بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

بررسی اثر pH بر خواص ساختاری و اپتیکی نانوذارت TiO_2 به منظور بکارگیری در سلول خورشیدی رنگدانه‌ای

مرتضی عاصمی، سعیده ملکی و مجید قناعت‌شعار

آزمایشگاه نانومغناطیس و نیمرساناهای مغناطیسی، پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، اوین، تهران

چکیده - در این مقاله نانوذرات TiO_2 به روش سل-ژل تهیه می‌شوند. در این راستا، اثر pH محلول اولیه بر خواص ساختاری و اپتیکی و همچنین اندازه ذرات مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهند که $pH < 3$ ساختار آناتاز را بدست می‌دهد که در سلول خورشیدی رنگدانه‌ای مورد توجه است. همچنین، $pH = 2$، کوچکترین اندازه‌ی ذرات را نتیجه می‌دهد که جهت بکارگیری در سلول خورشیدی رنگدانه‌ای مناسب‌تر خواهد بود. گاف انرژی نانوذرات تهیه شده با $pH = 2$، در حدود eV ۳/۹۵ است.

کلید واژه- نانوذرات TiO_2، سل-ژل، pH، گاف انرژی.

Influence of the pH on structural and optical properties of TiO_2 nanoparticles: applicable in dye sensitized solar cells

Morteza Asemi, Saeedeh Maleki and Majid Ghanaatshoar

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, G.C., Evin, 1983963113, Tehran, Iran

Abstract- In this paper, TiO_2 nanoparticles are prepared by sol gel method and the effect of initial solution pH on the structural and optical properties as well as particle size is investigated. Results show that pH<3 leads to anatase structure which is highly desirable in dye sensitized solar cells. In addition, for pH=2 we get the smallest particle size that is more suitable for dye solar cell applications. The obtained optical band gap energy for these nanoparticles is about 3.95 eV.

Keyword- TiO_2 nanoparticles, sol gel, pH, band gap.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]

۱- مقدمه

دی اکسید تیتانیوم از نیم‌رساناهای اکسیدی شفاف با گاف انرژی پهن است که به دلیل فعالیت فوتوکاتالیستی و پایداری شیمیایی بالا، سمی نبودن و هزینه‌ی نسبتاً پایین ساخت برای بکارگیری در فوتوکاتالسیت‌ها، سلول‌های خورشیدی، حسگرهای گازی و دستگاه‌های الکترونیک نوری، توجهات زیادی را به خود جلب کرده است[۲،۱]. TiO_2 دارای سه ساختار بلوری آناتاز (هگزاگونال)، روتایل (هگزاگونال) و بروکیت (اورتورومبیک) است. فاز آناتاز به آسانی و تحت عملیات حرارتی به فاز روتایل پایدار تبدیل می‌شود [۳]. TiO_2 در حالت حجمی دارای گاف انرژی ۳ (فاز روتایل) و ۳/۲ eV (فاز آناتاز) است [۴] و با کوچکتر شدن اندازه ذرات آن، گاف اپتیکی این ماده به دلیل وجود اثرات اندازه کوانتومی بزرگتر هم می‌شود. خواص فیزیکی و شیمیایی TiO_2 به روش‌های ساخت وابسته است.

روش‌های مختلفی برای ساخت نانوذرات TiO_2 مطرح شده است که روش سل-ژل به دلیل خلوص بالا، یکنواختی خوب نانوساختارها، سنتز در دمای پایین و شرایط قابل کنترل واکنش مورد توجه است [۵]. اندازه نانوذرات TiO_2 در روش سل-ژل را می‌توان با پارامترهای مختلفی نظیر غلظت پیش ماده و pH کنترل کرد [۶]. کنترل اندازه ذرات در ساخت سلول خورشیدی حساس شده به رنگ، از اهمیت بالایی برخوردار است که با فراهم آوردن شرایط مناسب نظیر افزایش سطح مقطع موٴثر برای جذب مولکول‌های رنگ، بازدهی سلول را افزایش می‌دهد.

در این مقاله از روش شیمیایی سل-ژل برای تولید نانوذرات TiO_2 استفاده می‌کنیم. بدست آوردن ساختار آناتاز با اندازه ذرات کوچک‌تر برای بکارگیری در سلول خورشیدی حساس شده به رنگ، از اهداف این کار است. برای رسیدن به اهداف مذکور برای کاربرد مطرح شده، اثر pH در محلول را مورد بررسی قرار می‌دهیم تا بتوانیم به شرایط بهینه دست پیدا کنیم.

۲- روش ساخت

ترکیبات تیتانیوم تترااِیزوپروپکسید (TTIP)، اسید استیک و آب مقطر برای تهیه‌ی نانوذرات TiO_2 استفاده شد. از هیدروکسید پتاسیم (KOH) برای کنترل pH محلول ساخته شده استفاده کردیم. ترکیبات فوق با نسبت مولی مناسب در همزن مغناطیسی به مدت یک ساعت هم زده شد تا محلول یکنواختی بدست بیاید. بعد از ۲۴ ساعت نگهداری در دمای اتاق، محلول بدست آمده به مدت ۴ ساعت در دمای $^{\circ}C$ ۷۰ قرار گرفت تا ژل سفید رنگی تشکیل شود. ژل بدست آمده در دمای $^{\circ}C$۱۰۰ خشک و سپس به داخل آسیاب منتقل گردید. ذرات خرد شده در داخل کوره هوا تحت فرآیند عملیات حرارتی در دمای $^{\circ}C$۵۰۰ قرار گرفتند تا ساختار مورد نظر بدست آید. ساختار و اندازه ذرات سنتز شده به ترتیب با طیف پراش اشعه‌ی X (XRD) و تحلیل اندازه‌ی ذرات[1] (PSA) و خواص اپتیکی این نانوذرات با طیف سنج UV-VIS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

۳- بحث و نتایج

آماده سازی نانوذرات TiO_2 به طور موثر از طریق هیدرولیز و تراکم آلکوکسیدهای تیتانیوم در محیط آبی انجام می‌شود. در حضور مولکول‌های آب، فرآیند هیدرولیز و پس از آن بسپارش اتفاق می‌افتد. در زیر واکنش‌های درگیر در فرآیند سل-ژل به اختصار آورده شده‌اند:

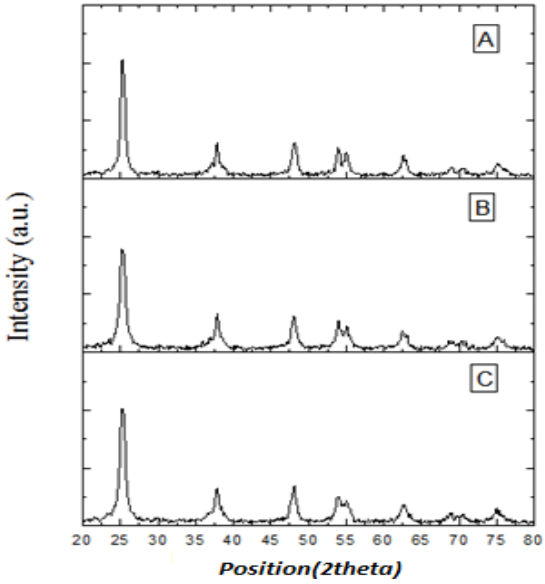
(۱) هیدرولیز $Ti(OR)_4 + 4H_2O \rightarrow Ti(OH)_4 + 4ROH$

(۲) تراکم $Ti(OH)_4 \rightarrow TiO_2 \cdot H_2O + (2-x)H_2O$

که R متیل، ایزوپروپیل و یا n-بوتیل است [۷]. چون کاتیون‌های ۴ ظرفیتی بیش از حد اسیدی هستند هسته-زایی هیدروکسید $Ti(OH)_4$ پایدار، نمی‌تواند اتفاق بیفتد. مولکول‌های آب شکل گرفته طبق واکنش (۲) همیشه بار مثبت جزیی را دارند. بنابراین اولاسیون[2] و اگزولاسیون[3] می‌توانند به طور همزمان در طول هسته‌زایی و رشد ادامه داشته باشند که منجر به تشکیل اکسید آمورف $TiO_2.nH_2O$ می‌شوند [۸]. شماره‌ی n مولکول‌های آب وابسته به شرایط آزمایش است. بسته به شرایط آزمایش، رسوب TiO_2 منجر به فازهای آناتاز و روتایل می‌شود. مرحله‌ی دی‌اگزولاسیون[4] قبل از اولاسیون می‌تواند با تنظیم pH و غلظت آب کنترل شود. این کنترل منجر به

[1] Particle Size Analysis
[2] Olation
[3] Oxolation
[4] Deoxilation

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]



شکل ۱: الگوی XRD برای نانوذرات TiO_2 سنتز شده در pH مختلف: A) pH=۱، B) pH=۲ و C) pH=۳.

رسوب فاز آناتاز نانوذرات TiO_2 در طول آزمایش می‌شود [۸].

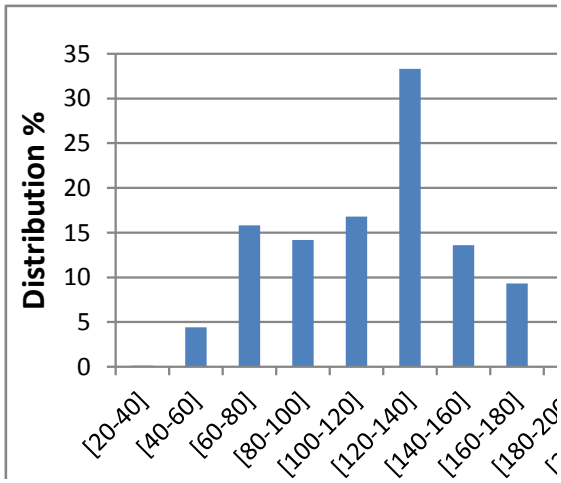
اثر pH بر اندازه بلورک‌های نانوذرات TiO_2، بعد از عملیات حرارتی مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱ الگوی پراش اشعه‌ی X نمونه‌های پودری TiO_2 تکلیس شده در دمای ۵۰۰ درجه‌ی سانتیگراد، در محدوده‌ی ۸۰-۲۰ درجه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱ می‌بینیم در زوایای ۲۵/۴، ۳۷/۸، ۴۸ و ۵۳/۹ درجه قله‌هایی در الگوی پراش گزارش شده است که با افزایش pH، پهنای قله‌ها افزایش و در نتیجه اندازه بلورک‌ها کاهش می‌یابد.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد در صورتی که pH محلول بالاتر از ۳ باشد، نانوذرات بی‌شکل و زمانی که pH زیر ۳ باشد فاز آناتاز تشکیل می‌شود. موارد مذکور به طور خلاصه در جدول (۱) نشان داده شده‌اند. اندازه‌ی بلورک‌ها با استفاده از معادله‌ی دبای-شرر تعیین می‌شود [۸]:

$$D = k\lambda/\beta\cos\theta \quad , \qquad (۳)$$

که در آن D اندازه بلورک برحسب nm، λ طول موج تابش بر حسب nm، θ زاویه‌ی براگ بر حسب درجه، β پهنای قله در نصف ارتفاع بیشینه (FWHM) بر حسب رادیان و k برابر با ۰/۸۹است. نتایج این محاسبات در جدول ۱ آمده است. بر اساس این نتایج با افزایش pH، اندازه‌ی بلورک‌ها افزایش می‌یابد.

در شکل۲، توزیع اندازه‌ی نانوذرات TiO_2 رسم شده است. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود، نانوذرات TiO_2 در pH=۲ ابعادی در حدود nm ۱۵۰-۲۷ دارند. در حالی‌که اندازه نانوذرات تهیه شده در pH ۱ و ۳ در محدوده ۵۳۳-۱۵۰ نانومتر توزیع شده است (از آوردن نمودار توزیع ذرات این دو مقدار بدلیل بزرگ بودن اندازه ذراتشان در این مقاله اجتناب و تنها به ذکر اندازه‌شان، اکتفا کرده‌ایم).



شکل۲: نمودارتوزیع اندازه‌ی نانوذرات TiO_2 در pH=۲.

برای بررسی میزان جذب و تعیین گاف انرژی نانوذرات TiO_2 تکلیس شده از دستگاه UV-VIS استفاده شده است. طیف جذبی نانو پودرهای TiO_2 سنتز شده در pH ۱، ۲ و۳ به ترتیب در شکل ۳ رسم شده‌اند. شکل ۳ به وضوح نشان می‌دهد که نانوذرات TiO_2 در طول موج ۲۸۲ نانومتر بیشترین جذب را دارند و pH=۲ نسبت به ۱ و ۳ از بیشترین جذب در این طول موج برخوردار است.

گاف انرژی اپتیکی، می‌تواند با استفاده از رابطه‌ی تاک محاسبه شود که بصورت [۹]:

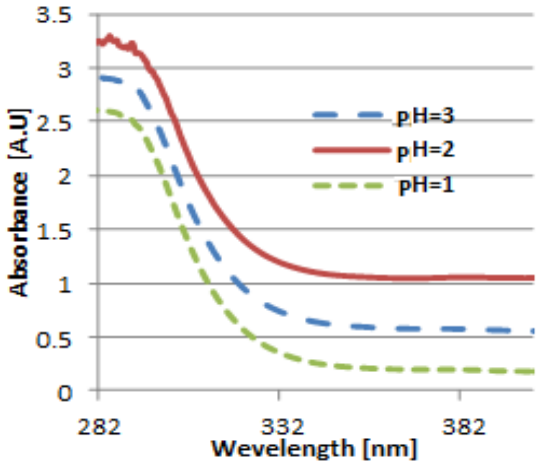
$$(\alpha h\upsilon)=B(h\upsilon-E_g)^n \cdot \qquad (۴)$$

است که در آن، α ضریب جذب، B ثابت جذب، hυ انرژی

جدول۱: اندازه‌ی بلورک‌ها و ساختار بلوری نانوذرات TiO_2 تکلیس شده در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد.

نمونه	FWHM (rad)	(hkl)	D (nm)
PH=1	0.413	(101)	16.1
	0.295	(004)	19.8
	0.472	(200)	19.6
PH=2	0.720	(101)	12.1
	0.432	(004)	13.6
	0.720	(200)	15.1
PH=3	0.590	(101)	3.2
	0.600	(400)	4.6
	0.470	(200)	8.5

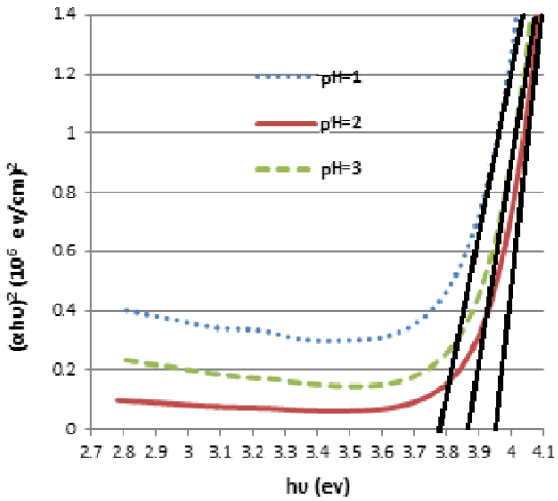
[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]



شکل۳: طیف جذبی نانوذرات TiO_2.

فوتون‌های فرودی، E_g گاف اپتیکی و n برای گذار مستقیم، ۰/۵ و برای گذار غیر مستقیم ۲ است. ضریب جذب α از طیف جذبی بدست می‌آید.

نمودار $(\alpha h\upsilon)^2$ بر حسب $(h\upsilon)$ برای نانوذرات TiO_2 در pH=۱،۲،۳ در شکل ۴ رسم شده است. مماس بر بخش خطی این نمودارها مقدار گاف انرژی اپتیکی نمونه‌ها را بدست می‌دهد. همان گونه که دیده می‌شود نانوذرات ساخته شده در pH=۱ گاف انرژی برابر ۳/۷۹ eV، در pH=۲ گاف انرژی ۳/۹۵ eV و در pH=۳ گاف انرژی ۳/۸۷ eV دارند و pH=۲ گاف بزرگتری را نسبت به دو حالت دیگر دارد که با نتایج اندازه‌گیری اندازه‌ی ذرات در توافق است. با کوچک‌تر شدن اندازه ذرات، گاف انرژی افزایش می‌یابد که به دلیل اثرات اندازه کوانتومی است.



شکل۴: نمودار $(\alpha h\upsilon)^2$ برحسب انرژی فوتون $(h\upsilon)$ برای نانوذرات TiO_2.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله نانوذرات TiO_2 با هیدرولیز تیتانیوم تترا ایزوپروپکسید تهیه شدند. اثر pH محلول اولیه بر خواص ساختاری و اپتیکی و اندازه ذرات مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که pH <۳ ساختار آناتاز را بدست می‌دهد و pH بزرگتر از ۳ فاز آمورف را تشکیل داد. ذرات سنتز شده در pH=۲، کوچکترین اندازه‌ی ذرات و بزرگترین گاف انرژی در حدود ۳ /۹۵ eV را نتیجه دادند.

مراجع

[1] Zhang Y., Wan J., and Ke Y., J. Hazardous Materials 177 (2010) 750-754.
[2] Mejia M.I., Marin J.M., Restrepo G., Rios L.A., Pulgarin C. and Kiwi J., Applied Catalysis B: Environmental 94 (2010) 166-172.
[3] Ibrahim S.A., Streekatan S., Effect of pH on TiO_2 nanoparticles via sol gel method, ICXRI June 9–10, 2010.
[4] Biswas P., Sahu M., Single-step processing of copper-doped titanianomaterials in a flame aerosol reactor. Nanoscale Res. Lett., 6 (2011) 1-14.
[5] Kim Y.T., Park Y.S., Myung H. and Chae H.K., Colloi. Surf. A: Phys. Eng. Asp., 313-314 (2008) 260-263.
[6] Vorkapic D., and Matsoukas T., Am J. Cerm. Soc., 81 (1998) 2815-2820.
[7] Livage J., Henry M., and Sanchez C., Solid State Chem., 18 (1998) 259-341.
[8] Lim C.S., Ryub J.H., Kim D., Cho S.Y., and Oh W.C., Journal of Ceramic Processing Research, 11 (2010) 736-141.
[9] Souri D., Salehizadeh S.A., J. Mater. Sci., 44 (2009) 5800-5805.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]