دانشگاه اراک- دانشکده علوم

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک

گرایش حالت جامد

ساخت سلول های خورشیدی رنگدانه ای مبتنی بر نانوذرات TiO_2، بررسی روش های تهیه فوتوآند به منظور افزایش بازدهی

نگارش: *محبوبه نعیمی ثانی ثابت*

اساتید راهنما:

دکتر مازیار مرندی *دکتر مهران قلی پور شهرکی*

زمستان ۱۳۹۱

پروردگار راشاکرم که به من بعد از سال ها دوری از تحصیل فرصتی دوباره عنایت کرد تا بتوانم کاری را که علاقه داشتم به پایان برسانم.

ابتدا می خواهم از پرنیان، تنها گل باغ زندگیم تشکر کنم. در این دو سال و اندی خیلی از روزها را بدون حضور من گذراند. با وجود عطش فراوان به آغوش من، به ندرت از کار زیاد و خستگی من شکایت کرد. سنگینی کار من را به بهترین نحو تحمل کرد و همواره برای من آرزوی موفقیت کرد. به هیچ وجه شکیبایی و صبوریش در این مدت را از یاد نخواهم برد.

از زحمات بی دریغ پدر و مادر همسرم نیز کمال تشکر را دارم . حضور گرم ایشان در کنار من و پرنیان نعمتی بزرگ بوده و گذران این روزهای سخت را برای پرنیان قابل تحمل کرد. داشتن چنین پشتوانه ای موجب مباهات من بوده و آرزوی سلامتی و طول عمر برای ایشان دارم.

از دلسوزی و همراهی پدر و مادرم بسیار سپاسگذارم. دعای خیر ایشان از راه دور همیشه گره گشای کارهای من بوده و هست. امیدوارم که بتوانم موجب شادمانی و افتخار آنها باشم. از خداوند منان سلامتی و طول عمر را برای ایشان خواهانم.

از استاد گرامی جناب آقای دکتر قلی پور به خاطر قبول زحمت راهنمایی این پروژه و همچنین فراهم کردن محیطی بدون تنش در کار مشترک نیز سپاسگذارم.

از استاد گرامی جناب آقای دکتر مرندی به خاطر راهنمایی های ارزنده و بی دریغ ایشان نیز کمال تشکر را دارم . ایشان با فراهم آوردن امکانات آزمایشگاهی، فضایی مناسب برای کار گروهی را فراهم کرده اند. حضور پر رنگ ایشان در آزمایشگاه لحظات سخت و بن بست کار تجربی را کم رنگ کرد. امیدوارم که توانسته باشم نقش مثبتی در پیشرفت آزمایشگاه و اهداف ایشان داشته باشم و کمی از خستگی و دغدغه های ایشان را کم کرده باشم.

از اساتید محترم جناب آقای دکتر نبوئی و آقای دکتر ذوالانوار که زحمت داوری این پروژه را متقبل شدند، تشکر می نمایم.

در پایان نمی دانم چگونه از همسرم، کسی که همواره حامی من بوده است تشکر کنم . بعد از گذشت سال ها دوری من از تحصیل، همیشه این دغدغه را داشت که من به هدف و آنچه که علاقه دارم برسم. مرا در این راه از هر نظر چه فکری و چه عملی به شایسته ترین وجه حتی بیشتر از توانش کمک کرد. ایشان با آگاهی، از آرامش و آسایش یک زندگی مشترک گذشت و صبورانه این شرایط را تحمل کرد و مرا همراهی کرد. آرزوی روزهای خوش و پربار همراه با سلامتی برای ایشان دارم.

صمیمانه از دوستان گرامی در آزمایشگاه نانوساختارها و قطعات نانوساختاری خانمها فرزانه احمدلو، نیلوفر مومبدی، زکیه آنجفی و سمیرا فشکی و آقای پیرهادی و کمک های بی منت آقای فراهانی در روند این پروژه سپاسگذارم.

محبوبه نعیمی ثانی ثابت

چکیده:

در این پژوهش به معرفی، مطالعه اصول کارکرد و همچنین ساخت سلولهای خورشیدی نانوساختاری رنگدانه ای که متعلق به نسل سوم سلولهای خورشیدی است پرداخته می شود. درابتدا با معرفی انواع مختلف سلولهای خورشیدی و نحوه کارکرد آنها، روشهای متداول تبدیل نور خورشید به الکتریسیته توضیح داده می شود. سپس سلول خورشیدی رنگدانه ای که شامل فوتوالکترود نانوساختاری از نیمه رسانای TiO_2، رنگدانه N۷۱۹، الکترولیت شامل زوج اکسایش-کاهش I^-/I_3^- و همچنین الکترود پلاتین است معرفی شده و نحوه کارکرد و مراحل کلی ساخت آن بررسی می گردد. در ادامه، مروری بر تحقیقات انجام گرفته در این حوزه انجام می گردد. در بخش کارهای عملی علاوه بر انجام تمامی مراحل ساخت و تهیه سلولهای خورشیدی رنگدانه ای و گسترش تکنیکهای ساخت، مطالعه و تهیه فوتوالکترود نانوساختاری سلول با استفاده از نانوذرات نیمه رسانای TiO_2 انجام می گیرد. در ابتدا نحوه تهیه خمیر با استفاده از نانوذرات TiO_2-P۲۵، که شامل ذراتی با اندازه های ۲۰-۲۵nm هستند در محیط های آبی و همچنین در محیط اتانولی و بر مبنای استفاده از ترپینئول انجام می گیرد. سپس با کنترل شرایط تهیه خمیر و بهبود آن، خمیر TiO_2 به روش لایه نشانی دکتر-بلید بر سطح زیرلایه شیشه ای FTO/شیشه لایه نشانی می شود. با تهیه الکترود کاتد با لایه نشانی پلاتین بر سطح زیرلایه FTO/شیشه به روش انداختن قطره و حرارت دهی و انجام سایر مراحل ساخت، سلولهای خورشیدی رنگدانه ای مورد مطالعه قرار می گیرند. عوامل مهمی مانند محیط تهیه خمیر TiO_2 و تاثیر آن بر کیفیت فوتوالکترود، تاثیر اولتراسونیک بر خواص خمیر TiO_2 و در نتیجه بر خصوصیات فوتوالکترود و همچنین ضخامت لایه فوتوالکترود و نوع تاثیر نهایی این عوامل بر بازدهی سلولهای خورشیدی رنگدانه ای بررسی می شود. نتایج نشان می دهند که فوتوآند های تهیه شده با استفاده از خمیر TiO_2 تهیه شده در محیط اتانولی و بر مبنای ترپینئول پراکندگی کمتر نور و جذب رنگ مناسبی دارند. این پراکندگی نور با استفاده از اولتراسونیک پروبی در مرحله ساخت خمیر کاهش و سلولها با جذب رنگ مناسب عملکرد بهتری را نشان می دادند. ضخامت های بیشتر فوتوآند نیز باعث افزایش رنگ و افزایش مقاومت لایه TiO_2 می گردید. رقابت این دو عامل باعث ایجاد ضخامت بهینه برای لایه فوتوآند در حدود ۱۵ µm و بازدهی قابل ملاحظه ای در حدود ٪ ۶ برای سلولها می گشت. در مرحله بعد از کارهای انجام شده نانوبلورهای TiO_2 به روش سل-ژل هایدروترمال و در یک محیط اسیدی سنتز شدند. این نانوذرات پس از انجام یک فرآیند سول-ژل و سپس حرارت دهی در اتوکلاو در دمای ۲۳۰ ^oC در فرآیند تهیه خمیر در محیط اتانولی و بر مبنای استفاده از ترپینئول بکار گرفته شدند. سطح موثر نانوذرات سنتز شده ۶۰ m^2/g بود که نسبت به سطح موثر نانوذرات TiO_2-P۲۵ برابر ۴۶ m^2/g بیشتر بود. خمیر تهیه شده از این نانوذرات ۲۰-۲۵ nm در ساخت فوتوالکترود سلول خورشیدی رنگدانه ای بکار گرفته شد. تاثیر عوامل مهمی چون انجام فرآیند اولتراسونیک و تاثیر آن بر خصوصیات خمیر TiO_2، ضخامت لایه فوتوآند و همچنین انجام فرایند "بهتر سازی" با استفاده از $TiCL_4$ بر بازدهی سلول خورشیدی رنگدانه ای مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که انجام فرآیند اولتراسونیک در مرحله تهیه خمیر تاثیر عمده ای بر ایجاد چسبندگی مناسب بین لایه فوتوآند و زیرلایه دارد. همچنین ضخامت بهینه ای در اثر رقابت بین افزایش جذب رنگ و افزایش مقاومت در ضخامت های بالا ایجاد می شود. انجام فرآیند بهتر سازی با استفاده از $TiCl_4$ نیز با جلوگیری از بازترکیب ناخواسته الکترونهای فوتوآند با الکترولیت عامل پرشدگی و بازدهی سلول را بهبود می بخشد. بهترین بازدهی سلولهای ساخته شده در این مرحله ٪۶/۲ بدست آمد.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل اول: مقدمه ای بر خواص فیزیکی و شیمیایی دی اکسید تیتانیوم و کاربردهای آن ۸

۱-۱ مقدمه ۹

۱-۲ خواص فیزیکی دی اکسید تیتانیوم ۹

۱-۲-۱ معرفی انواع ساختارهای بلوری دی اکسید تیتانیوم ۹

۱-۲-۲ خواص اپتیکی ۱۱

۱-۲-۲-۱ اصول جذب ۱۲

۱-۲-۲-۲ خواص الکترون و حفره ۱۳

۱-۲-۳ خواص الکترونیکی ۱۴

۱-۳ خواص شیمیایی ۱۴

۱-۴ خواص ویژه فیزیکی و شیمیایی دی اکسید تیتانیوم ۱۵

۱-۴-۱ خاصیت فوتوکاتالیستی و کاربردهای آن ۱۵

۱-۴-۱-۱ مکانیسم واکنش فوتوکاتالیستی در دی اکسید تیتانیوم ۱۶

۱-۴-۲ خاصیت فوق آبدوستی و کاربردهای آن ۱۹

۱-۵ کاربردهای نانوذرات دی اکسید تیتانیوم ۲۲

۱-۵-۱ پوشش های خود تمیز شونده ۲۲

۱-۵-۲ پوشش های تصفیه هوا ۲۳

۱-۵-۳ سلول های خورشیدی رنگدانه ای ۲۴

فصل دوم: معرفی سلول خورشیدی رنگدانه ای ۲۶

۲-۱ مقدمه ۲۷

۲-۲ ضرورت استفاده از انرژی های پاک و نو ۲۷

۲-۳ تاریخچه سلول های فوتو ولتاییک ۲۸

۲-۴ سلول های خورشیدی نسل سوم (رنگدانه ای) ۳۲

۲-۵ ساختار سلول خورشیدی رنگدانه ای ۳۳

۲-۵-۱ زیر لایه ۳۴

۲-۵-۲ فوتوالکترود یا فوتوآند TiO_2 ..... ۳۵

۲-۵-۳ رنگدانه حساس به نور ۳۶

۲-۵-۴ الکترولیت (ماده رسانای حفره) ۳۸

۲-۵-۵ الکترود کاتد(پلاتین) ۳۹

۲-۵- ۶ بستن سلول رنگدانه ای ۴۰

۲-۶ عملکرد سلول خورشیدی ۴۱

۲-۷ سینتیک انتقال بار ۴۵

۲-۷-۱ فرایند تزریق الکترون ۴۶

۲-۷-۲ بازترکیب بار ۴۶

۲-۷-۳ بازتولید رنگ اکسید شده ۴۷

۲-۷-۴ بازترکیب الکترون تزریق شده با الکترولیت ۴۷

۲-۷-۵ انتقال الکترون در لایه TiO_2 ..... ۴۸

۲-۸ تعیین مشخصه های فوتوولتایی سلول خورشیدی با اندازه گیری منحنی جریان- ولتاژ ۴۹

۲-۹ آنالیز امپدانس الکتروشیمیایی(EIS) برای تعیین مشخصات میکروسکوپیک سلول ۵۰

۲-۱۰ بهبود در عملکرد سلول خورشیدی ۵۶

۲-۱۱ جمع بندی ۵۷

فصل سوم: مروری بر منابع تحقیق ۵۹

فصل چهارم: کارهای آزمایشگاهی: ۷۶

ساخت سلول های خورشیدی رنگدانه ای با استفاده از خمیر TiO2(P25) تهیه شده در محیط های آبی و اتانولی

مقدمه ۷۷

۴-۱ مواد شیمیایی و دستگاه های آنالیز مورد استفاده در ساخت و مشخصه یابی سلول های خورشیدی رنگدانه ای ۷۷

۴-۲ تهیه خمیر تیتانیوم دی اکساید از پودر تجاری نانوبلورهای (TiO2(P25 به روش آبی ۷۸

۴-۳ ساخت سلول خورشیدی رنگدانه ای با استفاده از خمیر آبی TiO2(P25) ۸۰

۴-۳-۱ آماده سازی الکترود آند ۸۰

۴-۳-۲ جذب رنگدانه ۸۲

۴-۳-۳ الکترولیت ۸۲

۴-۳-۴ الکترود شمارنده (کاتد)..... ۸۲

۴-۳-۵ بستن سلول خورشیدی رنگدانه ای ۸۳

۴-۳-۶ مراحل و ظرافت های تشکیل لایه ۸۴

۴-۳-۷ اندازه گیری بازدهی و عوامل موثر ۸۵

۴-۴ بررسی عوامل مؤثر بر عملکرد سلول ۸۶

۴-۴-۱ تاثیر غلظت اسید در هنگام تهیه خمیر TiO2(P25) بر عملکرد سلول خورشیدی تهیه شده ۸۷

۴-۴-۲ تاثیر غلظت پلی اتیلن گلیکول در هنگام تهیه خمیر و تاثیر آن بر عملکرد سلول خورشیدی تهیه شده ۸۹

۴-۴-۳ تاثیر ضخامت لایه نانوساختاری TiO_2 در فوتوالکترود بر عملکرد سلول های تهیه شده ۹۰

۴-۴-۴ تاثیر زمان هم خوردن محلول نهایی شامل نانوذرات TiO_2 و پلی اتیلن گلایکول در هنگام تهیه خمیر بر بازدهی سلول های تهیه شده ۹۶

۴-۵ تاثیر گذشت زمان بر عملکرد سلول ۱۰۷

۴-۶ تهیه خمیر تیتانیوم دی اکساید با استفاده از پودر تجاری نانوکریستال های TiO_2(P25) در محیط اتانولی ۱۰۹

۴-۷ ساخت سلول خورشیدی رنگدانه ای با استفاده از خمیر TiO2(P25) در محیط اتانولی ۱۱۱

۴-۷-۱ تاثیر ضخامت لایه نانوساختاری TiO_2 در فوتوالکترود بر عملکرد سلول های تهیه شده ۱۱۲

۴-۷-۲ بررسی اثر اولتراسونیک معمولی بر کیفیت خمیر TiO2 ..... ۱۱۳

۴-۷-۳ بررسی اثر اولتراسونیک پروبی بر کیفیت خمیر TiO2 ..... ۱۱۶

فصل پنجم: کارهای آزمایشگاهی:..... ۱۲۰

رشد هایدروترمال نانوبلورهای TiO2 و استفاده از آن در سلول های خورشیدی رنگدانه ای

۵-۱ مقدمه ۱۲۱

۵-۲ تهیه نانوبلورهای تیتانیوم دی اکساید به روش سل- ژل و هایدروترمال

۵-۲-۱ روش تهیه و سنتز نانوذرات TiO_2 با سایز ۲۰ nm در محیط کاملا اسیدی ۱۲۵

۵-۲-۲ عوامل موثر بر کیفیت نانوذرات ۱۲۷

۵-۳ تهیه خمیر بر مبنای نانوذرات TiO_2 سنتز شده به روش هایدرو ترمال ۱۳۱

۵-۳-۱ تاثیر اولتراسونیک در تهیه خمیر TiO_2 ..... ۱۳۳

۵-۳-۲ تاثیر pH محلول در فرایند سنتز و رشد نانوذرات بر کیفیت خمیر ۱۳۴

۵-۴ ساخت سلول خورشیدی رنگدانه ای با استفاده از خمیر اتانولی بر مبنای نانوذرات تیتانیوم دی اکساید سنتز شده به روش هیدروترمال ۱۳۵

۵-۴-۱ تهیه فوتوالکترود از لایه نانوساختاری TiO2 سنتز شده به روش سل- ژل در محیط اسیدی ۱۳۵

۵-۴-۲ بستن سلول ۱۳۶

۵-۵ عوامل مؤثر بر عملکرد سلول خورشیدی ۱۳۷

۵-۵-۱ تاثیر ضخامت لایه فوتوآند بر عملکرد سلول ۱۳۷

۵-۵-۲ انجام فرایند بهتر سازی اولیه با استفاده از تترا کلرید تیتانیوم و تاثیر آن بر عملکرد سلول ۱۳۹

۵-۶ آنالیز امپدانس الکترو شیمیایی(EIS) برای مشخصات میکروسکوپیک سلول ۱۴۱

نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۴۴

مراجع ۱۴۶

فهرست شکل ها

صفحه

شکل ۱-۱: ساختار فاز بلوری آناتاز ۱۰

شکل ۱-۲: ساختار بلوری فاز روتایل ۱۰

شکل ۱-۳: ساختار بلوری فاز بروکیت ۱۱

شکل ۱-۴: نوارهای انرژی برای ماده با شکاف انرژی مستقیم ۱۳

شکل ۱-۵: نوارهای انرژی برای ماده شکاف انرژی غیر مستقیم ۱۳

شکل ۱-۶: فرایند فوتوکاتالیستی TiO_2 ..... ۱۶

شکل ۱-۷ : طرحواره کاربردهای TiO_2 به دلیل داشتن خاصیت فوتوکاتالیستی ۱۸

شکل ۱- ۸: فوق - آب دوست: زیر ۵ درجه = Ø (قطرات مسطح تر)، آب- دوست: زیر ۳۰ درجه = Ø ،

آب- گریز: بالای ۹۰ درجه = Ø، فوق آب- گریز: بالای ۱۵۰ درجه = Ø ۲۰

شکل ۱-۹: (الف) سطحی که از نانوذرات TiO_2 پوشیده شده است و (ب) سطحی که از نانوذرات TiO_2 پوشیده نشده است ۲۱

شکل ۱-۱۰ : شیشه خود تمیز شونده در سمت راست و شیشه ای که پوششی از TiO_2 ندارد را در سمت چپ نشان می دهد ۲۲

شکل ۱-۱۱: شماتیکی از ساختار یک سلول خورشیدی رنگدانه ای ۲۴

شکل ۲-۱: درصد منابع مختلف در تولید انرژی جهانی در سال ۲۰۱۱ ..... ۲۷

شکل ۲-۲ : (الف) شبکه بلوری سیلیکون که (+) اتم های سیلیکون و (-) الکترون های اطراف اتم سیلیکون، (ب) ناخالصی بور در شبکه بلوری سیلیکون با رنگ زرد و حضور حفره ها با رنگ آبی و (ج) ناخالصی فسفر در شبکه بلوری سیلیکون

با رنگ زرد و الکترون های اضافی با رنگ قرمز..... ۲۹

شکل ۲-۳: ایجاد پیوندگاه p-n در محل اتصال دو نیم رسانای نوع n و p ۳۰

شکل ۲-۴: شماتیکی از ساختار یک سلول خورشیدی سیلیکونی..... ۳۰

شکل ۲-۵: شماتیکی از ساختار یک سلول خورشیدی لایه نازک..... ۳۱

شکل ۲-۶: ساختار و اجزای سلول خورشیدی رنگدانه ای..... ۳۴

شکل ۲-۷: جذب یک مولکول رنگدانه N719 به سطح نانوذره TiO_2 از طریق گروه های کربوکسیلی..... ۳۷

شکل ۲-۸: طرحواره ای از پیکربندی سلول خورشیدی رنگدانه ای..... ۴۰

شکل ۲-۹: طرحواره ای ازعملکرد سطوح انرژی سلول خورشیدی رنگدانه ای نانوساختاری. رنگدانه با جذب نور فرودی به حالت برانگیخته می رود و الکترون برانگیخته به تراز هدایت نیم رسانای اکسیدی TiO2 منتقل می شود. مولکولهای رنگدانه با یک فرایند اکسایش- کاهش دوباره بازتولید می شوند که الکترون مورد نیاز برای این واکنش از الکترون های رسیده به الکترود شمارنده از طریق مدار خارجی تأمین می گردد. ولتاژ مدار باز سلول در شکل با شماره ۵ نشان داده شده است..... ۴۳

شکل ۲-۱۰: نیروی رانشی برای تزریق الکترون از رنگدانه به نیم رسانا در نمودار انرژی سلول خورشیدی رنکدانه ای

شکل ۲-۱۱: مولکول رنگدانه با جذب نور فرودی به حالت برانگیخته می رود و الکترون برانگیخته به تراز هدایت نیم رسانای اکسیدی TiO2 منتقل می شود. مولکولهای رنگدانه بایک فرایند اکسایش- کاهش دوباره بازتولید می شوند که الکترون مورد نیاز برای این واکنش از الکترون های رسیده به الکترود شمارنده از طریق مدار خارجی تأ مین می گردد. از طرف دیگر، فرایند بازترکیب الکترون منتقل شده به نیم رسانا از طریق بازگشت به مولکول رنگ دانه و نیز بازگشت به الکترولیت اتفاق می افتد..... ۴۴

شکل ۲-۱۲: انتقال الکترون در لایه TiO2 بر اساس مدل نفوذ (پراکندگی) و مدل به دام افتادن..... ۴۹

شکل ۲-۱۳: منحنی I-V یک سلول خورشیدی رنگدانه ای نوعی..... ۵۰

شکل ۲-۱۴: مدار الکتریکی معادل برای خازن غیر ایده آل..... ۵۲

شکل ۲-۱۵: منحنی نیکوییست مربوط به امپدانس الکتروشیمیایی سلول خورشیدی رنگدانه ای نوعی..... ۵۳

شکل ۲-۱۶: منحنی نیکوئیست مدار معادل نشان..... ۵۴

شکل ۲-۱۷: مدل کردن اجزائ سلول خورشیدی رنگدانه ای برای استفاده از نرم افزارZview..... ۵۵

شکل ۲-۱۸: ترابرد الکترون در (الف) لایه ای از متشکل از نانوذرات TiO_2 و (ب) لایه ای متشکل از ساختارهای یک بعدی مانند نانو سیم ها و نانو تیوب ها TiO_2..... ۵۷

شکل ۳-۱: طرحواره ای از مسیر نفوذ الکترون در ساختارهای ذره ای و یک بعدی..... ۶۰

شکل۳-۲: نانوساختارهای مختلف TiO_2 برای استفاده در سلول خورشیدی رنگدانه ای .(الف) نانوذره ، ب) نانوفیبر، ج) ساختاریک بعدی نانومیله های عمودی و د) ساختار یک بعدی نانوتیوب ها..... ۶۲

شکل۳-۳ : طیف XRD نانوذرات TiO2 در دماهای بازپخت (کلسیناسیون) مختلف به مدت ۲ ساعت..... ۶۳

شکل۳-۴ : منحنی تغییر اندازه نانوذرات با افزایش دمای بازپخت..... ۶۳

شکل ۳-۵: طیف XRD این نانوذرات TiO_2..... ۶۴

شکل۳-۶: تصویر HRTEM اندازه نانوذرات سنتز شده پس از عمردار شدن آنها در دمای پایین..... ۶۵

شکل ۳-۷ : الگوی طیف XRD نمونه TiO2 که برای ۴ ساعت بازپخت شده اند..... ۶۵

شکل ۳-۸ : تصویر TEM نمونه TiO_2 که برای ۴ ساعت بازپخت شده اند..... ۶۶

شکل۳-۹ : تصاویر TEM پودرهای TiO2 تهیه شده به روش هایدروترمال الف) به کمک امواج صوتی ب) معمولی..... ۶۷

شکل ۳-۱۰ : طیف XRD نانوذرات TiO2 که با نسبت های مولی HNO3/TTIP متفاوت و H_2O/TTIP =۱۵۰ و خشک شده در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد..... ۶۸

شکل ۳-۱۱: طیف XRD نانوذرات TiO2 در دماهای مختلف بازپخت: HNO_3/TTIP= 0.2 ، H_2O/TTIP = ۱۵۰ ... ۶۹

شکل ۳-۱۲: تصویر TEM از نانوذرات تهیه شده در دماهای بازپخت مختلف..... ۷۰

شکل ۳-۱۳: منحنی مشخصه جریان- ولتاژ سلول های خورشیدی ساخته شده در شرایط مختلف..... ۷۲

شکل ۳-۱۴: رابطه بین بازدهی سلول خورشیدی ساخته شده از یک لایه با نانوذراتnm ۲۰ و یک لایه از نانوذراتnm ۴۰۰و ضخامت لایه های فوتوآند..... ۷۲

شکل ۳-۱۵: الگوی XRD از نانوذرات TiO_2 ..... ۷۳

شکل ۳-۱۶: رابطه بین بازدهی سلول و درصد وزنی اتیل سلولز ۷۵

شکل ۳-۱۷: رابطه بین بازدهی سلول و درصد وزنی نانوذرات TiO_2 ..... ۷۵

شکل۴-۱: طیف FT-IR مربوط به نانوذرات TiO_2(P25) ۸۰

شکل۴-۲: (الف) زیرلایه های بریده شده در ابعاد ۱/۵× ۱ و قرار دادن ماسک کنار لبه های زیر لایه ها برای لایه کشیدن (ب) لایه نشانی به روش دکتر بلید ۸۱

شکل۴-۳ : (الف) لایه نشانی خمیر روی زیر لایه FTO، (ب) لایه TiO2 بعد از پخت نهایی، (ج) لایه TiO2 بعد از جذب رنگ ۸۱

شکل۴-۴ : غوطه ور شدن فوتوالکترود ساخته شده در محلول اتانولی رنگ برای ۲۴ ساعت ۸۲

شکل ۴-۵ : الکترود کاتد که از پوشش لایه نازک پلاتین روی زیر لایه FTO تشکیل شده است ۸۳

شکل ۴-۶: تصویری از دستگاه اندازه گیری جریان- ولتاژ سلول خورشیدی ۸۵

شکل ۴-۷: الف) لایه تهیه شده از خمیر TiO2 با غلظت بیشتر اسید نیتریک قبل از خشک شدن و (ب) فوتوآند تهیه شده از خمیر TiO2 با غلظت بیشتر اسید نیتریک بعد از پخت نهایی ۸۷

شکل۴-۸ : منحنی های I-V سلول خورشیدی ساخته شده از فوتوالکترود (الف) تک لایه ای TiO_2 (ب) با دولایه ای TiO_2 غلظت بیشتر اسید نیتریک ۸۸

شکل ۴-۹: منحنی I-V مربوط به سلول خورشیدی استاندارد ۸۹

شکل۴-۱۰: : لایه تهیه شده از خمیر TiO_2 با غلظت بیشتر پلی اتیلن گلایکول ۹۰

شکل۴-۱۱ : تصویر SEM از ساختار سطح دولایه ای با ضخامت۱۳ μ m از TiO_2(P25) به عنوان فوتوالکترود سلول خورشیدی..... ۹۱

شکل۴-۱۲: تصویر SEM از ساختار سطح تک لایه ای با ضخامت۹ μ m از TiO_2(P25) به عنوان فوتوالکترود سلول خورشیدی..... ۹۱

شکل ۴- ۱۳: شماتیکی از لایه فوتوآند سلول خورشیدی متشکل از (الف) ذرات نانومتری و همچنین کلوخه های ذرات و (ب) ذرات یکنواخت تک اندازه..... ۹۲

شکل۴-۱۴: نمودار توزیع سایز ذرات TiO_2(P25) ۹۲

شکل ۴-۱۵ منحنی جذب و واجذب گاز نیتروژن از نانوذرات TiO2..... ۹۳

شکل۴-۱۶: منحنیBET برای تعیین حجم حفره ها..... ۹۴

شکل۴-۱۷ : منحنی جذب رنگ الکترود TiO_2 با ضخامت μm ۹ ، μm ۱۳ و μm ۲۰..... ۹۴

شکل ۴-۱۸: منحنیI-V سلول های خورشیدی رنگدانه ای. ضخامت فیلم TiO_2 μm ۹ ، μm ۱۳ ، μm ۲۰..... ۹۵

شکل۴-۱۹: منحنی I-V سلول خورشیدی ساخته شده در ضخامت های μm ۹، μm ۱۲ و μm ۱۸ از خمیر آبی TiO_2(P25) که در مرحله امتزاج نانوذرات TiO_2 و پلیمر به مدت ۱ ساعت هم خورده است..... ۹۷

شکل۴-۲۰: منحنی I-V سلول خورشیدی ساخته شده در ضخامت های μm ۹، ۱۲ و ۱۸ از خمیر آبی TiO_2(P25) که در مرحله امتزاج نانوذرات TiO2 و پلیمر به مدت ۲ روز هم خورده است..... ۹۸

شکل۴-۲۱: منحنی I-V سلول خورشیدی ساخته شده در ضخامت های μm ۹، ۱۲ و ۱۸ از خمیر آبی TiO_2(P25) که در مرحله امتزاج نانوذرات TiO2 و پلیمر به مدت ۳ روز هم خورده است..... ۹۹

شکل۴-۲۲: منحنی I-V سلول خورشیدی ساخته شده در ضخامت های μm ۹ ، μm ۱۲ و μm ۱۸ با خمیری که

۷ روز بعد از اضافه کردن PEG به نانوذرات TiO_2(P25) فرایند آبزدایی و خمیری شدن انجام می شود..... ۱۰۰

شکل ۴-۲۳: منحنی I-V سلول خورشیدی ساخته شده در ضخامت های µm ۹، µm ۱۲ و µm ۱۸ از خمیر آبی TiO_2(P25) که در مرحله امتزاج نانوذرات TiO_2 و پلیمر به مدت ۱۴ روز هم خورده است..... ۱۰۲

شکل ۴-۲۴ : تغییرات چگالی جریان سلول های ساخته شده با ضخامت های مختلف لایه TiO2 که از خمیر TiO2 که در مرحله تهیه خمیر، نانوذرات و پلیمر برای مدت زمان های متفاوتی هم خورده تهیه شده اند..... ۱۰۳

شکل ۴-۲۵: تغییرات ولتاژ مدار باز سلول های خورشیدی رنگدانه ای برحسب ضخامت فوتوآند تهیه شده از خمیر TiO_2 که در مرحله امتزاج نانوذرات و پلیمر برای مدت زمان های متفاوتی هم خورده اند..... ۱۰۳

شکل ۴-۲۶ : تغییرات بازدهی سلول های خورشیدی رنگدانه ای تهیه شده با ضخامت های مختلف فوتوآند از خمیر TiO2 که در مرحله امتزاج نانوذرات و پلیمر برای مدت زمان های متفاوتی هم خورده اند..... ۱۰۴

شکل ۴-۲۷: منحنی های I-V بهترین سلول ساخته شده در زمان های مختلف بعد از بستن آن ۱۰۷

شکل۴-۲۸: (الف) وزن کردن پودر TiO2(P25) ، (ب) افزودن اسید استیک به نانوذرات و (ج) افزودن آب به ماده قبل.. ۱۱۰

شکل ۴-۲۹: منحنی های I-V سلول های خورشیدی ساخته شده از لایه های تهیه شده از خمیرTiO2(P25) در محیط اتانولی در ضخامت های µm ۸، µm ۱۴ و µm ۲۰..... ۱۱۲

شکل ۴-۳۰: (الف) لایه نازک TiO2 تهیه شده از خمیر TiO2(P25) در محیط اتانولی که در مرحله ساخت از اولتراسونیک معمولی استفاده شده قبل از پخت نهایی ، (ب) لایه نازک تهیه شده قبل از پخت نهایی ، (ج) لایه نازک بعد از مرحله جذب رنگدانه و (د) سلول خورشیدی ساخته شده با استفاده از خمیر TiO2(P25) که در محیط اتانولی..... ۱۱۴

شکل ۴-۳۱ : تصویر SEM از ساختار سطح لایه TiO2(P25) به عنوان الکترود سلول خورشیدی با خمیری که در محیط

اتانولی..... ۱۱۵

شکل ۴-۳۲: تصویر SEM از ساختار سطح لایه TiO2(P25) به عنوان الکترود سلول خورشیدی..... ۱۱۶

شکل ۴-۳۳ : منحنیI-V سلول خورشیدی ساخته شده از خمیر TiO2(P25) در محیط اتانولی که با استفاده از

اولتراسونیک معمولی..... ۱۱۶

شکل ۴-۳۴ : (الف) لایه TiO2 بعد از پخت نهایی، (ب) لایه Tio2 بعد از جذب رنگ و (ج) سلول خورشیدی ساخته شده

شکل ۴-۳۵: تصویر SEM از ساختار سطح لایه TiO2(P25) به عنوان الکترود سلول خورشیدی..... ۱۱۸

شکل ۴-۳۶ : منحنیI-V سلول خورشیدی ساخته شده از خمیر در محیط اتانولی که با استفاده از اولتراسونیک پروبی... ۱۱۸

شکل ۵-۱: تصویری از دستگاه اتوکلاو مورد استفاده برای سنتز ذرات در روش هایدروترمال..... ۱۲۳

شکل ۵-۲: ساختار شیمیایی تترا ایزو پروپیل ارتو تیتانات..... ۱۲۴

شکل ۵-۳: ساختار شیمیایی اسید استیک..... ۱۲۴

شکل ۵-۴: طرحواره ای از کنار هم قرار گرفتن ماده اولیه(TTIP) و کاتالیست (اسید استیک). دایره های کوچک اسید

استیک و دایره بزرگ TTIP می باشند..... ۱۲۴

شکل ۵-۵: طرحواره ای از تشکیل کاتیون های Ti^{+4} توسط کاتالیست اسید استیک..... ۱۲۵

شکل ۵-۶: (الف) تشکیل رسوب سفید رنگ در فرایند هیدرولیز و (ب) فرایند لختی زدایی در دمای $80^{\circ}C$ ۱۲۷

شکل ۵-۷: (الف) مرحله منتقل کردن مواد از داخل اتوکلاو به داخل بشر و (ب) محلول TiO_2 با ۴۰٪ وزنی در

اتانول بعد از سانتریفیوژ..... ۱۲۸

شکل ۵-۸: نانوذرات TiO2 را بعد از فرایند لخته زدایی و کریستالی شدن آنها در اتوکلاو..... ۱۲۹

شکل ۵-۹: طیف FT-IR مربوط به نانوذرات TiO2 سنتز شده به روش هایدروترمال..... ۱۲۹

شکل ۵-۱۰: تصویر لایه از خمیر TiO2 بعد از پخت نهایی که در فرایند سنتز نانوذرات اسید نیتریک استفاده نشده است ۱۳۰

شکل۵-۱۱: تصویرSEM از ساختار سطح لایه TiO_2 تهیه شده از نانوذرات سنتز شده با PH=۱ ..... ۱۳۰

شکل۵-۱۲ : تصویر SEM ناحیه بزرگی از سطح فوتوآند با بزرگنمایی کمتر ۱۳۱

شکل ۵-۱۳ : منحنی جذب و واجذب گاز نیتروژن از نانوذرات TiO_2 سنتز شده در محیط اسیدی ۱۳۱

شکل ۵-۱۴: (الف) افزودن ترپینئول به نانوذرات TiO2 با ۴۰٪ وزنی در اتانول و (ب) خمیر نهایی شامل ۱۸٪ وزنی TiO_2، ۹٪ وزنی اتیل سلولز، ۷۳٪ وزنی ترپینئول ۱۳۳

شکل ۵-۱۵: (الف) لایه ای که تهیه شده از خمیری که در مراحل تهیه از اولتراسونیک استفاده نشده است و (ب) لایه پس از جذب رنگدانه ۱۳۴

شکل ۵-۱۶: تصویر SEM (الف) از سطح لایه ی نازک از نانوذرات سنتز شده با PH= ۳ و (ب) با بزرگنمایی کم از ناحیه بزرگی از سطح ۱۳۵

شکل۵-۱۷ : (الف) لایه کشیده شده به روش دکتر بلید قبل از خشک شدن اولیه، (ب) لایه TiO_2 پس از خشک شدن نهایی، (ج) لایه TiO_2 پس از جذب رنگدانه و (د) سلول خورشیدی رنگدانه ای ساخته شده ۱۳۷

شکل ۵-۱۸: منحنی های جذب محلول های رنگ واجذب شده از سطح فوتوالکترود های تهیه شده با ضخامت های ۴ µm، ۷ µm و ۱۲ µm ۱۳۸

شکل ۵-۱۹: منحنی های I-V سلول های خورشیدی تهیه شده با ضخامت های فوتوالکترود ۴ µm، ۷ µm و ۱۲ µm .. ۱۳۹

شکل ۵-۲۰: منحنی I-V سلول های خورشیدی ساخته شده با انجام عملکرد $TiCl_4$ و بدون انجام عملکرد $TiCl_4$ ۱۴۱

شکل ۵-۲۱: . طیف امپدانس الکتروشیمیایی سلول خورشیدی رنگدانه ای بهترین نمونه ساخته شده از نانوذرات

سنتز شده به روش هایدروترمال..... ۱۴۳

فهرست جداول

جدول ۳-۱: خمیرهای $TiO2$ مختلفی با درصدهای متفاوت از نانوپودر $TiO2$ و اتیل سلولز و ترپینئول..... ۷۴

جدول ۴-۱: مشخصات فوتوولتاییک سلول های خورشیدی ساخته شده با غلظت بیشتر اسید نیتریک..... ۸۷

جدول ۴-۲: داده های بر آمده از منحنی و آنالیز BET..... ۹۳

جدول ۴-۳: مشخصه های فوتوولتاییک سلول های خورشیدی تهیه شده با ضخامت های µm ۹، µm ۱۳ و µm۲۰ .... ۹۶

جدول۴-۴ : مشخصه های فوتوولتاییک سلول خورشیدی ساخته شده در ضخامت های µm ۹، µm ۱۲ و µm ۱۸ از

خمیر آبی TiO_2(P25) که در مرحله امتزاج نانوذرات $TiO2$ و پلیمر به مدت ۱ ساعت هم خورده است..... ۹۸

جدول ۴-۵ : مشخصه های فوتوولتاییک سلول خورشیدی ساخته شده در ضخامت های µm ۹، µm ۱۲ وµm ۱۸ از

خمیر آبی TiO_2(P25) که در مرحله امتزاج نانوذرات $TiO2$ و پلیمر به مدت ۲ روز هم خورده است..... ۹۹

جدول۴-۶ : مشخصات فوتوولتاییک سلول خورشیدی ساخته شده در ضخامت های µm ۹، µm ۱۲ و µm ۸ از

خمیر آبی TiO_2(P25) که در مرحله امتزاج نانوذرات $TiO2$ و پلیمر به مدت ۳ روز هم خورده است..... ۱۰۰

جدول ۴-۷: مشخصه های فوتوولتاییک سلول خورشیدی ساخته شده در ضخامت های µm ۹، µm ۱۲ و µm ۱۸ با

خمیری که ۷ روز بعد از اضافه کردن PEG به نانوذرات TiO_2(P25) فرایند آبزدایی و خمیری شدن انجام می شود..... ۱۰۱

جدول۴-۸ : مشخصه های فوتوولتاییک سلول خورشیدی ساخته شده در ضخامت های µm ۹، ۱۲ و ۱۸ از

خمیر آبی TiO_2(P25) که در مرحله امتزاج نانوذرات $TiO2$ و پلیمر به مدت ۱۴ روز هم خورده است..... ۱۰۲

جدول ۴-۹: تغییرات بازدهی سلول ها در زمان های مختلف هم خوردن محلول اولیه با ضخامت های مختلف..... ۱۰۵

جدول ۴-۱۰: مشخصات فوتوولتاییک بهترین سلول ساخته شده در زمان های مختلف بعد از بستن آن..... ۱۰۸

جدول ۴-۱۱: مشخصات فوتوولتاییک سلول های خورشیدی ساخته شده از لایه های تهیه شده از خمیر(TiO2(P25

در محیط اتانولی در ضخامت های µm ۸، µm ۱۵ و µm ۲۰..... ۱۱۳

جدول ۴-۱۲: مشخصه های فوتوولتاییک سلول خورشیدی ساخته شده با شرایط بالا..... ۱۱۷

جدول۴-۱۳: مشخصه های فوتوولتاییک سلول خورشیدی ساخته شده با شرایط بالا..... ۱۱۹

جدول ۵-۱ : نتایج برآمده از آنالیز BET سطح مؤثر نانوذرات TiO2 سنتز شده به روش هایدروترمال ، حجم کل حفره

ها و قطر متوسط حفره ها..... ۱۳۲

جدول ۵-۳: مشخصات فوتوولتاییک سلول های خورشیدی تهیه شده با ضخامت های فوتوالکتروµm ۴،µm ۷ و µm

۱۲..... ۱۴۰

جدول ۵-۴: مشخصات فوتوولتاییک سلول های خورشیدی ساخته شده با انجام فرایند بهترسازی $TiCl_4$ و بدون

انجام آن..... ۱۴۲

فصل اول

مقدمه ای بر خواص فیزیکی و شیمیایی دی اکسید تیتانیوم و کاربردهای آن