

ساخت و مشخصه یابی سلول خورشیدی رنگینه‌ای توسط پوشش‌های مزومتخلخل منظم دی اکسید تیتانیم

بنیامین یارمند*

استادیار، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده فناوری نانو و مواد پیشرفته

تاریخ ثبت اولیه: ۹۲/۵/۸، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۹۲/۸/۱۹، تاریخ پذیرش قطعی: ۹۲/۸/۲۵

چکیده سلول‌های خورشیدی رنگینه‌ای توسط پوشش‌های مزومتخلخل منظم دی اکسید تیتانیم ساخته و عملکرد آنها ارزیابی شد. بررسی خصوصیات ساختاری پوشش‌ها توسط پراش پرتو ایکس مشخص ساخت که فاز آناتاز در دمای ۳۰۰ °C جوانه زده و با افزایش دما تا ۷۰۰ °C تبلور می‌یابد. مساحت سطح ویژه پوشش‌ها با افزایش دمای آنیل از ۴۰۰ به ۶۰۰ °C از ۱۶۳/۴۳ به ۸۷/۱۵ m²/g کاهش و میانگین اندازه تخلخل‌ها از ۵/۰۵ به ۸/۷۵ nm افزایش یافته است. میزان جذب پوشش‌ها در محدوده مرئی با افزایش دمای آنیل افزایش یافته و لبه جذب آنها به سمت طول موج‌های بزرگ‌تر جابجا شده است. ارزیابی عملکرد سلول‌های ساخته شده از پوشش‌های مزومتخلخل منظم دی اکسید تیتانیم در ضخامت‌های مختلف مشخص ساخت که با افزایش ضخامت از ۰/۷ تا ۱/۷ μm جریان اتصال کوتاه از ۲/۵۹ به ۸/۰۵ mA/cm² افزایش می‌یابد اما افزایش بیشتر ضخامت موجب کاهش جریان اتصال کوتاه می‌شود. بیشترین بازده سلول در ضخامت ۱/۷ μm برابر ۳/۶۱٪ به دست آمد.

کلمات کلیدی: سلول خورشیدی رنگینه‌ای، پوشش مزومتخلخل منظم، دی اکسید تیتانیم.

Fabrication and characterization of dye-sensitized solar cell based on ordered mesoporous TiO₂ films

B. Yarmand^{1*}

¹Department of Nanotechnology and Advance Materials, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran

Abstract Dye-sensitized solar cells based on ordered mesoporous TiO₂ films were fabricated by sol-gel technique. X-ray diffraction (XRD) analysis revealed that anatase phase was crystallized at 300 °C with initially crystallite size 3.2 nm and the crystallization was improved to 700 °C. Surface area analysis showed that the specific surface area of the films decreased from 163.43 to 87.15 m²/g and the pore size increased from 5.05 to 8.75 nm as the annealing temperature increased from 400 to 600 °C. The transmittance spectra that measured by UV/Vis spectrophotometer revealed that the transmittance maxima of the films decreased in the visible region and the absorption edges shifted to longer wavelengths. Photovoltaic measurements showed that the power conversion efficiency of the films initially enhanced to the maximum value of 3.61% with the increasing film thickness to 1.7 μm and then declined when the film thickness increased further.

Keywords: Dye-sensitized solar cell; TiO₂; Ordered mesoporous films.

*عهده‌دار مکاتبات

نشانی: کرج، پژوهشگاه مواد و انرژی

تلفن: ۰۲۶-۳۶۲۸۰۰۴۰، دورنگار: ---، پیام‌نگار: byarmand@merc.ac.ir

۱- مقدمه

ساخته شد. پوشش‌دهی توسط فرایند سل-ژل صورت گرفت. برای تهیه سل ابتدا $3/2$ g اسید کلریدریک به 5 g تترایزوپروپوکسید تیتانیم اضافه گردید و در دمای اتاق همزده شد. سپس 1 g پلورونیک P123 در 21 g اتانول حل شد و به محلول هیدرولیز شده فوق اضافه گردید. لایه‌ها به روش چرخشی با سرعت 2000 rpm به مدت 30 s ایجاد شدند و سپس به مدت 24 h در دمای 10°C و رطوبت $65-75\%$ نگهداری و در کوره تونلی به مدت 1 h در محدوده دمایی $900-300^\circ\text{C}$ با سرعت گرمایش $1^\circ\text{C}/\text{min}$ در اتمسفر محیط آیل شدند. برای افزایش ضخامت چرخه پوشش‌دهی تکرار گردید. حساس سازی الکترودهای نوری توسط مولکول‌های رنگی N719 با غلظت $0/3$ mM به مدت 48 h انجام شد. برای ساخت الکترودهای مقابل مقدار معینی از محلول اسید کلروپلاتینیک هگزا هیدرات بر روی زیرلایه رسانای شفاف قرار داده شد و سپس درون کوره با دمای 450°C به مدت 30 min حرارت داده شد. در ادامه برای سرهم کردن اجزای سلول ابتدا لایه‌ای از چسب حرارتی که در آن حفره‌ای به شکل مربع و به ابعاد $0/5 \times 0/5 \text{ cm}^2$ بریده شده بود بر روی الکترودهای نوری قرار داده شد. سپس چند قطره از الکترولیت AN-50 به درون آن ریخته و الکترودهای مقابل به آرامی به طوری که هیچ گونه حبابی از هوا بین دو الکترودهای باقی نماند بر روی چسب حرارتی قرار داده شد. در نهایت اجزای سرهم شده سلول درون آن با دمای 100°C به مدت 30 min تحت فشار قرار گرفتند تا چسب حرارتی گیرایی لازم را ایجاد نماید.

خصوصیات ساختاری پوشش‌ها توسط پراش پرتو ایکس (XRD) با تابش $\text{Cu-K}\alpha$ و فیلتر Ni در ولتاژ 40 kV و شدت جریان 30 mA توسط دستگاه Philips مدل PW3710 تعیین شد. رفتار حرارتی پوشش‌ها توسط آنالیز حرارتی همزمان (STA) با سرعت گرمایش $5^\circ\text{C}/\text{min}$ در محدوده دمایی $100-25^\circ\text{C}$ تحت اتمسفر محیط توسط دستگاه PI-STA 1640 مطالعه شد. خصوصیات سطحی پوشش‌ها توسط دستگاه BELSORP II بررسی شد. مساحت سطح تخلخل‌ها به روش جذب سطحی همدمای بروئر-امت-تلا (BET) با استفاده از گاز نیتروژن اندازه‌گیری گردید و توزیع اندازه تخلخل‌ها توسط مدل بارت-جویئر-هالندا (BJH) محاسبه شد. خصوصیات

بحران انرژی یکی از چالش‌های پیشروی بشر طی سال‌های آینده می‌باشد. برای پیشگیری از این بحران با توجه به کاهش ذخایر فسیلی و آلودگی محیط زیست ناشی از مصرف آنها باید سهم منابع انرژی تجدیدپذیر در تامین انرژی مورد نیاز افزایش یابد. سلول‌های خورشیدی از جمله تجهیزات راهبردی برای استفاده مستقیم از انرژی خورشیدی به عنوان یک منبع فراوان، سازگار با محیط زیست و در دسترس می‌باشند. تاکنون تلاش‌های بسیاری در راستای ساخت و بهبود راندمان سلول‌های خورشیدی صورت گرفته اما بزرگ‌ترین مانع بکارگیری این تجهیزات هزینه ساخت زیاد می‌باشد [۱].

جدیدترین نسل سلول‌های خورشیدی که در سال‌های اخیر توجه بسیاری از محققان را به خود جلب نموده سلول‌های خورشیدی رنگینه‌ای^۱ است. مزیت عمده این سلول‌ها فرایند ساخت ساده و هزینه بسیار کم تولید در مقایسه با سلول‌های متداول می‌باشد [۲]. تحقیقات بسیاری برای بهبود راندمان این سلول‌ها صورت گرفته که از جمله آنها می‌توان به استفاده از ساختارهای نانوذره و نانولوله در ساخت سلول اشاره نمود. یکی از ساختارهای جدیدی که انتظار می‌رود تاثیر بسزایی در راندمان سلول‌ها داشته باشد ساختار مزومتخلخل منظم است. این ساختار از یک سو میزان جذب نور برخوردی را افزایش می‌دهد و از سوی دیگر موجب سهولت جابجایی حامل‌های بار می‌شود [۳ و ۴]. از این رو در پژوهش حاضر ساخت سلول‌های خورشیدی رنگینه‌ای با استفاده از پوشش‌های مزومتخلخل منظم دی اکسید تیتانیم مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا شرایط ایجاد پوشش بهینه سازی شده و سپس عملکرد سلول در ضخامت‌های مختلف مشخصه یابی شده است.

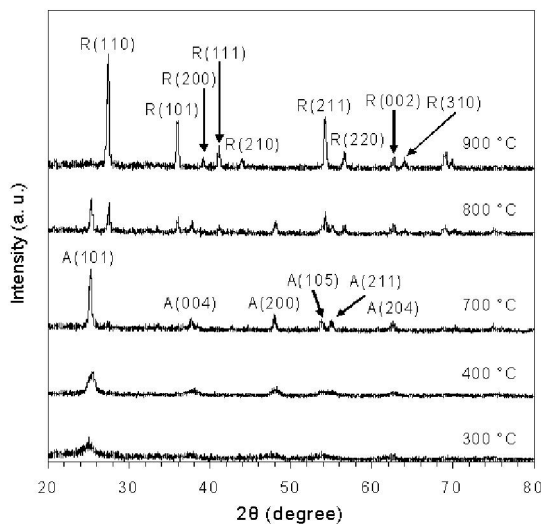
۲- نحوه آزمایش

سلول خورشیدی رنگینه‌ای از دو بخش اصلی الکتروده نوری و الکتروده مقابل تشکیل شده است. الکتروده نوری با ایجاد پوشش‌های مزومتخلخل منظم دی اکسید تیتانیم روی زیرلایه‌های رسانای شفاف FTO با مقاومت الکتریکی $8 \Omega/\square$

k عدد ثابت 0.9 ، λ طول موج پرتو ایکس $(\lambda=1.5406 \text{ \AA})$ ، θ زاویه تفرق بر حسب درجه و B عرض کامل در نصف بیشینه (FWHM) پیک مورد نظر بر حسب رادیان است. کسر جرمی فاز روتیل موجود در پوشش‌های دی اکسید تیتانیم در غیاب فاز بروکایت توسط رابطه زیر محاسبه گردید [۵]:

$$X_{\text{Rutile}} = \frac{1}{1 + K(I_A/I_R)} \quad (\text{معادله ۲})$$

در رابطه فوق I_R و I_A به ترتیب شدت پیک‌های (۱۰۱) فاز آناتاز و (۱۱۰) فاز روتیل و K عدد ثابت 0.79 است که توسط یک نمونه با مقادیر مشخص فازهای آناتاز و روتیل تعیین شده است. نمودار تغییرات میانگین اندازه کریستالیت‌ها و مقدار فاز روتیل بر حسب دمای آنیل در شکل (۲) نشان داده شده است. با افزایش دمای آنیل اندازه کریستالیت‌های هر دو فاز افزایش یافته است. میانگین اندازه کریستالیت‌های فاز آناتاز با افزایش دمای آنیل از 300°C به 800°C بیش از هفت برابر شده و از $3/2$ به $22/7 \text{ nm}$ افزایش یافته و کریستالیت‌های فاز روتیل با افزایش دمای آنیل از 700°C به 900°C از $15/3$ به $27/8$ رشد کرده‌اند. مقدار فاز روتیل در دمای 700°C برابر $11/1\%$ بوده و در دمای 900°C به 100% افزایش پیدا کرده است. اندازه کریستالیت فازهای موجود در پوشش‌های دی اکسید تیتانیم ایجاد شده در این تحقیق در مقایسه با نتایج تحقیقات دیگر کوچک‌تر است که به دلیل استفاده از پلورونیک به عنوان تمپلت می‌باشد [۶].



شکل ۱. طیف‌های پراش پرتو ایکس پوشش‌های دی اکسید تیتانیم آنیل شده در دماهای مختلف.

نوری پوشش‌ها توسط طیف سنجی UV-vis در محدوده طول موج $200\text{--}800 \text{ nm}$ با سرعت روبش 60 nm/min توسط دستگاه Perkin Elmer مدل $\lambda 25$ اندازه‌گیری شد. ضخامت پوشش‌ها توسط تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح مقطع نمونه‌ها محاسبه شد. عملکرد سلول‌ها تحت نور شبیه سازی شده خورشید با توان W/m^2 1000 ، دمای 25°C و جرم هوا (AM) $1/5$ توسط پتانسیواستات Autolab ارزیابی شد.

۳- نتایج و بحث

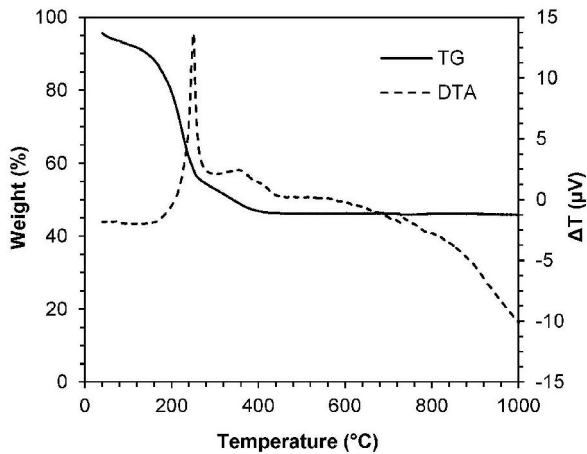
شکل (۱) طیف‌های پراش پرتو ایکس پوشش‌های دی اکسید تیتانیم آنیل شده در محدوده دمایی $300\text{--}900^\circ\text{C}$ را نشان می‌دهد. پوشش ایجاد شده در دمای محیط ساختار آمورف دارد و پس از آنیل تبلور می‌یابد. در دمای 300°C پیک‌های فاز آناتاز ظاهر می‌شوند که بیانگر جوانه‌زنی کریستال‌های آناتاز و شروع استحاله فازی آمورف به آناتاز است. با افزایش دمای آنیل از 300°C به 700°C شدت پیک‌های فاز آناتاز افزایش یافته که به معنای تبلور بیشتر این فاز در پوشش است. در دمای 700°C با ظاهر شدن پیک‌های فاز روتیل استحاله فازی آناتاز به روتیل شروع می‌شود. با افزایش دمای آنیل به 800°C شدت پیک‌های فاز آناتاز کاهش یافته در حالی که شدت پیک‌های فاز روتیل افزایش می‌یابد. در دمای 900°C پیک‌های فاز آناتاز به طور کلی ناپدید شده و شدت پیک‌های فاز روتیل افزایش پیدا کرده که بیانگر تبلور کامل فاز روتیل در ساختار پوشش است. پیک‌های شاخص فاز آناتاز و روتیل به ترتیب در $2\theta=25/3^\circ$ و $2\theta=27/4^\circ$ مشاهده می‌شود که مربوط به صفحات (۱۰۱) و (۱۱۰) است. بنابراین هیچ شواهدی مبنی بر تشکیل فاز بروکایت و یا ترکیبات دیگر نظیر ناخالصی‌های کربن در پوشش‌های دی اکسید تیتانیم وجود ندارد.

میانگین اندازه کریستالیت فازهای موجود در پوشش‌های دی اکسید تیتانیم با استفاده از نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس و رابطه شرر محاسبه شد [۵]:

$$D = \frac{k\lambda}{B \cos \theta} \quad (\text{معادله ۱})$$

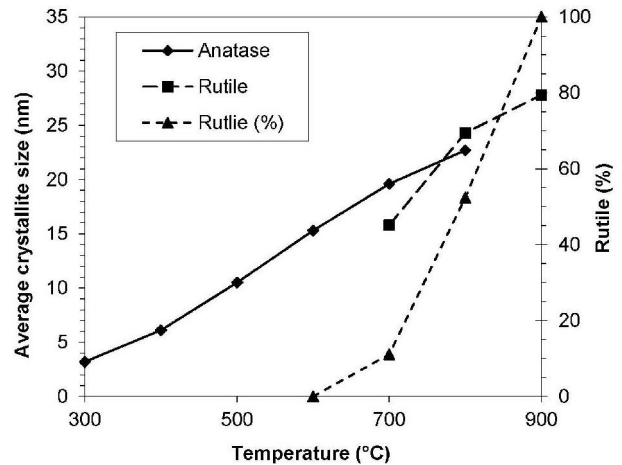
در این رابطه D میانگین اندازه کریستالیت‌ها بر حسب

رخ می‌دهد بنابراین اضافه نمودن پلورونیک به عنوان تمپلت تأثیری بر دمای استحاله نگذاشته است [۷].



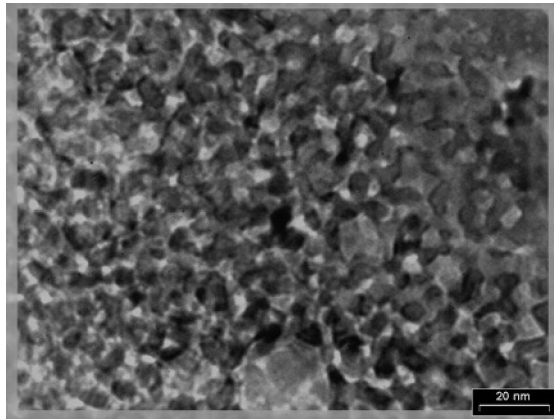
شکل ۳. منحنی‌های آنالیز حرارتی افتراقی و تغییرات وزن پوشش دی اکسید تیتانیوم.

منحنی‌های همدمای جذب و دفع سطحی گاز نیتروژن و توزیع اندازه تخلخل‌های شاخه جذب پوشش‌های دی اکسید تیتانیوم آنیل شده در دماهای مختلف در شکل (۴) نشان داده شده است. هر سه منحنی دارای جذب و دفع تدریجی مولکول‌های گاز بوده و از نظر شکل ظاهری شبیه منحنی نوع چهار می‌باشند. بنابراین پوشش‌های دی‌اکسید تیتانیوم ساختار مزومتخلخل دارند [۸]. دامنه توزیع اندازه تخلخل‌ها همان طور که در منحنی‌های شکل (۴-ب) نشان داده شده بسیار محدود می‌باشد که بیانگر یکنواختی اندازه آنها است. جدول (۱) خصوصیات سطحی پوشش‌های دی اکسید تیتانیوم آنیل شده در دماهای مختلف را نشان می‌دهد. با افزایش دمای آنیل از ۴۰۰ به ۶۰۰ °C مساحت سطح ویژه پوشش‌ها از ۱۶۳/۴۳ m²/g به ۸۷/۱۵ کاهش یافته در حالی که میانگین اندازه تخلخل‌ها از ۵/۰۵ به ۸/۷۵ nm افزایش پیدا کرده است. افزایش دمای آنیل همان طور که نتایج پراش پرتو ایکس مشخص ساخت موجب رشد کریستالیت‌های موجود در ساختار پوشش می‌شود که در اثر آن تخلخل‌های ریز به یکدیگر پیوسته و درشت می‌شوند. نیروی محرکه این فرایند کاهش انرژی آزاد سیستم با کاهش انرژی سطح است.



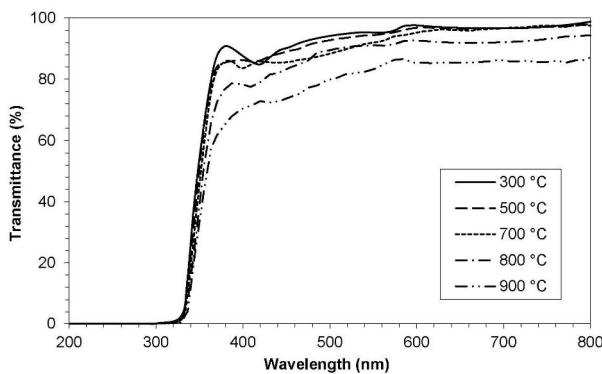
شکل ۲. تغییرات میانگین اندازه کریستالیت فازها و مقدار فاز روتیل با دمای آنیل.

رفتار حرارتی پوشش‌های دی اکسید تیتانیوم در محدوده دمایی ۱۰۰-۲۵۰ °C در نمودار شکل (۳) نشان داده شده است. در منحنی آنالیز حرارتی افتراقی (DTA) پیک گرمازا با شدت نسبتاً زیادی در دمای ۲۵۰ °C مشاهده می‌شود که مربوط به احتراق و حذف مواد آلی از پوشش است. پیک گرمای پهنی با شدت کم در محدوده دمایی ۳۰۰-۳۵۰ °C وجود دارد که بیانگر تبلور فاز آاناتاز است. دمای شروع تبلور فاز آاناتاز به دلیل همپوشانی با دمای تجزیه مواد آلی به صورت دقیق قابل تعیین نیست. پیک گرمای دیگری با شدت کم در محدوده دمایی ۷۲۰-۷۳۰ °C وجود دارد که تبلور فاز روتیل را مشخص می‌سازد. مطابق منحنی تغییرات وزن (TG)، کاهش وزن در سه مرحله رخ می‌دهد. مرحله اول در دماهای کمتر از ۱۳۰ °C است. با توجه به اینکه هیچ پیکی در نمودار تغییرات دمایی مشاهده نمی‌شود می‌توان نتیجه گرفت که کاهش ۴/۱٪ وزن نمونه ناشی از تبخیر آبی است که به صورت فیزیکی جذب شده است. مرحله دوم کاهش وزن در محدوده دمایی ۲۶۰-۱۸۰ °C رخ می‌دهد که در حدود ۲۸/۵٪ است. این کاهش وزن مربوط به حذف مواد آلی و آب باقی مانده است. در مرحله سوم، کاهش وزن ۹/۴٪ در محدوده دمایی ۲۶۰-۴۰۰ °C اتفاق می‌افتد که ناشی از حذف آب ساختاری و تبدیل هیدروکسید تیتانیوم به دی اکسید تیتانیوم است. منحنی تغییرات وزن در دماهای بالاتر از ۴۵۰ °C تقریباً ثابت است که بیانگر حذف کامل آب، مواد آلی و ترکیبات دیگر است. مطابق نتایج تحقیقات استحاله فازی آاناتاز به روتیل در دمای حدود ۷۰۰ °C



شکل ۵. تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری پوشش دی اکسید تیتانیم آنیل شده در دمای ۴۰۰ °C.

شکل (۶) طیف‌های عبور نور مرئی- فرابنفش پوشش‌های دی اکسید تیتانیم آنیل شده در دماهای مختلف را در محدوده طول موج ۸۰۰-۲۰۰ nm نشان می‌دهد. تمامی پوشش‌ها در محدوده نور مرئی عبور بیش از ۷۰٪ دارند و در محدوده فرابنفش دارای جذب می‌باشند که ناشی از انرژی گاف آنها است. با افزایش دمای آنیل میزان عبور نور از پوشش‌ها در محدوده مرئی کاهش یافته و لبه جذب آنها به سمت طول موج‌های بزرگ‌تر جابجا شده است. این تغییرات در دماهای آنیل ۸۰۰ °C و بالاتر از آن به علت تغییر فاز کریستالی از آاناتاز به روتیل مشخص‌تر است.

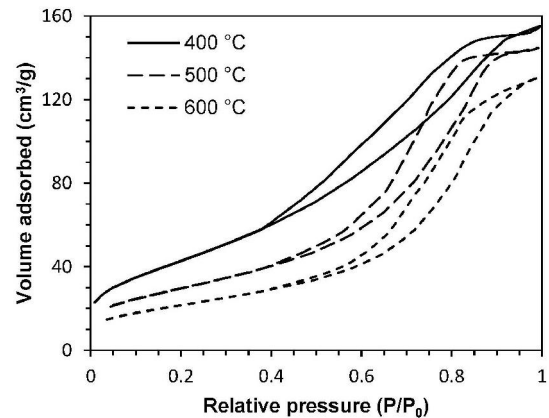


شکل ۶. طیف‌های عبور نور مرئی- فرابنفش پوشش‌های دی اکسید تیتانیم آنیل شده در دماهای مختلف.

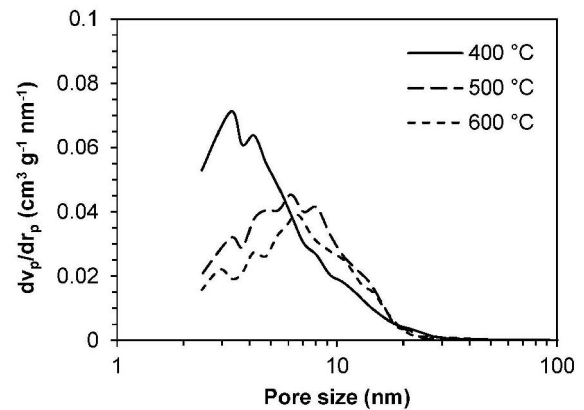
انرژی گاف پوشش‌ها با استفاده از طیف‌های عبور نور و رابطه تاک محاسبه شد [۹]:

$$\alpha = \frac{k(h\nu - E_g)^n}{h\nu} \quad (\text{معادله ۳})$$

در این رابطه α ضریب جذب نور، k عدد ثابت، $h\nu$



(الف)



(ب)

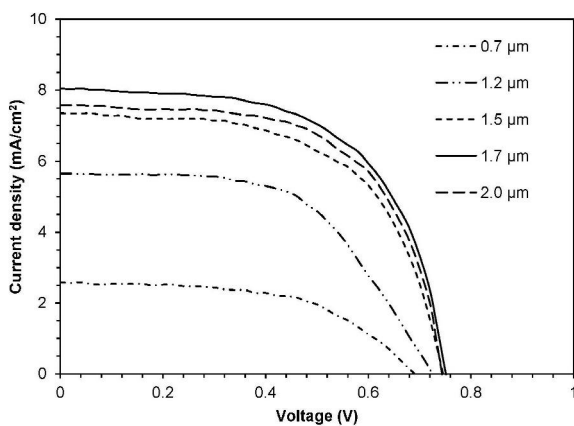
شکل ۴. منحنی‌های الف- همدمای جذب و دفع سطحی گاز نیتروژن و ب- توزیع اندازه تخلخل‌های شاخه جذب پوشش‌های دی اکسید تیتانیم آنیل شده در دماهای مختلف.

جدول ۱. خصوصیات سطحی پوشش‌های دی اکسید تیتانیم آنیل شده در دماهای مختلف.

دمای آنیل (°C)	مساحت سطح ویژه (m²/g)	میانگین اندازه تخلخل‌ها [BET] (nm)	میانگین اندازه تخلخل‌های شاخه جذب [BJH] (nm)	میانگین اندازه تخلخل‌های شاخه دفع [BJH] (nm)
۴۰۰	۱۶۳/۴۳	۵/۰۵	۳/۲۸	۳/۲۸
۵۰۰	۱۰۸/۹۱	۸/۲۱	۶/۱۸	۶/۱۸
۷۰۰	۸۷/۱۵	۸/۷۵	۶/۶۵	۷/۰۳

تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) از پوشش دی اکسید تیتانیم آنیل شده در دمای ۴۰۰ °C در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نانو کریستال‌های فاز آاناتاز به یکدیگر متصل شده و شبکه متخلخل را ایجاد کرده‌اند.

۲ μm موجب کاهش جریان اتصال کوتاه به $7/57 \text{ mA/cm}^2$ شده است. اختلاف پتانسیل مدار باز سلول از $0/701 \text{ V}$ به $0/761 \text{ V}$ افزایش پیدا کرده است. سلول با ضخامت پوشش $1/7 \mu\text{m}$ بیشترین بازده $3/61\%$ را دارد. افزایش چگالی جریان اتصال کوتاه در ضخامت‌های کمتر از $1/7 \mu\text{m}$ ناشی از افزایش مساحت سطح پوشش است. با افزایش مساحت سطح مولکول‌های رنگی بیشتری جذب شده که موجب تزریق بیشتر الکترون به نوار هدایت دی اکسید تیتانیم می‌شوند. در ضخامت‌های بیشتر از $1/7 \mu\text{m}$ میزان بازترکیب الکترون‌های تزریق شده با حامل‌های الکتروولیت افزایش می‌یابد که موجب کاهش جریان اتصال کوتاه می‌شود. همچنین این احتمال وجود دارد که با افزایش چرخه پوشش‌دهی مساحت جدیدی که ایجاد می‌شود کمتر از مساحتی باشد که به دلیل آنیل از لایه‌های زیرین حذف می‌گردد [۱۰].

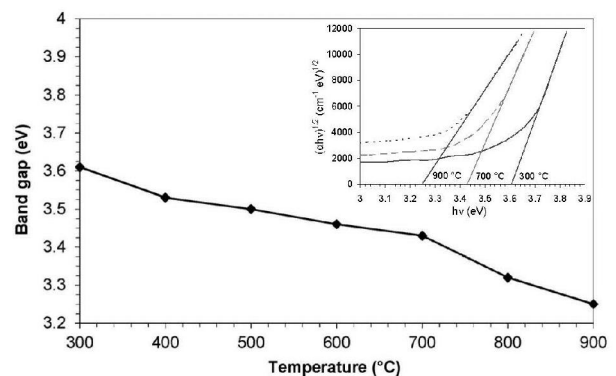


شکل ۸. منحنی‌های چگالی جریان بر حسب اختلاف پتانسیل سلول‌های ساخته شده در ضخامت‌های مختلف.

جدول ۲. نتایج حاصل از منحنی‌های چگالی جریان بر حسب اختلاف پتانسیل سلول‌های ساخته شده در ضخامت‌های مختلف.

تعداد چرخه‌های پوشش‌دهی	ضخامت پوشش (μm)	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (V)	FF	η (%)
۴	۰/۷	۲/۵۹	۰/۷۰۱	۰/۵۴	۰/۹۸
۶	۱/۲	۵/۶۵	۰/۷۳۳	۰/۵۶	۲/۳۱
۸	۱/۵	۷/۳۵	۰/۷۴۹	۰/۵۹	۳/۲۵
۱۰	۱/۷	۸/۰۵	۰/۷۶۱	۰/۵۹	۳/۶۱
۱۲	۲	۷/۵۷	۰/۷۶۰	۰/۶۰	۳/۴۵

انرژی فوتون و n دارای مقادیر $0/5$ و 2 به ترتیب برای انتقال مستقیم مجاز و غیر مستقیم مجاز است. انرژی گاف پوشش‌ها توسط برون یابی خط مماس بر ناحیه خطی نمودار $(\alpha hv)^{1/2}$ بر حسب hv تخمین زده می‌شود. شکل (۷) نمودار تغییرات انرژی گاف پوشش‌های دی اکسید تیتانیم را بر حسب دمای آنیل نشان می‌دهد. انرژی گاف پوشش آنیل شده در دمای 300°C برابر $3/61 \text{ eV}$ است و با افزایش دمای آنیل به تدریج کاهش یافته و به $3/43 \text{ eV}$ در دمای 700°C می‌رسد. با افزایش دما به 900°C انرژی گاف پوشش‌ها به طور ناگهانی به $3/25 \text{ eV}$ کاهش می‌یابد که ناشی از تبدیل فاز آناتاز به روتیل است. کاهش انرژی گاف پوشش‌های دی اکسید تیتانیم ناشی از افزایش اندازه کریستالیت و چگالی پوشش‌ها با افزایش دما و استحاله آناتاز به روتیل است. مقادیر انرژی گاف به دست آمده برای پوشش‌های نانوساختار مزومتخلخل دی اکسید تیتانیم در این تحقیق بیشتر از پوشش‌های ضخیم است که ناشی از اثرات کوانتومی نانوکریستال‌های پوشش به دلیل اندازه بسیار کوچک می‌باشد.



شکل ۷. تغییرات انرژی گاف پوشش‌های دی اکسید تیتانیم آنیل شده در دماهای مختلف و منحنی‌های $(\alpha hv)^{1/2}$ بر حسب hv .

بهترین دمای آنیل برای دستیابی به پوشش با خصوصیات مناسب برابر 400°C انتخاب گردید. منحنی‌های چگالی جریان بر حسب اختلاف پتانسیل سلول‌های ساخته شده در ضخامت‌های مختلف و نتایج حاصل از آنها به ترتیب در شکل (۸) و جدول (۲) آورده شده است. با افزایش چرخه‌های پوشش‌دهی از ۴ به ۱۲ ضخامت پوشش دی اکسید تیتانیم از $0/7 \mu\text{m}$ به $2 \mu\text{m}$ افزایش یافته است. چگالی جریان اتصال کوتاه سلول با افزایش ضخامت از $0/7 \mu\text{m}$ تا $1/7 \mu\text{m}$ از $2/59$ تا $8/05 \text{ mA/cm}^2$ افزایش پیدا کرده اما افزایش بیشتر ضخامت تا

7. Negishi, N., Takeuchi, K., Structural changes of transparent TiO₂ thin films with heat treatment, *Mater. Lett.*, 1999, 38, 150.
8. Wark, N., Tschirch, J., Bartels, O., Bahnemann, D., Rathousky, J., Photocatalytic activity of hydrophobized mesoporous thin films of TiO₂, *Micropor. Mesopor. Mater.*, 2005, 84, 247.
9. Sreemany, M., Sen, S., A simple spectrophotometric method for determination of the optical constants and band gap energy of multiple layer TiO₂ thin films, *Materials Chemistry and Physics*, 2004, 83, 169.
10. Wang, H., Liu, Y., Xu, H., Dong, X., Shen, H., Wang, Y., Yang H., An investigation on the novel structure of dye-sensitized solar cell with integrated photoanode, *Renewable Energy*, 2009, 34, 1635.

۴- نتیجه‌گیری

پوشش‌های مزومتخلخل منظم دی اکسید تیتانیم به منظور ساخت سلول‌های خورشیدی رنگینه‌ای ایجاد و ارزیابی شدند. نتایج پراش پرتو ایکس نشان داد که کریستال‌های فاز آناتاز در دمای ۳۰۰°C با اندازه کریستالیت ۳/۲ nm شروع به جوانه‌زنی کرده و در دمای ۷۰۰°C به فاز روتیل با اندازه کریستالیت ۱۵/۳nm تبدیل می‌شوند. مساحت سطح ویژه پوشش‌ها با افزایش دمای آنیل از ۴۰۰ به ۶۰۰°C از ۱۶۳/۴۳ به ۸۷/۱۵ m²/g کاهش می‌یابد در حالی که میانگین قطر حفرات از ۵/۰۵ به ۸/۷۵nm افزایش پیدا می‌کند. میزان جذب پوشش‌ها در محدوده مرئی با افزایش دمای آنیل افزایش یافته و لبه جذب آنها به سمت طول موج‌های بزرگ‌تر جابجا شده است. با افزایش دمای آنیل گاف انرژی پوشش‌ها از ۳/۶۱ eV در دمای ۳۰۰°C به ۳/۲۵ eV در دمای ۹۰۰°C کاهش یافته است. ارزیابی عملکرد سلول‌ها مشخص ساخت که با افزایش ضخامت از ۰/۷ تا ۱/۷ μm جریان اتصال کوتاه از ۲/۵۹ به ۸/۰۵ mA/cm² افزایش می‌یابد اما افزایش بیشتر ضخامت موجب کاهش جریان اتصال کوتاه می‌شود. بیشترین بازده سلول در ضخامت ۱/۷ μm برابر ۳/۶۱٪ به دست آمد.

مراجع

1. Grätzel, M., Dye-sensitized solar cells, *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 2003, 4, 145.
2. Wang, H., Liu, Y., Xu, H., Dong, X., Shen, H., Wang, Y., Yang, H., An investigation on the novel structure of dye-sensitized solar cell with integrated photoanode, *Renewable Energy*, 2009, 34, 1635.
3. Gan, W.Y., Zhao, H., Amal, R., Photoelectrocatalytic activity of mesoporous TiO₂ thin film electrodes, *Applied Catalysis A: General*, 2009, 354, 8.
4. Zhang, Q., Cao, G., Nanostructured photoelectrodes for dye-sensitized solar cells, *Nano today*, 2011, 6, 91.
5. Cullity, B.D., Elements of X-ray diffraction, Addison-Wesley Publishing Company Inc, London, 1978.
6. Yun, H., Miyazawa, K., Honma, I., Zhou, H., Kuwabara, M., Synthesis of semicrystallized mesoporous TiO₂ thin films using triblock copolymer templates, *Mat. Sci. and Eng. C*, 2003, 23, 487.