوی پراش پرتو ایکس نانوکامپوزیت دوتایی TiO_2/ZnO را تایید می‌نماید.

توزیع فراوانی عناصر (Mapping) در شکل ۴ ارائه شده است. مشخصه یابی EDS نشان داده شده در شکل ۴ (الف) حضور عناصر تیتانیوم، روی و اکسیژن را در نانوکامپوزیت TiO_2/ZnO تهیه شده تایید می‌نماید. همانگونه که در شکل ۴ (الف) مشاهده می‌شود، هیچ گونه ناخالصی در نانوکامپوزیت TiO_2/ZnO تهیه شده وجود ندارد. شکل‌های ۴ (ج-۱) تا (ج-۳) به ترتیب توزیع فراوانی عناصر تیتانیوم، روی و اکسیژن مربوط به تصویر انتخاب شده در الگوی FE-SEM نشان داده شده در شکل ۴ (ب) را نمایش



شکل ۳ - طیف EDS از نانو ذرات (الف) TiO_2 و (ب) ZnO



شکل ۴ - (الف) طیف EDS از نانوکامپوزیت TiO_2/ZnO ، (ب) تصویر FE-SEM مربوط به نانوکامپوزیت TiO_2/ZnO و (ج-۱) توزیع عنصر Ti، (ج-۲) توزیع عنصر Zn و (ج-۳) توزیع عنصر O در نانوکامپوزیت TiO_2/ZnO

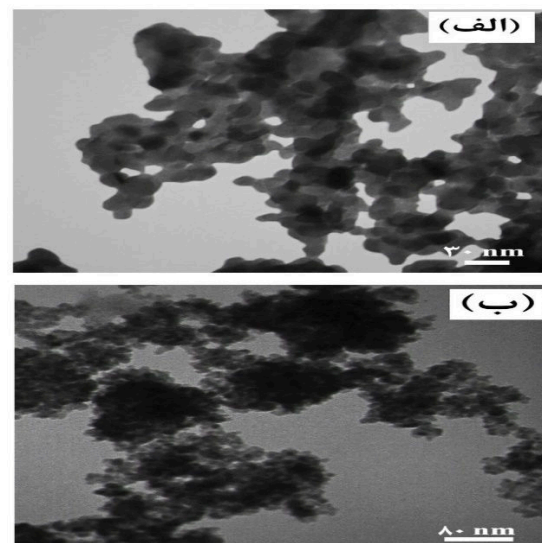
جدول ۱- تحلیل عددی EDS مربوط به نانو ذرات TiO_2 ، ZnO و نانوکامپوزیت TiO_2/ZnO

Titanium (Ti)		Zinc (Zn)		Oxygen (O)		نمونه
A%	W%	A%	W%	A%	W%	
۳۶/۶۰	۶۱/۹۰	---	---	۶۳/۴۰	۳۸/۱۰	TiO_2
---	---	۵۵/۹۰	۸۳/۴۰	۴۴/۱۰	۱۶/۶۰	ZnO
۱/۲۸	۲/۱۸	۲۳/۸۴	۵۵/۳۰	۷۴/۸۸	۴۲/۵۲	TiO_2/ZnO

به پیوند کششی Ti-O و مدهای کششی-خمشی Ti-O-Ti نسبت داده شود. باندهای پیوندی در 1633 cm^{-1} و 3429 cm^{-1} می‌توانند مربوط به ارتعاشات کششی -OH- (گروه هیدروکسیل) و ارتعاشات خمشی مولکول‌های آب در سطح نانو ذرات TiO_2 باشند. علاوه بر این، باند پیوندی ظاهر شده در موقعیت 2360 cm^{-1} متعلق به ارتعاشات کششی گروه‌های کربوکسیل (C=O) ایجاد شده توسط دی اکسید کربن اتمسفریک جذب شده بر روی سطح نانوذرات TiO_2 است. الگوی تبدیل فروسرخ نانو ذرات ZnO نشان داده شده در شکل ۶ (ب) باندهای پیوندی را در گستره 1447 cm^{-1} تا 400 cm^{-1} و همچنین در موقعیت 1447 cm^{-1} ارائه می‌دهد که می‌تواند متعلق به نوسانات کششی ایجاد شده در شبکه Zn-O-Zn باشند باندهای پیوندی ظاهر شده در 2358 cm^{-1} و 3435 cm^{-1} می‌توانند مربوط به پیوندهای O=C=O و تعاملات بین گروه‌های هیدروکسیل و سطح نانو ذرات ZnO باشند. در الگوی تبدیل فروسرخ نانوکامپوزیت TiO_2/ZnO نشان داده شده در شکل ۶ (ج)، باند پیوندی در 488 cm^{-1} می‌تواند به پیوند کششی Ti-O-Ti در سطح نانو ذرات TiO_2 نسبت داده شود. باندهای پیوندی حاضر در گستره 1865 cm^{-1} تا 1525 cm^{-1} می‌توانند مربوط به ارتعاشات کششی -OH- (گروه هیدروکسیل) و ارتعاشات خمشی مولکول‌های آب باشند. علاوه بر این، باندهای پیوندی در موقعیت‌های 2923 cm^{-1} و 3436 cm^{-1} متعلق به ارتعاشات کششی پیوند Zn-O هستند. باند پیوندی در $488/13 \text{ cm}^{-1}$ می‌تواند به پیوند کششی Ti-O-Ti در سطح نانو ذرات TiO_2 نسبت داده شود. باندهای پیوندی حاضر در گستره $1865/99 \text{ cm}^{-1}$ تا $1525/62 \text{ cm}^{-1}$ می‌توانند مربوط به ارتعاشات کششی -OH- (گروه هیدروکسیل) و ارتعاشات خمشی مولکول‌های آب باشند.

۳.۳. بررسی ریزساختاری

شکل ۵ (الف) و (ب)، تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری گرفته شده از نانوکامپوزیت TiO_2/ZnO را به ترتیب در دو مقیاس 30 nm و 80 nm نشان می‌دهد. با یادآوری مراحل رشد نانو ذرات ساخته شده در ساختار کامپوزیتی TiO_2/ZnO ، حضور ساختارهای غیریکنواخت خاکستری رنگ تشکیل شده در اطراف نانو ذرات سیاه (الگوی خاکستری رنگ) در اطراف نانو ذرات کریستاله شده دی اکسید تیتانیوم (الگوی سیاه رنگ) نسبت داد.

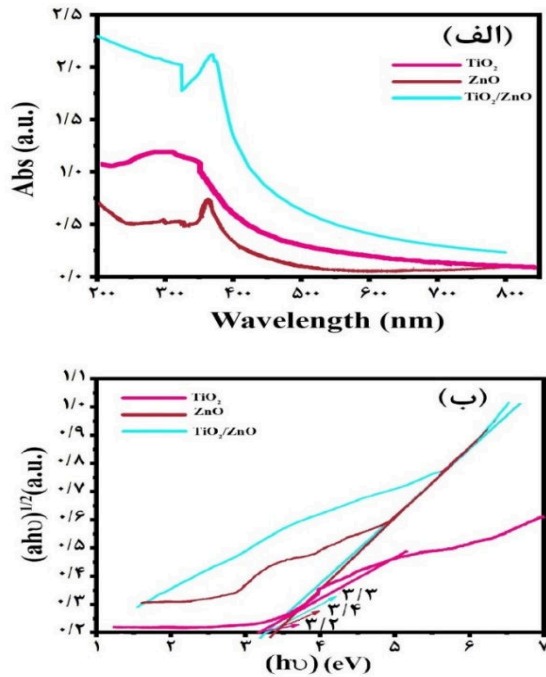


شکل ۵ - تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نانوکامپوزیت TiO_2/ZnO در بزرگنمایی (الف) 30 nm و (ب) 80 nm

۴.۳. بررسی تحلیل شیمیایی

جهت بررسی نقش گروه‌های عاملی در سطح نمونه‌های ساخته شده از طیف سنجی تبدیل فوریه فروسرخ استفاده شده است. شکل ۶، طیف تبدیل فوریه فروسرخ نمونه‌ها را در گستره 400 cm^{-1} تا 4000 cm^{-1} نشان می‌دهد. الگوی مربوط به نانو ذرات TiO_2 نشان داده شده در شکل ۶ (الف) باند پیوندی قوی را در 671 cm^{-1} ارائه می‌دهد که می‌تواند

مقادیر تخمین زده شده انرژی، طول موج هایی معادل با nm ۳۸۵، ۳۶۴ nm و ۳۷۵ nm را به ترتیب برای جذب بیشینه نانوساختارهای ZnO، TiO₂ و TiO₂/ZnO ارائه می کنند.



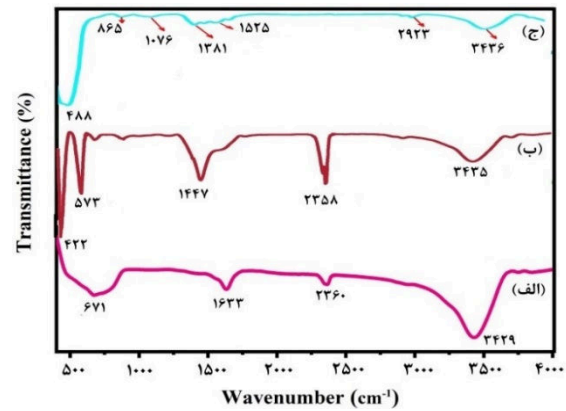
شکل ۷- (الف) طیف جذب مرئی-فرابنفش و (ب) نمودار $(ah\nu)^{1/2}$ برحسب انرژی فوتون تابشی برای محاسبه انرژی ناحیه ممنوعه نوری نانوذرات TiO₂، ZnO و نانوکامپوزیت TiO₂/ZnO

مقایسه نتایج حاصل از تحلیل عنصری نانوکامپوزیت TiO₂/ZnO در بخش ۲.۳ با مقادیر عددی تخمین زده شده برای نواحی ممنوعه نمونه های ساخته شده نشان می دهد که حضور درصد وزنی بالاتر عنصر Zn نسبت به Ti که منجر به شکل گیری حجم بالاتری از ساختارهای ZnO نسبت به TiO₂ در نانوکامپوزیت TiO₂/ZnO شده است، انرژی ناحیه باند ممنوعه نانوذرات TiO₂ را بعد از اضافه شدن ساختارهای ZnO به منظور شکل گیری نانوکامپوزیت TiO₂/ZnO، به دلیل بزرگتر بودن انرژی ناحیه ممنوعه نانوذرات ZnO نسبت به انرژی متناظر نانوذرات TiO₂، افزایش داده است.

۶.۳. بررسی تحلیل نوری غیرخطی

شکل ۸ گذارهای بهنجار شده آزمایش های روبش-Z روزنه بسته و باز را برای نمونه های ساخته شده نشان می دهد.

علاوه براین، باندهای پیوندی در موقعیت های $2923/80\text{ cm}^{-1}$ و $3436/74\text{ cm}^{-1}$ متعلق به ارتعاشات کششی پیوند Zn-O هستند.



شکل ۶- طیف تبدیل فوریه فروسرخ (الف) نانوذرات TiO₂، (ب) نانوذرات ZnO و (ج) نانوکامپوزیت TiO₂/ZnO

۵.۳. بررسی تحلیل نوری خطی

به منظور مطالعه مشخصه های نوری خطی نمونه های ساخته شده از طیف سنجی جذبی مرئی-فرابنفش در گستره طول موجی ۲۰۰ nm تا ۸۰۰ nm بهره گرفته شده است. شکل ۷ (الف)، طیف جذبی مرئی - فرابنفش نانوساختارهای ساخته شده را نمایش می دهد. الگوی جذبی نانوساختارهای تهیه شده نشان دهنده جذب قوی و گسترده این ذرات در ناحیه فرابنفش با شیب تندی به سمت ناحیه مرئی است. انرژی ناحیه ممنوعه نوری از رابطه تاک^۱ مطابق معادله ۷ قابل تخمین است [۲۱]:

$$(ah\nu) = A(h\nu - E_g)^2 \quad (7)$$

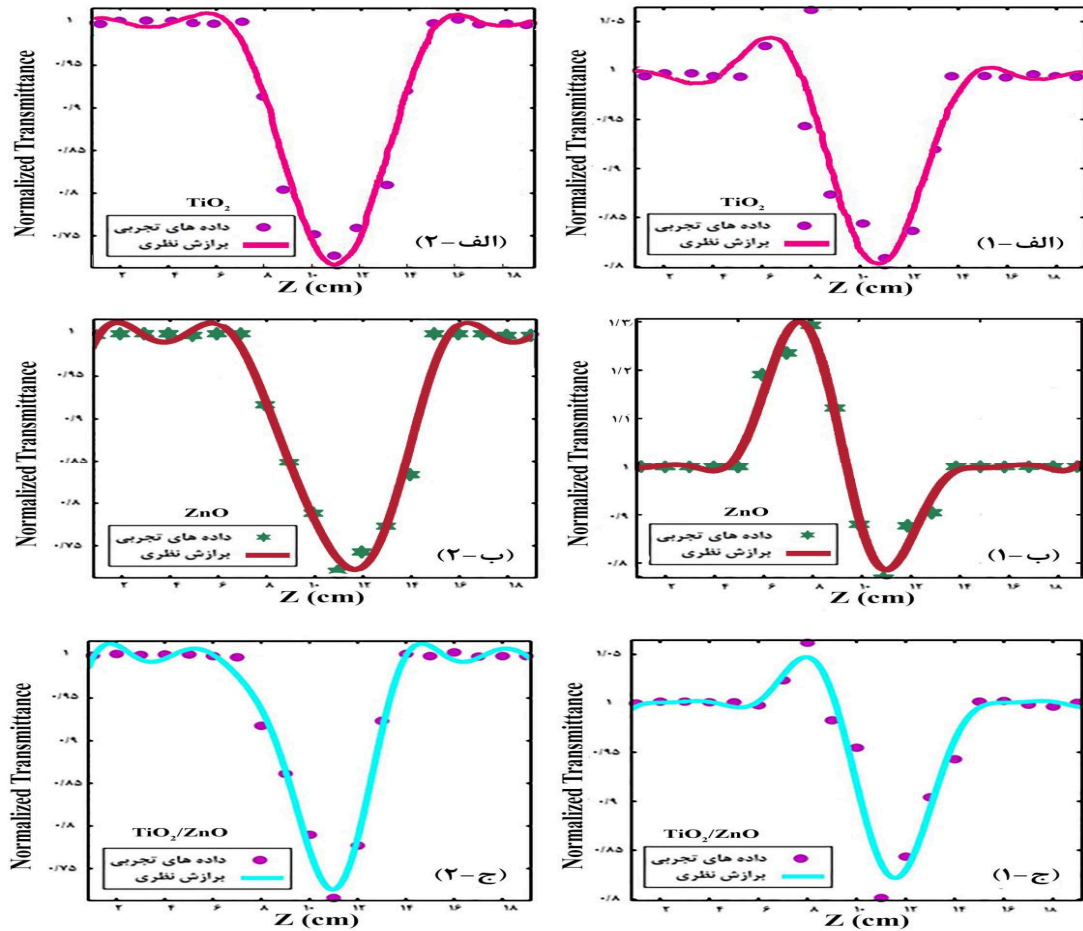
در این رابطه α ضریب جذب، $h\nu$ انرژی فوتون^۲، A ثابت تناسب و E_g انرژی ناحیه ممنوعه نوری است. مقدار انرژی ناحیه ممنوعه از رسم منحنی $(ah\nu)^{1/2}$ در مقابل $h\nu$ و تخمین زدن تقاطع شیب بخش راست منحنی با محور مربوط به انرژی فوتون تعیین می گردد. نتیجه بدست آمده برای نانوساختارهای ساخته شده در شکل ۷ (ب) ارائه شده است. نتیجه حاصل شده، انرژی هایی معادل ۳/۲ eV، ۳/۴ eV و ۳/۳ eV را به ترتیب برای ناحیه ممنوعه نوری نانوساختارهای ZnO، TiO₂ و TiO₂/ZnO تخمین زده شده است.

^۲ Photon

^۱ Tauc

شده در حضور میدان‌های قوی لیزری است. بر اساس تحلیل کرامرز-کرونیگ و انرژی ناحیه باند ممنوعه بدست آمده از شکل ۸ (ب)، مشاهده رفتار خودواکانونگی برای نمونه‌های تهیه شده، تحت تابش پرتوهایی با طول موج 532nm معادل با انرژی فوتون تابشی 2.33 eV به دلیل برقراری شرط $0.69 < E_g/h\nu >$ قابل پیش بینی است [۱۸،۲۲].

اشکال هندسی پراکنده در شکل ۸ بیانگر داده‌های تجربی ثبت شده توسط چیدمان آزمایشگاهی روبش-Z هستند. مطابق آنچه پیشتر توضیح داده شد، مشاهده قله و دره‌های برآمده به ترتیب پیش و پس از کانون عدسی ($z=11\text{cm}$)، در داده‌های ترسیم شده در شکل ۸ (الف-۱)، (ب-۱) و (ج-۱) بیانگر حضور ضریب شکست غیرخطی منفی با اثرات معروف به خودواکانونگی برای نمونه‌های ساخته



شکل ۸ - گذارهای بهنجار شده تجربی روبش-Z (۱) در پیچه بسته و (۲) در پیچه باز به همراه برازش‌های نظری در حضور (الف) نانو ذرات TiO_2 ، (ب) نانو ذرات ZnO و (ج) نانوکامپوزیت TiO_2/ZnO

نشان می‌دهد. نتیجه حاصل شده نشانگر حضور جذب غیر خطی اشباع معکوس تحت تاثیر شدت‌های نوری قوی برای نمونه‌های ساخته شده است. پدیده جذب اشباع معکوس مشاهده شده در نمونه‌ها، تحت تابش پرتوهایی با طول موج 532nm را می‌توان به پدیده غیرخطی جذب دو فوتونی نسبت داد. از اندازه‌های انرژی‌های باند ممنوعه بدست آمده از شکل ۸ (ب)، رخداد جذب دو فوتونی در نمونه ساخته شده تحت شرایط نوری قابل انتظار است. بر اساس شرط

علاوه بر این، شکل ۸ (الف-۱)، (ب-۱) و (ج-۱) ساختارهایی نامتقارن (قله‌ها و دره‌هایی با اندازه‌های متفاوت) را در اطراف نقطه کانونی نشان می‌دهد. این ساختارهای نامتقارن می‌توانند ناشی از پدیده جذب غیرخطی باشند [۲۳،۲۴] که توسط آزمایش روبش-Z با چیدمان در پیچه باز قابل مطالعه کردن است. شکل ۸ (الف-۲)، (ب-۲) و (ج-۲) ظهور دره‌هایی عمیق را در اطراف نقطه کانونی ($z=11\text{cm}$) برای چیدمان تجربی در پیچه باز

همانگونه که در جدول ۲ ارائه شده است، بدلیل کوچک تر بودن نتایج عددی بدست آمده برای ضرایب شکست غیرخطی نمونه های ساخته شده در مقایسه با مقادیر تخمین زده شده آنها برای ضرایب جذب غیرخطی، پذیرفتاری غیرخطی مرتبه سوم نمونه ها روند تغییری مشابه با آنچه که برای ضرایب جذب غیرخطی حاصل شده است، را دنبال می کند. نتایج عددی فهرست شده در جدول ۲ همچنین نشان می دهند که؛ پذیرفتاری غیرخطی مرتبه سوم نانوذرات TiO₂ بعد از اضافه شدن ساختار ZnO که منجر به شکل گیری نانوکامپوزیت TiO₂/ZnO شده است، از مقدار $3/5 \times 10^{-4} \text{esu}$ به $1/72 \times 10^{-4} \text{esu}$ کاهش یافته است. رفتار کاهش پذیرفتاری غیرخطی مرتبه سوم نانوذرات TiO₂ بعد از شکل گیری نانوکامپوزیت TiO₂/ZnO را می توان براساس تحلیل عنصری نانوکامپوزیت TiO₂/ZnO صورت گرفته شده در بخش ۲.۳، به حضور درصد بالاتر ساختار ZnO با پذیرفتاری غیرخطی مرتبه سوم کوچکتر در مقایسه با درصد پایین تر نانوذرات TiO₂ با پذیرفتاری غیرخطی مرتبه سوم بزرگتر در ساختار نانوکامپوزیتی TiO₂/ZnO ساخته شده نسبت داد.

مشخصه های غیرخطی بدست آمده در این مطالعه همچنین به طور ارزشمندی می توانند با نتایج گزارش شده از سوی دیگر پژوهشگران این حوزه مورد مقایسه قرار گیرند. در این خصوص، هان^۱ و همکارانش ضریب جذب غیرخطی به بزرگی $1/5 \times 10^3 \text{cm/GW}$ برای لایه های نازک ZnO-TiO₂ القا شده توسط پرتوهای لیزری با طول موج 790 nm را هنگامی که نسبت Zn/Ti معادل $0/75$ بود، بدست آوردند [۱۵]. یریمپان^۲ و همکارانش نیز ضرایب شکست و جذب غیرخطی از مرتبه $10^{-17} \text{ m}^2/W$ و 10^{-11} m/W را برای نانوکامپوزیت ZnO-TiO₂ آزمایش شده با استفاده از روش روبش-z تخمین زده اند [۱۴]. در مقایسه با نتایج حاصل شده از دیگر ساختارهای نانوکامپوزیتی متشکل از دی اکسید تیتانیوم و اکسید روی، نانوکامپوزیت TiO₂/ZnO ساخته شده در این مطالعه، جذب و شکست غیرخطی نسبتاً

دوفوتونی هنگامی که انرژی ناحیه ممنوعه ساختارهای مواد نیم رسانا بسیار بزرگتر از انرژی فوتون های تابشی باشد ($E_g > h\nu$)، با برقراری شرط $2h\nu > E_g > h\nu$ جذب نوری از طریق جذب همزمان دو فوتون اتفاق می افتد [۲۴]. ضرایب مربوط به جذب و شکست غیرخطی مشاهده شده در اثر ردیابی های پرتوهای لیزر در چیدمان های روبش-z باز و بسته به ترتیب می توانند از برازش داده های تجربی با معادلات ۳ و ۴ حاصل شوند. همانگونه که در شکل ۸ دیده می شود، برازش نظری منحنی های حاصل از معادلات ۳ و ۴ انطباق بسیار خوبی را با نتایج تجربی (اشکال هندسی پراکنده در شکل ۸) نشان می دهند. ضرایب جذب و شکست غیرخطی نمونه های ساخته شده به ترتیب براساس داده های تجربی بدست آمده از شکل ۸ (الف-۱)، (ب-۱) و (ج-۱) گذار بهنجار شده $T(z)$ در نقطه کانونی ($z=11 \text{ cm}$) و (الف-۲)، (ب-۲) و (ج-۲) (اختلاف بین قله و دره $\Delta T(z)$ در مجاورت نقطه کانونی $z=11 \text{ cm}$) محاسبه و نتایج عددی آن ها در جدول ۲ ارائه شده اند. مقادیر بدست آمده ضرایب شکست و جذب غیرخطی از مرتبه $10^{-11} \text{ m}^2/W$ و 10^{-3} m/W را به ترتیب برای نمونه های ساخته شده نشان می دهند. با محاسبه بخش های حقیقی و موهومی پذیرفتاری غیرخطی مرتبه سوم مطابق با معادلات ۱ و ۲، پذیرفتاری غیرخطی مرتبه سوم نمونه ها براساس $\chi^{(3)} = \sqrt{\text{Re}(\chi^{(3)}) + \text{Im}(\chi^{(3)})}$ تخمین و نتایج عددی آن در جدول ۲ ارائه شده است. مقادیر بدست آمده پذیرفتاری غیرخطی مرتبه سوم، بزرگی از مرتبه 10^{-4}esu را برای نمونه های ساخته شده نشان می دهد.

جدول ۲- مشخصه های نوری غیرخطی نانوذرات TiO₂، ZnO و

نانوکامپوزیت TiO₂/ZnO

نمونه	$\beta(\text{m/W})$	$n_2(\text{m}^2/W)$	$\chi^{(3)}(\text{esu})$
TiO ₂	$5/08 \times 10^{-3}$	$-1/00 \times 10^{-11}$	$3/50 \times 10^{-4}$
ZnO	$3/23 \times 10^{-3}$	$-1/85 \times 10^{-11}$	$2/10 \times 10^{-4}$
TiO ₂ /ZnO	$2/90 \times 10^{-3}$	$-0/82 \times 10^{-11}$	$1/72 \times 10^{-4}$

¹ Han

² Irimpan

- [7] T. Hashimoto, T. Yoko, S. Sakka, "Sol-gel preparation and third-order nonlinear optical properties of TiO₂ thin films", *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, **67** (1994) 653-660.
- [8] V. Gayvoronsky, A. Galas, E. Shepelyavy, T. Dittrich, V.Y. Timoshenko, S.A. Nepijko, M.S. Brodyn, F. Koch, "Giant nonlinear optical response of nanoporous anatase layers", *Applied Physics B*, **80** (2005) 97-100.
- [9] F. Hosseinpour, M. Pourtabrizi, "Experimental investigation of nonlinear optical responses of Fuchsin dye by reversed micelles", *Optical and Quantum Electronics*, **53** (2021) 563.
- [10] Q. Tong, Y.-H. Wang, X.-X. Yu, B. Wang, Z. Liang, M. Tang, A.-S. Wu, H.-J. Zhang, F. Liang, Y.-F. Xie, "Nonlinear optical and multi-photon absorption properties in graphene@ZnO nanocomposites", *Nanotechnology*, **29** (2018) 165706.
- [11] A.S. Rao, G. Sethuraman, O.S.N. Ghosh, A. Sharan, A.K. Viswanath, "Third order nonlinear study of ZnO nano particles under femto-second laser illumination", *ArXiv Prepr. ArXiv*, **1806** (2018) 09404.
- [12] S. Valligatla, A. Chiasera, S. Varas, P. Das, B.N.S. Bhaktha, A. ukowiak, F. Scotognella, D.N. Rao, R. Ramponi, G.C. Righini, "Optical field enhanced nonlinear absorption and optical limiting properties of 1-D dielectric photonic crystal with ZnO defect", *Optical Materials*, **50** (2015) 229-233.
- [13] T. Ning, Y. Zhou, H. Shen, H. Lu, Z. Sun, L. Cao, D. Guan, D. Zhang, G. Yang, "Nonlinear optical properties of Au/ZnO nanoparticle arrays" *Applied Surface Science*, **254** (2008) 1900-1903.
- [14] L. Iriraman, V.P.N. Nampoori, P. Radhakrishnan, "Spectral and nonlinear optical characteristics of ZnO nanocomposites", *Sciences of Advanced Materials*, **2** (2010) 117-137.
- [15] Y.-B. Han, J.-B. Han, Z.-H. Hao, "Band Gap Shift and the Optical Nonlinear Absorption of Sputtered ZnO-TiO₂ Films", *Journal of nanoscience and nanotechnology*, **11** (2011) 5024-5027.
- [16] Deepika, R. Dhar, D. Mohan, "Study of optical nonlinearity of CdSe and CdSe@ ZnO core@shell quantum dots in nanosecond regime", *Modern Physics Letters B*, **29** (2015)1550209.
- [17] H.S. Sindhu, S.R. Maidur, P.S. Patil, R.J. Choudhary, "Nonlinear optical and optical power limiting studies of Zn_{1-x}Mn_xO thin films prepared by spray pyrolysis", *Optik*, **182** (2019)671-681.
- [18] R.A. Ganeev, M. Baba, M. Morita, D. Rau, H. Fujii, A.I. Rysanyansky, N. Ishizawa, M. Suzuki, H. Kuroda, "Nonlinear optical properties of CdS and ZnS nanoparticles doped into zirconium oxide films" *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* **6** (2004) 447,
- [19] S. Mathew, B.S. Bhardwaj, A.D. Saran, P. Radhakrishnan, V.P.N. Nampoori, C.P.G. Vallabhan, J.R. Bellare, "Effect of ZnS shell on optical properties of CdSe-ZnS core-shell quantum dots", *Optical Materials*, **39** (2015) 46-51.
- [20] D. Ram rez-Ortega, A.M. Meléndez, P. spero Acevedo-Pe a, I. Gonz lez, R. Arroyo, "Semiconducting properties of ZnO/TiO₂ composites by electrochemical measurements and their relationship with photocatalytic activity", *Electrochimica Acta*, **140** (2014) 541-549.
- [21] L. Munguti, F. Dejene "Influence of annealing temperature on structural, optical and photocatalytic properties of ZnO-TiO₂ composites for application in dye removal in water", *Nano-Structures & Nano-Objects*, **24** (2020) 100594.
- [22] M. Sheik-Bahae, A.A. Said, T.-H. Wei, D.J. Hagan, E.W. Van Stryland, "Sensitive measurement of optical nonlinearities using a single beam", *IEEE journal of quantum electronics*, **26** (1990) 760-769.
- [23] W. Feng, T. Wei, M. Li-Na, C. Wen-Ju, Z. Gui-Lan, Z. Guo-Feng, C. Shi-Dong, X. Wei, "Optical nonlinear properties of CdSeS/ZnS core/Shell quantum dots" *Chinese Physics Letters*, **25** (2008) 1461.
- [24] A.K. Kole, P. Kumbhakar, U. Chatterjee, "Observations on nonlinear optical properties of ZnS nanosheet, ZnS-ZnO composite nanosheet and porous ZnO nanostructures dispersed in aqueous medium", *Chemical Physics Letters*, **591** (2014) 93-98.

بزرگتری را نشان داده‌اند که علاوه بر ساختار کریستالی نانو ذرات می‌تواند ناشی از ویژگی‌های منبع لیزر تحریکی همچون شدت فوتون‌های ورودی باشد.

۴. نتیجه‌گیری

نانو ذرات TiO₂ و ZnO و نانوکامپوزیت TiO₂/ZnO با موفقیت به روش هم‌رسوبی ساخته شدند. نتایج حاصل از مشخصه‌یابی‌های ساختاری، تشکیل موفق نانو ساختارهای TiO₂، ZnO و TiO₂/ZnO را بدون حضور ناخالصی نشان دادند. مطالعات نوری نانو ساختارهای تهیه شده جذب قوی و گسترده این نانو ذرات را در ناحیه فرابنفش با شیب تندی به سمت ناحیه مرئی ارائه دادند. یافته‌های نوری غیرخطی، اثرات خود واکانونگی و جذب اشباع معکوس دو فوتونی را در نانو ساختارهای ساخته شده تحت تابش‌های لیزری ۱۰^{-۴} esu با پذیرفتاری غیرخطی مرتبه سوم از مرتبه ۱۰^{-۴} esu نشان دادند. نتایج بدست آمده وابستگی مشخصه‌های نوری خطی و غیرخطی مرتبه سوم را به سهم حضور ساختارهای پایه ای TiO₂ و ZnO تایید کردند.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله بدینوسیله مراتب قدردانی و تشکر خود را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز بواسطه پشتیبانی فنی از این کار اعلام می‌دارند.

مرجع‌ها

- [1] J.W. You, S.R. Bongu, Q. Bao, N.C. Panoiu, "Nonlinear optical properties and applications of 2D materials: theoretical and experimental aspects", *Nanophotonics*, **8** (2019) 63-97.
- [2] V.I. Gavrilenko, T. V Murzina, G. Mizutani, "Nonlinear Optics of Nanostructures", *Physics Research International*, **2** (2012)
- [3] M. Turunen, M. Brotons-Gisbert, Y. Dai, Y. Wang, E. Scerri, C. Bonato, K.D. Jöns, Z. Sun, B.D. Gerardot, "Quantum photonics with layered 2D materials", *Nature Reviews Physics* **4** (2022) 219-236.
- [4] D. Banerjee, S.S.B. Moram, C. Byram, J. Rathod, T. Jena, G.K. Podagatlapalli, V.R. SOMA, " Plasmon-enhanced ultrafast and tunable thermo-optic nonlinear optical properties of femtosecond laser ablated TiO₂ and Silver-doped ", *Applied Surface Science*, **569** (2021) 151070.
- [5] L.-H. Guo, Y.-W. Wang, Y.-Q. Jiang, S. Xiao, J. He, "Dependence of Nonlinear Optical Response of Anatase TiO₂ on Shape and Excitation Intensity", *Chinese Physics Letters*, **34** (2017) 77803.
- [6] S. Saalimraj, K.C. Ajithprasad, "Effect of Calcination Temperature on Non-linear Absorption Co-efficient of Nano Sized Titanium Dioxide (TiO₂) Synthesised by Sol-Gel Method", *Materialstoday proceedings*, **4** (2017) 4372-4379.