

ساخت و مشخصه‌یابی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم آلائیده شده با اتم‌های سریم با روش تخلیه الکتریکی

اعظم جعفری^۱، سیامک خادمی^۱، مجید فرهمندجو^{۲*}، احمد درودی^۱ و رضا رسولی^۱

۱. دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، دانشگاه زنجان

۲. دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی ورامین

(دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۵/۱۲ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۸/۲/۲۹)

چکیده- نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (TiO_2) به‌عنوان یک ماده فوتوکاتالیست پرکاربرد شناخته شده است. برای بهبود کارایی این نانوذرات باید بازترکیب زوج الکترون-حفره کاهش داده و همچنین میزان جذب به ناحیه مرئی گسترش داده شود. یک روش برای افزایش کارایی این نانوذرات، آلائیدن آنها با عناصر گروه لاتانیدها مانند سریم است. در تحقیق پیش رو نانوذرات TiO_2 خالص و آلائیده شده با سریم از روش تخلیه الکتریکی ساخته شدند. تاثیر سریم بر خواص ساختاری، مورفولوژیکی و اپتیکی آنها با آنالیزهای پراش پرتو X (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM)، طیف بازتاب پخشی (DRS) و فتولومینسانس (PL) مورد بررسی قرار گرفت. مطالعه ساختاری پراش پرتوایکس نشان داد که اندازه نانوذرات TiO_2 با وجود Ce ، تا $27/7$ نانومتر کاهش می‌یابد. مورفولوژی سطح نانوذرات نشان داد که یکنواختی نانوذرات در نمونه با ناخالصی سریم کاهش می‌یابد. نتایج طیف بازتابش پخشی نشان داد که گاف نواری با وجود سریم تا $2/24$ الکترون‌ولت کاهش می‌یابد. نتایج آنالیز فتولومینسانس نشان داد که برای نمونه ناخالص، شدت فتولومینسانس کاسته می‌شود که این باعث کاهش بازترکیب زوج الکترون-حفره و افزایش فعالیت فتوکاتالیستی در نانوذرات می‌شود.

واژه‌های کلیدی: دی‌اکسید تیتانیوم، نانوکریستال، تخلیه الکتریکی، آلائیده سریم.

Preparation and Characterization of Cerium Doped Titanium Dioxide Nanoparticles by the Electrical Discharge Method

A. Jafari¹, S. Khademi¹, M. Farahmandjou^{2*}, A. Darudi¹ and R. Rasuli¹

1. Department of Physics, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

2. Departments of Physics, Islamic Azad University, Varamin Pishva Branch, Varamin, Iran.

Abstract: Titanium dioxide nanoparticles (TiO_2) are known as a widely used photocatalyst. In order to improve the performance of these nanoparticles, the recombination of the electron-cavity pair must be reduced and the absorption rate of the visible region should be expanded. One way to increase the performance of these nanoparticles is using cerium doped TiO_2 . In

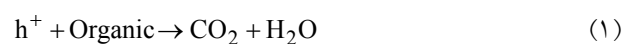
*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: majidfarahmandjou@gmail.com

the present study, pure and doped titanium dioxide nanoparticles were made by the electrical discharge method. The effect of cerium dopants on the structural, morphological and optical properties were studied by x-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (FESEM), diffused reflection spectroscopy (DRS), photoluminescence (PL) and infrared fourier transform (FTIR) spectroscopy analyses. XRD analysis revealed that the size of TiO₂ nanocrystals was decreased to 7.7 nm. The FESEM morphology of the samples also showed that the uniformity of the Ce doped TiO₂ was decreased. Further, the DRS results indicated that the band gap energy of Ce-TiO₂ was decreased to 2.24 eV. The photoluminescence results demonstrated that the intensity of PL was reduced for the Ce-TiO₂ sample, which reduced the recombination of the electron-hole coupling and increased the photocatalytic activity in the doped sample.

Keywords: Titanium dioxide, Nanocrystal, Electrical discharge method, Cerium dopant.

۱- مقدمه

تغییر بین دو اکسید CeO₂ و Ce₂O₃ دارد و دیگر اینکه جاهای خالی اکسیژن ناپایدار با تحرک به نسبت بالا در مقایسه با انواع اکسیژن بالک به آسانی تشکیل می شود. علاوه بر این ساختار اوربیتالی متفاوت Ce³⁺ به صورت 4f¹ 5d⁰ و Ce⁴⁺ به صورت 4f⁰ 5d⁰ به خواص نوری متفاوت منجر می شود [۲۳]. این خواص باعث شده است که TiO₂ آلاییده با Ce نسبت به TiO₂ خالص از نظر عملکرد فوتوکاتالیستی بیشتر مورد استفاده قرار گیرد [۲۴]. فرایند فوتوکاتالیستی پروسه فعال شدن کاتالیست با استفاده از نور است که به دلیل اینکه از نور خورشید استفاده می کند و کاربردهای فراوانی نیز دارد بسیار مورد توجه است. وقتی فوتونی با انرژی بزرگ تری از گاف انرژی یک نیم رسانا به آن می تابد، الکترون برانگیخته شده و از نوار ظرفیت به نوار رسانش می رود و یک حفره به جای می گذارد و در نتیجه رابطه (۱)، این حفره موجب اکسید شدن مولکول ارگانیک می شود. همچنین اگر اکسیژن در محیط باشد، مطابق رابطه (۲)، الکترون هم احیا می شود:



برای بهبود عملکرد خواص فوتوکاتالیستی باید سه عامل مورد توجه قرار گیرد. اول باز ترکیب الکترون و حفره باید به حداقل مقدار خود برسد، دوم اینکه الکترون و حفره ها سریعا به سطح انتقال داده شوند و در نهایت از آنجا که کاتالیست های حاضر فقط می توانند تحت نور فرابنفش فعال شوند، باید عملکرد فوتوکاتالیستی را به منطقه مرئی گسترش داد [۲۳]. در این تحقیق، ابتدا نانوذرات TiO₂ با روش جدید تخلیه الکتریکی

در سال های اخیر، ساخت نانومواد اکسید فلزی و نیم رساناها توجه زیادی را در زمینه های پزشکی و مهندسی به خود جلب کرده اند [۸-۱]. از جمله آنها، نانوذرات TiO₂ است که خواص فوق العاده ای شامل پایداری شیمیایی، استحکام مکانیکی، فعالیت های تحت نور، سازگاری با محیط زیست و قیمت ارزان دارد، به همین دلیل در سلول های خورشیدی، تکنولوژی های پوشش دهی، قطعات الکتریکی و کاتالیست ها از انواع نانوساختارهای TiO₂ بسیار استفاده می شود. از نظر ساختاری، TiO₂ در سه فاز آناتاز (تتراگونال)، روتایل (مکعبی) و بروکیت (ارتورمبیک) وجود دارد و دارای گاف انرژی ۳/۲ الکترون ولت در فاز آناتاز است [۹ و ۱۰]. به تازگی نانوذرات TiO₂ با روش های شیمیایی ساخته شدند [۱۱-۱۳]. تلاش های فراوانی برای افزایش خواص این نانوساختارها صورت گرفته است، که از جمله آنها می توان به ترکیب با بقیه نیمه هادی های فلزات واسطه مانند WO₃، SiO₂، SnO₂، ZnO، Fe₂O₃، CuO، CeO₂، Al₂O₃ و ZrO₂ اشاره کرد [۲۴-۱۴]. با وارد شدن Ce درون شبکه TiO₂، به دلیل ایجاد نوار آلاینده پایین نوار رسانش، گاف نوار انرژی کاهش می یابد [۲۴]. همچنین برخی مطالعات نشان می دهند که فعالیت فوتوکاتالیستی کاتالیست های TiO₂، به شدت به دو فاکتور جذب و میزان جدایش زوج الکترون و حفره ها وابسته است. از طرفی، فعالیت فوتوکاتالیستی به طور قابل ملاحظه ای به وسیله آلاییدن اکسید/ یون لانتانیدها، که اوربیتال الکترونی 4f دارند، افزایش می یابد. از میان این اکسیدها، اکسید سریم به دلیل دو ویژگی بیشتر مورد توجه قرار دارد. یکی اینکه، سریم توانایی تولید زوج اکسیداسیون و احیای Ce³⁺/Ce⁴⁺ با

اسپکترومتر Avaspec 2048 TEC که تولید شرکت Avantes هلند است در طول موج تحریک ۲۷۹ نانومتر استفاده شد. همچنین برای بررسی ساختار میکروسکوپی و یکنواختی نانوذرات از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی^۴ (FESEM) با دستگاه MIRA3 شرکت TE-SCAN استفاده شده است.

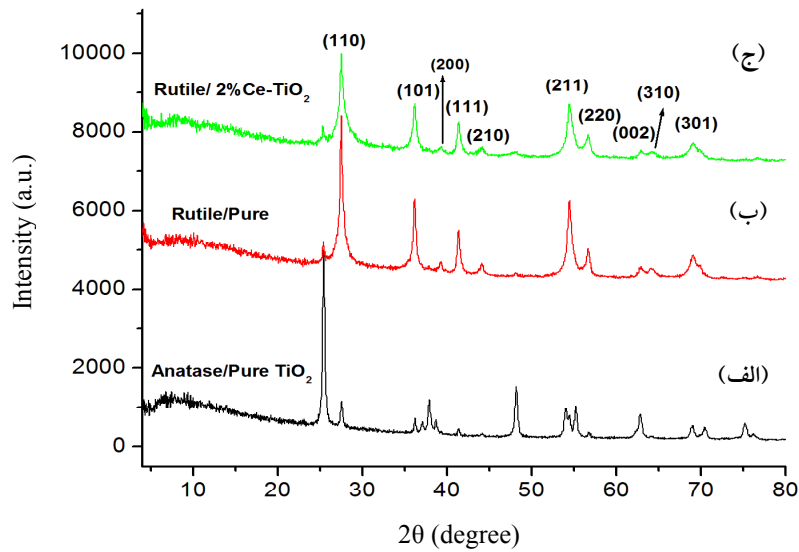
۳- نتایج و بحث

شکل (۱)، نتایج آزمون پراش پرتو ایکس برای نمونه خالص و نمونه حاوی Ce را نشان می‌دهد. نمونه‌ها در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت چهار ساعت گرمادهی شدند. طیف (الف) طیف پراش پرتو ایکس نمونه TiO_2 خالص تهیه شده با روش سل ژل [۲۳ و ۲۴]، که قبلاً توسط گروه نویسندگان مقاله ساخته شده‌اند و طیف (ب) نمونه TiO_2 خالص تهیه شده با روش قوس الکتریکی و طیف (ج) نمونه TiO_2 به همراه سریم تهیه شده با روش قوس الکتریکی را نشان می‌دهد. از طیف (ج) مشخص است که قله‌های به وجود آمده مربوط به بازتاب‌های (۱۱۰)، (۱۰۱)، (۲۰۰)، (۱۱۱)، (۲۱۰)، (۲۱۱)، (۲۲۰)، (۰۰۲)، (۳۱۰) و (۳۰۱) پرتو ایکس نمونه است که نشانگر فاز روتایل در ساختار تتراگونال TiO_2 هستند. مشاهده می‌شود با افزودن سریم ساختار بدون تغییر است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزودن سریم از شدت قله‌ها کاسته می‌شود که نشان‌دهنده کاهش اندازه نانوذرات با وجود آلایند سریم است. هیچ اثری از قله‌های Ce در طیف پرتو ایکس دیده نمی‌شود که این حاکی از نفوذ یون‌های Ce در ماتریس TiO_2 به صورت بین صفحه‌ای و حل‌شدگی اتم‌های سریم درون ساختار TiO_2 است. اندازه نانوذرات با استفاده از رابطه شرر [۲۵]، برای نمونه خالص برابر با ۴۹ نانومتر و برای نمونه همراه با آلایند Ce تا ۲۷/۵ نانومتر کاهش می‌یابد. دلیل کاهش اندازه ذرات با افزایش آلایند Ce، این است که چون شعاع یونی Ce^{+3} (۱/۰۳) آنگستروم) از شعاع یونی Ti^{+4} (۰/۶۸ آنگستروم) بیشتر است، جایگزینی یون‌های Ce در ماتریس Ti با

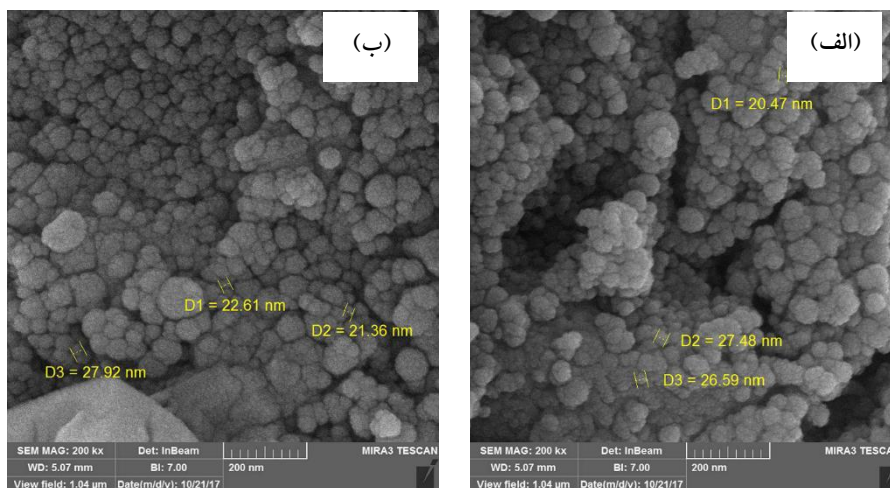
ساخته شدند و سپس خواص کریستالی، مورفولوژیکی و اپتیکی با استفاده از افزودن سریم بر نانوذرات TiO_2 مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش برای سنتز نانوذرات TiO_2 خالص و نانوذرات TiO_2 آلاییده شده با سریم از روش تخلیه الکتریکی استفاده شد. مجموعه آزمایش شامل دو بخش اصلی است، منبع تغذیه DC با جریان بالا و یک راکتور شامل آند و کاتد که در محیط آب دیونیزه قرار گرفته‌اند و آند به سمت کاتد حرکت می‌کند. جریان اعمال شده بین دو الکترود تیتانیوم ۱۰ آمپر اعمال شد و ولتاژ تا حدودی کاهش یافت تا در طول تشکیل قوس، جریان به مقدار مورد نظر ثابت شود. در این آزمایش ابتدا الکترودهای TiO_2 را در راکتور حاوی ۳۰۰ میلی‌لیتر آب خالص قرار دادند. با حرکت دادن آند به سمت کاتد و با ایجاد قوس الکتریکی بین الکترودها، یون‌های Ti از آند جدا شده و سپس در آب به صورت نانوذرات TiO_2 تشکیل شدند. در این مرحله پس از خالص‌سازی و خشک کردن آنها در آون، نانوذرات برای کریستاله شدن در کوره با دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت چهار ساعت قرار داده شدند. برای آماده‌سازی نمونه حاوی سریم، از روش فوق استفاده شد، با این تفاوت که ۰/۰۱ گرم پیش‌ماده $CeNO_3$ به آب خالص به همراه الکترودهای TiO_2 اضافه شد و آزمایش مشابه قبل انجام گرفت. برای مطالعه نمونه‌ها، خواص ساختاری، اپتیکی و مورفولوژیکی نانوذرات مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. الگوهای پراش پرتو ایکس^۱ (XRD) با استفاده از یک دستگاه XRD مدل X'Pert PRO MPD PANalytical Compan ساخت کشور هلند، با تابش $K\alpha$ مس ثبت شد. اندازه‌گیری طیف بازتاب/ عبور پخش^۲ (DRS) منتشر شده توسط دستگاه اندازه‌گیری اسپکترومتر^۳ Avantes مدل Avaspec-2048-TEC با AvaLamp DH-S Setup انجام شد. برای اندازه‌گیری طیف فتولومینسانس (PL) ماده از یک دستگاه طیف‌سنجی



شکل ۱- الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های مختلف

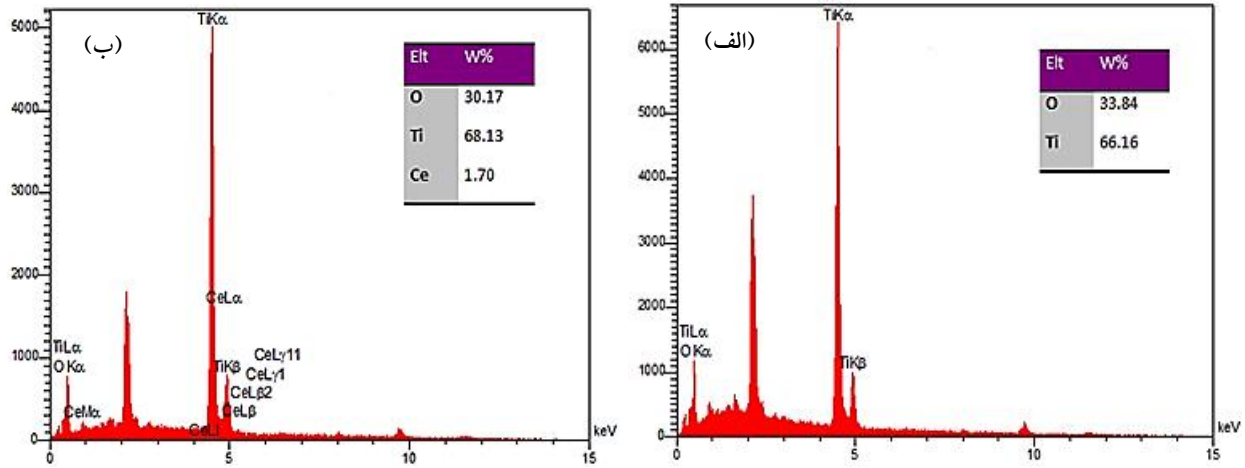


شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی انتشار میدانی، (الف) نانوذرات TiO_2 خالص و (ب) نمونه آلاینده شده با سریم

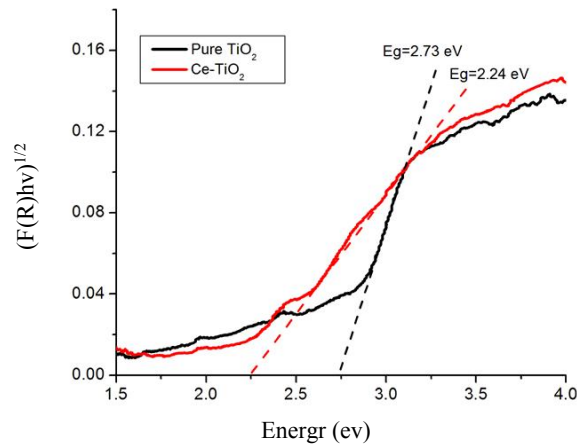
ساختارهای بلوری متفاوت TiO_2 موثرند (مقایسه طیف‌های الف و ب).

شکل (۲)، مورفولوژی سطح میکروسکوپ الکترونی روبشی انتشار میدانی نانوذرات خالص TiO_2 (الف) و ناخالص (ب) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این شکل مشخص است با افزودن آلاینده سریم از یکنواختی نانوذرات به‌واسطه کاهش اندازه نانوذرات، کاسته می‌شود. درحقیقت با کاهش اندازه، نیروهای بین اتمی و مولکولی افزایش می‌یابد و نیروی جاذبه قوی باعث

مشکل مواجه می‌شود و تعداد کمی از یون‌های آلاینده Ce می‌توانند از طریف اعوجاج در شبکه TiO_2 نفوذ کنند و بیشتر آنها در سطح نانوذرات پراکنده شده و مرزدهانه‌هایی تشکیل می‌دهند که باعث جدایی نانوذرات و مانع از رشد آنها می‌شوند. دلیل دیگر آن ممکن است به‌خاطر تغییر پتانسیل زتا در نتیجه افزایش بار ناشی از یون‌های Ce و به‌وجود آمدن نیروی دافعه بین نانوذرات و در نتیجه جلوگیری از رشد آنها باشد [۲۴]. نتایج به‌دست آمده نشان دادند که روش ساخت، در ایجاد



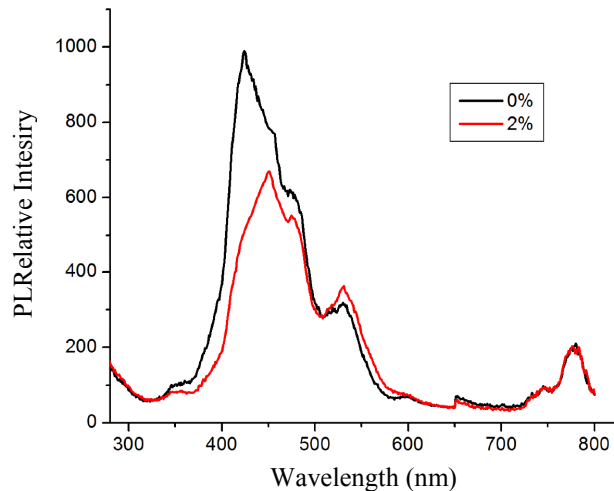
شکل ۳- طیف پراش انرژی نمونه‌ها (EDS) برای نمونه: الف) خالص و ب) ناخالص



شکل ۴- منحنی تائوک $(F(R)hv)^{1/2}$ برحسب انرژی فوتون $E(h\nu)$ نمونه‌ها

به منظور محاسبه گاف نواری نمونه‌ها، منحنی تائوک $(F(R)hv)^{1/2}$ برحسب انرژی فوتون $E(h\nu)$ رسم شد، (شکل ۴). بیشترین شیب خط مماس بر منحنی و محل تلاقی آن با محور انرژی، میزان گاف نواری در نمونه را به دست می‌دهد [۲۳]. نتایج نشان می‌دهند که در نمونه حاوی سریم نسبت به نمونه خالص TiO_2 ، گاف نواری انرژی کاهش می‌یابد که حاکی از انتقال فرمز در نمونه است و مقدار آن از $2/73$ الکترون‌ولت برای نمونه خالص به $2/24$ الکترون‌ولت برای نمونه ناخالص کاهش می‌یابد. درحقیقت نقص شبکه و تغییر در پارامترهای شبکه در اندازه گاف انرژی مؤثر است. همچنین پژوهشگران

می‌شود تا نانوذرات تمایل بیشتری به نزدیک شدن به هم داشته باشند و این منجر به کلوخه‌ای شدن آنها می‌شود [۲۹-۲۶]. به منظور تعیین درصد عنصری نمونه، طیف‌سنجی انرژی پرتو ایکس^۵ (EDX) انجام شد. در هر دو نمونه خالص و ناخالص جز عناصر Ti ، O و Ce اتم دیگری در نمونه وجود ندارد که حاکی از خلوص نمونه است. شکل (۳)، طیف EDX نمونه‌ها را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که با وجود سریم در نمونه، درصد وزنی O از $33/84$ درصد تا $30/17$ درصد کاهش می‌یابد، که حاکی از جایگزینی مناسب و نفوذ یون‌های آلانده Ce^{3+} در تهی‌جاها شبکه TiO_2 در این مقدار آلانده است.



شکل ۵- طیف فتولومینسانس (PL) نمونه‌ها با طول موج تحریک ۳۴۰ نانومتر

شود. قله‌های نشری در طول موج‌های ۳۴۹، ۴۲۴، ۴۷۳ و ۵۳۰ نانومتر که به ترتیب متناظر با انرژی‌های ۳/۵۵، ۲/۹۲، ۲/۶۲ و ۲/۳۳ الکترون‌ولت هستند در نمونه‌ها ایجاد می‌شوند که ناشی از نقایص شبکه به واسطه تهی‌جای به وجود آمده از سایت‌های اکسیژن پایین نوار رسانش و جایگزینی Ce^{3+} در آنها هستند [۳۰].

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نانوذرات TiO_2 خالص و آلاینده شده با سریم، با موفقیت با روش تخلیه الکتریکی ساخته شدند. با استفاده از آزمون پراش پرتو ایکس فاز نمونه‌ها روتایل تشخیص داده شد و مشخص شد که با افزودن سریم اندازه نانوذرات از ۴۹ نانومتر به مقدار ۲۷/۷ نانومتر کاهش می‌یابد. همچنین تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی انتشار میدانی نشان داد که یکنواختی نانوذرات در اثر افزودن Ce ، به دلیل کاهش اندازه نانوذرات، کاهش می‌یابد. با استفاده از طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس خلوص نمونه‌ها تأیید شد و مشخص شد که یون-های سریم به خوبی در شبکه TiO_2 نفوذ کرده‌اند. همچنین مقدار گاف انرژی با استفاده از آنالیز طیف بازتاب پخشی و رابطه تائوک محاسبه شد و مشخص شد که با افزایش سریم مقدار گاف انرژی نانوذرات TiO_2 از ۲/۷۳ به ۲/۲۴ الکترون‌ولت

گزارش کرده‌اند که کاهش گاف نواری در نتیجه تبادل $sp-d$ بین الکترون‌های نواری در TiO_2 و الکترون‌های d نوار آلاینده Ce^{3+} است [۲۴].

برای تعیین میزان بازترکیب در نمونه و رفتار زوج الکترون-حفره از آنالیز فتولومینسانس (PL) استفاده شد. شکل (۵)، طیف فتولومینسانس بر حسب طول موج برای نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است، با افزودن Ce شدت فتولومینسانس کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهش بازترکیب زوج الکترون-حفره‌های القایی و در نتیجه افزایش خاصیت فتوکاتالیستی است. در واقع با افزودن Ce ، یک نوار آلاینده در پایین نوار رسانش TiO_2 خالص ایجاد می‌شود که از بازترکیب مجدد $e-h$ جلوگیری کرده و باعث جداسازی الکترون و حفره می‌شود. این نوار آلاینده Ce^{3+} از به دام افتادن حفره‌ها توسط نوار Ti^{4+} در نوار رسانش جلوگیری می‌کند و این عمل باعث کاهش شدت PL و در نتیجه کاهش گاف نواری می‌شود. درحقیقت انرژی نواری $4f$ مربوط به Ce حدود ۲-۳ الکترون‌ولت است که نزدیک نوار انرژی حاصل از نقایص شبکه ایجاد شده به واسطه اکسیژن (حدود ۲/۸۸ الکترون‌ولت) است. این دو نوار انرژی با هم هیبرید شده و تشکیل یک نوار آلاینده در پایین نوار رسانش می‌دهند که باعث کاهش گاف نواری می‌شود؛ بنابراین امکان جذب در ناحیه مرئی فراهم می‌

حفره استفاده شد و مشخص شد که مقدار بازترکیب پس از افزودن Ce کاهش یافته است که به نوبه خود، عامل مؤثری در افزایش خاصیت فوتوکاتالیستی نمونه‌هاست.

کاهش یافته است که این کاهش گاف انرژی، گسترش جذب فوتوکاتالیستی به ناحیه مرئی را تأیید می‌کند. از آنالیز فتولومینسانس برای بررسی میزان بازترکیب زوج الکترون-

واژه‌نامه

1. X- ray diffraction
2. Diffuse Reflection Spectroscopy
3. spectrometer

4. Field Emission Scanning Electron Microscopy
5. Energy Dispersive X-ray Spectroscopy

مراجع

1. Shadrokh, S., Farahmandjou, M., and Firoozabadi, T. P., "Fabrication and Characterization of Nanoporous Co Oxide (Co₃O₄) Prepared by Simple Sol-Gel Synthesis", *Physical Chemistry Research*, Vol. 4, pp. 153-160, 2016.
2. Farahmandjou, M., Honarbakhsha, S., and Behrouziniab, S., "PVP-Assisted Synthesis of Cobalt Ferrite (CoFe₂O₄) Nanorods", *Physical Chemistry Research*, Vol. 4, pp. 655-662, 2016.
3. Dastpak, M., Farahmandjou, M., and Firoozabadi, T. P., "Synthesis and Preparation of Magnetic Fe-Doped CeO₂ Nanoparticles Prepared by Simple Sol-Gel Method", *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, Vol. 29, pp. 2925-2929, 2016.
4. Farahmandjou, M., and Soflaee, F., "Polymer-Mediated Synthesis of Iron Oxide (Fe₂O₃) Nanorods", *Chinese Journal of Physics*, Vol. 53, pp. 080801-9, 2015.
5. Jurablu, S., Farahmandjou, M., and Firoozabadi, T. P., "Multiple-Layered Structure of Obelisk-Shaped Crystalline Nano-ZnO Prepared by Sol-Gel Route", *Journal of Theoretical and Applied Physics*, Vol. 9, pp. 261-266, 2015.
6. Farahmandjou, M., and Soflaee, F., "Synthesis and Characterization of α -Fe₂O₃ Nanoparticles by Simple Co-precipitation Method", *Physical Chemistry Research*, Vol. 3, pp. 193-198, 2015.
7. Zarinkamar, M., Farahmandjou, M., and Firoozabadi, T. P., "Diethylene Glycol-Mediated Synthesis of Nano-Sized Ceria (CeO₂) Catalyst", *Journal of Nanostructures*, Vol. 6, pp. 114-118, 2016.
8. Sebt, S. A., Parhizgar, S. S., Farahmandjou, M., Aberomand, P., and Akhavan, M., "The Role of Ligands in the Synthesis of FePt Nanoparticles", *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, Vol. 22, pp. 849-854, 2009.
9. Ramazani, M., Farahmandjou, M., and Firoozabadi, T. P., "Fabrication and Characterization of Rutile TiO₂ Nanocrystals by Water Soluble Precursor", *Physical Chemistry Research*, Vol. 3, pp. 293-298, 2015.
10. Farahmandjou, M., and Khalili, P., "Morphology Study of Anatase Nano-TiO₂ for Self-Cleaning Coating", *International Journal of Fundamental Physical Sciences*, Vol. 3, pp. 54-56, 2013.
11. Ramazani, M., Farahmandjou, M., and Firoozabadi, T. P., "Effect of Nitric Acid on Particle Morphology of the Nano-TiO₂", *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 11, pp. 115-122, 2015.
12. Farahmandjou, M., and Khalili, P., "Study of Nano SiO₂/TiO₂ Superhydrophobic Self-Cleaning Surface Produced by Sol-Gel", *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol. 7, pp. 462-465, 2013.
13. Farahmandjou, M., "Self-Cleaning Measurement of Nano-Sized Photoactive TiO₂", *Journal of Computer & Robotics*, Vol. 5, pp. 15-19, 2014.
14. Khoshnevisan, B., Marami, M. B., and Farahmandjou, M., "Fe³⁺-Doped Anatase TiO₂ Study Prepared by New Sol-Gel Precursors", *Chinese Physics Letter*, Vol. 35, pp. 027501-5, 2018.
15. Marami, M. B., Farahmandjou, M., and Khoshnevisan, B., "Sol-Gel Synthesis of Fe-doped TiO₂ Nanocrystals" *Journal of Electronic Materials*, Vol. 47, pp. 3741-3749, 2018.
16. Farahmandjou, M., "Synthesis of ITO Nanoparticles Prepared by Degradation of Sulfide Method", *Chinese Physics Letters*, Vol. 29, pp. 077306-9, 2012.
17. Farahmandjou, M., "Synthesis and Structural Study of L1₀- FePt Nanoparticles", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, Vol. 34, pp. 265-270, 2010.
18. Farahmandjou, M., Honarbakhsh, S., and Behrouziniab, S., "FeCo Nanorods Preparation using New Chemical Synthesis", *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, Vol. 31, pp. 4147-4152, 2018.
19. Farahmandjou, M., "The Study of Electro-Optical Properties of Nanocomposite ITO Thin Films Prepared by E-Beam Evaporation", *Revista Mexicana De Física*, Vol. 59, pp. 205-207, 2013.

20. Farahmandjou, M., Motaghi, S., "Sol-Gel Synthesis of Ce-Doped α -Al₂O₃: Study of Crystal and Optoelectronic Properties", *Optics Communications*, Vol. 441, pp. 1-7, 2019.
21. Zarinkamar, M., Farahmandjou, M., and Firoozabadi, T. P., "One-Step Synthesis of Ceria (CeO₂) Nanospheres by a Simple Wet Chemical Method", *Journal of Ceramic Processing Research*, Vol. 17, pp. 166-169, 2016.
22. Farahmandjou, M., and Golabiyan, N., "New Pore Structure of Nano-Alumina (Al₂O₃) Prepared by Sol-Gel Method", *Journal of Ceramic Processing Research*, Vol. 16, pp. 237-240, 2015.
23. Jafari, A., Khademi, S., and Farahmandjou, M., "Nano-Crystalline Ce-Doped TiO₂ Powders: Sol-Gel Synthesis and Optoelectronic Properties", *Materials Research Express*, Vol. 5, pp. 095008-18, 2018.
24. Jafari, A., Khademi, S., Farahmandjou, Darudi, A., and Rasuli, R., "Structural and Optical Properties of Ce³⁺-doped TiO₂ Nanocrystals Prepared by Sol-Gel Precursors", *Journal of Electronic Materials*, Vol. 47, pp. 6901-6908, 2018.
25. Scherrer, P., "Göttinger Nachrichten Gesell", *Mathematisch-Physikalische Klasse*, Vol. 2 pp. 98-100, 1918.
26. Farahmandjou, M., "Effect of Oleic Acid and Oleylamine Surfactants on the Size of FePt Nanoparticles", *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, Vol. 25, pp. 2075-2079, 2012.
27. Akhtari, F., Zorriasatein, S., Farahmandjou, M., and Elahi, S. M., "Structural, Optical, Thermoelectrical, and Magnetic Study of Zn_{1-x}Co_xO (0 ≤ x ≤ 0.10) Nanocrystals", *International Journal of Applied Ceramic Technology*, Vol. 15, pp. 723-733, 2018.
28. Akhtari, F., Zorriasatein, S., Farahmandjou, M., and Elahi, S. M., "Synthesis and Optical Properties of Co²⁺-doped ZnO Network Prepared by New Precursors", *Material Research Express*, Vol. 5, pp. 065015-24, 2018.
29. Khodadadi, A., Farahmandjou, M., Yaghoubi, M., and Amani, A. R., "Structural and Optical Study of Fe³⁺-Doped Al₂O₃ Nanocrystals Prepared by New Sol-Gel Precursors", *International Journal of Applied Ceramic Technology*, Vol. 16, pp. 718-726, 2019.
30. Zarinkamar, M., Farahmandjou, M., and Firoozabadi, T. P., "Diethylene Glycol-Mediated Synthesis of Nano-Sized Ceria (CeO₂) Catalyst", *Journal of Nanostructures*, Vol. 6, pp. 116-120, 2016.