



بررسی اثر فازی آلومینا بر بلورینگی لایه پروسکایت در سلول‌های خورشید پروسکایتی

ناصر جهان بخشی زاده^۱، محمود برهانی زرنندی^{۱*}، محمدرضا ناطقی^۲

۱- دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد

۲- دانشکده شیمی، دانشگاه آزاد یزد

(دریافت مقاله: ۹۶/۷/۲۶، نسخه نهایی: ۹۶/۱۱/۳۰)

چکیده: پروسکایت آلی-معدنی ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) به دلیل گاف انرژی مناسبی که برای جذب نور خورشید دارد بعنوان لایه جاذب در سلول‌های خورشیدی نسل سوم استفاده می‌شود. بلورینگی لایه جاذب کننده نور نقش مهمی در عملکرد سلول‌های خورشیدی پروسکایتی بازی می‌کند و نوع ماده‌ای که بعنوان زیرلایه استفاده می‌شود یکی از عوامل موثر بر بلورینگی لایه جاذب است. در سلول‌های خورشیدی ابرساختار از آلومینا (اکسید آلومینیوم) بعنوان لایه زیرین لایه جاذب نور استفاده می‌شود. در این مقاله فازهای آلفا و گامای اکسید آلومینیوم بعنوان لایه زیرین استفاده شده‌اند و اثر آنها بر بلورینگی لایه پروسکایت و پارامترهای موثر بر عملکرد سلول خورشیدی بررسی شده است. مشخص شد که با در نظر گرفتن همه پارامترهای موثر بر عملکرد سلول خورشیدی، فاز گامای اکسید آلومینیوم نسبت به فاز آلفای آن برای استفاده در سلول‌های خورشیدی پروسکایتی که به روش دو مرحله‌ای ساخته می‌شوند، مناسب‌تر است.

واژه‌های کلیدی: اکسید آلومینیوم؛ بلورینگی؛ پروسکایت؛ سلول خورشیدی؛ لایه نشانی.

مقدمه

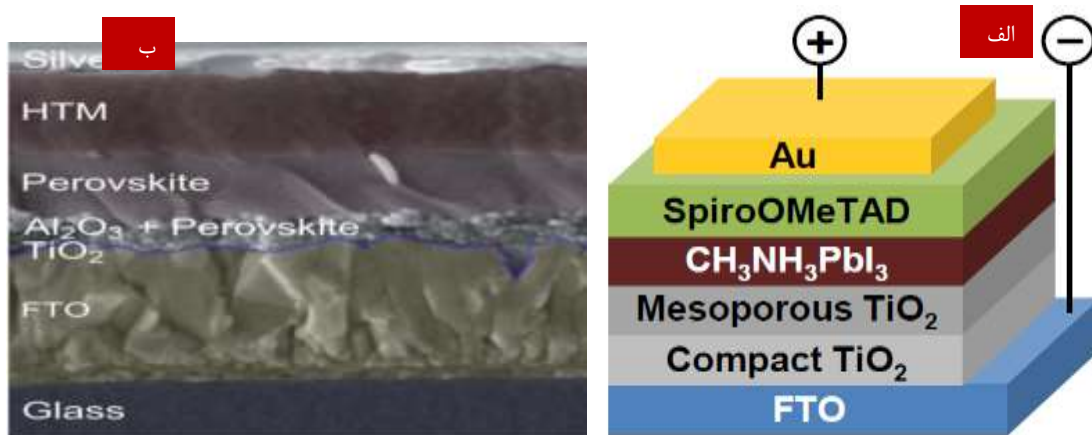
درصد رسیده است که قابل مقایسه با سلول‌های خورشیدی تجاری شده سیلیکونی است [۳-۵].

بر اساس نوع لایه‌های مورد استفاده برای این نوع از سلول‌های خورشیدی، پروسکایتی سه ساختار کلی سطح، نو و متخلخل و ابرساختار در نظر گرفته می‌شود.

یکی از مشکلات این نوع از سلول‌های خورشیدی پایداری کم لایه پروسکایت در محیط است [۶]. لایه‌های آلی که معمولاً در دو طرف لایه پروسکایت در سلول خورشیدی استفاده می‌شوند با اکسیژن و رطوبت محیط واکنش می‌دهند که بر عملکرد سلول خورشیدی تاثیر منفی می‌گذارد [۷]. به منظور بهبود این وضعیت می‌توان از اکسیدهای فلزی به جای لایه‌های آلی استفاده شده در سلول‌های خورشیدی استفاده کرد که دیگر مشکل ناپایداری در محیط اطراف را ندارند [۸]. چنان که در شکل (۱) دیده می‌شود، در سلول‌های خورشیدی ابرساختار

پروسکایت را در حالت کلی می‌توان با فرمول AMX_3 نشان داد که در آن A کاتیون آلی یا غیرآلی، M یون فلزی و X آنیون هستند [۱]. معمول‌ترین ساختار و ترکیبی که بعنوان پروسکایت در سلول‌های خورشیدی استفاده می‌شود $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ است که در مقایسه با فرمول کلی بیان شده برای پروسکایت، A، M و X به ترتیب CH_3NH_3^+ ، Pb^{2+} و I^- هستند. بر اساس دما، سه ساختار بلوری برای پروسکایت در نظر می‌گیرند که شامل مکعبی، چهارگوشه‌ای و راست‌گوشه هستند [۲].

از سال ۲۰۰۹ که نخستین بار از پروسکایت بعنوان جاذب کننده نور در سلول‌های خورشیدی استفاده شد، توجه زیادی به این ماده شده است به طوری که امروزه بازده سلول‌های خورشیدی ساخته شده با لایه جاذب پروسکایت به حدود ۲۰



شکل ۱ ساختار سلول‌های خورشیدی پروسکایتی الف- ابرساختار ب- مزو متخلخل.

تهیه نمونه‌ها

برای ساخت سلول خورشیدی پروسکایتی، ابتدا به اندازه ۳ میلی متر از لایه رسانای روی شیشه‌های FTO با استفاده از پودر روی (Zn) و حلال HCl ۲ مولار برداشته و مراحل شستشوی آن به ترتیب با آب صابون، آب مقطر، استون و اتانول انجام شد. سپس لایه دی اکسید تیتانیوم فشرده که نقش سد-کنندگی در برابر حرکت حفره و در نتیجه کاهش آهنگ بازترکیب زوج الکترون-حفره را دارد و همچنین لایه متخلخل دی اکسید تیتانیوم با استفاده از دستگاه نشانده چرخشی لایه-نشانی شده و در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت یک ساعت گرمادهی شد. برای لایه‌نشانی فازهای آلفا و گامای اکسید آلومینیوم، نخست ۵ میلی گرم از هر یک در ۵ سی سی ایزوپروپانول حل شده و به مدت ۲۰ ساعت هم زده شد، سپس محلول حاصل با روش لایه‌نشانی چرخشی بر لایه اکسید تیتانیوم لایه‌نشانی و در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت یک ساعت گرمادهی شد. سپس از آن، محلول یدید سرب و DMF که در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲۴ ساعت هم خورده بود را با استفاده از دستگاه لایه‌نشانی چرخشی لایه-نشانی کرده و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد پخت دادیم. برای تشکیل لایه پروسکایت، FTO که لایه یدید سرب بر آن لایه-نشانی شده است را و به مدت ۳ دقیقه در محلول متیل یدید آمونیوم غوطه ور کرده و به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد پخت دادیم. برای لایه‌نشانی الکتروود طلا از دستگاه کندوپاش استفاده شده و لایه طلا با ضخامت ۵۰ نانومتر بر لایه پروسکایت لایه‌نشانی شد.

به جای لایه متخلخل اکسید تیتانیوم، از اکسید آلومینیوم استفاده می‌شود که نسبت به اکسید تیتانیوم سرعت انتقال الکترون بیشتری دارد و در نتیجه باعث کم شدن آهنگ بازترکیب الکترون-حفره و بهتر شدن عملکرد سلول خورشیدی می‌شود [۹].

روش آزمایش

مواد و تجهیزات مورد استفاده

حلال‌های اتانول، استون، ایزوپروپانول، دی اتیل اتر و DMF^۱ و همچنین سولفات آمونیوم، سولفات آلومینیوم ۱۸ آبه، متیل آمونیوم و اسید هیدرویدیک (HI) از شرکت مرک و مواد یدید سرب (PbI₂)، خمیر TiO₂ و شیشه FTO^۲ از شرکت شریف سولار خریداری شدند.

شکل (۲) وسایل مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. از دستگاه لایه‌نشانی چرخشی^۳ با قابلیت تنظیم سرعت و زمان لایه‌نشانی (ساخت ایران)، کوره افقی با تنظیمات دمایی و زمانی برای پخت نمونه‌های لایه‌نشانی شده (ساخت ایران)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (مدل VEGA3 TESKAN ساخت کشور جمهوری چک)، دستگاه شبیه‌ساز نور خورشید برای مشخصه‌یابی جریان-ولتاژ (ساخت ایران)، دستگاه لایه-نشانی کندوپاش برای لایه‌نشانی الکتروود طلا (ساخت ایران)، گرم کننده (ساخت ایران) استفاده شد.

1-Dimethylformamide
2-Fluorine doped Tin Oxide
3-Spin Coating



شکل ۲ وسایل مورد استفاده الف- دستگاه لایه‌نشانی چرخشی ب- کوره افقی پ- گرم کننده ت- دستگاه شبیه‌ساز نور خورشید و مشخصه‌یابی جریان-ولتاژ ث- دستگاه کند و پاش.

تشکیل شد. سپس ۷/۷۲ گرم اتیلن گلیکول به آن اضافه شد و محلول مورد نظر در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد برای ۱ ساعت هم زده و گرمادهی شد که در این مرحله یک محلول کاملاً شفاف (سل) بدست آمد. این محلول در دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد هم زده و گرمادهی شد تا حلال اضافی آن به طور کامل حذف شود، که در این مرحله رزین (ژل) تشکیل شد. رزین به مدت ۱ ساعت در کوره ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا جامد سیاه رنگ تشکیل شد. پودر رزین در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت در کوره گرمادهی شد که در این مرحله پودر سفید رنگ ایجاد شد. نیمی از این پودر به مدت ۲۰ دقیقه در کوره ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد گذاشته شد تا $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ شکل گیرد و نیمی دیگر در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد برای ۲۰ دقیقه پخت داده شده تا $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ تشکیل شود [۱۰].

سنتز پودر متیل یدید آمونیوم (MAI)

سنتز سولفات آلومینیوم آمونیوم $\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2$

برای سنتز $\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2$ مقدار ۱/۳۲ گرم از سولفات آمونیوم و ۶/۶۶ گرم سولفات آلومینیوم ۱۸ آب $(\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O})$ به ۱۰ میلی لیتر آب دوباره یونیده اضافه شده و محلول هم زده شد. سپس محلول گرمادهی شد تا حلال آن تبخیر و پودری سفید مایل به صورتی ایجاد شد. سپس ۱ میلی لیتر آمونیاک غلیظ به آن اضافه شده و پس از گرمادهی پودر سفید رنگ ایجاد شد.

سنتز $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ و $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ با استفاده از روش سل ژل

برای سنتز فازهای آلفا و گامای اکسید آلومینیوم، ۴/۷۴ گرم از سولفات آلومینیوم آمونیوم که به آن ۹ گرم از محلول آمونیاک ۲۵٪ اضافه شد به خوبی هم زده شد. در این مرحله $\text{Al}(\text{OH})_3$ تشکیل شد. ۱۱/۶ گرم اسید سیتریک به آرامی به آن اضافه شده و محلول به دست آمده در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت هم زده و گرمادهی شد تا آلومینیم سترات

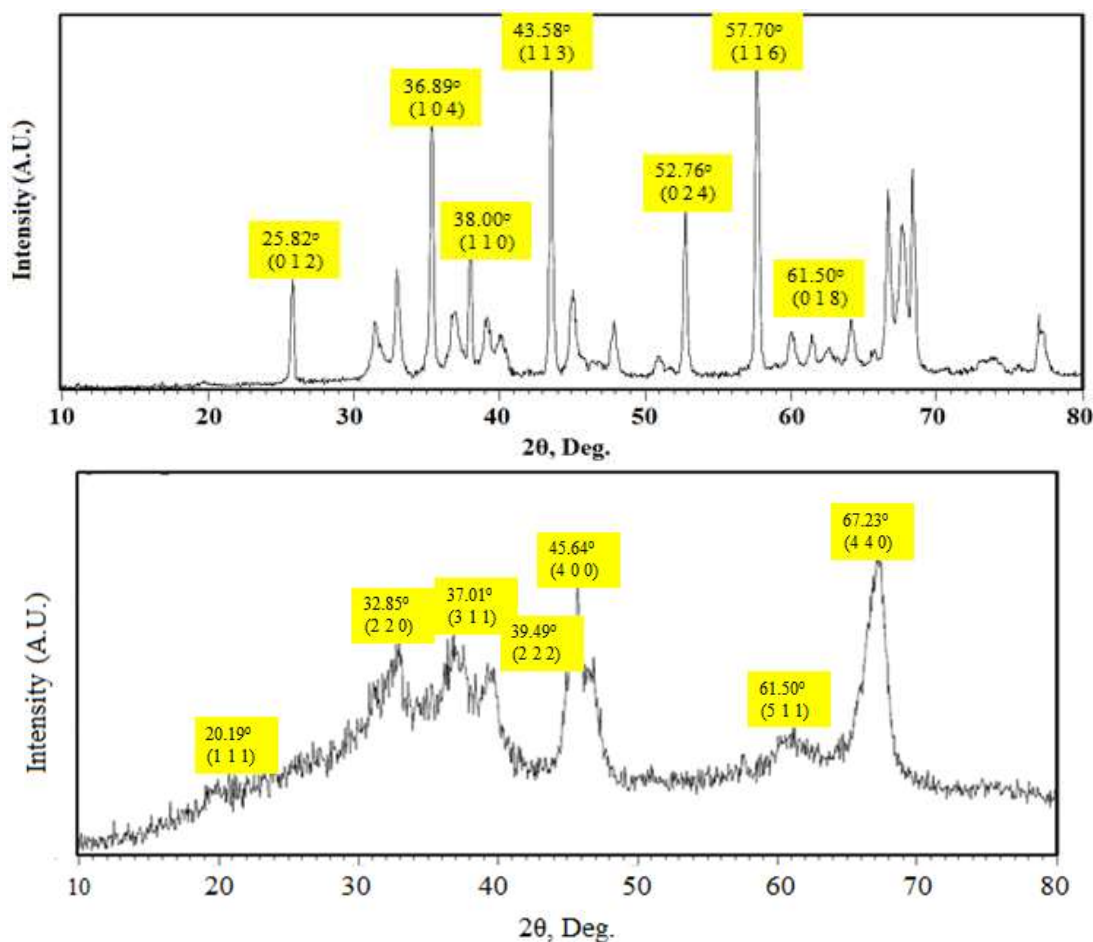
(XRD) گرفته شد. شکل ۳ طیف XRD فازهای آلفا و گاما اکسید آلومینیوم سنتز شده را نشان می‌دهد. وجود قله های بیشتر در طیف مربوط به فاز آلفا نسبت به فاز گاما که بلورینگی بیشتر فاز آلفا را نشان می‌دهد و همچنین قله‌های ظاهر شده در 36.89° ، 43.58° ، 57.70° و 61.50° برای فاز آلفا و 25.82° ، 38.00° ، 45.64° و 67.23° برای فاز گاما مطابق با نتایج دیگر پژوهش‌ها همخوانی دارد که گواهی بر تایید تشکیل فاز های آلفا و گامای اکسید آلومینیوم طی فرایند سنتز است [۱۰، ۱۱]. برای بررسی ریخت‌شناسی و تعیین اندازه بلورک‌های لایه پروسکایت ایجاد شده از نمونه‌های ساخته شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تصویر گرفته شد.

جهت تعیین بازدهی نمونه ها و همچنین مشخص کردن پارامترهای ولتاژ مدار باز، چگالی جریان اتصال کوتاه و ضریب پرتدگی، سلول‌های خورشیدی ساخته شده مشخصه‌یابی IV شدند.

نخست ۲۴ میلی لیتر متیل آمونیوم (۳۳ wt% در اتانول) و ۱۰ میلی لیتر اسید هیدرویدیک (۵۷ wt% در آب) در یک بالون در حمام یخ مخلوط شد به طوریکه اسید HI قطره قطره به متیل آمونیوم اضافه شد. این محلول به مدت ۲-۳ ساعت روی همزن مغناطیسی قرار داده شد و پس از خشک شدن در دمای 50° درجه سانتی گراد به مدت ۱ ساعت رسوب سفید رنگی باقی ماند. پودر به دست آمده در اتانول خالص حل شد و سپس با اضافه کردن دی اتیل اتر به محلول، دوباره ته‌نشینی از پودر سفید رنگ بوجود آمد. پس از صاف کردن آن، مرحله پیشین چندین بار تکرار شد و در آخر در دمای 60° درجه سانتی‌گراد در کوره خلا خشک شد تا پودر سفید رنگ MAI ساخته شد.

مشخصه‌یابی نمونه‌ها

برای مشخص کردن تشکیل فازهای آلفا و گامای اکسید آلومینیوم، از نمونه‌های سنتز شده طیف پراش پرتوی X

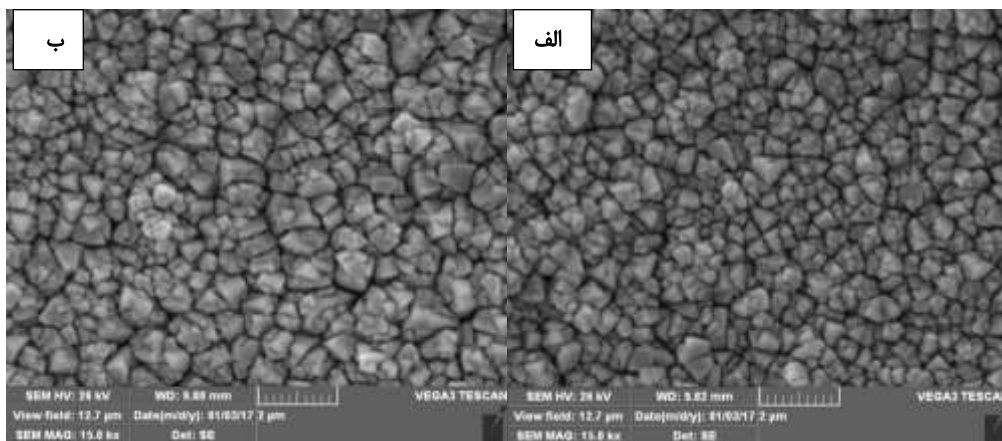


شکل ۳ الگوی XRD مربوط به اکسید آلومینیوم الف- فاز آلفا و ب- فاز گاما.

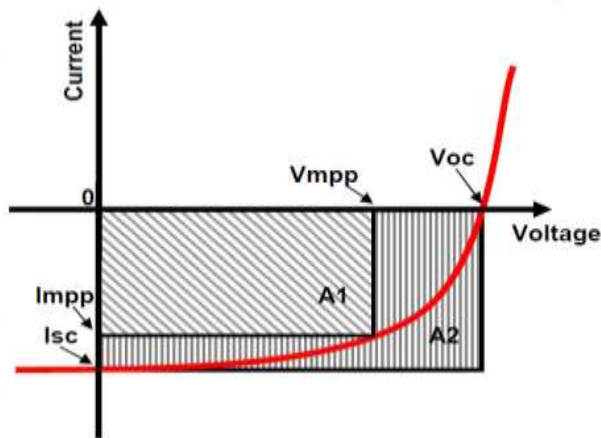
یکی از پارامترهای بسیار مهم در سلول‌های خورشیدی پروسکایتی، بلورینگی لایه پروسکایت است که ارتباط مستقیم با عملکرد سلول دارد. شکل ۴ تصاویر SEM مربوط به لایه پروسکایت ساخته شده بر لایه اکسید آلومینیوم با فازهای آلفا و گاما را نشان می‌دهد. چنان که دیده می‌شود اندازه بلورک‌های پروسکایت که بر لایه اکسید آلومینیوم با فاز آلفا ساخته شده است نسبت به فاز گاما بزرگتر است. فاز گاما نسبت به فاز آلفای اکسید آلومینیوم دارای تخلخل بسیار بالایی است [۱۰]. از این رو نانو بلورهای یدید سرب که بر آنها لایه‌نشانی شده اند با نفوذ به درون این تخلخل، به اندازه‌های کوچک محدود می‌شوند. در نتیجه بلورک‌های پروسکایت تشکیل شده که از بر همکنش یدید سرب با متیل یدید آمونیوم ایجاد شده‌اند اندازه‌های کوچکتری نسبت به بلورک‌های پروسکایتی که بر فاز آلفای

اکسید آلومینیوم تشکیل شده‌اند، دارند. در ادامه اثر این بلورینگی متفاوت لایه پروسکایت که ناشی از متفاوت بودن لایه زیرین آن است، بر پارامترهای موثر بر عملکرد سلول خورشیدی بررسی می‌شود.

بازده سلول خورشیدی پروسکایتی وابسته به سه پارامتر ولتاژ مدار باز، چگالی جریان اتصال کوتاه و ضریب پرشدگی است که به ترتیب با V_{oc} ، J_{sc} و FF نمایش داده می‌شوند. این پارامترها و رابطه آنها با بازده سلول خورشیدی که از نمودار جریان-ولتاژ مشخص می‌شود در شکل ۵ نشان داده شده است. در این رابطه کمیت P_{in} چگالی توان نور فرودی است. برای بررسی دقیق اثر هر یک از فازهای اکسید آلومینیوم بر عملکرد سلول خورشیدی ساخته شده، پارامترهای موثر بر عملکرد سلول خورشیدی بررسی شد، که نتایج آن به شرح زیر است:



شکل ۴ تصاویر SEM لایه پروسکایت ساخته شده بر روی الف- فاز گامای اکسید آلومینیوم و ب- فاز آلفای اکسید آلومینیوم.



$$FF = \frac{(V \cdot I)_{\max}}{(V_{oc} \cdot I_{sc})}$$

$$\text{بازده} = (V_{oc} \cdot J_{sc} \cdot FF / P_{in}) \cdot 100$$

شکل ۵ نمایش عوامل موثر بر بازده سلول خورشیدی پروسکایتی با استفاده از مشخصه‌یابی جریان-ولتاژ.

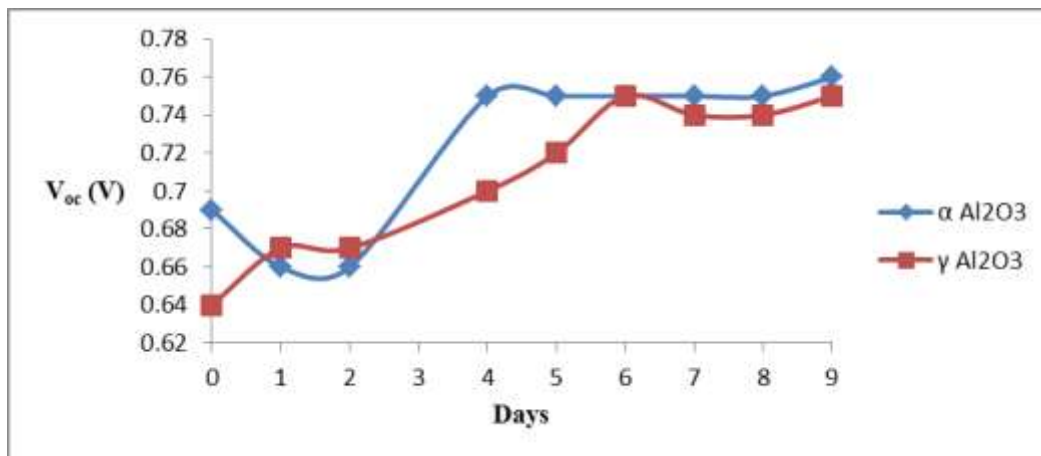
ولتاژ مدار باز (V_{oc}) سلول خورشیدی

های آلفا و گامای اکسید آلومینیوم بررسی شد و نتیجه آن در شکل ۷ نشان داده شده است. دیده می‌شود که پروسکایتی که بر فاز گامای اکسید آلومینیوم لایه‌نشانی شده است نسبت به پروسکایت بر اکسید آلومینیوم با فاز آلفا دارای ضریب پرتشنگی بیشتری است که دلیل آن می‌تواند بزرگتر بودن بلورک‌های پروسکایت در حالت آلفا نسبت به گاما باشد. طول انتشار الکترون-حفره در پروسکایت $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ بر اساس ضخامت لایه پروسکایت بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ نانومتر است [۱۳]. هر چه اندازه بلورهای پروسکایت از این طول انتشار بزرگتر باشد احتمال بازترکیب الکترون-حفره و کاهش ضریب پرتشنگی بیشتر می‌شود. از این‌رو، پروسکایتی که بر فاز آلفای اکسید آلومینیوم تشکیل شده است ضریب پرتشنگی کمتری نسبت به فاز گاما دارد.

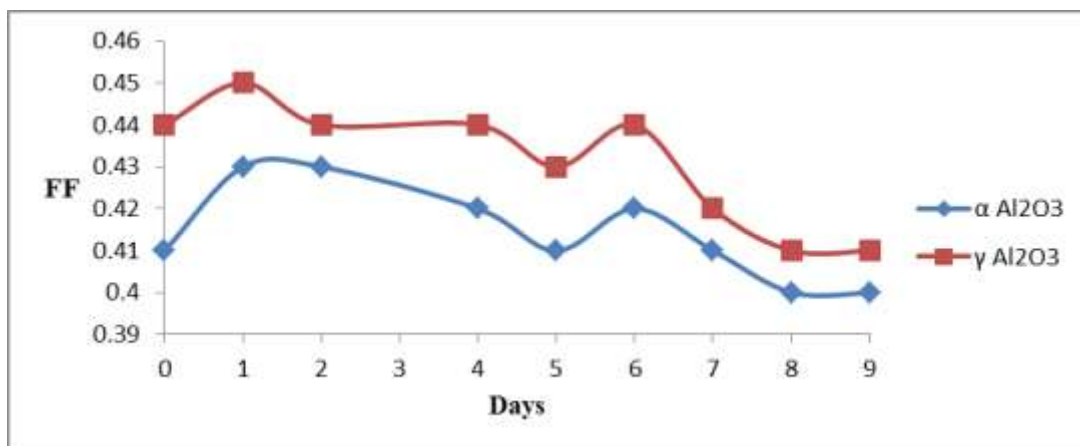
برای بررسی ولتاژ مدار باز و همچنین میزان پایداری این کمیت در سلول‌های خورشیدی پروسکایتی که در آنها از فازهای آلفا و گامای اکسید آلومینیوم استفاده شده است، سلول‌های ساخته شده با مشخصه‌یابی جریان-ولتاژ به مدت ۹ روز بررسی شدند که نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است. دیده می‌شود که پارامتر V_{oc} مربوط به سلول‌هایی که در آنها از فاز آلفای اکسید آلومینیوم استفاده شده است نسبت به فاز گاما بیشتر است که به دلیل بزرگتر بودن بلورک‌های پروسکایت برای فاز آلفا نسبت به فاز گاماست و این با بررسی‌های انجام شد پیرامون اندازه بلورک‌های پروسکایت همخوانی دارد [۱۲،۵].

ضریب پرتشنگی (FF) سلول خورشیدی

با استفاده از نمودار مربوط به مشخصه‌یابی جریان-ولتاژ سلول-های خورشیدی ساخته شده، پارامتر FF این سلول‌ها برای فاز-



شکل ۶ کمیت V_{oc} سلول‌های خورشیدی پروسکایتی ساخته شده با استفاده از فازهای آلفا و گامای اکسید آلومینیوم.



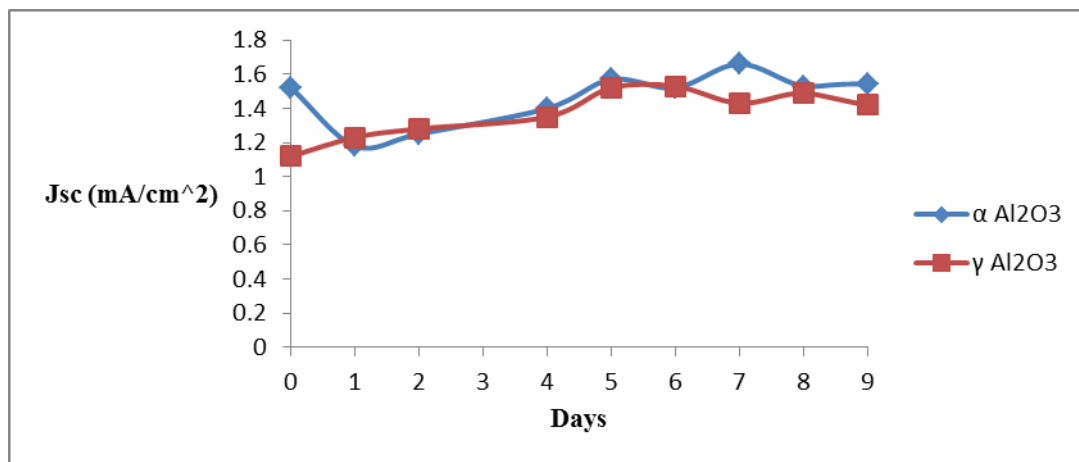
شکل ۷ کمیت FF سلول‌های خورشیدی پروسکایتی ساخته شده با استفاده از فازهای آلفا و گامای اکسید آلومینیوم.

جریان اتصال کوتاه سلول خورشیدی (J_{sc})

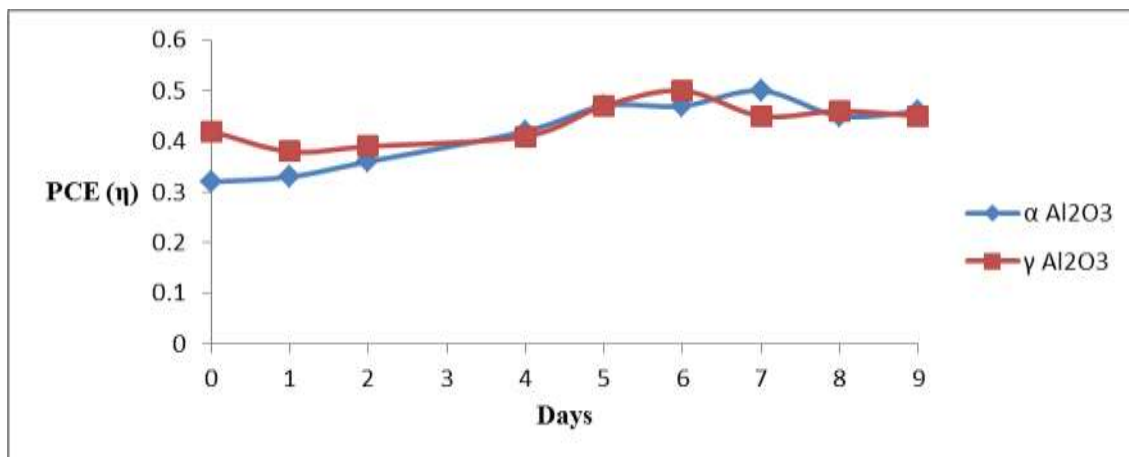
با استفاده از روابط شکل ۵ در نمودارهای جریان-ولتاژ سلول-های ساخته شده و استفاده از پارامترهای J_{sc} ، FF و V_{oc} بدست آمده از مشخصه‌یابی سلول‌ها، بازده سلول‌های خورشیدی پروسکایتی ساخته شده محاسبه و بررسی شد که نتایج آن در شکل ۹ آورده شده است. چنان که دیده می‌شود، با در نظر گرفتن همه پارامترهای موثر بر بازده سلول خورشیدی، استفاده از فاز گاما در سلول‌های خورشیدی ابرساختار نسبت به فاز آلفا نتایج بهتری را می‌دهد که یکی از دلایل مهم آن تخلخل بیشتر فاز گاما نسبت به آلفاست. این تخلخل به رشد بهتر بلورک‌های پروسکایت کمک می‌کند که در نتیجه آن سلول‌های ساخته شده بر پایه فاز گاما نسبت به فاز آلفا عملکرد بهتری دارند.

برای بررسی جریان اتصال کوتاه سلول‌های خورشیدی پروسکایتی ساخته شده بر پایه فازهای آلفا و گامای اکسید آلومینیوم، کمیت J_{sc} با استفاده از نمودار جریان-ولتاژ سلول-های ساخته شده که نتایج آن در شکل ۸، آورده شده است. با توجه به شکل، جریان اتصال کوتاه مربوط به سلول‌های ساخته شده با فازهای آلفا و گامای اکسید آلومینیوم بسیار نزدیک به نیز هستند ولی در این مورد هم میانگین کمیت J_{sc} سلول با فاز گاما نسبت به فاز آلفا بیشتر است که می‌تواند به دلیل مناسب بودن اندازه بلورک‌های پروسکایت بر پایه فاز گاما نسبت به فاز آلفا باشد که در نتیجه آن احتمال به دام افتادگی الکترون کمتر و جریان سلول خورشیدی بیشتر می‌شود.

بازده سلول خورشیدی (η)



شکل ۸ کمیت J_{sc} سلول‌های خورشیدی پروسکایتی ساخته شده با فازهای آلفا و گامای اکسید آلومینیوم.



شکل ۹ کمیت η سلول‌های خورشیدی پروسکایتی ساخته شده با فازهای آلفا و گامای اکسید آلومینیوم.

برداشت

Solar Cells with Graphene Electrodes", Adv. Mater. 27 (2015) 3632–3638.

[5] Chuantian Z., Henk J. B., Hongwei H., Jinsong H., David C., Liming D., "Advances in Perovskite Solar Cells", Adv. Sci. 3 (2016) 1500324.

[6] Dian W., Matthew W., Naveen K. E., Ashraf U., "Stability of perovskite solar cells", Solar Energy Materials & Solar Cells 147 (2016) 255–275.

[7] Guangda N., Xudong G., Liduo W., "Review of Recent Progress in Chemical Stability of Perovskite Solar Cells", J. Mater. Chem. A 3 (2015) 8970–8980.

[8] Jingbi Y., Lei M., Tze B. S., Tzung F. G., Yang Y., Wei H. C., Ziruo H., Huajun Ch., Huanping Zh., Qi Ch., Yongsheng L., Nicholas D. M., Yang Y., "Improved air stability of perovskite solar cells via solution-processed metal oxide transport layers", Nature Nanotechnology 11 (2016) 75–81.

[9] Michael M. L., Joël T., Tsutomu M., Takurou N. M., Henry J. S., "Efficient Hybrid Solar Cells Based on Meso-Superstructured Organometal Halide Perovskites", science 338 (2012) 643–647.

[10] Louise S., Aleksander J., Mattias E., Danielle M. L., Dong K. S., Javier G. G., Ulrich H., "Structural analysis of highly porous γ - Al_2O_3 ", Journal of Solid State Chemistry 217 (2014) 1–8.

[11] Ponja S. D., Parkin I. P., Carmalt C. J., "Synthesis and material characterization of amorphous and crystalline (α -) Al_2O_3 via aerosol assisted chemical vapour deposition", RSC Adv. 6 (2016) 102956–102960.

[12] Fangyuan J., Yaoguang R., Huawei L., Tiefeng L., Lin M., Wei M., Fei Q., Youyu J., Bangwu L., Sixing X., Jinhui T., Yun L., Zaifang L., Hongwei H., Yinhua Zh., "Synergistic Effect of PbI_2 Passivation and Chlorine Inclusion Yielding High Open-Circuit Voltage Exceeding 1.15 V in Both Mesoscopic and Inverted Planar $CH_3NH_3PbI_3(Cl)$ -Based Perovskite Solar Cells", Adv. Funct. Mater. 26 (2016) 8119–8127.

[13] Xiaojie W., Ping L., Li M., Qian Zh., Yongsheng Ch., Jingxiao L., Shi Y., "Two-dimensional modeling of TiO_2 nanowire based organic-inorganic hybrid perovskite solar cells", Solar Energy Materials & Solar Cells 152(2016)111–117.

در این پژوهش با استفاده از اکسید آلومینیوم در ساختار سلول‌های خورشیدی پروسکایتی، اثر فازی اکسید فلزی بر پارامترهای موثر بر بازده سلول خورشیدی و بلورینگی لایه پروسکایت ساخته شده به روش دومرحله‌ای بررسی شد. بلورک‌های پروسکایت تشکیل شده بر لایه اکسید آلومینیوم با فاز آلفا نسبت به فاز گاما بزرگتر هستند. سلول‌هایی که در ساختار آنها از فاز آلفای اکسید آلومینیوم استفاده شده است نسبت به سلول‌های دارای اکسید آلومینیوم با فاز گاما، ولتاژ مدار باز بیشتری دارند که به دلیل بزرگتر بودن بلورک‌های پروسکایت بر پایه فاز آلفا نسبت به فاز گاما است. جریان اتصال کوتاه سلول‌های با فاز آلفا و گامای اکسید آلومینیوم تقریباً یکسان است. در حالت کلی می‌توان گفت که با در نظر گرفتن همه پارامترهای موثر بر بازده سلول‌های خورشیدی پروسکایتی ساخته شده به روش دومرحله‌ای، استفاده از فاز گامای اکسید آلومینیوم نسبت به فاز آلفا به دلیل تخلخل بیشتری که دارند و منجر به رشد بهتر و اندازه مناسب تر بلورک‌های پروسکایت می‌شوند، در سلول‌های خورشیدی پروسکایتی نتیجه بهتری می‌دهد. همچنین برای بررسی پایداری سلول‌های خورشیدی ساخته شده، با در نظر گرفتن جداگانه پارامترهای موثر بر بازده سلول خورشیدی طی چند روز، مشخص شد که از نظر پایداری، سلول‌های خورشیدی پروسکایتی ساخته شده بر فاز-های آلفا و گاما شرایط یکسانی دارند و از این نظر تفاوتی بین این دو فاز وجود ندارد.

مراجع

[1] Qiong W., Hongjun C., Gang L., Lianzhou W., "Control of organic-inorganic halide perovskites in solid-state solar cells: a perspective", Science Bulletin 60 (2015) 405–418.

[2] Tze B. S., Qi C., Huanping Z., Chengyang J., Hsin H. W., Yang M. Y., Yongsheng L., Jingbi Y., Yang Y., "Perovskite solar cells: film formation and properties", J. Mater. Chem. A 3 (2015) 9032–9050.

[3] Elham H. A., Ahmad K., Ludmilla S., Konrad D., Taisuke M., Wolfgang T., Michael S., Antonio A., Michael G., Anders H., Juan-Pablo C. B., "Highly efficient and stable planar perovskite solar cells by solution-processed tin oxide", Energy Environ. Sci 9 (2016) 3128–3134.

[4] Peng Y., Zhike L., Qidong T., Shenghua L., Feng Y., "Efficient Semitransparent Perovskite